



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN E INGENIERÍA DE
FABRICACIÓN

TESIS DOCTORAL

INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN DE LOS PARÁMETROS
DE DOSIFICACIÓN Y FABRICACIÓN DE HORMIGÓN
RECICLADO ESTRUCTURAL SOBRE SUS PROPIEDADES
FISICAS Y MECÁNICAS

Por

Fernando López Gayarre

Presentada en cumplimiento de los requisitos para la
obtención del Grado de Doctor Ingeniero Industrial.

Directores de Tesis:

Prof. Dr. D. Pedro Serna Ros.

Prof. Dr. D. Alberto Domingo Cabo.

Prof. Dr. D. Ángel Martín Rodríguez.

Gijón, Octubre de 2008

UNIVERSIDAD DE OVIEDO

**DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN E INGENIERÍA DE
FABRICACIÓN**

TESIS DOCTORAL

**INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN DE LOS PARÁMETROS
DE DOSIFICACIÓN Y FABRICACIÓN DE HORMIGÓN
RECICLADO ESTRUCTURAL SOBRE SUS PROPIEDADES
FISICAS Y MECÁNICAS**

Doctorando: FERNANDO LÓPEZ GAYARRE

**Directores de Tesis: PEDRO SERNA ROS, ALBERTO DOMINGO
CABO Y ÁNGEL MARTÍN RODRÍGUEZ.**

Tribunal de la Tesis Doctoral.

Presidente	Dr. D. Enric Vázquez Ramonich.
Secretario	Dr. D. Francisco José Suárez Domínguez.
Vocal 1º	Dr. D. Fernando Martínez Abella.
Vocal 2º	Dra. Dña. Pilar Alaejos Gutierrez.
Vocal 3º	Dr. D. Rafael Santiago García.

*A la memoria de mis padres
A Yolanda y Diego*

AGRADECIMIENTOS

Quiero comenzar expresando mi más sincero y profundo agradecimiento a mis directores de tesis Pedro Serna, Alberto Domingo y Ángel Martín por su continuo e incondicional respaldo durante todo el tiempo en que se ha llevado a cabo este trabajo. A Ángel Martín por sus minuciosos detalles durante el proceso de corrección final de la tesis. A Alberto Domingo por introducirme, hace ya algunos años, en el estudio del hormigón reciclado, por sus consejos durante la elaboración del trabajo, por los buenos ratos que pasamos juntos y por estar siempre a mi lado y disponible para todo lo que haga falta. A Pedro Serna por su interés totalmente desinteresado en que yo llevara a buen término este trabajo, por estar siempre ahí cuando le he necesitado, incluido algún que otro fin de semana, y por sus valiosas ideas y aportaciones sin las que no hubiera sido posible culminar esta tesis.

Quiero agradecer a las empresas La Belonga Impulso Industrial Alternativo S.A, a Lafarge S.A.U., a HORAVISA y al Caleyó Nuevas Tecnologías S.A. su valiosa aportación en material y medios para conseguir desarrollar el trabajo que ahora finalizamos. No puedo dejar de mencionar a D. José Luis Oliveros, a D. Javier Lorenzo, a D. Juan Manuel Díaz y a la dirección técnica que tan buenos consejos me dio. Muchas gracias a todos. No puedo olvidarme de Julián, técnico de laboratorio siempre dispuesto, con el que compartí muchas jornadas de trabajo durante este periodo. Tampoco me olvido de Julio, Ricardo y Carlos.

A todos mis compañeros del área de Ingeniería de la Construcción de la Universidad de Oviedo por su ánimo y su apoyo durante todos estos años. Agradecer a mis compañeros Paco Blanco, José Luis García y Carlos Suárez su disposición y su colaboración a lo largo de estos años.

A los compañeros del área de la Universidad Politécnica de Valencia que desde el primer día me recibieron con los brazos abiertos, con M^a José a la cabeza de todos. Gracias Emilio por tu apoyo constante y tu inestimable colaboración durante todo este tiempo.

Quiero agradecer el apoyo absoluto de toda mi familia, de mis hermanos José Carlos y Pedro Antonio, cuñadas y cuñado, tíos, sobrinos, gracias Carlos, primos, Abel y Ana. A Miguel Ángel, Miguel, Ana y Justo que desde muy pequeños, como hermanos, siempre han estado y estarán conmigo. Quiero recordar especialmente con todo mi cariño a mis padres a los que, desafortunadamente, ya no tengo a mi lado.

No puedo finalizar sin agradecer infinitamente la paciencia, la comprensión, los ánimos, el apoyo incondicional y el amor ilimitado de mi queridísima esposa Yolanda y mi queridísimo hijo Diego. Sin ellos, este modesto trabajo no tendría para mí sentido alguno.

RESUMEN

Durante las últimas cuatro décadas nuestra sociedad viene proponiendo e impulsando, cada vez con mayor compromiso y celeridad, políticas medioambientales que tratan de reducir la continua degradación a la que se está viendo sometido nuestro planeta. Dentro de esta línea, en el año 2001, en nuestro país se puso en marcha el I Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición que finalizó en el año 2006. En la actualidad, dentro del Plan Nacional Integrado de Residuos, el II Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición fomenta y promueve el reciclaje y la valorización de dichos residuos. Este trabajo ha sido realizado dentro de este ámbito de actuaciones tratando de profundizar en los estudios llevados a cabo dentro de este campo.

A tal efecto se plantea la realización de un estudio experimental para tratar de determinar el grado de influencia de una serie de factores que, en primera instancia, pueden afectar a las propiedades del hormigón fabricado con áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición donde el propio hormigón es el componente mayoritario.

Los factores seleccionados en el estudio han sido: la calidad del árido reciclado según su origen, el porcentaje de sustitución en la dosificación del hormigón de áridos convencionales por áridos reciclados, el porcentaje de desclasificados que contienen los áridos reciclados gruesos empleados, el tipo de granulometría utilizada en la dosificación del hormigón, el criterio empleado en la sustitución de los áridos convencionales por áridos reciclados, la resistencia característica del hormigón a compresión y la consistencia que pretendemos obtener en la mezcla.

Se estudiarán las variaciones de dichos factores sobre algunas de las características más relevantes del hormigón así fabricado. La densidad, la absorción, la cantidad de aire ocluido, la resistencia a compresión, el módulo de elasticidad, la resistencia a tracción y la permeabilidad al agua serán las propiedades ensayadas.

Para definir el programa de ensayos se ha realizado un diseño del experimento altamente fraccionado tomando como base el "orthogonal array L27" diseñado por Taguchi con el fin de compatibilizar la fiabilidad de las conclusiones con un volumen de ensayos viable.

Tras caracterizar los materiales empleados se ha establecido un procedimiento de dosificación y ensayo que permite fabricar hormigones en el que los distintos factores analizados se reproducen de acuerdo con el diseño del experimento adoptado.

Para dar más robustez a los resultados y ampliar el estudio a otras propiedades se ha replicado el experimento en algunas de ellas. El estudio de los resultados experimentales se lleva a cabo mediante los correspondientes análisis de varianza, que determinan las diferencias más significativas existentes en las propiedades del hormigón reciclado estudiadas, debidas a la variación en los niveles fijados para los factores considerados, respecto al hormigón convencional.

Finalmente se extraen conclusiones relativas al empleo de hormigón fabricado con áridos reciclados con fines estructurales y se sugieren futuras líneas de trabajo que nos ayuden a comprender mejor este campo.

ABSTRACT

During the last four decades our society has been proposing and pushing, each time with greater commitment and speed, environmental policies that seek to reduce the continued degradation to which it is being subjected our planet. Within this line, in the year 2001, our country launched the National Waste Plan I of Construction and Demolition ended in 2006. At present, under the National Integrated Waste, the National Waste Plan II of Construction and Demolition encourages and promotes recycling and recovery of such waste. This work has been carried out within this area of actions trying to deepen the studies in this field.

For this purpose is conducting a pilot study to try to determine the degree of influence on a number of factors that in the first instance, can affect the properties of concrete made with recycled aggregates from construction and demolition wastes where Concrete itself is the majority component.

The factors identified in the study were: the quality of recycled aggregate according to their origin, the rate of substitution in the strength of concrete aggregates by conventional recycled aggregate, the percentage of declassified containing recycled coarse aggregates used, the type of particle size the dosage used in the concrete, the criterion used in the replacement of conventional dry recycled aggregates, resistance to compression characteristic of the concrete and consistency that we intend to get into the mix.

We will study variations of these factors on some of the most important characteristics of the concrete and manufactured. The density, absorption, the amount of air occluded, the resistance to compression, the elasticity, tensile strength and resistance to water permeability properties will be tested.

To define the test program was conducted a design of the experiment highly fractionated based on the "orthogonal array L27" designed by Taguchi in order to make the reliability of the findings with a volume of essays viable.

Having characterized the materials used has been an dose procedure that allows the manufacture and testing concrete in which individual factors are analyzed according to the design of the experiment taken.

To give more robustness to the results and expand the study to other properties has replicated the experiment in some of them. The study of the experimental results is carried out

through the appropriate analysis of variance, which determine the most significant differences in the properties of recycled concrete studied, due to variations in the levels for the factors considered, with respect to conventional concrete.

Finally, conclusions are drawn regarding the use of concrete made with recycled aggregates for structural and suggest future directions, which will help us better understand this field.

INDICE

Agradecimientos	I
Resumen	III
Abstract	V
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1 GENERALIDADES.	1
1.2 OBJETIVOS.	5
CAPÍTULO II. ESTADO DEL ARTE	7
2.1 INTRODUCCIÓN.	7
2.2 PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE ÁRIDOS RECICLADOS.	14
2.2.1 Demolición selectiva.	14
2.2.2 Etapas del proceso de producción de áridos reciclados.	15
2.2.3 Plantas de producción de áridos reciclados.	17
2.2.4 Otros tratamientos.	20
2.3 CARACTERÍSTICAS DEL ÁRIDO RECICLADO.	22
2.3.1 Mortero adherido.	22
2.3.2 Granulometría.	23
2.3.3 Forma y textura superficial.	26
2.3.4 Densidad.	26
2.3.5 Absorción.	29
2.3.6 Resistencia a la fragmentación.	32
2.3.7 Resistencia a la helada.	33
2.3.8 Contenido de cloruros.	35
2.3.9 Contenido de sulfatos.	36
2.3.10 Reacción álcali-árido.	37

2.3.11 Contaminantes e impurezas.	38
2.3.12 Distintas normativas sobre áridos reciclados.	40
2.3.12.1 <i>Estado actual en USA.</i>	40
2.3.12.2 <i>Estado actual en Japón.</i>	41
2.3.12.3 <i>Estado actual en Australia.</i>	42
2.3.12.4 <i>Estado actual en la Comunidad Europea.</i>	43
2.3.12.5 <i>Estado actual en España.</i>	44
2.4 DOSIFICACIÓN DEL HORMIGÓN RECICLADO.	47
2.4.1 Contenido de agua.	48
2.4.2 Contenido de cemento.	48
2.4.3 Relación agua-cemento.	49
2.4.4 Relación árido fino-árido grueso.	50
2.4.5 Adiciones.	50
2.5 PROPIEDADES DEL HORMIGÓN RECICLADO FRESCO.	50
2.5.1 Consistencia.	50
2.5.2 Densidad.	53
2.5.3 Aire ocluido.	53
2.5.4 Exudación.	54
2.6 PROPIEDADES DEL HORMIGÓN RECICLADO ENDURECIDO.	54
2.6.1 Densidad.	54
2.6.2 Resistencia a compresión.	54
2.6.3 Módulo de elasticidad.	61
2.6.4 Resistencia a tracción.	66
2.6.5 Resistencia a flexotracción.	67

2.6.6 Resistencia a cortante.	68
2.6.7 Retracción por secado.	69
2.6.8 Fluencia.	72
2.7 DURABILIDAD DEL HORMIGÓN RECICLADO.	73
2.7.1 Porosidad, absorción y permeabilidad.	73
2.7.2 Resistencia a la helada.	73
2.7.3 Carbonatación.	76
2.7.4 Resistencia a los sulfatos.	76
2.7.5 Penetración de cloruros.	77
2.7.6 Reacción álcali-árido.	78
2.8 CONCLUSIONES DEL ESTADO DEL ARTE.	79
CAPÍTULO III MATERIALES, METODOLOGÍA, CRITERIOS DE ENSAYO Y PROCEDIMIENTOS	83
3.1 INTRODUCCIÓN.	83
3.2 MATERIALES.	84
3.2.1 Cementos.	84
3.2.2 Áridos naturales.	86
3.2.3 Áridos reciclados.	88
3.2.4 Aditivos.	91
3.3 ENSAYOS REALIZADOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES.	93
3.3.1 Resistencia mecánica de los cementos.	93
3.3.2 Determinación de la granulometría de los áridos.	93
3.3.3 Determinación de la densidad y la absorción de los áridos.	94
3.3.4 Determinación de la humedad de los áridos.	96
3.3.5 Otros ensayos de caracterización de los áridos.	96

3.4 PROCEDIMIENTO SEGUIDO PARA MEZCLAR LOS ÁRIDOS RECICLADOS, SEGÚN SU CURVA GRANULOMÉTRICA, PARA SER UTILIZADOS EN LA FABRICACIÓN DE HORMIGÓN RECICLADO.	97
3.5 PROCEDIMIENTO SEGUIDO PARA LA FABRICACIÓN DE HORMIGÓN RECICLADO.	98
3.5.1 Almacenamiento de las materias primas.	98
3.5.2 Proceso de fabricación del hormigón reciclado.	99
3.6 ENSAYOS REALIZADOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGÓN RECICLADO.	101
3.6.1 Determinación de la consistencia del hormigón reciclado.	101
3.6.2 Determinación del aire ocluido en el hormigón reciclado.	102
3.6.3 Fabricación, curado y preparación de probetas.	103
3.6.4 Determinación de la densidad del hormigón reciclado endurecido.	105
3.6.5 Determinación de la absorción del hormigón reciclado.	105
3.6.6 Determinación de la resistencia a compresión del hormigón reciclado.	107
3.6.7 Determinación del módulo de elasticidad del hormigón reciclado.	108
3.6.8 Determinación de la penetración de agua bajo presión del hormigón reciclado.	111
3.6.9 Determinación de la resistencia a tracción del hormigón reciclado.	112
CAPÍTULO IV. PROGRAMA EXPERIMENTAL DESARROLLADO	115
4.1 INTRODUCCIÓN.	115
4.2 SELECCIÓN DE VARIABLES Y NIVELES.	116
4.3 DISEÑO ESTADÍSTICO DEL EXPERIMENTO.	119
4.4 DOSIFICACIÓN DEL HORMIGÓN.	122
4.4.1 Criterios de sustitución del árido convencional por árido reciclado.	127

4.4.2 Criterio para obtener el contenido de desclasificados.	131
4.4.3 Empleo de los aditivos.	131
4.4.4 Ejemplos.	132
4.5 PROGRAMA DE ENSAYOS.	135
4.6 ENSAYOS PREVIOS Y AJUSTE DE LAS DOSIFICACIONES.	136
CAPÍTULO V.- ANÁLISIS DE RESULTADOS	139
5.1 INTRODUCCIÓN.	139
5.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES.	140
5.2.1 Análisis de varianza e interpretación de los resultados obtenidos sobre la densidad.	144
5.2.2 Análisis de varianza e interpretación de los resultados obtenidos sobre la absorción.	156
5.2.3 Análisis de varianza e interpretación de los resultados obtenidos sobre el aire ocluido.	164
5.2.4 Análisis de varianza e interpretación de los resultados obtenidos sobre la resistencia a compresión.	169
5.2.5 Análisis de varianza e interpretación de los resultados obtenidos sobre el módulo de elasticidad.	179
5.2.6 Análisis de varianza e interpretación de los resultados obtenidos sobre la resistencia a tracción.	184
5.2.7 Análisis de varianza e interpretación de los resultados obtenidos sobre la permeabilidad al agua.	194
CAPÍTULO VI.- CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	201
6.1 CONCLUSIONES.	201
6.2 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.	206
CAPÍTULO VII.- BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.-	209

ANEJO 1. DISEÑO EXPERIMENTACIÓN. ROBUSTEZ	227
ANEJO 2. DOSIFICACIÓN DEL HORMIGÓN. HOJA DE CÁLCULO	247
ANEJO 3. AJUSTES DE ÁRIDOS. GRÁFICOS	255
ANEJO 4. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS	271
LISTA DE TABLAS	303
LISTA DE FIGURAS	307

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. GENERALIDADES.-

La utilización masiva de los recursos naturales por el hombre para su propio provecho ha sido una constante a través de los tiempos, colaborando de manera inconsciente en la degradación paulatina de su entorno y en el progresivo deterioro del medio natural en el que desarrolla sus actividades.

A partir del comentario anterior parece obvia la necesidad de establecer políticas encaminadas al mejor aprovechamiento de dichos recursos y a su reutilización, en los casos en que sea posible, en los mismos usos o en otros distintos de aquellos para los que inicialmente fueron concebidos.

La generación de Residuos de Construcción y Demoliciones (RCDs) va estrechamente ligada a la actividad constructiva, aunque en la mayoría de los casos el volumen de los mismos se produce como consecuencia de derribos de edificaciones e infraestructuras que agotaron su vida útil o quedaron obsoletas.

La mayor parte de estos residuos se depositan en vertederos, con frecuencia incontrolados, provocando un considerable impacto visual debido a la gran cantidad de espacio que ocupan y al escaso control ambiental de los terrenos en que se depositan. Su importante volumen hace que su gestión, valorización y reciclaje sea un una tarea de creciente interés.

Los Residuos de Construcción y Demoliciones (RCDs) son de naturaleza fundamentalmente inerte disponiendo, por lo tanto, de un poder contaminante relativamente bajo. Pueden tener su origen en el desarrollo de grandes obras de infraestructura o en actividades como la demolición, las reformas, las rehabilitaciones o la implantación de servicios. Por lo general proceden de derribos de edificios e infraestructuras o el rechazo de materiales en obras de nueva construcción, reparación, remodelación y rehabilitación, incluyendo las obras menores y de reparación domiciliaria.

Dichos residuos incorporan fundamentalmente hormigón, ladrillos, tejas, materiales cerámicos, madera, vidrio, plástico, mezclas bituminosas, metales, piedras, tierras, yeso, papel y otros residuos procedentes de la construcción y de las demoliciones^[91]. Todos ellos aparecen codificados en el capítulo 17 de la Lista Europea de Residuos^[73]. La composición media de los RCDs, según el I Plan Nacional de Construcción y Demolición (2001-2006) a partir de los datos procedentes de un estudio de composición realizado por la Comunidad Autónoma de Madrid, puede observarse en la **figura 1.1**.

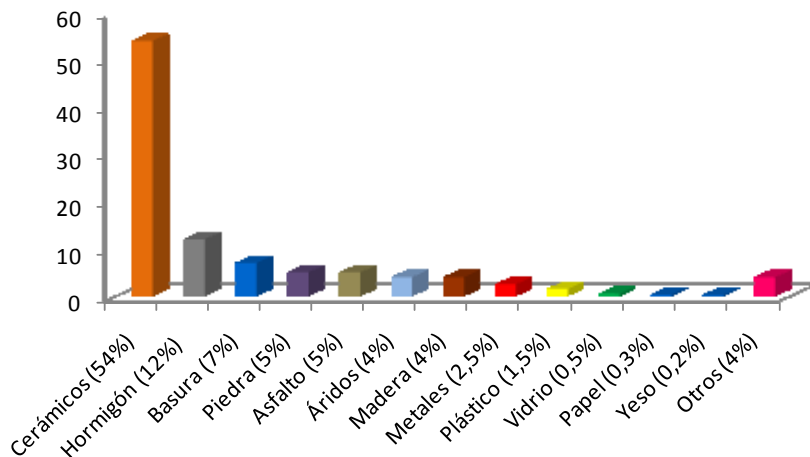


Figura 1.1 Composición media de los RCDs.

En La Comunidad Europea la gestión de los RCDs se lleva a cabo de manera desigual, ya que si bien hay países en los que se recicla un porcentaje importante de los residuos generados, caso de los Países Bajos, en otras naciones el porcentaje reciclado es mínimo. La escasez de áridos, el incremento de las penalizaciones por vertido e incluso su prohibición, son causas que favorecen, sin duda alguna, el reciclado.

En países como Holanda, Bélgica o Dinamarca se alcanzan porcentajes de reciclado por encima del 75%. En otros países como Gran Bretaña o Austria dicha tendencia se mantiene aunque con porcentajes entorno al 40%^[120].

Sin embargo existen todavía bastantes países dentro de la Comunidad Europea con porcentajes de reciclado muy bajos. En España el porcentaje de reciclaje se aproxima al 15%, según los datos proporcionados por el Gremio de Entidades del Reciclaje y Derrivos GERD, aunque menos de un tercio del material reciclado se comercializa como producto reciclado (áridos para bases y subbases, drenajes, arenas y gravas, explanadas y suelos). La mayor parte se destina a rellenos o a restauración de espacios degradados (entre los que se contabiliza la restauración de canteras). Las instalaciones de reciclaje autorizadas produjeron y comercializaron, según la misma fuente, 5 millones de toneladas de áridos reciclados durante el año 2007. En la **tabla 1.1** pueden observarse algunos datos estadísticos europeos, procedentes de diversas fuentes, correspondientes a la gestión de RCDs^[120].

El reciclado de materiales procedentes de RCDs es cada vez más frecuente dentro del ámbito de la construcción presentando dicha actividad unas interesantes expectativas de crecimiento. El impulso de estas actividades depende, en gran manera, de la capacidad que presenten para superar los obstáculos derivados del bajo precio de los áridos naturales y los gravámenes correspondientes a los depósitos en vertederos. Sin duda, se verán favorecidas por la legislación medioambiental, cada vez más restrictiva.

Ante esta situación el Ministerio de Medio Ambiente lanzó en el año 2001 el I Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición^[81] que finalizó al terminar el año 2006. Sus objetivos, en algunos aspectos muy ambiciosos, fueron cumplidos parcialmente. Cabe destacar el aumento del porcentaje de reciclado y el número de plantas fijas y móviles a largo de toda la geografía nacional.

En el año 2007 entró en vigor el Plan Nacional Integrado de Residuos^[82] que finalizará en el año 2015. Dentro del mismo se desarrolla el II Plan Nacional de Residuos de Construcción

Aún disponiendo de estas recomendaciones, existen aspectos relativos a las propiedades de estos hormigones, sobre todo cuando las sustituciones de áridos reciclados son elevadas, que no permiten ser concluyentes al respecto.

Después de las consideraciones realizadas se observa la necesidad de seguir realizando estudios experimentales que permitan profundizar en el conocimiento de este nuevo material y en sus aplicaciones.

1.2. OBJETIVOS.-

Los comienzos del presente trabajo tienen su origen en la idea de introducir el estudio del hormigón reciclado en el Departamento de Construcción e Ingeniería de Fabricación de la Universidad de Oviedo, tratando de abrir una nueva línea de investigación en esta materia, así como en los trabajos del proyecto RECHNOR (Estudio experimental prenormativo sobre la utilización de los RCDs en hormigón reciclado de aplicación estructural) llevados a cabo en colaboración con el área de Ingeniería de la Construcción de la Universidad Politécnica de Valencia. A este respecto los objetivos de esta tesis doctoral son los siguientes:

Llevar a cabo un profundo estudio bibliográfico y actualizar el estado del conocimiento de los hormigones fabricados con áridos reciclados procedentes de residuos de hormigón.

Definir una serie de parámetros que potencialmente puedan influir en algunas de las propiedades más relevantes del hormigón reciclado para tratar de establecer la mayor o menor dependencia de ellos. Se incluirán algunos que no han sido frecuentemente analizados con anterioridad.

Utilizar métodos estadísticos suficientemente robustos para la definición de un programa de ensayos de manera que el análisis de los resultados obtenidos en la experimentación sea concluyente. Entre los factores a considerar se incluyen:

1. El tipo de árido reciclado utilizado según su procedencia.
2. El tipo de granulometría utilizada.
3. El porcentaje de sustitución de árido grueso convencional por árido grueso reciclado.

4. El contenido en desclasificados del árido grueso reciclado utilizado.
5. El criterio de sustitución del árido grueso convencional por árido grueso reciclado utilizado.
6. La resistencia objetivo a compresión del hormigón.
7. La consistencia objetivo del hormigón.

Se analizará la posible influencia ejercida por la calidad del árido reciclado empleado sobre las propiedades del hormigón reciclado.

Se analizará la influencia del porcentaje de sustitución del árido grueso reciclado empleado sobre las propiedades del hormigón reciclado.

Se analizará la influencia del tipo de granulometría de los áridos empleados, convencionales y reciclados, sobre las propiedades del hormigón reciclado.

Se analizará la influencia que puede ejercer el diferente criterio de sustitución utilizado para reemplazar los áridos gruesos convencionales por los áridos gruesos reciclados sobre las propiedades del hormigón reciclado.

Se analizará la influencia que ejerce el porcentaje de desclasificados del árido reciclado empleado sobre las propiedades del hormigón reciclado.

Se analizará la influencia de la resistencia característica objetivo a compresión sobre las propiedades del hormigón reciclado.

Se analizará la influencia de la consistencia objetivo sobre las propiedades del hormigón reciclado.

Para el desarrollo de este estudio se plantearán unos procedimientos de dosificación y fabricación del hormigón y una metodología de ensayos que permita analizar los efectos de los distintos parámetros con garantías para detectar las influencia que ejercen sobre las propiedades ensayadas.

CAPÍTULO II

ESTADO DEL ARTE

2.1 INTRODUCCIÓN.-

Se entiende por árido reciclado aquel que resulta del tratamiento de material inorgánico previamente utilizado en la construcción^[144]. Según el origen de los residuos pueden distinguirse áridos reciclados procedentes de hormigón, áridos reciclados procedentes de residuos cerámicos y áridos reciclados mixtos siendo estos últimos los obtenidos a partir de residuos de distinta naturaleza.

El único árido reciclado factible de utilizarse en la fabricación de hormigón estructural, según el anejo 15 de la EHE-08, es el procedente de residuos de hormigón. Con la finalidad de que las impurezas no presenten efectos negativos sobre la resistencia y la durabilidad del mismo se deberán limitar ciertas propiedades. Los áridos reciclados procedentes de hormigón, con tamaño superior a 4 mm son, por lo general, apropiados para fabricar hormigón siempre y cuando cumplan las especificaciones correspondientes a la aplicación concreta en la que vayan a ser empleados. De ahora en adelante, para referirnos al árido reciclado procedente de hormigón, utilizaremos la denominación simple *árido reciclado*.

Se denomina hormigón reciclado al que se fabrica con árido reciclado o con mezcla de árido reciclado y árido natural. En la mayoría de los estudios consultados se ha determinado la influencia negativa sobre las propiedades del hormigón como consecuencia de la utilización de la fracción fina del árido reciclado. Por esta razón la mayoría de ellos se centra en la sustitución de un porcentaje determinado del árido grueso natural por árido reciclado. Por lo general se establece una comparación entre el hormigón fabricado con árido reciclado y un hormigón de control fabricado con la misma dosificación pero empleando árido natural.

El empleo de áridos reciclados en la fabricación de hormigón afecta a las propiedades del mismo. Los resultados obtenidos en su empleo para la fabricación de hormigón presentan diferencias como consecuencia de la heterogeneidad que presentan los distintos áridos reciclados con los que se fabrican.

En la actualidad pocos países disponen de normativa para el empleo de áridos reciclados en hormigón estructural. En ellas pueden observarse distintas tendencias en lo que al contenido máximo de árido reciclado, a la calidad exigida al mismo o a las limitaciones en cuanto a su utilización se refieren^[7,18,49,61,108,113,150]. La nueva instrucción EHE-08, publicada recientemente en nuestro país, incorpora en el anejo 15 las especificaciones donde se regula la utilización de hormigones reciclados. Los estudios llevados a cabo en España con hormigón reciclado se han realizado principalmente en la Universidad Politécnica de Cataluña, en la Universidad Politécnica de Madrid, en la Universidad de La Coruña, en la Universidad de Cantabria, en la Universidad Politécnica de Valencia y en el Centro de Experimentación y Obras Públicas (CEDEX). Los relación de estudios llevados a cabo hasta la fecha y sus principales aspectos quedan resumidos en la **tabla 2.1**.

Los trabajos reseñados coinciden en señalar la absorción junto al mortero adherido como las propiedades más relevantes que afectan en mayor medida a la producción y a las características del hormigón reciclado.

Dichos trabajos coinciden básicamente en señalar el 20% como el límite del porcentaje de sustitución del árido grueso natural por árido reciclado sin que se vean afectadas las características del hormigón endurecido. A partir de dicho límite se observa un descenso en los valores de estas características, haciéndose más notable al aumentar el porcentaje de sustitución. La disminución de las propiedades mecánicas, según aumenta el porcentaje de sustitución, se hace más evidente en el módulo de elasticidad del hormigón reciclado.

TRABAJO	RESULTADOS OBTENIDOS
<p>Estudio de la durabilidad del hormigón con árido reciclado en su aplicación como hormigón armado. Tesis doctoral (1996).^[9]</p> <p>Autor: Marilda Barra.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - La utilización de áridos reciclados procedentes mayoritariamente de hormigón puede quedar limitada frente a los convencionales debido a la mayor absorción que presentan. - El consumo de cemento para mantener la resistencia a compresión, respecto a un hormigón dosificado con áridos convencionales, aumenta. Dicho aumento oscila entre un 7,2% para resistencias a compresión más bajas y un 17,3% para las más altas. - La mayor porosidad del árido reciclado influye negativamente en la carbonatación del hormigón. - El módulo elástico en los hormigones reciclados estudiados es un 20% inferior a los de control. - La presencia de ladrillo en cantidad controlada favorece la resistencia hielo-deshielo del hormigón y no influye negativamente en la resistencia a compresión hasta un límite del 40%. - Establece un nuevo procedimiento para determinar la cantidad de mortero adherido del árido reciclado.
<p>Caracterización de residuos de construcción y demoliciones de la Comunidad de Madrid como áridos reciclados para la fabricación de hormigones. Tesis doctoral (2001).^[95]</p> <p>Autor: José Luis Parra Alfaro.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - La combinación de restos de hormigón y ladrillo como material reciclado alcanzó, con resultados aceptables, el 40% de este último material. - Es conveniente, para la obtención de buenos resultados en los hormigones reciclados, no superar sustituciones del árido grueso del 50%. - Debido a los elevados valores de la absorción de agua se sugiere la saturación previa a la preparación del hormigón para garantizar su trabajabilidad. - La resistencia a compresión en los hormigones reciclados ensayados es equiparable a la de los convencionales con sustituciones de hasta el 60% del árido grueso con un 20% de residuos procedentes de ladrillo. - La penetración de agua es similar a la de los hormigones convencionales.

Tabla 2.1: Estudios sobre áridos reciclados llevados a cabo en España.

TRABAJO	RESULTADOS OBTENIDOS
<p>Comportamiento tenso-deformación, instantáneo y diferido de hormigón con árido reciclado. Tesis doctoral (2002).^[30]</p> <p>Autor: José Manuel Gómez Soberón.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Alguna propiedad de los áridos reciclados procedentes de hormigón no cumple alguna de las prescripciones correspondientes a los áridos naturales aunque pueden emplearse en la fabricación de hormigón. - Las propiedades de los áridos reciclados que más control necesitan por su mayor diferencia respecto de las de los áridos naturales son la densidad, la absorción y la porosidad. - Desde el punto de vista de las tensiones y deformaciones el hormigón reciclado tiene que ser considerado como un sistema compuesto por cuatro componentes: mortero nuevo, mortero de material reciclado, mortero enlazado con áridos y áridos naturales. Sus propiedades físicas y mecánicas dependerán de las de dichos componentes, de su mecanismo de interacción y de sus fracciones de volumen. - Los hormigones reciclados pueden llegar a incrementar su volumen de vacío inversamente proporcional a su tamaño de poro. El origen del incremento de dicha porosidad radica en el mortero adherido al árido.
<p>Hormigones con áridos reciclados procedentes de demoliciones: dosificaciones, propiedades mecánicas y comportamiento estructural a cortante. Tesis doctoral (2002).^[35]</p> <p>Autor: Belén González Fonteboa.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - La absorción en los áridos reciclados empleados presenta valores superiores a los convencionales. La densidad de los mismos es inferior en un 10%. - Sustituciones del árido grueso por árido grueso reciclado proporcionan hormigones reciclados estructurales adecuados. - Para conseguir la trabajabilidad adecuada en los hormigones reciclados estudiados se aumenta la cantidad de agua por lo que para mantener la misma relación a/c aumenta el consumo de cemento. - Los hormigones reciclados con adición de humo de sílice experimentaron valores más altos en la resistencia a compresión. - El módulo de elasticidad disminuye en los hormigones reciclados. - La absorción en los hormigones con áridos reciclados es superior a la del hormigón convencional. No se observan mejoras con la adición del humo de sílice.

Tabla 2.1: Estudios sobre áridos reciclados llevados a cabo en España (continuación).

TRABAJO	RESULTADOS OBTENIDOS
<p>Diseño de nuevos materiales procedentes del reciclaje de escombros de construcción y demolición. RUE (residuos urbanos de edificación) y RAHA (residuos de aglomerados hidráulicos y asfálticos). Tesis doctoral (2003).^[29] Autor: Francisco Gilbert.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Debido a los altos niveles de la absorción que presentan los áridos reciclados empleados recomiendan una saturación previa sumergiéndolos entre 10 y 15 minutos en agua para garantizar la trabajabilidad. - Dosificaciones del 65% de árido grueso reciclado, procedente de residuos urbanos de edificación, y del 35% de árido fino natural permiten la elaboración de hormigón magro vibrado y pobre. - El empleo de residuos de aglomerados hidráulicos y asfálticos en rellenos, subbases y bases de firmes proporciona resultados excelentes. - Las proporciones de residuos de aglomerados hidráulicos y asfálticos más adecuadas son del 20-60% de residuos de mezclas asfálticas y del 80-40% de residuos de pavimentos de hormigón.
<p>Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural. Tesis doctoral (2004).^[116] Autor: Marta Sánchez de Juan.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - La calidad del árido reciclado depende de la cantidad de mortero adherido y en menor medida de la resistencia del hormigón original. - La utilización de árido reciclado debe restringirse a la fracción gruesa. - La dosificación del hormigón se realiza de manera similar a la de un hormigón convencional - Un porcentaje máximo del 20% de sustitución del árido grueso por árido reciclado grueso no provoca caídas en los valores de la resistencia a compresión del hormigón. - Establece el 7% como límite de la absorción para los áridos reciclados para cumplir las prescripciones de nuestra Instrucción. - Establece coeficientes correctores para la resistencia a compresión del hormigón cuando la sustitución del árido reciclado alcanza valores del 50% y del 100%. Dichos coeficientes son 0,90 y 0,85 respectivamente.

Tabla 2.1: Estudios sobre áridos reciclados llevados a cabo en España (continuación).

TRABAJO	RESULTADOS OBTENIDOS
<p>Estudio experimental prenormativo sobre la utilización de los residuos de construcción y demoliciones en hormigón reciclado de aplicación estructural. (2005-2007)*</p> <p>Coordinadora: Pilar Alaejos Gutiérrez.</p> <p>* Los resultados de dicho proyecto están pendientes de publicación por parte de los diversos grupos de trabajo participantes por lo que solo se presentan algunas consideraciones generales relativas al mismo.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Trata de definir las condiciones que debe reunir el árido reciclado para su empleo en hormigón estructural. - Trata de establecer procedimientos de diseño, cálculo y ejecución de estructuras de hormigón con áridos reciclados. - La utilización de áridos reciclado saturados en la fabricación del favorece la trabajabilidad del hormigón. - La utilización de áridos saturados provoca ligeros descensos de la resistencia a compresión del hormigón mientras que si se utilizan áridos reciclados secos la resistencia a compresión del hormigón mejora. - Se observaron descensos en el valor del módulo de elasticidad en los hormigones reciclados. Dicha disminución se incrementa a medida que aumenta el porcentaje de sustitución del árido reciclado. - La deformación a carga constante es más evidente al aumentar el porcentaje de sustitución. - Las deformaciones están por debajo de las estimadas por diferentes modelos cuando el porcentaje de sustitución es del 20%. Cuando el porcentaje de sustitución del 50% o del 100% las deformaciones se aproximan a las previstas por el código modelo. - La durabilidad tiende a reducirse proporcionalmente al porcentaje de sustitución del árido reciclado cuando se sobrepasa el 20% de sustitución

Tabla 2.1: Estudios sobre áridos reciclados llevados a cabo en España (continuación).

TRABAJO	RESULTADOS OBTENIDOS
<p>Estudio sobre los residuos de construcción y demolición en Galicia: método de estimación de la producción anual y usos posibles para su reciclaje (2006).^[77]</p> <p>Autora. Isabel Martínez Lage</p>	<p>Se diseñó un método general para estimar la generación y composición en residuos de construcción y demolición aplicable a cualquier ámbito territorial.</p> <p>Se estudio la viabilidad del uso de áridos reciclados mixtos en la fabricación de suelo cemento.</p> <p>Debido a la mayor absorción de los áridos reciclados la humedad óptima del suelo cemento fabricado con áridos reciclados es mucho mayor que la del fabricado con áridos convencionales.</p> <p>Al añadir la fracción 5/20 mm saturada con superficie seca y mantener constante la cantidad, la resistencia a compresión de las probetas de suelo cemento aumenta con respecto a la que tienen si no se satura dicha fracción.</p> <p>La trabajabilidad del suelo cemento aumenta cuando se fabrica con la fracción 5/20 mm saturada.</p> <p>La resistencia a compresión del suelo cemento disminuye al aumentar el plazo entre el amasado y el compactado independientemente de saturar o no la fracción 5/20 mm.</p>
<p>Proyecto para la elaboración de la Guía Española de áridos Reciclados (2008-2010).</p> <p>Coordinador científico: E. Vázquez</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Este proyecto se encuentra en la fase inicial y pretende normalizar los productos reciclados de RCD y sus usos en la obra pública y privada. - Se elaborará una guía con las prescripciones técnicas exigibles a las principales aplicaciones de áridos procedentes de residuos de construcción y demoliciones. - Se realizará un estudio técnico y estadístico para caracterizar los productos obtenidos procedentes de áridos reciclados así como sus posibles aplicaciones. - Se realizará un estudio científico de análisis de impacto ambiental de los áridos reciclados. Se definirán métodos e indicadores de control de calidad ambiental. - Se realizarán estudios de aplicación experimental para analizar el comportamiento de los áridos reciclados en obra.

Tabla 2.1: Estudios sobre áridos reciclados llevados a cabo en España (continuación).

Algunos de los trabajos se centran en otras posibles aplicaciones de los áridos reciclados como el suelo cemento o la fabricación de hormigones magros vibrados destacando, una vez más, la absorción como la propiedad de los áridos reciclados que más negativamente influye en este tipo de aplicaciones.

2.2 PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE ÁRIDOS REICLADOS.-

La producción de áridos reciclados procedentes de residuos de hormigón se realiza de forma similar al proceso que se emplea para producir áridos naturales machacados. Las plantas que se emplean con dicha finalidad incorporan varios tipos de trituradoras, tamizadoras y equipos para eliminar los residuos no deseados. Si los residuos son seleccionados adecuadamente en origen, los sistemas de eliminación de materiales no deseados se ven reducidos sensiblemente. Las plantas de producción de áridos reciclados pueden clasificarse, en función de su capacidad de transporte, en plantas fijas y plantas móviles presentando las primeras una capacidad de producción sustancialmente mayor^[4]. En España, según datos facilitados por el GERD correspondientes al año 2007, el número de plantas fijas o semifijas de reciclado de RCDs completamente legalizadas se estima en 135, aunque dicho número puede llegar a 200 si a estas se suman las instalaciones que aún no cuentan con la totalidad de los permisos preceptivos para un desarrollo normal de sus actividades.

2.2.1 DEMOLICIÓN SELECTIVA.-

Se lleva a cabo con el fin de separar y prevenir la mezcla de materiales perjudiciales como madera, cartón, plásticos, etc, de los áridos reciclados que se desean obtener. Los escombros procedentes de obras de ingeniería civil presentan una baja contaminación pero, al proceder la mayoría de los RCDs de estructuras de edificación, si la demolición no se realiza de forma selectiva, el proceso de separación y selección ha de realizarse, posteriormente, en la planta de reciclaje con el consiguiente aumento de costes. Es indudable que el proceso de demolición selectiva resultará más caro que la demolición tradicional pero puede compensarse en parte al reducirse los costes de transporte y las tasas de vertido. No obstante presenta algunas ventajas como la reutilización directa de diversos materiales o destinar al vertido una masa que representa el 65 de la demolición total^[4]. El proceso de demolición selectiva se lleva a cabo

desmantelando en primera instancia las molduras y sacando los desechos, a continuación se desmantela la carpintería de taller (puertas, ventanas, etc), la cubierta y las instalaciones (agua, saneamiento, electricidad, gas, etc). Posteriormente se demuele la tabiquería y, por último, se procede a la demolición de la estructura.

2.2.2 ETAPAS DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE ÁRIDOS RECICLADOS.-

El proceso de producción de áridos reciclados varía de unas plantas productoras a otras, según las necesidades y el destino final del producto obtenido. En la **figura 2.1** puede observarse un esquema simplificado de dicho proceso. De forma resumida puede describirse a través de las siguientes operaciones^[4]:

1.- Los RCDs llegan a la planta mezclados en un contenedor descargándose en el suelo. Mediante grúa se extraen las piezas mayores de madera, de acero, paredes aislantes y otros metales. Los bloques mayores de hormigón se reducen con un martillo hasta conseguir el tamaño adecuado.

2.- Antes de triturar y clasificar el material se realiza un precribado del mismo con el fin de realizar un control de tamaño separando los más pequeños, para aprovecharlos directamente, de aquellos cuyo tamaño es mayor. Dicho sistema consta de una criba de tamaño normal 160 mm dispuesta en serie con otras cuyos tamaños habituales son 80 mm y 40 mm. Los rechazos en las dos primeras alimentan el molino primario.

3.- La trituración primaria consta, por lo general, en las plantas fijas de un molino de impactos, un separador magnético, cabina de triaje, cribas y cintas transportadoras.

4.- Un pala cargadora realiza el transporte de los residuos de hormigón desde el acopio hasta la cinta de alimentación del molino primario. Dicho molino rompe los bloques a través de la acción de pantallas solidarias al bastidor de trituración mediante esfuerzos de compresión y cizalladura. Admite tamaños hasta de 500 mm. Como molino primario también puede disponerse una machacadora de mandíbulas.

5.- El separador magnético, situado a la salida del molino, separa los elementos metálicos que puedan haber quedado mezclados con el hormigón. Un separador neumático permitiría eliminar los materiales de baja densidad.

6.- El material resultante pasa a una cabina de triaje donde, de manera manual, se eliminan los restos de plásticos, maderas, o metales no detectados en el separador magnético.

7.- El árido reciclado se introduce en una tolva con una criba de corte de 40 mm a través de una cinta transportadora. Todo lo que pasa se transporta a otras cribas dispuestas en serie y con luces de malla correspondientes a los cortes de la grava, la gravilla y la arena formando los diferentes acopios. Lo que queda retenido pasa a la trituración secundaria.

8.- En la trituración secundaria se reduce el tamaño del material utilizando otro molino de impactos hasta obtener la granulometría adecuada.

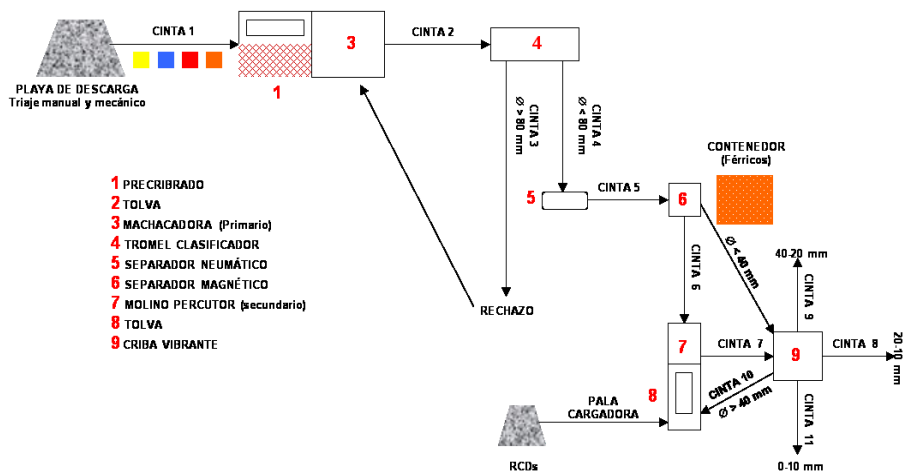


Figura 2.1 Proceso de producción de RCDs.

2.2.3 PLANTAS DE PRODUCCIÓN DE ÁRIDOS RECICLADOS.-

Las plantas de producción de áridos reciclados pueden clasificarse en función de su movilidad en fijas, semifijas y móviles. Atendiendo a los sistemas de procesado y la tecnología que incorporan se clasifican en plantas de 1ª, 2ª y 3ª generación^[1].

Las plantas de 1ª generación no incorporan mecanismos para la eliminación de sustancias contaminantes, excepto separadores magnéticos.

Las plantas de 2ª generación incorporan, previo al machaqueo, sistemas manuales o mecánicos para eliminar contaminantes así como algún sistema de limpieza del producto obtenido. Son las plantas más extendidas en el reciclado de hormigón.

Las plantas de 3ª generación procesan y permiten la reutilización de materiales secundarios considerados contaminantes de los áridos reciclados.

La tecnología de las plantas móviles ha experimentado cambios significativos. Dichas plantas son muy utilizadas como elementos auxiliares en plantas fijas o como alternativa de las mismas. En la actualidad llegan a procesar hasta 400 t/hora. Algunos modelos pueden trabajar como plantas de proceso completo triturando el material de alimentación en una trituradora de impactos. Después de la trituración, se criba el material en la criba inclinada que incorporan y desde allí el material sobredimensionado retorna a la trituradora mediante una cinta transportadora. Los modelos más extendidos de estos tipos de plantas se usan en procesos abiertos para producir un único producto final.

En la **figura 2.2** puede observarse una sección de una planta móvil para la producción de áridos reciclados donde destaca la trituradora de mandíbulas que incorpora y el separador magnético.

Las plantas fijas incorporan una tecnología similar a la de las plantas de producción de áridos naturales aunque incorporan sistemas para la eliminación de impurezas y contaminantes. Su capacidad productiva es, por lo general, superior a las plantas móviles. Los sistemas de trituración empleados pueden ser de mandíbulas, de impactos o de conos^[25].

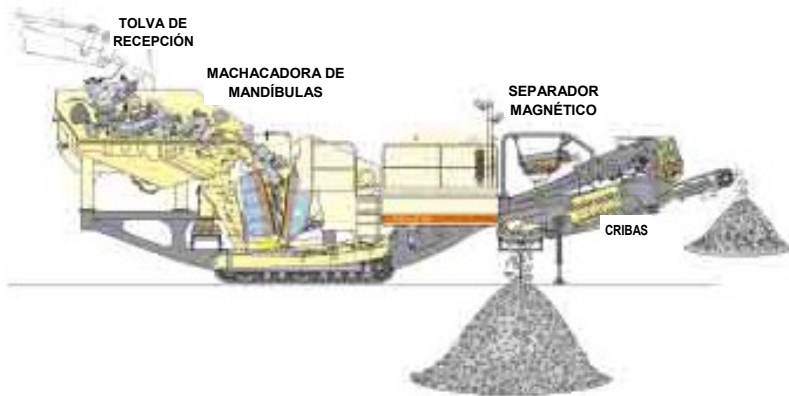


Figura 2.2 Planta móvil reciclado de RCDs^[80].

Las **trituradoras de mandíbulas**, figura 2.3, generan una cantidad de finos inferior al 10% del material triturado con una buena distribución del tamaño del árido para fabricar hormigón. La forma de las partículas es angulosa. Es la más apropiada para la trituración primaria y la incorporan tanto plantas fijas como móviles por su alta capacidad y bajo coste.

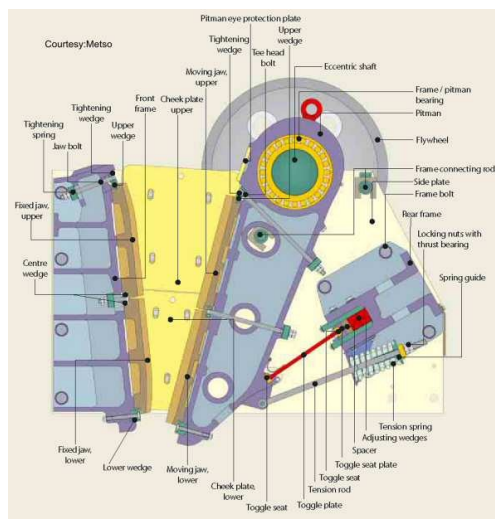


Figura 2.3: Trituradora de mandíbulas^[80].

Las **trituradoras o molinos de impacto**, figura 2.4, permiten obtener altos valores de reducción y un producto más fino obtenido en menos etapas de trituración lo que

supone reducir los costes de inversión y de explotación. Generan hasta un 40% de finos. El mayor inconveniente es el gran desgaste que sufren los martillos.

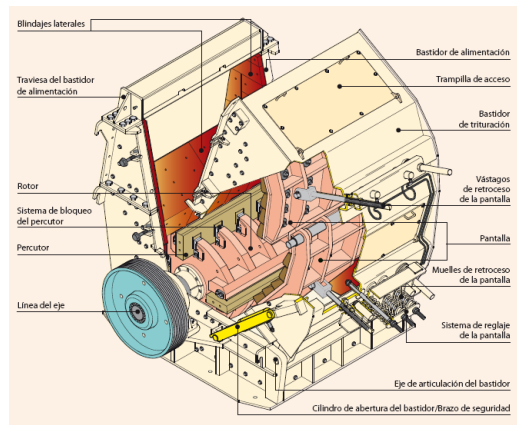


Figura 2.4 Molino de impactos^[80].

Las **trituradoras de conos**, figura 2.5, ofrecen rendimientos elevados con una reducción considerable de costes de desgaste y mantenimiento. El mayor inconveniente que presentan es que no admiten tamaños muy grandes de partículas aunque el árido final obtenido en ellas presenta mayor calidad. Suelen utilizarse en la trituración secundaria. La cantidad de finos producida está entorno al 20%^[94].

En la **tabla 2.2** se resumen las principales propiedades de los tres sistemas de trituración^[25].

CARACTERÍSTICA	MANDÍBULAS	IMPACTOS	CONO
Capacidad	Alta	Media	Baja
Coste producción	Bajo	Medio	Alto
Desgaste	Bajo	Bajo	Alto
Calidad del árido	Bajo	Media	Alta
Contenido en finos	Bajo	Medio	Alto
Consumo energía	Bajo	Medio	Alto

Tabla 2.2: Características de los sistemas de trituración.

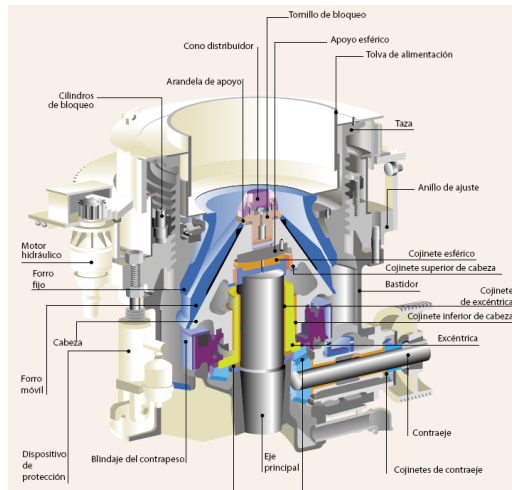


Figura 2.5 Molino de conos^[80].

La combinación más extendida en las plantas de reciclado fijas es la que utiliza la machacadora de mandíbulas como sistema de trituración primario y el molino de impactos como triturador secundario.

La clasificación de los productos, en función de su tamaño, se realiza mediante cribas con luces de malla diferentes. Dichas cribas incorporan sistemas vibrantes de baja frecuencia y gran amplitud que agilizan el proceso de tamizado. Suelen colocarse en posición inclinada para llevar a cabo el proceso de separación de manera más cómoda.

2.2.4 OTROS TRATAMIENTOS.-

La eliminación de impurezas y contaminantes en el árido reciclado se realiza habitualmente mediante tamizado, con separadores magnéticos y de forma manual. Como ya comentamos anteriormente el empleo de técnicas con aire y agua permiten la eliminación de materiales ligeros como la madera, los plásticos o el papel. Los residuos de otros materiales metálicos como el cobre, el zinc, el aluminio, el plomo o aleaciones de ellos se separan, por lo general, manualmente. Otra vía de separación de estos materiales está basada en las corrientes de Foucault. Este principio de separación está basado en la generación un campo magnético variable. Al atravesar estos materiales conductores dicho campo se generan en estos materiales las corrientes de Foucault que

permiten la separación por repulsión de los metales no magnéticos y no férricos. Aunque se trata, sin duda, de una novedosa mejora las plantas de reciclaje aún no la incorporan.

La separación magnética por densidad en seco es otro de los más novedosos procedimientos para la eliminación de impurezas^[119]. Se basa en la susceptibilidad magnética de los materiales de mortero y los cerámicos. Su distinto contenido en óxido de hierro permite la separación. Dicho sistema no se incluye actualmente en las plantas de reciclado.

La separación de materiales de baja densidad puede realizarse en seco o por vía húmeda. En seco se lleva a cabo una separación manual previa y, posteriormente, se utilizan corrientes de aire. Por vía húmeda la separación se consigue haciendo pasar los materiales a contracorriente sobre chorros de agua.

Otros investigadores^[69,84,123] han desarrollado otros tratamientos con los que se consiguen áridos reciclados de elevada calidad separando casi en su totalidad el mortero adherido al árido. Son sistemas caros y poco habituales.

El **tratamiento térmico** es uno de los métodos utilizados y se lleva a cabo mediante los siguientes pasos:

1. Trituración hasta reducir el tamaño máximo del árido a 100 mm.
2. Eliminación de impurezas metálicas mediante separador magnético.
3. Separación del mortero en un horno rotatorio a 700 °C. Se combina la acción térmica con la mecánica.
4. Separador de aire y tamizadora vibrante obteniendo árido grueso, árido fino y polvo de cemento.

Según los estudios realizados la cantidad de mortero adherida no sobrepasa el 5%. El polvo de cemento es factible de utilizarse de nuevo en la fabricación de cemento. Parte de la energía necesaria para el proceso puede obtenerse de la combustión de algunos de los contaminantes que incorporen los RCDs de origen.

Otro sistema patentado para la obtención de áridos reciclados de buena calidad se denomina Cyclite^[123]. Dicho sistema consta de una primera etapa de trituración mediante machacadora de mandíbulas hasta la reducción del material a un tamaño que

no exceda los 40 mm. A continuación el material obtenido se introduce en un sistema de trituración con cierta similitud a las grandes trituradoras primarias giratorias. En este sistema un cilindro metálico girando sobre un eje excéntrico ejerce de útil contra las paredes interiores de otro cilindro de mayor diámetro. Según los resultados obtenidos por este procedimiento la calidad del árido reciclado permite su utilización sin reparos en la fabricación de hormigón.

2.3 CARACTERÍSTICAS DEL ÁRIDO RECICLADO.-

2.3.1 MORTERO ADHERIDO.-

La principal diferencia entre los áridos reciclados y los áridos naturales estriba en la cantidad de mortero adherido que incorporan los primeros debido al hormigón original del que proceden. La cantidad de mortero adherido hace que los áridos reciclados presenten propiedades distintas a los naturales que se reflejan en un aumento de la absorción de agua, menor densidad, menor resistencia, menor dureza y una menor resistencia a la fragmentación. El hormigón fabricado con ellos estará directamente condicionado por dichas propiedades.

No existe un procedimiento normalizado para evaluar estas cantidades aunque suelen emplearse métodos^[5,87,151] que tratan de eliminarlo de la superficie del árido original para, mediante diferencia de pesadas antes y después de su eliminación, establecer el porcentaje en peso que corresponde al mortero adherido al árido. Otra forma de evaluarlo consiste en fabricar un hormigón nuevo con los áridos reciclados y con el cemento coloreado. Una vez cortadas las probetas en rebanadas y pulidas sus caras se procede a evaluar mediante un planímetro la superficie del mortero adherido distinguiéndose del nuevo por su coloración^[40,104,107]. De esta forma puede estimarse el volumen del mismo.

A continuación se recogen los valores, obtenidos en diversos estudios, correspondientes a la cantidad de mortero adherido en áridos reciclados. En todos ellos puede observarse el incremento de dicha cantidad conforme disminuye el tamaño del árido repercutiendo negativamente en sus propiedades. La calidad del hormigón de origen apenas influye en la cantidad de mortero adherido^[4,10,14,15], observándose porcentajes ligeramente mayores en aquellos áridos que proceden de hormigones con

resistencias elevadas. La reducción de la cantidad de mortero adherido puede lograrse mediante trituraciones sucesivas.

Referencia	% Mortero adherido	Tamaño árido
Ravindrarajah 87 ^[104]	54% (a/c=0,51)	5/37,5 mm
Ravindrarajah 88 ^[105]	20%	20/30 mm
	45-65%	<0,30 mm
Yagishita 1993 ^[151]	40,2% (a/c=0,45)	10/20 mm
Barra M.1996 ^[5]	51,7%	12/20 mm
	52,9%	6/12 mm
Nagataki 2000 ^[87]	52,3%	AG
Vázquez E. 2002 ^[148]	40,5%	10/20 mm
	49,5%	5/10 mm
Sánchez M. 2005 ^[116]	30,8%	4/16 mm

Tabla 2.3: Mortero adherido en áridos reciclados según diversos autores.

2.3.2 GRANULOMETRÍA.-

Para la clasificación por tamaños de las distintas fracciones se siguen las recomendaciones de la EHE en la que se prescribe el empleo de la UNE EN 933-2:96, que establece como serie básica de tamices la formada por los siguientes: 0,063-0,125-0,250-0,500-1-2-4-8-16-31,5-63-125 mm. Para el árido fino, la Instrucción utiliza únicamente los tamices de dicha serie. Para el árido grueso, utiliza además los tamices 10-20-40 mm, que están incluidos en la serie complementaria R 20 admitida por la indicada Norma, y que tienen una larga tradición de empleo en España.

La granulometría del árido reciclado depende fundamentalmente del sistema de trituración que se haya empleado en su proceso de producción. Las trituradoras de impacto, por lo general, son las que permiten alcanzar reducidos tamaños en los áridos produciendo como consecuencia mayor cantidad de finos. A estas trituradoras las siguen las de conos con una producción de finos inferior y las machacadoras de mandíbulas.

La cantidad de árido grueso generado oscila entre el 70% y el 90% de la producción^[25]. Por lo general, esta fracción gruesa se ajusta a los requerimientos que exigen las normativas vigentes quedando enmarcada dentro de los husos granulométricos de referencia establecidos en ellas. Es evidente que el tamaño obtenido en la trituración depende fundamentalmente del tamaño que tenía el hormigón de

procedencia. Los áridos reciclados presentan formas angulosas debido al proceso de machaqueo y un aspecto rugoso como consecuencia del mortero adherido a ellos.

Para el mismo tamaño máximo de árido, un árido reciclado experimenta pequeñas variaciones de su módulo granulométrico si el sistema de trituración empleado ha sido el mismo que para el árido natural^[53,54,62,65,89].

Como consecuencia de la disgregación que sufre el árido grueso reciclado durante su transporte y almacenamiento, una vez cribado se siguen obteniendo porcentajes muy reducidos de arena debido a su mayor friabilidad^[47]. Dichos valores oscilan entre el 0,5% y el 2%^[116]. Esta fracción fina se caracteriza por presentar un elevado contenido de mortero influyendo negativamente en las propiedades del hormigón.

En áridos naturales la EHE admite un 10% de desclasificados inferiores. Para áridos reciclados dicho porcentaje debe ser menor debido a los efectos perjudiciales que ocasionan en las propiedades del hormigón.

El porcentaje de desclasificados inferiores en áridos reciclados establecido por el anejo 15 de la EHE 08 tiene como límite el 10% debiendo ser el contenido de partículas que pasan por el tamiz de 4 mm no superior al 5%. Esta última especificación coincide con las especificaciones de Hong Kong^[150] y con las recomendaciones Rilem^[108].

El porcentaje de finos generado, al desprenderse pequeñas partículas de mortero durante la manipulación del árido grueso reciclado, varía entre el 0,27% y el 1,14% según estudios realizados en nuestro país^[116]. Nuestra Norma establece el límite, en relación a la cantidad de finos admisible, en el 1% del árido grueso observándose que dichos valores quedan por debajo del mismo en la mayoría de los casos. El problema que plantean los finos, al estar presentes en exceso en la superficie del árido, es que la adherencia entre el árido y la pasta de mortero decrece. Por otra parte hace que la cantidad de agua de amasado aumente.

La norma inglesa^[7] establece el límite de finos en el 5% cuando el árido reciclado proviene exclusivamente de hormigón, reduciendo dicho valor al 3% si el árido reciclado proviene de material cerámico o mezcla de ambos.

La norma alemana^[18] establece la limitación de la cantidad de finos en el 4%.

La norma belga^[148] establece la cantidad límite de finos en el 5% si los áridos reciclados tienen su origen en residuos cerámicos. Dicha cantidad se reduce al 3% si el origen, en su mayor parte, son escombros de hormigón. El tamiz que los clasifica es el de 0,08 mm.

La RILEM^[108] establece el límite de finos para los áridos procedentes en su mayoría de escombros de fábrica de ladrillo en el 3%. Si los áridos proceden en su mayoría de escombros de hormigón, con un contenido en materiales cerámicos inferior al 10%, o están formados por una mezcla con un porcentaje superior o igual al 80% de áridos naturales, con un límite de un 10% de residuos cerámicos y un 20% de residuos procedentes de escombros de hormigón, la cantidad de finos no ha de ser superior al 2%.

Algunos países especifican los husos granulométricos entre los que ha de quedar encuadrada la granulometría del árido reciclado. Al respecto se incluyen las siguientes tablas correspondientes a las recomendaciones japonesas^[72] y a la normativa belga^[148]. En las **tablas 2.4, 2.5 y 2.6** se recogen las granulometrías correspondientes al uso de áridos reciclados.

T.max (mm)	% en peso que pasa								
	50	40	30	25	20	15	10	5	2,5
40	100	95-100	-	-	35-70	-	10-30	0-5	-
25	-	-	100	95-100	-	30-70	-	0-10	0-5
20	-	-	-	100	90-100	-	20-55	0-10	0-5

Tabla 2.4: Norma japonesa. Granulometría de áridos reciclados para fabricar hormigones en obra civil.

T. máx (mm)	% en peso que pasa					
	30	25	20	10	5	2,5
25	100	90-100	50-90	10-60	0-15	0-5
20	-	100	90-100	10-60	0-15	-

Tabla 2.5: Norma japonesa. Granulometría de áridos reciclados para fabricar hormigones en edificación.

T. máx (mm)	% en peso que pasa								
	63	31,5	22,4	16	8	4	2	1	0,25
0-4	-	-	-	-	100	90-98	-	50-85	0-20
4-8	-	-	-	100	90-100	0-20	0-2	-	-
4-16	-	-	100	95-100	30-65	0-15	0-5	0-4	-
4-32	100	98-100	70-95	45-75	15-40	0-10	-	0-4	-
8-16	-	-	100	90-100	0-20	0-2	-	-	-
16-32	100	90-100	-	0-20	0-2	-	-	-	-

Tabla 2.6: Norma belga. Husos granulométricos para el árido reciclado.

2.3.3 FORMA Y TEXTURA SUPERFICIAL.-

Por lo general el coeficiente de forma del árido grueso reciclado supera el valor de 0,20, correspondiente al menor valor establecido por la EHE, como así lo atestigua la bibliografía consultada^[5,35,38,116].

Las partículas de árido reciclado obtenidas suelen presentar una textura más rugosa y porosa que la de los áridos naturales debido a la presencia de mortero adherido a la superficie del árido origen. Estas circunstancias hacen que los hormigones que se fabriquen con ellos presenten problemas de trabajabilidad.

Si para determinar la forma del árido grueso se empleó el método del índice de lajas se obtienen valores menores en el árido reciclado^[35,38]. Quizás pueda deberse a que el espesor de las partículas aumente debido a la acumulación de mortero en las caras planas de las partículas con forma de laja. De esta forma se reduce el porcentaje de lajas. La EHE establece el 35% como el valor mayor que puede tomar el índice de lajas.

El coeficiente de forma de las partículas se ve directamente afectado por el sistema de trituración empleado en la obtención del árido reciclado^[76]. Las machacadoras de mandíbulas proporcionan áridos reciclados con un coeficiente de forma más adecuado que las trituradoras de impactos o de conos.

2.3.4 DENSIDAD.-

La densidad del árido reciclado es menor que la del árido convencional ya que el primero presenta una capa de mortero adherido cuya densidad es inferior a la del árido. La fracción fina obtenida es la que menor densidad tiene debido a la mayor cantidad de mortero adherido que poseen sus partículas por unidad de peso.

Los factores más influyentes sobre la densidad son: el proceso de producción del árido, el tamaño de las fracciones obtenidas y su grado de contaminación.

Si en el proceso de fabricación del árido reciclado se empleó una trituradora de impactos, el valor obtenido en la densidad del árido reciclado grueso es ligeramente superior que en los casos en que para su obtención se hayan empleado trituradoras de conos o machacadoras de mandíbulas^[76]. Esto es debido a que la trituradora de impactos elimina mejor el mortero adherido en el árido grueso. Sin embargo, en la producción del árido fino son los otros sistemas de trituración los que permiten obtener mejores resultados, obteniéndose valores de la densidad mayores.

Combinando varias trituradoras diferentes, en el proceso de producción se obtienen áridos reciclados de muy buena calidad ya que se consigue reducir en mayor proporción la cantidad de mortero adherido a los áridos originales. Así, en la bibliografía consultada^[87] dichos áridos alcanzan un valor correspondiente al 90% de la densidad del árido natural, después de haberlos sometido a dos etapas sucesivas de triturado mediante machacadora de mandíbulas y trituradora de impactos. Dicho valor alcanza el 95% cuando son cuatro las etapas de trituración.

La densidad en las fracciones más gruesas del árido reciclado es algo mayor que en las fracciones finas. De los datos obtenidos en la bibliografía puede observarse que incluso en las mismas fracciones granulométricas los resultados presentan gran disparidad. Sin duda se debe a la distinta naturaleza de los áridos con los que se fabricaron los hormigones originales. Aun así puede concluirse que la densidad aumenta con el tamaño.

En la **tabla 2.7** se resumen los valores obtenidos en los diferentes estudios consultados.

La evaluación de la densidad del árido reciclado grueso se realiza utilizando la norma UNE-EN 1097-6 "Ensayos para determinar las propiedades físicas y mecánicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua".

Referencia	Densidad kg/m ³	
	Árido reciclado	Árido natural
Rasheeduzzafar 1984 ^[101]	2280 G	2550 G
Ravindrarajah 1984 ^[103]	2490 G	2670 G
Kashino1988 ^[58]	2420-2380 G	-
Nishbayashi 1988 ^[89]	2430-2320 G	2700 G
Nixon 1993 ^[90]	2350-2320 G	2630 G
Barra 1996 ^[5]	2270-2240 G	2680-2660 G
Knight 1998 ^[64]	2630-2390 G	-
Park 1999 ^[93]	2450-2400 G	2650 G
Katz 2000 ^[59]	2550-2320 G	-
Dos Santos 2002 ^[19]	2360-2320 G	2630 G
Poon C.S. 2002 ^[98]	2470-2350 G	2570 G
	2390-2260 F	2520 F
Kou S. C. 2004 ^[86]	2570-2490 G	2620 G
Jianzhuang X. 2004 ^[52]	2520 G	2820 G
D. Sani 2004 ^[117]	2350 G	-
D. Sani 2004 ^[117]	2280 F	-
Sánchez M. 2004 ^[116]	2160-2340 G	2600-2610 G
Tsung-Yueh Tu 2005 ^[126b]	2480 G	-
	2340 F	2580 F
Poon C.S. 2005 ^[100]	2310 F	-
Evangelista 2007 ^[24]	2165 F	2560 F

Tabla 2.7: Densidad en áridos reciclados comparados con los naturales según diversos autores.

2.3.5 ABSORCIÓN.-

La absorción en los áridos reciclados alcanza valores muy superiores a los obtenidos en los áridos naturales. Sin duda alguna esto es debido a la cantidad de mortero adherido que presentan dichos áridos. En áridos naturales los valores de la absorción oscilan entre un 0% y un 4% mientras que en los diferentes estudios consultados los valores obtenidos en áridos reciclados van desde un 3,3% hasta un 13% aunque, por lo general, la mayoría sobrepasa el valor límite de un 5% establecido por la EHE 08.

El tamaño del árido reciclado influye de manera decisiva sobre la absorción. En las fracciones más finas la absorción es mayor, ya que en ellas la cantidad de mortero adherido es superior que en las fracciones más gruesas, siendo más acusado dicho efecto cuanto menor sea la densidad del árido reciclado, tal y como puede comprobarse en el **figura 2.6**.

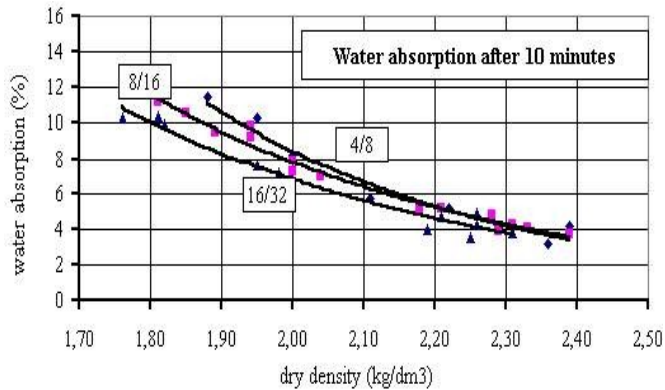


Figura 2.6 Relación entre la absorción y la densidad en áridos reciclados según su tamaño transcurridos 10 minutos^[110].

Una vez transcurridas 24 horas, puede observarse en el **figura 2.7**, la absorción sigue presentando valores claramente diferenciados, según el tamaño del árido reciclado, en densidades bajas. Dicha diferencia prácticamente se anula para densidades más elevadas.

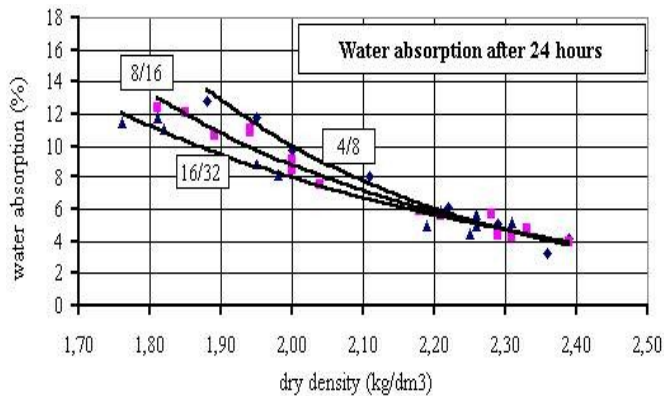


Figura 2.7 Relación entre la absorción y la densidad en áridos reciclados según su tamaño transcurridas 24 horas^[110].

También, el sistema empleado en el procesado de los RCDs para la obtención de áridos reciclados permite reducir la absorción, ya que a medida que los RCDs pasan por diferentes trituradoras la cantidad de mortero adherido a los áridos disminuye. Algún estudio realizado^[76] ha obtenido valores de la absorción algo mayores cuando se utilizan machacadoras de mandíbulas o molinos de impacto.

Cuando los áridos reciclados proceden de hormigones que presentaban resistencias elevadas la absorción es menor que en los de resistencias más bajas^[14,19,40,53,62,89,156].

En la **tabla 2.8** quedan reflejados los valores obtenidos para la absorción en la bibliografía consultada.

La absorción en los áridos reciclados puede determinarse utilizando la norma UNE-EN 1097-6 “Ensayos para determinar las propiedades físicas y mecánicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua”.

La RILEM^[108] establece una absorción máxima para el árido tipo II (90% de residuos de hormigón y un 10% de residuos cerámicos) igual al 10% y para el árido tipo III (mezcla con un mínimo del 80% de áridos naturales y el resto residuos de hormigón o cerámicos) establece un valor máximo igual al 3%.

Referencia	Absorción %	
	Árido reciclado	Árido natural
Rasheeduzzafar 1984 ^[101]	8,51 G	4,11 G
Ravindrarajah 1984 ^[103]	5,68 G	0,30 G
Kashino 1988 ^[58]	5,98-5,47 G	-
Nishbayashi 1988 ^[89]	8,1-6,8 G	-
Kikuchi 1993 ^[62]	5,1-4 G	0,9 G
Barra 1996 ^[5]	7,49-6,85 G	0,8-0,5 G
Knight 1988 ^[64]	5,7-5,4 G	-
Park 1999 ^[93]	4,8-3,8 G	0,5 G
Katz 2000 ^[59]	8-3,3 G	-
Dos Santos 2002 ^[19]	5,5-4,9 G	1,14 G
Poon C.S. 2002 ^[66]	7,60 G	1,25 G
	14,21 F	1,01 F
Kou S.C. 2004 ^[66]	4,26-3,52 G	1,12-1,11 G
Jianzhuang X. 2004 ^[52]	9,25 G	0,4 G
D.Sani 2004 ^[117]	7,4 G	-
	15,8 F	-
Sánchez M. 2004 ^[116]	6,10 G	1,99 G
Tsung Yueh Tu 2005 ^[126]	5 G	-
	10 F	1 F
Poon C.S. 2005 ^[100]	10,3 F	-
Evangelista 2007 ^[24]	13,1 F	0,8 F

Tabla 2.8: Absorción en áridos reciclados comparados con los naturales según diversos autores.

Las especificaciones belgas establecen una absorción máxima del 9% para el árido reciclado denominado GBSB-II que es similar al árido tipo II especificado por la RILEM. Para el árido reciclado GBSB-I que procede en su mayoría de residuos cerámicos la absorción máxima exigida es del 9%.

En Japón^[60], para los áridos reciclados empleados en la fabricación de hormigón, se establece un valor máximo de la absorción según su tipo y su tamaño máximo. Dichos valores quedan recogidos en la tabla siguiente:

Tipo	Absorción %	
	AG	AF
I Calidad elevada. Uso en hormigón armado	< 3	< 5
II Calidad media. Hormigón en masa o soleras	< 3	< 10
III Calidad inferior. Hormigones pobres	< 7	

Tabla 2.9: Valores de la absorción según la norma japonesa.

2.3.6 RESISTENCIA A LA FRAGMENTACIÓN.-

El coeficiente de Los Ángeles en áridos reciclados presenta valores superiores debido a que en dicho ensayo no solamente se produce la correspondiente pérdida de peso del árido natural sino también la derivada de eliminar la totalidad del mortero adherido.

En las fracciones más finas el coeficiente de Los Ángeles es mayor debido a que, como ya se ha comentado con anterioridad, el porcentaje de mortero adherido es mayor^[5,124].

Mediante el empleo de trituraciones sucesivas se logra mejorar la calidad del árido y obtener un coeficiente de Los Ángeles con valores más próximos a los del árido natural.

El hormigón del que proceden los áridos reciclados también influye en el valor obtenido en el ensayo observándose que, al aumentar la resistencia, el valor del coeficiente de Los Ángeles disminuye^[44,124]. En la tabla siguiente se recogen algunos valores para dicho coeficiente reflejados en los estudios consultados.

Referencia	Tamaño árido	Coefic. de Los Ángeles %	
		Ár. convenc	Ár. reciclado
Ravindrarajah 1987 ^[108]	37,5/5 mm	18,1	37
Barra 1996 ^[9]	20/12 mm	24,7	31
	12/6 mm	20,4	29,5
Yamato 2000 ^[153]	AG	19,4	30,1
González B. 2002 ^[35]	25/12 mm	27	34
Sánchez M. 2005 ^[116]	4/16 mm	35,8	38,9

Tabla 2.10: Coeficiente de Los Ángeles en áridos reciclados según diversos autores

La evaluación de la resistencia a la fragmentación en los áridos reciclados puede realizarse mediante la norma UNE-EN 1097-6 “Ensayos para determinar las propiedades físicas y mecánicas de los áridos. Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación”.

2.3.7 RESISTENCIA A LA HELADA.-

La resistencia a los ciclos de hielo y deshielo suele estar relacionada con la resistencia de las partículas de los áridos y la distribución de los poros en las mismas. Los áridos reciclados suelen experimentar una pérdida de peso mayor que los áridos naturales, como consecuencia del mortero que llevan adherido a la matriz rocosa, al ser sometidos a diez ciclos de hielo-deshielo en agua o a cinco ciclos en una solución de sulfato magnésico.

Cuando el ensayo se realiza utilizando soluciones de sulfato sódico o magnésico cabe señalar que algunos estudios^[107] ponen de manifiesto que los resultados pueden dejar de ser representativos debido a que dichas soluciones producen un efecto químico destructivo sobre la pasta de cemento.

Algunos estudios realizados en Japón^[53,55,65] ponen de manifiesto que los áridos reciclados sobrepasan las limitaciones impuestas a los áridos naturales en lo referente a la resistencia a la helada. En otro trabajo^[107] se observa que en hormigones reciclados procedentes de áridos utilizados en pavimentos de hormigón la pérdida de peso por tratamiento con sulfatos ha estado entre el 0% y el 2%.

Los estudios consultados^[35b,81,125,135b] proporcionan unos valores de pérdida de peso comprendida entre el 2% y el 22% sobrepasando en algunas ocasiones el límite del 18% establecido en la EHE.

La utilización de áridos reciclados procedentes de pavimentos de hormigón hace que el comportamiento frente a la helada sea mejor^[78,107] debido probablemente a la incorporación de aireantes en el hormigón y a la buena calidad del árido que suele emplearse con esta finalidad.

Como comentamos para propiedades anteriores también se observa que de hormigones que presentan elevadas resistencias se obtienen áridos gruesos reciclados con mejor comportamiento a la helada^[20,65], aunque cuando la relación a/c toma valores superiores a 0,55 la pérdida de peso aumenta notablemente.

Si el proceso de obtención del árido consistió en realizar varias trituraciones sucesivas el comportamiento del producto final será muy parecido al del árido natural. Una única trituración llevada a cabo mediante una trituradora de impacto proporciona valores comprendidos entre el 23% y el 32% de pérdida de masa en el árido grueso. Si el procesado se realiza mediante dos trituraciones consecutivas dichos valores se reducen entre el 6% y el 18%^[20].

Como ya hemos hecho referencia en párrafos anteriores los ensayos físicos para evaluar la resistencia a los ciclos de hielo y deshielo pueden efectuarse mediante la norma UNE-EN 1367-1 "Ensayos para determinar las propiedades térmicas y de alteración de los áridos. Parte1: Determinación de la resistencia a ciclos de hielo y deshielo" y mediante la norma UNE-EN 1367-2 "Ensayos para determinar las propiedades térmicas y de alteración de los áridos. Parte 2: Ensayo de sulfato de magnesio". Este último es el más apropiado cuando el árido reciclado provenga de hormigones sometidos a la acción de sales para evitar el hielo o haya estado expuesto al agua del mar.

La norma UNE-EN 12620 "Áridos para hormigón" establece un valor del 1% de pérdida de masa cuando el hormigón esté sometido a ambientes agresivos. Dicho valor aumenta hasta el 4% para ambientes normales.

2.3.8 CONTENIDO DE CLORUROS.-

El contenido de cloruros que pueden presentar los áridos reciclados puede ser importante cuando provengan de obras en las que hayan estado en contacto con sales fundentes como, por ejemplo, en pasos de alta montaña, cuando hayan estado en contacto directo con agua del mar y si en la fabricación del hormigón se empleó como aditivo algún producto acelerante.

Cuando los hormigones origen de los áridos reciclados no estuvieron expuestos a las condiciones del párrafo anterior los valores de los cloruros solubles en agua y los cloruros totales oscilan entre el 0,001% y el 0,005%^[16,107,20].

En los áridos reciclados será muy conveniente establecer no solo la cantidad de cloruros solubles en agua sino los cloruros totales que contiene el árido ya que pueden existir cloruros combinados que puedan ser reactivos como en el caso del cloro aluminato cálcico hidratado que puede liberar los iones cloruros ante la presencia de iones sulfatos.

La EHE determina un contenido máximo de cloruros solubles en agua del 0,05% tanto para el árido grueso como para el árido fino cuyo empleo se utilice en hormigón armado. Si los áridos se emplean en la fabricación de hormigón pretensado dicho límite máximo se reduce al 0,03%. Dicho porcentaje se expresa respecto a la masa del árido seco. El contenido total de cloruros se limita al 0,4% del peso del cemento para hormigones que no contengan armaduras activas. y al 0,2% en peso del cemento para el hormigón pretensado.

La determinación del contenido en cloruros solubles en agua para áridos reciclados puede realizarse mediante la norma UNE-EN 1744-1 “Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte1: Análisis químico”. La evaluación del contenido de cloruros totales se lleva a cabo mediante la norma UNE 112010 “Determinación de cloruros totales en hormigones endurecidos”.

En aquellos países en los que existen recomendaciones para el empleo de árido reciclado establecen las mismas limitaciones que para el árido natural.^[12,55,108,148]

2.3.9 CONTENIDO DE SULFATOS.-

La cantidad de sulfatos contenida en el árido reciclado puede ser importante debido a la suma de los correspondientes al árido natural con los del mortero adherido al árido y, en el caso de hormigones procedentes de edificación, a la presencia de yeso como contaminante.

Dichos sulfatos pueden provocar problemas en el hormigón, ya que pueden dar lugar a su combinación con el aluminato tricálcico hidratado del cemento formando ettringita (sulfoaluminato tricálcico hidratado) y provocar fuertes expansiones. Otra posible transformación es la del hidróxido de calcio libre o liberado durante la hidratación del cemento en yeso que conlleva, igualmente, un aumento de volumen que puede llevar a la rotura del hormigón^[26].

Si limitamos el contenido de compuestos totales de azufre en vez de, únicamente, los sulfatos solubles en agua reduciremos considerablemente el riesgo de sufrir expansiones^[12, 57, 108, 148]. Reduciendo la presencia de yeso en el árido reciclado, al eliminar los tamaños más finos del mismo, contribuiremos también a reducir la posibilidad de que dichas expansiones tengan lugar.

La instrucción EHE un contenido máximo del 1% en los compuestos totales de azufre. Dicho contenido se reduce al 0,8% para los sulfatos solubles en ácido.

La norma UNE-EN 1744-1 "Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte1: Análisis químico" describe los métodos para determinar el contenido total de azufre y la cantidad de sulfatos solubles en ácido en áridos naturales. Dicha norma también puede ser empleada para determinar el contenido de sulfatos en los áridos reciclados.

En áridos reciclados la RILEM^[108] establece un límite máximo, para el contenido de sulfatos solubles en ácido, del 1% cuando se empleen en la fabricación de hormigón.

2.3.10 REACCIÓN ÁLCALI-ÁRIDO.-

Determinados tipos de áridos que contengan sílice reactiva pueden reaccionar con los álcalis del cemento portland formando un gel que provoca expansiones peligrosas en el hormigón. La reactividad entre los álcalis y la sílice es proporcional a su hidratación. Las mayores expansiones se producen con una determinada cantidad de sílice reactiva. Si la cantidad está por encima o por debajo dichas expansiones disminuyen.

Cuando se utilizan áridos reciclados dicha reacción puede verse favorecida debido al mortero adherido que llevan consigo y que aumenta el contenido de alcalinos.

Según la bibliografía consultada^[12] cuando los áridos reciclados vayan a emplearse en la fabricación de hormigón deberá evaluarse el contenido en álcalis que aportan.

Como el control de la procedencia de los áridos reciclados presenta dificultades y la utilización de cementos con adiciones de cenizas volantes o escorias disminuye la reacción álcali-árido puede ser conveniente utilizar estos cementos en la fabricación de hormigón con áridos reciclados.

Tomando como criterio las recomendaciones de la RILEM según las cuales, para cualquier clase de exposición distinta a la que corresponde a un ambiente seco es necesaria la realización de ensayos para comprobar la reactividad álcali-árido, necesitaríamos un estudio de reactividad para ambientes diferentes al I y al IIb de los recogidos en la EHE tanto para áridos reciclados como naturales.

La determinación de la reactividad potencial de los áridos se lleva a cabo con las normas UNE 146507-1 EX "Determinación de la reactividad potencial de los áridos. Parte 1: Determinación de la reactividad álcali-sílice y álcali-silicato" y UNE 146507-2 EX "Determinación de la reactividad potencial de los áridos. Parte 2: Determinación de la reactividad álcali-carbonato".

2.3.11 CONTAMINANTES E IMPUREZAS.-

La presencia de impurezas y contaminantes en los áridos reciclados perjudican notablemente las propiedades del hormigón fabricado con ellos. La madera, plásticos, yeso, metales, vidrio, ladrillos, asfaltos, materia orgánica, etc, son los contaminantes que se presentan con mayor frecuencia.

Uno de los mayores perjuicios que provocan sobre el hormigón es la caída de su resistencia a compresión. Cuando los elementos contaminantes son restos arcillosos o de cales la disminución en la resistencia es mayor que si el árido reciclado incorpora restos de asfalto o pinturas.

A modo de ejemplo indicar que restos de cales con un porcentaje en volumen sobre el total del 7%, restos de tierra con un 5% sobre el volumen total, madera con un 4% sobre el volumen total, yeso con un 3% sobre el volumen total, asfalto con un 2% sobre el volumen total y pinturas sintéticas con un 0,2% sobre el volumen total provocaron una caída en la resistencia del hormigón a compresión del 15%.^[107]

La presencia de un tipo u otro de contaminantes depende de la procedencia del árido reciclado. El árido reciclado procedente de escombros de hormigón presenta un contenido de impurezas bastante inferior al que incorporan los áridos procedentes de escombros de demolición^[49,111,154].

Otros perjuicios causados al hormigón, según el tipo de impureza que presenten los áridos, son los siguientes:

Los restos de ladrillos originan un peor comportamiento frente a ciclos de hielo-deshielo. Si dichos residuos proceden de material refractario originan fenómenos expansivos.

El vidrio favorece la reacción álcali-árido y, además, presenta dificultades para su separación ya que su densidad es similar a la del árido.

Los restos de madera y papel provocan desconchados superficiales en el hormigón.

Los restos arcillosos suelen provocar retracciones en el hormigón.

La presencia de yeso puede originar un ataque por sulfatos.

Las limitaciones en cuanto a contaminantes e impurezas establecidas por el anejo 15 de la EHE son las recogidas en la **tabla 2.11**:

Contaminantes e impurezas	Máximo contenido % del peso total de la muestra
Material cerámico	5
Partículas ligeras	1
Asfalto	1
Vidrio, plásticos, metales.	1

Tabla 2.11: Contenido máximo de impurezas en áridos reciclados según anejo EHE.

En hormigones reciclados el contenido de terrones de arcilla será inferior al 0,6% en peso de la proporción de árido reciclado si esta cantidad es inferior o igual al 20% del árido grueso. En caso contrario dicha limitación se establecerá en un 0,25%.

El contenido de partículas blandas no será superior al 5% del peso total de la muestra.

Según el tipo de impureza emplearemos las siguientes normas para su determinación.

El contenido de impurezas de mayor tamaño se determina mediante la norma UNE-EN 933 “Determinación del contenido en conchas”. Con ella clasificaremos contaminantes como el vidrio, metales o asfalto.

Los restos de materiales arcillosos se pueden determinar mediante la norma UNE 7133 “Determinación de terrones de arcilla”.

Con el ensayo descrito en la norma UNE-EN 1744-1 “Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte1: Análisis químico” se determina el contenido de yeso.

Para determinar los áridos considerados blandos así como el contenido de restos de ladrillo o asfalto se utiliza la norma UNE 7134 “Determinación de partículas blandas para hormigón”.

Las recomendaciones de la RILEM^[108] establecen una cantidad máxima de materiales de densidad inferior a 2200 kg/m³ del 10%, una cantidad máxima del 1% con densidad inferior a 1800 kg/m³ y una cantidad máxima del 0,5% con densidad inferior a 1000 kg/m³. De esta manera indirecta se controla el contenido de impurezas. El máximo contenido en materiales extraños como vidrio, betunes, etc se establece en el 1% y el contenido máximo de materia orgánica no ha de sobrepasar el 0,5%.

La norma inglesa BS 8500-2^[15] establece el máximo contenido de materiales cerámicos en el 5% y de asfalto en el 5%.

2.3.12 DISTINTAS NORMATIVAS SOBRE ÁRIDOS RECICLADOS.-

En la actualidad solo algunos países disponen de normativa que regule el uso de áridos reciclados para su empleo en hormigón. A continuación resumimos algunas de ellas.

2.3.12.1 Estado actual en USA.-

Aunque no existen normas específicas al respecto si existen otras que se utilizan como base para determinar las propiedades de los áridos reciclados. Actualmente el comité 555 de ACI elabora un documento para normalizar la utilización de áridos reciclados en hormigón. Cabe reseñar que dichos áridos se clasifican según las siguientes categorías^[61]:

a) Residuos triturados procedentes de demoliciones. Son una mezcla de hormigón y residuos cerámicos triturados, clasificados y que contienen cierto porcentaje de otros elementos contaminantes.

b) Residuos de demolición clasificados y limpios. Son una mezcla de hormigón y residuos cerámicos triturados, clasificados y sin presencia de otros elementos contaminantes.

c) Residuos cerámicos limpios. Son restos de ladrillos triturados y clasificados que contienen menos del 5% de hormigón, materiales pétreos u otros contaminantes.

d) Residuos de hormigón limpios. Son restos de hormigones triturados y clasificados que contienen menos del 5% de restos de ladrillo, materiales pétreos u otros contaminantes.

A todos ellos se les exige, cuando vayan a ser utilizados en la producción de hormigón, que posean la dureza adecuada para conseguir la resistencia a compresión deseada, que no provoquen reacciones indeseables con otros componentes de la mezcla y que su granulometría y forma sean las adecuadas para obtener una buena trabajabilidad con ellos. En función de su uso se clasifican en:

- 1) Áridos para rellenos en general. Las cuatro categorías anteriores pueden utilizarse con dicho fin.
- 2) Áridos para drenajes. Las cuatro categorías son adecuadas para emplearse con esta finalidad.
- 3) Áridos para bases y sub-bases de carreteras. Las categorías b, c y d son adecuadas para esos fines.
- 4) Áridos para la fabricación de hormigón. Aunque las categorías b y c pueden emplearse en hormigones de dosificación es la categoría d la más adecuada para esta finalidad.

2.3.12.2 Estado actual en Japón.-

En Japón los áridos reciclados se clasifican en tres categorías. El árido reciclado de mayor calidad se le denomina con la letra H, el de calidad intermedia con la letra M y el de más baja calidad con la letra L. Con el primero de ellos se consiguen las mejores prestaciones en la fabricación de hormigón. Quedan regulados, respectivamente, por las normas JIS A 5021, JIS A 5022 y JIS A 5023 puestas en circulación entre los años 2005 y 2007^[50,51].

La clasificación en una u otra categoría se basa en los requisitos exigidos a sus propiedades físicas, a la reactividad álcali-árido y al contenido de impurezas que contengan.

En las tablas siguientes se especifican a modo de ejemplo los estándares de calidad requeridos para los áridos reciclados de más alta calidad (clase H).

PROPIEDAD	AG	AF
Densidad en seco (kg/m ³)	≥ 2500	≥ 2500
Absorción %	≤ 3%	≤ 3%
Abrasión %	≤ 35%	-
% que pasa por el tamiz de 75 μm	≤ 1%	≤ 7%
Contenido de ion cloruro	≤ 0,04%	≤ 0,04%

Tabla 2.12: Propiedades del árido reciclado clase H JIS A 5021.

Sustancias contaminantes	% en peso
Baldosas, ladrillo, cerámica, asfalto	2,0
Vidrio	0,5
Yeso	0,1
Otras sustancias inorgánicas	0,5
Plásticos	0,5
Madera, papel	0,1

Tabla 2.13: Sustancias contaminantes del árido reciclado clase H JIS A 5021.

2.3.12.3 Estado actual en Australia.-

En 2002, el Ministerio de Medio Ambiente y Patrimonio en colaboración con el CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) elaboró una guía nacional para la utilización de hormigón reciclado en aplicaciones no estructurales. En dicha guía los áridos reciclados se clasifican en áridos reciclados de clase 1 y de clase 2. Los primeros son los que se utilizan en la fabricación de hormigón ya que las limitaciones establecidas en sus propiedades físicas son muy parecidas a las de los áridos naturales. Los áridos reciclados de segunda clase se utilizan como material de relleno y como bases y sub-bases en carreteras y pavimentación. Se les exige^[46] a ambos una absorción inferior al 6% y una densidad mínima de 2100 kg/m³.

2.3.12.4 Estado actual en la Comunidad Europea.-

Al coexistir las distintas normas nacionales con las que emanan del CEN nos encontramos, dentro del grupo de países que componían la comunidad Europea antes de la última ampliación, con cierta variedad en cuanto a la clasificación de los áridos reciclados.

En Alemania la norma DIN 4226-100 clasifica los áridos reciclados en cuatro categorías diferentes:

TIPO 1: Son áridos que proceden mayoritariamente de residuos de hormigón o de áridos minerales. Presentan un contenido máximo de clinker, ladrillo y arenisca caliza del 10%.

TIPO 2: Son áridos que proceden mayoritariamente de residuos de hormigón o de áridos minerales en con un porcentaje mínimo del 70%. Presentan un contenido máximo de clinker, ladrillo y arenisca caliza del 30%.

TIPO 3: Son áridos que en su mayoría proceden de residuos cerámicos en una proporción mínima del 80%. Presentan un contenido máximo de materiales procedentes de hormigón o áridos minerales del 20%.

TIPO 4: Son áridos que en su mayoría proceden de una mezcla de RCDs con un contenido mínimo del 80% de material procedente de hormigón, áridos minerales o productos cerámicos.

En Reino Unido la norma BS-EN 206-1 clasifica el árido reciclado en dos tipos diferentes:

RCA: Árido reciclado procedente de residuos de hormigón con un contenido máximo de impurezas como material cerámico, partículas ligeras, asfalto, vidrio, plástico, etc del 17%. La resistencia máxima recomendable del hormigón fabricado con este tipo de árido no superará los 40 N/mm².

RA: Árido reciclado procedente de materiales cerámicos o mezclado con hormigón. El contenido de materiales cerámicos puede ser del 100%. Se utiliza en hormigones pobres con resistencias a compresión que no llegan a los 20 N/mm².

La RILEM distingue tres tipos de áridos reciclados^[108]:

TIPO I: Áridos procedentes mayoritariamente de fábrica de ladrillo.

TIPO II: Áridos procedentes mayoritariamente de residuos de hormigón con un contenido máximo de residuos cerámicos del 10%.

TIPO III: Áridos compuestos por una mezcla de áridos naturales mayor del 80%. El resto puede estar integrado por un 10% como máximo de áridos tipo I o un hasta un 20% de áridos tipo II.

2.3.12.5 *Estado actual en España.-*

En nuestro país se acaba de publicar, en Julio de 2008, la nueva EHE-08. Entre los aspectos fundamentales que han inspirado los trabajos de revisión de la Instrucción están la adopción de criterios de contribución a la sostenibilidad y la incorporación a la Instrucción de nuevos hormigones como los reciclados. Por estas razones incorpora el anejo 15 donde quedan detalladas las recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados. Entre ellas destacamos aquellas que inciden en las características del árido reciclado:

- Excluye los áridos finos reciclados para la fabricación de hormigón.
- No permite la fabricación de hormigón con áridos reciclados de distinta naturaleza al hormigón así como con aquellos que, aunque procedan de residuos de hormigón, puedan estar afectados por patologías que afecten a su calidad tales como ataque por sulfatos, fuego, reactividad álcali-árido, etc o provengan de hormigones especiales como el aluminoso, con fibras, polímeros, etc.
- El tamaño del árido permitido será de 4 mm presentando como máximo un 5% en peso de partículas que pasen por dicho tamiz así como un 10% de desclasificados inferiores.
- El contenido de cloruros, de sulfatos, de partículas blandas y de las que tienen bajo peso específico serán los mismos que los prescritos en la Instrucción para áridos naturales.

- Cuando la sustitución de árido grueso por árido reciclado no supere el 20% el contenido de terrones de arcilla en dicho árido no será superior al 0,6%. En el árido natural no excederá del 0,15%.
- El contenido de material cerámico no deberá exceder del 5% en peso del total de la muestra, las partículas ligeras en el 1%, el asfalto en el 1% y otros materiales como vidrio, plásticos, metales, en el 1%.
- La absorción en el árido reciclado no será superior al 7% cuando el porcentaje de sustitución del árido grueso no supere el 20%. En este caso el árido grueso natural no presentará una absorción superior al 4,5%. Si se supera el 20% de sustitución la mezcla de árido reciclado y árido natural no debe presentar un valor de la absorción superior al 5%.
- La resistencia al desgaste será la misma que en los áridos naturales con un coeficiente de Los Ángeles máximo del 40%.
- La granulometría, el coeficiente de forma y el índice de lajas del árido reciclado serán adecuados para su empleo en hormigón estructural.

En la **tabla 2.14** pueden compararse los valores de las especificaciones, correspondientes a distintas normativas internacionales, para la utilización de áridos reciclados. En ella puede observarse que la calidad del árido reciclado se controla fundamentalmente a través de la densidad y la absorción. Las exigencias requeridas al respecto son menos restrictivas que en los áridos convencionales ya que el mortero adherido a ellos da lugar a un aumento en los valores de la absorción y a la disminución de la densidad. La excepción al respecto la presentan las especificaciones japonesas relativas a los áridos reciclados de mayor calidad en las que las exigencias de absorción están por debajo de las que corresponden a los áridos convencionales en algunas normativas nacionales.

Característica	RILEM			ALEMANIA				BÉLGICA		REINO UNIDO		Australia
	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	GBSB I	GBSB II	RCA	RA	
Densidad seca (kg/m ³)	≥ 1500(1) ≤ 20(1)	≥ 2000(1) ≤ 10(1)	≥ 2400(1) ≤ 3(1)	≥ 2000(2) ≤ 10(2)	≥ 2000(2) ≤ 15(2)	≥ 1800(2) ≤ 15(2)	≥ 1500(2) ≤ 18(3)	> 1600(3) < 9(3)	> 2100(3) < 6(4)			> 2100(4) < 6(4)
Absorción (%)												
Contenido en metales, vidrios, materiales blandos, betún (%)	≤ 5	≤ 1	≤ 1	Componentes minoritarios en la tabla 2.15				≤ 1	≤ 1	Componentes minoritarios en la tabla 2.16		≤ 2 incluido ladrillo
Material de densidad < 2200 kg/m ³ (%)		≤ 10(5)	≤ 10(5)									≤ 10(6)
Material de densidad < 1800 kg/m ³ (%)	≤ 10(5)	≤ 1(5)	≤ 1(5)					≤ 10	≤ 1(7)			
Material de densidad < 1000 kg/m ³ (%)	≤ 1(5)	≤ 0,5(5)	≤ 0,5(5)					≤ 1	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 1	
Contenido de arena < 4 mm (%)	≤ 5(8)	≤ 5(8)	≤ 5(8)									
Contenido de finos < 0,063mm (%)	≤ 3(8)	≤ 2(8)	≤ 2(8)	< 4(9)	< 4(9)	< 4(9)	< 4(9)	< 5(10)	< 3(10)			
Contenido de cloruros (%)				< 0,04(9)	< 0,04(9)	< 0,15(9)	< 0,15(9)	< 0,06(11)	< 0,06(11)			
Contenido de sulfatos SO ₃ (%)	≤ 1(12)	≤ 1(12)	≤ 1(12)					< 1(13)	< 1(13)	≤ 1	≤ 1	
Contenido de materia orgánica (%)	≤ 1(14)	≤ 0,5(14)	≤ 0,5(14)					< 0,5(15)	< 0,5(15)			
Índice de machacabilidad												< 30(16)

(1) ISO 6783 y 7033

(5) ASTM C123 Condiciones de árido saturado superficie seca.

(2) DIN EN 1096-6. Absorción media a los 10 minutos.

(3) NBN B11-255

(4) AS 1141 6

(6) Según la norma belga la densidad es de 2100 kg/m³.

(7) La densidad considerada es de 1600 kg/m³.

(8) Si se sobrepasa dicho límite la fracción de arena del árido reciclado se considerará la fracción total de arena. UNE-EN 933-1

(9) DIN 4226-1

(10) Finos menores de 0,08 mm.

(11) NBN B11-202

(12) Sulfatos solubles en agua

Tabla 2.14: Especificaciones internacionales sobre árido reciclado

Elementos	% en masa			
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4
Residuos de hormigón o áridos	≥ 90	≥ 70	≤ 20	
Clinker, ladrillo sin poros			≥ 80	≥ 80
Arenisca caliza	≤ 10	≤ 30	≤ 5	
Ladrillo, hormigón ligero, estuco, cemento, escoria, pumita.	≤ 2	≤ 3	≤ 5	
Asfalto	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 20
Vidrio, cerámica, escoria de metal, yeso	≤ 2	≤ 2	≤ 2	
Goma, plástico, metal, madera, papel, plantas, otros	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 1

Tabla 2.15: Composición de los áridos reciclados según DIN 4223.

Componente	% en masa	
	RCA	RA
Material cerámico	5	100
Asfalto	5	10
Partículas ligeras	0,5	1
Vidrio, plásticos, metales, etc	1	1

Tabla 2.16: Impurezas en áridos reciclados según BS 8500-2.

2.4 DOSIFICACIÓN DEL HORMIGÓN RECICLADO.-

La dosificación del hormigón utilizando áridos reciclados pretende establecer las cantidades óptimas de cemento, agua, áridos naturales, áridos reciclados y aditivos que nos permitan obtener una determinada trabajabilidad del hormigón en estado fresco y un valor estipulado de su resistencia a compresión, a una edad determinada, una vez endurecido.

La dosificación de hormigones con áridos reciclados se realiza con los métodos habitualmente empleados en los hormigones convencionales. Una vez establecida la dosificación tipo se efectúan amasadas de prueba que permiten ajustar la dosificación definitiva.

Para asegurar la calidad del hormigón reciclado fabricado es muy importante realizar un control exhaustivo de la densidad, absorción y humedad del árido reciclado tanto durante el

proceso de producción como en el acopio^[111]. Si la dosificación se realiza en peso se tendrá en cuenta la menor densidad del árido reciclado.

Resulta muy conveniente realizar ensayos previos para determinar la cantidad de agua libre necesaria para obtener una determinada consistencia. También puede determinarse la relación árido grueso/árido fino para conseguir la consistencia deseada o la relación agua libre/cemento para obtener la resistencia adecuada^[111].

Las propiedades de los hormigones fabricados con áridos reciclados se ven afectadas negativamente a medida que aumenta el porcentaje de árido sustituido. No suele sobrepasarse el 50% de sustitución del árido grueso cuando se pretende emplear el hormigón con fines estructurales.

2.4.1 CONTENIDO DE AGUA.-

La cantidad de agua necesaria para la dosificación de hormigones con áridos reciclados es mayor que la que se precisa en un hormigón convencional debido, sobre todo, a la presencia de mortero adherido a la matriz rocosa de los áridos que hace que la absorción de los mismos presente valores superiores a la de los áridos naturales. El incremento de agua necesario para obtener la misma consistencia se estima entre un 5% y un 10% respecto a un hormigón convencional^[42].

En caso de utilizar áridos gruesos y finos reciclados completamente secos el incremento de agua estaría entorno al 15%^[42].

2.4.2 CONTENIDO DE CEMENTO.-

Debido a la peor calidad del árido reciclado se necesitará un incremento adicional en la cantidad de cemento, respecto al mismo hormigón fabricado con áridos naturales, para mantener la resistencia y la consistencia. Según los estudios consultados, cuando se sustituya el árido grueso en su totalidad por árido reciclado la cantidad de cemento aumenta en más del 5%. Si se sustituye el árido grueso y el fino por árido reciclado dicha cantidad aumenta hasta un valor superior al 15%^[107]. Para sustituciones del 50% del árido natural por árido reciclado el incremento de cemento oscila entre el 5% y el 6%^[64].

2.4.3 RELACIÓN AGUA-CEMENTO.-

La fabricación de hormigón utilizando áridos reciclados incrementa la cantidad de agua de amasado, respecto a un hormigón fabricado con áridos naturales con la misma consistencia, debido a la mayor absorción que presentan dichos áridos. El aumento de la consistencia en el hormigón fresco es progresivo, conforme aumenta el tiempo de amasado, ya que la absorción de agua por parte del árido se va efectuando de manera lenta y gradual. Dichos incrementos oscilan entre un 5% y un 10% del volumen de agua total^[103,105]. Cuando en la fabricación se utiliza árido reciclado grueso y fino dichos porcentajes aumentan entre un 14% y un 15%^[41].

Al aumentar la cantidad de agua cuando se utilizan áridos reciclados, la cantidad de cemento deberá aumentar en la misma proporción para que la relación agua-cemento permanezca invariable. Cuando en el hormigón reciclado se sustituye el árido grueso y el árido fino se produce una caída en la resistencia a compresión comprendida entre un 10 y un 50%^[43] por lo que la cantidad de cemento añadida para mantenerla ha de ser mayor.

Para establecer la cantidad de agua necesaria se tendrán en cuenta las siguientes relaciones^[96]:

$$A_{\text{total}} = A_{\text{árido}} + A_{\text{añadida}}$$

$$A_{\text{añadida}} = A_{\text{libre}} + A_{\text{absorbida}}$$

Hay que dejar constancia de la falta de homogeneidad de este ajuste debido a las variaciones que puede presentar el árido respecto a su humedad y a su absorción.

Si el árido reciclado que vaya a utilizarse se satura previamente se puede prevenir el aumento de consistencia y el rápido endurecimiento del hormigón. Para alcanzar este estado de saturación los estudios consultados no se ponen de acuerdo. Así, algunos autores^[65,101] sumergen el árido veinticuatro horas y después lo secan superficialmente, otros^[83] recomiendan sumergir el árido una hora y algún estudio considera suficiente diez minutos^[111,112]. Indicar al respecto los problemas que surgirían para realizar la saturación de los áridos dentro de las plantas de fabricación de hormigón.

Con el fin de mantener la misma consistencia sin incrementar la cantidad de agua puede añadirse como aditivo un superplastificante^[33], lo que redundará en mejorar la resistencia ya que la relación agua-cemento efectiva es menor. Por otra parte, llevará aparejado un coste más elevado. Se añadirá poco antes de la puesta en obra y de manera gradual para evitar que durante el periodo de absorción del árido reciclado parte del aditivo sea absorbido por este^[70,88].

2.4.4 RELACIÓN ÁRIDO FINO-ÁRIDO GRUESO.-

Esta relación nos permite obtener la cohesión deseada en el hormigón reciclado y su valor es próximo al que presentan los hormigones convencionales, aunque durante el amasado del hormigón, como ya comentamos con anterioridad, la cantidad de finos aumenta provocando, por lo tanto, un incremento de la relación árido fino-árido grueso por encima del valor óptimo correspondiente^[111]. En todo caso la curva de referencia para el árido reciclado deberá ser igual a la del árido original.

2.4.5 ADICIONES.-

En estudios realizados en nuestro país^[35,38] se ha observado que el empleo de adiciones de humo de sílice, en un porcentaje del 8% en peso sobre el peso de cemento, mejora la resistencia a compresión y la fisuración. Las mezclas obtenidas presentan una trabajabilidad similar a la del hormigón de control.

2.5 PROPIEDADES DEL HORMIGÓN RECICLADO FRESCO.-

2.5.1 CONSISTENCIA.-

La fabricación de hormigones con áridos reciclados conlleva un aumento de la consistencia, para una misma relación agua-cemento, respecto a un hormigón convencional^[14,55]. Al presentar los áridos reciclados valores elevados en su absorción, la cantidad de agua absorbida por los áridos durante el proceso de amasado del hormigón será tanto más importante cuanto mayor sea el porcentaje de sustitución del árido. Como

consecuencia se producirá una reducción de la relación agua-cemento efectiva y, por lo tanto, un aumento de la consistencia del hormigón fresco.

Otros estudios realizados^[47,58] han obtenido consistencias similares en hormigones fabricados con áridos reciclados y en el correspondiente hormigón de control utilizando diferentes valores para la relación agua-cemento.

Aunque el factor fundamental que provoca un aumento en la demanda de agua en estos hormigones es la elevada absorción del árido reciclado, otros factores como su textura rugosa o el cambio de la granulometría del árido reciclado durante el proceso de amasado pueden contribuir a dicho incremento.

En la **figura 2.8** puede observarse la evolución de la consistencia en un hormigón de control y en otro fabricado con árido reciclado. Se ha utilizado la misma dosificación y la misma curva granulométrica para ambos^[88].

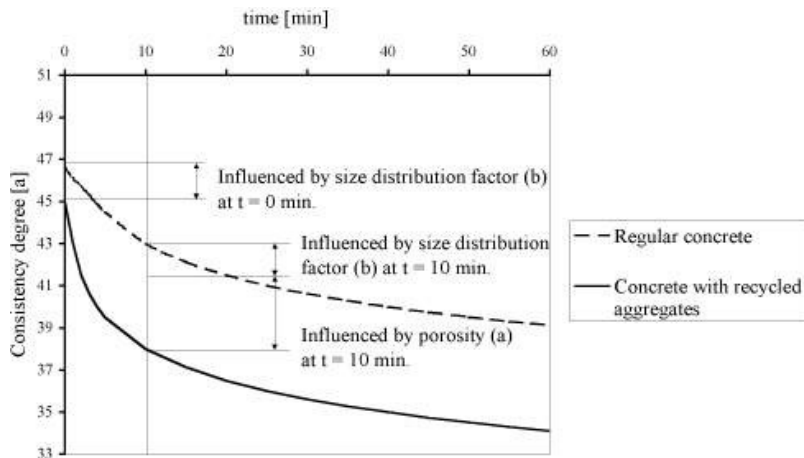


Figura 2.8 Comparación de consistencia entre el hormigón reciclado y el de control^[88].

Como puede observarse el aumento en la consistencia es debido, en principio, al desprendimiento del mortero adherido al árido. Después de transcurridos los diez primeros minutos la consistencia del hormigón aumenta considerablemente a causa de la elevada absorción del árido reciclado. A partir de entonces ambas curvas discurren casi paralelamente.

Para obtener una determinada consistencia puede procederse de varios modos:

1. Estimar la cantidad de agua adicional mediante ensayos previos.
2. Saturar el árido reciclado antes de proceder al amasado.
3. Utilizar un aditivo superplastificante.

Respecto a la primera opción cabe indicar que, al presentar bastante heterogeneidad el árido reciclado, será difícil establecer un valor único para la absorción y para la cantidad de agua que necesitará añadirse^[111].

La saturación del árido reciclado, para la producción de hormigón a escala industrial, presenta problemas logísticos ya que en la planta de fabricación habría que disponer de las instalaciones adecuadas que permitieran sumergir los áridos que se encuentran en el acopio hasta lograr su saturación. En los trabajos consultados al respecto^[53,76,92] puede observarse que en hormigones fabricados con áridos reciclados saturados previamente la consistencia disminuye significativamente respecto a los mismos hormigones que incorporaban el árido reciclado seco.

La adición de un aditivo superplastificante en un momento dado permite corregir la consistencia del hormigón sin añadir cantidad alguna de agua. El aumento del coste de fabricación puede verse compensado por la baja relación agua-cemento, en relación con los dos métodos anteriores, y el consiguiente aumento de la resistencia del hormigón^[70,88]. El superplastificante debe añadirse, preferiblemente, un poco antes de la colocación del hormigón en el encofrado.

En la **figura 2.9** puede observarse el efecto causado por el superplastificante en la consistencia del hormigón reciclado en relación con un hormigón de control de igual dosificación y con la misma granulometría en los áridos. Una vez añadido el aditivo en el porcentaje adecuado, el aumento en la fluidez de la masa del hormigón reciclado es, como puede observarse, superior al hormigón de control durante un periodo de tiempo estimado en treinta minutos. Es muy importante no sobrepasar el porcentaje máximo ya que puede provocar disgregación en la mezcla como efecto secundario.

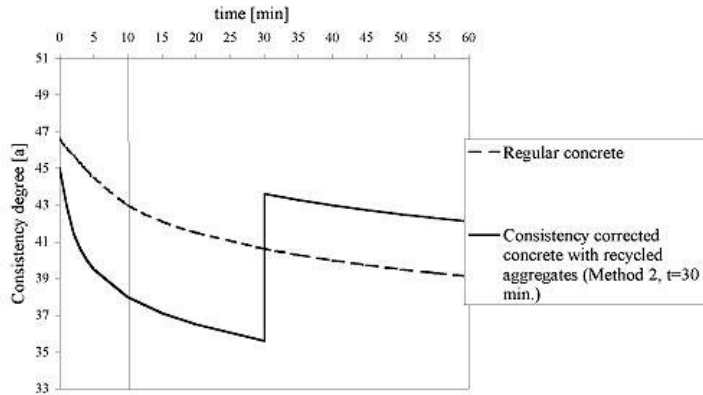


Figura 2.9 Corrección de la consistencia por adición de superplastificante^[88].

Por otra parte, si se utiliza árido fino reciclado se observa, a través de la bibliografía consultada^[101], un aumento significativo de la consistencia. Se produce debido a la elevada absorción que presenta dicha fracción.

El empleo de un tipo u otro de trituradora también influye en la consistencia debido a que generan áridos reciclados cuyas partículas presentan formas más o menos redondeadas. El empleo de áridos reciclados, cuyas partículas presentan formas llenas de aristas, proporciona hormigones de mayor consistencia que en aquellos en los que se utiliza áridos reciclados cuyas formas son más redondeadas.

2.5.2 DENSIDAD.-

La densidad del hormigón fresco fabricado con árido reciclado es inferior a la del hormigón normal, debido a la menor densidad que presenta el árido reciclado como consecuencia del mortero adherido que envuelve a la matriz rocosa.

Los valores de la densidad^[35,116] oscilan entre 2,13 y 2,40 kg/dm³.

2.5.3 AIRE OCLUIDO.-

Si bien algunos estudios realizados han determinado incrementos en la cantidad de aire ocluido en hormigones fabricados con árido reciclado, con variaciones entre el

hormigón de control y el hormigón reciclado inferiores al 7%, la mayoría de ellos no presentan variaciones considerables^[41,116].

2.5.4 EXUDACIÓN.-

Si el árido reciclado que se emplea en la fabricación de hormigón se utiliza previamente saturado la exudación será similar a la de los hormigones convencionales. Si, por el contrario, el árido reciclado se utiliza seco, la exudación del hormigón fabricado con árido reciclado presentará valores muy por debajo de los correspondientes al hormigón de control. Debido a la elevada absorción del árido reciclado el hormigón retiene mayor cantidad de agua^[102].

2.6 PROPIEDADES DEL HORMIGÓN RECICLADO ENDURECIDO.-

2.6.1 DENSIDAD.-

La menor densidad del árido reciclado hace que la densidad del hormigón reciclado endurecido sea inferior a la del hormigón convencional. En estudios realizados en nuestro país^[116] el descenso de la densidad es prácticamente inapreciable cuando la sustitución del árido grueso es del 20%. Cuando la sustitución es del 50% la densidad experimenta una reducción media del 2%. Dicha reducción llega a un valor medio del 3,5% cuando el porcentaje sustituido de árido grueso es del 100%.

2.6.2 RESISTENCIA A COMPRESIÓN.-

En general, la resistencia a compresión en los hormigones fabricados con árido reciclado disminuye con respecto a los convencionales, manteniendo en ambos la misma relación agua-cemento, siendo dicha disminución más significativa cuanto mayor sea el porcentaje de árido grueso sustituido. Las causas más influyentes en este aspecto son:

1. La cantidad de mortero adherido a la matriz rocosa que hace que el árido reciclado tenga una menor resistencia mecánica que el árido natural.

2. El aumento de zonas débiles en la masa de hormigón endurecido al utilizar áridos reciclados, ya que a la superficie de contacto entre el árido natural y el mortero adherido que lleva se suma la superficie de contacto, más débil aún, existente entre los áridos reciclados y el mortero nuevo.

En la mayoría de los estudios consultados la influencia de los áridos reciclados sobre la resistencia a compresión del hormigón se ha analizado estudiando separadamente los dos casos siguientes:

1. Sustitución de diferentes porcentajes del árido grueso natural por árido reciclado.
2. Sustitución de diferentes porcentajes del árido grueso y del árido fino natural por árido reciclado.

Sin embargo, se ha llevado a cabo alguna experiencia^[24] sustituyendo únicamente el árido fino por árido fino reciclado, obteniéndose resultados que van desde una disminución de resistencia del 3,4% para un porcentaje de sustitución del 20% hasta un 7,6% cuando se sustituye el 100%.

C-S. Poon y D. Chan^[11] sustituyeron la arena por restos cerámicos y de baldosas. Para un porcentaje máximo de sustitución de restos de ladrillo del 20% la resistencia a compresión a 28 días disminuyó en un 12,3%. En el caso de residuos de baldosas la disminución de resistencia fue de un 15,4%.

La **influencia del porcentaje de árido reciclado** en la resistencia del hormigón es muy notable. En los estudios consultados, en los que se sustituye únicamente el árido grueso y cuyos datos quedan reflejados en la **tabla 2.17**, las pérdidas de resistencia son muy pequeñas cuando el porcentaje de sustitución no supera el 30%. Cuando el porcentaje sustituido es del 50% la resistencia varía en una horquilla comprendida entre una ganancia puntual del 5% y pérdidas de hasta el 16%. Cuando dicho porcentaje aumenta al 100% las pérdidas de resistencia oscilan entre el 1% y el 23%.

Cuando se sustituye íntegramente el árido grueso y el árido fino, según los resultados mostrados en la **tabla 2.17**, las pérdidas de resistencia se hacen más acusadas situándose en una horquilla comprendida entre el 6% y el 30%. Algún estudio

puntual, en el que se han utilizado áridos saturados, presenta resultados en los que llegan a producirse incrementos en la resistencia de hasta el 16%.

Referencia	Resistencia a compresión. (MPa)			% sustituido	Observaciones
	HC	HR	%Δ		
	44-34	43-33	-2% -3%	30% AG	
Kasai 1988 ^[68]	44-34	42-32	-5% -6%	50% AG	
	44-34	40-26	-10% -23%	100% AG	
Mukai 1988 ^[66]	31,7	29,8	-6%	100% AG y AF	Aumenta contenido de agua y cemento
	40	38	-5%	100% AG	
Kikuchi 1993 ^[62]	40	35	-12,5%	30% AG y AF	Aumenta contenido de agua y cemento
	40	38	-5%	15% AG y AF	
Yanagi 1994 ^[155]	34	27,3	-20%	100% AG	Impurezas (5-8%)
Tavakoli 1996 ^[124]	33	33,5-32	+1,5% -3%	100% AG	Aumenta contenido de agua y cemento
Barra 1996 ^[5]	44,4	40,3	-9%	100% AG	Aumenta contenido de agua y cemento
Di Niro 1998 ^[17]	45	38	-16%	50% AG	
Knight 1998 ^[64]	45,2	46,7-43	+3% -5%	30% AG y AF	Igual contenido de cemento y agua libre
	45,2	44,7-34,8	-1% -23%	60% AG y AF	
Nagataki 2000 ^[87]	-	-	+3% +16%	100% AG y AF	Árido saturado
Park 2001 ^[94]	41,5	38	-8%	50%	
		40	-4%	100% AG	
Ajdukiewicz 2001 ^[2]	37,7	34,6	-8%	100% AG	Mas agua HR. Humo de sílice

Tabla 2.17: Resistencia a compresión del hormigón reciclado.

Referencia	Resistencia a compresión. (MPa)			% sustituido	Observaciones
	HC	HR	%Δ		
González B. 2002 [165]	38,3-	40,2-	+5%	50% AG	Aumento 12% de agua y cemento.
	41,8	42,9	+3%	50% AG	
Gómez J. 2002 [11]	39	35,8	-8%	60% AG	400 kg/m ³ de cemento
	39	34,5	-12%	100% AG	
Kou S.C. 2004 [68]	45,9	43,6	-5%	20% AG	Con ceniza volante
	45,9	40,4	-12%	50% AG	
	45,9	38,3	-17%	100% AG	
Sánchez M. 2005 [116]	29,3	26,3	-10%	100% AG	a/c = 0,60
	40,3	34,4	-15%	100% AG	a/c = 0,50
	48,5	41,3	-15%	100% AG	a/c = 0,50
Jianzhuang X. 2005 [52]	26,9	25,4	-6%	20% AG	
	26,9	23,6	-12%	50% AG	
	26,9	23,8	-12%	100% AG	
Tsung Y. T. 2006 [126]	-	-	-20%	100% AG	Aumenta contenido de agua y cemento
	-	-	-30%	100% AG y AF	
Evangelista 2007 [24]		57,3	-3,4%	20% AF	
	59,3	58,8	-0,8%	50% AF	
		54,8	-7,6%	100% AF	
Exteberría 2007 [22]	29	28	-4%	25% AG	a/c = 0,55
	29	29	-	50% AG	a/c = 0,52
	29	28	-4%	100% AG	a/c = 0,50
Turatsinze 2007 [127]	33,5	33,1	-1%	100% AG	a/c = 0,40
	24,1	23,6	-2%	100% AG	a/c = 0,50
	18,1	17,9	-1%	100% AG	a/c = 0,60

Tabla 2.17: Resistencia a compresión del hormigón reciclado (continuación).

Aunque hay muy pocos estudios al respecto, las pérdidas en el valor de la resistencia a compresión son moderadas cuando se sustituye, únicamente, el árido fino, según L. Evangelista y J. de Brito^[24]. Fluctúan entre el 0,8% y el 7,6%.

Otro aspecto que influye directamente en la resistencia a compresión del hormigón reciclado es la **calidad del hormigón de origen**. Con un árido reciclado de baja calidad, procedente de un hormigón de baja resistencia o en mal estado, fabricaremos un hormigón reciclado cuya resistencia a compresión no superará la del hormigón original ni reduciendo la relación agua-cemento. Por el contrario, si los áridos reciclados proceden de hormigones con una elevada calidad –hormigón de origen con resistencia elevada y en buen estado- el hormigón reciclado obtenido sustituyendo el árido grueso a partir de ellos podrá presentar resistencias incluso superiores a las del hormigón de control. Así podemos observar en el **figura 2.10** como, a partir de áridos procedentes de hormigones cuya resistencia era de 30 N/mm², pueden fabricarse hormigones reciclados, sustituyendo el árido grueso, con resistencias por encima de los 35 N/mm² reduciendo adecuadamente la relación agua-cemento.

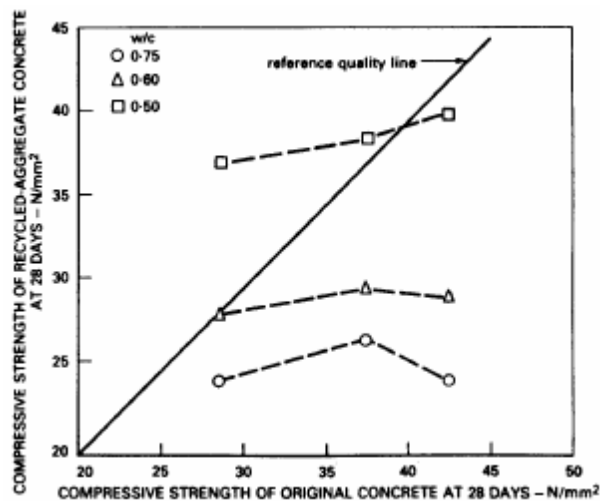


Figura 2.10 Relación entre la resistencia compresión del hormigón original y el reciclado^[103].

Cuando la sustitución del árido se realiza tanto en la fracción gruesa como en la fracción fina la influencia de la calidad del hormigón de origen reviste mayor importancia que en el caso anterior. Según los estudios consultados^[62] el empleo de áridos

reciclados procedentes de hormigones de elevada calidad no permite obtener hormigones reciclados que alcancen las resistencias del hormigón de control cuando la sustitución del árido natural se realiza en su totalidad. En cualquier caso sería conveniente llevar a cabo más estudios que nos permitieran establecer como definitivas dichas conclusiones.

El **contenido de mortero adherido** del árido reciclado también influye decisivamente sobre la resistencia a compresión del hormigón reciclado. La reducción de resistencia experimentada en un hormigón fabricado con árido reciclado que llevaba un 35,5% en peso de mortero adherido fue del 15%, mientras que en el mismo hormigón, fabricado con el mismo tipo de árido reciclado pero conteniendo un 67,6% de mortero adherido, la caída de resistencia fue del 30%^[89].

La **evolución de la resistencia a compresión** en el hormigón reciclado durante las cuatro primeras semanas es similar a la de hormigón de control aunque algunos estudios^[21,35,47] indican una tendencia de los hormigones reciclados a presentar resistencias superiores a los hormigones de control a partir de los 28 días. A este respecto puede observarse la **figura 2.11**.

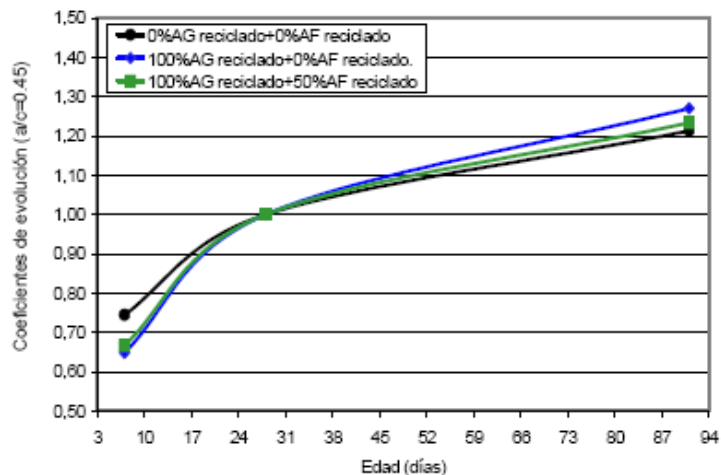


Figura 2.11: Evolución de la resistencia compresión del hormigón reciclado^[47].

Las caídas de resistencia en los hormigones reciclados cuando la aplicación de la carga se realiza a una velocidad lenta son mayores que en los hormigones de control.

Aunque hay pocos estudios realizados al respecto, cabe resaltar los resultados obtenidos por González Fonteboa^[35] en los que puede observarse que se producen descensos en la resistencia del hormigón reciclado en torno al 9%. Dichos estudios se llevaron a cabo utilizando cuatro probetas cilíndricas; dos de ellas se rompieron a velocidad normalizada (8,66 kN/s) y otras dos a velocidad lenta (0,06 kN/s). De todas formas sería muy conveniente realizar estudios complementarios que permitan un conocimiento más amplio de las roturas a carga lenta y los fenómenos diferidos en los hormigones reciclados.

El **modo de rotura** en los ensayos de resistencia a compresión se produce principalmente de forma intragranular debido a la cantidad de mortero adherido que lleva consigo el árido reciclado. En cualquier caso será función de la naturaleza del árido natural y de la cantidad de mortero adherida al mismo^[4].

Las grandes diferencias que pueden presentar, en lo referente a su calidad, los áridos reciclados procedentes de hormigones repercutirán, sin duda, en la resistencia a compresión del hormigón haciendo que el coeficiente de variación sea elevado.

El **coeficiente de variación** adoptará valores bajos si el árido reciclado es homogéneo y es contrastada su calidad. Según estudios consultados^[158] en hormigones fabricados en laboratorio, con un 75% de sustitución del árido grueso y con unas relaciones a/c de 0,40, 0,50 y 0,60, los coeficientes de variación de la resistencia a compresión han sido, respectivamente, el 7,1%, el 6,8% y el 7,6%.

Cuando el hormigón origen de los áridos reciclados no presenta una uniformidad elevada al proceder de distintas partidas, dicho coeficiente puede alcanzar valores^[42] que llegan hasta el 25%. En estas ocasiones la dosificación del hormigón debe proporcionar resistencias a compresión altas para lograr obtener la resistencia característica requerida.

Respecto a la **normativa existente** al respecto podríamos destacar las especificaciones, relativas a la categoría resistente de los hormigones reciclados, establecidas por distintas normas internacionales y referidas al ensayo sobre probeta cilíndrica. Dichos valores quedan recogidos en la **tabla 2.18**.

Normativa	Árido reciclado	f_c (N/mm ²)
RILEM	Tipo I	16
	Tipo II	50
	Tipo III	Sin límite
Gran Bretaña	RCA	40
	RA	16
	≤ 20% AG	Sin límite
Alemania	Tipo 1	25-35 *
	Tipo 2	25-35 *
	Tipo 3	25-35 *
	Tipo 4	25-35 *
Japón	H	18-24
	M	16-18
	L	< 16
Australia **	≤ 20% AG	Sin límite
	Clase I	40
	≤ 20% AG	Sin límite
España	≤ 20% AG	20-40
	> 20% AG	Ensayos previos

* Resistencia a compresión en probeta cúbica. En ambientes agresivos se comprobará la reacción álcali-árido.
** Aplicaciones no estructurales.

Tabla 2.18: Recomendaciones para la resistencia a compresión en hormigones reciclados.

2.6.3 MÓDULO DE ELASTICIDAD.-

Cuanto mayor sea el módulo de elasticidad del árido total y mayor sea la proporción en la que se mezclen con los demás componentes más alto será el valor del módulo de elasticidad del hormigón fabricado con ellos. Los áridos reciclados están formados por una matriz rocosa y por la cantidad de pasta que los envuelve. El módulo de elasticidad de la pasta es inferior al del árido y al del hormigón^[26]. Debido a esta circunstancia los áridos reciclados presentarán un módulo de elasticidad inferior al de los

áridos naturales y el módulo de elasticidad del hormigón reciclado será inferior al del hormigón convencional.

La textura superficial más rugosa de los áridos reciclados y las pequeñas microfisuras que puede presentar el mortero adherido hacen que el módulo de elasticidad se reduzca^[51].

En la **tabla 2.19** se observan los datos obtenidos de diferentes estudios consultados. Cabe destacar que en hormigones con sustitución del árido grueso en un porcentaje que no sobrepase el 30% la caída del valor del módulo se sitúa en torno del 4% al 10%. Cuando la sustitución llega hasta el 50% del árido grueso la reducción que experimenta el módulo de elasticidad puede llegar al 20%. Si el árido grueso sustituido es del 100% la reducción del módulo aumenta llegando a alcanzar valores del 50%. Cuando también se sustituye el árido fino dichas reducciones llegan, en casos puntuales, hasta el 80%.

Referencia	Módulo elasticidad hormigón reciclado	
	% sustitución	% reducción
Ravindrarah 1988 ^[105]	100% AG	30
	100% AF	20
	100% AG y AF	35
Nishibayashi 1988 ^[89]	100% AG	15-35
Hansen 1992 ^[43]	100% AG	15-50
Merlet 1993 ^[79]	100% AG y AF	25
Topcu 1995 ^[13]	100% AG y AF	80
Kikuchi 1998 ^[62]	100% AG	5-20
González B. 2002 ^[35]	50% AG	11
Sánchez M. 2005 ^[116]	20% AG	10
	50% AG	20
	100% AG	40

Tabla 2.19: Valores del módulo de elasticidad en hormigones reciclados.

Referencia	Módulo elasticidad hormigón reciclado	
	% sustitución	% reducción
Evangelista 2007 [24]	30% AF	4
	100% AF	19
Etxeberria 2007 [22]	25% AG	4
	50% AG	12
	100% AG	15
Casuccio 2008 [10]	100% AG	13-18

Tabla 2.19: Valores del módulo de elasticidad en hormigones reciclados (continuación).

En la **figura 2.12** puede observarse como el módulo de elasticidad de los hormigones reciclados disminuye a medida que aumenta el porcentaje de sustitución del árido grueso^[52]. Puede observarse que cuando la sustitución del árido grueso alcanza el 100% la reducción del módulo de elasticidad llega al 45%.

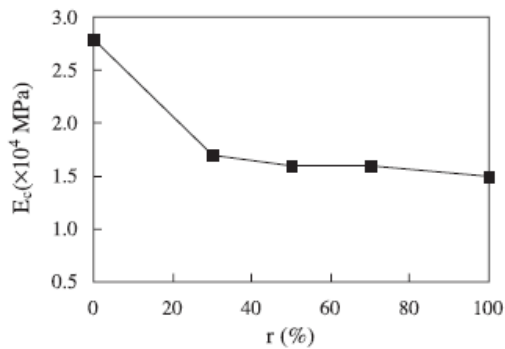


Figura 2.12 Reducción del módulo de elasticidad en hormigones reciclados^[52].

A continuación se exponen diferentes formulaciones, según diversos autores, que relacionan el valor del módulo de elasticidad del hormigón reciclado con la resistencia a compresión del mismo.

El Instituto de Arquitectura Japonés^[54] proporciona una expresión para el módulo de elasticidad en la que además se tiene en cuenta el peso específico del árido utilizado. Es válida tanto para sustituciones del árido grueso como del árido fino.

$$E_c = 2,1 \cdot 10^5 \left[\frac{\gamma}{2,3} \right]^{1,5} \cdot \sqrt{\frac{f_c}{200}}$$

E_c = Modulo de elasticidad estático (kg/cm²).

f_c = Resistencia a compresión (kg/cm²).

γ = Peso específico en t/m³. Válida entre 1,9 y 2,3.

Zilch an Roos^[159] proponen la siguiente expresión cuando solo se sustituye la fracción fina.

$$E_c = 9100 \cdot (f_c + 8)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\gamma}{2400} \right)^2$$

E_c = Modulo de elasticidad estático (MPa).

f_c = Resistencia a compresión (MPa).

γ = Peso específico en kg/m³.

Rasheeduzzafar^[120] propone la siguiente expresión:

$$E_c = 80 \cdot w^{3/2} \cdot \sqrt{f_c} - 5 \cdot 10^6$$

E_c = Modulo de elasticidad estático (lb/in²).

f_c = Resistencia a compresión (lb/in²).

w = Peso específico en (lb/ft³).

Ravindrarajah propone, a partir de trabajos efectuados al respecto^[104], las siguientes expresiones para relacionar el módulo dinámico de elasticidad y la resistencia a compresión del hormigón.

Para un hormigón convencional se tiene:

$$E_d = 5,31 \cdot f^{0,5} + 5,38$$

Para hormigón reciclado en el que se sustituye tanto el árido grueso como el fino la expresión es:

$$E_d = 3,02 \cdot f^{0,5} + 10,67$$

Para hormigón reciclado en el que se sustituye únicamente el árido el valor es:

$$E_d = 3,48 \cdot f^{0,5} + 13,05$$

En las tres expresiones anteriores:

E_c = Modulo de elasticidad dinámico (kN/mm²).

f_c = Resistencia a compresión en probeta cúbica (N/mm²).

En la **figura 2.13** pueden observarse la relación existente entre la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad según las expresiones anteriores.

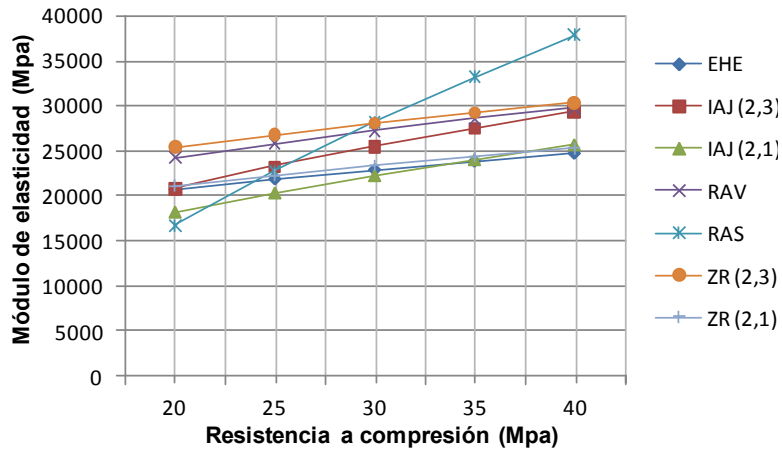


Figura 2.13 Relación entre la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad en hormigones reciclados según diversos autores.

En cuanto a la normativa existente consultada al respecto, cabe destacar los coeficientes de corrección que especifican tanto la RILEM como la norma belga. Dichos coeficientes se aplican a las expresiones del módulo de elasticidad utilizadas para hormigones convencionales y quedan recogidos en la **tabla 2.20**.

Normativa	Tipo de árido	Coefficiente
RILEM	Tipo I	0,65
	Tipo II	0,8
	Tipo III	1
Bélgica	GBSB I	0,65
	GBSB II	0,8

Tabla 2.20: Coeficientes de corrección del módulo de elasticidad en hormigones reciclados.

2.6.4 RESISTENCIA A TRACCIÓN.-

Los estudios consultados proporcionan valores dispersos en la resistencia a tracción indirecta de los hormigones reciclados. Dichas variaciones pueden producirse al utilizarse áridos reciclados con distintas calidades para la fabricación de hormigón reciclado. Las pérdidas de resistencia son muy pequeñas^[36] cuando el porcentaje de sustitución del árido grueso es inferior al 50%. Si la sustitución del árido grueso por árido reciclado es del 100% las pérdidas oscilan dentro rango comprendido entre el 6% y el 32% tal y como puede observarse en la **tabla 2.21**.

Resistencia a tracción en HR		
Referencia	%sustitución	% de variación
Hansen 1992 ^[43]	100% AG y AF	-20, -30
Di Niro 1998 ^[17]	50% AG	-3,2
	100% AG	-31, -32
Yamato 1998 ^[152]	100% AG	10, -20
Katz 2000 ^[59]	100% AG	-6
Gómez J. 2002 ^[31]	20% AG	0
	50% AG	0
	100% AG	-9, -11
González B. 2002 ^[35]	50% AG	1, -2
Kou S.C. 2004 ^[66]	20% AG	-8
	100% AG	-17
Sánchez M. 2005 ^[116]	50% AG	-1
	100% AG	-10
Turatsinze 2005 ^[127]	50% AG	-10
Etxeberria 2007 ^[22]	50% AG	7
	100% AG	9
Evangelista 2007 ^[24]	30% AF	-5
	100% AF	-30

Tabla 2.21: Variación de la resistencia a tracción en hormigones reciclados.

En los estudios que reflejan un aumento significativo de la resistencia a tracción^[68] la relación agua-cemento efectiva se redujo en relación con la del hormigón de control. La heterogeneidad en los resultados expuestos es debida a la variación en las condiciones de dosificación, consistencia o resistencia de los hormigones ensayados. Algunas normativas como la belga y las especificaciones de la RILEM consideran la misma resistencia a tracción para hormigones convencionales y hormigones reciclados fabricados en las mismas condiciones y con los mismos parámetros.

Estudios realizados en nuestro país^[116] parecen indicar que la reducción de la resistencia a tracción en los hormigones reciclados es pequeña en niveles de resistencia bajos pero se incrementa al aumentar la resistencia del hormigón. A tal respecto proponen los coeficientes de reducción de la resistencia a tracción indirecta que se indican en la **tabla 2.22**.

Resistencia a tracción indirecta del hormigón de control (N/mm ²)	Coeficiente de reducción	
	20-50% A.R.	100% A.R.
2,5	0,98	0,97
3	0,98	0,88
3,5	0,98	0,81

Tabla 2.22: Coeficiente de reducción la resistencia a tracción en hormigones reciclados.

2.6.5 RESISTENCIA A FLEXOTRACCIÓN.-

Las variaciones de la resistencia a flexotracción en los hormigones reciclados presentan unas oscilaciones, en función del % del árido sustituido, similares a las experimentadas en la resistencia a tracción. En la **tabla 2.23** puede observarse que dichas reducciones son pequeñas cuando la sustitución no es superior al 50% del árido grueso. Al llegar a sustituir el 100% del árido grueso o cuando se sustituye el 100% del árido total la reducción de la resistencia a flexión es más notable.

Otros estudios realizados en nuestro país^[6] establecen descensos notables en la resistencia a flexotracción cuando se utilizan áridos reciclados saturados en lugar de secos.

Resistencia a flexión en HR		
Referencia	%sustitución	% de variación
Ravindrarajah 1985 ^[103]	100% AG	-1, -10
Ravindrarajah 1987 ^[104]	100% AG	-15, 12
Ravindrarajah 1988 ^[105]	100% AG y AF	-15, 29
Hansen 1992 ^[43]	100% AG y AF	20
Kikuchi 1993 ^[62]	100% AG	-19, 11
Dhir 1999 ^[14]	20% AG	-2
	30% AG	-2
	50% AG	2
Katz 2000 ^[59]	100% AG	-6
Limbachiya 2000 ^[72]	30% AG	2
	50% AG	-6, 2
	100% AG	-4, 3
Park 2001 ^[93]	30% AG	-4
	50% AG	-4
M. Rakshvir 2006 ^[74]	30% AG	-10
	50% AG	-15

Tabla 2.23: Variación de la resistencia a flexión en hormigones reciclados.

2.6.6 RESISTENCIA A CORTANTE.-

La disminución de la resistencia a cortante, según los estudios consultados, alcanzan el 26% cuando se sustituye únicamente el árido grueso. Dichas pérdidas alcanzan el 41% cuando la sustitución también se realiza en el árido fino tal y como puede observarse en la **tabla 2.24**.

Otros autores^[23] establecen que sustituciones por debajo del 25% del árido grueso apenas afectan a la resistencia a cortante de elementos estructurales fabricados con áridos reciclados. Otros estudios^[37] establecen un buen comportamiento a cortante del hormigón reciclado con sustituciones del 50% del árido grueso.

Resistencia a cortante en HR		
Referencia	%sustitución	% de variación
Ikeda et al 1988 ^[47]	100% AG	-26
Ikeda et al 1988 ^[47]	100% AG 50% AF	-41
Hansen et al 1992 ^[44]	100% AG 50% AF	-32

Tabla 2.24: Variación de la resistencia a flexión en hormigones reciclados.

2.6.7 RETRACCIÓN POR SECADO.-

En los hormigones reciclados la retracción por secado es mayor que en los convencionales. Dicho aumento puede ser debido, entre otras causas, a que el módulo de elasticidad del árido reciclado es inferior al del árido convencional por la cantidad de mortero que lleva adherido, a la mayor cantidad de agua empleada en su dosificación para conseguir la misma consistencia que en el hormigón convencional y por la mayor absorción del árido reciclado^[4].

Es evidente que el valor de la retracción será tanto mayor cuanto más alto sea el porcentaje de sustitución del árido natural por el árido reciclado. En la **tabla 2.25** pueden observarse los valores que se han obtenido en diferentes estudios consultados.

Puede observarse, a través de estos datos, que la retracción por secado aumenta considerablemente debido al árido reciclado, alcanzando incrementos del 100% cuando se sustituye íntegramente el árido. Cuando la sustitución solo se lleva a cabo en el árido grueso el valor medio del incremento de la retracción puede establecerse alrededor del 50%. En sustituciones que no sobrepasen el 50% los valores se reducen significativamente.

Retracción por secado en HR		
Referencia	%sustitución	% de variación
Ravindrarajah 1987 ^[104]	100% AG	55
	100% AG y AF	100
Ravindrarajah 1988 ^[105]	100% AG	Gran aumento
	100% AF	40
	100% AG y AF	100
Kashino 1988 ^[58]	100% AF	10
Hansen 1993 ^[45]	100% AG	70-80
Merlet 1993 ^[79]	100% AG y AF	50
	20% AG	8
Kou S.C.2004 ^[86]	50% AG	15
	100% AG	25
Sánchez M. 2005 ^[116]	20% AG	5
	100% AG	60
Batayneh 2006 ^[75]	50% AG	19
	100% AG	45

Tabla 2.25: Variación de la retracción por secado en hormigones reciclados.

La **calidad del hormigón** del que procede el árido reciclado influye en la retracción ya que, según estudios consultados^[40,67,104], al presentar los áridos reciclados procedentes de hormigones de mayor resistencia mayor cantidad de mortero adherido, presentarán valores más elevados de la retracción que los hormigones de peor calidad en los que, generalmente, y utilizando el mismo sistema de trituración presentan menor cantidad de mortero alrededor de la matriz rocosa del árido. Sin embargo, estudios posteriores realizados en Japón presentan resultados^[62] que rebaten la teoría anterior ya que en ellos, tal y como puede observarse en la **figura 2.14**, la retracción por secado es menor cuando la calidad del hormigón de origen, medida en términos de resistencia a compresión, es más elevada.

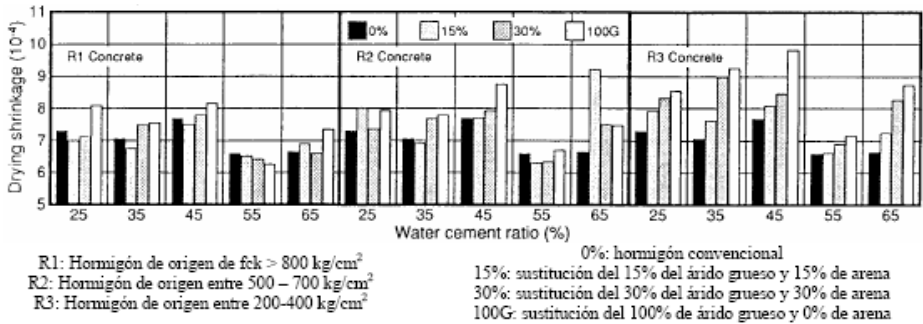


Figura 2.14 Retracción por secado en hormigones reciclados^[77].

A mayor **tamaño máximo del árido** menor será la retracción^[26] ya que se necesitará una cantidad menor de pasta para la fabricación del hormigón. Por otra parte, al incorporar las fracciones mayores del árido menor cantidad de mortero adherido, la retracción también disminuirá.

Es indudable que los **procesos de trituración** empleados en la obtención del árido reciclado también tendrán influencia en la retracción del hormigón. Cuanto mejor se lleven a cabo dichos procesos menor será la cantidad de mortero adherido que presente el árido reciclado y menor la retracción.

Respecto a las recomendaciones expresadas al respecto cabe destacar que la RILEM establece como coeficiente de corrección para la retracción del hormigón reciclado, a partir del hormigón convencional utilizado como referencia, un valor de 1,5 para el árido tipo II procedente de residuos de hormigón. Para el árido tipo III, mezcla de árido natural y árido reciclado, el valor del coeficiente es la unidad.

Las especificaciones belgas emplean un coeficiente de corrección igual a 2 para los áridos denominados GBSB I, áridos procedentes de residuos cerámicos, y un coeficiente de corrección igual a 1,50 para los áridos GBSB II que proceden mayoritariamente de residuos de hormigón.

En Holanda recomiendan unos coeficientes de corrección de la retracción en hormigones reciclados igual a 1,35 y 1,55. El primero de ellos se aplica a hormigones reciclados en los que se sustituyó el 100% del árido grueso con un incremento en la cantidad de cemento de 40 kg/m^3 . El segundo coeficiente se aplica cuando con la sustitución del 100% del árido grueso se incrementa la cantidad de cemento en 50 kg/m^3 .

Para un supuesto intermedio entre los dos anteriores el coeficiente de corrección sería la unidad.

2.6.8 FLUENCIA.-

La fluencia en los hormigones reciclados es superior a la experimentada por los hormigones convencionales, debido al mortero adherido que incorporan los áridos reciclados. A medida que aumenta el porcentaje de árido sustituido mayor es la fluencia. Los estudios consultados, resumidos en la **tabla 2.26**, presentan unos incrementos comprendidos entre el 15% y el 60%.

Fluencia en HR		
Referencia	%sustitución	% de variación
Ravindrarahaj 1987 ^[104]	100% AG	30
Nishibayashi 1988 ^[89]	100% AG	30, 50
Sagoe-Crentsil 1998 ^[111]	100% AG	40
Limbachiya 2000 ^[72]	30% AG	1, 2
	50% AG	15, 22
	100% AG	33, 65
Gómez J. 2002 ^[31]	100% AG	30
Gómez J.2003 ^[32]	15% AG	4
	100% AG	35

Tabla 2.26: Variación de la fluencia en hormigones reciclados.

La RILEM establece un coeficiente de corrección para el valor de la fluencia en hormigones reciclados igual a 1,25 cuando se emplean áridos Tipo I y Tipo II. Para los áridos Tipo III dicho coeficiente vale 1. En Bélgica el coeficiente corrector de la fluencia en hormigones reciclados, cuando se utilizan áridos GBSB I y GBSB II, es de 1,25 mientras que su valor es 1 para la mezcla de ellos. En Holanda el coeficiente de corrección adopta valores similares a los anteriores.

2.7 DURABILIDAD DEL HORMIGÓN RECICLADO.-

Puede comprenderse que la utilización de áridos reciclados dará lugar a hormigones que presente una mayor porosidad y permeabilidad. Como consecuencia el transporte de sustancias agresivas a través de la red de poros del hormigón se verá favorecido.

Por otra parte la pasta adherida al árido reciclado será de una naturaleza distinta a la fabricada con el nuevo hormigón pudiendo influir tanto en la carbonatación como en la reacción álcali-árido.

2.7.1 POROSIDAD, ABSORCIÓN Y PERMEABILIDAD.-

El deterioro del hormigón debido a fenómenos o causas distintas de las mecánicas se debe, principalmente, a la presencia de agua en su interior con sustancias perjudiciales para el hormigón disueltas en ella. El transporte de agua hacia el interior del hormigón se realiza a través de los poros y fisuras que presenta y depende del tipo, del tamaño y de su distribución.

Al utilizarse árido reciclado en la fabricación de hormigón, la porosidad, la absorción y la permeabilidad aumentan como se pone de manifiesto en diferentes estudios realizados^[5,31,34,35,116]. El aumento se hace más notable al incrementarse el porcentaje de sustitución. Los valores de dichos incrementos oscilan entre un 15% y un 70%. Cuando también se sustituye la fracción fina del árido los valores de la porosidad y la permeabilidad al aire llegan a duplicarse^[149]. Si el porcentaje de sustitución del árido grueso es inferior al 30% apenas se aprecian diferencias en los valores de la porosidad, y la absorción^[14, 121].

La permeabilidad del hormigón reciclado, para distintos niveles de resistencia, llega a alcanzar valores que oscilan entre dos y siete veces la permeabilidad del hormigón de control cuando se sustituye el 100% del árido grueso^[9,72,157].

2.7.2 RESISTENCIA A LA HELADA.-

El comportamiento del hormigón reciclado frente a la helada es, en general, peor que el del hormigón convencional^[8,35, 56, 114, 115]. Esto se debe fundamentalmente a la mayor absorción del árido reciclado lo que hace que, en caso de saturación, la

cantidad de agua absorbida sea superior a la del hormigón de control. Como consecuencia el deterioro del hormigón reciclado frente a ciclos de hielo deshielo será mayor. Si además se sustituye la fracción fina del árido su comportamiento empeora de manera notable aunque se le añadan aditivos aireantes^[12].

Cabe reseñar que cuando se utilizan áridos reciclados procedentes de hormigones en los que se emplearon aireantes el comportamiento frente a los ciclos hielo-deshielo mejora. Si se fabrican hormigones reciclados saturando los áridos previamente el comportamiento frente a la helada es peor que cuando se utilizan semisaturados y es siempre inferior al comportamiento que presenta el hormigón de control^[6]. En la **figura 2.15** puede observarse el peor comportamiento frente a sucesivos ciclos hielo-deshielo de hormigón reciclado saturado (Rn sat), con una resistencia a compresión de 50,2 MPa, y de hormigón reciclado semisaturado (Rn*), con una resistencia a compresión de 47 MPa frente a hormigón convencional de resistencia a compresión 55,7 MPa.

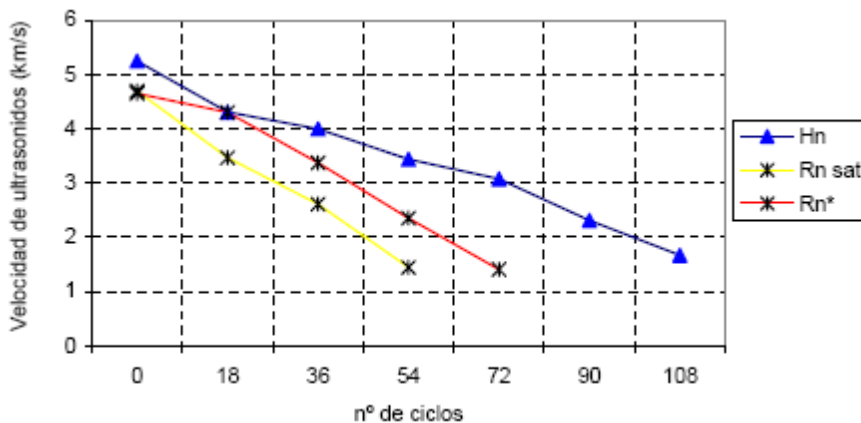


Figura 2.15 Resistencia a la helada de hormigón reciclado y convencional^[6].

En ensayos realizados^[63] con diversos porcentajes de árido grueso se han obtenido factores de durabilidad comprendidos entre 95 y 100 respecto al hormigón de control. Al sustituir el 20% del árido fino por material reciclado el factor de durabilidad decreció hasta 80. Cuando la cantidad sustituida de árido fino reciclada llegó al 50% se obtuvieron resultados insatisfactorios. En dichos ensayos el contenido de aire ocluido estaba comprendido entre el 3,1% y el 4,5%.

Los valores del coeficiente de durabilidad para hormigones reciclados, ensayados utilizando la norma ASTM C-666(A) y empleando aditivo aireante, son prácticamente iguales que los del hormigón de control, según Limbachiya^[71]. En la **tabla 2.27** pueden observarse los valores de dicho coeficiente obtenidos en el estudio aludido.

Factor de durabilidad en HR						
f _c (MPa)	H.control	HR (% de AG reciclado)			HR (% de AF reciclado)	
		30	50	100	20	50
		35	99	102	100	97
45	96	96	97	99	96	96

Tabla 2.27: Factor de durabilidad en hormigones reciclados^[71].

Por otra parte cabe reseñar que en los estudios llevados a cabo por Mulheron^[85], utilizando un procedimiento no normalizado en el que los líquidos de saturación fueron agua y una solución de cloruro cálcico, obtuvieron unos resultados ligeramente favorables a los hormigones reciclados tal y como puede observarse en la **figura 2.16**. El número de ciclos hielo-deshielo fue reducido. Dicha mejoría puede explicarse por una mejor distribución en los poros del hormigón reciclado para resistir las presiones provocadas por el hielo.

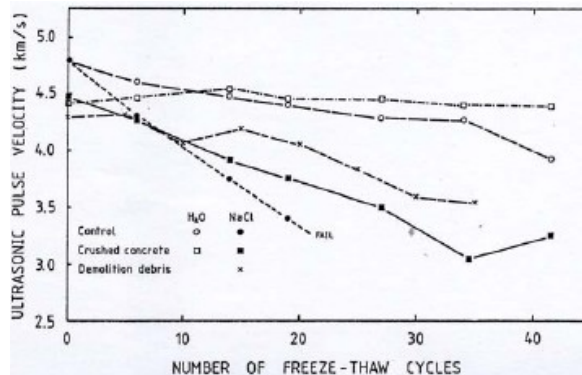


Figura 2.16 Resistencia a la helada en hormigones reciclados^[85].

2.7.3 CARBONATACIÓN.-

En este aspecto surgen divergencias sobre el comportamiento del hormigón reciclado frente al proceso de carbonatación. Al respecto, estudios realizados en nuestro país^[5] determinan que dicho proceso y el consiguiente desarrollo del frente de carbonatación depende de los valores relativos de permeabilidad del mortero nuevo y del árido reciclado. Si el mortero nuevo es más permeable que el árido reciclado la propagación del frente de carbonatación tendrá lugar a través del mismo; el dióxido de carbono penetrará por el mortero nuevo siendo dicho proceso parecido al de un hormigón convencional. Si, por el contrario, el árido reciclado posee una permeabilidad mayor que el mortero nuevo el frente de carbonatación se propagará a través de él. Tendrá un aspecto más irregular y presentará picos que coinciden con los áridos porosos.

Según estudios realizados en Japón^[43], los hormigones con áridos reciclados presentan una profundidad del frente de carbonatación superior en un 65% al del hormigón de control.

Sin embargo, otros autores^[63,72] apenas hallaron diferencias en la profundidad del frente de carbonatación entre hormigones reciclados y convencionales.

Kasai Y^[56]. obtuvo un incremento del frente de un 20% y Teranishi K^[125]. del 50% respecto del hormigón de control.

Puede afirmarse, a la vista de los resultados anteriores, que al sustituir el árido grueso natural por árido grueso reciclado en pequeños porcentajes, la profundidad de carbonatación en los hormigones no aumenta prácticamente. Cuando los porcentajes de sustitución sean mayores la profundidad del frente de carbonatación se hace mayor en los hormigones reciclados.

2.7.4 RESISTENCIA A LOS SULFATOS.-

El ataque por sulfatos tiene lugar al reaccionar ellos con el aluminato tricálcico hidratado procedente del cemento y dar lugar a la formación de sulfoaluminato tricálcico hidratado. Se le conoce como ettringita o sal de Candot. Dicho compuesto aumenta de volumen dos veces y media. Dicha expansión provoca fisuraciones en el hormigón que

facilitan el acceso del agua agresiva y favorece la disgregación del hormigón. En la superficie se forma una papilla blanquecina característica^[26].

En general, y debido a la mayor permeabilidad del hormigón reciclado, la penetración de sustancias con alto contenido en sulfatos susceptibles de atacar al hormigón es más fácil que en el hormigón convencional.

De todas formas la resistencia del hormigón reciclado al ataque por sulfatos será, principalmente, función tanto del cemento empleado para la elaboración del nuevo hormigón como del que lleva adherido el árido reciclado^[4]. Si dichos cementos son resistentes a los sulfatos el comportamiento del hormigón reciclado será similar al del hormigón convencional fabricado con cemento SR.

En algunos estudios consultados^[14,71] se observa, al igual que ocurre con otras características, que hormigones con porcentajes de sustitución del árido grueso que no superen el 30% presentan un comportamiento similar al del hormigón de control. Con porcentajes superiores la resistencia al ataque por sulfatos disminuye.

2.7.5 PENETRACIÓN DE CLORUROS.-

La mayor o menor permeabilidad del hormigón reciclado será un buen índice de referencia para determinar su oposición a la penetración de cloruros.

Según Collins^[12] cuando se realizan sustituciones íntegras del árido el coeficiente de difusión del hormigón reciclado alcanza el doble del valor respecto al hormigón de control. Al sustituir únicamente el árido grueso dicho valor se incrementa en un 30%.

Di Maio y Villagran^[15,147] ha obtenido resultados similares, para el proceso de difusión de cloruros en ambiente marino, tanto en hormigones reciclados con sustituciones de hasta el 75% como en hormigones convencionales.

Fukute^[27] afirma que la permeabilidad al ión cloruro en hormigones reciclados es superior a la del hormigón convencional. Dicho efecto es aún mayor a medida que disminuye la calidad del árido reciclado. En la **figura 2.17** quedan de manifiesto estas consideraciones.

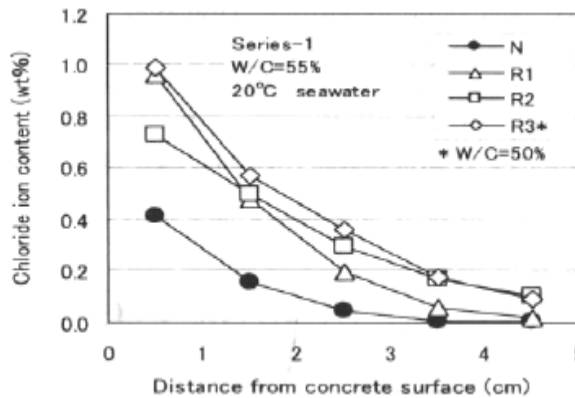


Figura 2.17 Penetración de cloruros en hormigones reciclados^[27].

El hormigón de control tiene la denominación N. El hormigón R1 corresponde a hormigón reciclado con una absorción del 8,30% para la fracción fina y del 4,25% para la fracción gruesa. El hormigón reciclado R2 tiene una absorción del 12,28% en la fracción fina y una del 4,86% en la fracción gruesa. Por último, el hormigón reciclado R3 tiene una absorción del 2,11% en la fracción fina y una del 0,70% en la fracción gruesa.

2.7.6 REACCIÓN ÁLCALI-ÁRIDO.-

Dicha reacción tiene lugar, en presencia de agua, entre aquellos áridos que contienen sílice amorfa o parcialmente cristalizada y los compuestos alcalinos del cemento. Da lugar a expansiones que pueden provocar la disgregación del hormigón^[26].

En los hormigones reciclados la reacción álcali-árido se controla igual que en los hormigones convencionales solo que dicho control presenta mayores dificultades debido a la diversa procedencia de los residuos que llegan a las plantas de reciclaje. Cuando los RCDs proceden de un solo origen el control de dicha reacción no presenta inconvenientes. Cuando se utilizan áridos reciclados reactivos, a veces, esta reacción solo tiene lugar cuando el cemento que se utiliza en el nuevo hormigón tiene un alto contenido alcalino^[45].

En áridos reciclados, cuya matriz rocosa no sea reactiva, podemos distinguir cuatro tipos diferentes de reactividad residual debido al mortero adherido que incorporan^[39]:

1. Árido reciclado cuyo mortero no contiene partículas reactivas.
2. Árido reciclado donde la reacción álcali-árido en el mortero adherido ya tuvo lugar previamente.
3. Árido reciclado cuyo mortero contiene partículas reactivas. La reacción álcali-árido está produciéndose y es origen de expansiones.
4. Árido reciclado cuyo mortero, a pesar de contener partículas reactivas, no da lugar a la reacción álcali-árido por falta de humedad o de álcalis.

Etxeberria^[21] pudo observar la reacción álcali-árido en un hormigón reciclado dosificado a partir de un árido grueso reciclado que era reactivo en su totalidad, tanto su matriz rocosa como el mortero adherido, y en el que, sin embargo, en el hormigón original no había tenido lugar dicha reacción.

2.8 CONCLUSIONES DEL ESTADO DEL ARTE.-

Del análisis de los datos procedentes de los estudios consultados destacamos, a continuación, algunas de las conclusiones más relevantes que pueden extraerse.

- La obtención de áridos reciclados factibles de utilizarse en la fabricación de hormigón reciclado ha de realizarse a partir de RCDs seleccionados, principalmente, de demoliciones de obra civil y de estructuras de edificación.
- Los diferentes sistemas de clasificación y trituración empleados en la obtención de áridos reciclados y sus combinaciones permiten obtener áridos reciclados con diferentes calidades. La utilización de sistemas, dispositivos y filtros adecuados permiten eliminar, prácticamente en su totalidad, los contaminantes no deseados.
- La diversa procedencia de los RCDs en las zonas de acopio de las plantas de reciclaje hace que, por lo general, las características de los áridos reciclados sean bastante heterogéneas.
- Sucesivos sistemas de trituración aseguran una mejor calidad del árido reciclado pero encarecen el producto final.

- Con sistemas de trituración adecuados dispuestos en la plantas de reciclaje se obtienen áridos reciclados con la granulometría adecuada para ser utilizados en la fabricación de hormigón.
- Durante el proceso de producción se generan mayores cantidades de árido fino y de finos que en el procesamiento de áridos naturales.
- Los áridos reciclados presentan una determinada cantidad de mortero adherido a su matriz rocosa según su calidad. Esta particularidad es la causa principal de la variación en sus propiedades respecto a los áridos naturales.
- La densidad del árido reciclado presenta valores ligeramente inferiores respecto a la de los áridos convencionales.
- Los áridos reciclados poseen una textura, por lo general, más rugosa que la de los áridos naturales y presentan mayor porosidad.
- El coeficiente de forma de los áridos reciclados es similar al de los áridos naturales.
- La absorción es una de las características más desfavorables que presenta el árido reciclado en relación con el árido natural y es quizás el principal inconveniente que presenta para su utilización en la fabricación de hormigón.
- Los áridos reciclados presentan una resistencia al desgaste inferior a la de los áridos naturales.
- La resistencia a la helada de los áridos reciclados suele ser inferior a la de los áridos naturales debido a su mayor porosidad.
- El contenido de cloruros de los áridos reciclados es elevado cuando proceden de hormigones empleados en obras marítimas o de construcciones en contacto con sales que los contengan.
- El árido reciclado puede presentar un alto contenido en sulfatos acumulados en el mortero adherido y en la presencia de impurezas como el yeso cuando los RCDs proceden de edificación.

- Por lo general, los áridos reciclados presentan mayor cantidad de contaminantes e impurezas que los áridos naturales afectando negativamente a las propiedades del hormigón.
- La normativa existente sobre áridos reciclados limita su empleo en función de la absorción, del contenido en contaminantes e impurezas y de la densidad.
- La dosificación del hormigón reciclado se realiza con los métodos empleados en hormigones convencionales aunque se realizan pequeñas correcciones, como un aumento de las cantidades de agua y cemento para conseguir la misma consistencia y resistencia o el empleo de un aditivo superplastificante.
- Saturando los áridos justo antes del amasado se evitará el aumento de la consistencia derivado de la mayor absorción que presenta el árido reciclado.
- La densidad del hormigón reciclado en estado fresco o endurecido es inferior a la del hormigón convencional. La cantidad de aire ocluido en su masa es similar.
- La resistencia a compresión del hormigón reciclado disminuye, en general, respecto al convencional aunque en algunas ocasiones se observan incrementos en dicho valor. El porcentaje de árido sustituido, la calidad del hormigón original y la cantidad de mortero adherido son los factores que más inciden en el valor de la resistencia.
- El módulo de elasticidad, la retracción y la fluencia en los hormigones reciclados son las propiedades más afectadas cuando se sustituye la totalidad del árido grueso, tomando valores sensiblemente inferiores a los del hormigón convencional.
- Al presentar el hormigón reciclado mayor porosidad, absorción y permeabilidad que el convencional el proceso de carbonatación se propagará más rápidamente. En ambientes propicios podrán producirse más fácilmente el ataque por sulfatos o la penetración de cloruros. La reacción álcali-árido tendrá que vigilarse aunque ni los áridos ni el hormigón original del que procedan fueran inicialmente reactivos.

- Por último, indicar que en la bibliografía consultada el análisis de las distintas propiedades del hormigón reciclado se ha llevado a cabo realizando variaciones sobre distintos niveles en cada uno de los factores considerados en los estudios mientras el resto permanecía fijo. Esto les ha permitido evaluar los efectos individuales de cada uno de ellos, a cambio de no considerar un excesivo número de factores y de niveles dentro de cada factor, ya que de lo contrario el número de pruebas a realizar haría, en la mayoría de las ocasiones, completamente inviables dichos estudios en períodos de tiempo razonables.

CAPÍTULO III

ESTUDIO EXPERIMENTAL. MATERIALES, CRITERIOS DE ENSAYO Y PROCEDIMIENTOS.

3.1. INTRODUCCIÓN.-

El estudio experimental llevado a cabo comienza por una selección de los materiales utilizados en el mismo. Realizaremos una descripción exhaustiva de sus características y justificaremos su elección en cada caso.

A continuación se realiza una descripción de los métodos de ensayo puestos en práctica para caracterizar los materiales de partida utilizados en la fabricación de hormigón reciclado. Dentro de ellos detallaremos aquellos métodos que revistan especial importancia, tanto por afectar a una propiedad que incida decisivamente en el comportamiento del hormigón reciclado resultante como por desviarse del procedimiento operatorio habitual establecido en la norma de ensayo correspondiente.

Una vez determinadas las características de los componentes del hormigón reciclado, describiremos de manera detallada los procedimientos de ensayo seguidos para caracterizar el hormigón reciclado tanto en estado fresco como una vez endurecido. De nuevo haremos

especial hincapié en aquellos métodos cuya puesta en práctica se haya realizado mediante procedimientos específicos que no sigan el cauce operativo habitual dictado por la normativa.

Posteriormente explicamos el procedimiento seguido para conseguir sustituir el árido grueso natural por árido reciclado de manera que dicha sustitución se realice totalmente ajustada a la granulometría del árido reciclado utilizado.

En el último apartado de este capítulo se comentan detalladamente los pasos seguidos durante el proceso de fabricación del hormigón reciclado en cualquiera de las amasadas realizadas.

3.2. MATERIALES.-

A lo largo de todo el estudio se han utilizado, aparte de los materiales básicos constituyentes del hormigón, áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demoliciones. En los apartados siguientes se describen las características y particularidades de todos ellos.

3.2.1. CEMENTOS.-

El cemento empleado fue el III/A 42,5 N/SR. Fue suministrado por la empresa HORAVISA y procede de la fábrica de cementos Tudela-Veguín S.A. situada en la localidad de Veguín, Asturias.

La elección de dicho cemento se determinó por ser su empleo habitual en las plantas de hormigón de Lafarge, Horavisa y El Caleyó, empresas que comparten la planta de reciclaje La Belonga Impulso Industrial Alternativo S.A. y que han colaborado en el desarrollo del presente trabajo.

El cemento fue obteniéndose regularmente, en la boca del silo de almacenamiento de la planta de hormigones de Horavisa, los días en los que se desarrollaban las pruebas. Su almacenamiento, hasta el momento del uso, se realizó en bidones de plástico con cierre hermético que estuvieron en todo momento protegidos de la acción directa del Sol.

Sus propiedades físicas y químicas, evaluadas según la Instrucción para la recepción de cementos RC-08, se resumen a continuación en las **tablas 3.1** y **3.2**. Dichos datos fueron facilitados por la empresa suministradora del cemento y corresponden a la media estadística obtenida de los ensayos realizados durante el periodo de tiempo en que se realizaron las pruebas. Se realizaban dos ensayos semanales.

Tipo de cemento	Fraguado		Expansión Le Chatelier
	Inicio	Final	
III/A 42,5 N/SR	173 min	217 m	0,3 mm

Tabla 3.1 Propiedades físicas del cemento utilizado.

Tipo de cemento	Contenido en cloruros	Pérdida por calcinación	Residuo insoluble	Contenido en sulfatos
III/A 42,5 N/SR	0,01 %	1,57 %	0,28 %	1,86 %

Tabla 3.2 Propiedades químicas del cemento utilizado.

La resistencia a compresión que proporcionó dicho cemento queda reflejada en la **figura 3.1**. Dichos datos corresponden al periodo de tiempo en que se llevó a cabo la experimentación. Los ensayos se llevaron a cabo siguiendo las pautas establecidas por la norma UNE-EN 196-1. Se realizaban dos ensayos semanales.

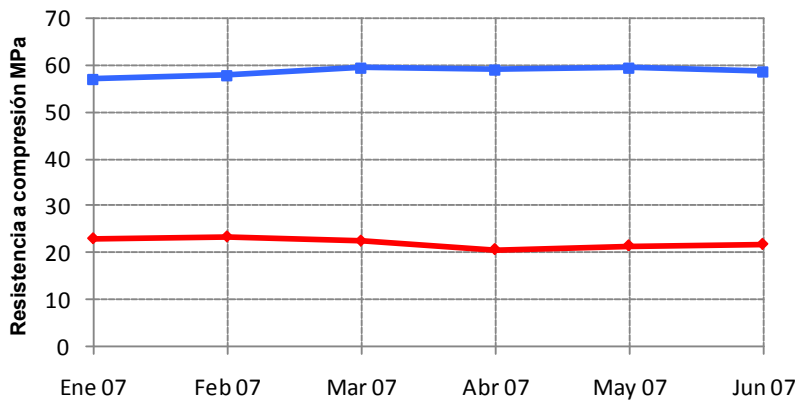


Figura 3.1 Resistencia a compresión del cemento utilizado.

3.2.2. ÁRIDOS NATURALES.-

Los áridos convencionales, gravas y arenas, procedentes de machaqueo empleados en la fabricación del hormigón reciclado fueron suministrados por Canteras La Belonga S.A. Su origen es calizo. Dichos áridos se emplean de manera habitual en la fabricación de hormigón por la empresa Horavisa.

En la **figura 3.2** pueden observarse las curvas granulométricas de las tres fracciones, grava (10/20 mm), gravilla (4/10 mm) y arena (0/4 mm), de los áridos calizos empleados. Asimismo, puede observarse la granulometría de la arena rodada de naturaleza silícea, utilizada de manera habitual en la dosificación de hormigones convencionales. Mezclada en una proporción que oscila entre el 12% y el 18% permite corregir la curva granulométrica de la arena caliza y, al ser rodada, mejora sensiblemente la trabajabilidad del hormigón. Fue suministrada por la empresa Hormigones La Estrella S.A. procedente de la planta situada en Castrillo de Ribera (León).

Con el fin de determinar posibles variaciones en las características de los áridos utilizados y asegurar la uniformidad en su empleo se realizaron ensayos periódicos para determinar su densidad y su absorción, según la norma UNE-EN 1097-6 "Determinación de la densidad de partículas y absorción de agua", además de ensayos granulométricos apoyándonos en la norma UNE-EN 933-1 "Determinación de la granulometría de las

partículas. Método del tamizado”. Dichos ensayos se realizaban sobre una muestra tomada semanalmente de las cantidades empleadas en las pruebas realizadas.

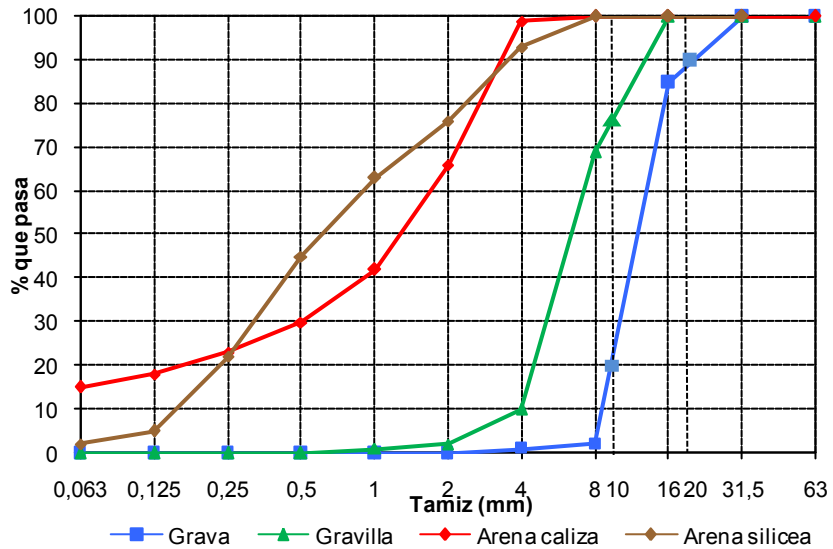


Figura 3.2 Curvas granulométricas de los áridos naturales empleados.

Además, tanto en la arena caliza utilizada como en la silícea se determinó semanalmente el valor del equivalente de arena según la norma UNE-EN 933-8 “Ensayos para controlar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8. Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena”.

Los valores medios obtenidos en los ensayos correspondientes a la densidad y la absorción en dichos áridos quedan reflejados en la tabla siguiente:

Árido	Densidad	Absorción
Árido 8/20 mm (machacado)	2,68 kg/dm ³	0,27 %
Árido 4/8 mm (machacado)	2,69 kg/dm ³	0,22 %
Árido 0/4 mm (machacado)	2,68 kg/dm ³	0,23 %
Árido 0/4 mm (rodado)	2,63 kg/dm ³	0,07 %

Tabla 3.3 Densidad y absorción de los áridos naturales empleados.

Los valores medios obtenidos en los ensayos correspondientes al equivalente de arena quedan recogidos en la **tabla 3.4**.

Árido	Equivalente de arena	
	A vista	Con pistón
Árido 0/4 mm (machacado)	79	78
Árido 0/4 mm (rodado)	90	81

Tabla 3.4 Equivalente de arena en los áridos finos empleados.

3.2.3. ÁRIDOS RECICLADOS.-

Los áridos reciclados utilizados durante nuestro estudio provenían de dos plantas diferentes:

Árido reciclado procedente de Tec-Rec S.A., empresa localizada en la Comunidad de Madrid.

Árido reciclado procedente de La Belonga Impulso Industrial Alternativo S.A., empresa situada en el Principado de Asturias.

En la **figura 3.3** puede observarse una muestra de dichos áridos. En ella puede apreciarse como la cantidad de mortero adherido que tiene el árido procedente de Madrid parece inferior a la que incorpora el árido de Oviedo.



Figura 3.3 Muestra de los áridos reciclados empleados.

Las granulometrías de dichos áridos, realizadas según la norma UNE-EN 933-1 “Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado”, quedan reflejadas en la **figura 3.4**. Se realizaron tres granulometrías tanto del árido reciclado procedente de Madrid como del árido reciclado procedente de la planta de Oviedo. Destacar que el árido procedente de Madrid era muy homogéneo, presentaba muy poco mortero adherido y generaba muy pocos desclasificados. La cantidad de impurezas, procedentes en su práctica totalidad de residuos cerámicos, aunque también aparecieron en muy pequeña cantidad algunos residuos asfálticos, era mínima.

Por el contrario, el árido reciclado procedente de la planta de La Belonga es más heterogéneo, presenta a la vista mayor cantidad de mortero adherido y está más contaminado por residuos cerámicos, áridos ligeros y, aunque en una cantidad muy pequeña, algunos residuos plásticos.

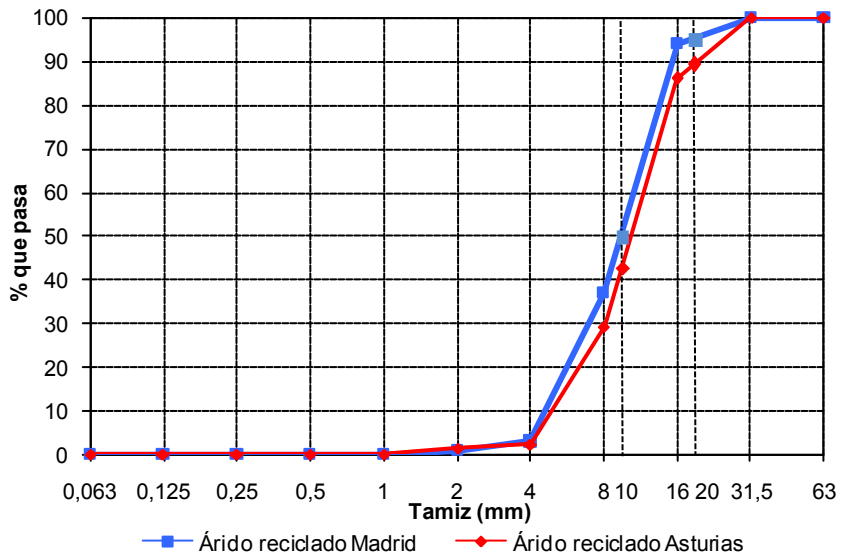


Figura 3.4. Curvas granulométricas de los áridos empleados.

Al igual que en los áridos naturales y con el fin de asegurar la uniformidad en su empleo se realizaron dos ensayos de densidad y absorción de cada una de las partidas utilizadas. Antes de comenzar a realizar las pruebas de la amasada A se realizó un ensayo de densidad y otro de absorción sobre el árido reciclado de Madrid y sobre el

árido reciclado de Oviedo. Se procedió de igual forma antes de dar comienzo a las pruebas correspondientes a las amasadas B. La norma utilizada a tal efecto fue la UNE-EN 1097-6 “Determinación de la densidad de partículas y absorción de agua”. Los resultados obtenidos en dichos ensayos quedan reflejados en la **tabla 3.5**.

Árido reciclado	Densidad kg/dm ³	Dens media kg/dm ³	Absorción %	Absorción media %
Madrid	A 2,36	2,36	A 3,8	3,8
	B 2,36		B 3,8	
Oviedo	A 2,20	2,20	A 5,0	5,0
	B 2,20		B 5,0	

Tabla 3.5 Densidad y absorción de los áridos reciclados empleados.

Los resultados obtenidos en los áridos reciclados correspondientes al coeficiente de forma determinado según la Norma UNE-EN 933-4 “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 4: Determinación de la forma de las partículas y al coeficiente de Los Ángeles determinado según la norma UNE-EN 1097-2 “Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación” quedan recogidos en la tabla 3.6.

Árido reciclado	Coficiente de forma	Coficiente de Los Ángeles
Madrid	0,23	33,1%
Oviedo	0,33	37,2 %

Tabla 3.6 Coeficiente de forma y resistencia a la fragmentación de los áridos reciclados empleados.

Siguiendo el procedimiento establecido en sus tesis doctoral por Barra M.^[5] se determinó el porcentaje de mortero adherido. Para ello pesamos una muestra de 750 g de árido reciclado previamente secada en estufa. A continuación se sumergía durante dos horas en agua con la finalidad de llenar la mayoría de los poros permeables del mortero. Posteriormente, la muestra húmeda se introducía en un horno precalentado a 500 °C durante un período de tiempo de dos horas. De esta forma se logran crear

tensiones internas debidas a la rápida evaporación del agua. Dichas tensiones afectan principalmente al mortero y hacen que se desprenda de la matriz rocosa. Los trozos de roca no se ven afectados debido a su baja porosidad y a que el tiempo en que permanecen sumergidos en agua no es suficiente para su saturación.

Una vez finalizada esta operación la muestra se saca del horno y se sumerge de nuevo en agua fría provocando un choque térmico que genera de nuevo tensiones y desprende el mortero. Después se tamiza la muestra por el tamiz de luz de malla 2 mm. La muestra que queda retenida y todavía presenta mortero adherido se golpea con una maza de goma para lograr el desprendimiento del mortero. La muestra, una vez limpia, se seca de nuevo en estufa y se pesa. La diferencia de peso entre la muestra inicial y la final expresada en tanto por ciento en relación con la muestra original es el porcentaje de mortero adherido que presenta el árido reciclado ensayado.

Los resultados obtenidos se observan en la **tabla 3.7**.

Árido reciclado	Mortero adherido %
Madrid	23
Oviedo	34,2

Tabla 3.7 Porcentaje de mortero adherido en los áridos reciclados.

3.2.4. ADITIVOS.-

En la dosificación de los hormigones se utilizaron dos tipos de aditivos: Un reductor de agua de alta actividad, Glenium Sky 511, y un plastificante de denominación comercial Pozzolith 370N.

La elección de estos dos aditivos se debe a su empleo en la dosificación de hormigones convencionales por parte de las empresas que colaboraron en el desarrollo de las pruebas y en la realización de los ensayos.

El superplastificante se utiliza en la mezcla como reductor de agua y como fluidificante, aumenta la trabajabilidad del hormigón y permite la obtención de hormigones fluidos. Presenta un efecto secundario nocivo que es el riesgo de

segregación cuando se emplea en dosis elevadas. Su empleo como único aditivo en los hormigones convencionales fabricados con los áridos procedentes de la cantera de La Belonga S.A. presenta el inconveniente de que el periodo de tiempo en el que la mezcla mantiene la trabajabilidad adecuada es reducido.

El empleo del plastificante Pozzolith 370N mezclado con el aditivo anterior persigue el incremento de autonomía en las mezclas sin llegar a provocar retrasos excesivos en el fraguado.

Su empleo se realiza en estado líquido. El Pozzolith 370N presenta un aspecto marrón oscuro mientras que el Glenium Sky 511 tiene un color casi transparente. En la **figura 3.5** puede observarse una muestra de ellos.

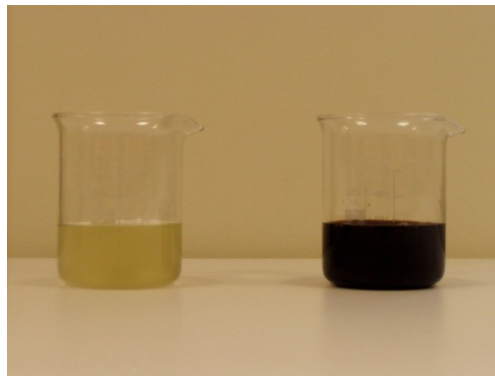


Figura 3.5 Muestra de los aditivos empleados.

El Glenium Sky 511 está basado en un éter de policarboxílico. Las propiedades más relevantes de ambos aditivos quedan reflejadas en la **tabla 3.8**.

Aditivo	Propiedades
Glenium Sky 511	<p>Superplastificante, reductor de agua de alta actividad.</p> <p>Incrementa las resistencias iniciales y finales.</p> <p>Mejora la trabajabilidad y el aspecto del hormigón.</p> <p>Mejora la impermeabilidad y durabilidad.</p>
Pozzolith 370N	<p>Plastificante, reductor de agua.</p> <p>Mantenimiento de consistencia.</p> <p>Disminuye el riesgo de exudación y facilita la compactación.</p>

Tabla 3.8 Propiedades de los aditivos empleados.

3.3. ENSAYOS REALIZADOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES.-

3.3.1. RESISTENCIA MECÁNICA DE LOS CEMENTOS.-

Dicho ensayo se realiza para determinar que la resistencia a compresión del cemento es conforme a su especificación. Se determina de acuerdo a la norma UNE-EN 196-1 "Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas".

3.3.2. DETERMINACIÓN DE LA GRANULOMETRÍA DE LOS ÁRIDOS.-

La granulometría de todos los áridos utilizados en el estudio se ha realizado mediante tamizado y de acuerdo con las prescripciones establecidas en la norma UNE-EN 933-1 "Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado". En la **figura 3.6** se observa la tamizadora de laboratorio utilizada.



Figura 3.6 Tamizadora utilizada.

3.3.3. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD Y LA ABSORCIÓN DE LOS ÁRIDOS.-

La densidad y la absorción de los áridos naturales y reciclados empleados en este estudio se determinaron mediante el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 1097-6 “Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua”.

La densidad del árido grueso natural y de los áridos gruesos reciclados procedentes de Madrid y de la planta de La Belonga Impulso Industrial S.A., se determinan tomando una muestra de 4,5 kg del árido en cuestión. Se sumergen en agua dentro del laboratorio durante 24 horas. A continuación se pesa dicha muestra en el agua (M_{ac}). Posteriormente, se realiza una pesada en agua de la cesta vacía que contenía el árido (M_c). El árido se seca con un paño absorbente seco hasta eliminar los brillos de humedad y se vuelve a pesar (M_{sss}). Por último, se seca en el horno a una

temperatura de 100 °C hasta masa constante (M_s). En la **figura 3.7** puede observarse el dispositivo empleado para realizar las pesadas hidrostáticas.

La densidad del árido seco se obtendrá mediante la expresión:

$$d_r = \frac{M_s}{M_{sss} - [M_{ac} - M_c]}$$

La absorción del árido expresada en % se determinará mediante:

$$A = \frac{100 \times [M_{sss} - M_s]}{M_s}$$



Figura 3.7 Pesada hidrostática.

3.3.4. DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD DE LOS ÁRIDOS.-

Para determinar la humedad que tenían los áridos empleados en todas las pruebas realizadas se siguió el procedimiento establecido en la norma UNE-EN 1097-5 "Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación del contenido en agua por secado en estufa". Dicho proceso puede resumirse así:

Se pesa una muestra del árido (M_a) con una incertidumbre en la medida de 0,1g y, posteriormente, dicha muestra se introduce en la estufa a 110 ± 5 °C para su secado hasta masa constante (M_s). El contenido de agua de la muestra, expresado en %, vendrá determinado por la expresión siguiente:

$$W = \frac{100 \times [M_a - M_s]}{M_s}$$

3.3.5. OTROS ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE LOS ÁRIDOS.-

En el árido grueso se determinó el coeficiente de forma y el índice de lajas según las normas UNE-EN 933-4 "Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 4: Determinación de la forma de las partículas. Coeficiente de forma y UNE-EN 933-3 "Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 3: Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas. En las arenas se evaluaron los finos según el procedimiento establecido en la norma UNE-EN 933-8 "Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena". También se determinó el coeficiente de Los Ángeles según el procedimiento establecido en la Norma UNE-EN 1097-2 "Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación". La cantidad de mortero adherido en los áridos reciclados se determinó, como se comentó, mediante el procedimiento propuesto por Barra M.^[5] en su tesis doctoral.

3.4. PROCEDIMIENTO SEGUIDO PARA MEZCLAR LOS ÁRIDOS RECICLADOS, SEGÚN SU CURVA GRANULOMÉTRICA, PARA SER UTILIZADOS EN LA FABRICACIÓN DE HORMIGÓN RECICLADO.-

Una vez determinada la granulometría de los áridos reciclados empleados en nuestro estudio mediante el método del tamizado se procedió de la siguiente manera:

Los dos áridos reciclados se separaron por fracciones, asegurando en la mezcla una granulometría invariable en todas las amasadas. Para ello se utilizó una tamizadora de laboratorio de gran capacidad. Las cantidades resultantes para cada una de las fracciones se dispusieron en cubetas. Se mantuvieron tapadas con plástico y protegidas dentro de la nave en la que se realizaron las amasadas hasta que fueron utilizadas.

Una vez determinadas las cantidades necesarias, distribuidas por fracciones, obtenidas en el proceso de dosificación para cada una de las amasadas se procedía a su pesado.

En la **figura 3.8**, puede observarse la tamizadora industrial utilizada en el proceso descrito.



Figura 3.8 Tamizadora empleada en el cribado de los áridos reciclados.

Además de la serie gruesa prescrita en la norma UNE-EN 933-2, en el proceso de tamizado también se utilizaron los tamices de luz de malla 2 mm y 1 mm. De esta forma se aseguraba en las mezclas las cantidades exactas de desclasificados inferiores requeridas para cada amasada, ya que uno de los factores tenidos en cuenta en el diseño del experimento es su porcentaje dentro de la mezcla.

3.5. PROCEDIMIENTO SEGUIDO PARA LA FABRICACIÓN DE HORMIGÓN RECICLADO.-

Establecer dicho procedimiento tuvo como finalidad principal asegurar la uniformidad del proceso de fabricación en todas las amasadas realizadas en este estudio.

3.5.1. ALMACENAMIENTO DE LAS MATERIAS PRIMAS.-

Los áridos reciclados, como ya se comentó anteriormente, estaban disponibles, separados por fracciones, en cubetas tapadas y protegidas mediante plástico dentro de la nave de amasado. Durante el periodo de pruebas permanecieron completamente secos.

El cemento empleado se obtenía directamente del silo de cemento de la planta el día anterior a la fabricación del hormigón reciclado. Se depositaba en el laboratorio en un bidón cerrado herméticamente y se transportaba a la mañana siguiente hasta la nave donde se realizaron todas las amasadas.

Los áridos naturales se recogían directamente de los acopios de la cantera el día anterior a la fabricación del hormigón reciclado. Se almacenaba en bidones iguales a los utilizados para el cemento que quedaban a resguardo dentro del laboratorio. A la mañana siguiente se transportaban conjuntamente con el cemento a la nave de amasado.

Con la arena correctora se procedía de forma análoga.

Los aditivos utilizados se obtenían directamente de la planta. Se almacenaban en garrafas de plástico permaneciendo protegidos de la luz en una esquina de la nave de amasado.

La humedad de los áridos convencionales se controló continuamente para efectuar la corrección oportuna al elaborar el hormigón. Si bien los áridos calizos convencionales estaban exentos de humedad no ocurría lo mismo con la arena silíceo cuyo control se realizó con periodicidad semanal.

3.5.2. PROCESO DE FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN RECICLADO.-

Se pesaban por separado, con ayuda de capazos, las distintas fracciones de árido utilizadas: en nuestro caso, grava natural (10/20 mm), gravilla (4/10 mm), arena (0/4 mm) y grava reciclada (4/20 mm). Se empleó una balanza calibrada de 20 kg, con una resolución en la medida de 1g y una tolerancia de $\pm 3g$.

A continuación se pesaban el cemento y el agua. El recipiente de agua utilizado se taraba una vez humedecido. Se apartaban en una probeta de plástico 300 ml de agua para mezclarlos en la segunda fase del amasado con los aditivos.

Por último se pesaban el plastificante y el superplastificante.

Para el amasado se utilizó una mezcladora Betonmass, modelo ST-80C, de eje vertical y palas giratorias, con una capacidad de 80 litros. En la figura 3.9 puede observarse la amasadora empleada para la fabricación del hormigón.



Figura 3.9 Amasadora empleada en la fabricación del hormigón.

Antes de introducir los materiales en la amasadora se humedecía con agua el interior del tambor. El orden de vertido de las materias primas al interior de la hormigonera era el siguiente:

1º.- Aporte de la grava natural y giro la amasadora durante 3 segundos para facilitar su extendido.

2º.- Añadido de la gravilla y giro de la amasadora durante 3 segundos para facilitar el mezclado.

3º.- Vertido de la arena caliza y la silícea y giro de la amasadora durante 3 segundos para lograr su mezclado con el resto de material.

4º.- Aporte del cemento, extendido manual, arranque de la amasadora y giro durante dos segundos.

5º.- Por último, se añade la mitad del agua y comienza el amasado.

6º.- Con la hormigonera en marcha se añade el resto del agua, a excepción de los 300 ml separados previamente en la probeta, durante un periodo de tiempo no superior a 30 segundos. Esta primera fase del amasado finaliza a los tres minutos y medio del comienzo del amasado.

7º Se deja reposar la mezcla durante tres minutos con la tapa de la mezcladora bajada. Al finalizar dicho periodo de tiempo se añaden los aditivos por separado. En primer lugar se añade el plastificante mezclado con 100 ml de agua. A continuación se añade el 50% del superplastificante mezclado con otros 100 ml de y se arranca de nuevo la mezcladora. Por último, se añade lentamente el superplastificante restante mezclado con otros 100 ml de agua con la amasadora en funcionamiento.

8.- Después de dos minutos de amasado finaliza el proceso. Se miden la temperatura y la humedad ambientales así como la temperatura de la masa de hormigón.

3.6. ENSAYOS REALIZADOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGÓN RECICLADO.-

3.6.1. DETERMINACIÓN DE LA CONSISTENCIA DEL HORMIGÓN RECICLADO.-

La consistencia del hormigón reciclado se determinó según el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 12350-2 “Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento”.



Figura 3.10 Ensayo de consistencia.

En cada amasada se realizaron dos ensayos de consistencia. El primero se hacía nada más finalizar el periodo de tiempo establecido para el amasado. El segundo ensayo se realizaba una vez finalizada la fabricación de las probetas. En la **figura 3.10** puede observarse un detalle de dicho ensayo.

3.6.2. DETERMINACIÓN DEL AIRE OCLUIDO EN EL HORMIGÓN RECICLADO.-

El porcentaje de aire ocluido en el hormigón reciclado fresco se determinó siguiendo el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 12350-7 "Ensayos de hormigón fresco. Parte 7: Determinación del contenido de aire. Métodos de presión".

El método operatorio consiste en introducir en un recipiente estanco agua hasta una altura predeterminada sobre una muestra de hormigón compactado de volumen conocido y aplicar una presión predeterminada sobre el agua. La reducción en volumen del aire en la muestra del hormigón se mide observando la cantidad que disminuye el nivel del agua, habiendo calibrado la columna de agua en función del porcentaje de aire en la muestra de hormigón.

El llenado de la cazoleta del medidor de aire ocluido se realiza en tres capas y de manera similar a como se llenan los moldes cilíndricos empleados en la fabricación de las probetas utilizadas en la determinación de la resistencia a compresión. Después de compactar cada capa golpeamos la cazoleta con una maza de goma hasta eliminar las huellas dejadas por los golpes de la barra.

Después de enrasar la cazoleta el recipiente se cierra herméticamente. A continuación se llena de agua el tubo vertical hasta el nivel cero. Para ello nos ayudamos de las válvulas de purga y de ventilación que incorpora el aparato. Al finalizar la operación cerramos la válvula de ventilación y aplicamos la presión de trabajo (2 kg/cm^2) con una bomba de aire. Anotamos la lectura obtenida (a_1) sobre la escala graduada del aparato y liberamos la presión. Si la altura de la columna de agua recupera el nivel inicial o no experimenta una variación mayor del 0,2% del contenido de aire (b_1), el contenido aparente de aire es la diferencia entre las dos lecturas realizadas [$a_1 - b_1$].

Si la variación es mayor del 0,2% aplicamos de nuevo la presión de trabajo con la bomba de aire y tomamos nota de esta segunda medida (a_2). Si no difiere más del 0,1% respecto de la primera medida el valor del aire ocluido será esta medida menos el valor de recuperación (b_2) de la columna de agua al liberar la presión [$a_2 - b_2$].



Figura 3.11 Ensayo de aire ocluido.

Si la variación entre la primera y la segunda medida realizada es superior al 0,1% de contenido de aire debemos repetir el ensayo. En la **figura 3.11** puede observarse el medidor de aire ocluido. Se aprecia la cazoleta llena y enrasada para la realización del ensayo.

3.6.3. FABRICACIÓN, CURADO Y PREPARACIÓN DE PROBETAS.-

En todo el estudio llevado a cabo se han utilizado probetas cilíndricas de 15×30 cm. Para la fabricación de dichas probetas se siguió el procedimiento establecido por la normas UNE-EN 12390-1 “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 1: Forma, medida y otras características de las probetas y moldes” y UNE-EN 12390-2 “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia”.

Se utilizaron moldes de acero calibrados. Dichos moldes se rellenaron mediante tres capas, compactándose mediante 25 golpes de barra cada capa. Después de compactar cada capa se golpeaba sobre el molde con una maza de goma para eliminar las depresiones ocasionadas en la superficie por la barra de picar. Una vez finalizado el

llenado se enrasaban y nivelaban con ayuda de una llana. Las probetas se mantenían durante 24 horas en una zona de la nave donde se fabricaban a resguardo de la acción directa del Sol y de las bajadas de las temperaturas nocturnas. En cada una de las amasadas realizadas se tomaba la temperatura del hormigón fresco así como la temperatura ambiente y la humedad relativa.

Después de 24 horas se desmoldaban y eran trasladadas a la cámara húmeda donde se mantenían a 20 °C y un 95% de humedad relativa durante 28 días. En la **figura 3.12** pueden observarse algunas probetas en el interior de la cámara húmeda.



Figura 3.12 Probetas en la cámara húmeda.

El día del ensayo se refrentaba la cara superior de las probetas utilizando un compuesto de azufre líquido. De esta forma aseguramos el paralelismo entre caras y su perpendicularidad respecto al eje de la probeta evitando un contacto desigual de las caras de la probeta con los platos de prensa que daría lugar a tensiones muy desiguales en la masa de hormigón.

3.6.4. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DEL HORMIGÓN RECICLADO ENDURECIDO.-

Los valores de la densidad del hormigón reciclado endurecido, en las diferentes pruebas realizadas en nuestro estudio, se han obtenido siguiendo el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 12390-7 “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 7: Densidad del hormigón endurecido”. Para determinar el volumen de la probetas se midió su altura sobre tres generatrices diferentes situadas a 120° cada una.

3.6.5. DETERMINACIÓN DE LA ABSORCIÓN DEL HORMIGÓN RECICLADO.-

La absorción en el hormigón reciclado se determinó por dos procedimientos diferentes:

1. Determinando la diferencia de peso existente en una probeta cilíndrica de 15×30 cm secada en estufa hasta masa constante (M_s) y después de permanecer sumergida 24 horas en agua (M_w) y secarse superficialmente. El valor de la absorción es:

$$A = \frac{100 \times [M_w - M_s]}{M_s}$$

2. Siguiendo, con pequeñas variaciones, tanto el protocolo establecido por la norma UNE-EN 1936 “Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total” como el propugnado por el ensayo RILEM nº I.1:82.

Para ello se prepararon dos series de probetas cúbicas de 5 cm de lado a partir de restos de probetas ensayadas con anterioridad a tracción indirecta. Se procedió a eliminar su humedad introduciéndolas en la estufa a 110 °C hasta masa constante (M_s).

A continuación se introducen en un recipiente de vacío. Su sellado se realiza con vaselina. La tapa de dicho recipiente dispone de una llave de paso, conectada a la bomba de vacío y a un recipiente con agua, que permite la aspiración del aire o la entrada de agua.

Se realiza el vacío durante dos horas para eliminar el aire contenido en los poros abiertos de las probetas. A continuación giramos la llave de la tapa para facilitar la entrada de agua de forma que las probetas queden sumergidas en menos de quince minutos. Para que la cara inferior quede cubierta de agua las probetas se apoyan en calzos de corcho. Una vez sumergidas se deshace el vacío y se mantienen 24 sumergidas en agua a la presión atmosférica.

Transcurrido dicho periodo de tiempo se sacan del recipiente, se secan superficialmente quitando el brillo del agua superficial con un paño y se pesan (M_{SSS}). El valor de la absorción viene dado por:

$$A = \frac{100 \times [M_{SSS} - M_s]}{M_s}$$

En la **figura 3.13** puede observarse el recipiente de vacío utilizado. En su parte superior incorpora una llave de paso para permitir la entrada de agua una vez realizado el vacío mediante la bomba conectada al recipiente.



Figura 3.13 Ensayo de absorción en el hormigón endurecido.

3.6.6. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN RECICLADO.-

La resistencia a compresión del hormigón reciclado se determinó según el procedimiento establecido en la norma UNE-EN 12390-3 “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas”. En la **figura 3.14** puede observarse la prensa utilizada en los ensayos.



Figura 3.14 Ensayo de resistencia a compresión.

El tiempo máximo transcurrido, una vez que las probetas abandonaban la cámara húmeda, hasta la realización del ensayo no era superior a las tres horas. El ensayo se realizaba automáticamente programando todos los parámetros a través del computador que gobernaba el funcionamiento de la prensa.

3.6.7. DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN RECICLADO.-

La determinación del módulo de elasticidad estático del hormigón se llevó a cabo siguiendo el procedimiento establecido en la norma UNE 83316 “Ensayos de hormigón. Determinación del módulo de elasticidad en compresión”.

Para la realización de estos ensayos la Fundación ITMA (Instituto Tecnológico de Materiales del Principado de Asturias) puso a nuestra disposición la prensa del Centro de Materiales no Metálicos de Llanera. A diferencia de la utilizada en los ensayos de compresión permite, a través de dos canales añadidos, la captación de datos relativos a las deformaciones que tienen lugar en la probeta ensayada.

Para la realización del ensayo se determinaba previamente la resistencia a compresión en tres probetas de la misma amasada. Un tercio del valor medio obtenido en dichos ensayos se utiliza, posteriormente, como la tensión máxima a que se somete la probeta durante el procedimiento establecido por la norma para la determinación del módulo de elasticidad.

A la probeta se le fijan dos collarines, como los que pueden observarse en la **figura 3.15**, que permiten, una vez fijados a la probeta, medir las deformaciones que va experimentando, en función de la carga, mediante la incorporación de dos sensores de desplazamiento (LVDT) situados en dos generatrices diametralmente opuestas de la probeta.



Figura 3.15 Accesorios empleados en el ensayo de módulo de elasticidad.

Ha de asegurarse un buen centrado de la probeta en el plato de la prensa ya que de ello dependerá, en buena medida, el éxito del ensayo. Una vez colocados los collarines, se coloca la probeta sobre el plato inferior de la prensa, se acoplan los transductores de desplazamiento y se centra. En la **figura 3.16** puede observarse la probeta ya dispuesta para el ensayo.

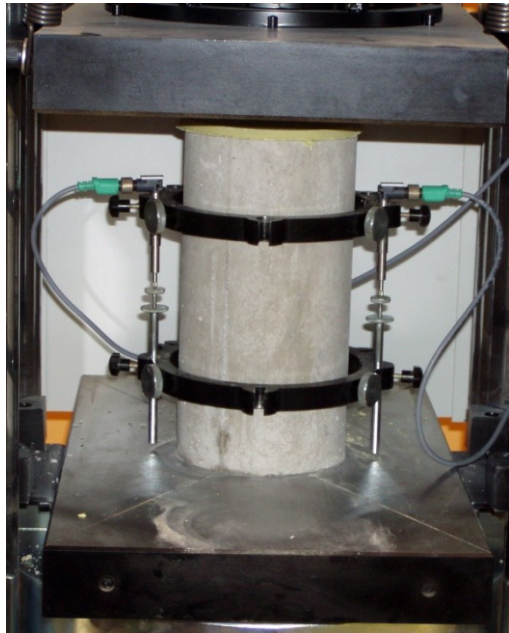


Figura 3.16 Collarines y sensores de desplazamiento.

A continuación se aplica la carga con una velocidad, regulada por el sistema de control de la máquina, de $0,5 \pm 0,2$ N/mm² por segundo. Al aplicar la tensión inicial σ_a de 0,5 N/mm² tomamos nota de las lecturas de los sensores de desplazamiento. Posteriormente, al llegar al valor máximo de la carga la mantenemos durante 60 segundos y tomamos nota de los valores de los sensores cada 30 segundos. El valor de cada lectura ha de diferir un máximo del 20% respecto del valor medio. Si esto no fuera así pararíamos el ensayo y volveríamos a centrar mejor la probeta. Si las lecturas siguieran siendo erróneas desecharíamos el ensayo. En la **figura 3.17** puede observarse el panel de control de la máquina durante este período de tiempo.

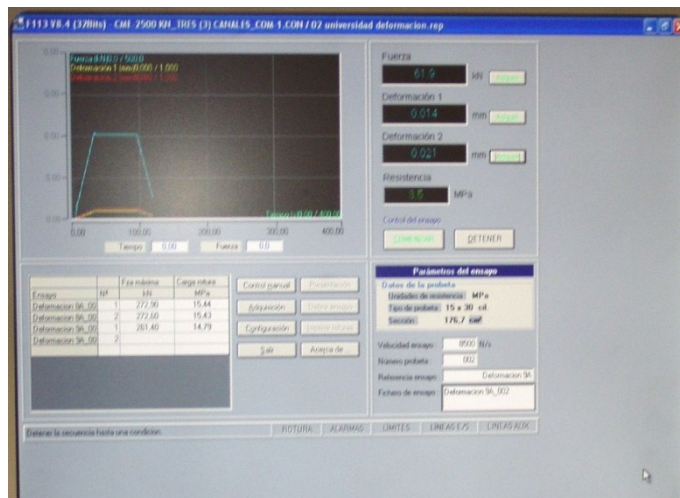


Figura 3.17 Primer ciclo de carga en el ensayo de módulo elástico.

Una vez asegurado el centrado de la probeta se reduce la carga hasta el nivel inicial y se repiten dos ciclos de carga-descarga adicionales con la misma velocidad de carga y de descarga ($0,5 \pm 0,2$ N/mm² por segundo). En cada ciclo se mantiene la tensión máxima σ_b durante 60 segundos.

En el último ciclo tomamos las deformaciones que indican los transductores transcurridos 30 segundos desde que comenzó a aplicarse la carga máxima. La media de ambas medidas será la deformación a carga máxima (d_b).

Al descargar la probeta en el último ciclo se mantiene durante 60 segundos la tensión inicial $0,5$ N/mm². Transcurridos 30 segundos desde su aplicación tomamos nota de las deformaciones en los dos sensores. La media de ambas medidas es la deformación inicial (d_a).

Las deformaciones unitarias ϵ_a y ϵ_b las obtenemos dividiendo las deformaciones obtenidas en el ensayo entre la distancia existente entre los dos collarines. Al final el valor del módulo de elasticidad estático a compresión viene dado por la expresión:

$$E = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\epsilon_b - \epsilon_a}$$

En la **figura 3.18** se observa una vista de conjunto de la prensa empleada en los ensayos con una probeta dispuesta para la realización del ensayo.



Figura 3.18 Ensayo de módulo de elasticidad.

3.6.8. DETERMINACIÓN DE LA PENETRACIÓN DE AGUA BAJO PRESIÓN DEL HORMIGÓN RECICLADO.-

Para determinar la profundidad de penetración de agua bajo presión en el hormigón reciclado se puso en práctica el procedimiento establecido en la norma UNE-EN 12390-8 “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Determinación de la profundidad de penetración de agua bajo presión”.

Se colocan tres probetas en el dispositivo que se observa en la **figura 3.19**. Por la parte inferior se aplica agua a 5 kg/cm^2 de presión, evitando su salida mediante una junta de estanqueidad. Las probetas se mantienen así durante 72 ± 2 horas.

A continuación se sacan y se rompen en dos mitades perpendicularmente a la cara en la que se aplicó la presión de agua. En las caras partidas se marca con lápiz o rotulador de color la extensión del frente y se mide sobre ellas la profundidad de penetración del agua en el hormigón redondeando al mm.

En la sección de la probeta se pudo comprobar además la distribución de los áridos y la homogeneidad de la mezcla.



Figura 3.19 Ensayo de penetración de agua bajo presión.

La rotura en dos mitades de las probetas ensayadas para medir la penetración de agua se realiza mediante el ensayo de tracción indirecta también denominado ensayo brasileño.

3.6.9. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A TRACCIÓN DEL HORMIGÓN RECICLADO.-

La resistencia a tracción del hormigón reciclado se determinó a partir del ensayo de tracción indirecta, también denominado ensayo brasileño, según la norma UNE-EN 12390-6 "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas". La probeta cilíndrica de 15×30 cm se coloca entre los platos de la prensa con

su eje en posición horizontal. A continuación se somete a compresión entre dos generatrices opuestas hasta su rotura según un plano diametral. La resistencia a tracción indirecta viene dada por la expresión:

$$f_{cti} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot d \cdot l}$$

P es la carga de rotura en N.

d es el diámetro de la probeta en mm.

l es la longitud de la probeta en mm.

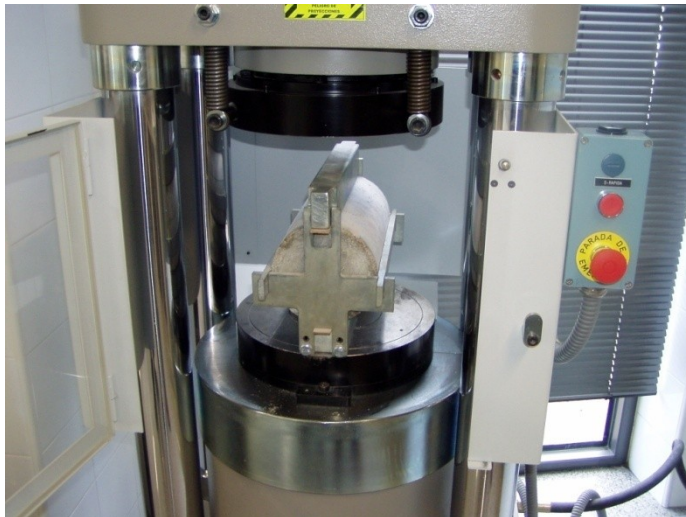


Figura 3.20 Ensayo brasileño.

En la **figura 3.20** se observa el útil empleado, donde se acopla la probeta, para llevar a cabo el ensayo de tracción indirecta.

CAPÍTULO IV

PROGRAMA EXPERIMENTAL DESARROLLADO.

4.1. INTRODUCCIÓN.-

El programa experimental base desarrollado en este estudio consta de veintisiete pruebas que fueron replicadas, posteriormente, para contrastar los datos obtenidos en la primera serie y ampliar el estudio llevado a cabo determinando la influencia de los mismos factores sobre otras características o propiedades no estudiadas con anterioridad. Cada una de las pruebas se corresponde con una amasada de hormigón reciclado realizada en el laboratorio en la que se van variando los distintos niveles de los factores que se han tenido cuenta en la planificación del programa experimental.

El diseño del experimento se ha realizado siguiendo el procedimiento general para el diseño de experimentos desarrollado por Taguchi^[122].

Utilizando como variables de entrada un conjunto de factores con distintos niveles, se analizará la influencia que, en principio, ejercen dichos factores sobre la densidad, la absorción, el aire ocluido, la resistencia a compresión, el módulo de elasticidad, la resistencia a tracción y

la penetración de agua en el hormigón reciclado. Se planificó un programa de ensayos cuyo objetivo persigue evaluar el efecto individual de cada uno de ellos sobre las características enumeradas anteriormente del hormigón reciclado fabricado.

El planteamiento de la dosificación se realizó conforme a los parámetros más comunes utilizados en las empresas que colaboraron en el estudio para producir hormigones habitualmente empleados en edificación y obra pública. El ajuste de los áridos se realizó utilizando como curva de referencia la parábola de Bolomey. Antes de realizar las amasadas se llevaron a cabo ensayos previos para realizar el ajuste de las dosificaciones teóricas.

4.2. SELECCIÓN DE VARIABLES Y NIVELES-

Las variables o factores que intervienen en el diseño del experimento son los siguientes: la procedencia del árido reciclado, el tipo de granulometría, el contenido en desclasificados, el porcentaje de sustitución del árido grueso convencional por árido reciclado, el criterio de sustitución, simple o compensada, del árido grueso convencional por árido grueso reciclado, la consistencia objetivo del hormigón reciclado y la resistencia característica a compresión objetivo.

Dichas variables han sido seleccionadas al considerar, a priori, su posible influencia sobre las características del hormigón reciclado. A continuación se realizan una serie de consideraciones que justifican la elección de cada una de ellas.

Tipo de árido reciclado.- En principio se considera importante la influencia que tiene la calidad del árido reciclado sobre propiedades del hormigón reciclado como la densidad, absorción, resistencia a compresión, etc. Así, cuanto más reducida sea la cantidad de mortero adherido que contenga el árido reciclado más se asemejará a un árido convencional y, en principio, mejor comportamiento presentará tanto en el proceso de fabricación del hormigón como, posteriormente, en las propiedades del mismo. A tal efecto se seleccionaron dos tipos de árido reciclado que establecen los dos niveles que presenta esta variable:

1. Árido reciclado procedente de la empresa Tecnología y Reciclado S.A. (Madrid). Su matriz rocosa es de origen calizo, presenta poca cantidad de mortero adherido y un porcentaje reducido de desclasificados. Es un árido reciclado de buena calidad.

2. Árido reciclado procedente de la empresa La Belonga Impulso Industrial Alternativo S.A. (Oviedo). Su matriz rocosa es de origen calizo y presenta gran cantidad de mortero adherido y de desclasificados. La calidad de dicho árido es inferior al anterior.

Granulometría.- En la bibliografía consultada no se han encontrado estudios basados en las posibles variaciones de este factor. Se ha considerado potencialmente su influencia en propiedades como la consistencia, la cantidad de aire ocluido o la resistencia a compresión del hormigón reciclado. La curva de referencia adoptada es la parábola de Bolomey y se han definido tres tipos de granulometrías distintas que constituyen los tres niveles de la variable.

1. Granulometría continua fina. La curva granulométrica se construye fijando un valor alto del parámetro "a" de la parábola de Bolomey.
2. Granulometría continua gruesa. La curva granulométrica se construye fijando un valor bajo del parámetro "a" de la parábola de Bolomey.
3. Granulometría discontinua. La curva granulométrica se construye eliminando la fracción 4/8 mm.

Contenido en desclasificados (partículas inferiores a 4 mm).- Después de separar la fracción gruesa, el árido reciclado sigue generando pequeños porcentajes de arena durante su transporte y manipulación. Dichos porcentajes pueden hacer que aumente la absorción de agua al concentrarse mayor porcentaje de pasta en estas partículas más pequeñas. El artículo 28.4 del anejo 15 de la EHE-08 establece el 5% como el porcentaje máximo de partículas que pasen por el tamiz de 4 mm para el árido grueso reciclado. En base a esto los niveles establecidos para dicho factor han sido los siguientes:

1. Un porcentaje nulo.
2. Un 5%, el límite máximo establecido por nuestra Instrucción, de partículas que pasan por el tamiz de 4 mm.
3. Un 10%, el doble del límite máximo establecido por nuestra Instrucción, de partículas que pasan por el tamiz de 4 mm.

Porcentaje de sustitución.- Sin duda, la variable considerada en principio más influyente en las propiedades del hormigón reciclado. La mayoría de estudios consultados

establecen el 20% de árido grueso reciclado como el límite de sustitución en el hormigón sin que sus propiedades se vean afectadas. En este trabajo se han propuesto cuatro niveles:

1. Un porcentaje de sustitución nulo que corresponde al hormigón de control.
2. Un porcentaje de sustitución del 20%, correspondiente al límite máximo establecido por el anejo 15 de nuestra Instrucción para su empleo como hormigón estructural sin que sea necesaria la realización de estudios específicos adicionales.
3. Un porcentaje de sustitución del 50% de la totalidad del árido grueso utilizado en la dosificación del hormigón.
4. La sustitución total del árido grueso por árido grueso reciclado.

Criterio de sustitución del árido grueso.- En la bibliografía consultada la sustitución del árido grueso por árido reciclado se realiza de manera simple. En este estudio se han establecido dos niveles diferentes para esta variable.

1. Criterio de sustitución simple. Las fracciones de árido grueso convencional son sustituidas por cantidades iguales de la misma fracción del árido reciclado empleado.
2. Criterio de sustitución compensada. Los desclasificados del árido reciclado pasan a formar parte de la arena. La cantidad de árido grueso convencional será ligeramente superior y la de la arena ligeramente inferior debido a esta circunstancia.

Consistencia objetivo.- Es otra de las variables considerada en el estudio. El aumento de consistencia, que tiene lugar al utilizar áridos reciclados, se puede compensar añadiendo agua durante el amasado, saturando los áridos o utilizando un aditivo superplastificante. En este estudio se ha elegido esta última opción. Los niveles establecidos son dos y se corresponden con las consistencias más utilizadas en obra.

1. Consistencia blanda.
2. Consistencia fluida.

Resistencia característica objetivo.- También se analiza la influencia de la variación de esta variable sobre las propiedades del hormigón reciclado. La EHE-08 limita la resistencia a compresión de los hormigones reciclados a 40 N/mm². Se han elegido dos niveles de

resistencia por debajo de este valor correspondientes a dos hormigones muy utilizados en edificación y obra civil.

1. Resistencia característica 25 N/mm².
2. Resistencia característica 35 N/mm².

4.3. DISEÑO ESTADÍSTICO DEL EXPERIMENTO.-

Con el diseño del experimento se pretende analizar estadísticamente los efectos que provocan sobre las características del hormigón reciclado la variación de los factores que, a priori, parece que influyen decisivamente en dichas propiedades. Estos efectos serán analizados de manera individual de forma que las posibles interacciones de unos con otros no puedan ser confundidas.

Los resultados que se obtengan vienen condicionados por los niveles de variación que experimentan los factores o variables de entrada definidos para este trabajo en el apartado anterior. No se ha realizado el estudio de los efectos de cada factor uno a uno de manera secuencial ya que, como puede observarse, al ser numerosos los factores introducidos, el desarrollo completo de los ensayos resultaría inviable. Este programa experimental se ha diseñado reduciendo sensiblemente el número de combinaciones resultantes de multiplicar los números correspondientes a los niveles de todos los factores considerados. Dicha reducción se ha realizado utilizando sólidos fundamentos estadísticos [97,109] y no supone merma alguna en el rigor científico del planteamiento.

Por tanto, la fase experimental ha consistido en seleccionar un número reducido de combinaciones de todas las posibles que permitirá, analizando los resultados obtenidos en esta serie de pruebas, generalizarlos a toda la población estudiada.

En la **tabla 4.1** se presenta un resumen de los factores y niveles que intervienen en el diseño del experimento.

El desarrollo del programa experimental se diseñó para llevarse a cabo mediante dos series o periodos de pruebas. En cada una de ellas se realizaron 27 amasadas, resultantes de un diseño factorial altamente fraccionado que se correspondería con el plan completo y que constaría de 576 pruebas. Esta matriz ortogonal, denominada L27 [122], ha sido adaptada convenientemente al experimento, debido al número de factores que intervienen y a sus

correspondientes niveles. Nos permite estudiar la influencia de los efectos simples de dichos factores sobre cada una de las propiedades consideradas sin que se confundan entre ellos.

Factor	Niveles	Definición	Abrev.
Árido de origen	2	Oviedo	OVD
		CEDEX	CDX
Contenido en desclasificado	3	0	0d
		5%	0,5d
		10%	d
Resistencia característica objetivo	2	H-35	H35
		H-25	H25
Consistencia objetivo	2	Blanda	B
		Fluida	F
Tipo de Granulometría	3	Continua fina	GCF
		Continua gruesa	GCG
		Discontinua	GD
Porcentaje de sustitución	4	0	0%
		20	20%
		50	50%
		100	100%
Criterio de sustitución	2	Sustitución simple	SS
		Sustitución compensada	SC

Tabla 4.1 Factores y niveles de variación.

En la serie de ensayos denominada B se analizó la influencia de las variables de entrada sobre la densidad y la absorción del hormigón, sobre la resistencia a compresión, sobre la resistencia a tracción y también sobre la penetración de agua a presión.

En la serie de ensayos denominada A el estudio ha consistido en el análisis de la influencia de los factores propuestos en el diseño del experimento sobre la cantidad de aire ocluido en el hormigón reciclado fresco y sobre el módulo de deformación del hormigón reciclado endurecido.

En la **tabla 4.2** se observan las combinaciones analizadas de acuerdo con los niveles establecidos en la **tabla 4.1**. En el ANEJO 1 se justifican las pautas seguidas para obtener dichas combinaciones modificando la matriz L27 original.

Estas combinaciones permiten, a partir de los resultados obtenidos en los ensayos de las 27 pruebas, obtener información suficiente para poder analizar la influencia de cada uno de los factores considerados con plena garantía.

Nº Prueba	Tipo de árido	% de sustituc	Cont. desclasif	Tipo de granul.	Resist. carac. obj	Consist. objetivo	Crit. sustituc.
1	OVD	0%	0	GCF	H35	B	SS
2	CDX	0%	5%	GCG	H25	F	SC
3	CDX	0%	10%	GD	H25	B	SS
4	CDX	20%	0	GCF	H35	F	SC
5	CDX	20%	5%	GCG	H25	B	SS
6	OVD	20%	10%	GD	H25	B	SS
7	CDX	0%	0	GCF	H35	B	SS
8	OVD	0%	5%	GCG	H25	B	SS
9	CDX	0%	10%	GD	H25	F	SC
10	CDX	50%	0	GCG	H25	B	SC
11	OVD	50%	5%	GD	H35	F	SS
12	CDX	50%	10%	GCF	H25	B	SS
13	OVD	100%	0	GCG	H25	F	SS
14	CDX	100%	5%	GD	H35	B	SS
15	CDX	100%	10%	GCF	H25	B	SC
16	CDX	50%	0	GCG	H25	B	SS
17	CDX	50%	5%	GD	H35	B	SC
18	OVD	50%	10%	GCF	H25	F	SS
19	CDX	0%	0	GD	H25	B	SS
20	CDX	0%	5%	GCF	H25	F	SS
21	OVD	0%	10%	GCG	H35	B	SC
22	CDX	20%	0	GD	H25	F	SS
23	OVD	20%	5%	GCF	H25	B	SC
24	CDX	20%	10%	GCG	H35	B	SS
25	OVD	0%	0	GD	H25	B	SC
26	CDX	0%	5%	GCF	H25	B	SS
27	CDX	0%	10%	GCG	H35	F	SS

Tabla 4.2 Combinaciones ensayadas.

4.4. DOSIFICACIÓN DEL HORMIGÓN.-

Se plantearon dos dosificaciones base. Una para un hormigón reciclado de resistencia característica a compresión 25 N/mm^2 . Otra en la que la resistencia característica a compresión del hormigón reciclado sea 35 N/mm^2 . En ambos casos el tamaño máximo del árido es de 20 mm. El cemento empleado es el CEM III/A 42,5 N/SR. Se eligió por ser muy utilizado en las tres plantas de hormigón preparado que colaboraron en este estudio. Con estos criterios se plantean las dosificaciones de referencia para cada uno de los dos hormigones base.

Dosificación base 1. Resistencia característica 25 N/mm^2 . Se trata de una dosificación muy empleada en edificación. Se utilizaron 275 kg/m^3 de cemento, la mínima cantidad de cemento establecida por la EHE-08 (tabla 37.3.2.a), y una relación agua-cemento de 0,60, valor máximo establecido por nuestra instrucción (tabla 37.3.2.a) para ambientes IIa. La cantidad de agua, incluida la que absorben los áridos, es de 165 l. El tipo de ambiente elegido es el más común en la zona de influencia de las plantas colaboradoras en el estudio. A nivel de planta esta dosificación suele llevar un exceso de 5 a 25 kg/m^3 de cemento mientras que la relación agua-cemento es similar. Al ejercer un control más exhaustivo sobre todos los parámetros que intervienen en la dosificación se optó por dosificar el hormigón con la cantidad mínima permitida.

Dosificación base 2. Resistencia característica 35 N/mm^2 . Es una dosificación típica de obra civil. Se utilizaron 375 kg/m^3 de cemento y una relación agua-cemento de 0,5. Al igual que en la dosificación anterior la cantidad de cemento queda ligeramente por debajo de la utilizada en las plantas colaboradoras debido al mayor control ejercido durante el proceso de fabricación. La cantidad de agua, incluida la que absorben los áridos, es de 187,5 l.

Una vez determinadas las cantidades de cemento y agua para las dosificaciones base anteriores se determinan las cantidades de grava y arena naturales que se necesitan tomando como unidad de fabricación 1 m^3 de hormigón. Se tendrá en cuenta la disminución de volumen que experimenta la masa de hormigón debida a la absorción de agua por parte del árido y a que el volumen que ocupa la pasta de cemento es inferior a la suma de los volúmenes del cemento y el agua^[26]. Al estimarse dicha disminución de volumen por término medio en el 2,5%, la cantidad necesaria de componentes sueltos serán 1025 litros.

Para determinar los porcentajes en que han de mezclarse el árido grueso, grava y gravilla, y el fino, arenas caliza y silícea, con la finalidad de que dicha mezcla sea óptima para la fabricación de hormigón se utilizó como curva de referencia la parábola de Bolomey. Se eligió dicha curva al tener en cuenta, a través del parámetro "a", el tipo de árido y la consistencia que se desea obtener en el hormigón. En realidad dicho parámetro es un índice del contenido en finos, incluido el cemento, que se propone en cada dosificación. Dicha curva responde a la expresión siguiente:

$$y = a + (100 - a) \sqrt{\frac{d}{D}}$$

y es el % que pasa por cada tamiz de la serie empleada.

d es la abertura de cada tamiz en mm-

D es el tamaño máximo del árido en mm.

El valor del parámetro "a" queda recogido, de manera orientativa, en la **tabla 4.3**:

Tipo de árido	Consistencia	a
Rodado	Seco-plástica	10
	Blanda	11
	Fluida	12
Machacado	Seco-plástica	12
	Blanda	13
	Fluida	14

Tabla 4.3 Parámetro de Bolomey.

De acuerdo con lo comentado en la metodología, la curva resultante de la mezcla de los áridos utilizados en el estudio, incluyendo el cemento como una fracción más de los mismos, se ajustó a la parábola de Bolomey mediante el método de mínimos cuadrados.

Estos valores del parámetro "a" fueron propuestos para un tipo de hormigón estándar que no siempre coincide con los intereses de todos los fabricantes de hormigón. Por eso en este estudio se plantea como variable el tipo de granulometría, tal y como se recoge en el apartado 4.2, considerando granulometrías continuas finas, granulometrías continuas gruesas y granulometrías discontinuas. Para considerar este criterio los valores del parámetro "a"

utilizados para el ajuste, independientemente de la consistencia del hormigón fabricado, han sido los siguientes:

- Para granulometrías continuas finas: $a = 16$
- Para granulometrías continuas gruesas: $a = 11$
- Para granulometrías discontinuas: $a = 12$

Evidentemente, para asegurar la discontinuidad de la curva teórica en la granulometría discontinua se procedió a eliminar la fracción 4/8 mm del árido. En la **figura 4.1** pueden observarse las tres curvas granulométricas utilizadas. Para realizar los cálculos relativos a las dosificaciones correspondientes a cada una de las amasadas propuestas en el diseño del experimento se elaboró una hoja de cálculo –se incluye un resumen en el ANEJO 2– en la que se introducían los siguientes datos:

- Relación agua-cemento.
- Cantidad de cemento.
- Tamaño máximo del árido.
- Parámetro de Bolomey.
- Granulometría de la grava, de la gravilla, de la arena caliza, de la arena silícea y del árido reciclado.
- Porcentaje de arena silícea respecto a la totalidad del árido fino.
- Densidad relativa de la grava, de la gravilla, de la arena caliza, de la arena silícea y del árido reciclado.
- Humedad de la grava, de la gravilla, de la arena caliza, de la arena silícea y del árido reciclado.
- Porcentaje de aditivo utilizado.
- Volumen de la amasada.

En el proceso de cálculo se tiene en cuenta la corrección por humedad de los áridos y la correspondiente al aditivo. Los resultados que se obtienen en la hoja de cálculo, a través de los datos anteriores, proporcionan simultáneamente las cantidades en kg de cemento, agua, grava, gravilla, arena caliza, arena silícea, árido reciclado y aditivos necesarias para la fabricación del volumen de hormigón que se necesite con un 20%, un 50% o un 100% de árido grueso reciclado, incluyendo el porcentaje de desclasificados requeridos por la amasada

correspondiente. También se realiza un control del ajuste de la curva mezcla a la curva de referencia midiendo la dispersión.

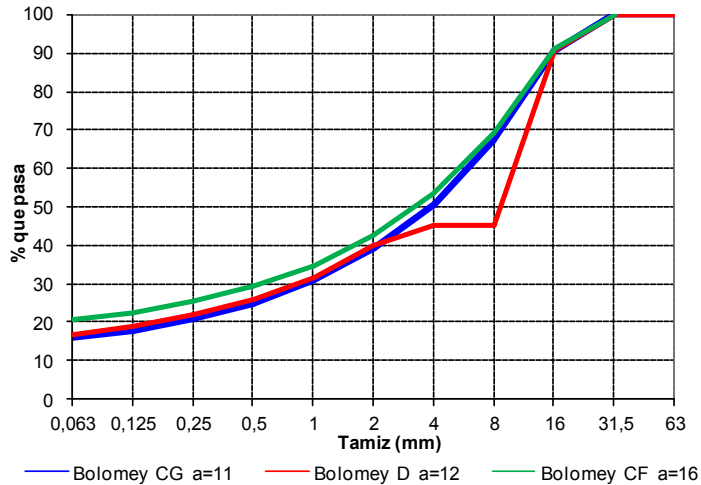


Figura 4.1 Curvas granulométricas de referencia.

A modo de ejemplo, en las figuras 4.2, 4.3 y 4.4 puede observarse el ajuste de la curva granulométrica del árido total a la parábola de Bolomey para las tres granulometrías empleadas. En el ANEJO 3 están disponibles el resto de gráficos correspondientes a todas las amasadas realizadas.

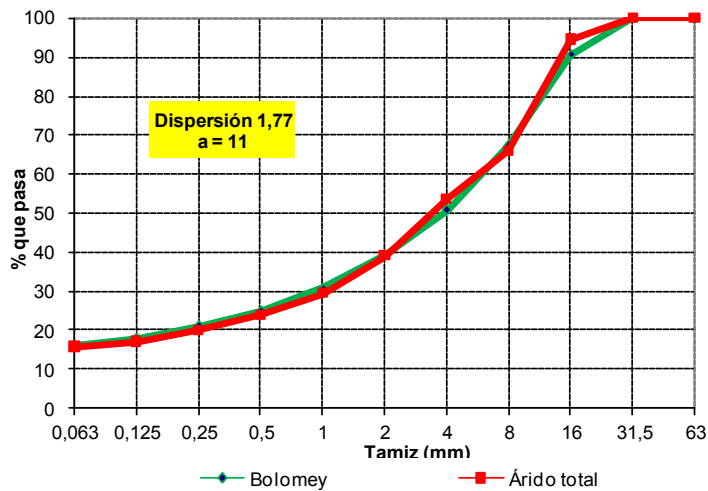


Figura 4.2 Ajuste por mínimos cuadrados del árido total a la curva de Bolomey en la dosificación base 1. (Granulometría continua gruesa).

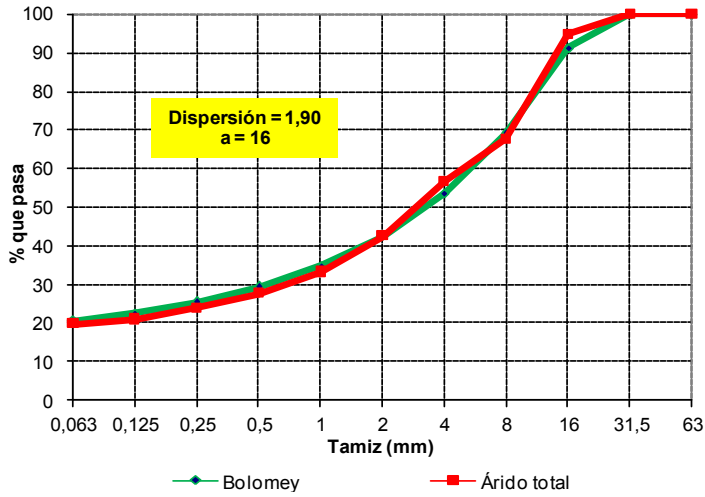


Figura 4.3 Ajuste por mínimos cuadrados del árido total a la curva de Bolomey en la dosificación base 2. Granulometría continua fina.

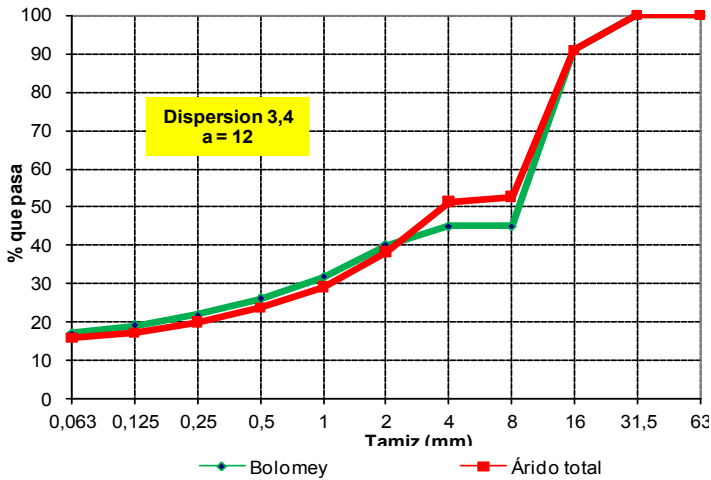


Figura 4.4 Ajuste por mínimos cuadrados del árido total a la curva de Bolomey en la dosificación base 1. Granulometría discontinua.

4.4.1. CRITERIOS DE SUSTITUCIÓN DEL ÁRIDO CONVENCIONAL POR ÁRIDO RECICLADO.-

Se plantean dos criterios de sustitución que se denominan “sustitución simple” y “sustitución compensada”.

En ambos casos el criterio implica conseguir una dosificación como la de referencia. La única diferencia estriba en el porcentaje de sustitución y el contenido en desclasificados previstos para cada amasada.

Conceptualmente, el criterio de sustitución simple consiste en reemplazar el porcentaje de árido convencional previsto por el mismo volumen de árido reciclado. Este último mantendrá su distribución granulométrica original salvo en lo relativo a la fracción 0/4 mm que se adaptará para que coincida con el contenido en desclasificados previsto.

El criterio de sustitución compensada, además de adaptar la dosificación del árido reciclado para garantizar el contenido en desclasificados previsto, reduce el árido grueso convencional *únicamente* en la cantidad de árido reciclado grueso. La dosificación de arena también se reduce en la cantidad correspondiente a los desclasificados del árido reciclado ya que la granulometría de estos entra en el ámbito de los áridos finos.

Para conseguir un proceso que garantice estos extremos todo el árido reciclado a utilizar se tamizó conservando cada fracción en contenedores independientes. Las fracciones empleadas fueron: 0/1 mm, 1/2 mm, 2/4 mm, 4/8 mm, 8/16 mm y 16/32 mm.

Mediante el siguiente ejemplo se aclaran los dos criterios de sustitución utilizados. En la **tabla 4.4** se muestran las granulometrías de los áridos reciclados de La Belonga, la de sus fracciones gruesas y la de los desclasificados que se obtienen de este árido reciclado.

Árido Reciclado La Belonga						
Tamiz (mm)	Total		Fracción gruesa		Desclasificados	
	% pasa	% ret. parcial	% pasa	% ret. parcial	% pasa	% ret. parcial
31,50	100,00	0,00	100,00	0,00	100	0
16,00	86,00	14,00	85,67	14,33	100	0
8,00	29,30	56,70	27,64	58,03	100	0
4,00	2,30	27,00	0,00	27,64	100,00	0
2,00	1,40	0,90	0,00	0,00	60,87	39,13
1,00	0,00	1,40	0,00	0,00	0,00	60,87

Tabla 4.4 Granulometrías de los áridos reciclados de la Belonga.

A partir de una dosificación base como la indicada en la **tabla 4.5**, se pretende determinar la composición de una amasada con un porcentaje de sustitución del 50% y un contenido en desclasificados del 10% aplicando los dos criterios de sustitución considerados. El procedimiento para determinar las cantidades de los distintos materiales a emplear es el siguiente:

Dosificación base (kg/m3)	
Cemento	275,00
Agua	158,84
Grava	675,80
Gravilla	284,89
Ar. Grueso total	960,69
Arena caliza	940,41
Arena silícea	170,93
Arena total	1111,34

Tabla 4.5 Dosificación base.

1. Se determina la cantidad total de árido reciclado AR_t a emplear:

$$AR_t = AG_t \cdot \frac{d_{AR}}{d_{AG}} \cdot \frac{P_s}{100} = 960,60 \cdot \frac{2,20}{2,68} \cdot \frac{50}{100} = 394,28 \text{ kg}$$

AG_t es el árido grueso total.

d_{AR} es la densidad del árido reciclado.

d_{AG} es la densidad del árido grueso.

P_s es el porcentaje de sustitución.

2. A continuación se determina el contenido en desclasificados D_t .

$$D_t = AR_t \cdot \frac{d}{100} = 394,28 \cdot \frac{10}{100} = 39,43 \text{ kg}$$

Estos desclasificados se reconstituirán a partir de las fracciones inferiores a 4 mm del árido reciclado en la misma proporción en que se encuentran en él. Así se utilizará un 39,13 % de la fracción 2/4 mm y el 60,87% de la fracción 0/2 mm según puede observarse en la **tabla 4.4**. Así se tiene:

$$\text{Fracción (2/4 mm)} = 39,13 \cdot \frac{39,43}{100} = 15,43 \text{ kg}$$

$$\text{Fracción (1/2 mm)} = 60,87 \cdot \frac{39,43}{100} = 24,00 \text{ kg}$$

3. Reconstitución del árido reciclado grueso.

El árido reciclado grueso que debe incorporarse se reconstituirá manteniendo las proporciones entre las distintas fracciones e iguales a las que presenta la fracción gruesa del árido reciclado utilizado (véase **tabla 4.4**). La cantidad de árido reciclado grueso AR_G que debe añadirse es:

$$AR_G = AR_t - D_t = 394,28 - 39,43 = 354,85 \text{ kg}$$

En este ejemplo las cantidades de cada fracción serían las siguientes:

$$\text{Fracción (16/31,5 mm)} = AR_G \cdot P_{16/31,5} = 354,85 \cdot 0,1433 = 50,85 \text{ kg}$$

$$\text{Fracción (8/16 mm)} = AR_G \cdot P_{8/16} = 354,85 \cdot 0,5803 = 205,92 \text{ kg}$$

$$\text{Fracción (4/8 mm)} = AR_G \cdot P_{4/8} = 354,85 \cdot 0,2764 = 98,08 \text{ kg}$$

4.- Finalmente se determina la composición del resto de áridos, que será diferente en función del criterio de sustitución aplicado.

Criterio de sustitución simple. Las cantidades de cemento, agua y arenas no sufren modificación alguna y coinciden con la dosificación base.

La cantidad de cada uno de los áridos gruesos convencionales se reduce en una cantidad igual a la del porcentaje de sustitución.

$$GC_f = GC_i \cdot \left(1 - \frac{P_s}{100}\right) = 675,80 \cdot \left(1 - \frac{50}{100}\right) = 337,90 \text{ kg}$$

$$GVC_f = GVC_i \cdot \left(1 - \frac{P_s}{100}\right) = 284,89 \cdot \left(1 - \frac{50}{100}\right) = 142,45 \text{ kg}$$

GC_f es la grava convencional final.

GC_i es la grava convencional inicial.

GVC_f es la gravilla convencional final.

GVC_i es la gravilla convencional inicial.

Criterio de sustitución compensada. Las cantidades de cemento y agua no sufren modificación alguna y coinciden con la dosificación base.

La cantidad de cada uno de los áridos gruesos convencionales se reduce en una cantidad igual a la del porcentaje de sustitución descontando el contenido en desclasificados.

$$GC_f = GC_i \cdot \left[1 - P_s \cdot \frac{1 - \frac{d}{100}}{100}\right] = 675,80 \cdot \left[1 - 50 \cdot \frac{1 - \frac{10}{100}}{100}\right] = 371,69 \text{ kg}$$

$$GVC_f = GVC_i \cdot \left[1 - P_s \cdot \frac{1 - \frac{d}{100}}{100}\right] = 284,89 \cdot \left[1 - 50 \cdot \frac{1 - \frac{10}{100}}{100}\right] = 156,69 \text{ kg}$$

La cantidad de arena se obtendrá descontando a las cantidades de la dosificación base el contenido total en desclasificados. Este descuento se realizará proporcionalmente a las cantidades de la dosificación base de cada una de ellas. La corrección incluye el factor de relación de densidades de los áridos para mantener el volumen total del hormigón. Así se tiene:

$$AC_f = AC_i - D_t \cdot \frac{AC_i}{AT} \cdot \frac{d_{AG}}{d_{AR}} = 940,41 - 39,43 \cdot \frac{940,41}{1111,34} \cdot \frac{2,68}{2,20} = 899,76 \text{ kg}$$

$$AS_f = AS_i - D_t \cdot \frac{AS_i}{AT} \cdot \frac{d_{AG}}{d_{AR}} = 170,93 - 39,43 \cdot \frac{170,93}{1111,34} \cdot \frac{2,68}{2,20} = 163,54 \text{ kg}$$

AC_f es la arena caliza final.

AC_i es la arena caliza inicial.

AS_f es la arena silíceica final.

AS_i es la arena silíceica inicial.

AT es la arena total.

Como es lógico las diferencias entre un criterio y otro son tanto mayores cuanto mayor es el porcentaje de sustitución y el contenido en desclasificados.

4.4.2. CRITERIO PARA OBTENER EL CONTENIDO DE DESCLASIFICADOS.-

El contenido en desclasificados es nulo, del 5% o del 10%, según la amasada. Para añadir la cantidad exacta se separan la fracción 0/4 mm en las fracciones 2/4 mm, 1/2 mm y 0/1mm. Los desclasificados se añaden en las mismas proporciones que tenían en el árido reciclado original, tal y como se ha visto en los ejemplos anteriores, descontando previamente la cantidad que incorpora la grava reciclada.

4.4.3. EMPLEO DE LOS ADITIVOS.-

Los aditivos empleados, plastificante (Pozzolith 370N) y superplastificante (Glenium Sky 511), se dosificaron utilizando los márgenes establecidos por el fabricante. Para el plastificante estos márgenes oscilan entre el 0,2% y el 0,5% del peso del cemento y para el superplastificante entre el 0,6% y el 1,2%. El añadido de los aditivos a la mezcla se llevó a cabo en la segunda parte del amasado tal y como se explicó detalladamente en el apartado 3.5.2 del capítulo III.

4.4.4. EJEMPLOS.-

En la **tabla 4.6** se muestran, a modo de ejemplo, las cantidades de componentes sueltos correspondientes a las amasadas nº 26 y nº 16.

La amasada nº 26 corresponde a la dosificación de un hormigón con una resistencia característica objetivo a compresión de 25 N/mm². El porcentaje de sustitución de árido reciclado es nulo. La granulometría es continua fina y la consistencia del hormigón es blanda. No incorpora desclasificados.

La amasada nº 16 corresponde a la dosificación de un hormigón con una resistencia característica objetivo a compresión de 25 N/mm², con un porcentaje de sustitución de árido reciclado procedente Madrid del 50 % y un contenido en desclasificados del 5%. La granulometría es continua gruesa y la consistencia del hormigón es blanda.

AMASADA Nº	26	16
Componente	Cantidad kg/m ³	Cantidad kg/m ³
Cemento III 42,5 N/SR	275,00	275,00
Agua	158,46	159,08
Trito (10/20 mm)	675,81	333,98
Arrocillo (4/10 mm)	284,89	215,40
Arena caliza (0/4 mm)	940,41	823,06
Arena silíceas (0/4 mm)	170,93	149,60
Grava reciclada	0	469,28
Desclasificados	0	14,5
Plastificante	0,83	0,83
Superplastificante	0,83	1,37

Tabla 4.6.Componentes sueltos de las amasadas nº 26 y nº 16.

La diferencia entre la cantidad de agua de una y otra amasada estriba en la humedad de la arena silíceas. Al ir en menor cantidad en la amasada 16, necesita un

poco más de agua. En la amasada 16 se reemplazó el 50% de la grava natural por grava reciclada mediante el criterio de sustitución simple. Las diferencias en las cantidades de arena son consecuencia de la diferente granulometría empleada en cada una de las amasadas.

En las **figuras 4.5, 4.6 y 4.7** pueden observarse ejemplos de ajuste de las curvas granulométricas del árido total a la curva de referencia utilizada. Corresponden a dosificaciones del hormigón en las que se sustituyeron, respectivamente, el 20%, el 50% y el 100% de árido grueso natural por árido reciclado.

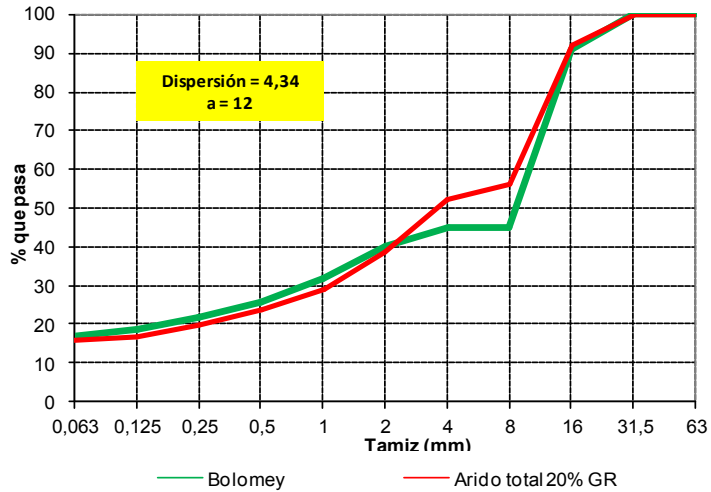


Figura 4.5 Ajuste del árido total con 20% de grava reciclada a la curva de Bolomey para la dosificación base 1. Granulometría discontinua. Sustitución simple.

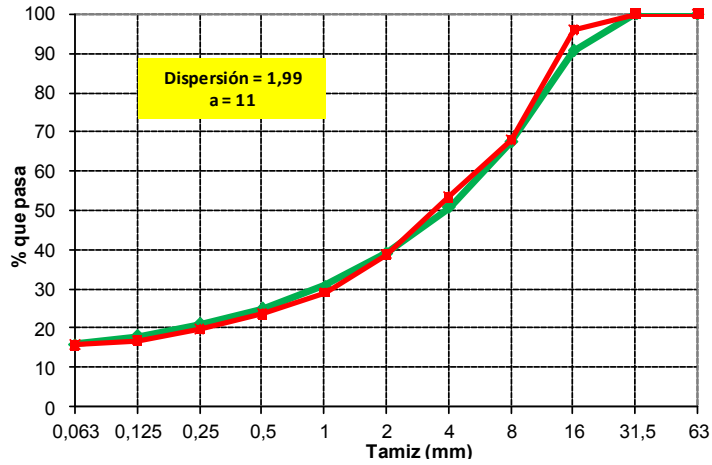


Figura 4.6 Ajuste del árido total con 50% de grava reciclada a la curva de Bolomey para la dosificación base 1. Granulometría continua gruesa. Sustitución simple.

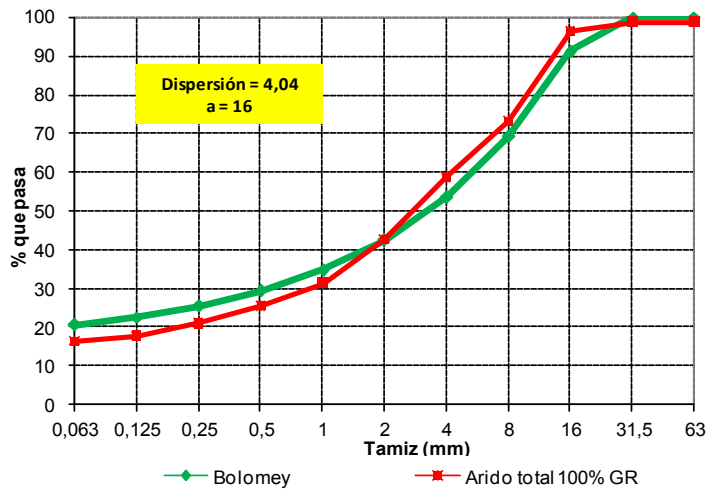


Figura 4.7 Ajuste del árido total con 100% de grava reciclada a la curva de Bolomey para la dosificación base 1. Granulometría continua fina. Sustitución simple.

4.5. PROGRAMA DE ENSAYOS.-

Tal y como se indica en el apartado 4.3 la fase experimental incluye dos series de ensayos. En cada una de ellas se cubren todas las dosificaciones especificadas en la **tabla 4.2**. Corresponden a las mismas dosificaciones por lo que se procedió a replicar algunos ensayos además de introducir la medida de otros parámetros distintos. Se replicaron la densidad, la consistencia y la resistencia.

Según el programa de ensayos establecido se comienza por realizar las 27 amasadas correspondientes a la serie B. Las primeras amasadas que se realizaron fueron aquellas que no tenían porcentaje alguno de árido reciclado, a continuación las que tenían un 20%, un 50% y un 100% de árido reciclado procedente de Madrid y finalmente aquellas que tenían un 20%, un 50% y un 100% de árido reciclado procedente de Oviedo. El volumen de hormigón fabricado en cada una de ellas fue de 60 litros. De esta forma se dispone de hormigón suficiente en cada amasada para realizar dos medidas de consistencia mediante el cono de Abrams y fabricar 7 probetas cilíndricas de 15×30 cm para realizar los siguientes ensayos:

- 1 ensayo de resistencia a compresión a 7 días.
- 3 ensayos de resistencia a compresión a 28 días.
- 6 ensayos de densidad.
- 3 ensayos de absorción.
- 3 ensayos de resistencia a tracción indirecta.
- 3 ensayos de profundidad de penetración de agua a presión.

En la **tabla 4.7** se recogen los ensayos realizados con cada una de las probetas fabricadas.

AMASADAS B		
Probeta	Ensayo	
1	Resistencia a compresión 7 días	En cada una de las 27 pruebas realizadas se llevaron a cabo dos ensayos de consistencia
2, 3 y 4	Densidad, absorción, resistencia a compresión 28 días	
5, 6, 7	Densidad, tracción indirecta, penetración de agua.	

Tabla 4.7 Ensayos amasadas B.

Una vez finalizadas las amasadas B se procedió a realizar la serie de amasadas A en el orden establecido en la matriz diseñada. Se realizaron los ensayos siguientes:

- 1 ensayo de consistencia.
- 1 ensayo de aire ocluido.
- 6 ensayos de densidad.
- 3 ensayos de resistencia a compresión.
- 3 ensayos de módulo de deformación.

En la **tabla 4.8** se recogen los ensayos realizados con cada una de las probetas fabricadas.

AMASADAS A		
Probeta	Ensayo	
1, 2, 3	Densidad, resistencia a compresión 28 días.	En cada una de las 27 pruebas realizadas se llevó a cabo un ensayo de consistencia y otro de aire ocluido.
4, 5, 6	Densidad, módulo de deformación a 28 días.	

Tabla 4.8 Ensayos amasadas A.

En consecuencia los ensayos de consistencia, densidad y resistencia a compresión han sido replicados ya que se repiten en las dos series de ensayos.

4.6. ENSAYOS PREVIOS Y AJUSTE DE LAS DOSIFICACIONES.-

Antes de proceder a realizar las amasadas correspondientes al experimento diseñado se efectuaron una serie de amasadas de prueba de 50 litros de hormigón. Con cada una de las dosificaciones base se realizaron dos amasadas de prueba. En todos los casos el porcentaje de sustitución de árido reciclado fue nulo.

Se realizaron ensayos de consistencia con el fin de determinar las cantidades apropiadas de aditivos así como la proporción adecuada de arena silíceas. En cada una de ellas

se comprobó la resistencia a compresión a 28 días, obtenida como la media de los resultados de los ensayos sobre tres probetas cilíndricas de 15×30 cm.

Dichas amasadas sirvieron para desarrollar de manera sistemática el protocolo establecido en el capítulo anterior así como para realizar los ajustes necesarios en los sistemas mecánicos de la amasadora.

Una vez comprobados que los valores de la resistencia a compresión obtenidos estaban dentro de lo previsto se procedió al desarrollo del programa experimental.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS.

5.1 INTRODUCCIÓN.-

A través del análisis de los resultados obtenidos en las 54 amasadas realizadas, correspondientes a la replicación de las veintisiete pruebas propuestas, se establecerán conclusiones válidas con un margen de error reducido y conocido para cada una de las propiedades del hormigón fabricado con áridos reciclados objeto de este estudio.

Se utilizará el Análisis de la Varianza (ANOVA) al ser una eficiente herramienta que nos permite la posibilidad de estudiar, de manera simultánea y mediante un único examen, la influencia de todos los factores, con los diferentes niveles considerados en este trabajo, sobre cada una de las variables de salida medidas en los ensayos.

La idea básica radica en descomponer la variabilidad observada en los resultados de cada una de las series de valores obtenidos en los ensayos, correspondientes a cada una de las propiedades estudiadas, en los efectos simples que corresponden a cada uno de los factores introducidos.

Se irá discutiendo de manera singular, para cada una de las propiedades estudiadas la influencia, a partir de los resultados obtenidos del ANOVA, de aquellos factores o variables de entrada que, en primera instancia, se estimaron en el diseño del experimento y que pueden afectar a dichas propiedades.

5.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES.-

Los resultados experimentales correspondientes a todos los ensayos realizados en este estudio están recogidos en el ANEJO 4 del presente trabajo.

El tratamiento y análisis estadístico de los resultados se ha realizado utilizando la aplicación informática Statgraphics Plus versión 5.1.

El ANOVA se llevará a cabo sucesivamente sobre los resultados de los ensayos de las 27 pruebas o amasadas realizadas correspondientes a la densidad, la absorción, el aire ocluido, la resistencia a compresión, el módulo de elasticidad, la resistencia a tracción indirecta, la resistencia a tracción y la permeabilidad al agua. Se estudiará el efecto que ejercen los factores considerados con sus distintos niveles sobre el valor medio de los ensayos de cada una de estas propiedades.

Una vez introducidos los datos en Statgraphics se realiza un análisis de varianza multifactorial. El experimento diseñado, al constar de 27 pruebas, tiene 26 grados de libertad.

A modo de ejemplo se expone la **tabla 5.1** con los datos de salida de un análisis de varianza realizado sobre una determinada propiedad con todos los factores considerados en este estudio.

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Tipoarido	2,31467	1	2,31467	8,08	0,0123
B:Porcsust	15,4285	3	5,14283	17,95	0
C:Centdeselas	0,158696	2	0,0793481	0,28	0,7618
D:Tipogranul	0,509652	2	0,254826	0,89	0,4314
E:Resistobj	1,5572	1	1,5572	5,44	0,0341
F:Consistobj	0,315869	1	0,315869	1,1	0,3103
G:Critsust	0,046363	4	0,016363	0,06	0,8143
RESIDUAL	4,29659	15	0,286439		
TOTAL corrected	24,5975	26			

Tabla 5.1 Salida de Statgraphics. Primer análisis de varianza.

1. En la *primera columna* de la **tabla 5.1** se observan los factores analizados.
2. La *segunda columna* de la **tabla 5.1** incluye las sumas de los cuadrados de cada uno de los factores. Mide la variabilidad en los datos asociada a cada factor sobre la media. Se obtiene hallando las sumas de los cuadrados de las desviaciones de la media de cada uno de los niveles del factor respecto a la media general.

El penúltimo dato de la segunda columna contiene la suma de cuadrados residual y mide la variabilidad interna de los factores. Se obtiene hallando la suma de los cuadrados en todos los factores de las diferencias entre cada dato y la media del nivel al que corresponda dentro del factor.

El último dato de la segunda columna corresponde a la suma de cuadrados total y mide la variabilidad total en los datos. Es la suma de los cuadrados de las desviaciones de cada dato respecto a la media general.

3. La *tercera columna* de la **tabla 5.1** refleja los grados de libertad de cada factor que es igual al número de niveles de cada uno de ellos menos uno.

El último dato de la tercera columna es el número de grados de libertad totales que es igual al número de pruebas del experimento menos una.

El penúltimo dato de la tercera columna corresponde al número de grados de libertad residuales que se obtiene restando al número de grados de libertad totales la suma de los grados de libertad de todos los factores.

4. La *cuarta columna* de la **tabla 5.1** contiene la relación entre las sumas de los cuadrados de los factores y los grados de libertad de los mismos. A estos estadísticos así obtenidos se les denomina cuadrados medios.
5. En la *columna F-Ratio* de la **tabla 5.1** se divide el cuadrado medio de cada factor y el cuadrado medio residual. Con dicho valor se contrasta la hipótesis nula, que establece la misma media para los distintos niveles del factor considerado. Se observa si es demasiado grande para distribuirse como una distribución F de Fisher con el número de grados de libertad asociados al factor considerado y a la suma de cuadrados residual.
6. En última columna de la **tabla 5.1** se cuantifica el p-valor y mide el riesgo a equivocarnos al rechazar la hipótesis nula. Cuando dicho factor es inferior a 0,05 se rechaza dicha hipótesis considerando entonces que las diferencias existentes entre las medias del factor evaluado son significativas. El riesgo de equivocación en este caso es inferior al 5%.

Puede observarse a la vista de los p-valores obtenidos (ver **tabla 5.1**) que los factores A, B y E presentan diferencias significativas en los valores medios de sus diferentes niveles. Los factores que presentan p-valores altos presentan valores medios similares en todos sus niveles.

Las diferencias entre los valores medios de los distintos niveles de cada factor pueden observarse y compararse mediante una de las salidas gráficas de esta aplicación: los gráficos LSD (Least Significant Difference). Cuando dos intervalos LSD, correspondientes a dos niveles de un factor, se solapan entre sí la diferencia entre las medias no es significativa. En la **figura 5.1** se observa un ejemplo. El factor considerado presenta una diferencia importante entre el nivel 0 y el resto de niveles así como entre el nivel 0, el nivel 20 y el nivel 100. Por el contrario las diferencias existentes entre los niveles 20 y 50 y entre el nivel 50 y el nivel 100 no son significativas y por lo tanto no existirán diferencias apreciables entre sus medias.

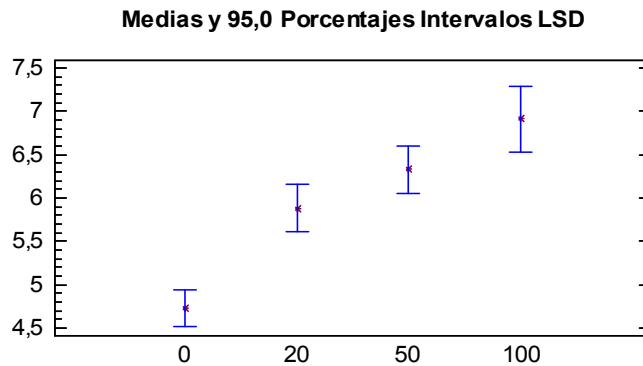


Figura 5.1 Gráfico LSD

Statgraphics analiza los residuos y aplica el test de Grubbs para detectar la presencia de datos anómalos en el análisis de varianza. Dicho test consiste en determinar el valor de G como:

$$G = \frac{\max_{i=1,\dots,N} |x_i - \bar{x}|}{s}$$

donde \bar{x} es el valor medio de los datos analizados y s la desviación típica.

Se determina:

$$G_{cal} = \frac{N - 1}{\sqrt{N}} \cdot \sqrt{\frac{t_{(\frac{\alpha}{2N}, N-2)}^2}{N - 2 + t_{(\frac{\alpha}{2N}, N-2)}^2}}$$

$t_{(\frac{\alpha}{2N}, N-2)}$ es una distribución t de student con $N-2$ grados de libertad y un nivel de confianza de $\frac{\alpha}{2N}$

Si $G > G_{cal}$ el valor x_i para el que se cumple está desigualdad es un dato anómalo.

En este ejemplo el valor de la media de los residuos es de 0,038. La desviación máxima se produce en el residuo 16 con un valor de -0,783. La desviación típica de los residuos es de 0,405.

El valor de G resulta ser 2,02.

El valor de G_{cal} es igual a 2,05 por lo que no existe dato anómalo alguno

Cuando alguno de los factores presente p-valores elevados puede eliminarse del análisis. La reiteración del análisis de varianza sin estos factores puede aclarar mejor la influencia de los que quedan. En este ejemplo (véase **tabla 5.1**) podrían eliminarse los factores C y G. Reiterando el ANOVA se obtienen los resultados reflejados en la **tabla 5.2**.

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Tipoarido	2,31467	1	2,31467	9,32	0,0069
B:Porcsust	15,4285	3	5,14283	20,7	0
C:Tipogranul	0,509652	2	0,254826	1,03	0,3786
D:Resistobj	1,5572	1	1,5572	6,27	0,0221
E:Consistobj	0,315869	1	0,315869	1,27	0,2743
RESIDUAL	4,47165	18	0,248425		
TOTAL corrected	24,5975	26			

Tabla 5.2 Salida de Statgraphics. Segundo análisis de varianza.

En este caso, aunque los factores C y E presenten p-valores más reducidos, como puede observarse en la **tabla 5.2**, se siguen manteniendo únicamente los factores A, B, y D como influyentes.

Para ayudar a interpretar los resultados obtenidos en los análisis realizados se representan mediante diagramas de barras los resultados obtenidos. Se ordenan para destacar los efectos de los distintos factores que demostraron ser influyentes en la variable analizada. Así, por ejemplo, en la **figura 1.1** se han agrupado los resultados de los ensayos de densidad en las amasadas con un porcentaje de sustitución nulo, según el tipo de granulometría, para poder observar la influencia de este factor sobre aquella variable.

5.2.1. ANÁLISIS DE VARIANZA E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS SOBRE LA DENSIDAD.-

Los datos analizados corresponden a los resultados medios, obtenidos en la medida de la densidad en el hormigón endurecido y realizados en cada una de las

amasadas. En un primer análisis los resultados obtenidos se pueden observar en la **tabla 5.3**

Los factores que tienen un efecto estadísticamente significativo sobre el valor de la variable *densidad* son aquéllos con un p-valor igual o inferior al 0,05 asumiendo un 95% de nivel de confianza.

<i>Source</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>Df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F-Ratio</i>	<i>P-Value</i>
MAIN EFFECTS					
A:Tipoarido	2799,22	1	2799,22	18,18	0,0007
B:Porcsust	41769,7	3	13923,2	90,41	0
C:Contdesclas	0,991874	2	0,445937	0	0,9971
D:Tipogranul	1725,69	2	862,845	5,6	0,0152
E:Resistobj	0,175674	4	0,175674	0	0,9735
F:Consistobj	828,532	1	828,532	5,38	0,0349
G:Critsust	463,467	1	463,467	3,01	0,1033
RESIDUAL	2310,08	15	154,005		
TOTAL corrected	49897,8	26			

Tabla 5.3 Primer análisis de varianza para la densidad media.

Se retiran del análisis los factores *contenido en desclasificados* y *resistencia objetivo* ya que presentan un p-valor muy elevado. Se reitera de nuevo el análisis para clarificar la posible influencia del factor *criterio de sustitución* ya que presenta un p-valor próximo a 0,05, aunque superior. Los resultados obtenidos en este segundo análisis quedan resumidos en la **tabla 5.4**. En ella se observa claramente que los factores *tipo de árido*, el *porcentaje de sustitución*, el *tipo de granulometría* y la *consistencia objetivo* influyen significativamente sobre la densidad del hormigón reciclado endurecido.

Después de analizar los residuos se comprobó que no había ningún dato anómalo.

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Tipoarido	2799,22	1	2799,22	21,8	0,0002
B:Porcsust	41769,7	3	13923,2	108,44	0
C:Tipogranul	1725,69	2	862,845	6,72	0,0066
D:Consistobj	828,532	1	828,532	6,45	0,0205
E:Critsust	463,467	1	463,467	3,61	0,0736
RESIDUAL	2311,15	18	128,397		
TOTAL corrected	49897,8	26			

Tabla 5.4 Segundo análisis de varianza para la densidad media.

En los valores obtenidos para la densidad del hormigón endurecido en las amasadas representadas en el **figura 5.2**, correspondientes a aquellas en las que el porcentaje de sustitución de árido natural por árido reciclado es nulo, puede observarse la influencia sobre esta propiedad del tipo de granulometría y de la consistencia objetivo, ya que de los cuatro factores significativos son los únicos que las afecta al ser nulo el porcentaje de sustitución del árido reciclado y por lo tanto también el tipo de árido reciclado empleado. En este gráfico puede advertirse la tendencia de la densidad a disminuir según la granulometría sea discontinua, continua gruesa o continua fina.

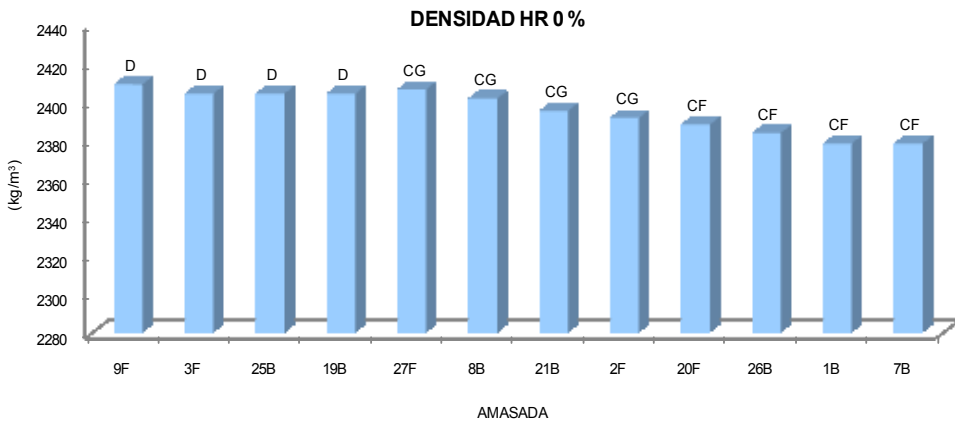


Figura 5.2 Densidad media en HR 0%.

En la **figura 5.3**, correspondiente a las amasadas en las que se sustituyeron el 20% de árido grueso natural por árido reciclado, se aprecia un descenso general en los valores de la densidad del hormigón respecto a los obtenidos en las amasadas en las que la sustitución fue nula quedando de manifiesto la influencia del porcentaje de sustitución. Puede observarse además la influencia del tipo de árido y del tipo de granulometría, factores que también resultaron significativos en el ANOVA. Así, en aquellas amasadas en las que se utilizaron áridos reciclados procedentes de la planta de Oviedo (OV) se observa una menor densidad que en aquellas en las que se utilizaron áridos reciclados procedentes de la planta de Madrid (MD). De igual manera en dicho gráfico puede observarse el descenso de la densidad según la granulometría sea discontinua, continua gruesa o continua fina.

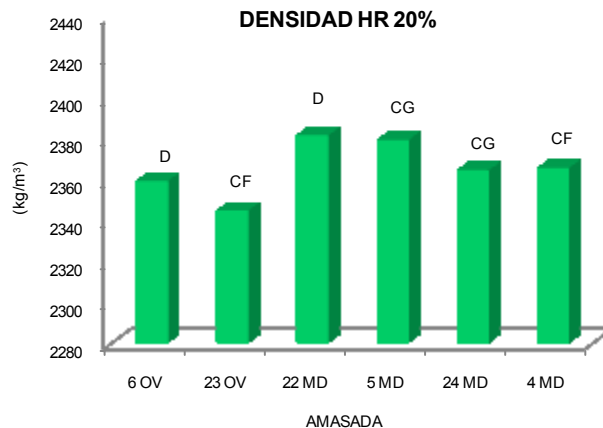


Figura 5.3 Densidad media en HR 20%.

En la **figura 5.4** queda representada la densidad de las amasadas correspondientes a hormigones reciclados con el 50% de árido grueso natural sustituido por árido reciclado. De nuevo el porcentaje de sustitución se muestra como el factor más influyente en el descenso de los valores de la densidad, respecto a las amasadas ya analizadas. Igualmente, se observa la influencia del tipo de árido reciclado empleado ya que los valores de la densidad descienden notablemente cuando el hormigón ha sido fabricado con árido reciclado procedente de la planta de Oviedo.

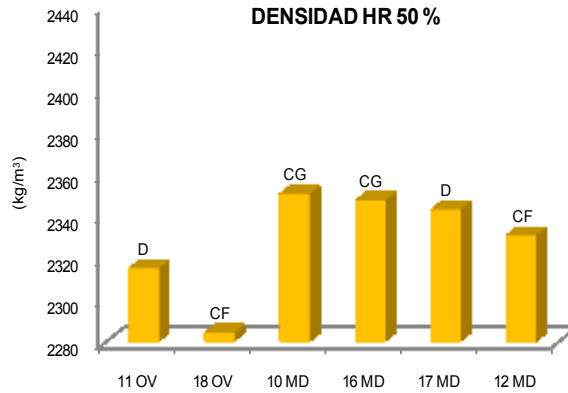


Figura 5.4 Densidad media en HR 50%.

Los resultados correspondientes a la densidad del hormigón reciclado en las amasadas en las que se sustituyó el 100% del árido grueso quedan recogidos en la **figura 5.5**. De nuevo se observa un descenso acusado de la densidad respecto a todas las amasadas anteriores. En ellas puede observarse de nuevo la menor densidad que presenta el valor medio correspondiente a los datos de la amasada realizada con árido reciclado procedente de la planta de Oviedo respecto a las realizadas con áridos reciclados procedentes de la planta de Madrid.

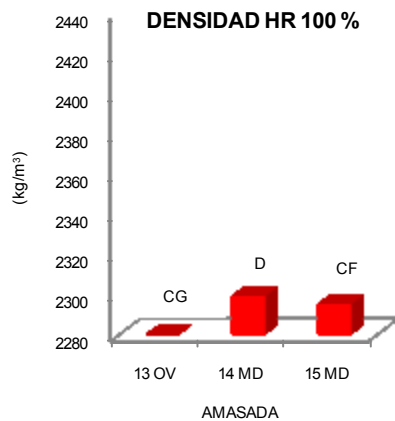


Figura 5.5 Densidad media en HR 100%.

A través de los siguientes gráficos LSD (least significant difference) pueden observarse las diferencias significativas entre las medias de los distintos niveles de los factores que intervienen en nuestro estudio. Dichos gráficos nos proporcionan, respecto a la posición de la media muestral, el radio donde se encontraría la verdadera media poblacional con un nivel de confianza del 95% con objeto de detectar las diferencias entre las medias de todos los niveles del factor considerado.

En la **figura 5.6** puede observarse la influencia que sobre la densidad media ejerce el tipo de árido, ya que la diferencia entre los intervalos LSD correspondientes a las dos medias obtenidas no se solapan. La media de la densidad correspondiente a las amasadas de Oviedo es, como puede observarse inferior a las amasadas que emplean árido reciclado procedente de Madrid. Dicha variación está en torno al 1%.

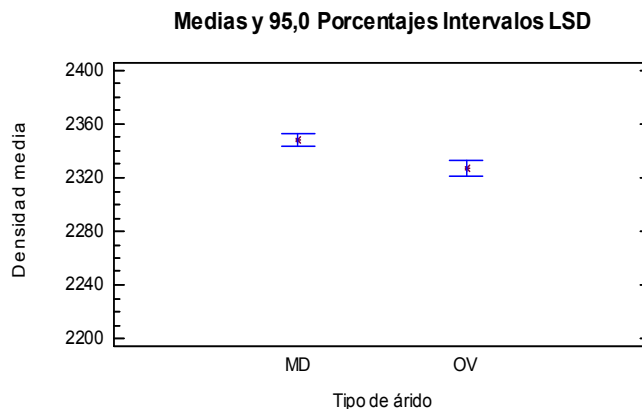


Figura 5.6 Intervalos LSD de la densidad media para los dos tipos de árido.

En la **figura 5.7** se observa la clara influencia del factor *porcentaje de sustitución* y como los intervalos LSD, correspondientes a los cuatro niveles de sustitución de árido grueso por árido reciclado empleados, no se solapan entre sí poniendo de relieve el efecto significativo del porcentaje sustituido. Puede observarse la variación prácticamente lineal de la media de dicho factor. Cuando la sustitución alcanza el nivel del 100% la densidad disminuye un 5,2%.

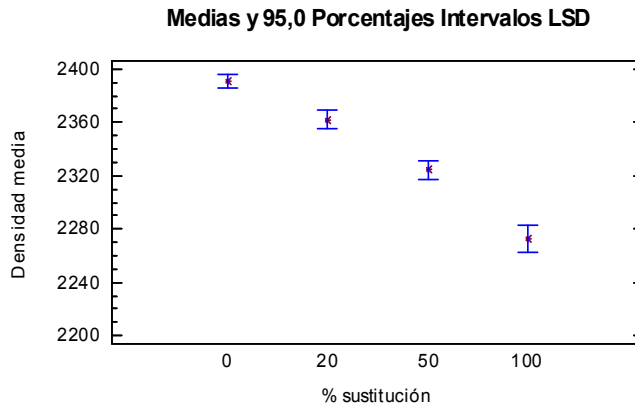


Figura 5.7 Intervalos LSD de la densidad media para el % de árido reciclado.

En la figura 5.8 se representan los resultados medios de los ensayos, correspondientes a todas las amasadas realizadas. Se muestra la relación existente entre la densidad del hormigón reciclado y el porcentaje de árido sustituido. Se realizó una regresión lineal a partir de dichos valores obteniendo un buen ajuste para la misma. También se han añadido para compararlos los valores obtenidos por Sánchez De Juan M. en su tesis doctoral^[116], correspondientes a hormigones reciclados con diversas relaciones a/c.

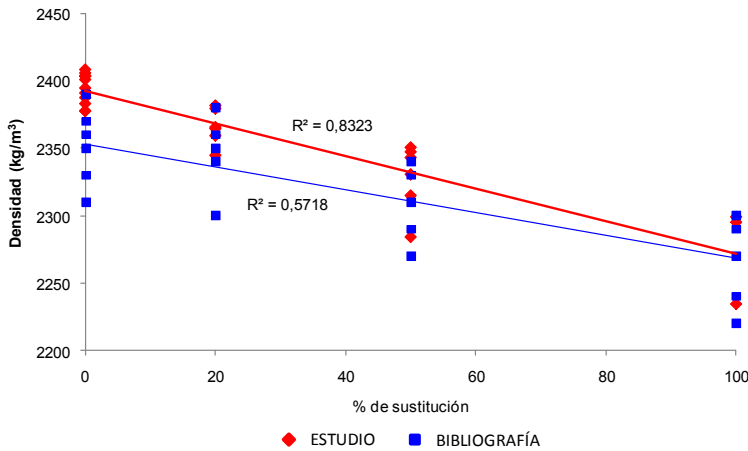


Figura 5.8 Relación densidad - % de sustitución.

Es evidente que la influencia del porcentaje de sustitución puede verse potenciada en la medida en que la calidad del árido reciclado disminuya.

En la **figura 5.9** se aprecia como la media de la densidad en aquellas amasadas realizadas ajustando la curva mezcla de los áridos a una curva granulométrica de referencia continua fina presenta una diferencia significativa con respecto a aquellas amasadas que se ajustaron a una curva granulométrica continua gruesa o discontinua aunque la variación de densidad es inferior al 1% por lo que carece de importancia. Por el contrario, puede apreciarse que entre las amasadas realizadas con áridos ajustados a la curva granulométrica de referencia continua gruesa y discontinua no existe diferencia significativa entre sus medias no influyendo, por lo tanto, en el valor de la densidad media la utilización de una granulometría u otra.

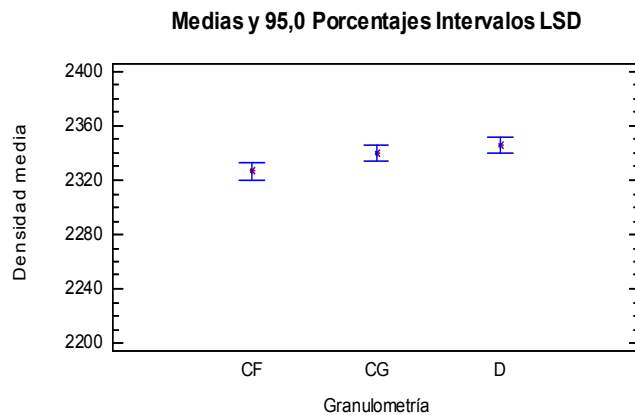


Figura 5.9 Intervalos LSD de la densidad media para el tipo de granulometría.

En la **figura 5.10** vuelve a observarse de nuevo el efecto significativo que ejerce sobre la densidad el factor consistencia objetivo. Así, las amasadas cuya consistencia objetivo es fluida presentan valores más bajos en la densidad que en aquellas cuya consistencia es blanda. De nuevo los intervalos LSD para los dos tipos de consistencia no se solapan entre sí aunque la variación de densidad que experimentan según la consistencia es inferior al 1% por lo que carece de importancia.

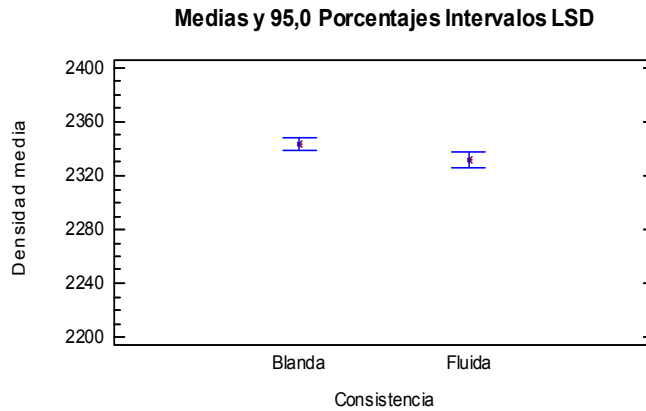


Figura 5.10 Intervalos LSD de la densidad media según la consistencia.

El factor *criterio de sustitución* es ligeramente significativo ya que su p-valor es de 0,07. Aquellas amasadas en las que el árido reciclado se sustituyó de manera compensada presentan mayor densidad que aquellas en las que la sustitución se realizó de manera simple aunque la diferencia es de nuevo inferior al 1% por lo que carece de importancia. Puede observarse en la **figura 5.11** que sus intervalos LSD se solapan ligeramente entre sí.

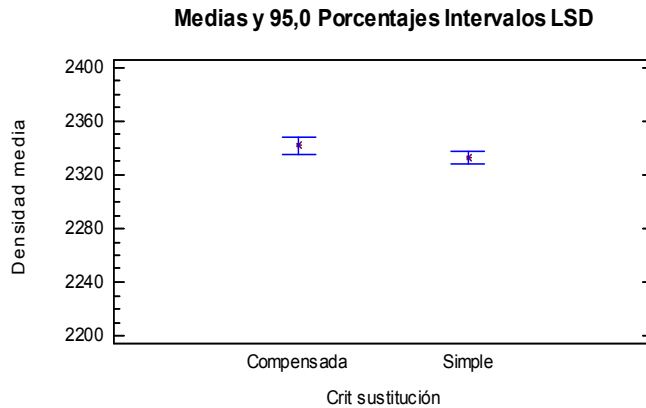


Figura 5.11 Intervalos LSD de la densidad media según el criterio de sustitución.

En la **figura 5.12** se recogen los valores medios de la densidad para el conjunto completo de amasadas realizadas en nuestro estudio. En dicho gráfico pueden apreciarse claramente los descensos del valor de la densidad según aumenta el porcentaje de

sustitución de árido reciclado. Con el mismo porcentaje sustituido puede observarse la menor densidad de las amasadas realizadas con árido reciclado procedente de la planta de Oviedo. Dentro de cada tipo de árido si se utilizan granulometrías continuas finas la densidad disminuye respecto a la utilización de granulometrías continuas gruesas o discontinuas.

Tras todo lo expuesto a lo largo de este apartado se determina que, de los factores introducidos en el estudio, los que influyen sobre la densidad del hormigón reciclado son:

- El tipo de árido. Con los áridos reciclados elegidos la variación media de la densidad de uno a otro es del 1%, proporcionando los valores inferiores el árido procedente de la planta de Oviedo. Dicha variación carece de importancia.
- El tipo de granulometría. Las amasadas dosificadas con un árido total cuya granulometría sea continua fina presentan una densidad menor respecto a aquellas en las que las granulometrías del árido mezcla sean continuas gruesas o discontinuas. La densidad es menor cuando se utilizan granulometrías continuas finas aunque dicha variación es inferior al 1% y no es importante.
- La consistencia objetivo. Independientemente del porcentaje de árido reciclado que incorpore, la densidad disminuye en torno a un 0,5% cuando la consistencia objetivo de la amasada considerada es fluida aunque dicha variación carece de importancia.
- La influencia del criterio de sustitución sobre el valor de la densidad apenas tiene importancia ya que el nivel de confianza baja al 92%. El porcentaje de desclasificados y la resistencia objetivo tampoco tienen influencia alguna en el valor de la densidad del hormigón.
- El porcentaje de sustitución de árido reciclado. En la **tabla 5.5** se adjuntan los valores correspondientes a la variación de densidad en el hormigón reciclado según el porcentaje de árido grueso natural sustituido por árido grueso reciclado. Sin duda alguna es el factor más influyente en la densidad del hormigón.

Porcentaje de sustitución	20%	50%	100%
Variación de la densidad	-1,2%	-2,8%	-5,2%

Tabla 5.5 Variación de la densidad en el HR.

- La densidad de los hormigones reciclados fabricados está dentro de los límites establecidos en el anejo nº 15 de la EHE 08.

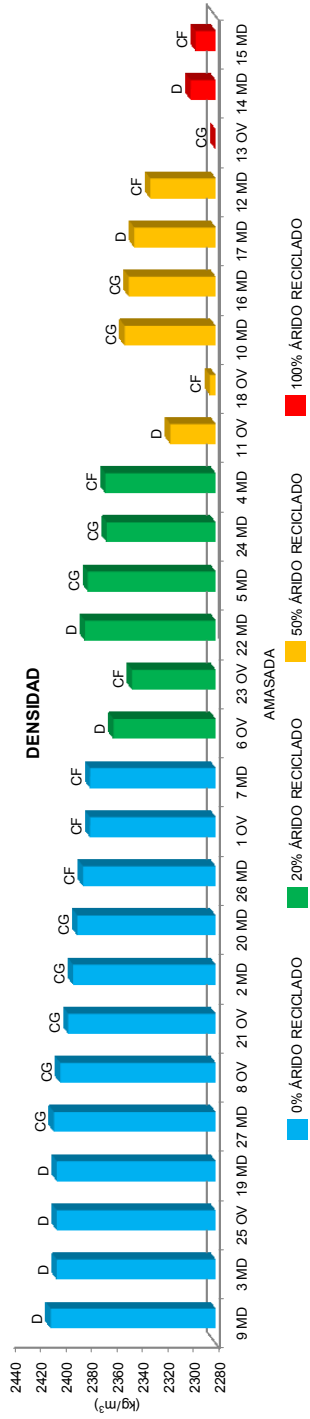


Figura 5.12 Densidad media

5.2.2. ANÁLISIS DE VARIANZA E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS SOBRE LA ABSORCIÓN.-

Los datos analizados corresponden a los resultados medios que se obtuvieron al determinar la absorción del hormigón reciclado endurecido en las veintisiete pruebas realizadas. Al realizar un primer ANOVA los resultados que proporciona, reflejados en el resumen de la **tabla 5.6**, establecen que el *tipo de árido*, el *porcentaje de sustitución* y la *resistencia objetivo* son los factores que presentan una influencia claramente significativa sobre la absorción del hormigón reciclado. De ahí los p-valores, inferiores a 0,05, obtenidos para ellos.

<i>Source</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>Df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F-Ratio</i>	<i>P-Value</i>
MAIN EFFECTS					
A:Tipoarido	1,215	1	1,215	6,71	0,0205
B:Porcsust	17,953	3	5,98432	33,06	0
C:Contdeselas	0,667467	2	0,333733	1,84	0,1924
D:Tipegranul	0,730956	2	0,365478	2,02	0,1673
E:Resistobj	2,12415	1	2,12415	11,73	0,0038
F:Consistobj	0,59535	1	0,59535	3,29	0,0898
G:Critsust	0,299267	4	0,299267	1,65	0,2180
RESIDUAL	2,7152	15	0,181035		
TOTAL corrected	26,3007	26			

Tabla 5.6 Primer análisis de varianza para la absorción.

Después de rehacer el análisis retirando los factores *contenido en desclasificado* y *criterio de sustitución*, al presentar p-valores muy altos, los resultados obtenidos se recogen en la **tabla 5.7**. Como puede comprobarse en dicha tabla este segundo análisis corrobora los resultados obtenidos en el primer ANOVA.

Después de proceder al análisis de los residuos no se encontró valor atípico alguno.

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Tipoarido	1,215	1	1,215	5,51	0,0294
B:Porcsust	17,953	3	5,98432	27,12	0
D:Resistobj	2,12415	1	2,12415	9,63	0,0056
E:Consistobj	0,59535	1	0,59535	2,70	0,1161
RESIDUAL	4,41321	20	0,22066		
TOTAL corrected	26,3007	26			

Tabla 5.7 Segundo análisis de varianza para la absorción.

En la **figura 5.13** se puede observar cómo los valores correspondientes a la absorción, cuando el porcentaje de sustitución es nulo, se ven afectados solamente por los valores de la resistencia objetivo ya que el tercer factor, correspondiente al tipo de árido, no afecta tampoco a estas pruebas.

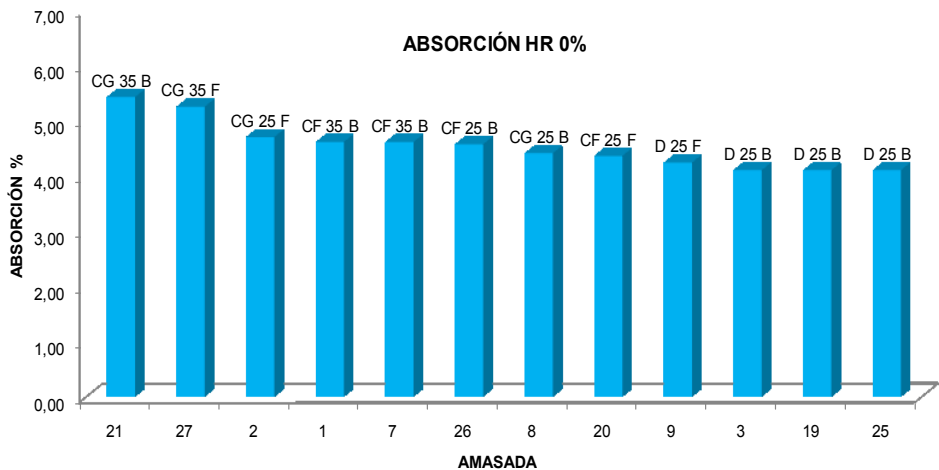


Figura 5.13 Absorción en HR 0%.

Los resultados medios correspondientes a las pruebas realizadas, cuando el *porcentaje de sustitución* del árido grueso natural por árido grueso reciclado es del 20%, se recogen en la **figura 5.14**. Los valores de la absorción se ven incrementados respecto a los anteriores debido a la presencia de árido reciclado. Al presentar mayor absorción este árido, por la presencia de mortero adherido sobre su matriz rocosa, la absorción en

el hormigón fabricado con él será mayor. La influencia correspondiente al factor *tipo de árido* en este porcentaje de sustitución no es relevante ya que, como puede observarse, la variación en los valores de la absorción cuando el árido reciclado procede de Oviedo (OV) o tiene como origen la planta de reciclado de Madrid (MD) es pequeña. En esta batería de pruebas la influencia del factor resistencia objetivo tampoco es apreciable.

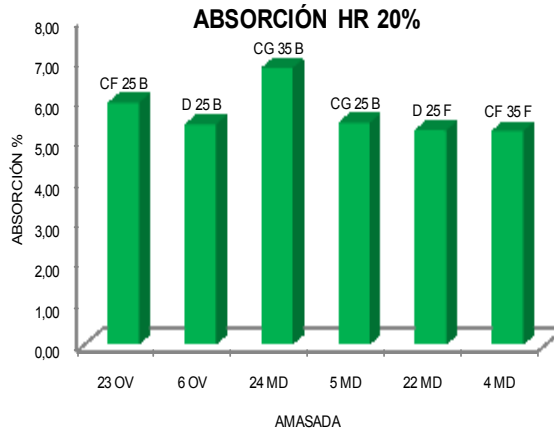


Figura 5.14 Absorción en HR 20%.

En la **figura 5.15** quedan representados los valores correspondientes a la absorción en las pruebas realizadas con un porcentaje de sustitución del 50% de árido grueso reciclado. Al aumentar de nuevo el porcentaje de árido reciclado sustituido la absorción presenta valores mayores que en las amasadas anteriores. Puede observarse el incremento que presentan los hormigones en los que se utilizaron áridos reciclados procedentes de la planta de Oviedo. La calidad de dichos áridos es inferior a los procedentes de Madrid. Queda clara la influencia del tipo de árido cuando el porcentaje de sustitución del árido grueso alcanza valores del 50%.

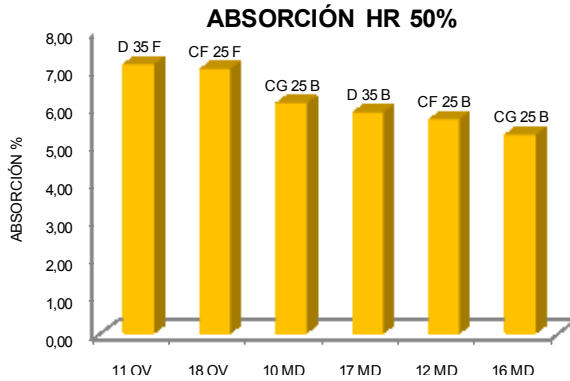


Figura 5.15 Absorción en HR 50%.

Cuando el porcentaje de árido reciclado sustituido alcanzó el 100%, **figura 5.16**, la absorción en el hormigón reciclado presenta los valores más altos. La inferior calidad del árido procedente de la planta de Oviedo, con una mayor cantidad de mortero adherido y por lo tanto mayor porosidad, se pone de nuevo de manifiesto al presentar un valor medio de la absorción mayor que la media de las amasadas realizadas con árido reciclado procedente de Madrid.

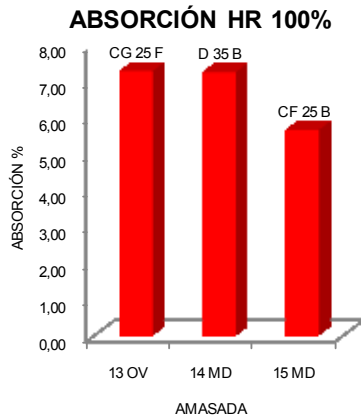


Figura 5.16 Absorción en HR 100%.

A continuación, utilizando de nuevo los gráficos LSD, se observan las diferencias significativas entre las medias correspondientes a los distintos niveles de los factores influyentes en la absorción. Así, en la **figura 5.17** se aprecia la clara influencia del factor *tipo de árido* con sus intervalos claramente diferenciados. El árido con la

absorción media más baja se corresponde con el de Madrid ya que presenta una mejor calidad traducida en menor cantidad de mortero adherido. La variación se aproxima al 8%.

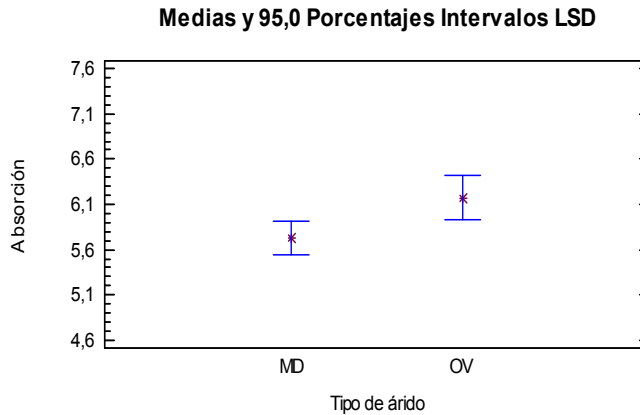


Figura 5.17 Absorción media e intervalos LSD según el tipo de árido.

En la **figura 5.18** se observa la influencia del porcentaje de sustitución del árido reciclado. No existen diferencias relevantes cuando el porcentaje de sustitución pasa del 20% al 50% o cuando pasa del 50% al 100%. Sin embargo, como puede apreciarse en el gráfico existen diferencias significativas para la absorción en el hormigón que sustituye el 20%, el 50% o el 100% del árido grueso natural por árido reciclado respecto al hormigón convencional o cuando el porcentaje de sustitución pasa del 20% al 100%. Estas variaciones en la absorción oscilan entre el 24% y el 47%.

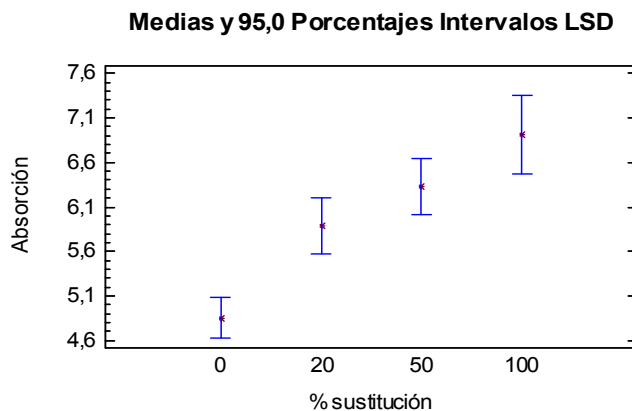


Figura 5.18 Absorción media e intervalo LSD según el % de árido sustituido.

En la **figura 5.19** se observa la influencia, como así determina el ANOVA realizado, de la resistencia objetivo sobre la absorción. La diferencia significativa existente entre las medias que corresponden a una resistencia a compresión de 25 MPa y 35 MPa así lo pone de manifiesto. Los hormigones con una resistencia objetivo a compresión de 35 MPa presentan una absorción mayor que la de los hormigones de 25 MPa. Esta circunstancia puede ser debida a que los hormigones con mayor resistencia presenten un tamaño medio de poro mucho más pequeño, aunque con una red mucho más densa, contribuyendo de esta manera al aumento de la absorción.

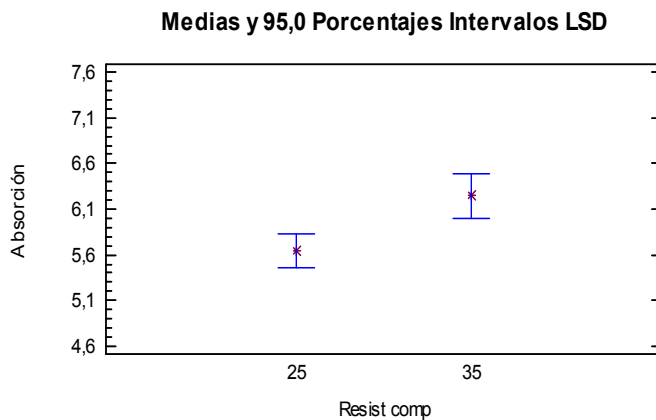


Figura 5.19 Absorción media e intervalo LSD según la resistencia a compresión.

En la **figura 5.20** quedan recogidos los valores medios de la absorción en todas las pruebas realizadas en este estudio. En ella se observa claramente como en los hormigones sin árido reciclado la absorción es menor que en el resto y como al ir aumentando el porcentaje de sustitución del árido grueso natural por árido grueso reciclado aumenta la absorción debido, sin duda, a la mayor porosidad que presenta este último. Dicho gráfico corrobora los comentarios realizados sobre los intervalos LSD.

Tras todo lo expuesto en este apartado se puede concluir que de los factores introducidos en el estudio los que presentan influencia sobre la absorción del hormigón reciclado son:

- El *tipo de árido*. La absorción presenta un incremento medio del 7,8% para las amasadas en las que se utilizó el árido procedente de la planta de Oviedo

- La *resistencia objetivo*. En las amasadas con una resistencia objetivo a compresión de 35 MPa se produce un incremento medio de la absorción de un 10,4% respecto a aquellas en las que la resistencia objetivo es de 25 MPa.
- El *porcentaje de sustitución*. En la **tabla 5.8** se recogen los datos correspondientes al incremento de la absorción que se produce, según los diferentes porcentajes de sustitución de árido grueso natural por árido grueso reciclado realizados en el estudio, respecto a la absorción media en aquellas amasadas con un porcentaje de sustitución nulo. Como puede desprenderse de dichos datos este factor es el más influyente de todos los considerados.

Porcentaje de sustitución	20%	50%	100%
Variación de la absorción respecto al hormigón de control	24,6%	33,9%	46,5%

Tabla 5.8 Variación de la absorción en el HR.

El porcentaje de desclasificados, el tipo de granulometría, la consistencia objetivo y el criterio de sustitución son factores que no influyen en el valor de la absorción del hormigón reciclado.

5.2.3. ANÁLISIS DE VARIANZA E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS SOBRE EL AIRE OCLUIDO.-

Los datos del análisis corresponden a los resultados obtenidos en la medida del aire ocluido sobre el hormigón fresco en las veintisiete pruebas realizadas. Al realizar un primer ANOVA se obtienen unos resultados, cuyo resumen queda reflejado en la **tabla 5.9**, que permiten establecer la clara influencia del factor *porcentaje de sustitución*, sobre la cantidad de aire ocluido presente en el interior de la masa fresca del hormigón reciclado.

<i>Source</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>Df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F-Ratio</i>	<i>P-Value</i>
MAIN EFFECTS					
A:Tipoarido	1,96E+00	1	1,96E+00	3,47	0,082
B:Porcsust	8,00E+00	3	2,67E+00	4,71	0,016
C:Contdesclas	9,92E-01	2	4,96E-01	0,88	0,437
D:Tipogranul	1,10E+00	2	5,50E-01	0,97	0,401
E:Resistobj	4,11E-04	4	4,11E-04	0,2	0,664
F:Consistobj	7,41E-04	4	7,41E-04	0	0,972
G:Critsust	0,409074	1	0,409074	0,72	0,409
RESIDUAL	8,49E+00	15	5,66E-01		
TOTAL corrected	2,11E+01	26			

Tabla 5.9 Primer análisis de varianza en aire ocluido.

Sin embargo, al presentar los factores *resistencia objetivo* y *consistencia objetivo* valores del p-valor elevados se procede a su eliminación. Con ello se ganan grados de libertad para los residuos y se aclara la posible influencia del factor *tipo de árido*.

Una vez reiterado el análisis se observa en la **tabla 5.10** que el único factor influyente sobre el aire ocluido es el *porcentaje de sustitución* ya que el factor *tipo de árido* presenta un nivel de confianza por debajo del 95%.

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Tipoarido	1,96E+00	1	1,96E+00	3,88	0,0653
B:Porcsust	8,00E+00	3	2,67E+00	5,27	0,0094
C:Contdesclas	9,92E-01	2	4,96E-01	0,98	0,3955
D:Tipogranul	1,10E+00	2	5,50E-01	1,09	0,3595
E:Critsust	4,09E-01	1	4,09E-01	0,81	0,3812
RESIDUAL	8,60E+00	17	0,506059		
TOTAL corrected	21,0719	26			

Tabla 5.10 Segundo análisis de varianza en aire ocluido.

En la **figura 5.21**, correspondiente al gráfico LSD, puede observarse la diferencia significativa existente entre la media correspondiente al 100% de sustitución del árido grueso natural por árido grueso reciclado y el resto de porcentajes. El aire ocluido en hormigones reciclados aumenta considerablemente cuando la sustitución alcanza el 100% del árido grueso y presenta valores similares a los del hormigón tradicional para porcentajes de sustitución del 20 y del 50%. Dicho incremento se aproxima al 46%.

Medias y 95,0 Porcentajes Intervalos LSD

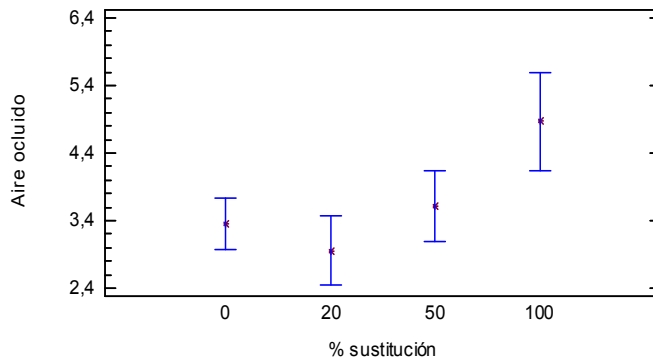


Figura 5.21 Aire ocluido medio e intervalo LSD según el % de sustitución.

A modo de ejemplo, en la **figura 5.22** pueden observarse las diferencias en el contenido de aire ocluido entre las amasadas que incorporan un porcentaje de árido grueso reciclado del 20% y las que incorporan el 100%. El mayor porcentaje de aire

ocluido en la mezcla que incorpora el 100% de árido grueso reciclado puede ser debido a la mayor porosidad que presentan los áridos reciclados a causa del mortero adherido.

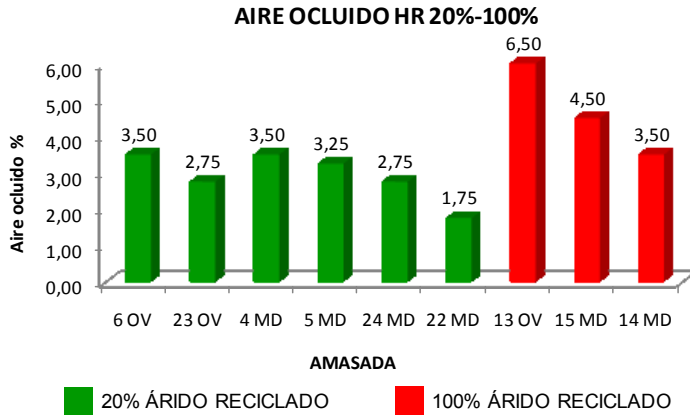


Figura 5.22 Aire ocluido según el % de sustitución.

El factor tipo de árido es ligeramente significativo, según puede observarse en el p-valor obtenido y en la **figura 5.23**. Los hormigones dosificados con árido reciclado procedente de la planta de Oviedo presentan, en general, mayor porcentaje de aire ocluido que aquellos en los que el árido reciclado procede de Madrid. El aumento de la cantidad de aire puede producirse por la cantidad de aire contenida dentro de los poros del mortero adherido. Al ser mayor la cantidad de mortero adherido en el árido de Oviedo mayor será la cantidad de aire ocluido. Se aprecia el solapamiento entre los dos intervalos.

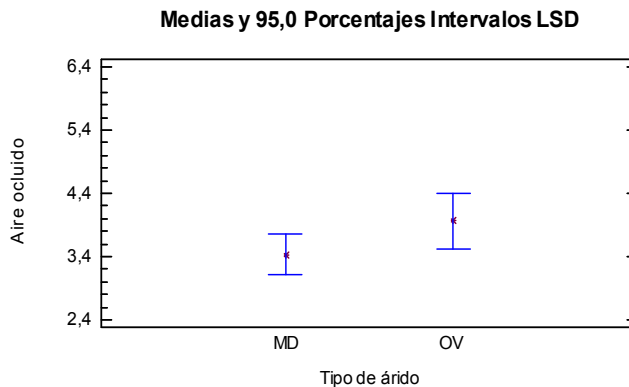


Figura 5.23 Aire ocluido medio e intervalo LSD según el tipo de árido.

En la **figura 5.24** se presentan los resultados correspondientes a la medida del aire ocluido en todas las amasadas realizadas en este trabajo. Puede observarse de nuevo como los valores del aire ocluido diferenciados con respecto al resto son los que corresponden a una sustitución del árido grueso del 100%.

A través de los resultados obtenidos se puede establecer que, de los factores considerados en el estudio, los que influyen en la cantidad de aire ocluido en masa de hormigón fresco son:

- El *tipo de árido* influye ligeramente, ya que los dos intervalos LSD se solapan y el nivel de confianza está ligeramente por debajo del 95%. La variación en los valores medios es del 16,8% incrementándose para el árido de Oviedo.
- El *porcentaje de sustitución* del árido grueso natural por árido grueso reciclado. Hasta porcentajes de sustitución del 50% el valor de la media del aire ocluido no experimenta variaciones significativas. Cuando el nivel de sustitución es del 100% aumenta significativamente la cantidad de aire ocluido en el hormigón reciclado. El incremento que se produce es del 47,8%. Este factor es, sin duda alguna, el más influyente de todos.

Puede observarse que el porcentaje de desclasificados, el tipo de granulometría, la resistencia media objetivo, la consistencia objetivo y el criterio de sustitución no tienen influencia alguna en la cantidad de aire ocluido que incorpore el hormigón reciclado.

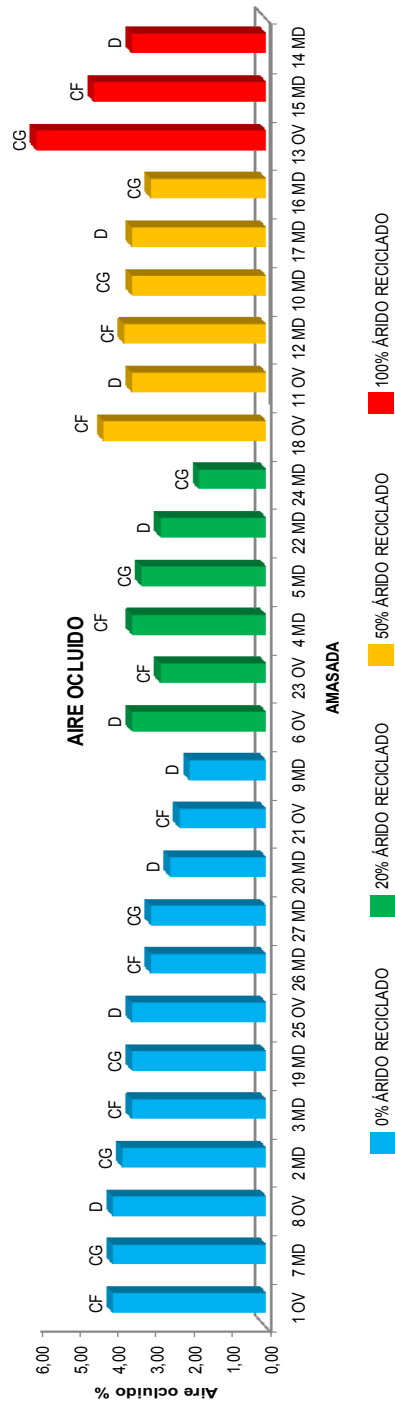


Figura 5.24 Aire ocluido.

5.2.4. ANÁLISIS DE VARIANZA E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS SOBRE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN.-

El análisis se ha realizado con los resultados medios de los ensayos que se realizaron para determinar la resistencia a compresión del hormigón reciclado endurecido en las veintisiete pruebas realizadas replicadas.

En el diseño del experimento uno de los factores elegidos ha sido precisamente la *resistencia objetivo*. Dicho factor tiene dos niveles: uno correspondiente a 25 MPa y el otro a 35 MPa. Al ser ahora la variable de salida en el ANOVA la resistencia a compresión es indudable, y además una obviedad, que el factor resistencia objetivo será muy influyente en la resistencia a compresión del hormigón obtenida en los ensayos. Para evitar este inconveniente y con la finalidad de poder establecer comparaciones entre los valores de los ensayos de resistencia a compresión obtenidos en todas las amasadas realizadas, independientemente de su resistencia objetivo, se ha tipificado la variable de salida dividiendo el valor obtenido en el ensayo por el valor que corresponde al nivel del factor *resistencia objetivo*. Así se obtiene la *resistencia tipificada* según la siguiente expresión:

$$f_{c,tip} = \frac{f_{c,28}}{f_{c,obj}}$$

$f_{c,tip}$ es la resistencia a compresión tipificada.

$f_{c,28}$ es la resistencia a compresión a la edad de 28 días.

$f_{c,obj}$ es la resistencia objetivo a compresión (25 MPa o 35 MPa).

Un primer ANOVA de los resultados obtenidos en los ensayos, cuyo resumen se observa en la **tabla 5.11**, determina que el *tipo de árido* y, a pesar de la tipificación, la *resistencia objetivo* son los únicos factores estadísticamente significativos. De ahí los p-valores obtenidos para ellos.

<i>Source</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>Df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F-Ratio</i>	<i>P-Value</i>
MAIN EFFECTS					
A:Tipoarido	0,142091	1	0,142091	6,75	0,0201
B:Porosust	0,0100935	3	0,00336451	0,16	0,9216
C:Contdesclas	0,0171185	2	0,00855926	0,41	0,6729
D:Tipogranul	0,0138741	2	0,00693704	0,33	0,7242
E:Resistobj	0,450091	1	0,450091	21,4	0,0003
F:Consistobj	0,00689074	1	0,00689074	0,33	0,5756
G:Critsust	0,000740741	4	0,00074074	0,04	0,8537
RESIDUAL	0,315553	15	0,0210369		
TOTAL corrected	0,956452	26			

Tabla 5.11 Primer análisis de varianza para la resistencia media tipificada a compresión.

Después de rehacer el análisis retirando los factores *porcentaje de sustitución* y *criterio de sustitución* los resultados obtenidos se recogen en la **tabla 5.12**. Este segundo análisis corrobora los resultados obtenidos en el primer ANOVA.

Una vez analizados los residuos no se encontró valor atípico alguno.

<i>Source</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>Df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F-Ratio</i>	<i>P-Value</i>
MAIN EFFECTS					
A:Tipoarido	0,142091	1	0,142091	8,27	0,0097
B:Contdesclas	0,0171185	2	0,00855926	0,5	0,6153
C:Tipogranul	0,0138741	2	0,00693704	0,4	0,6734
D:Resistobj	0,450091	1	0,450091	26,2	0,0001
E:Consistobj	0,00689074	1	0,00689074	0,4	0,5341
RESIDUAL	0,326387	19	0,0171783		
TOTAL corrected	0,956452	26			

Tabla 5.12 Segundo análisis de varianza para la resistencia media tipificada a compresión.

En la **figura 5.25** puede observarse la influencia sobre el valor de la resistencia media tipificada del tipo de árido. El hormigón con árido reciclado de mayor calidad,

procedente de Madrid, presenta, como puede observarse, valores más altos en su resistencia media tipificada.

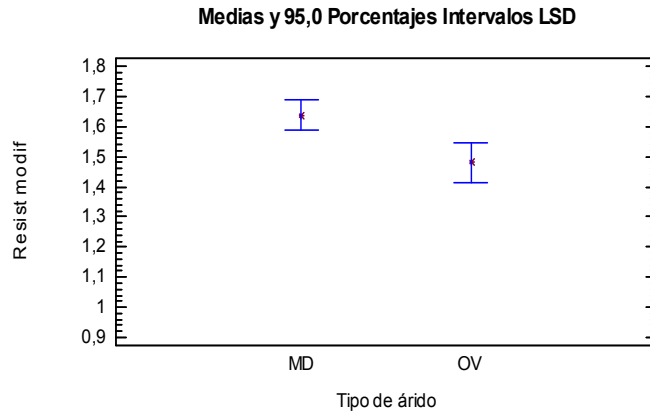


Figura 5.25 Resistencia a compresión tipificada media e intervalo LSD según el tipo de árido.

A pesar de haber tipificado la resistencia a compresión también puede observarse claramente en el ANOVA como la *resistencia objetivo* sigue siendo un factor muy influyente en esta propiedad. Dicha circunstancia se pone de manifiesto en la **figura 5.26**. En ella puede observarse que el valor medio de la resistencia a compresión tipificada para una resistencia objetivo de 25 MPa es mayor que el que corresponde a una resistencia objetivo de 35 MPa. Dicha circunstancia puede explicarse en que al fabricar el hormigón de resistencia característica a compresión 25 MPa, la diferencia en los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a compresión respecto a su resistencia objetivo son superiores a las diferencias obtenidas en los ensayos de los hormigones cuya resistencia característica a compresión es de 35 MPa, aunque también la misma variación en cualquiera de los dos hormigones estudiados hace que la resistencia tipificada sea mayor en el de resistencia objetivo más baja.

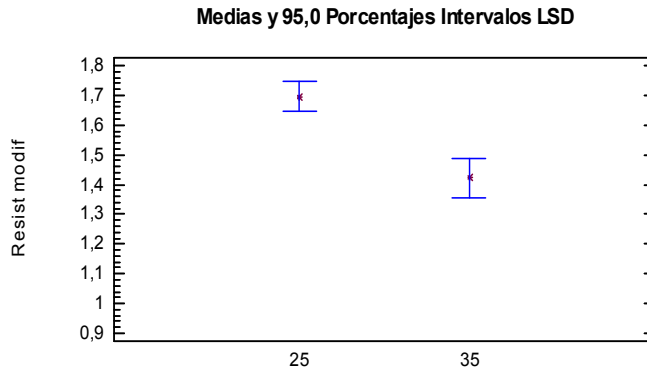


Figura 5.26 Resistencia a compresión tipificada media e intervalo LSD según la resistencia objetivo.

En la figura 5.27 puede observarse como la media de la resistencia a compresión tipificada apenas presenta variación, a pesar del aumento del porcentaje de árido grueso reciclado sustituido, aunque el intervalo LSD aumente con el porcentaje de sustitución. Puede ser consecuencia de la disminución de la relación a/c efectiva y al incremento de la cantidad de aditivo empleada en las amasadas con porcentajes de sustitución del 50% y del 100%.

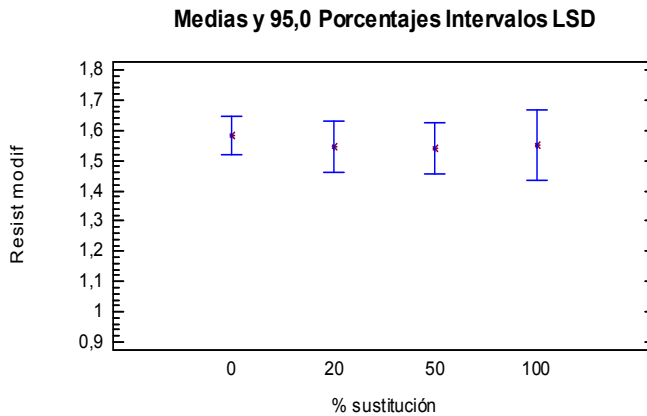


Figura 5.27 Resistencia a compresión tipificada media e intervalo LSD según el % de sustitución.

A la vista de los resultados anteriores el factor *tipo de árido* influye claramente en la resistencia a compresión del hormigón reciclado. Aquellos áridos reciclados con menor cantidad de mortero adherido presentarán un índice de calidad superior siempre y cuando la matriz rocosa de los áridos reciclados comparados sea la misma.

También ha quedado de manifiesto la nula influencia que ha tenido el porcentaje de sustitución del árido grueso natural por árido grueso reciclado en la resistencia a compresión. Para cualquiera de los tres porcentajes de sustitución estudiados, el 20%, el 50% y el 100%, la variación del valor medio de la resistencia a compresión ha sido muy pequeña. Esta afirmación diverge claramente con gran parte del estado del arte consultado ya que en la mayoría de los estudios se producen caídas de resistencias que llegan a ser notables cuando los porcentajes de sustitución sobrepasan el 50% del árido grueso.

Estos resultados obtenidos en el estudio pueden ser debidos a la mayor absorción del árido reciclado y a las cantidades de aditivo superplastificante empleadas.

El árido reciclado absorbe directamente parte del agua de amasado, reduciéndose así la cantidad de agua disponible para la hidratación del cemento, lo que ocasiona una disminución de la relación a/c efectiva que provoca un aumento de la resistencia a compresión del hormigón. De esta forma se compensa una parte de la probable caída de resistencia debida a la utilización de árido reciclado.

Por otra parte, para compensar la pérdida de trabajabilidad en los hormigones con árido reciclado, la cantidad de aditivo superplastificante empleada es mayor que en aquellos que no lo incorporan. Una de las propiedades del aditivo superplastificante empleado es mejorar la resistencia a compresión del hormigón. Dicho aumento también compensa en parte la caída de resistencia producida por el empleo de árido reciclado.

A tal efecto se han realizado dos pruebas complementarias para comprobar el aumento de resistencia debido al empleo de mayor cantidad de aditivo superplastificante durante el amasado. En las dos amasadas la dosificación del hormigón es la misma variando únicamente entre ellas la cantidad de aditivo superplastificante empleada.

Así, para obtener una consistencia blanda (9 cm), medida en cono de Abrams, la cantidad de aditivo superplastificante empleada fue del 0,3% del peso del cemento. Para conseguir una consistencia fluida (15 cm) la cantidad de aditivo superplastificante empleada fue del 0,6% del peso del cemento.

La evolución de la resistencia a compresión queda reflejada en los resultados de la **tabla 5.13**.

Consistencia	Blanda	Fluida	% var
Resistencia media a compresión 7 días (MPa)	32,3	35,1	8,6
Resistencia media a compresión 28 días (MPa)	42,1	44,0	4,5

Tabla 5.13 Influencia del aditivo superplastificante en la resistencia a compresión.

Como puede observarse, el efecto del superplastificante sobre la resistencia a compresión es significativo.

Para tratar de aclarar la influencia de la resistencia objetivo en la resistencia a compresión del hormigón se tipifica de nuevo la resistencia a compresión dividiéndola por la resistencia media obtenida en las amasadas con la misma resistencia objetivo y con un porcentaje nulo de sustitución del árido reciclado (43,4 MPa para las amasadas con una resistencia objetivo de 25 MPa y 49,8 MPa para las amasadas con resistencia objetivo 35 MPa).

$$f_{c,tip} = \frac{f_{c,28}}{f_{cm,0\%}}$$

$f_{c,tip}$ es la resistencia a compresión tipificada.

$f_{c,28}$ es la resistencia a compresión a la edad de 28 días.

$f_{cm,0\%}$ es la resistencia media a compresión en las amasadas con la misma resistencia objetivo y el 0% de sustitución.

Al realizar un primer ANOVA con los resultados obtenidos para esta variable, cuyo resumen se observa en la **tabla 5.14**, se observa que el *tipo de árido* es el único factor estadísticamente significativo. Ahora, al realizar esta tipificación, el factor resistencia objetivo es el que menos influencia presenta.

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Tipoarido	0,040563	1	0,040563	8,21	0,0118
B:Porosust	0,000526852	3	0,000175617	0,04	0,9906
C:Contdesclas	0,000718519	2	0,000359259	0,07	0,9302
D:Tipogranul	0,00711852	2	0,00355926	0,72	0,5026
E:Resistobj	0,000007407	4	0,000007407	0,00	0,9696
F:Consistobj	0,00986852	1	0,00986852	2,00	0,1779
G:Critsust	0,00155741	1	0,00155741	0,32	0,5827
RESIDUAL	0,0740917	15	0,00493944		
TOTAL corrected	0,134452	26			

Tabla 5.14 Tipificación 2. Primer análisis de varianza para la resistencia media tipificada a compresión.

Se rehace el análisis retirando los factores *porcentaje de sustitución* y *resistencia objetivo*. Los resultados obtenidos se recogen en la **tabla 5.15**. Este último análisis corrobora los resultados obtenidos en el tercer ANOVA.

Una vez analizados los residuos no se encontró valor atípico alguno.

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Tipoarido	0,040563	1	0,040563	10,33	0,0046
B:Contdesclas	0,000718519	2	0,000359259	0,09	0,9130
C:Tipogranul	0,00711852	2	0,00355926	0,91	0,4208
D: Consistobj	0,00986852	1	0,00986852	2,51	0,1294
E:Critsust	0,00155741	1	0,00155741	0,4	0,5364
RESIDUAL	0,0746259	19	0,00392768		
TOTAL corrected	0,134452	26			

Tabla 5.15 Tipificación 2. Segundo análisis de varianza para la resistencia media tipificada a compresión.

En la **figura 5.28** puede observarse la influencia del tipo de árido sobre el valor de la resistencia media tipificada. El hormigón con árido reciclado de mayor calidad,

procedente de Madrid, presenta, como puede observarse, valores más altos en su resistencia media tipificada. El incremento en el valor tipificado es del 8,5%.

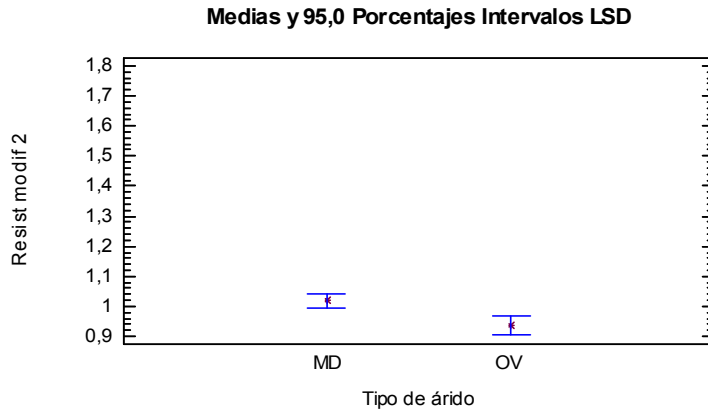


Figura 5.28 Tipificación 2. Resistencia a compresión tipificada media e intervalo LSD según el tipo de árido.

En la **tabla 5.16** quedan recogidos los valores numéricos correspondientes a la variación de resistencia a compresión tipificada del árido reciclado procedente de Madrid respecto al de Oviedo. Dicha variación se hace más evidente en las amasadas que sustituyen el 50% o el 100% del árido grueso.

Porcentaje de sustitución	20%	50%	100%
Variación de la f_c tipificada	5,5%	10,3%	47,4%

Tabla 5.16 Tipificación 2. Variación de la resistencia media a compresión tipificada del árido reciclado de Madrid respecto al de Oviedo según el % de sustitución.

En la **figura 5.29** se reflejan los valores medios de la resistencia a compresión tipificada correspondientes a todas las pruebas realizadas en nuestro estudio. Puede observarse la variación de la resistencia a compresión en las amasadas que incorporan árido reciclado de distinta procedencia.

Resumiendo, el único factor que influye significativamente en la resistencia a compresión del hormigón es el *tipo de árido* reciclado empleado. En función de su

calidad, traducida en mayor o menor cantidad de mortero adherido principalmente, el hormigón reciclado tendrá más o menos resistencia a compresión.

El porcentaje de sustitución, el tipo de granulometría, la resistencia objetivo, la consistencia objetivo, el contenido en desclasificados y el criterio de sustitución no ejercen influencia significativa alguna sobre la resistencia a compresión de los hormigones fabricados en nuestro estudio.

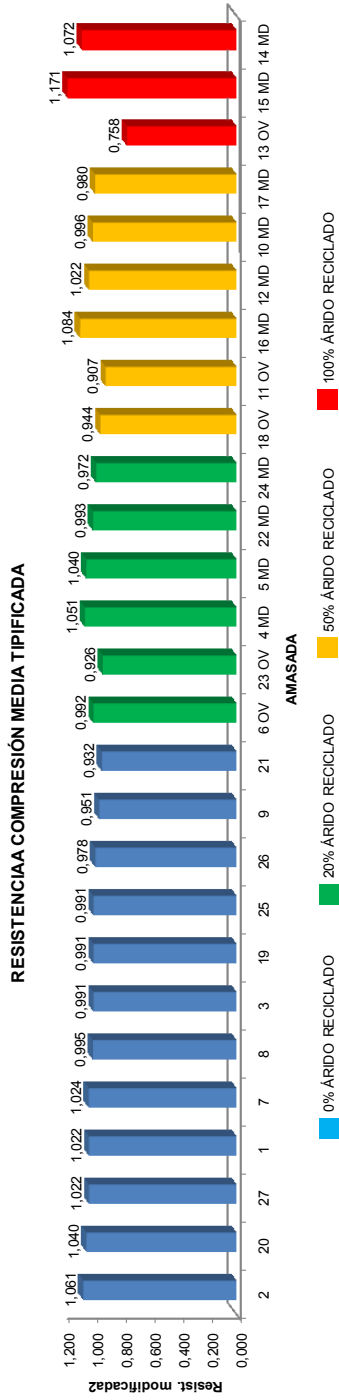


Figura 5.29 Tipificación 2. Resistencia media a compresión.

5.2.5. ANÁLISIS DE VARIANZA E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS SOBRE EL MÓDULO DE ELASTICIDAD.-

El análisis se ha realizado con los resultados medios que se obtuvieron al determinar el módulo de elasticidad estático del hormigón reciclado endurecido en una de las dos series de pruebas realizadas.

Para poder establecer comparaciones entre los diferentes valores del módulo de elasticidad obtenidos en los ensayos, correspondientes a todas las amasadas realizadas, se ha tipificado dicha variable dividiendo el valor obtenido en el ensayo por la raíz cúbica de la resistencia media del hormigón. Se recuerda que el módulo de elasticidad secante del hormigón viene determinado, según la EHE, por la siguiente expresión:

$$E_j = 8500 \cdot \sqrt[3]{f_{cm,j}}$$

E_j es el módulo de elasticidad secante a la edad de j días.

$f_{cm,j}$ es la resistencia media del hormigón a compresión a j días.

Con la tipificación de la variable propuesta se obtiene el módulo de elasticidad tipificado. Su expresión viene dada por:

$$E_{c,tip} = \frac{E_{c,28}}{\sqrt[3]{f_{cm,0\%}}}$$

$E_{c,tip}$ es el módulo de elasticidad estático tipificado.

$E_{c,28}$ es el módulo de elasticidad estático a los 28 días

$f_{cm,0\%}$ es la resistencia media a compresión en las amasadas con la misma resistencia objetivo y el 0% de sustitución.

Un primer análisis de varianza de los resultados obtenidos en los ensayos, cuyo resumen se observa en la **tabla 5.17**, establece que el único factor estadísticamente significativo es el *porcentaje de sustitución*. De ahí el p-valor obtenido.

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Tipearide	2042,54	4	2042,54	0,05	0,8337
B:Porcsust	1491558,0	3	497186,0	11,12	0,0004
C:Contdesclas	38384,8	2	19192,4	0,43	0,6589
D:Tipogranul	114955,0	2	57477,5	1,28	0,3054
E:Resistobj	9408,7	1	9408,7	0,21	0,6531
F:Consistobj	23736,8	1	23736,8	0,53	0,4775
G:Gritsust	4737,97	4	4737,97	0,04	0,8464
RESIDUAL	670944,0	15	44729,6		
TOTAL corrected	2352770	26			

Tabla 5.17 Primer análisis de varianza para el módulo de elasticidad tipificado.

Se volvió a reiterar el análisis descartando los factores *tipo de árido*, *contenido en desclasificado* y *criterio de sustitución* por presentar valores muy altos del p-valor y se obtuvieron los resultados recogidos en la **tabla 5.18**. Este segundo análisis corrobora los resultados obtenidos en el primero.

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Porcsust	9251,78	3	497186,0	13,25	0,0001
B:Tipogranul	768,915	2	57477,5	1,53	0,2418
C:Resistobj	3146,92	1	9408,7	0,25	0,6223
D:Consistobj	168,01	1	23736,8	0,63	0,4363
RESIDUAL	713110,0	19	37532,1		
TOTAL corrected	2352770	26			

Tabla 5.18 Segundo análisis de varianza para la resistencia media tipificada a compresión.

Una vez analizados los residuos no se encontró valor atípico alguno.

El único factor influyente en el módulo de elasticidad es el *porcentaje de sustitución*.

En la **figura 5.30** puede observarse como para sustituciones del 20% del árido grueso natural por árido grueso reciclado las diferencias en los valores medios del módulo de deformación son mínimas respecto a los que presenta el hormigón convencional. Solo cuando el porcentaje de sustitución es del 50% o del 100% la variación en los valores del módulo elástico es apreciable. Dichas variaciones quedan recogidas en la **tabla 5.19**.

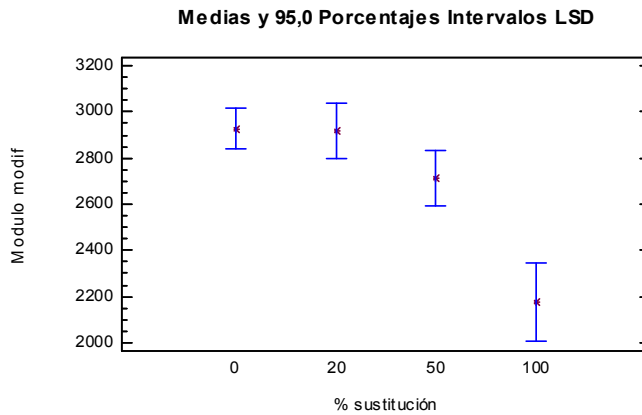


Figura 5.30 Módulo de elasticidad tipificado medio e intervalo LSD según el % de sustitución.

Porcentaje de sustitución	20%	50%	100%
Variación del módulo elástico tipificado	0%	-7,5%	-26,0%

Tabla 5.19 Variación del módulo de elasticidad tipificado según el % de sustitución.

Los valores medios del módulo de elasticidad tipificado, correspondientes a todas las pruebas realizadas, quedan recogidos en la **figura 5.31**. En él puede observarse el descenso paulatino que experimenta el valor del módulo a medida que aumenta el porcentaje de sustitución, apreciándose claramente cuando se alcanza un valor del 50% y haciéndose notable cuando se sustituye la totalidad del árido grueso del hormigón convencional por árido grueso reciclado.

Con los resultados obtenidos se determina que el único factor de los estudiados que influye significativamente en el valor del módulo de elasticidad tipificado es el *porcentaje de sustitución*.

El tipo de árido, el tipo de granulometría, la resistencia objetivo, la consistencia objetivo, el contenido en desclasificados y el criterio de sustitución no ejercen influencia significativa alguna sobre el módulo de elasticidad de los hormigones fabricados en nuestro estudio

Los descensos obtenidos en el valor del módulo de elasticidad están en la línea de los resultados obtenidos por Hansen^[42], González Fonteboa B.^[35] y Sánchez De Juan M.^[116] entre algunos de los estudios consultados en el estado del arte.

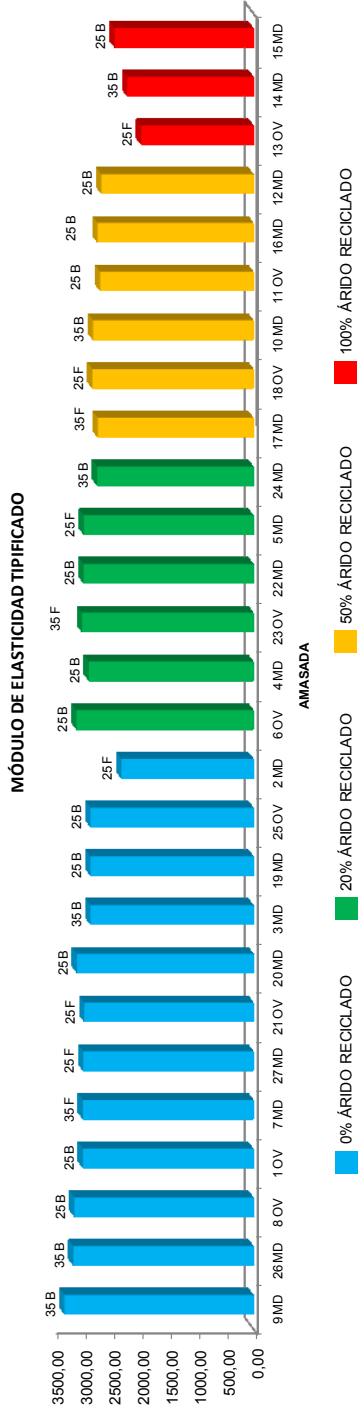


Figura 5.31 Módulo de elasticidad tipificado.

5.2.6. ANÁLISIS DE VARIANZA E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS SOBRE LA RESISTENCIA A TRACCIÓN.-

El análisis se ha realizado con los resultados medios obtenidos del ensayo de tracción indirecta realizado sobre una de las dos series de pruebas realizadas.

Para poder comparar los resultados de todos los ensayos de resistencia a tracción indirecta, independientemente de su resistencia objetivo, se tipificó dicha variable dividiendo el valor obtenido en el ensayo por el valor de dicho parámetro (25 o 35 MPa).

$$f_{cti,tip} = \frac{f_{cti,28}}{f_{c,obj}}$$

$f_{cti,tip}$ es la resistencia a tracción tipificada.

$f_{cti,28}$ es la resistencia a tracción a los 28 días.

$f_{c,obj}$ es la resistencia objetivo a compresión (25 o 35 MPa).

Se realiza un primer análisis de varianza con los resultados obtenidos en los ensayos, cuyo resumen se observa en la **tabla 5.20**, y se observa que el *tipo de árido*, el *porcentaje de sustitución* y la *resistencia objetivo* son los factores con una clara influencia sobre la resistencia a tracción indirecta. De ahí los p-valores obtenidos para ellos.

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Tipoarido	0,00201667	1	0,00201667	8,45	0,0108
B:Porcsust	0,003475	3	0,00115833	4,85	0,0149
C:Contdesclas	0,00108889	2	0,00054444	2,28	0,1365
D:Tipogranul	0,000298889	2	0,00014444	0,64	0,5588
E:Resistobj	0,00601667	1	0,00601667	25,21	0,0002
F:Consistobj	0,0006	1	0,0006	2,51	0,1337
G:Crtsust	0	4	0	0	4
RESIDUAL	0,00358056	15	0,0002387		
TOTAL corrected	0,0170667	26			

Tabla 5.20 Primer análisis de varianza para la resistencia a tracción indirecta tipificada.

Una vez rehecho el análisis retirando los factores *tipo de granulometría* y *criterio de sustitución* los resultados obtenidos están recogidos en la **tabla 5.21**. Se observa de nuevo que los factores influyentes siguen siendo los mismos.

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Tipoarido	0,00201667	1	0,00201667	9,38	0,0067
B:Porcsust	0,003475	3	0,00115833	5,39	0,008
C:Contdesclas	0,00108889	2	0,00054444	2,53	0,1074
D:Resistobj	0,00601667	1	0,00601667	27,99	0
E:Consistobj	0,0006	1	0,0006	2,79	0,1121
RESIDUAL	0,00386944	18	0,00021497		
TOTAL corrected	0,0170667	26			

Tabla 5.21 Segundo análisis de varianza para la resistencia a tracción indirecta tipificada.

La influencia del *tipo de árido* reciclado empleado puede observarse en la **figura 5.32**. Así, los hormigones fabricados con árido reciclado procedente de Madrid presentan un valor medio más alto en la resistencia a tracción indirecta que los fabricados con árido reciclado procedente de Oviedo. El árido reciclado procedente de Madrid presenta menor cantidad de mortero adherido que el de Oviedo favoreciendo la adherencia con la pasta de cemento y aumentando de esta forma la resistencia a tracción.

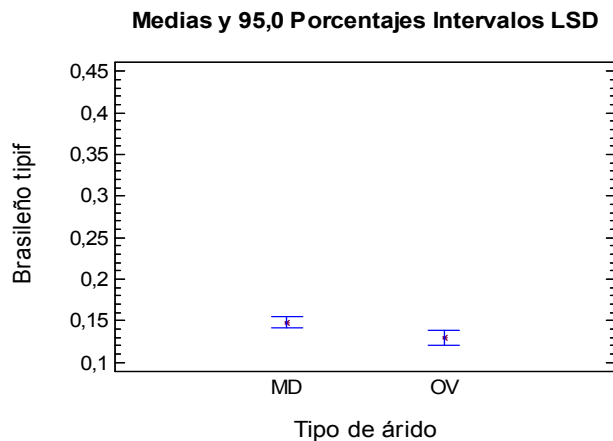


Figura 5.32 Resistencia a tracción indirecta tipificada media e intervalo LSD según el % tipo de árido.

El porcentaje de sustitución del árido reciclado también influye en la resistencia a tracción indirecta pero, como se observa en la **figura 5.33**, solamente entre el hormigón convencional y el que presenta un 20% de árido sustituido y entre éste y el que sustituye un 50%. Además, la imprecisión en la determinación de esta propiedad para este factor nos proporciona resultados no del todo convincentes por lo que, aunque el factor *porcentaje de sustitución* sea significativo, se necesitaría corroborar o rechazar con estudios complementarios estos resultados.

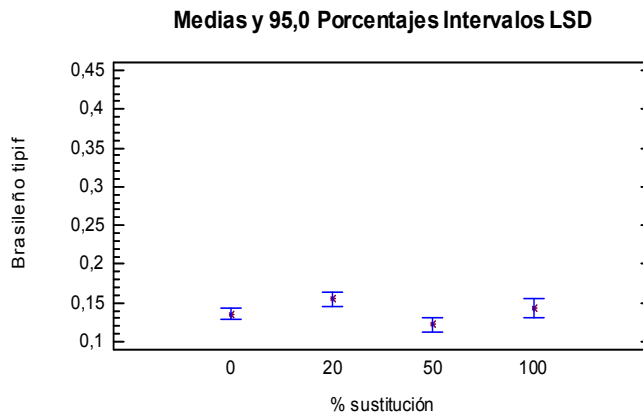


Figura 5.33 Resistencia a tracción indirecta tipificada media e intervalo LSD según el % de sustitución.

La influencia de la resistencia objetivo del hormigón, aún tipificando la variable de salida en el ANOVA, continúa siendo muy significativa como queda reflejado en la **figura 5.34**. Los valores de la resistencia a tracción indirecta tipificada presentan un valor medio más alto para hormigones con resistencia objetivo 25 MPa que para los de 35 MPa.

Esta circunstancia puede deberse a una mayor diferencia en los resultados de los ensayos de los hormigones de resistencia característica a compresión 25 MPa respecto a este valor que en los hormigones de resistencia característica a compresión 35 MPa. Además, para la misma diferencia respecto de la resistencia objetivo entre cualquiera de los dos hormigones estudiados la resistencia a tracción indirecta tipificada será mayor en el hormigón de resistencia objetivo más baja.

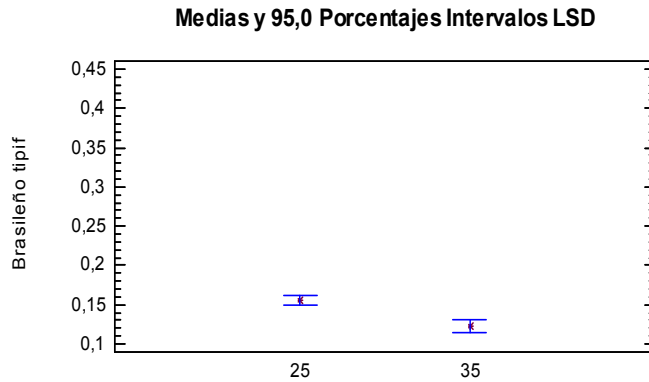


Figura 5.34 Resistencia a tracción indirecta tipificada media e intervalo LSD según la resistencia objetivo.

Para tratar de dejar clara la influencia de la resistencia objetivo en la resistencia a tracción indirecta del hormigón se tipifica de nuevo dicha variable teniendo en cuenta que, según nuestra Instrucción, la resistencia media a tracción $f_{ct,m}$ viene dada por la expresión:

$$f_{ct,m} = 0,30 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2}$$

donde f_{ck} es la resistencia característica a compresión del hormigón.

La relación entre la resistencia característica f_{ck} y la resistencia media a compresión f_{cm} , siempre y cuando las condiciones de ejecución sean buenas, es:

$$f_{cm} = f_{ck} + 8$$

Por otra parte, la resistencia a tracción simple f_{ct} se relaciona con la resistencia a tracción indirecta f_{cti} según la siguiente expresión^[48]:

$$f_{ct} = 0,9 \cdot f_{cti}$$

Relacionando las expresiones anteriores:

$$f_{cti} = 0,33 \cdot \sqrt[3]{(f_{cm} - 8)^2}$$

A partir de estas consideraciones se tipifica la resistencia a tracción indirecta $f_{cti,tip}$ como se observa en la siguiente expresión:

$$f_{cti,tip} = \frac{f_{cti}}{\sqrt[3]{(f_{cm,0\%} - 8)^2}}$$

$f_{cm,0\%}$ es la resistencia media a compresión en las amasadas con la misma resistencia objetivo y el 0% de sustitución.

Se realiza un primer análisis de varianza con los valores de la resistencia a tracción indirecta tipificada, cuyo resumen se observa en la **tabla 5.22**, y se observa que el *tipo de árido* y el *porcentaje de sustitución* son los únicos factores con una clara influencia sobre la resistencia a tracción indirecta ya que la resistencia objetivo deja de serlo claramente. De ahí los p-valores que se obtienen. Puede observarse además que los factores *contenido de desclasificados* y *consistencia objetivo* tienen p-valores muy próximos a 0,05.

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Tipoarido	0,0097338	1	0,0097338	8,47	0,0108
B:Porcsust	0,020401	3	0,00680033	5,91	0,0072
C:Contdesclas	0,00766807	2	0,00383404	3,33	0,0634
D:Tipegranul	0,00168985	2	0,00084493	0,73	0,4964
E:Resistobj	0,00025785	4	0,00025785	0,22	0,6426
F:Consistobj	0,00468535	1	0,00468535	4,07	0,0618
G:Gritsust	6,4463E-05	4	6,4463E-05	0,06	0,816
RESIDUAL	0,017247	15	0,0011498		
TOTAL corrected	0,0617474	26			

Tabla 5.22 Tipificación 2. Primer análisis de varianza para la resistencia a tracción indirecta tipificada.

Una vez rehecho el análisis retirando los factores *tipo de granulometría*, *resistencia objetivo* y *criterio de sustitución* los resultados obtenidos están recogidos en la **tabla 5.23**. Se observa ahora que además del *tipo de árido* y el *porcentaje de sustitución* los factores *contenido de desclasificados* y *consistencia objetivo* también son influyentes sobre el valor de la resistencia a tracción indirecta.

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Tipoarido	0,0097338	1	0,0097338	9,6	0,0059
B:Porcsust	0,020401	3	0,00680033	6,71	0,0028
C:Contdesclas	0,00766807	2	0,00383404	3,78	0,0414
D:Consistobj	0,00468535	1	0,00468535	4,62	0,0446
RESIDUAL	0,0192592	19	0,00101364		
TOTAL corrected	0,0617474	26			

Tabla 5.23 Tipificación 2. Segundo análisis de varianza para la resistencia a tracción indirecta tipificada.

En la **figura 5.35** sigue observándose la influencia del *tipo de árido*, de forma análoga a lo que ocurría en la primera tipificación de la variable, aunque con valores superiores a los obtenidos entonces.

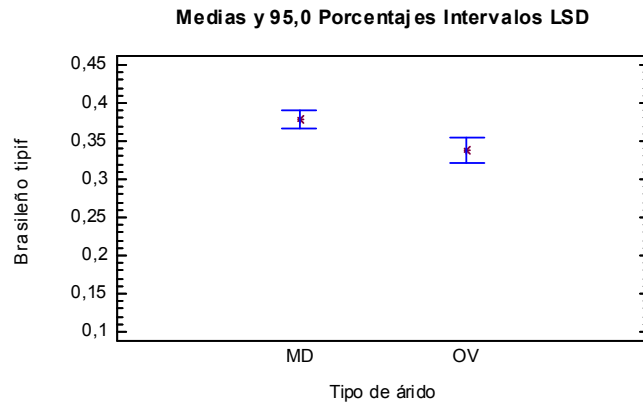


Figura 5.35 Tipificación 2. Resistencia a tracción indirecta tipificada media e intervalo LSD según el tipo de árido.

En la **figura 5.36**, correspondiente a los hormigones con un 50% de sustitución del árido grueso por árido reciclado, puede observarse claramente dicha influencia. Las amasadas 11 y 18 incorporan árido reciclado procedente de Oviedo y las amasadas 10, 12, 16 y 17 incorporan árido reciclado procedente de Madrid. Estos resultados permiten contrastar la influencia que sobre la tracción indirecta tienen la distinta naturaleza y procedencia de los áridos utilizados^[26].

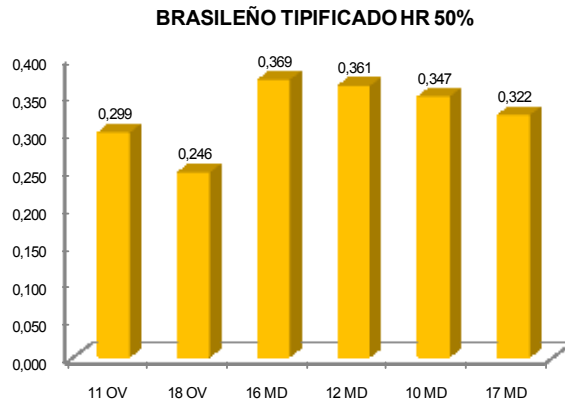


Figura 5.36 Tipificación 2. Resistencia a tracción indirecta con el 50% de árido grueso reciclado.

Como se observa en la **figura 5.37**, la influencia del porcentaje de sustitución del árido reciclado sobre la resistencia a tracción indirecta sigue mostrando las mismas variaciones que se observaban en la primera tipificación, aunque ahora sus valores son más altos.

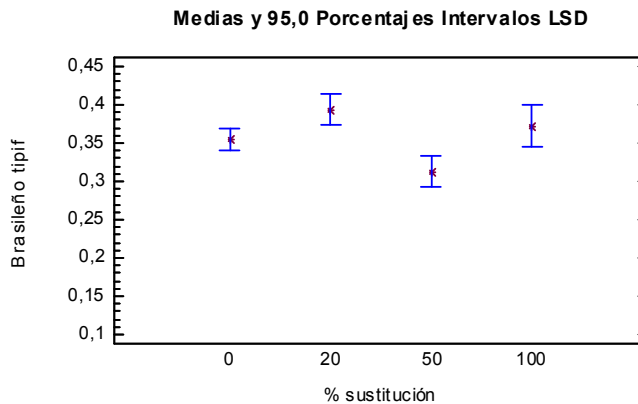


Figura 5.37 Tipificación 2. Resistencia a tracción indirecta tipificada media e intervalo LSD según el % de sustitución.

La influencia del *porcentaje de desclasificados* que contiene el árido reciclado sobre la resistencia a tracción indirecta también es significativa como se observa en la **figura 5.38**. Así los hormigones con porcentajes de desclasificados comprendidos entre el 5% y el 10% ven disminuida su resistencia a tracción indirecta.

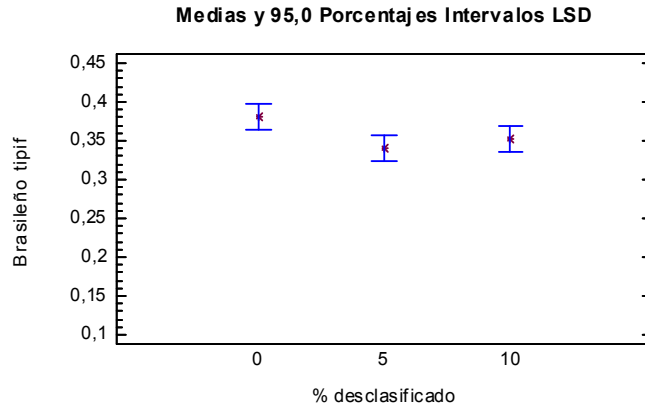


Figura 5.38 Tipificación 2. Resistencia a tracción indirecta tipificada media e intervalo LSD según el % de desclasificados.

En la **figura 5.39** se observa la influencia que experimenta la tracción indirecta según la consistencia del hormigón. Los hormigones con consistencia blanda presentan mayor resistencia a tracción indirecta que los de consistencia fluida.

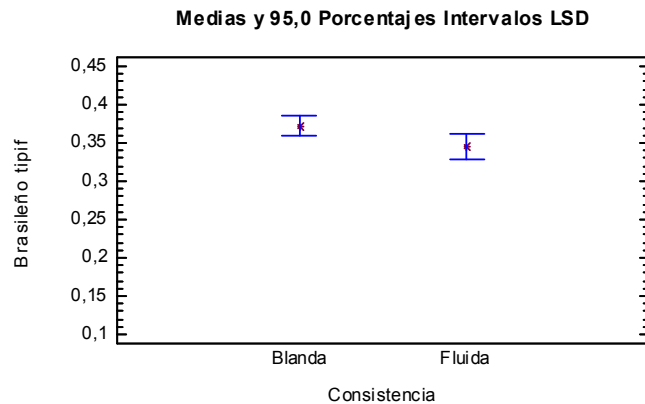


Figura 5.39 Tipificación 2. Resistencia a tracción indirecta tipificada media e intervalo LSD según la consistencia.

En la **figura 5.40** se recogen todos los valores correspondientes a los ensayos de tracción indirecta realizados. Puede observarse como las amasadas con árido reciclado procedente de la planta de Oviedo presentan valores más bajos que las que, con el mismo porcentaje de sustitución, emplean árido reciclado procedente de Madrid. Las variaciones que experimenta la resistencia a tracción indirecta según el tipo de árido empleado y el porcentaje de árido grueso sustituido son las que se recogen en la **tabla 5.24**. Sustituciones del 50% del árido grueso son las más perjudiciales para esta

propiedad ya que porcentajes de sustitución inferiores o superiores (20% o 100%) hacen que dicho valor se incremente.

Porcentaje de sustitución	20%	50%	100%
Árido reciclado de Madrid	25,1%	5,3%	23,6%
Árido reciclado de Oviedo	14,6%	-17,8%	-7,5%

Tabla 5.24 Variación de la resistencia a tracción indirecta tipificada 2 según tipo de árido y el % de sustitución.

En resumen, de los factores considerados en el estudio los que influyen significativamente en la resistencia a tracción indirecta del hormigón son:

- El *porcentaje de sustitución*. En este caso las variaciones de la resistencia a tracción indirecta no permiten extraer conclusiones convincentes ya que, aunque sustituciones del 50% de árido reciclado hacen que disminuya el valor de la resistencia a tracción indirecta, las sustituciones del 20% y del 100% de árido reciclado no siguen dicha tendencia por lo que sería conveniente ampliar el estudio.
- El *porcentaje de desclasificados* también influye en el valor la resistencia a tracción indirecta, aunque no existen diferencias significativas entre las caídas que experimenta dicha propiedad cuando el porcentaje de desclasificados pasa del 5% al 10%.
- La *consistencia objetivo*. Los hormigones con consistencia blanda presentan valores superiores a los de consistencia fluida.
- El *tipo de árido* reciclado empleado. En función de su calidad, traducida en mayor o menor cantidad de mortero adherido así como de la resistencia del hormigón original, el hormigón reciclado tendrá más o menos resistencia a tracción indirecta. En el estudio realizado es el factor más influyente. Utilizando árido reciclado procedente de Madrid la resistencia a tracción indirecta aumenta un 12,1%.

El análisis que se acaba de realizar puede extrapolarse de para la resistencia a tracción ya que el valor de esta propiedad, según nuestra Instrucción, es el 90% de la resistencia a tracción indirecta^[43].

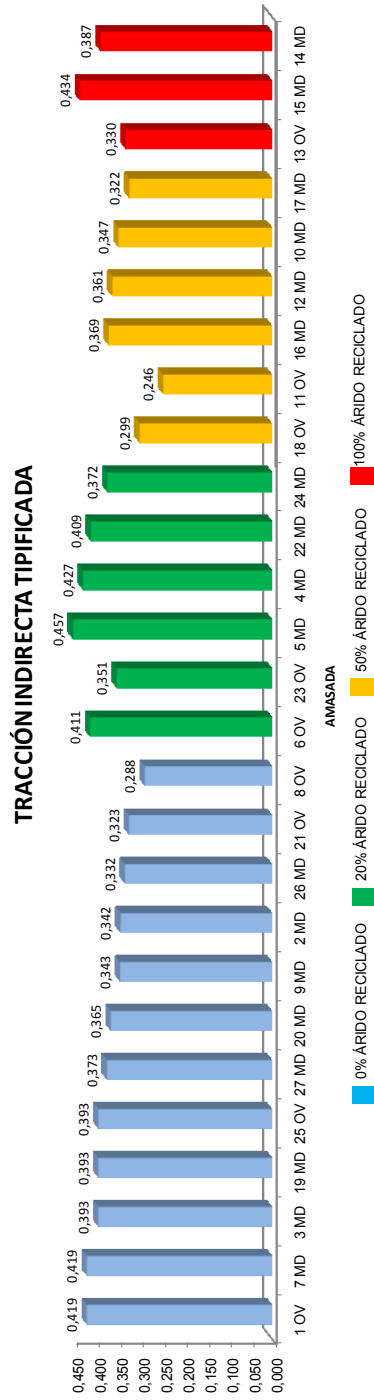


Figura 5.40 Tipificación 2. Tracción indirecta.

5.2.7. ANÁLISIS DE VARIANZA E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS SOBRE LA PERMEABILIDAD AL AGUA.-

Los datos del análisis corresponden a los resultados medios de los ensayos de penetración de agua llevados a cabo en las veintisiete pruebas realizadas. Al realizar un primer ANOVA con dichos resultados, cuyo resumen se recoge en la **tabla 5.25**, no se advierte ninguna influencia estadísticamente significativa sobre la penetración de agua a presión por parte de ninguno de los factores analizados.

<i>Source</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>Df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F-Ratio</i>	<i>P-Value</i>
MAIN EFFECTS					
A:Tipoarido	5,49E+02	1	5,49E+02	1,81	0,200
B:Porcsust	1,20E+03	3	3,99E+02	1,31	0,310
C:Contdesclas	8,10E+02	2	4,05E+02	1,33	0,295
D:Típogranul	6,03E+02	2	3,01E+02	0,99	0,395
E:Resistobj	7,48E+02	1	7,48E+02	2,46	0,139
F:Consistobj	2,36E+02	1	2,36E+02	0,78	0,393
G:Crtsust	117,178	4	117,178	0,39	0,545
RESIDUAL	4,25E+03	14	3,04E+02		
TOTAL corrected	8,57E+03	25			

Tabla 5.25 Primer análisis de varianza para la permeabilidad.

Sin embargo, al presentar el factor *criterio de sustitución* un p-valor elevado se elimina. Con ello se ganan grados de libertad para los residuos y se aclara la posible influencia del factor *resistencia objetivo*.

Después de rehacer el análisis retirando el factor *criterio de sustitución* el resumen de los resultados obtenidos se recoge en la **tabla 5.26**. Este segundo análisis corrobora los resultados obtenidos en el primer ANOVA. En el análisis de los residuos no se encontraron valores atípicos.

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Tipoarido	5,62E+02	1	5,62E+02	1,93	0,185
B:Porcsust	1,19E+03	3	3,97E+02	1,36	0,292
C:Contdesclas	8,24E+02	2	4,12E+02	1,41	0,274
D:Tipogranul	6,02E+02	2	3,01E+02	1,03	0,380
E:Resistobj	7,33E+02	1	7,33E+02	2,52	0,134
F:Consistobj	2,45E+02	1	244,948	0,84	0,374
RESIDUAL	4369,29	15	291,286		
TOTAL corrected	8568,5	25			

Tabla 5.26 Segundo análisis de varianza para la permeabilidad.

De estos resultados se desprende que la sustitución del árido grueso natural por árido grueso reciclado no afecta sobremanera al comportamiento del hormigón frente a la permeabilidad al agua en las pruebas llevadas a cabo.

Sin embargo, dichos resultados quedan condicionados por los aditivos empleados. En efecto, el plastificante utilizado, Pozzolith 370N, reduce la permeabilidad al agua del hormigón y una de las propiedades del superplastificante empleado, Glenium Sky 511, es precisamente la mejora de la impermeabilidad del hormigón al disminuir su porosidad.

En la **figura 5.41** quedan representados los valores medios de los ensayos de penetración de agua a presión llevados a cabo en este estudio. Cabe destacar la dispersión de resultados obtenida. Las amasadas con un porcentaje de sustitución del 50% presentan una clara diferencia según la calidad del árido empleado: las que sustituyen árido reciclado procedente de Oviedo, de peor calidad, presentan unos valores más elevados en el ensayo de penetración de agua que aquellas que en las que el árido sustituido procede de Madrid. La misma tendencia, aunque con valores más igualados presentan las amasadas del 20% de sustitución. Sin embargo las amasadas que sustituyen el 100% de árido reciclado no presentan la misma tendencia. Cabe la posibilidad de que el efecto de los aditivos enmascare estos resultados.

Debido a la dispersión de datos obtenida se revisó el procedimiento y el instrumental utilizado en el ensayo aunque no se encontraron anomalías. La utilización de una bancada de ensayos con seis dispositivos para las probetas podría mejorar los resultados.

En el laboratorio de la planta de hormigones donde se llevaron a cabo estos ensayos la experiencia con este procedimiento en el control del hormigón convencional es similar. Con frecuencia los resultados que se obtienen sobre probetas del mismo hormigón presentan resultados muy dispersos ya que la reproducibilidad del ensayo no es buena. El ensayo puede verse afectado por una incorrecta fabricación de la probeta así como por el desbaste llevado a cabo en la cara que va a estar expuesta a la presión del agua.

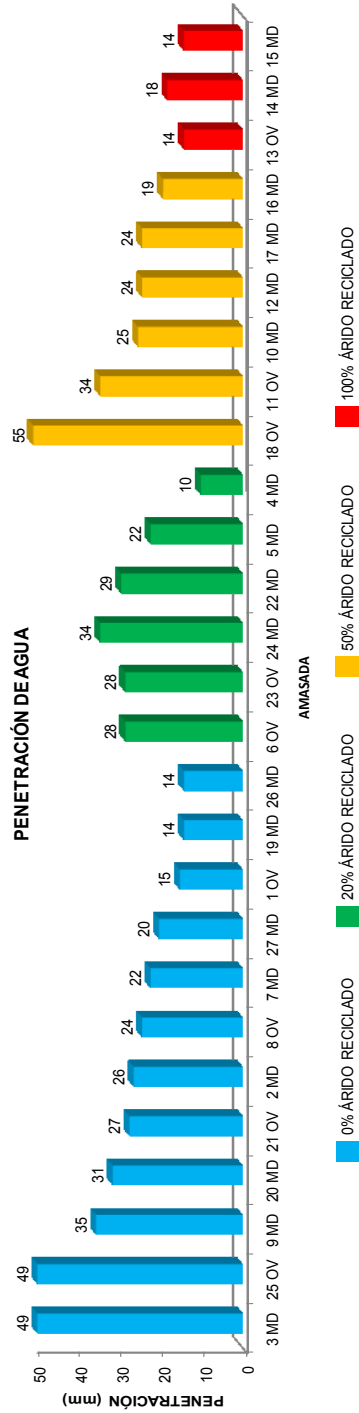


Figura 5.41 Permeabilidad al agua.

En la **tabla 5.27** se realiza un resumen conjunto con todos los resultados obtenidos indicando los factores influyentes sobre cada variable.

Teniendo en cuenta los márgenes establecidos para todos los factores considerados se aprecia como el porcentaje de sustitución comprendido entre el 50% y el 100% del árido grueso es el factor más influyente sobre la densidad del hormigón endurecido. Apenas reviste importancia la influencia de la consistencia, blanda o fluida, ya que las variaciones que se producen sobre la densidad son muy pequeñas. Ocurre lo mismo con los criterios de sustitución del árido grueso que se han empleado. Con los dos áridos empleados en el estudio las variaciones apreciadas en esta variable tampoco son importantes. El factor tipo de granulometría apenas afecta al valor de la densidad dentro de los márgenes aplicados en este estudio.

Dentro de los márgenes de variación establecidos para los factores que intervienen en el estudio realizado, puede observarse como la absorción del hormigón reciclado se ve influenciada por la resistencia característica objetivo del hormigón. Los áridos empleados también influyen sobre la absorción aunque, de nuevo, es el porcentaje de sustitución el factor que más influencia presenta sobre esta variable incrementándose considerablemente en los tres niveles de sustitución establecidos.

Con los márgenes de variación considerados para todos los factores el porcentaje de sustitución del árido grueso por árido reciclado es el factor más influyente sobre el aire ocluido cuando se sustituye íntegramente. El tipo de árido influye ligeramente sobre la cantidad de aire ocluido en el hormigón ya que el nivel de confianza en la variación detectada sobre la media entre los dos tipos de árido está por debajo del 95%.

El porcentaje de sustitución es el único factor influyente sobre el valor del módulo de elasticidad del hormigón reciclado dentro del conjunto de factores tenidos en cuenta en este estudio y de los márgenes establecidos para ellos.

Dentro de los márgenes establecidos para los factores considerados en este estudio el tipo de árido es el factor más influyente sobre la resistencia a tracción indirecta. El contenido en desclasificados y la consistencia objetivo también influyen sobre dicha variable. Las variaciones que presenta el factor porcentaje de sustitución, aunque significativas, aconsejan la ampliación del estudio.

Parámetro	Variable analizada																	
	Densidad		Absorción		Aire ocluido		Resist. compresión		Mód. elasticidad		Resist. tracción		Permeabilidad					
	Influencia	Variación	Influencia	Variación	Influencia	Variación	Influencia	Variación	Influencia	Variación	Influencia	Variación	Influencia	Variación				
Tipo de árido	OV	X	XXX	7,8%	X	17%	XXX	8,5%		XXX		XXX						
	MD																	12,2%
Porcentaje de sustitución	0%																	
	20%	XXX	XXX	24,6%	XXX	-10,0%	XXX											11,4%
	50%		XXX	34,9%		10,0%												-11,4%
	100%			46,5%		47,8%												5,7%
Tipo de granulometría	CF																	
	CG	X																
	D																	
Contenido en desclasificados	0%																	
	5%																	-10,5%
	10%																	-7,8%
Resist. carac. objetivo	35 MPa		XXX	10,4%														
	25 MPa																	
Consistencia objetivo	B	X																8,0%
	F																	
Criterio de sustitución	SS	X																
	SC																	

XXX Muy influyente X Ligeramente influyente

Tabla 5.27 Resumen de resultados del ANOVA.

La permeabilidad al agua no se ve afectada por ninguno de los factores propuestos en este estudio.

Con los límites establecidos en este estudio para el tipo de granulometría, el contenido en desclasificados, la consistencia objetivo y el criterio de sustitución, puede observarse en la **tabla 5.27** que su influencia sobre las variables estudiadas es, en la mayoría de los casos, nula y en el resto carece de importancia.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

6.1. CONCLUSIONES.-

En este trabajo se ha planteado un programa experimental diseñado con una metodología estadística rigurosa con el fin de poner de manifiesto qué factores relacionados con la calidad de las materias primas y con los criterios de dosificación son los más influyentes sobre las propiedades del hormigón reciclado.

El campo de validez de las conclusiones obtenidas debe considerarse limitado al margen en el que se mueven los parámetros considerados.

Se han analizado dos áridos reciclados integrados mayoritariamente por residuos de hormigón de diferente procedencia (Madrid y Oviedo) y calidad. Ambos presentan unas características físicas y químicas adecuadas para su empleo en la fabricación de hormigón, según el anejo nº 15 de la EHE 08, aunque inferiores a las de los áridos convencionales. De acuerdo con las recomendaciones de la RILEM quedarían clasificados como áridos Tipo II.

La mayor calidad del árido reciclado utilizado procedente de Madrid, respecto al árido reciclado de Oviedo, se pone de manifiesto por su mayor densidad y su menor absorción y contenido en mortero adherido. Como referencia, el valor de la absorción del árido reciclado procedente de Madrid es del 3,8% frente al 5% del árido reciclado procedente de Oviedo

Para analizar diferentes niveles de calidad del árido reciclado se ha reconstituido su granulometría forzando contenidos en desclasificados entre el 0 y el 10% (hasta el doble del límite máximo propuesto por la EHE para hormigón reciclado estructural) El hormigón reciclado se ha fabricado sustituyendo diferentes cantidades de árido grueso (del 0 al 100%) por árido reciclado. En este estudio se ha mantenido constante la relación A/C total del hormigón de referencia al realizar la sustitución, y se ha compensado la pérdida de trabajabilidad generada por la mayor absorción del árido reciclado modificando la dosificación de aditivo.

Se han seleccionado hormigones de referencia con resistencia (25 MPa y 35 MPa) y consistencia (blanda o fluida) que cubren la gran mayoría de los hormigones normalmente fabricados en España para hormigón de obra.

Así mismo se ha considerado como variable la estructura granular del hormigón y el criterio de sustitución del árido grueso por árido reciclado.

Como resumen de los resultados experimentales obtenidos en el presente estudio se exponen, a continuación, las conclusiones obtenidas en el mismo.

Sobre el hormigón reciclado fresco.

Con sustituciones del 20% del árido reciclado grueso la cantidad de superplastificante utilizada es la misma que en un hormigón convencional, por lo que el efecto de pequeñas cantidades de árido reciclado apenas afecta a la trabajabilidad del hormigón. Para mayores niveles de sustitución es preciso incrementar la dosificación del aditivo para mantener la consistencia deseada. En hormigones de consistencia blanda el porcentaje de aditivo superplastificante pasa del 0,6% al 0,8% cuando el porcentaje de sustitución es del 50% y al 0,9% cuando el porcentaje de sustitución es del 100%.

La presencia de árido reciclado también afecta al contenido de aire ocluido. Este aumento puede llegar a ser en el peor de los casos de un 48% con sustituciones del 100% del

árido grueso convencional por árido reciclado. Con sustituciones inferiores las variaciones son menos importantes situándose en torno al 10%.

Sobre el hormigón reciclado endurecido, análisis por factor.

Con los márgenes establecidos para los factores en este estudio el tipo de granulometría utilizada, el criterio de sustitución empleado o la consistencia objetivo del hormigón, son factores que prácticamente no influyen en ninguna de las propiedades analizadas, y cuando muestran alguna influencia sus efectos son muy poco importantes.

A pesar de que el contenido en desclasificados se ha considerado como una propiedad importante en los áridos reciclados, y aunque este parámetro ha sido analizado en niveles de variación muy por encima de los permitidos por la EHE 08 para hormigón reciclado estructural, el contenido en desclasificados tampoco ha demostrado tener influencia en la mayoría de las propiedades del hormigón reciclado. Sólo se ha detectado una ligera reducción de la resistencia a tracción del hormigón.

La resistencia objetivo tampoco puede considerarse como un factor esencial, y las conclusiones son aplicables de forma similar a hormigones de niveles de resistencia habitual en hormigón de obra.

Como consecuencia, este trabajo permite descartar como parámetros influyentes los factores antes comentados y poner en evidencia que aquellos que van a condicionar los efectos de la utilización del árido reciclado en las propiedades del hormigón se limitan al tipo de árido y el porcentaje de sustitución.

La importancia del porcentaje de sustitución era evidente ya que se ha analizado hasta el nivel de sustitución del 100%. Sin embargo cabe destacar que las variaciones importantes en las propiedades de hormigón se producen cuando el porcentaje de sustitución es superior al 50%.

El tipo de árido también se ha decantado como un factor esencial y ello a pesar de que los áridos reciclados utilizados presentan un nivel de calidad adecuado. La ampliación del estudio a otras materias primas menos cuidadas parece necesaria.

Sobre el hormigón reciclado endurecido, análisis por propiedad.

Densidad.- El porcentaje de sustitución de árido reciclado grueso es el factor más determinante sobre la densidad del hormigón dentro de los márgenes considerados para el resto de factores. Cuando el porcentaje de sustitución es del 20% la densidad disminuye un 1%. Si la sustitución es del 50% la reducción de densidad llega al 3%. En hormigones con un 100% de sustitución del árido grueso la densidad disminuye en torno a un 5%.

Con los márgenes establecidos para los factores en este estudio la calidad del árido reciclado, la utilización de granulometrías continuas finas y la consistencia objetivo del hormigón son factores influyentes sobre la densidad del hormigón aunque las variaciones que experimenta debido a ellos apenas reviste importancia.

Absorción.- El hormigón reciclado fabricado presenta un coeficiente de absorción superior al del hormigón convencional. Cuando la sustitución es del 20% del árido grueso la absorción experimenta un incremento medio del 24%. Si la sustitución es del 50% el incremento medio es del 34%. Cuando la sustitución es del 100% del árido grueso el incremento medio de la absorción es del 46%.

La calidad de los áridos reciclados utilizados en este estudio también influye de manera determinante en el coeficiente de absorción del hormigón reciclado. Los hormigones fabricados con áridos reciclados procedentes de Oviedo presentan una absorción superior en un 8% respecto a los que incorporan árido reciclado procedente de Madrid.

Se ha detectado que en los hormigones reciclados de resistencia objetivo 25 MPa ($a/c=0.6$, 275 kg/m³ de cemento) la absorción es un 10% inferior a la de los hormigones de 35 MPa ($a/c=0.5$, 375 kg/m³ de cemento). Este hecho se ha atribuido a un menor tamaño de poro de estos últimos que por su efecto sobre la absorción compensaría el incremento previsible del volumen total de poros esperable. Este resultado concuerda con los obtenidos por Gómez Soberón^[30].

Resistencia.- La resistencia a compresión del hormigón reciclado se ve afectada únicamente por la calidad de los áridos reciclados empleados. La mayor calidad del árido reciclado está relacionada con menor cantidad de mortero adherido, menor absorción y ello conduce a una mayor resistencia final del hormigón.

En los hormigones reciclados fabricados en este estudio el porcentaje de sustitución de árido grueso no influye sobre la resistencia a compresión, ya que la pérdida de resistencia causada por la utilización de árido reciclado se ve compensada por el empleo del superplastificante y por la disminución de la relación a/c efectiva debido al criterio aplicado.

Módulo de elasticidad.- El módulo de elasticidad del hormigón reciclado presenta descensos que son sensibles para sustituciones del 50% de árido grueso (alcanzando un 7% de reducción). Esta reducción aumenta hasta el 25% para sustituciones del 100%. Es evidente que altas sustituciones modifican sustancialmente el comportamiento del hormigón.

Resistencia a tracción.- La resistencia a tracción indirecta del hormigón reciclado fabricado aumenta al mejorar la calidad del árido reciclado. Los márgenes de variación alcanzados no son preocupantes para aplicaciones estructurales, ya que ésta no es una propiedad fundamental en el diseño, pero puede tener influencia en otros aspectos como los relacionados con la fisuración, por ejemplo debida a la retracción.

Permeabilidad.- El análisis realizado no ha mostrado influencias claras de ninguno de los parámetros considerados en la permeabilidad. La variabilidad de ésta propiedad en sí misma es más importante que los efectos de las variables analizadas. El análisis de este hecho, importante en sí mismo, queda fuera del alcance de este estudio.

Consideraciones generales.

La disponibilidad de árido reciclado procedente de hormigón ha planteado algunos problemas ya que frecuentemente el producto ofertado es mixto. Sin embargo, cuando se ha localizado, la obtención de áridos reciclados de buena calidad en la línea de las exigencias propuestas por el anejo 15 de la EHE 08 ha sido posible sin demasiada dificultad.

Del estudio realizado se desprende que, con los áridos utilizados, *las exigencias* del anejo 15 de la EHE 08 pueden considerarse conservadoras en lo relativo al límite máximo de porcentaje de sustitución o al contenido en desclasificados. En aras a una mayor reutilización de subproductos cabría una limitación más flexible condicionada a la calidad del mismo.

6.2. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.-

Analizar en profundidad la influencia de la calidad del árido reciclado y de los posibles contaminantes en las propiedades del hormigón reciclado.

Es evidente que en este trabajo se ha analizado áridos de un nivel de calidad adecuado, y que todos los estudios que se realicen son necesarios para acotar los campos de aplicabilidad de los áridos reciclados.

Sería interesante realizar estudios con áridos reciclados con un acusado contraste en la cantidad de mortero adherido así como que presenten variaciones en su composición sobrepasando los límites al respecto establecidos por la EHE.

Cualquier avance en este sentido permitirá la inclusión de más tipos de árido reciclado y por tanto un mayor nivel de reciclado. Se debe abundar en el estudio de la influencia de incorporar elementos contaminantes como restos cerámicos, plásticos, asfaltos, etc. Sería conveniente estudiar la influencia ejercida por ellos sobre las propiedades físicas, químicas y mecánicas del hormigón reciclado.

Estudios sobre aplicaciones no estructurales con hormigón reciclado.

Se están iniciando estudios orientados a aplicaciones de áridos reciclados en aplicaciones menos exigentes que el hormigón estructural y que permitan el empleo de cantidades superiores de subproductos, con menores exigencias de calidad, y por tanto con un menor coste de adaptación. En esta línea se analizan aplicaciones del hormigón reciclado en prefabricados de hormigón no estructurales como bloques, paneles de cerramiento, etc, adecuadas por el hecho de que frecuentemente se podrían reutilizar en las proximidades de sus puntos de producción, con la reducción del coste de transporte.

En este mismo bloque, pero con criterios de calidad diferentes se están iniciando estudios para evaluar aplicaciones en hormigón seco compactado. En ésta línea deberá analizarse entre otros los posibles efectos en la tendencia a fisuración del hormigón.

Realizar un estudio de sensibilidad en la fabricación a escala industrial de hormigón reciclado.

El empleo de áridos reciclado en una producción continuada exige unas garantías de control y continuidad de producción de un material cuyo origen es normalmente imprevisto y de difícil control. Por ello sería conveniente plantear un estudio en el que se analizaran las variaciones que pudieran presentar las propiedades del hormigón reciclado debidas a las tolerancias empleadas en las plantas de fabricación para las variaciones tolerables o previsibles aplicadas a los de materiales reciclados utilizados.

Profundizar en el estudio de aspectos relacionados con la durabilidad del hormigón reciclado.

A tal efecto creemos que convendría profundizar en el estudio del comportamiento del hormigón reciclado frente a ataques por sulfato o frente al ataque del agua del mar.

Estudios sobre deformaciones diferidas.

No existen prácticamente estudios realizados sobre fluencia en el hormigón reciclado por lo que sería muy recomendable estudiar su comportamiento. Se está desarrollando actualmente un importante trabajo en esta línea en la Universidad Politécnica de Valencia.

CAPÍTULO VII

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- [1] AGUADO, A.(COORDINADOR): "Demolición y reutilización de estructuras de hormigón". GEHO-CEB. Sept. 1997.
- [2] AJDUKIEWICZ AB, KLISZCZEWICZ AT. "Comparative tests of beams and columns made of recycled aggregate concrete and natural aggregate concrete" Journal of Advanced Concrete Technology. Vol. 5 pp 259-273. Jun 2007.
- [3] AJDUKIEWICZ, A.; HULIMKA, J.; KLISZCZEWICZ, A.: "Structural RC Members from Recycled Aggregate Concrete", 2001. www.betonverein.de/fib2001/05_prog_04.htm.
- [4] ALAEJOS, M^a P y otros: "Utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural". Monografías ACHE. Sept. 2006.
- [5] BARRA; M.: "Estudio de la Durabilidad del Hormigón de Árido Reciclado en su Aplicación como Hormigón Estructural". Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. 1996.
- [6] BARRA M., VAZQUEZ E. "The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete". Waste Management. Vol. 16 pp. 113-117. Año1996.

- [7] BS 8500-2:2002: "Concrete-Complementary British Standard to BS EN 206-1. : Specification for Constituent Materials and Concrete".
- [8] BUCK, A.: "Recycled Concrete as a Source of Aggregate"; ACI Journal Vol 74 N°5; pp. 212-219, Mayo 1977.
- [9] BUYLE-BODIN, F.; HADJIEVA-ZAHARIEVA, R.: "Influence of Industrially Produced Recycled Aggregates on Flow Properties of Concrete", Materials and Structures, Vol. 35, pp. 504-509, 2002.
- [10] CASUCCIO M, TORRIJOS MC, GIACCIO G, ET AL. "Failure mechanism of recycled aggregate concrete". Construction and Building Materials Vol. 22 pp: 1500-1506 : Jul 2008.
- [11] CHI-SUN POON, DIXON CHAN: "The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong". Resources Conservation and recycling. Vol. 50. pp 293-305. Agosto 2006.
- [12] COLLINS, R.J.: "BRE Digest 433: Recycled Aggregates". Noviembre 1998.
- [13] C.U.R. (Centre for Civil Engineering Research and Codes): "Report nr. 125: Crushed Concrete Rubble and Masonry Rubble as Aggregate for Concrete". Holanda
- [14] DHIR, R. K.; LIMBACHIYA, M.C.; LEELAWAT, T.: "Suitability of Recycled Concrete Aggregate for Use in BS 5328 Designated Mixes". Structures and Buildings. Agosto 1999.
- [15] DI MAIO, A.A.; ZEGA, C.; TAUS, V.; TRAVERSA, L.P.: "Durability of Recycled Concretes". INCERC. Comportarea in Situ a Constructiilor. Conferinta Natianala. Bucarest, 2004.
- [16] DI NIRO, G.; DOLARA, E.; RIDGWAY, P.: "Recycled Aggregate Concrete (RAC): Properties of Aggregate and RC Beams Made from RAC". Concrete for Environment Enhancement and Protection. Concrete in the Service of Mankind. Vol 1. Proceedings of the International Conference Held at the University of Dundee, Scotland, UK. June 1996, Edited by Dhir, R.K, Dyer, T.D, Published by E&FN Spon, 2-6 Boundary Row, London SE 1 8HN, First edition. p.p. 141-149, 1996.

- [17] DI NIRO, G.; CAIRNS, R.; DOLARA, E.: "Properties of Hardened RAC for Structural Purposes"; Use of Recycled Concrete Aggregate, Sustainable Construction; Edited Dhir, Henderson y Limbachiya; p.p. 177-188, 1998.
- [18] DIN 4226-1:2000: "Concrete Aggregate".
- [19] DOS SANTOS, J.R.; BRANCO,F.; DE BRITO, J.: "Mechanical Properties of Concrete with Coarse Recycled Concrete Aggregates". Sustainable Construction; Ed. Dhir, Henderson y Limbachiya. 2002.
- [20] DOSHO, Y.; KIKUCHI, M.; NARIKAWA, A.; OHSHIMA, A.K.: "Application of Recycled Concrete for Structural Concrete-Experimental Study on the Quality of Recycled Aggregate and Recycled Aggregate". Proceedings of the Fifth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, June 4-9, 2000, Barcelona.
- [21] ETXEBARRIA, M.: "Experimental Study on Microstructure and Structural Behaviour of Recycled Aggregate Concrete". Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. 2004.
- [22] ETXEBERRIA M., VÁZQUEZ E., MARÍ A. BARRA M.: "Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete". Cement and Concrete Research Vol 37, pp 735-742. May 2007.
- [23] ETXEBERRIA M, MARI AR, VAZQUEZ E "Recycled aggregate concrete as structural material" Materials and Structures Vol. 40 pp: 529-541 Junio 2007.
- [24] EVANGELISTA L., BRITO J.: "Mechanical behaviour concrete made with fine recycled concrete aggregates". Cement and concrete composites. Vol 29, pp 397-401. Enero 2007.
- [25] EUROPEAN DEMOLITION ASSOCIATION (EDA). "Demolition and Construction Debris: Questionnaire about an EC Priority Waste Stream". The Hague, 1992.
- [26] FERNÁNDEZ CANOVAS. M.: "Hormigón". Servicio de Publicaciones de la E.T.S.I De Caminos, Canales y Puertos. 1991.

- [27] FUKUTE, T.; HAMADA, H.; YAMAJI, T.; ITO, M.; HAYAKAMA, K. "A study on the applicability of recycled aggregate concrete under marine environments". International Seminar on Recycled Concrete. Sponsored by Niigata University and Japan Concrete Institute (JCI), pp 115-129, 2000.
- [28] GERD. Asociación Española de Gestores de Residuos de Construcción y Demolición. <http://www.gerd.es>.
- [29] GILBERT F. "Diseño de nuevos materiales procedentes del reciclaje de escombros de construcción y demolición: RUE (residuos urbanos de edificación) y RAHA (residuos de aglomerados hidráulicos y asfálticos)". Tesis doctoral. E.T.S.:I. Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria, 2003.
- [30] GOMEZ SOBERON, J.M.V "Comportamiento tenso-deformación, instantáneo y diferido de hormigón con árido reciclado". Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. 2002.
- [31] GOMEZ, J.M.V.: "Porosity of Recycled Concrete with Substitution of Recycled Concrete Aggregate: an Experimental Study ". Cement and Concrete Research, Vol 32, pp. 1301-1311, 2002.
- [32] GOMEZ, J.M.V.: "Deferred Behavioral Verification of Concrete with Aggregate from Recycled Concrete, Part II) Experimental Study of Creep. Proceedings of the Fifth International Conference on the Environmental and Technical Implications of Construction with Alternative Materials, San Sebastian, Spain, 2003. Editado por G. Ortiz de Urbina y J.J.J.M. Goumans, pp 115-125.
- [33] GOMEZ, J.M.V., VAZQUEZ, E., AGULLÓ, L.: "Hormigón con áridos reciclados. Una guía de diseño para el material". Monografía CIMNE. Nº 60. Mayo 2001.
- [34] GOMEZ, J.M.V.; AGULLÓ, L.; VAZQUEZ, E.: "Relationship Between Porosity and Concrete Properties with Natural Aggregates Replacement by Recycled Concrete Aggregate". Second International Conference on Engineering Materials, California, USA, pp.147-156, 16-19 Agosto 2001.

- [35] GONZÁLEZ-FONTEBOA, B.: "Hormigones con Áridos Reciclados Procedentes de Demoliciones: Dosificaciones, Propiedades Mecánicas y Comportamiento Estructural a Cortante". Tesis doctoral. E.T.S.:I. Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica A Coruña, 2002.
- [36] GONZALEZ-FONTEBOA B, MARTINEZ-ABELLA F. "Recycled aggregates concrete: aggregate and mix properties". *Materiales de Construcción* Vol. 55 p.p. 53-66 Julio 2005.
- [37] GONZALEZ-FONTEBOA B, MARTÍNEZ-ABELLA F. "Shear strength of recycled concrete beams". *Construction and Building Materials*. Vol. 21 pp. 887-893. Abril 2007.
- [38] GONZALEZ-FONTEBOA B, MARTINEZ-ABELLA F. "Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. Materials and mechanical properties" Source: *Building and Environment* Vol: 43. pp: 429-437 Apr 2008.
- [39] GOTTFREDSSEN, F. R.; THOGERSEN, F.: "Recycling of Concrete in Aggressive environment". *Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Proceedings of the Third International RILEM Symposium*; Ed. Erik K. Lauritzen; pp. 309-318; Año 1993.
- [40] HANSEN, T. C.; BOEEGH, E.: "Elasticity and Drying Shrinkage of Recycled-Aggregate Concrete"; *ACI Journal* Vol 82 N°5; p.p. 648- 652, Octubre 1985.
- [41] HANSEN, T. C.; MARGA, M.: "Strength of Recycled Concrete Made from Coarse and Fine Recycled Concrete Aggregate"; *Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol. 2 Reuse of Demolition Waste, Proceedings of the Second International RILEM Symposium*; Ed. Y. Kasai; p.p. 605-612, Noviembre 1988.
- [42] HANSEN T.C.: "Recycling of Demolition Concrete and Masonry". *RILEM Report* 6. 1992.
- [43] HANSEN T.C., SHULZ R., HENDRICKS CH., MOLIN C., LAURITZEN K.: "Recycling of Demolition Concrete and Masonry". *RILEM Report of Technical Committee 37-DCR Demolition and Reuse Concrete*. RILEM. Ed. T.C. Hansen 1992.
- [44] HANSEN, T.C.; TORBEN, C.: "Recycled Aggregates and Recycled Aggregate Concrete. Second State-Of-The-Art Report. Developments 1945-1985". *Materials and Structures*, Mayo-Junio 1996.

- [45] HENDRIKS Ch.F. JANSSEN G., VÁZQUEZ E: "Recycled aggregate in concrete". RILEM Final Report of RILEM TC 198-URM ISBN:2-912143-82-9. Año 2005.
- [46] HB 155-2002: "Guide to the use of recycled concrete and masonry materials". Standards Australia.
- [47] IKEDA T.; YAMANE S.; SAKAMOTO A.: "Strengths of Concrete Containing Recycled Concrete Aggregate". Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol. 2. Reuse of Demolition Waste, Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Japan. pp. 585-594, November 1988.
- [48] INSTRUCCIÓN DE HORMIGÓN ESTRUCTURAL. EHE. Centro de Publicaciones. Mº de Fomento. Julio 2008
- [49] JAKOBSEN, J. B.: "On-site Use of Regenerated Demolition Debris". Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol. 2. Reuse of Demolition Waste, Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Japan; Ed. Y. Kasai; pp. 537-547, November 1988.
- [50] JAPANESE INDUSTRIAL STANDARDS COMMITTEE. <http://www.jisc.go.jp/eng/>
- [51] JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. "New Standards on Recycled Aggregates and Molten-Slag in Japan". <http://www.jsce-int.org/>
- [52] JIANZHUANG XIAO, JIABIN LI, CH. ZHANG: "Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading". Cement and Concrete Research. Vol. 35 pp 1187-1194. Año 2004.
- [53] KAGA, H.; KASAI, Y.; TAKEDA, K.; KEMI, T.: "Properties of Recycled from Concrete"; Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol. 2. Reuse of Demolition Waste, Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, November 1988, Japan; Ed. Y. Kasai, pp. 690-698 Noviembre 1988.

- [54] KAKIZAKI, M.; HARADA, M.; SOSHIRODA, T.; KUBOTA, S.; IKEDA, T.; KASAI, Y.: "Strength and Elastic Modulus of Recycled Aggregate Concrete"; Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol. 2. Reuse of Demolition Waste, Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, November 1988, Japan; Ed. Y. Kasai, pp. 565-574, Noviembre 1988.
- [55] KARLSEN, J.; PETKOVIC, G.; LAHUS, O.: "A Norwegian Certification Scheme for Recycled Aggregate (RCA)". Sustainable Buildings 2002.
- [56] KASAI, Y.; HISAKA, M.; YANAGI, K.: "Durability of Concrete Using Recycled Coarse Aggregate"; Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol. 2. Reuse of Demolition Waste, Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, November 1988, Japan; Ed. Y. Kasai, pp. 623-632, Noviembre 1988.
- [57] KASAI, Y.: "Guidelines and the Present State of the Reuse of Demolished Concrete in Japan". Demolition and Reuse of Concrete and Masonry. Proceedings of the Third International RILEM Symposium, Edited by Lauritzen, E.K., Published by E&FN Spon, 2-6 Boundary Row, London SE 1 8HN, First Edition. pp. 93-104, 1994.
- [58] KASHINO, N.; TAKAHASHI, Y.: "Experimental Studies on Placement of Recycled Aggregate Concrete"; Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol. 2 Reuse of Demolition Waste, Proceedings of the Second International RILEM Symposium; Ed. Y. Kasai; pp. 699-708, Noviembre 1988.
- [59] KATZ, A.: "Recycling of partially hydrated concrete". Waste Materials in Construction. Edited by G.R. Woolley; J.J.J.M. Goumans; P.J. Wainwright, p.p. 383-391, 2000.
- [60] KAWANO, H.: "The State of Using By-Products in Concrete in Japan and Outline of JIS/TR on Recycled Concrete Using Recycled Aggregate". Public Works Research Institute. Proceedings of the 1º FIB Congress, 2002.
- [61] KIBERT C. J. "Concrete/masonry recycling progress in USA". Demolition and Reuse of Concrete and Masonry. Proceedings of the Second International RILEM Symposium. Ed. E.K. Lauritzen, pp 83-92

[62] KIKUCHI, M.; YASUNAGA, A. EHARA, K.: "The Total Evaluation of Recycled Aggregate and Recycled Concrete"; Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Proceedings of the Third International RILEM Symposium; Ed. Erik K. Lauritzen; p.p. 367-378; 1993.

[63] KIKUCHI, M.; DOSHO, Y.; NARIKAWA, M.; OHSHIMA, A.: "Application of Recycled Concrete for Structural Concrete. Part 1- Experimental Study on the Quality of Recycled Aggregate and Recycled Aggregate". Use of Recycled Concrete Aggregate, Sustainable Construction; Ed. Dhir, Henderson y Limbachiya; p.p. 55-68, 1998.

[64] KNIGHT, J.: "Relative Performance of High Quality concretes Containing Recycled Aggregates and Their Use in Construction"; Use of Recycled Concrete Aggregate, Sustainable Construction; Ed. Dhir, Henderson y Limbachiya; p.p. 275-286, 1998.

[65] KOBAYASHI, S.; KAWANO, H.: "Properties and Usage of Recycled Aggregate Concrete". Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol. 2. Reuse of Demolition Waste, Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, November 1988, Japan; Ed. Y. Kasai, p.p. 547-556, Noviembre 1988.

[66] KOU S., POON C.S., CHAN D.: "Properties of Steam Cured Recycled Aggregate Fly Ash Concrete" <http://congress.cimne.upc.es/rilem04/frontal/Papers.htm>. Conference on the use. of Recycled Materials in Buildings and Structures. Barcelona. Año 2004.

[67] KOU SC, POON CS, CHAN D "Influence of fly ash as a cement addition on the hardened properties of recycled aggregate concrete". Materials and Structures Vol: 41 Pages: 1191-1201 Aug 2008.

[68] KOU SC, POON CS. "Mechanical properties of 5-year-old concrete prepared with recycled aggregates obtained from three different sources". Magazine of Concrete Research. Vol 60 pp. 57-64 Feb 2008.

- [69] LARBI, J.A.; HEIJNEN, W.M.M.; BROUWER, J.P.P.; MULDER, E.: "Preliminary Laboratory Investigation of Thermally Treated Recycled Concrete Aggregate for General Use in Concrete". The Fourth International Conference on the Environmental and Technical Implications of Construction with Alternative Materials, WASCON 2000. Leeds/Harrogate, United Kingdom.
- [70] LEMMER, CH.; RÜHL, M.; NEALEN, A.: "Correction of Consistency of Concrete Made with Aggregate Derived from Concrete Rubble", 1998. h41, 44 <http://www.bim.de/public/tudmassiv/damcon13emmerruehl.htm>.
- [71] LIMBACHIYA, M. C.; LEELAWAT, T.; DHIR, R.K.: "RCA Concrete: A study on Properties in the Fresh State, Strength Development and Durability"; Use of Recycled Concrete Aggregate, Sustainable Construction; Ed. Dhir, Henderson y Limbachiya. p.p. 227-238, 1998.
- [72] LIMBACHIYA, M.C., LEELAWAT, T., DHIR, R.K.: "Use of Recycled Concrete Aggregate in High-Strength Concrete". Materials and Structures, Vol 33.. p.p. 574-580, Noviembre 2000.
- [73] "Lista Europea de Residuos". Directiva 75/442/CEE.
- [74] MAJOR RAKSHVIR SUDHIRKUMAR V. BARAI: "Studies on recycled aggregates-based concrete". Waste Management & Research, Vol. 24, pp 225-233. Año 2006.
- [75] MALEK BATAYNEH, IQBAL MARIE, IBRAHIM ASI: "Use of selected waste materials in concrete mixes". Waste Management Vol. 27 pp 1870–1876. Año 2006.
- [76] MARMASH, B. E.: "The Properties of Recycled Precast Concrete Hollow Core Slabs for Use as Replacement Aggregate in Concrete" Waste Materials in Construction. Edited by G.R. Woolley; J.J.J.M. Goumans; P.J. Wainwright, p.p. 769-781, 2000.
- [77] MARTÍNEZ LAGE, I.: "Estudio sobre los residuos de construcción y demolición en Galicia: método de estimación de la producción anual y usos posibles para su reciclaje". Tesis doctoral. La Coruña. Diciembre de 2006.

[78] MELLMANN, G.; MEINHOLD, U.; MAULTZSCH, M.: "Processed Concrete Rubble For The Reuse As Aggregates". Exploting Wastes In Concrete. Edited by Ravindra K. Dhir; Trevor G. Jappy, pp. 171-178, 1999.

[79] MERLET, J. D.; PIMIENTA, P. : "Mechanical and Physico-Chemical Properties of Concrete Produced with Coarse and Fine Recycled Concrete Aggregates"; Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Proceedings of the Third International RILEM Symposium; Ed. Erik K. Lauritzen; pp. 343-354, 1993.

[80] METSO MINERALS: Catálogo de trituradoras. <http://www.metsominerals.com/>.

[81] MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE. I Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición. Año 2001.

[82] MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE. Plan Nacional Integrado de Residuos. Año 2007.

[83] MORLION D.; VENSTERMANS J.; VYNCKE J.: "Demolition Waste of the "Zandvliet" Lock as Aggregates for Concrete". Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol. 2. Reuse of Demolition Waste, Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Japan; Ed. Y. Kasai, p.p. 709-718, Noviembre 1988.

[84] MULDER, E.; BLAAKMEER, J.; VAN DIJK, K.; NIJLAND, T.M.: "Closed Material Cycles for Concrete and Masonry, as Part of an Integrated Process for the Reuse of the Total Flow of C&D Waste". Proceedings of the Fifth International Conference on the Environmental and Technical Implications of Construction with Alternative Materials, San Sebastian, Spain, 2003. Editado por G.Ortiz de Urbina y J.J.J.M. Goumans, pp 219-229.

[85] MULHERON, M.; O'MAHONY, M.; "The Durability of Recycled Aggregates and Recycled Aggregate Concrete"; Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol. 2 Reuse of Demolition Waste, Proceedings of the Second International RILEM Symposium; Ed. Y. Kasai; p.p. 633-642, Noviembre 1988.

- [86] MUKAI, T., KIKUCHI, M.: "Properties of Reinforced Concrete Beams Containing Recycled Aggregate"; Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol. 2 Reuse of Demolition Waste, Proceedings of the Second International RILEM Symposium; Ed. Y. Kasai; p.p. 670-679, Noviembre 1988.
- [87] NAGATAKI, S.; GOKCE, A.; SAEKI, T.: "Effects of recycled aggregate characteristics on the performance parameters of recycled aggregate concrete". Proceedings of the Fifth Conmet/ACI International Conference on Durability of Concrete, p.p. 51-71 June 4-9, 2000, Barcelona.
- [88] NEALEN, A.; M. RUHL, M.: "Consistency Aspects in the Production of Concrete Using Aggregates from Recycled Demolition Material". 1997 www.b-i-m.de/Public/TUDmassiv/dacon97nealen.htm.
- [89] NISHBAYASHI, S.; YAMURA, K.: "Mechanical Properties and Durability of Concrete from Recycled Coarse Aggregate Prepared by Crushing Concrete". Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol. 2. Reuse of Demolition Waste, Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, pp. 652-659, November 1988, Japan.
- [90] NIXON, P.J.: "Recycled Concrete as an Aggregate for Concrete". RILEM Committee, 37/DRC. Demolition and reuse of concrete. Matériaux et Constructions. Vol. 11 N° 65, pp. 371-378.
- [91] OIKONOMOU D. "Recycled Concrete Aggregates". Cement and concrete Composites. Vol 27. Pag 3154-318. Año 2005.
- [92] OLORUNSOGO, F.T.: "Early Age Properties of Recycled Aggregate Concrete". Exploting Wastes in Concrete. Edited by Ravindrarah K. Dhir; Trevor G. Jappy, pp. 163-170, 1999.
- [93] PARK, S. G.: "Recycled Concrete Construction Rubble as Aggregate for New Concrete". <http://www.branz.co.nz/branzltd/publications/pdfs/con98.pdf>. Study report n° 86. Branz, 1999.
- [94] PARK, S. G.: "Effect of Recycled Concrete Aggregate on New Concrete". Study report n° 101. Branz, 2001.

- [95] PARRA Y ALFARO, J.L.: "Caracterización de RCD de la Comunidad de Madrid como Áridos Recicladados para Fabricación de Hormigones. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. E.T.S.I. de Minas. Año 2001.
- [96] PAUW P.; THOMAS P.; VYNCKE J.; DESMYTER J.: "Shrinkage and Creep of Concrete with Recycled Materials as Coarse Aggregates". Use of Recycled Concrete Aggregate, Sustainable Construction. Ed. Dhir, Henderson y Limbachiya. Año 1998 pp. 213-226.
- [97] PLACKETT R. L. AND BURMAN J. P. "The Design of Optimum Multifactorial Experiments". Biometrika, Vol. 33, No. 4 (Jun., 1946), pp. 305-325.
- [98] POON C.S.; KOU, S.C.; LAM, S: "Use of recycled aggregates in moulded concrete bricks and blocks. Cement and Concrete Research, Vol. 16, 2002, pp. 281-289.
- [99] POON, C.S.; SHUI, Z.H.; LAM, S.; FOK, H.; KOU, S.C.: "Influence of Moisture States of Natural and Recycled Aggregates on the Slump and Compressive Strength of Concrete". Cement and Concrete Research, Vol. 34, 2004, pp. 31-36.
- [100] POON, C.S.; CHAN D.: "Effects of contaminants on the properties of concrete paving blocks prepared with recycled concrete aggregates". construction and Building Materials, Vol. 21, 2005, pp. 164-175.
- [101] RASHEEDUZZAFAR; KHAN, A.: "Recycled Concrete-A Source for New Aggregate"; Cement, Concrete and Aggregates Vol 6 N°11; pp. 17-27, 1984.
- [102] RAVINDRA K., DHIR, NEIL A., HENDERSON, MUKESH C., LIMBACHIYA. "Use of Recycled Concrete Aggregate". Reino Unido, 1998.
- [103] RAVINDRARAJAH, R.S.; TAM, C.T.: "Properties of Concrete Made With Crushed Concrete as Coarse Aggregate". Magazine of Concrete Research, Vol. 37, nº 130, pp. 29-38. March 1985.
- [104] RAVINDRARAJAH, R.S.; LOO, Y.H.; TAM, C.T.: "Recycled Concrete as Fine and Coarse Aggregate in Concrete". Magazine of Concrete Research, Vol. 39, nº 141, pp. 214-220. December 1987.

- [105] RAVINDRARAJAH, R.S.; TAM, C.T.; "Methods of Improving the Quality of Recycled Aggregate Concrete"; Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol. 2 Reuse of Demolition Waste, Proceedings of the Second International RILEM Symposium; Ed. Y. Kasai; p.p. 575-584, Noviembre 1988.
- [106] RAVINDRARAJAH, R.S.; LOO, Y.H.; TAM, C.T.: "Strength Evaluation of Recycled-Aggregate Concrete by in-Situ Tests". Materials and Structures. N° 21, p.p. 289-295. 1988.
- [107] RILEM (International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures). "Recycled Aggregates and Recycled Aggregate Concrete". Recycling of Demolished Concrete and Masonry. RILEM Report 6, Edited by Hasen, T.C., Published by E&FN Spon, 2-6 Boundary Row, London SE 1 8HN, First Edition, 1992.
- [108] RILEM (International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures): "Specifications for Concrete with Recycled Aggregates". Materials and Structures, N°27. p.p. 557-559, 1994.
- [109] ROMERO VILAFRANCA, R., ZÚNICA RAMAJO L.R. "Métodos Estadísticos en Ingeniería". Ed. Universidad Politécnica de Valencia, 2005.
- [110] RÜHL, M.: "Water Absorption Capacity of Recycled Demolition Rubbish". Darmstadt Concrete 97, Ausgabe 12, 1992. <http://www.b-i-m.de/public/tudmassiv/dacon97ruehl.htm>.
- [111] SAGOE-CRENTSIL, K.; BROWN, T.: "Guide for Specification of Recycled Concrete Aggregates (RCA) for Concrete Production". CSIRO, Building, Construction And Engineering. Ecorecycle, Victoria. September 1998.
- [112] SAGOE-CRENTSIL, K.K.; BROWN, T.; TAYLOR, A.H.: "Performance of Concrete Made with Commercially Produced Coarse Recycled Concrete Aggregate". Cement and Concrete Research. Vol. 31, pp. 707-712, 2001.
- [113] SAGOE-CRENTSIL, K.K. 2002, 'Development of guide specifications for recycled aggregates in concrete construction', Proc. 9th Int. Conf. on the Durability of Building Materials & Components, Brisbane, Australia, 17-20 Marzo 2002.

- [114] SAKATE, K.; AYANO, T.: "Improvement of Concrete with Recycled Aggregate". Proceedings of the Fifth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Junio 4-9, 2000, Barcelona, pp.1089-1108.
- [115] SALEM, R. M.; BURDETTE, E. G.: "Role of Chemical and Mineral Admixtures on the Physical Properties and Frost-Resistance of Recycled Aggregate Concrete". ACI Materials Journal, Vol. 95-5, pp.558-563, Septiembre-Octubre 1998.
- [116] SÁNCHEZ DE JUAN, M.: "Estudio sobre la Utilización de Árido Reciclado para la Fabricación de Hormigón Estructural". Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Año 2005.
- [117] SANI D., MORICONI G., AVAAND G., CORINALDESI V.: Leaching and mechanical behaviour of concrete manufactured with recycled aggregates. Waste Management. Vol. 25, pp 177-182. Año 2005.
- [118] SCHULZ, R.R.: "The Processing of Building Rubble as Concrete Aggregate in Germany". Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Proceedings of the Third International RILEM Symposium, Edited by Lauritzen, E.K., Published by E&FN Spon, 2-6 Boundary Row, London SE 1 8HN, First Edition, pp. 105-116, 1994.
- [119] S.G. Frantz Company inc. <http://www.sgfrantz.com/>.
- [120] SYMONDS, ARGUS, COWI Y PRC BOUWCENTRUM: "Construction and Demolition; Waste Management Practices, and Their Economic Impacts"; Report to DGXI , European Commission, Febrero 1999.
- [121] SOUSA, J.G.G.; BAUER, E.; SPOSTO, R.M.: "Empleo de Residuos de la Construcción Civil Como Áridos Reciclados. Producción de Bloques de Hormigón. Materiales de Construcción, Vol 53, pp. 59-70, 2003.
- [122] TAGUCHI, G. "System of Experimental Design: Engineering Methods to Optimize Quality and minimize Costs. Ed. Unipub, New York, USA 1988.
- [123] TAKENAMA CORPORATION : "High-quality Recycled Aggregate "Cyclite" Acquires First Approval of Innovative Building Technologies from Building Center of Japan". 1999. http://www.takenaka.co.jp/takenaka_e/news_e/pr9912/m9912_01.htm

- [124] TAVAKOLI, M.; SOROUSHIAN, P.: "Strengths of recycled aggregate concrete made using field -demolished concrete as aggregate". ACI Materials Journal Vol. 93 N°2, pp. 182-190, Marzo-Abril 1996.
- [125] TERANISHI, K.; KIKUCHI, M.; DOSHO, Y.; NARIKAWA, M.: "Application of Recycled Aggregate Concrete for Structural Concrete. Part 3-Production of Recycled Aggregate by Real-Scale Plant and Quality of Recycled Aggregate Concrete". Use of Recycled Concrete Aggregate, Sustainable Construction; Ed. Dhir, Henderson y Limbachiya; pp. 143-156, 1998.
- [126] TSUNG-YUEH TU, YUEN-YUEN CHEN AND CHAO-LUNG HWANG: "Properties of HPC with recycled aggregates". Cement and Concrete Research Vol. 36, pp 943-950. Año 2006.
- [127] TURATSINZE A., BONNET S. AND GRANJU J.L.: "Mechanical characterisation of cement-based mortar incorporating rubber aggregates from recycled worn tyres". Building and Environment Vol 40, pp 221-226. Año 2005.
- [128] UNE-EN 933-1 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte1. Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado.
- [129] UNE-EN 933-8 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8.Evaluacion de los finos. Ensayo del equivalente de arena.
- [130] UNE-EN 1097-2 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 2. Determinación de la resistencia a la fragmentación.
- [131] UNE-EN 1097-3 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 3. Determinación de la densidad aparente y la porosidad en áridos.
- [132] UNE-EN 1097-5 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 5. Determinación del contenido en agua en áridos.
- [133] UNE-EN 1097-6 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6. Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua.
- [134] UNE-EN 12350-1. Ensayos de hormigón fresco. Parte 1: Toma de muestras.

- [135] UNE-EN 12350-2 Ensayos de hormigón fresco. Parte 2. Ensayo de asentamiento.
- [136] UNE-EN 12350-6 Ensayos de hormigón fresco. Parte 6 Determinación de la densidad.
- [137] UNE-EN 12350-7 Ensayos de hormigón fresco. Parte 7. Determinación del contenido de aire. Métodos de presión.
- [138] UNE-EN 12390-1 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 1. Forma, medidas y otras características de probetas y moldes.
- [139] UNE-EN 12390-2 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2. Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia.
- [140] UNE-EN 12390-3 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2. Determinación de la resistencia a compresión de probetas.
- [141] UNE-EN 12390-6 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2. Resistencia a tracción indirecta de probetas.
- [142] UNE-EN 12390-7 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2. Densidad del hormigón endurecido.
- [143] UNE-EN 12390-8 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2. Profundidad de penetración de agua bajo presión.
- [144] UNE-EN 12620. Áridos para hormigón.
- [145] UNE 83316 Ensayos de hormigón. Determinación del módulo de elasticidad en compresión.
- [146] VAZQUEZ, E.; BARRA, M.: "Hormigón de Áridos Reciclados: Retracción". V Seminario Desenvolvimento Sustentavel e a Reciclagem na Construcao Civil. Comité Técnico 206 Medio Ambiente, pp. 7-14, 16-17 Brasil, Septiembre de 2002.
- [147] VILLAGRAN-ZACCARDI YA, ZEGA CJ, DI MAIO. "Chloride penetration and binding in recycled concrete" Journal of Materials in Civil Engineering. Vol. 20, pp: 449-455. Jun 2008.

[148] VINCKE, J.; ROUSSEAU, E.: "Recycling of Construction and Demolition Waste in Belgium: Actual Situation and Future Evolution". Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Proceedings of the Third International RILEM Symposium, Edited by Lauritzen, E.K., Published by E&FN Spon, 2-6 Boundary Row, London SE 1 8HN, First Edition, 1994. pp. 57-69.

[149] WAINWRIGHT, P.J.; TREVORROW, A; YU, Y.; WANG, Y: "Modifying the performance of concrete made with coarse and fine recycled concrete aggregates". Demolition and Reuse of Concrete and Masonry. Proceedings of the Third International RILEM Symposium, Edited by Lauritzen, E.K., Published by E&FN Spon, 2-6 Boundary Row, London SE 1 8HN, First edition, 1994; pp. 319-330.

[150] WORKS BUREAU OF HONG KONG: "Specifications Facilitating the Use of Recycled Aggregates". WBTC N° 12/2002, March 2002.

[151] YAGISHITA, F., SANO, M., YAMADA, M.: "Behaviour of Reinforced Concrete Beams Containing Recycled Coarse Aggregate". Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Proceedings of the Third International RILEM Symposium. Edited by Erik K. Lauritzen p. 331-342. 1993.

[152] YAMATO, T.; EMOTO, Y.; SOEDA, M., SAKAMOTO, Y. "Some Properties of Recycled Aggregate Concrete"; Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol. 2 Reuse of Demolition Waste, Proceedings of the Second International RILEM Symposium; Ed. Y. Kasai; p.p. 643-651, Noviembre 1988.

[153] YAMATO, T.; EMOTO, Y.; SOEDA, M.: "Mechanical Properties, Drying Shrinkage and Resistance to Freezing and Thawing of Concrete Using Recycled Aggregate". Proceedings of the Fifth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Junio 4-9, 2000, Barcelona, pp.105-121.

[154] YANAGI, K.; NAKAGAWA, M.; HISAKA, M.; KASAI, Y.: "Effect of Impurities in Recycled Coarse Aggregate Upon a Few Properties of the Concrete Produced With It". Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, November 1988, Japan. p.p. 613-623.

[155] YANAGI, K; HISAKA, M.; KASAI, Y.: "Physical Properties of Recycles Concrete Using Recycled Coarse Aggregate Made of Concrete With Finishing Materials". Demolition and Reuse of Concrete and Masonry. Proceedings of the Third International RILEM Symposium, Edited by Lauritzen, E.K., Published by E&FN Spon, 2-6 Boundary Row, London SE 1 8HN, First edition, 1994; pp. 379-390.

[156] YANG KH, CHUNG HS, ASHOUR AF. "Influence of type and replacement level of recycled aggregates on concrete properties". ACI Materials Journal.Vol: 105 pp: 289-296 May-Jun 2008.

[157] ZAHARIEVA, R.; BUYLE-BODIN, F.; SKOCZYLAS, F.; WIRQUIN, E.: "Assessment of the Surface Permeation Properties of Recycled Aggregate Concrete". Cement and Concrete Composites, 2001.

[158] ZEGA C.J., TAUS V.L. DI MAIO A.A.: "Comportamiento físico-mecánico de hormigones reciclados elaborados con canto rodado. Instituto de Materiales y Modelos Estructurales". Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela. Año 2008.

[159] ZILCH K, ROOS F. "An equation to estimate the modulus of elasticity of concrete with recycled aggregates". Civ Eng 2001;76(4):187-91.

ANEJO I
DISEÑO EXPERIMENTACIÓN. ROBUSTEZ

En los párrafos que siguen a continuación se explica y justifica detalladamente el proceso seguido para la obtención de la matriz L27 modificada correspondiente al experimento llevado a cabo en este trabajo. Dicha matriz se corresponde con la **tabla 4.2** del CAPÍTULO IV.

- La primera columna, tipo de árido, se corresponde con la columna F10 de la matriz ortogonal original L27 recogida en la página 15 del artículo del presente anexo, aunque con el número de niveles reducido a 2. El nivel 3 se hizo equivalente al nivel 2 mediante la primera de las recomendaciones dadas por Taguchi^[122] para adaptar los “ortogonal arrays” a las exigencias deseadas en el diseño de cada experimento. Dicha recomendación queda recogida en la página 235 del presente anexo. El nivel 1 corresponde al árido reciclado de Oviedo (OVD) y el nivel 2 el que corresponde al árido reciclado procedente de Madrid (CDX) según se reseña en la **tabla 4.2**.
- La segunda columna, % de sustitución, se obtuvo de la interacción de las columnas F1 y F2 de la matriz original reducidas previamente a dos niveles como ya se hizo en el párrafo anterior. En ambas columnas el nivel 3 se hizo equivalente al nivel 1 y posteriormente la interacción de ambas se acomodó a los cuatro niveles existentes. Dicha interacción se efectuó con la segunda regla de adaptación establecida por Taguchi y recogida en la página 235 del presente anexo. El nivel 1 corresponde al 0% de sustitución, el 2 al 20%, el 3 al 50% y el 4 al 100% según se recoge en la **tabla 4.2**.
- La tercera columna, contenido de desclasificados, tiene correspondencia con la columna F5 de la matriz original. El nivel 1 corresponde al 0% de desclasificados (0d), el nivel 2 corresponde al 5% de desclasificados (0,5d) y el nivel 3 corresponde al 10% de desclasificados (d) según se observa en la **tabla 4.2**.
- La cuarta columna, tipo de granulometría, se corresponde con la columna F6 de la matriz original. El nivel 1 corresponde a una granulometría continua fina (GCF), el nivel 2 corresponde a una granulometría continua gruesa (GCG) y el nivel 3 a una granulometría discontinua (GD) tal y como puede observarse en la **tabla 4.2**.
- La quinta columna, resistencia característica objetivo, se corresponde con la columna F7 de la matriz original acomodada a dos niveles empleando de nuevo

la primera recomendación de la página 234 del presente anejo. El nivel 3 se hizo equivalente al nivel 2. El nivel 1 es el que corresponde a una resistencia característica de 35 N/mm² (H35) y el nivel 2 corresponde a una resistencia característica de 25 N/mm² (H25) según queda recogido en la **tabla 4.2**.

- La sexta columna, consistencia objetivo, es equivalente a la columna F8 de la matriz original aunque acomodada a dos niveles. El nivel 3 se hizo equivalente al nivel 1 utilizando de nuevo la primera recomendación de la página 235 del presente anejo. El nivel 1 corresponde a consistencia blanda (B) y el nivel 2 corresponde a consistencia fluida (F) según se observa en la **tabla 4.2**.
- La última columna, criterio de sustitución, tiene correspondencia con la columna F9 de la matriz original aunque se ha acomodado a dos niveles siguiendo la primera recomendación de la página 235 del presente anejo. El nivel 3 se hizo de nuevo equivalente al nivel 1. El nivel 1 corresponde al criterio de sustitución simple (SS) y el nivel 2 corresponde al criterio de sustitución compensada (SC) tal y como puede observarse en la **tabla 4.2**.

Líneas básicas del diseño y análisis de experimentos

Serna, P., Taengua, E.G.

Dpto. de Ing. de la Construcción y Proyectos de Ing. Civil
Universitat Politècnica de València

1. Objetivo del texto

En el presente escrito se pretende exponer el procedimiento general del Diseño de Experimentos, desarrollado a partir de los trabajos de Taguchi [1].

2. Introducción

Frecuentemente, cuando se plantea una investigación experimental, se pretende analizar de qué factores depende una propiedad determinada (diseño factorial) y, en su caso, obtener una función que relacione el valor de dicha propiedad con los de los valores que pueden tomar los factores¹.

Ante un problema como éste, el procedimiento a seguir es el siguiente:

1. Definición de la/s característica/s a estudiar, que serán las variables respuesta.
2. Selección de los factores a considerar en el experimento y decisión de los niveles de variación a estudiar para cada factor.
Debe seleccionarse el número de factores y los niveles a estudiar con criterio económico: reducirlos a un número mínimo pero intentando controlar el máximo de efectos. Reducir en exceso los factores o niveles puede conducir a la pérdida del sentido del estudio y con ello a resultados incorrectos.
3. Decisión del número de pruebas a realizar y definición de las mismas.

Así, si se desea conocer de qué depende el módulo de elasticidad de un hormigón fabricado con áridos reciclados, se puede pensar en un conjunto de factores y niveles de los mismos como la que se presenta en la tabla 1.

FACTORES	NIVELES DE VARIACIÓN
Calidad del hormigón de origen de los áridos recibidos (f_c)	$f_c = 25 ; 35$
Contenido en desclasificados (%)	6% ; 10 %
Calidad del hormigón objetivo ($f_{c,obj}$)	$f_{c,obj} = 20 ; 40$
Sustitución del árido grueso por árido reciclado (%)	20% ; 100 %
Criterio de sustitución	2 niveles: mg (-10% ; +10%)

Tabla 1. Ejemplo de planteamiento de factores y niveles para un experimento.

¹ Puede haber experimentos que, por naturaleza, no puedan organizarse según un diseño factorial, como los de carácter sociológico (v.g. encuestas), aunque en ciencia e ingeniería la mayoría de experimentos se pueden someter a un diseño factorial. Es por ello que en adelante cuando hablemos de diseño de un experimento nos estaremos refiriendo a diseños factoriales.

En la decisión de qué factores considerar en el experimento juega un papel importante tanto el conocimiento empírico o teórico que se tenga del fenómeno estudiado como la intuición de lo que pueda ser o no influyente. El acierto en la elección de los niveles también es importante: un factor puede aparecer como significativo simplemente porque la diferencia entre los niveles del mismo sea grande.

El número de pruebas de que conste el experimento deberá surgir de un compromiso entre: el nivel de resolución o fiabilidad que se quiere tener de las conclusiones (tanto mayor cuantas más pruebas se hagan) y la minimización del tiempo invertido en el experimento. En este sentido, recurrir al uso de fracciones factoriales será de gran ayuda.

Un estudio completo de esta programación exigiría realizar un plan de ensayos que contemplaría $2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 3 = 48$ combinaciones distintas.

Para reducir el número de ensayos es frecuente optar por plantear un ensayo tipo y sobre él analizar el efecto de las variaciones de cada factor por separado. En el ejemplo propuesto anteriormente, el caso tipo podría ser: un hormigón base de 25 MPa, del que se fabrican áridos reciclados con un porcentaje de desclasificados del 6%, se utilizará para fabricar un H40 sustituyendo el 20% del árido grueso manteniendo la granulometría. El efecto del contenido en desclasificados se analizaría añadiendo 1 ensayo que coincidiría con el ensayo base en todo, salvo en el factor que se estudia, que tomaría el valor del 10%. Los otros factores se analizarían del mismo modo actuando siempre alrededor del ensayo base. De este modo, el estudio se realizaría con sólo 6 ensayos.

Sin embargo, este modo de proceder no es estadísticamente el más adecuado. Para compaginar la economía en esfuerzo experimental pero manteniendo el rigor científico en el diseño del programa de ensayos, nos apoyaremos en principios estadísticos.

3. Consideraciones para el diseño de experimentos

Cuando se plantea diseñar un programa de ensayos, se deben tener en cuenta aspectos como:

- Los objetivos de experimentos con un número considerable de factores pueden no conseguirse con diseños que intenten esclarecer uno a uno el efecto de los distintos factores. Es incorrecto presuponer que el valor óptimo de la variable respuesta es el óptimo de los óptimos parciales conseguidos variando solamente un factor cada vez y dejando el resto fijos.
- Principios erróneos como el mencionado pueden conducir a pérdidas de tiempo y recursos o a resultados no concluyentes.
- Factores no controlados comprometen las conclusiones del experimento.
- La no observancia de un mismo procedimiento y condiciones en todas las pruebas que constituyen el experimento puede enmascarar el efecto de los distintos factores.

Un uso efectivo de los principios estadísticos en el diseño de experimentos permite un diseño económico y eficiente de los mismos, que permite evaluar los efectos individuales y sus interacciones [2].

Aquí plantearémos un procedimiento para el diseño de experimentos, cuyo soporte estadístico es el análisis de la varianza o ANOVA.

El procedimiento que se propone consiste en seleccionar un número reducido de pruebas, de manera que del estudio de sus resultados sea posible extraer suficientes información para garantizar un análisis de la influencia de los distintos factores con garantías.

4. Terminología

- **Factor.** Variable controlable experimentalmente que se supone puede tener un efecto sobre la llamada variable respuesta.
- **Variable respuesta.** Resultado de un experimento.
- **Prueba.** Combinación de los factores, cada uno a un nivel de variación determinado, a la cual va asociada una observación experimental de la variable respuesta.
- **Niveles.** Valores prefijados que puede tomar un factor.
- **Diseño o experimento.** Especificación de un conjunto de pruebas experimentales, obtenidas asignando diferentes valores a los factores y pudiendo haber repeticiones.
- **Replicación.** Repetición de una prueba (o de un conjunto de ellas) dos o más veces.
- **Efecto.** Cambio en la variable respuesta que se produce entre 2 condiciones experimentales. En concreto, el efecto que produce un factor sobre la variable respuesta es la variación del valor de la misma al variar el factor.
- **Interacción entre 2 o más factores.** Existe si el efecto de uno de ellos depende de los niveles de los otros factores implicados en la interacción.
- **Orden de una interacción.** Número de factores implicados en la misma. Los efectos de las interacciones de orden mayor que 2 suelen ser inexistentes, [2].

5. Procedimiento para el diseño del experimento

Se plantearán diseños de tipo fracción factorial, en los que el número de pruebas se ve reducido en relación al diseño factorial completo de acuerdo con criterios que son válidos desde un punto de vista estadístico.

Los planes factoriales altamente fraccionados, más conocidos como **orthogonal arrays**, nacieron de los trabajos de Taguchi [1], orientados a generalizar y facilitar la aplicación del Diseño de Experimentos en círculos industriales, y por extensión a los investigadores en general, sin precisar de grandes conocimientos estadísticos. Con ellos se consigue [2] estudiar el efecto de un número elevado de factores con pocas pruebas, a cambio de desestimar el efecto de las interacciones de orden elevado (de más de 2 efectos, cuya importancia sería de todas formas despreciable).

La elección del orthogonal array que conviene utilizar en cada caso depende del número de factores a estudiar y los niveles de variación de cada uno. Los más comunes se muestran en el anejo “Catálogo de orthogonal arrays”. La denominación que se les da es del tipo L_x , donde x es el número de pruebas de que consta el array.

Por ejemplo, si se pretende diseñar un experimento que permita el estudio de hasta 7 factores a 2 niveles sobre una variable respuesta dada, se puede recurrir al orthogonal array L_8 , mostrado en la tabla 2.

En ella cada columna j corresponde a un factor, mientras que cada fila i corresponde a una prueba de las que conforman el experimento. Así pues, el elemento ij indicará el nivel al que se debe fijar el factor j en la prueba i .

Prueba	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Tabla 2. Orthogonal array L8.

Una buena fracción factorial no confunde nunca efectos simples entre sí. Sin embargo, debido a tan reducido número de pruebas con que se trabaja, es habitual que los efectos de las interacciones se confundan con los efectos simples de los factores estudiados. Por ello cada orthogonal array se acompaña de una tabla de doble entrada que recibe el nombre de tabla de interacciones. En la mayoría de casos en que se recurre a un orthogonal array para diseñar un experimento no se utilizan todas las columnas del mismo, puesto que el número de factores considerados normalmente es menor al número de factores que permite estudiar el orthogonal array. En esos casos conviene elegir las columnas a utilizar intentando no tomar aquellas en las que se confunden interacciones de otras columnas también escogidas, y para eso se utiliza la tabla de interacciones. En la tabla 3 se muestra como ejemplo la tabla de interacciones del orthogonal array L8.

1	2	3	4	5	6	7
1	3	2	5	4	7	6
2	1	4	6	7	4	5
	3	7	4	6	5	4
		4	1	5	2	3
				5	3	2
					6	1

Tabla 3. Tabla de interacciones del orthogonal array L8.

Elegidas dos columnas cualesquiera del orthogonal array, por ejemplo la 2 y la 4, en la tabla de interacciones se observa que la interacción de los efectos simples de estas columnas se recoge en la columna 6. Si tomásemos también esta columna del orthogonal array para otro factor, al estudiar su efecto estaríamos confundiendo el efecto simple de cada factor con los efectos simples de los otros dos.

Si por exigencias del propio experimento el número de factores es tal que obliga a emplear columnas del orthogonal array que incluyan interacciones, cuando posteriormente se analicen los resultados del experimento habrá que tener en cuenta que los efectos simples de los factores incluirán también parte del efecto de determinadas interacciones. Puesto que a la vista de la tabla de interacciones se puede saber cuáles son las que inerfieren cada efecto simple, o bien se pueden plantear experimentos adicionales destinados a clarificarlo, o bien se puede tener de antemano conocimiento de la importancia o no de las interacciones en cuestión.

Por último, es bastante común que se quieran considerar en un experimento un número de factores y/o niveles que no coincidan exactamente con ningún orthogonal array de los que se manejan usualmente. En ese caso, Romero y Zúñica [3], proponen unos “trucos” para la adaptación de un orthogonal array al número deseado de factores y/o niveles, y que son totalmente válidos porque no alteran las propiedades fundamentales del orthogonal array¹. Son los siguientes:

1. En una columna de un factor a 3 niveles es posible acomodar un factor a 2 niveles haciendo equivalentes 2 de los 3 niveles primitivos. Se tiene un ejemplo en la tabla 4.
2. En cualquier diseño con factores a 2 niveles es posible acomodar un factor a 4 niveles usando 2 columnas cualesquiera y la correspondiente a su interacción. Se tiene un ejemplo en la tabla 5.
3. En un diseño con factores a 2 niveles es posible acomodar un factor a 3 niveles usando el truco 2 y luego haciendo equivalentes 2 de los nuevos 4 niveles.

Nº prueba	FACTOR A
1	1
2	2
3	3
4	1
5	2
6	3
7	1
8	2
9	3

Tabla 4. Ejemplo del truco 1.

Nº prueba	FACTOR A
1	1
2	2
3	1
4	1
5	2
6	1
7	1
8	2
9	1

Nº prueba	FACTOR A	FACTOR B
1	1	1
2	1	2
3	1	1
4	1	2
5	2	1
6	2	2
7	2	1
8	2	2

	A * B
1 * 1	1
1 * 2	2
1 * 1	1
1 * 2	2
2 * 1	3
2 * 2	4
2 * 1	3
2 * 2	4

Tabla 5. Ejemplo del truco 2.

6. Indicaciones para el desarrollo del experimento

Lo más aconsejable es que la secuencia de realización de las pruebas no siga ningún orden, ya que una secuenciación excesiva de las pruebas podría introducir interferencias anómalas en el experimento, como errores por distracción del experimentador en las últimas pruebas.

Si se incluyen **replicaciones** o repeticiones de las pruebas, ha de actuarse, siempre que sea posible, de forma equilibrada: se hablará de **diseño balanceado o equilibrado** cuando todas las pruebas se repitan un mismo número de veces. Esto permitirá analizar el error experimental (ya que una misma prueba no proporciona 2 veces el mismo resultado exactamente). Además, las replicaciones aumentan los grados de libertad del experimento, teniéndose un análisis más robusto.

7. Análisis de los resultados: ANOVA

Una vez realizado el experimento y obtenidos los resultados, la variabilidad en los valores que ha tomado la variable respuesta se debe a:

1. A la variación de los factores estudiados según sus niveles.

¹ Ciertas propiedades fundamentales de los orthogonal arrays, que son intrínsecas a la construcción de los mismos y que garantizan la fiabilidad de las conclusiones que de su uso se extraen. No han sido descritas en el presente escrito por excederse del alcance del mismo.

1. A factores no considerados y al *ruido* experimental, que es el propio error inherente a cualquier experimento.

La variabilidad de la variable respuesta se recoge en lo que se llama la suma de cuadrados del experimento, que conceptualmente se asimila a la suma de errores al cuadrado:

$$SC_{TOTAL} = \sum_i (x_i - \bar{x})^2$$

Siguiendo la idea de que la variabilidad total del experimento es la suma de una variabilidad debida a los factores y de una variabilidad no controlada o *residual*, se tiene:

$$SC_{TOTAL} = \sum_i SC_{FACTORES} + SC_{RESIDUAL}$$

Resulta obvio que la influencia de un factor determinado sobre la variabilidad de la variable respuesta será tanto más importante cuanto mayor sea la suma de cuadrados asociada a éste, o dicho de otro modo: a mayor suma de cuadrados de un factor, más influyente es.

No obstante, la afirmación anterior se tiene que matizar, porque no es lo mismo un factor con 2 niveles de variación que uno con 4 niveles. En este sentido, es fácil entender que un factor para el que se han considerado muchos niveles de variación producirá mayor variabilidad en la respuesta que un factor considerado a pocos niveles.

Para relativizar la influencia de cada factor en la variabilidad de la variable respuesta en función del número de niveles considerado para cada uno, se introduce el concepto de *grados de libertad* tanto del experimento como de los factores, y a continuación el concepto de *cuadrado medio*, que es el cociente entre la suma de cuadrados y los grados de libertad del factor (la relativización de la suma de cuadrados según el número de niveles del factor).

Si el experimento consta en total de un número N de pruebas, entonces se dice que el experimento tiene N-1 grados de libertad totales.

Un factor F_i para el que se consideran N_{fi} niveles, tendrá N_{fi}-1 grados de libertad.

La diferencia entre los grados de libertad totales y la suma de los grados de libertad de todos los factores es igual a los grados de libertad del *residuo*. En este sentido, se habla de residuo como un factor más, y es el que agruparía toda la parte de variación que no queda explicada por los factores.

En resumen, se tiene:

$$\begin{aligned} \text{Grados de libertad totales:} & \quad g_{lt} = N - 1 \\ \text{Grados de libertad de los factores:} & \quad g_{lf} = \sum_i (N_{fi} - 1) \\ \text{Grados de libertad residuales:} & \quad g_{lr} = g_{lt} - g_{lf} \end{aligned}$$

En general se recomienda que $g_{lr} \geq 4$ para que un ANOVA se pueda considerar robusto, esto es, para que las conclusiones que de él se derivan se puedan considerar como tales. Hay diversas formas de aumentar los grados de libertad residuales en fase de diseño del experimento:

- Aumentar el número de pruebas.

- Reducir el número de factores considerados.
- Replicar el diseño (realizar todas las pruebas 2 veces).

El análisis de la varianza se suele hacer con la ayuda de paquetes informáticos, por lo que interesa comentar cómo se deben interpretar los resultados de los mismos, tanto en forma de tablas como salidas gráficas.

8. Análisis de la varianza (ANOVA) con Statgraphics*

Este epígrafe no pretende ser un manual del software Statgraphics, sino una iniciación a la interpretación de las tablas de anova y los gráficos del análisis de la varianza necesarios para poder pretender realizar un buen diseño del experimento.

Tras introducir los datos y resultados del experimento en el programa y solicitar el análisis de la varianza, el programa realiza contrastes de hipótesis y se obtiene una tabla de anova, que tiene el siguiente aspecto:

Analysis of Variance for DIAMETER - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:AD MIXTURE	21896,8	2	10948,4	3,55	0,0397
B:CEMENT	11193,6	2	5596,82	1,82	0,1781
C:FILLER	23011,3	3	7670,43	2,49	0,0769
D:GRAVEL	6543,29	2	3271,64	1,06	0,3571
E:SAND	15466,4	3	5155,48	1,67	0,1912
F:WATER	10467,2	2	5233,59	1,70	0,1982
RESIDUAL	104776,0	34	3081,66		
TOTAL (CORRECTED)	191167,0	48			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Cada fila de la tabla corresponde a uno de los factores considerados. En la columna **Df** se indican los grados de libertad de los factores y los que quedan para el residuo.

Antes de comenzar a sacar conclusiones debemos comprobar que el número de grados de libertad residuales es superior a 4.

Observando los p-valores mostrados en la columna **P-Value**, aquellos factores con p-valor *igual o inferior a 0,05* serán considerados estadísticamente significativos: tienen un efecto considerable sobre la variable respuesta. El valor límite de p-valor igual a 0,05 resulta de admitir una confianza del 95%.

Los factores con p-valores muy grandes son claramente no significativos. La forma lógica de proceder con ellos es eliminarlos y repetir el análisis sin tomarlos en consideración. Se procede así porque, ya que se conoce que un factor no es influyente, al no considerarlo se están ganando grados de libertad para el residuo, y con ello se clarifica más la consideración de significancia o no de los efectos de los otros factores.

* Statgraphics Plus 5.1, © 1994 – 2001 Statistical Graphics Corp.

En el caso de la tabla anterior, el factor ADMIXTURE aparece con un p-valor = 0,0397, por lo que su efecto sobre DIAMETER es estadísticamente significativo. Para FILLER se tiene un p-valor = 0,0769, próximo a 0,05 aunque superior. El factor GRAVEL, con un p-valor = 0,3571 es claramente no influyente. No considerándolo se obtiene:

Analysis of Variance for DIAMETER - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:ADMIXTURE	22554,8	2	11277,4	3,65	0,0361
B:CEMENT	9618,87	2	4809,44	1,56	0,2250
C:FILLER	24604,4	3	8201,46	2,65	0,0633
D:SAND	16382,1	3	5460,7	1,77	0,1711
E:WATER	10868,1	2	5434,04	1,76	0,1870
RESIDUAL	111320,0	36	3092,22		
TOTAL (CORRECTED)	191167,0	48			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

En esta segunda tabla de anova se tiene el factor FILLER con un p-valor = 0,0633, se ha visto disminuido respecto del valor que tenía en la tabla anterior y queda aún más cercano a 0,05. Por ello, en este caso se podría concluir que dicho factor también es influyente, aunque esta afirmación ya no cuenta con un nivel de confianza del 95%, sino del $100 - 6,33 = 93,67\%$. Por lo tanto, sólo ADMIXTURE y FILLER tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la variable respuesta DIAMETER; el resto, no.

Existe también una forma gráfica para deducir las conclusiones anteriores, referentes a qué factores son influyentes y cuáles no: son los **gráficos de intervalos LSD** (siglas de *Least Significant Difference*). En ellos se representa un segmento para cada nivel del factor seleccionado. En el caso de factores de tipo cualitativo¹, cuando los segmentos se solapan entre sí, la influencia del factor no es estadísticamente influyente; cuando los segmentos claramente no se solapan, el factor es influyente. En la figura 1 se muestra un ejemplo de cada caso. En el caso de factores de tipo cuantitativo no se puede concluir que un factor sea significativo o no a partir de un gráfico de intervalos LSD, éste simplemente aportaría información de la tendencia (crecimiento, decrecimiento, forma cuadrática, etc) en la variable respuesta producida por la variación del factor.

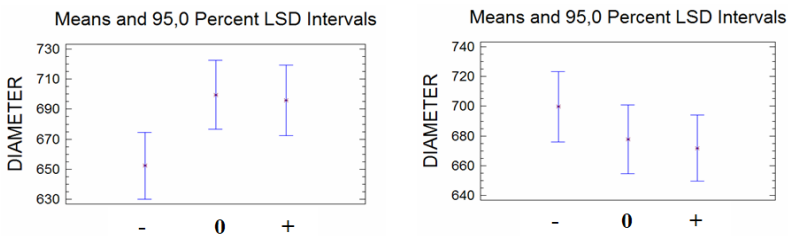


Fig. 1. Comparación del gráfico LSD de un factor cualitativo influyente con otro no influyente.

¹ Un factor de tipo cualitativo es aquél que no es continuo. Por ejemplo, el hecho de usar cohesionante o no en la fabricación del hormigón, tendríamos el factor COHESIONANTE con dos niveles: sí y no, que normalmente se denotan por 1 y 0.

9. Estudios de regresión con Statgraphics

Tras determinar con el análisis de la varianza los factores que tienen un efecto estadísticamente significativo sobre una variable respuesta, el objetivo último de un estudio de regresión es llegar a obtener una expresión matemática que estime los valores de una variable aleatoria Y a partir de los valores de una o más variables (aleatorias o no) de las que la primera depende, X_i , que ecuación que constituirá la formulación matemática de un modelo.

Las consideraciones teóricas y cálculos que se realizan en un estudio de regresión no se tratarán en el presente texto porque los estudios de regresión en la práctica se llevan a cabo con la ayuda de un paquete informático. Aquí se seguirá utilizando el Statgraphics.

En una primera aproximación, se considerarán sólo aquellos factores cuyo efecto ha resultado ser estadísticamente significativo en el análisis de la varianza. Tras ello, se obtiene una tabla como la siguiente:

Multiple Regression Analysis

Dependent variable: DIAMETER

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
CONSTANT	-1243,88	8601,97	-0,144604	0,8857
ADMIXTURE	3375,4	2230,37	1,51338	0,1375
FILLER	-119,846	73,6768	-1,62665	0,1111
ADMIXTURE^2	-274,921	185,952	-1,47845	0,1466
FILLER^2	0,397021	0,245933	1,61435	0,1138
WATER/CEMENT	1099,53	403,822	2,7228	0,0093

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	57841,7	5	11568,3	3,73	0,0068
Residual	133326,0	43	3100,6		
Total (Corr.)	191167,0	48			

R-squared = 30,2571 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 22,1474 percent
Standard Error of Est. = 55,683
Mean absolute error = 40,0141
Durbin-Watson statistic = 2,84462 (P=0,0008)
Lag 1 residual autocorrelation = -0,423571

Para interpretar los resultados, la atención debe centrarse especialmente en lo que ha sido recuadrado en rojo: las columnas **Parameter**, **P-Value** y los valores de **R-squared**.

En la columna **Parameter** encontraremos, además de los factores que han sido considerados en el estudio de regresión, un factor llamado **CONSTANT** que el programa considera por defecto y que se correspondería con la constante aditiva de la ecuación, lo que en una recta sería la ordenada en el origen.

El **P-Valor** de nuevo indica la significancia de la introducción del factor en cuestión en el modelo. Así, los que aparezcan con un p -valor $> 0,05$ son aquéllos cuya consideración o no consideración en el modelo no afecta especialmente al nivel de ajuste obtenido. Dichos factores

deben ser excluidos del modelo porque no contribuyen demasiado al buen ajuste del modelo y sin embargo sí que complican la ecuación obtenida añadiendo términos innecesarios.

Una vez eliminados, se repite el análisis con sólo los factores con p-valores $< 0,05$. Diremos que un ajuste o estudio de regresión es “bueno” cuando los valores que proporciona la ecuación encontrada en función de los factores se aproximan considerablemente a los valores realmente observados. El parámetro **R-squared** o R^2 es una medida de este ajuste: un R^2 próximo al 100% indica que la ecuación que se ha encontrado con la regresión es prácticamente la “exacta”, mientras que un R^2 bajo indica que no se ha conseguido un buen ajuste. El programa también proporciona un valor **R-squared (adjusted for d.f.)**, que no es más que el valor de R^2 “relativizado” al tamaño del experimento, y sólo sirve para comparar la calidad de las regresiones conseguidas en experimentos con distinto número de pruebas.

Se tiene que llegar a un compromiso entre la exactitud (maximizar el R^2 del ajuste) y la simplicidad de la ecuación. Para aumentar el valor del R^2 se procederá a ir modificando los factores considerados, interacciones e incluso funciones de los factores (exponencial, elevado al cuadrado, etc), retirando los que presenten p-valores $> 0,05$. Es importante destacar que la ecuación que se encuentre debe revestir un cierto significado físico, y en la mayoría de casos no tendrá sentido considerar funciones extrañas.

El mismo programa proporcionará el valor de la ecuación correspondiente al ajuste, y en este punto hay que recordar que no siempre se podrá llegar hasta esta situación: puede que la variable que se trata de relacionar con los factores presente demasiada variabilidad no controlada, que no se hayan considerado los factores adecuados, o que simplemente el experimento esté mal concebido.

Por último, cualquier paquete informático ofrece salidas gráficas interesantes también a nivel de los estudios de regresión. Por ejemplo, el Statgraphics ofrece la posibilidad de representar, una vez hecha la regresión, los valores observados frente a los calculados de la variable respuesta, de forma que cuanto más centrada esté la nube de puntos en torno a la recta bisectriz, mayor será la precisión de la ecuación obtenida. En la figura 2 se compara la gráfica de observados-calculados en un regresión con buen ajuste con la obtenida en una regresión con mal ajuste.

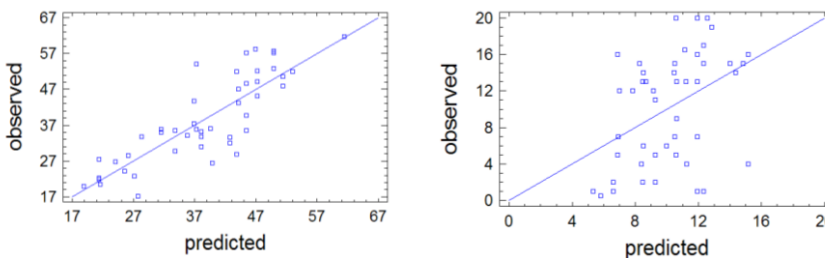


Fig.2. Comparación de un buen ajuste (izquierda) con un mal ajuste (dcha.).

Anejo: Catálogo de orthogonal arrays ¹

L8

Permite estudiar hasta 7 factores (todos a 2 niveles) en 8 pruebas.

Orthogonal array

Prueba	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Tabla de interacciones

1	2	3	4	5	6	7
1	3	2	5	4	7	6
	2	1	6	7	4	5
		3	7	6	5	4
			4	1	2	3
				5	3	2
					6	1

L16

Permite estudiar hasta 15 factores (todos a 2 niveles) en 16 pruebas.

Orthogonal array

Prueba	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
7	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
10	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2
16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1

Tabla de interacciones

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	3	2	5	4	7	6	9	8	11	10	13	12	15	14
	2	1	6	7	4	5	10	11	8	9	14	15	12	13
		3	7	6	5	4	11	10	9	8	15	14	13	12
			4	1	2	3	12	13	14	15	8	9	10	11
				5	3	2	13	12	15	14	9	8	11	10
					6	1	14	15	12	13	10	11	8	9
						7	15	14	13	12	11	10	9	8
							8	1	2	3	4	5	6	7
								9	3	2	5	4	7	6
									10	1	6	7	4	5
										11	7	6	5	4
											12	1	2	3
												13	3	2
													14	1

L9

Permite estudiar hasta 4 factores a 3 niveles en 9 pruebas.

Orthogonal array

Prueba	F1	F2	F3	F4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

No se acompaña tabla de interacciones porque cada interacción doble se “reparte” entre los efectos simples de los otros factores.

L18

Permite estudiar 1 factor a 2 niveles y hasta 7 factores a 3 niveles en 18 pruebas.

Orthogonal array

Prueba	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

L27

Permite estudiar hasta 13 factores a 3 niveles en 27 pruebas.

Orthogonal array

Prueba	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
5	1	2	2	2	2	2	3	3	3	3	1	1	1
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

Tabla de interacciones

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	3	2	2	6	5	5	9	8	8	12	11	11
	4	4	3	7	7	6	10	10	9	13	13	12
	2	1	1	8	9	10	5	6	7	5	6	7
		4	3	11	12	13	11	12	13	8	9	10
		3	1	9	10	8	7	5	6	6	7	5
			2	13	11	12	12	13	11	10	8	9
			4	10	8	9	6	7	5	7	5	6
				12	13	11	13	11	12	9	10	8
				5	1	1	2	3	4	2	4	8
					7	6	11	13	12	8	10	9
					6	1	4	2	3	8	2	4
						5	13	12	11	10	9	8
						7	3	4	2	4	3	2
							12	11	13	9	8	10
							8	1	1	2	3	4
								10	9	5	7	6
								9	1	4	2	3
									8	7	6	5
									10	3	4	2
										6	7	7
										11	1	1
											13	12
											12	1
												11

Bibliografía

1. Taguchi, G., *System of experimental Design: Engineering Methods to optimize Quality and minimize Costs*. Ed. Unipub, New York, Estados Unidos, 1988.
2. Mason et al., *Statistical Design and Analysis of Experiments*. Ed. John Wiley and Sons, Estados Unidos, 2003.
3. R. Romero y L. Zúnica, *Estadística: Diseño de experimentos, modelos de regresión. Editado por el Servicio de Publicaciones de la Univ. Politécnica de Valencia, Valencia, 1993.*

ANEJO II
DOSIFICACIÓN DEL HORMIGÓN.
HOJA DE CÁLCULO

En las páginas siguientes del presente anejo se muestra un ejemplo de dosificación obtenido mediante la hoja de cálculo elaborada con Excel a tal efecto.

En dicha hoja obtenemos las cantidades de materiales sueltos necesarias para la fabricación de un determinado volumen de hormigón, incluida la cantidad de árido grueso reciclado, con el porcentaje requerido, mediante sustitución simple o compensada.

Incluye un gráfico dinámico con las granulometrías de los áridos empleados. En él se observa el ajuste del árido total, sin sustitución alguna, a la curva granulométrica teórica tomada como referencia.

Incluye un gráfico dinámico con el ajuste del árido total, incluido el porcentaje de sustitución que requiera la amasada, a la curva granulométrica teórica tomada como referencia.

Se proporciona el valor de la dispersión correspondiente al ajuste entre las dos curvas.

También se facilitan las cantidades de desclasificados, desglosadas por fracciones según el porcentaje requerido, tanto en sustitución simple como en sustitución compensada.

1. Datos de identificación de la prueba que se lleva a cabo.

DOSIFICACIÓN DE HORMIGONES

Tipo de hormigón:	HA-25/B/20/IIa		
Tipo de cemento:	CEM III/A 42,5 N/SR		
Árido natural:	HORAVISA		
Árido reciclado:	CEDEX		
PRUEBA	10	AMASADA	A

x
x

Casilla de datos
Casilla de resultados

- 1º Fijar la relación a/c
- 2º Fijar la cantidad de cemento
- 3º Fijar el valor de a (según cuadro) y D de la curva de Bolomey
- 4º Insertar la granulometría de los áridos y sus densidades
- 5º Fijar el % de aditivo

2. Se introduce la relación a/c y la cantidad de cemento que se utiliza.

Según EHE		
Relación a/c	0,6	
Cemento c	275	kg/m ³
Agua a	165	l/m ³

3. Se introduce el tamaño máximo del árido a emplear y el parámetro de Bolomey.

Bolomey	a	D
	11	20
Tamiz (mm)	% pasa	% retenido
63	100	0,00
31,5	100	0,00
16	90,6	9,40
8	67,29	32,71
4	50,8	49,20
2	39,14	60,86
1	30,9	69,10
0,5	25,07	74,93
0,25	20,95	79,05
0,125	18,04	81,96
0,063	16	84,00

4. Se introducen los porcentajes de arena caliza y silícea y la humedad que incorporan.

Arena	%	Humedad
Caliza	85	0
Silícea	15	3

5. Se introducen las granulometrías de las arenas empleadas.

Tamiz (mm)	% QUE PASA	
	Arena Caliza	Arena Silícea
63	100	100
31,5	100	100
16	100	100
8	100	100
4	99	93
2	66	76
1	42	63
0,5	30	45
0,25	23	22
0,125	18	5
0,063	15	2

6. Se introducen las granulometrías de los áridos gruesos convencionales empleados y la del árido grueso reciclado utilizado, así como sus densidades y humedad.

- Se obtiene la distribución granulométrica de la mezcla de arenas en la proporción especificada anteriormente.
- Se obtienen las granulometrías del árido total con el 0%, el 20%, el 50% y el 100% de sustitución del árido grueso por el árido grueso reciclado empleado. En este caso la sustitución se ha realizado empleando el criterio de sustitución compensada.
- Se proporcionan valores de la dispersión obtenida en el ajuste de la curva granulométrica del árido total a la curva teórica empleada.

Procedencia del árido:		TEC-REC				SUSTITUCIÓN COMPENSADA			
Tamiz (mm)	% QUE PASA.				ÁRIDO TOTAL: % QUE PASA CON EL % DE GRAVA REC. INDICADO				
	Grava	Gravilla	85%AC+15%AS	Gravilla Rec.	0%	20%	50%	100%	
63	100	100	100,00	100	100	100	100	98,57	
31,5	100	100	100,00	100	100	100	100	98,57	
16	81	100	100,00	94	94,49	95,01	95,78	95,8	
8	2	69	100,00	37	65,81	66,61	67,83	69,44	
4	1	10	98,10	3	53,69	53,55	53,35	52,95	
2	0	2	67,50	1	39,05	38,97	38,85	38,65	
1	0	1	45,15	0	29,47	29,31	29,06	28,64	
0,5	0	0	32,25	0	23,87	23,77	23,64	23,41	
0,25	0	0	22,85	0	19,92	19,85	19,75	19,59	
0,125	0	0	16,05	0	17,06	17,02	16,95	16,83	
0,063	0	0	13,05	0	15,8	15,76	15,71	15,71	
Densidad r.	2,68	2,68	2,68	2,36	Dispersión				
					1,77	1,84	2,05	2,28	
Humedad	0	0	0,45	0					

7. Se introduce la cantidad de aditivo a emplear y obtienen las cantidades de materiales sueltos necesarias para la fabricación de 1 m³ de hormigón con el porcentaje de sustitución requerido.

DOSIFICACIÓN POR m ³	% de grava reciclada sustituida			
	0%	20%	50%	100%
Cemento (kg)	275,00	275,00	275,00	275,00
Agua (l)	159,46	159,46	159,27	158,89
Grava (kg)	667,97	538,43	343,89	0,00
Gravilla (kg)	430,79	347,12	221,96	0,00
Arena caliza (kg)	823,05	817,37	808,95	795,04
Arena sílicea (kg)	149,60	148,57	147,04	144,51
Total Arena (kg)	972,66	965,94	955,99	939,55
Grava reciclada (kg)	0,00	187,75	469,27	938,54
Aditivo %	0,6	0,6	0,7	0,9
Aditivo (kg)	1,65	1,65	1,93	2,48

8. Se obtienen los datos de las cantidades de materiales sueltos necesarias para la fabricación de 60 l de hormigón con el porcentaje de dosificación requerido.

DOSIFICACIÓN FINAL PARA 60 litros					
COMPONENTES		% de grava reciclada sustituida			
		0%	20%	50%	100%
Cemento (kg)		16,10	16,10	16,10	16,10
Agua (l)		9,33	9,33	9,32	9,30
Grava (kg)		39,10	31,52	20,13	0,00
Gravilla (kg)		25,22	20,32	12,99	0,00
Arena caliza (kg)		48,18	47,85	47,35	46,54
Arena sílicea (kg)		8,76	8,70	8,61	8,46
Arena (kg)		56,94	56,54	55,96	55,00
Grava reciclada (kg)		0,00	10,99	27,47	54,94
Aditivo %		0,04	0,04	0,04	0,05
Aditivo (kg)		0,10	0,10	0,11	0,14

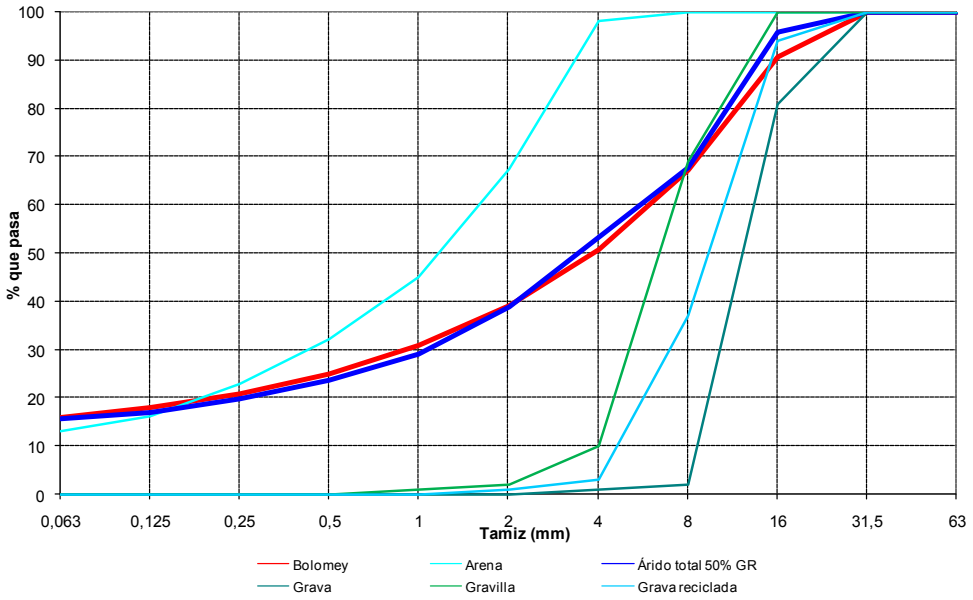
9. Se obtienen las cantidades de grava reciclada, manteniendo las proporciones en sus distintas fracciones, necesarias para la fabricación de 1 m³ de hormigón y de 60 l, según el porcentaje de sustitución.

Procedencia del árido reciclado:			TEC-REC			
Fracción (mm)	Cantidad en kg por m ³			Cantidad en kg para 60 litros		
	% de grava reciclada			% de grava reciclada		
	20%	50%	100%	20%	50%	100%
>63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
63 / 31,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
31,5 / 16	11,27	28,16	56,31	0,66	1,65	3,30
16 / 8	107,02	267,48	534,97	6,26	15,66	31,32
8 / 4	63,84	159,55	319,10	3,74	9,34	18,68
4 / 2	3,76	9,39	18,77	0,22	0,55	1,10
2 / 1	1,88	4,69	9,39	0,11	0,27	0,55
1 / 0,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5 / 0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,25 / 0,125	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,125 / 0,063	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

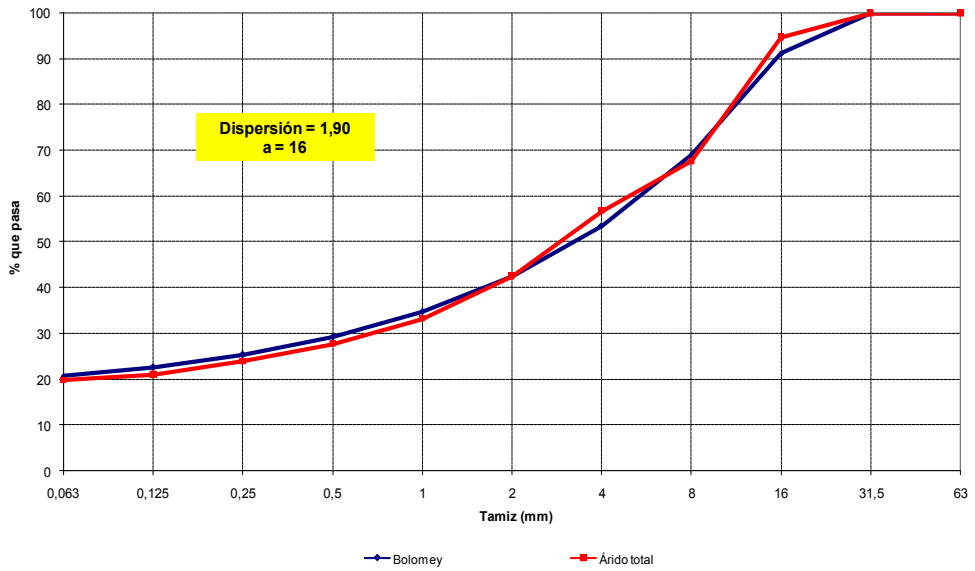
10. Si la amasada incorpora desclasificados, a través de esta salida se obtienen las cantidades necesarias de grava reciclada manteniendo las proporciones de las distintas fracciones que presenta el árido reciclado empleado según el porcentaje de sustitución realizado.

Cantidad en kg para 60 litros para 10% de desclasificados			
Fracción (mm)	% de grava reciclada		
	20%	50%	100%
31,5 / 16	0,61	1,53	3,06
16 / 8	5,81	14,53	29,06
8 / 4	3,47	8,67	17,33
4 / 2	0,73	1,83	3,66
2 / 1	0,37	0,92	1,83

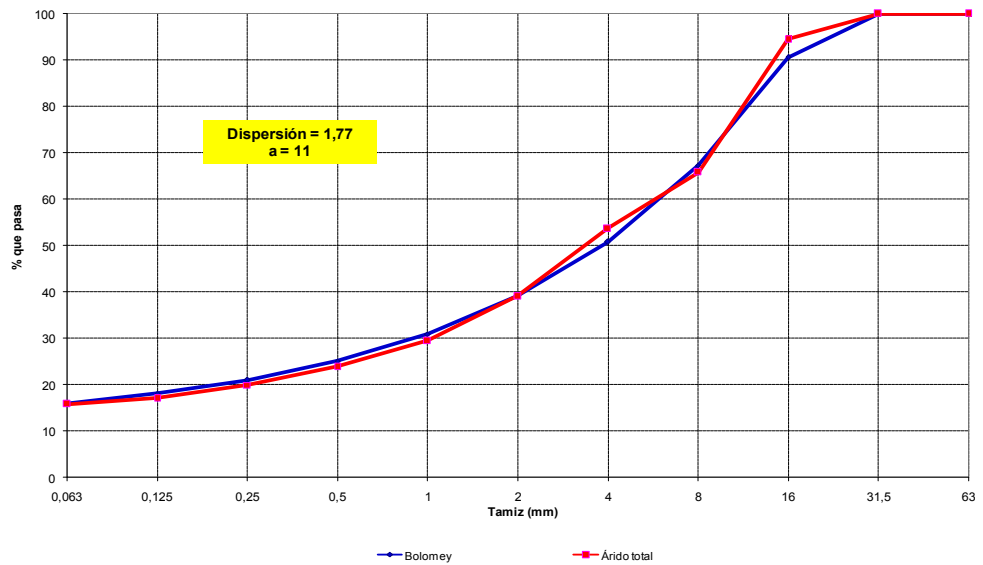
11. Los resultados numéricos se representan mediante un gráfico dinámico.



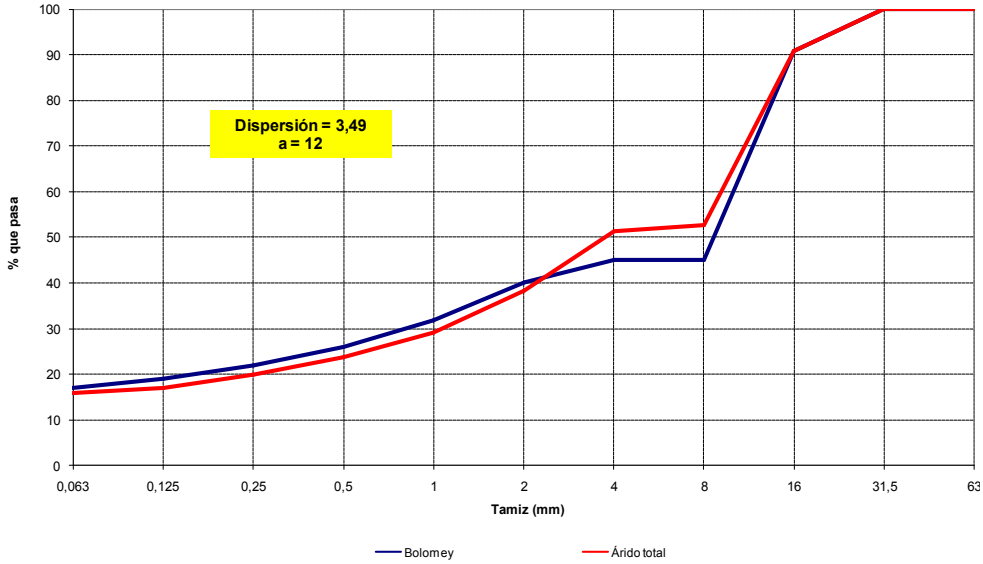
ANEJO III
AJUSTES DE ÁRIDOS. GRÁFICOS



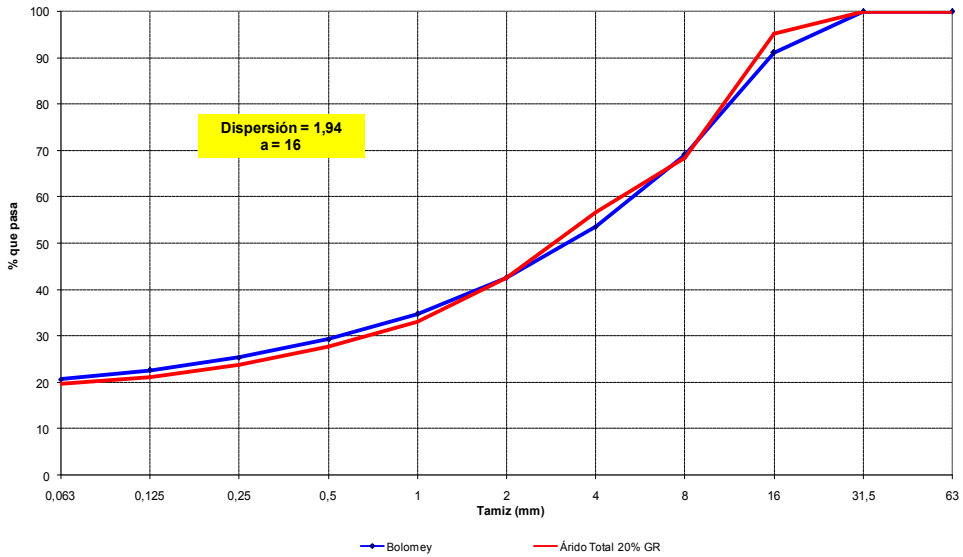
Amasada nº 1



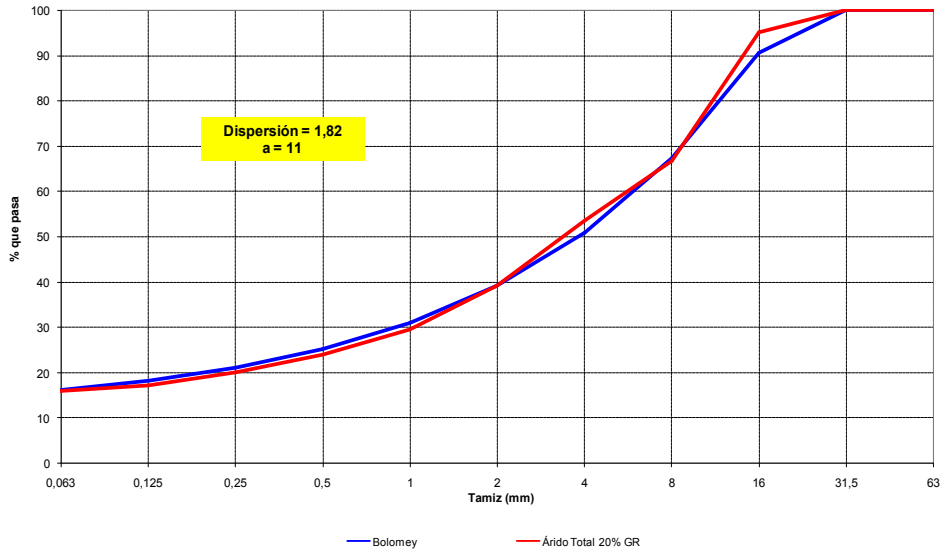
Amasada nº 2



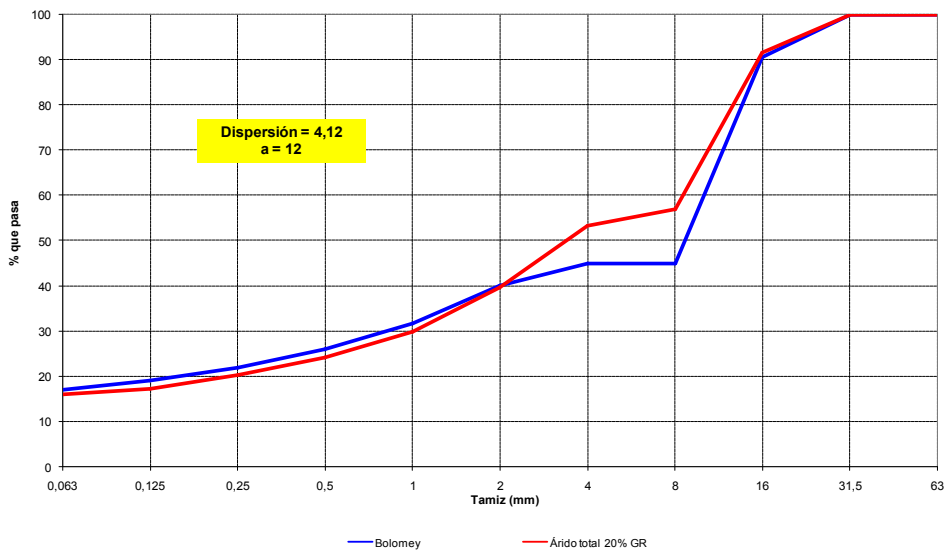
Amasada nº 3



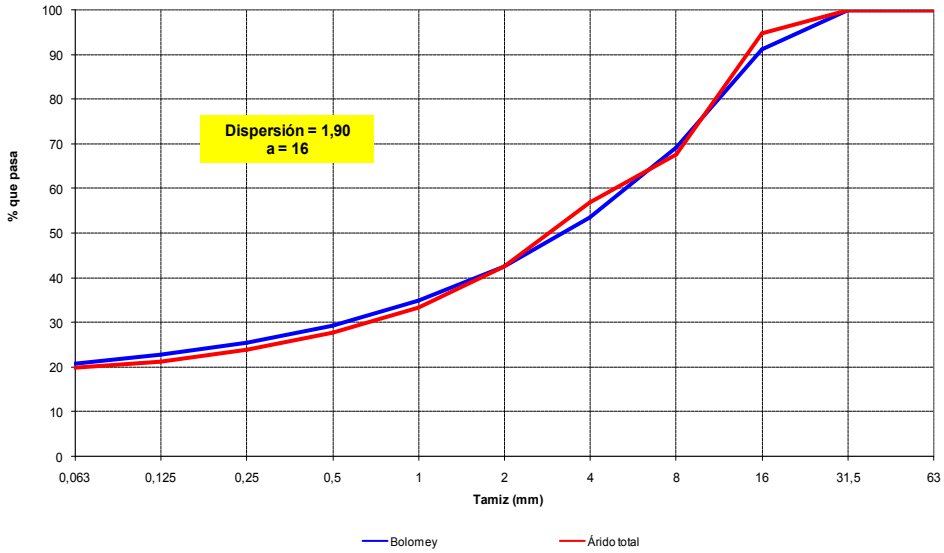
Amasada nº 4



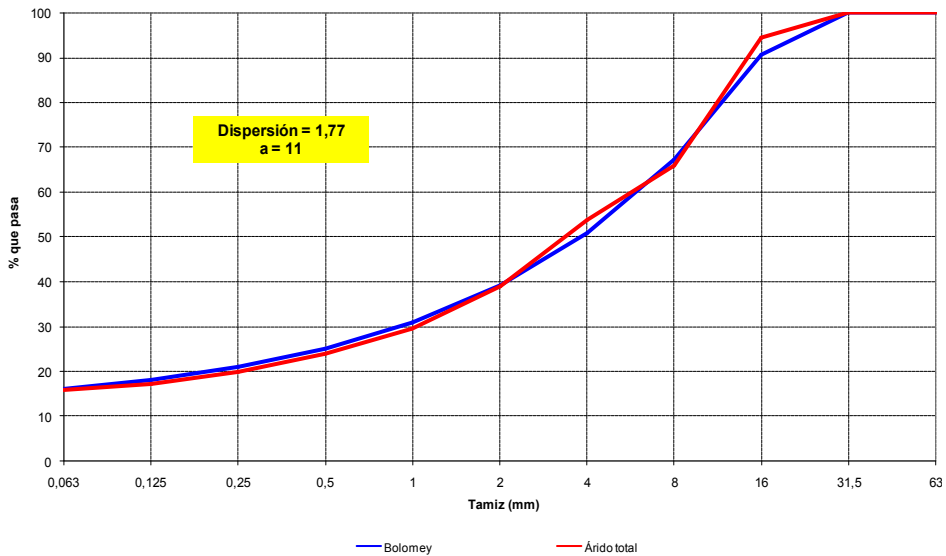
Amasada nº 5



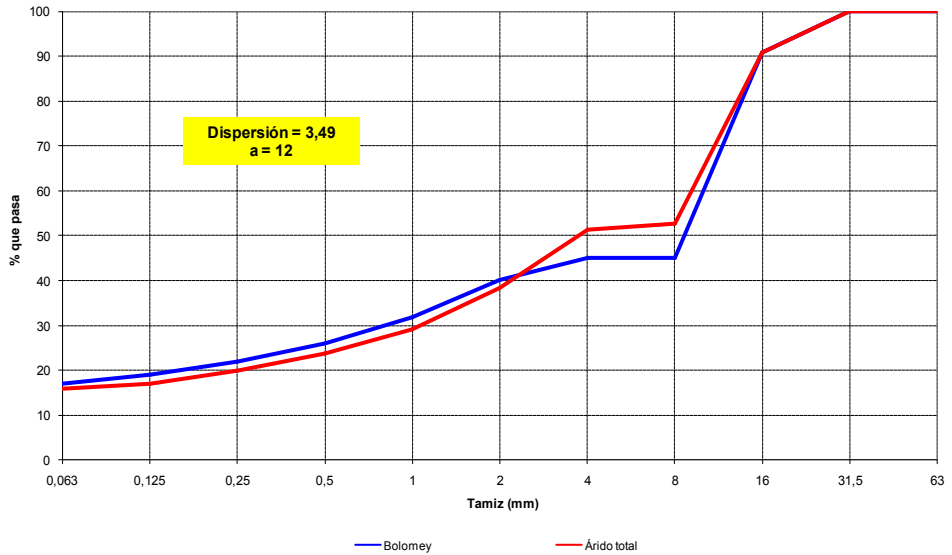
Amasada nº 6



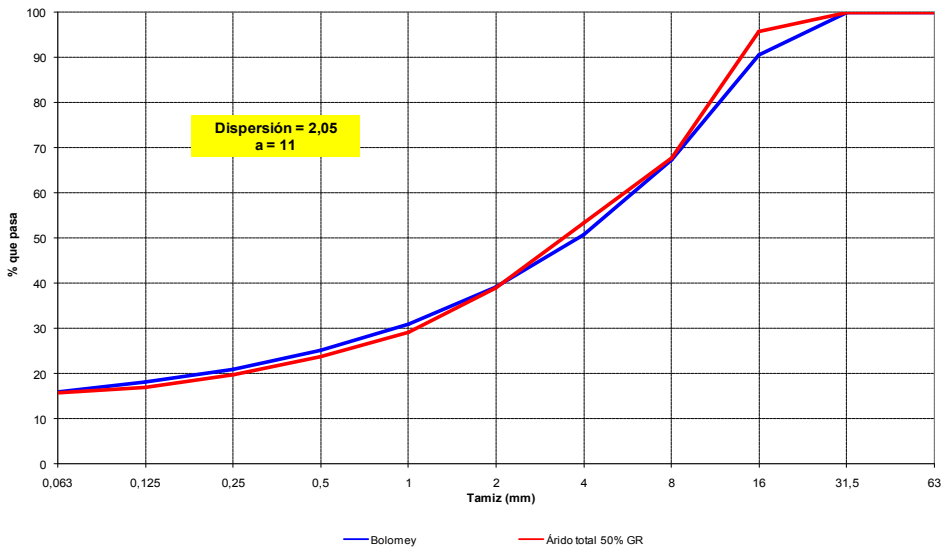
Amasada n° 7



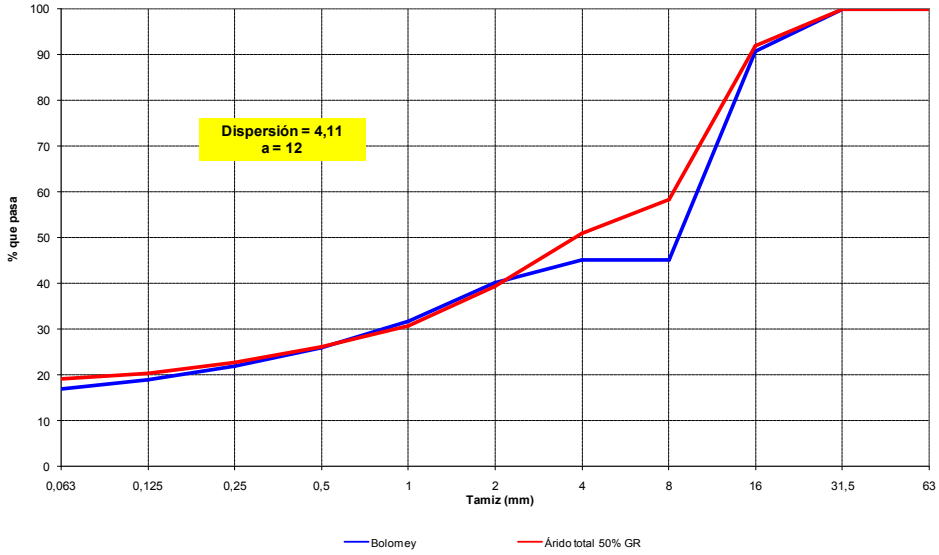
Amasada n° 8



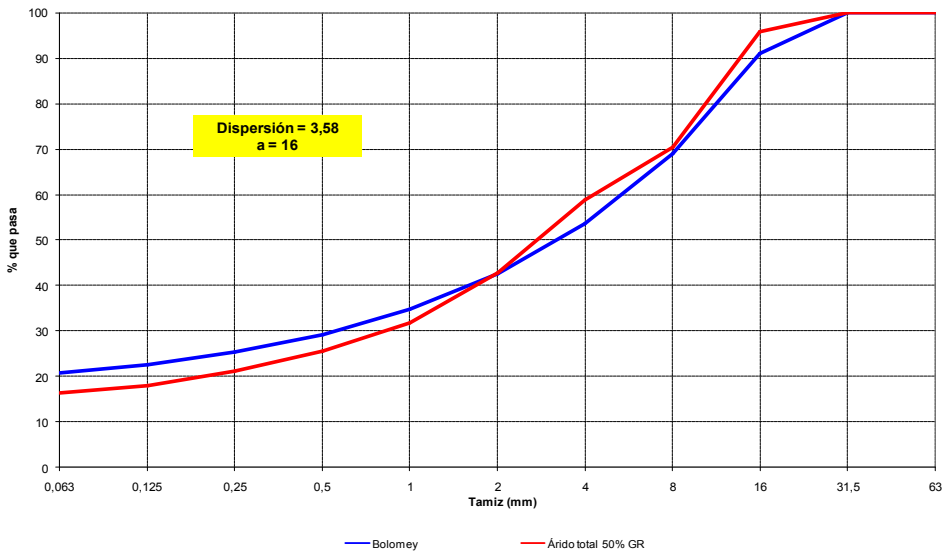
Amasada n° 9



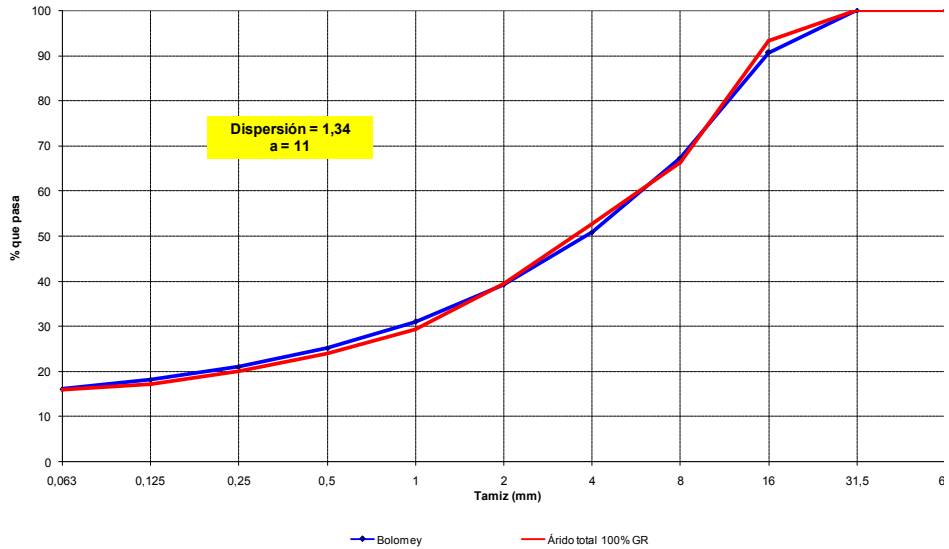
Amasada n° 10



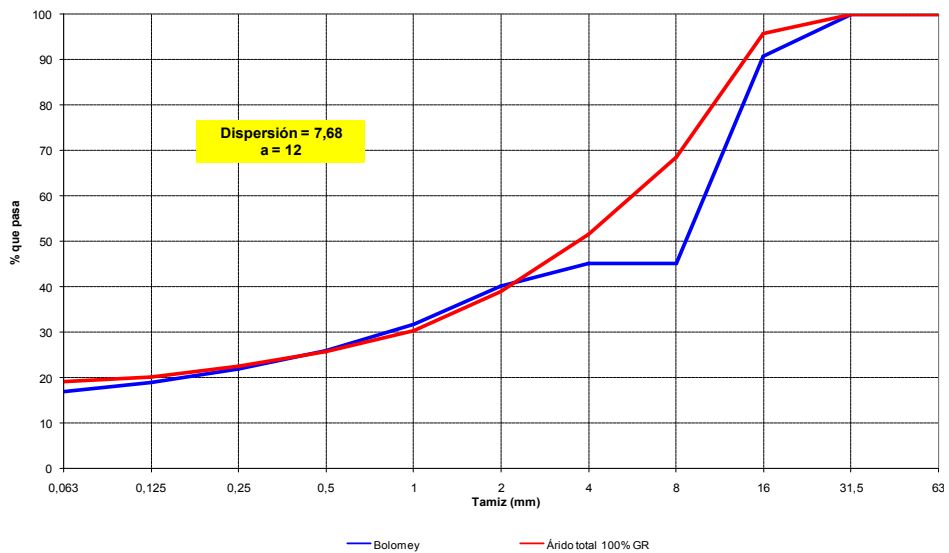
Amasada nº 11



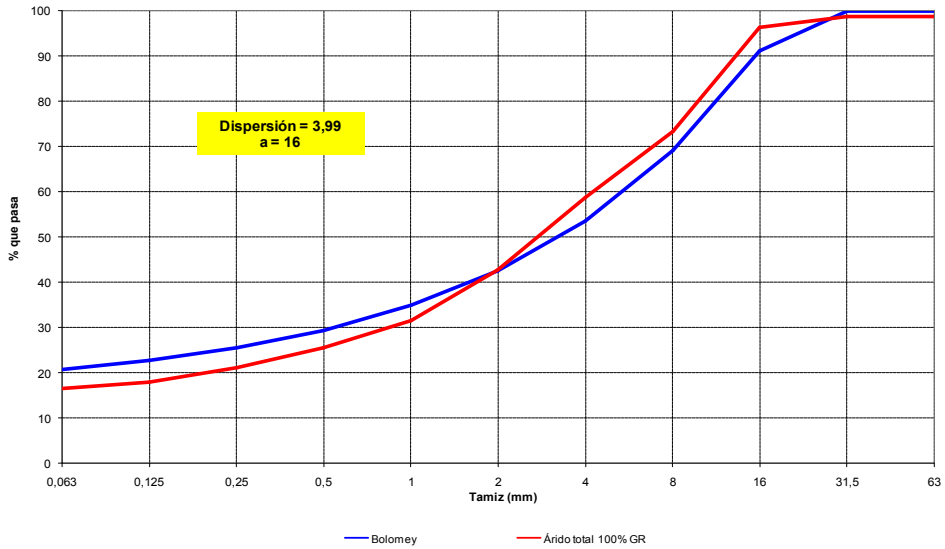
Amasada nº 12



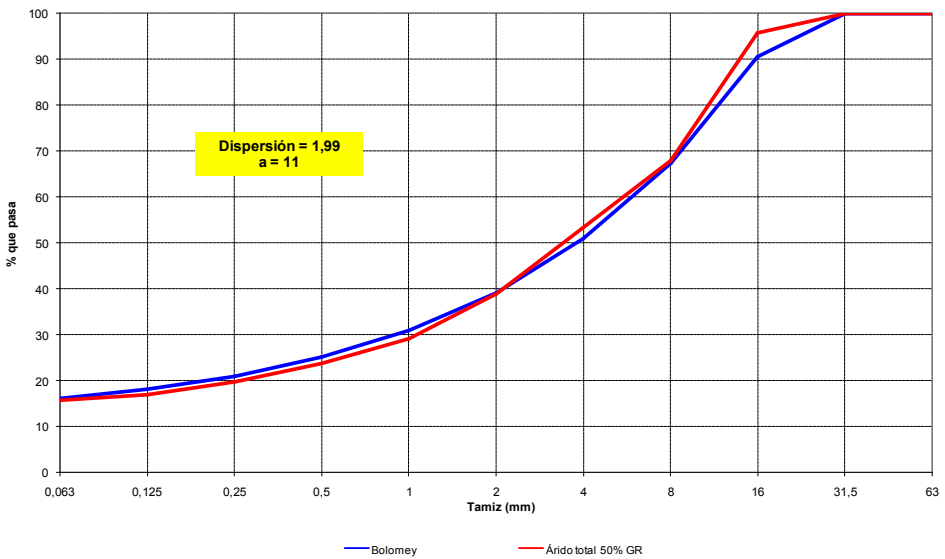
Amasada nº 13



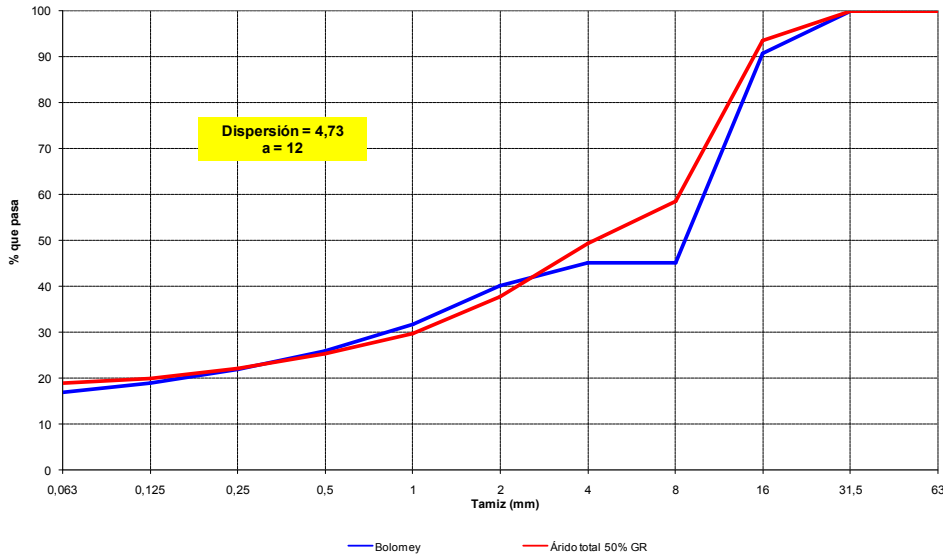
Amasada nº 14



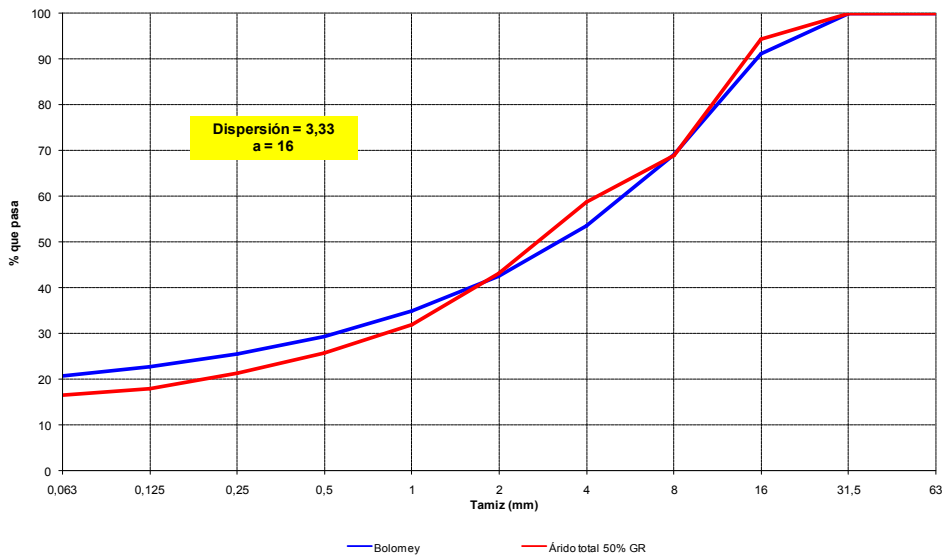
Amasada nº 15



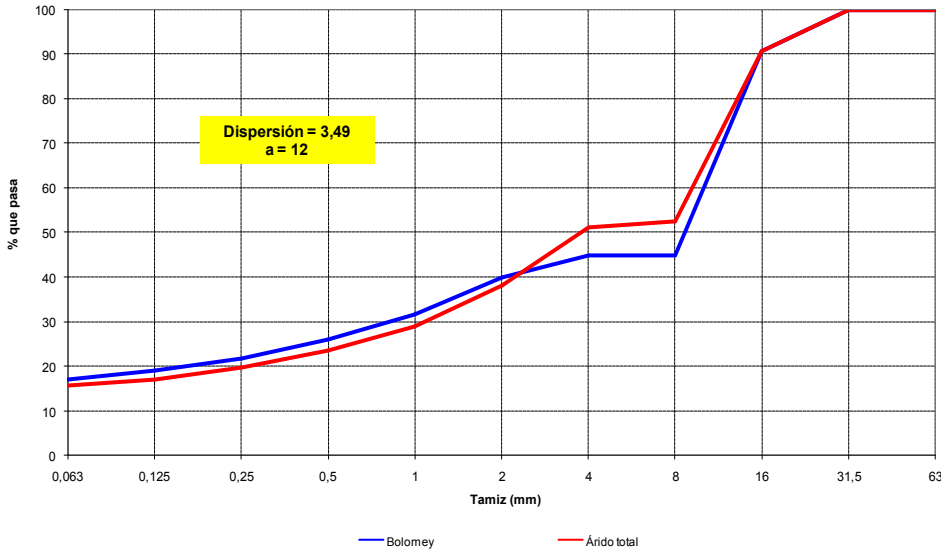
Amasada nº 16



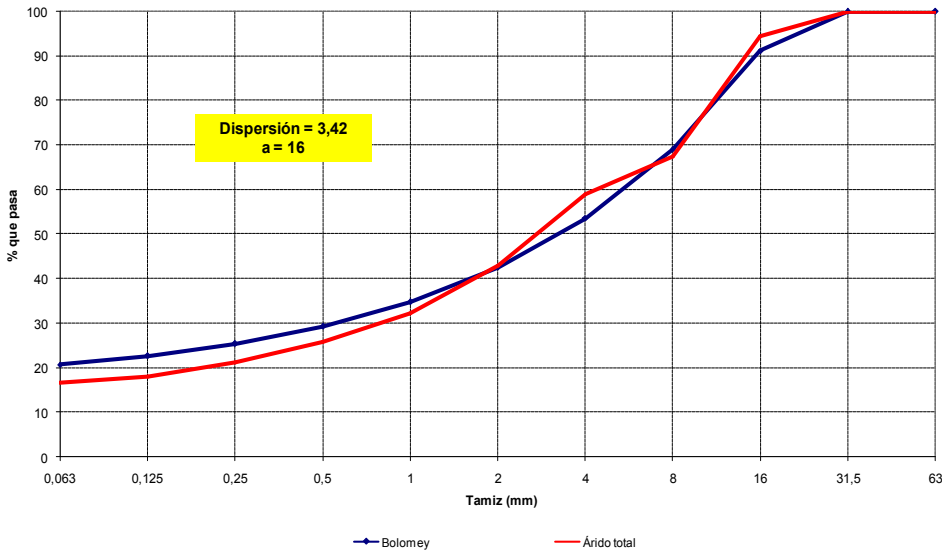
Amasada nº 17



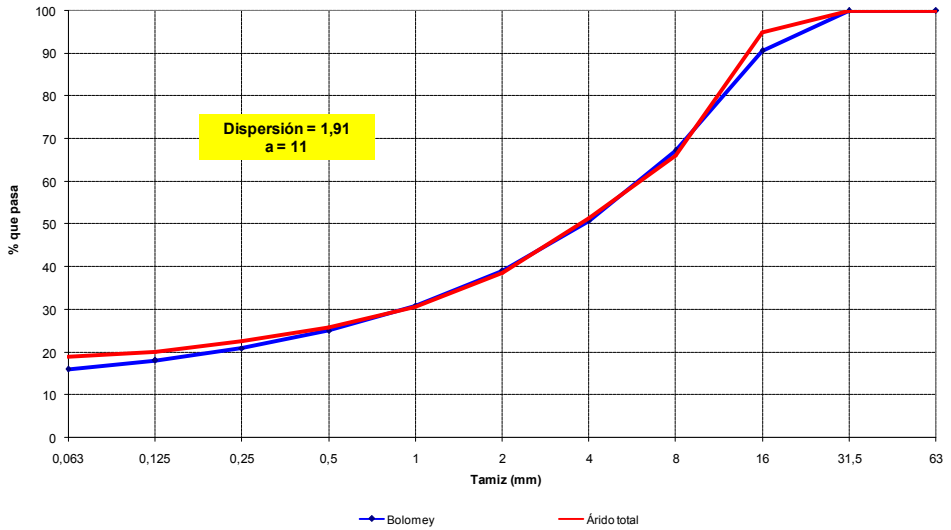
Amasada nº 18



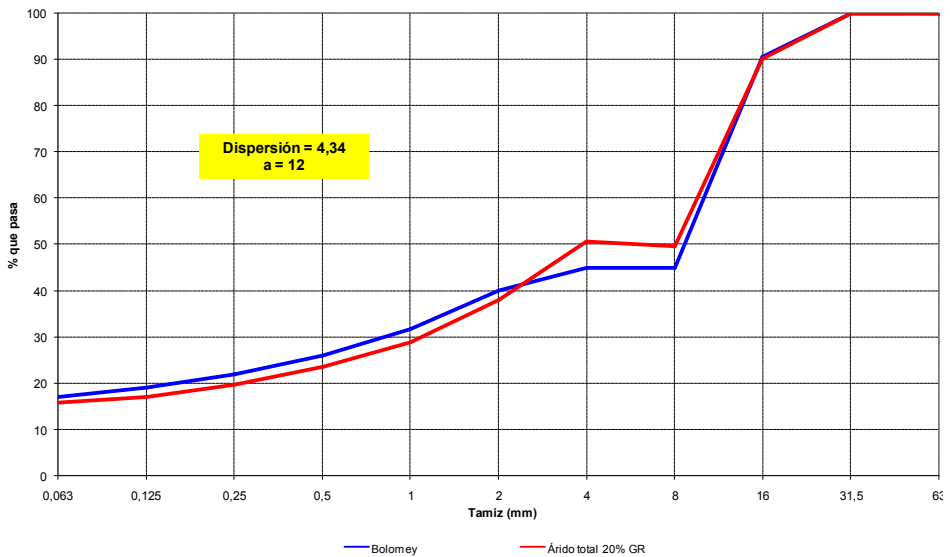
Amasada nº 19



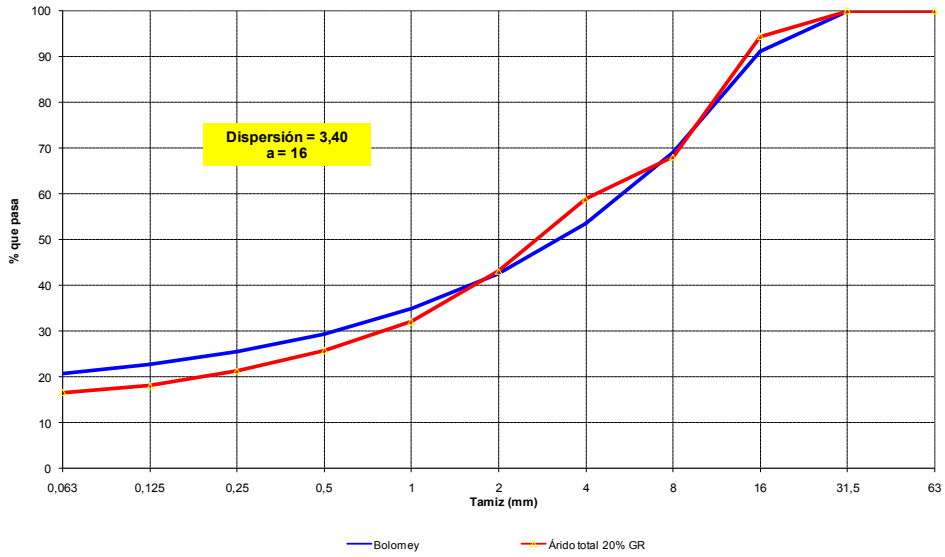
Amasada nº 20



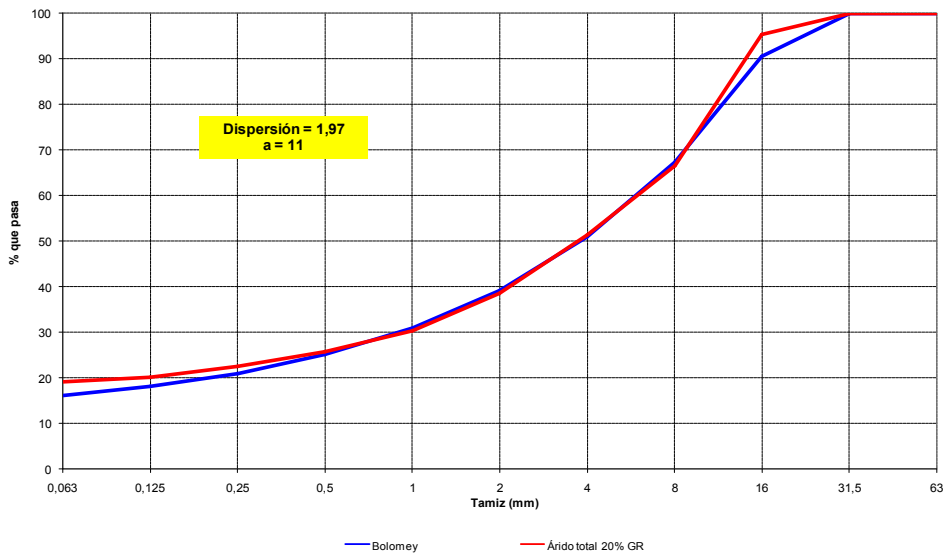
Amasada nº 21



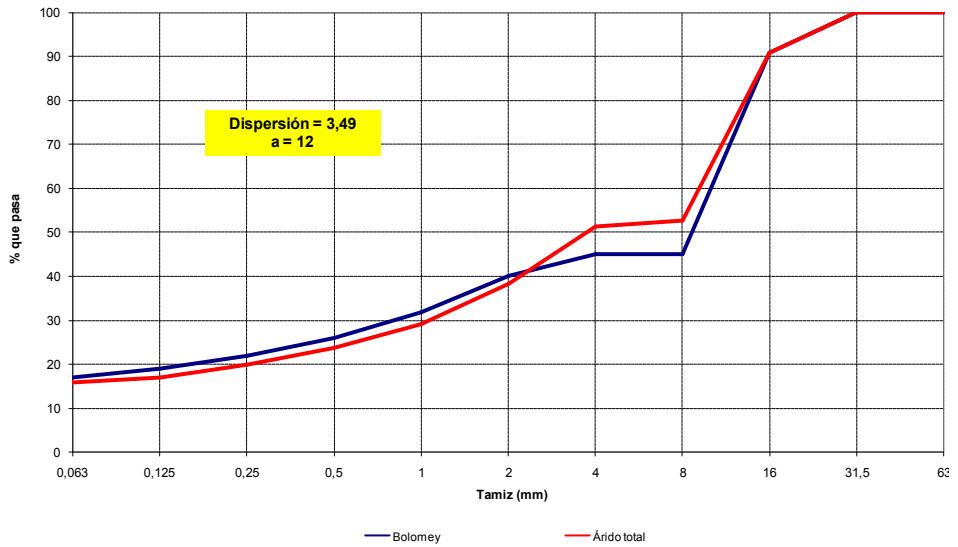
Amasada nº 22



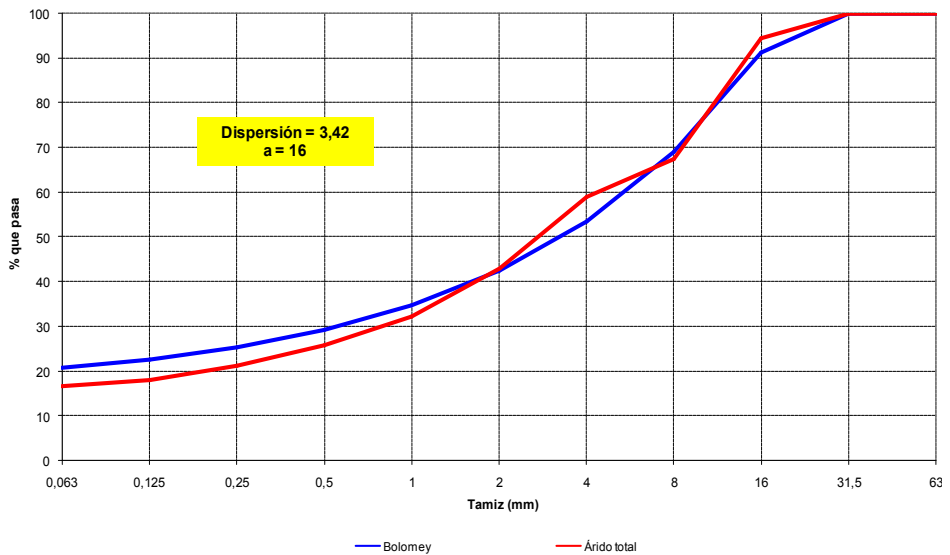
Amasada n° 23



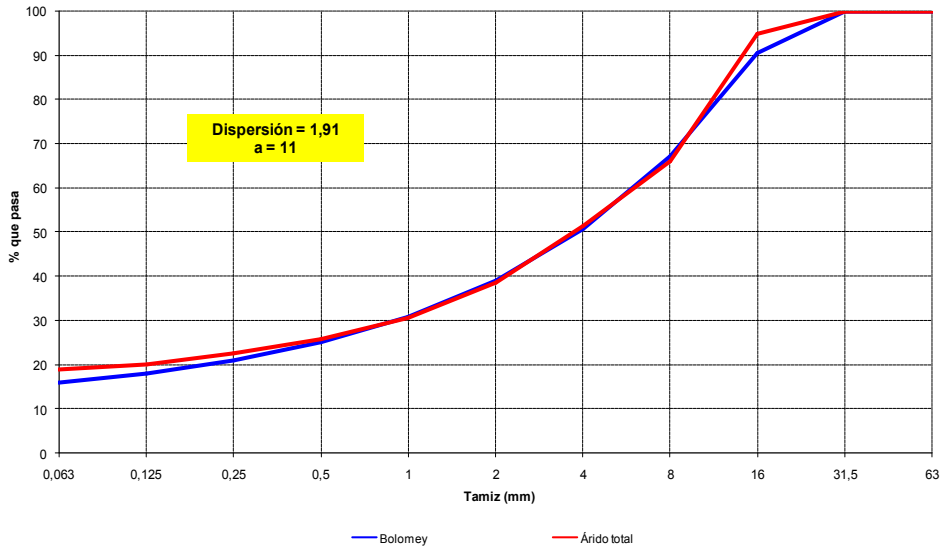
Amasada n° 24



Amasada nº 25



Amasada nº 26



Amasada nº 27

ANEJO IV **RESULTADOS DE LOS ENSAYOS**

		PRUEBA			3			AMASADA			A			B								
Ácido recibido:		MADRID			0,00			DISC.			DESCASIF.			0,00			Resist. med. objet:			25,00		
Temperatura ambiente:		16,70			Temperatura homigón:			20,50			H.R. %			68,00			Fecha amasada:			11/04/2007		
nº probeta	1º g	2º g	3º g	1º D	2º D	3º D	Peso (kg)	Vol. (m³)	Dens. (kg/m³)	Aire ocluido			Res 28 días (Mpa)			Mód. (Mpa)						
1,00	29,80	29,80	29,90	15,00	15,00	15,00	12,65	0,01	2399,48				42,50									
2,00	29,90	29,90	29,90	15,00	15,00	15,00	12,69	0,01	2404,38				40,30									
3,00	29,70	29,80	29,80	15,00	15,00	15,00	12,63	0,01	2401,05				39,90									
4,00	29,90	29,80	29,80	15,00	15,00	15,00	12,67	0,01	2403,27	3,50%			42,60			35500,00						
5,00	29,90	30,00	29,90	15,00	15,00	15,00	12,60	0,01	2382,01				39,80			35000,00						
6,00	29,80	29,90	29,90	15,00	15,00	15,00	12,55	0,01	2377,85				41,60			34500,00						
VALORES MEDIOS:													40,90			35000,00						

		PRUEBA			4			AMASADA			A			F								
Ácido recibido:		MADRID			20,00			C.F. a=16			DESCASIF.			0,00			Resist. med. objet:			35,00		
Temperatura ambiente:		13,20			Temperatura homigón:			19,80			H.R. %			70,20			Fecha amasada:			18/04/2007		
nº probeta	1º g	2º g	3º g	1º D	2º D	3º D	Peso (kg)	Vol. (m³)	Dens. (kg/m³)	Aire ocluido			Res 28 días (Mpa)			Mód. (Mpa)						
1,00	29,80	29,80	29,90	15,00	15,00	15,00	12,50	0,01	2371,02				48,20									
2,00	29,80	29,90	29,90	15,00	15,00	15,00	12,55	0,01	2377,85				47,30									
3,00	29,90	29,90	29,90	15,00	15,00	15,00	12,46	0,01	2368,17				37,90									
4,00	29,80	29,80	29,90	15,00	15,00	15,00	12,43	0,01	2357,75	3,50%			56,11			39500,00						
5,00	29,70	29,80	29,80	15,00	15,00	15,00	12,54	0,01	2363,94				56,26			39000,00						
6,00	29,80	29,80	29,90	15,00	15,00	15,00	12,54	0,01	2381,27				52,55			40000,00						
VALORES MEDIOS:													44,47			39500,00						

PRUEBA		7		AMASADA		A		Consist. objet.		B	
Árido reciclado:		0,00		C.F. a=16		Desclasif		Resist. med. objet.		Cono:	
Temperatura ambiente:		12,10		Granulom.:		H.R. %		Fecha amasada:		Fecha ensayo:	
Temperatura homigón:		17,80		Peso (kg)		Dens. (kg/m ³)		Res 28 días (Mpa)		Mod. (Mpa)	
n° probeta		1° D		2° D		3° D		Vol. (m ³)		Airé ocluido	
1,00	29,80	29,90	29,90	15,00	15,00	15,00	12,45	0,01	2388,90		46,20
2,00	29,90	29,80	29,80	15,00	15,00	12,50	0,01	2371,02		49,40	
3,00	29,70	29,80	29,80	15,00	15,00	12,52	0,01	2380,14		48,60	
4,00	29,90	29,80	29,80	15,00	15,00	12,41	0,01	2383,95	4,00%	50,12	41000,00
5,00	29,80	29,80	29,80	15,00	15,00	12,47	0,01	2387,88		51,92	40800,00
6,00	29,90	29,90	29,90	15,00	15,00	12,55	0,01	2375,20		49,97	40500,00
VALORES MEDIOS:										48,07	40666,67

PRUEBA		8		AMASADA		A		Consist. objet.		B		
Árido reciclado:		0,00		C.G. a=11		Desclasif		Resist. med. objet.		Cono:		
Temperatura ambiente:		29,20		Granulom.:		H.R. %		Fecha amasada:		Fecha ensayo:		
Temperatura homigón:		27,80		Peso (kg)		Dens. (kg/m ³)		Res 28 días (Mpa)		Mod. (Mpa)		
n° probeta		1° D		2° D		3° D		Vol. (m ³)		Airé ocluido		
1,00	30,00	30,00	29,90	15,00	15,00	15,00	12,69	0,01	2396,35		42,80	
2,00	29,90	30,00	29,90	15,00	15,00	15,00	12,79	0,01	2417,93		43,50	
3,00	30,00	30,00	29,90	15,00	15,00	15,00	12,74	0,01	2405,79		43,10	
4,00	30,00	29,90	30,00	15,00	15,00	15,00	12,67	0,01	2392,58	4,00%	43,94	38500,00
5,00	30,00	30,00	30,00	15,00	15,00	15,00	12,74	0,01	2403,12		42,43	38000,00
6,00	30,00	30,00	30,00	15,00	15,00	15,00	12,70	0,01	2395,58		43,00	38500,00
VALORES MEDIOS:										43,13	38333,33	

PRUEBA		9		AMASADA		A		F		
Árido reciclado:				DESC. a=12				Consist. objet:		
Temperatura ambiente:		23,30		Granulometría		DESC. a=12		Conco:		
Temperatura hormióón:		23,30		Temperatura hormióón:		H.R. %		Fecha ensayo:		
n° probeta	1° g	2° g	3° g	1° D	2° D	3° D	Vol. (m³)	Dens. (kg/m³)	Mod. (Mpa)	
1,00	29,90	30,00	30,00	15,00	15,00	15,00	12,80	2417,13	41,20	
2,00	30,00	29,90	29,90	15,00	15,00	15,00	12,70	2400,91	39,70	
3,00	30,00	30,00	30,00	15,00	15,00	15,00	12,75	2495,01	40,50	
4,00	29,90	29,90	30,00	15,00	15,00	15,00	12,74	2498,47	37,70	
5,00	30,00	30,00	30,00	15,00	15,00	15,00	12,95	2442,73	40,41	
6,00	30,00	29,90	30,00	15,00	15,00	15,00	12,84	2424,68	39,10	
VALORES MEDIOS:								2416,49	40,47	40000,00

PRUEBA		10		AMASADA		A		B		
Árido reciclado:				C.G. a=11				Consist. objet:		
Temperatura ambiente:		50,00		Granulom.:		DESC. a=11		Conco:		
Temperatura hormióón:		23,30		Temperatura hormióón:		H.R. %		Fecha ensayo:		
n° probeta	1° g	2° g	3° g	1° D	2° D	3° D	Vol. (m³)	Dens. (kg/m³)	Mod. (Mpa)	
1,00	30,00	29,90	30,00	15,00	15,00	15,00	12,49	2358,59	44,70	
2,00	29,90	29,80	29,90	15,00	15,00	15,00	12,41	2351,32	45,60	
3,00	29,90	30,00	30,00	15,00	15,00	15,00	12,49	2358,59	45,30	
4,00	30,00	29,90	29,80	15,00	15,00	15,00	12,42	2350,60	47,03	
5,00	29,80	29,90	29,90	15,00	15,00	15,00	12,40	2349,43	46,07	
6,00	29,90	29,80	30,00	15,00	15,00	15,00	12,51	2367,63	44,90	
VALORES MEDIOS:								2356,03	45,20	34500,00

PRUEBA		11		AMASADA		A		F	
Arido reciclado:	OVIEDO	Granulom.: 50,00		DESC.		DESCLASF		Cono:	
Temperatura ambiente:		17,40		Temperatura homigón:		19,60		Fecha ensayo:	
nº probeta	1º g	2º g	3º g	1º D	2º D	3º D	Vol. (m³)	Dens. (kg/m³)	Res 28 días (Mpa)
1,00	29,90	30,00	29,90	15,00	15,00	15,00	0,01	2312,06	Mód. (Mpa)
2,00	29,90	29,90	29,90	15,00	15,00	15,00	0,01	2308,96	43,90
3,00	29,90	29,90	29,80	15,00	15,00	15,00	0,01	2308,43	42,20
4,00	29,90	30,00	30,00	15,00	15,00	15,00	0,01	2309,49	43,60
5,00	30,00	29,90	30,00	15,00	15,00	15,00	0,01	2305,71	45,01
6,00	30,00	29,90	29,90	15,00	15,00	15,00	0,01	2296,94	42,52
								2306,93	43,20
								2306,93	43,23

VALORES MEDIOS:

PRUEBA		12		AMASADA		A		B	
Arido reciclado:	MADRID	Granulom.: 50,00		C.F. a=16		DESCLASF		Cono:	
Temperatura ambiente:		18,30		Temperatura homigón:		18,40		Fecha ensayo:	
nº probeta	1º g	2º g	3º g	1º D	2º D	3º D	Vol. (m³)	Dens. (kg/m³)	Res 28 días (Mpa)
1,00	29,90	29,90	29,90	15,00	15,00	15,00	0,01	2343,03	Mód. (Mpa)
2,00	30,00	30,00	29,90	15,00	15,00	15,00	0,01	2354,81	42,80
3,00	29,90	30,00	30,00	15,00	15,00	15,00	0,01	2334,04	43,10
4,00	29,90	29,90	29,90	15,00	15,00	15,00	0,01	2325,99	43,60
5,00	29,90	30,00	29,90	15,00	15,00	15,00	0,01	2325,29	43,55
6,00	30,00	29,90	29,90	15,00	15,00	15,00	0,01	2329,07	43,66
								2335,37	43,47
								2335,37	43,17

VALORES MEDIOS:

		PRUEBA 13		AMASADA A				
Árido reciclado: OVIEDO		% de sustit: 100,0		C.G. a=11		Resist. med. objet: 25,00		
Temperatura ambiente: 19,70		Temperatura homigón: 20,18		H.R. %		Fecha amasada: 15/05/2007		
nº probeta	1ª g	2ª g	3ª g	1º D	2º D	3º D	Res 28 días (Mpa)	
							Mod. (Mpa)	
1,00	30,00	30,00	29,90	15,00	15,00	15,00	27,00	
2,00	30,00	29,90	30,00	15,00	15,00	15,00	28,00	
3,00	30,00	29,90	29,90	15,00	15,00	15,00	27,50	
4,00	29,90	30,00	30,00	15,00	15,00	15,00	25,66	
5,00	30,00	30,00	30,00	15,00	15,00	15,00	26,20	
6,00	30,00	29,90	29,90	15,00	15,00	15,00	26,87	
							27,50	22166,67
							2241,62	

VALORES MEDIOS:

		PRUEBA 14		AMASADA A				
Árido reciclado: MADRID		% de sustit: 100,0		DISC.		Resist. med. objet: 35,00		
Temperatura ambiente: 18,50		Temperatura homigón: 21,40		H.R. %		Fecha amasada: 16/05/2007		
nº probeta	1ª g	2ª g	3ª g	1º D	2º D	3º D	Res 28 días (Mpa)	
							Mod. (Mpa)	
1,00	29,90	29,80	29,80	15,00	15,00	15,00	49,60	
2,00	29,80	29,80	29,80	15,00	15,00	15,00	51,40	
3,00	29,90	29,90	29,90	15,00	15,00	15,00	50,00	
4,00	29,80	29,80	29,80	15,00	15,00	15,00	49,45	
5,00	29,80	29,90	29,90	15,00	15,00	15,00	50,76	
6,00	30,00	29,90	29,90	15,00	15,00	15,00	52,60	
							50,33	30666,67
							2310,51	

VALORES MEDIOS:

PRUEBA		15		AMASADA		A		B	
Ardo recidado:	MADRID	% de sustit:	100.0	Granulom.:	C.F. a=16	Descasif:	10.00	Resist. med. objet:	25.00
Temperatura ambiente:	18.90	Temperatura homigón:		22.50	H.R.%	56.10	Fecha amasada:	16/05/2007	Constit. objet:
r ^o probeta	1 ^o g	2 ^o g	3 ^o g	1 ^o D	2 ^o D	3 ^o D	Vol. (m ³)	Res 28 dias (Mpa)	Mod. (Mpa)
							Aire oculto		
1.00	30.00	30.00	30.00	15.00	15.00	15.00	0.01	2303.15	48.20
2.00	30.00	29.90	30.00	15.00	15.00	15.00	0.01	2307.60	50.20
3.00	30.00	30.00	29.90	15.00	15.00	15.00	0.01	2286.83	49.00
4.00	29.90	29.90	30.00	15.00	15.00	15.00	0.01	2312.06	49.95
5.00	30.00	30.00	30.00	15.00	15.00	15.00	0.01	2299.38	48.99
6.00	30.00	30.00	30.00	15.00	15.00	15.00	0.01	2303.15	49.74
VALORES MEDIOS:									
							2302.03	49.13	31333.33

PRUEBA		16		AMASADA		A		B	
Ardo recidado:	MADRID	% de sustit:	50.00	Granulom.:	C.G. a=11	Descasif:	0.00	Resist. med. objet:	25.00
Temperatura ambiente:	21.20	Temperatura homigón:		22.40	H.R.%	54.70	Fecha amasada:	16/05/2007	Constit. objet:
r ^o probeta	1 ^o g	2 ^o g	3 ^o g	1 ^o D	2 ^o D	3 ^o D	Vol. (m ³)	Res 28 dias (Mpa)	Mod. (Mpa)
							Aire oculto		
1.00	30.00	29.90	30.00	15.00	15.00	15.00	0.01	2349.14	47.50
2.00	30.00	29.90	29.90	15.00	15.00	15.00	0.01	2376.34	44.00
3.00	30.00	30.00	30.00	15.00	15.00	15.00	0.01	2357.85	46.40
4.00	30.00	30.00	29.90	15.00	15.00	15.00	0.01	2352.92	45.80
5.00	30.00	30.00	30.00	15.00	15.00	15.00	0.01	2395.96	47.61
6.00	30.00	30.00	29.90	15.00	15.00	15.00	0.01	2380.47	47.75
VALORES MEDIOS:									
							2388.78	45.97	34500.00

MADRID		PRUEBA 17			AMASADA A		B	
Arido resiclado:		Granulom.:			DESC.		Constit. objet:	
Temperatura ambiente:		Temperatura hormigón:			Resist. med. objet:		Conco:	
1ª g	2ª g	3ª g	1º D	2º D	3º D	Vol. (m³)	Resist. med. objet:	Fecha ensayo:
29,90	29,90	29,90	15,00	15,00	15,00	12,43	35,00	18/05/2007
29,90	29,90	29,90	15,00	15,00	15,00	12,43	35,00	18/05/2007
29,90	29,90	29,90	15,00	15,00	15,00	12,38	35,00	18/05/2007
30,00	29,90	29,80	15,00	15,00	15,00	12,48	35,00	18/05/2007
30,00	29,90	29,80	15,00	15,00	15,00	12,43	35,00	18/05/2007
30,00	30,00	30,00	15,00	15,00	15,00	12,48	35,00	18/05/2007
29,80	29,80	29,90	15,00	15,00	15,00	12,43	35,00	18/05/2007
VALORES MEDIOS:							53,50	36333,33

OVIEDO		PRUEBA 18			AMASADA A		F	
Arido resiclado:		Granulom.:			C.F. a=16		Constit. objet:	
Temperatura ambiente:		Temperatura hormigón:			Resist. med. objet:		Conco:	
1ª g	2ª g	3ª g	1º D	2º D	3º D	Vol. (m³)	Resist. med. objet:	Fecha ensayo:
29,90	29,90	29,90	15,00	15,00	15,00	12,45	25,00	23/05/2007
29,90	29,90	29,90	15,00	15,00	15,00	12,40	25,00	23/05/2007
29,90	29,80	29,80	15,00	15,00	15,00	12,32	25,00	23/05/2007
29,90	29,90	29,90	15,00	15,00	15,00	12,49	25,00	23/05/2007
30,00	30,00	29,90	15,00	15,00	15,00	12,34	25,00	23/05/2007
29,80	29,80	29,90	15,00	15,00	15,00	12,36	25,00	23/05/2007
VALORES MEDIOS:							43,07	34166,67

		PRUEBA			23			AMASADA			A			Consist. objet.			B			
Árido reciclado:		OVIEDO			% de sustit:			Granulom.:			C.F. a=16			Resist. med. objet:			Cono:			
Temperatura ambiente:		16.30			Temperatura hominión:			19.20			H.R. %			Fecha amasada:			Fecha ensayo:			
nº probeta	1º g	2º g	3º g	1º D	2º D	3º D	Vol. (m³)	Peso (kg)	Dens. (kg/m³)	Aire ocluido	Res 28 días (Mpa)	Mód. (Mpa)								
1,00	30,00	29,90	29,90	15,00	15,00	15,00	0,01	12,58	2378,23		45,40									
2,00	29,90	29,90	29,90	15,00	15,00	15,00	0,01	12,61	2386,56		46,30									
3,00	30,00	29,90	30,00	15,00	15,00	15,00	0,01	12,52	2364,25	2,75%	44,30									
4,00	29,90	29,90	30,00	15,00	15,00	15,00	0,01	12,60	2382,01		45,44									
5,00	30,00	30,00	29,90	15,00	15,00	15,00	0,01	12,60	2379,36		43,80									
6,00	29,90	29,90	30,00	15,00	15,00	15,00	0,01	12,55	2372,55		45,38									
VALORES MEDIOS:											45.33		36000.00							
VALORES MEDIOS:											2377.16		36000.00							

		PRUEBA			24			AMASADA			A			Consist. objet.			B			
Árido reciclado:		MADRID			% de sustit:			Granulom.:			C.G. a=11			Resist. med. objet:			Cono:			
Temperatura ambiente:		15.40			Temperatura hominión:			19.10			H.R. %			Fecha amasada:			Fecha ensayo:			
nº probeta	1º g	2º g	3º g	1º D	2º D	3º D	Vol. (m³)	Peso (kg)	Dens. (kg/m³)	Aire ocluido	Res 28 días (Mpa)	Mód. (Mpa)								
1,00	29,90	29,80	29,90	15,00	15,00	15,00	0,01	12,48	2364,59		51,50									
2,00	30,00	29,90	29,90	15,00	15,00	15,00	0,01	12,50	2363,10		50,80									
3,00	30,00	30,00	29,90	15,00	15,00	15,00	0,01	12,52	2364,25	2,75%	51,70									
4,00	29,90	29,90	29,90	15,00	15,00	15,00	0,01	12,47	2360,06		50,97									
5,00	30,00	29,90	30,00	15,00	15,00	15,00	0,01	12,54	2368,03		52,48									
6,00	29,90	30,00	30,00	15,00	15,00	15,00	0,01	12,51	2362,36		51,08									
VALORES MEDIOS:											51.33		36666.67							
VALORES MEDIOS:											2363.73		36666.67							

		PRUEBA		25		AMASADA		A			
Árido reciclado:		%		de suscit:		0,00		DESC.		Resist. med. objet:	
Temperatura ambiente:		16,70		Temperatura homigón:		20,50		H.R. %		Fecha amasada:	
nº probeta		1ª g		2ª g		3ª g		1º D		2º D	
		3º D		3º D		3º D		Vol. (m³)		Res 28 días (Mpa)	
		Peso (kg)		Dens. (kg/m³)		Alre ocluido		Mod. (Mpa)			
1,00	29,80	29,80	29,80	15,00	15,00	15,00	15,00	0,01	2389,48		42,50
2,00	29,90	29,90	29,80	15,00	15,00	15,00	15,00	0,01	2404,38		40,30
3,00	29,70	29,80	29,80	15,00	15,00	15,00	15,00	0,01	2401,05	3,50%	39,90
4,00	29,90	29,80	29,80	15,00	15,00	15,00	15,00	0,01	2403,27		42,60
5,00	29,90	30,00	29,90	15,00	15,00	15,00	15,00	0,01	2382,01		39,80
6,00	29,80	29,90	29,90	15,00	15,00	15,00	15,00	0,01	2377,85		41,60
VALORES MEDIOS:											40,90
											35000,00
											35000,00

		PRUEBA		26		AMASADA		A			
Árido reciclado:		%		de suscit:		0,00		DESC.		Resist. med. objet:	
Temperatura ambiente:		17,90		Temperatura homigón:		20,00		H.R. %		Fecha amasada:	
nº probeta		1ª g		2ª g		3ª g		1º D		2º D	
		3º D		3º D		3º D		Vol. (m³)		Res 28 días (Mpa)	
		Peso (kg)		Dens. (kg/m³)		Alre ocluido		Mod. (Mpa)			
1,00	29,90	29,80	29,90	15,00	15,00	15,00	15,00	0,01	2368,38		39,20
2,00	29,90	29,90	29,90	15,00	15,00	15,00	15,00	0,01	2382,77		39,50
3,00	30,00	29,90	29,90	15,00	15,00	15,00	15,00	0,01	2361,21	3,00%	39,60
4,00	30,00	29,90	29,90	15,00	15,00	15,00	15,00	0,01	2368,77		40,62
5,00	29,90	30,00	29,90	15,00	15,00	15,00	15,00	0,01	2378,23		43,52
6,00	29,80	30,00	29,90	15,00	15,00	15,00	15,00	0,01	2382,77		39,95
VALORES MEDIOS:											39,43
											38500,00
											38500,00

		PRUEBA			27			AMASADA			A			F																				
Árido reciclado:		MADRID			% de sustit:			0,00			Granulom.:			C.G. a=11			Resist. med. objet.			35,00														
Temperatura ambiente:		28,00			Temperatura hormigón:			24,30			H.R. %			54,60			Fecha amasada:			07/06/2007														
nº probeta		1ª g			2ª g			3ª g			1º D			2º D			3º D			Peso (kg)			Vol. (m³)			Dens. (kg/m³)			Res 28 días (Mpa)			Mód. (Mpa)		
1,00	29,80	29,80	29,90	29,90	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	12,65	0,01	2399,48	45,50																				
2,00	29,90	29,90	29,90	29,90	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	12,53	0,01	2371,41	45,50																				
3,00	29,90	29,90	29,80	29,80	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	12,59	0,01	2385,43	45,40																				
4,00	29,80	29,80	29,90	29,90	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	12,61	0,01	2391,89	42,24	3,00%																			
5,00	29,90	29,80	29,80	29,80	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	12,67	0,01	2403,27	45,55																				
6,00	29,90	29,80	29,90	29,90	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	12,64	0,01	2394,90	45,40																				
VALORES MEDIOS:														45,47			40666,67																	

		PRUEBA			1	AMASADA	B	B		SS		
Arido recibido:		% de sustit:			C.F. a=16	Desclasificado:	0,00	Resist. med. objet:		Criterio de sustit:		
Temperatura ambiente:		8,00	Temperatura hormigón:			16,00	Humedad relativa:	70,00	Fecha amasada:		Plastificante (kg):	
n° probeta		1°g	2°g	3°g	1°D	2°D	3°D	Pt. Agua (mm)		Superplastif (kg):		
1.00					12,40			Res 28 días (Mpa)		Tracción (Mpa)		
2.00					12,64		26,10	Pt. Agua (mm)		P cámara (kg)		
3.00		30,00	29,90	30,00	12,70	0,00		53,70			12,60	
4.00		30,00	30,00	30,00	12,68	0,01		52,70			P sat s.s.(kg)	
5.00		30,00	30,00	30,00	12,66	0,01		54,30			12,69	
6.00		29,90	29,80	29,80	12,61	0,01			13,00	12,00	4,90	P seca (kg)
					12,61	0,01			17,00	16,00	5,04	12,61
					12,59	0,01			18,00	15,00	5,18	Absorción (%)
								53,57	15,17		5,04	0,63
VALORES MEDIOS:												

		PRUEBA			2	AMASADA	B	B		SS		
Arido recibido:		% de sustit:			C.G. a=11	Desclasificado:	0,00	Resist. med. objet:		Criterio de sustit:		
Temperatura ambiente:		Temperatura hormigón:				Humedad relativa:		Fecha amasada:		Plastificante (kg):		
n° probeta		1°g	2°g	3°g	1°D	2°D	3°D	Pt. Agua (mm)		Superplastif (kg):		
1.00		30,00	29,90	29,90	15,00	15,00	15,00	Res 28 días (Mpa)		Tracción (Mpa)		
2.00		29,90	30,00	30,00	12,60	0,01		Pt. Agua (mm)		P cámara (kg)		
3.00		29,90	30,00	30,00	12,54	0,01		36,40			12,60	
4.00		29,90	29,90	29,80	12,51	0,01		43,40			P sat s.s.(kg)	
5.00		29,90	29,90	29,80	12,51	0,01		43,80			12,69	
6.00		29,90	29,80	29,80	12,54	0,01			25,00	27,00	4,06	P seca (kg)
					12,54	0,01			23,00	24,00	2,99	12,61
					12,53	0,01			29,00	30,00	4,02	Absorción (%)
								43,60	26,33		3,69	0,63
VALORES MEDIOS:												

Árdo recibido:		MADRID		% de sustit:		0,00		GRUPO		3		AMASADA		B		Consist. objet.		B		Criterio de sustit:		
Temperatura ambiente:		14,50		Temperatura hormigon:		3° D		DISC. a=12		DESC. a=12		DESC. a=12		0,00		Resist. med. objet.		7-7		Plastificante (kg):		
nº probeta		2° g		3° g		1° D		18,00		Humedad relativa:		Humedad relativa:		55,00		Fecha amasada:		07/03/2007		Superplastif (kg):		
1° g		2° g		3° g		1° D		Volumen (m³)		Densidad (kg/m³)		Res 7 dias (Mpa)		Res 28 dias (Mpa)		Pt. Agua (mm)		Brazleño (Mpa)		Tracción (Mpa)		
1,00	29,90	30,00	29,90	15,00	15,00	15,00	15,00	0,01	24,46,28	45,50	33,10	45,50										P cámara (kg)
2,00	30,00	29,90	29,90	15,00	15,00	15,00	15,00	0,01	24,17,93	45,50		45,50										12,77
3,00	30,00	29,90	30,00	15,00	15,00	15,00	15,00	0,01	24,11,46	44,30		44,30										P sat sup s (kg)
4,00	30,00	30,00	30,00	15,00	15,00	15,00	15,00	0,01	24,08,78			52,00	57,00	4,59	3,90							12,84
5,00	29,80	29,90	29,80	15,00	15,00	15,00	15,00	0,01	24,01,37			50,00	51,00	3,93	3,34							P seca (kg)
6,00	29,90	30,00	29,80	15,00	15,00	15,00	15,00	0,01	23,92,23			40,00	41,00	4,16	3,54							12,77
VALORES MEDIOS:																						0,55
																						0,55

Árdo recibido:		MADRID		% de sustit:		20,00		GRUPO		4		AMASADA		B		Consist. objet.		F		Criterio de sustit:			
Temperatura ambiente:		7,00		Temperatura hormigon:		3° D		C.F. a=16		DESC. a=16		DESC. a=16		0,00		Resist. med. objet.		12-11		Plastificante (kg):			
nº probeta		2° g		3° g		1° D		17,70		Humedad relativa:		Humedad relativa:		47,00		Fecha amasada:		13/03/2007		Superplastif (kg):			
1° g		2° g		3° g		1° D		Volumen (m³)		Densidad (kg/m³)		Res 7 dias (Mpa)		Res 28 dias (Mpa)		Pt. Agua (mm)		Brazleño (Mpa)		Tracción (Mpa)			
1,00	29,90	29,90	29,90	15,00	15,00	15,00	15,00	0,01	23,77,09	57,70	45,90	57,70											P cámara (kg)
2,00	29,90	30,00	29,90	15,00	15,00	15,00	15,00	0,01	23,68,77	62,10		62,10											12,50
3,00	30,00	30,00	29,90	15,00	15,00	15,00	15,00	0,01	23,66,14	60,60		60,60											P sat sup s (kg)
4,00	29,90	29,90	29,90	15,00	15,00	15,00	15,00	0,01	23,65,74			7,00	9,00	5,15	4,38								12,68
5,00	30,00	29,90	30,00	15,00	15,00	15,00	15,00	0,01	23,73,69			6,00	5,00	5,60	4,76								P seca (kg)
6,00	30,00	30,00	30,00	15,00	15,00	15,00	15,00	0,01	23,69,17			15,00	19,00	4,66	3,96								12,49
VALORES MEDIOS:																							0,72
																							0,72

PRUEBA		5		AMASADA		B		Consist. objet.		B		SS													
Ardo recitado:		MADRID		% de sustit:		20,00		Granulometría:		C.G. #11		5,00		Resist. med. objet.:		25,00		Conc:		13/03/2007		Criterio de sustit:		0,050	
Temperatura ambiente:		6,80		Temperatura hormigón:		17,30		Humedad relativa:		50,20		Fecha ensayo:		13/02/2007		Superplastif (kg):		0,050							
n° probeta		1° g		2° g		3° g		1° D		2° D		3° D		Pl. Agua (mm)		Tracción (Mpa)									
		1,00		29,90		29,80		29,80		15,00		15,00		15,00		49,10								P cámara (kg)	
		2,00		29,90		29,90		29,90		15,00		15,00		15,00		46,40								12,57	
		3,00		29,90		30,00		30,00		15,00		15,00		15,00		45,80								12,66	
		4,00		30,00		30,00		30,00		15,00		15,00		15,00		4,83								4,11	
		5,00		30,00		29,90		30,00		15,00		15,00		15,00		5,65								12,60	
		6,00		30,00		29,90		29,90		15,00		15,00		15,00		4,29								3,65	
																								4,92	
																								4,18	
																								0,48	

VALORES MEDIOS:

PRUEBA		6		AMASADA		B		Consist. objet.		B		SS													
Ardo recitado:		OVIEDO		% de sustit:		20,00		Granulometría:		DISC. a=12		10,00		Resist. med. objet.:		25,00		Conc:		9-7		Criterio de sustit:		0,050	
Temperatura ambiente:		7,80		Temperatura hormigón:		14,90		Humedad relativa:		68,10		Fecha ensayo:		21/03/2007		Superplastif (kg):		0,050							
n° probeta		1° g		2° g		3° g		1° D		2° D		3° D		Pl. Agua (mm)		Tracción (Mpa)									
		1,00		29,90		29,80		29,80		15,00		15,00		15,00		42,90								P cámara (kg)	
		2,00		29,80		29,80		29,80		15,00		15,00		15,00		43,00								12,47	
		3,00		29,90		29,90		29,90		15,00		15,00		15,00		41,50								12,51	
		4,00		29,80		29,90		29,90		15,00		15,00		15,00		4,13								3,51	
		5,00		29,90		30,00		29,80		15,00		15,00		15,00		4,35								3,70	
		6,00		29,80		29,90		29,90		15,00		15,00		15,00		4,43								4,10	
																								0,32	
																								3,77	

VALORES MEDIOS:

		PRUEBA			7		AMASADA		B		Consist. objet.		B		Criterio de suscit.		
Árido recibido:		Granulometría:			C.F. a=16		Desclasificado:		0,00		Resist. med. objet.:		35,00		Plastificante (kg):		0,064
Temperatura ambiente:		Temperatura hormigón:			8,00		Humedad relativa:		70,00		Fecha ensayo:		27/02/2007		Superplastif (kg):		0,086
n° probeta	1°g	2°g	3°g	1°D	2°D	3°D	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)	Res 7 días (Mpa)	Res 28 días (Mpa)	Pt. Agua (mm)	Tracción (Mpa)					
1.00							12,40							P cámara (kg)			
2.00							12,64			53,70				12,60			
3.00	30,00	29,90	30,00	15,00	15,00	15,00	12,70			52,70				P sat s.s. (kg)			
4.00	30,00	30,00	30,00	15,00	15,00	15,00	12,68	0,01	2394,46	54,30				12,69			
5.00	30,00	30,00	29,90	15,00	15,00	15,00	12,66	0,01	2388,03		13,00	12,00	4,90	4,17	P seca (kg)		
6.00	29,90	29,80	29,80	15,00	15,00	15,00	12,61	0,01	2381,25		17,00	16,00	5,04	4,28	12,61		
							12,59	0,01	2388,09		18,00	15,00	5,18	4,40	Absorción (%)		
									2387,96		15,17		5,04	4,28	0,63		

VALORES MEDIOS:

		PRUEBA			8		AMASADA		B		Consist. objet.		B		Criterio de suscit.		
Árido recibido:		Granulometría:			C.G. a=11		Desclasificado:		0,00		Resist. med. objet.:		25,00		Plastificante (kg):		0,050
Temperatura ambiente:		Temperatura hormigón:			29,20		Humedad relativa:		50,60		Fecha ensayo:		05/07/2007		Superplastif (kg):		0,093
n° probeta	1°g	2°g	3°g	1°D	2°D	3°D	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)	Res 7 días (Mpa)	Res 28 días (Mpa)	Pt. Agua (mm)	Tracción (Mpa)					
1.00	29,90	29,90	30,00	15,00	15,00	15,00	12,67	0,01	2395,24					P cámara (kg)			
2.00	30,00	30,00	30,00	15,00	15,00	15,00	12,64	0,01	2384,26	44,60				12,77			
3.00	30,00	30,00	30,00	15,00	15,00	15,00	12,66	0,01	2388,03	42,00				P sat s.s. (kg)			
4.00	29,90	29,90	29,90	15,00	15,00	15,00	12,77	0,01	2416,84	43,00		25,00	24,00	2,88	2,45	12,83	
5.00	29,90	30,00	29,90	15,00	15,00	15,00	12,74	0,01	2408,47		21,00	24,00	3,31	2,81	P seca (kg)		
6.00	29,90	30,00	29,90	15,00	15,00	15,00	12,75	0,01	2410,36		23,00	24,00	3,10	2,64	Absorción (%)		
									2400,53		43,20		3,10	2,63	0,86		

VALORES MEDIOS:

PRUEBA		9		AMASADA		B		F		Criterio de sustit:		
Granulometría:		DISC. a=12		DESClASIFICADO:		25,00		13-13		Plasificante (kg): 0,050		
Temperatura ambiente:		23,30		Humedad relativa:		62,50		05/07/2007		Superplasti f (kg): 0,060		
Temperatura hormigón:		3° D		Res 28 días (Mpa)		Pl. Agua (mm)		Tracción (Mpa)				
Peso (kg)		Volumen (m³)		Res 7 días (Mpa)								
1.00	30,00	29,90	15,00	15,00	12,76	0,01	2409,57	41,70			P cámara (kg) 12,66	
2.00	29,90	29,90	30,00	15,00	12,74	0,01	2408,47	42,40			P sat sup s (kg) 12,75	
3.00	30,00	30,00	30,00	15,00	12,75	0,01	2405,01	42,00			P seca (kg) 3,21	
4.00	30,00	30,00	29,90	15,00	12,66	0,01	2390,69	53,00	55,00	3,78	3,09	
5.00	29,90	29,90	30,00	15,00	12,69	0,01	2399,02	24,00	22,00	3,64	12,65	
6.00	30,00	30,00	30,00	15,00	12,68	0,01	2391,80	28,00	28,00	3,69	3,14	
				VALORES MEDIOS:				42,03	35,17	3,70	3,15	0,79

PRUEBA		10		AMASADA		B		B		Criterio de sustit:		
Granulometría:		C.G. a=11		DESClASIFICADO:		0,00		25,00		Plasificante (kg): 0,050		
Temperatura ambiente:		17,70		Humedad relativa:		50,40		28/02/2007		Superplasti f (kg): 0,080		
Temperatura hormigón:		3° D		Res 28 días (Mpa)		Pl. Agua (mm)		Tracción (Mpa)				
Peso (kg)		Volumen (m³)		Res 7 días (Mpa)								
1.00	30,00	29,80	15,00	15,00	12,44	0,01	31,80	45,00			P cámara (kg) 12,39	
2.00	30,00	29,90	30,00	15,00	12,30	0,01	2320,13	39,40			P sat sup s (kg) 12,45	
3.00	30,00	30,00	29,90	15,00	12,35	0,01	2332,15	39,10			P seca (kg) 3,50	
4.00	29,80	29,90	29,90	15,00	12,45	0,01	2351,03	21,00	21,00	4,12	2,95	
5.00	29,80	29,70	29,80	15,00	12,39	0,01	2347,54	23,00	25,00	3,47	12,39	
6.00	29,80	29,80	29,80	15,00	12,35	0,01	2346,19	30,00	28,00	3,64	3,09	
				VALORES MEDIOS:				41,17	24,67	3,74	3,18	0,48

PRUEBA		11		AMASADA		B		Consist. objet.		F		SS	
Arido reciclado:		OVIEDO		% de sustit.		Granulometría:		DISC. a=12		Resist. med. objet.		Plastificante (kg):	
Temperatura ambiente:		10,00		Temperatura hormigón:		16,00		Humedad relativa:		Fecha amasada:		28/03/2007	
nº probeta		1º g		2º g		3º g		1º D		2º D		3º D	
Peso (kg)		12,22		12,32		12,32		Volumen (m³)		Pt. Agua (mm)		Tracción (Mpa)	
1,00	29,90	29,80	29,90	15,00	15,00	15,00	15,00	234,27	48,70			P cámara (kg)	12,29
2,00	29,90	29,90	29,90	15,00	15,00	15,00	15,00	236,50	27,70			P sat sup s (kg)	12,37
3,00	30,00	29,90	30,00	15,00	15,00	15,00	15,00	230,93	45,30			P seca (kg)	12,29
4,00	29,80	29,90	29,80	15,00	15,00	15,00	15,00	231,19		35,00	38,00	Absorción (%)	2,81
5,00	29,90	30,00	30,00	15,00	15,00	15,00	15,00	230,26		34,00	34,00		
6,00	29,80	29,80	29,80	15,00	15,00	15,00	15,00	234,29		30,00	30,00		
								2323,41	47,00	33,50	3,60	3,06	0,65

VALORES MEDIOS:

PRUEBA		12		AMASADA		B		Consist. objet.		B		SS	
Arido reciclado:		MADRID		% de sustit.		Granulometría:		C.F. a=16		Resist. med. objet.		Plastificante (kg):	
Temperatura ambiente:		14,90		Temperatura hormigón:		20,70		Humedad relativa:		Fecha amasada:		28/03/2007	
nº probeta		1º g		2º g		3º g		1º D		2º D		3º D	
Peso (kg)		12,39		12,33		12,33		Volumen (m³)		Pt. Agua (mm)		Tracción (Mpa)	
1,00	30,00	30,00	30,00	15,00	15,00	15,00	15,00	232,78	46,40			P cámara (kg)	12,33
2,00	30,00	29,90	30,00	15,00	15,00	15,00	15,00	230,60	46,80			P sat sup s (kg)	12,38
3,00	29,90	29,90	30,00	15,00	15,00	15,00	15,00	236,64	44,30			P seca (kg)	12,33
4,00	29,80	29,90	30,00	15,00	15,00	15,00	15,00	233,56		29,00	29,00	Absorción (%)	3,17
5,00	30,00	30,00	29,90	15,00	15,00	15,00	15,00	230,82		20,00	19,00		
6,00	30,00	29,90	30,00	15,00	15,00	15,00	15,00	234,04		25,00	21,00		
								2326,41	45,50	23,83	3,89	3,31	0,41

VALORES MEDIOS:

PRUEBA		13		AMASADA		B		F		SS			
Árido recibido:	OVIEDO	% de sustit:	Granulometría:	C.G. $\mu=11$	Desclasificado:	Resist. med. objet:	25.00	Cono:	12-6	Plasticante (kg):	0,047		
Temperatura ambiente:	12,70	Temperatura horniçòn:	18,30	Humedad relativa:	Fecha amasada:	28/03/2007	Fecha ensayo:	25/04/2007	Superplastif (kg):	0,163			
n° probeta	1°g	2°g	3°g	1°D	2°D	3°D	Peso (kg)	Volumen (m³)	Res 7 dias (Mpa)	Res 28 dias (Mpa)	Pt. Agua (mm)	Brasileño (Mpa)	Tracciòn (Mpa)
1.00	29,90	30,00	29,90	15,00	15,00	15,00	11,67	0,01	28,70	38,30			P cámara (kg)
2.00	29,90	29,90	30,00	15,00	15,00	15,00	11,88	0,01		37,80			11,72
3.00	29,90	29,80	29,90	15,00	15,00	15,00	11,76	0,01		38,60			P sat sup s (kg)
4.00	29,90	29,80	29,80	15,00	15,00	15,00	11,78	0,01			18,00	17,00	3,13
5.00	29,80	29,80	29,80	15,00	15,00	15,00	11,72	0,01			13,00	15,00	2,86
6.00	29,90	29,80	29,80	15,00	15,00	15,00	11,71	0,01			8,00	10,00	3,63
													Absorçòn (%)
													3,09
													3,56
													3,03
													0,94

VALORES MEDIOS:

PRUEBA		14		AMASADA		B		F		SS			
Árido recibido:	MADRID	% de sustit:	Granulometría:	DISC. $\mu=12$	Desclasificado:	Resist. med. objet:	35.00	Cono:	9-7	Plasticante (kg):	0,070		
Temperatura ambiente:	13,40	Temperatura horniçòn:	16,00	Humedad relativa:	Fecha amasada:	23/02/2007	Fecha ensayo:	23/03/2007	Superplastif (kg):	0,130			
n° probeta	1°g	2°g	3°g	1°D	2°D	3°D	Peso (kg)	Volumen (m³)	Res 7 dias (Mpa)	Res 28 dias (Mpa)	Pt. Agua (mm)	Brasileño (Mpa)	Tracciòn (Mpa)
1.00	29,90	30,00	29,90	15,00	15,00	15,00	39,60	0,01	39,60	56,20			P cámara (kg)
2.00	29,90	29,90	29,90	15,00	15,00	15,00	12,10	0,01		54,70			12,06
3.00	30,00	30,00	29,90	15,00	15,00	15,00	12,08	0,01		58,10			P sat sup s (kg)
4.00	30,00	29,90	29,80	15,00	15,00	15,00	12,13	0,01			21,00	20,00	12,13
5.00	29,90	30,00	29,90	15,00	15,00	15,00	12,06	0,01			15,00	16,00	4,29
6.00	29,80	29,90	29,80	15,00	15,00	15,00	12,09	0,01			16,00	18,00	3,37
													4,22
													4,66
													3,96
													0,75

VALORES MEDIOS:

PRUEBA		17		AMASADA		B		Consist. objet.		B		Criterio de suscit.	
Árido reciclado:	MADRID	% de suscit:	12,80	Granulometría:	DISC. a=12	Desclasificado:	5,00	Resist. med. objet:	35,00	Cono:	17-17	Plasticante (kg):	0,070
Temperatura ambiente:	12,80	Temperatura hormigón:	15,10	Humedad relativa:	56,70	Fecha amasada:	07/03/2007	Fecha ensayo:	04/04/2007	Superplastif (kg):	0,110		
n° probeta	1º g	2º g	3º g	1º D	2º D	3º D	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)	Res 7 días (Mpa)	Res 28 días (Mpa)	Pl. Agua (mm)	Tracción (Mpa)	P cámara (kg)
1,00	29,80	29,70	29,80	15,00	15,00	15,00	12,22	2338,31	34,60	44,80			12,28
2,00	29,70	29,70	29,80	15,00	15,00	15,00	12,30	2337,13		43,90			P sat sup s (kg)
3,00	29,90	29,80	29,80	15,00	15,00	15,00	12,18	2310,33		43,30			12,38
4,00	29,70	29,80	29,80	15,00	15,00	15,00	12,28	2334,51		4,40	35,00	32,00	P seca (kg)
5,00	29,80	29,80	29,80	15,00	15,00	15,00	12,32	2339,49		3,45	20,00	22,00	12,28
6,00	29,80	29,70	29,70	15,00	15,00	15,00	12,30	2340,83		3,78	15,00	19,00	Absorción (%)
VALORES MEDIOS:													0,81

PRUEBA		18		AMASADA		B		Consist. objet.		F		Criterio de suscit.	
Árido reciclado:	OVIEDO	% de suscit:	15,00	Granulometría:	C.F. a=16	Desclasificado:	10,00	Resist. med. objet:	25,00	Cono:	19-18	Plasticante (kg):	0,049
Temperatura ambiente:	15,00	Temperatura hormigón:	15,50	Humedad relativa:	50,00	Fecha amasada:	26/09/2007	Fecha ensayo:	01/05/2007	Superplastif (kg):	0,100		
n° probeta	1º g	2º g	3º g	1º D	2º D	3º D	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)	Res 7 días (Mpa)	Res 28 días (Mpa)	Pl. Agua (mm)	Tracción (Mpa)	P cámara (kg)
1,00	29,80	29,80	29,90	15,00	15,00	15,00	11,94	2264,80		37,60			11,86
2,00	29,90	29,80	29,90	15,00	15,00	15,00	11,94	2262,27		39,20			P sat sup s (kg)
3,00	29,80	29,80	29,80	15,00	15,00	15,00	11,81	2242,65		39,50			11,97
4,00	29,80	29,70	29,80	15,00	15,00	15,00	11,50	2186,23		2,50	No partió	2,13	P seca (kg)
5,00	29,80	29,70	29,70	15,00	15,00	15,00	11,58	2203,90		3,08	103,00	107,00	11,85
6,00	29,80	29,90	29,90	15,00	15,00	15,00	11,49	2177,01		3,08	108,00	100,00	Absorción (%)
VALORES MEDIOS:													1,01

PRUEBA		21		AMASADA		B		Consist. objet.		B		Criterio de suscit.		
Árido recibido:		Granulometría:		Desclasificado:		Resist. med. objet.:		Cono:		Plastificante (kg):		0,065		
Temperatura ambiente:		Temperatura hormigón:		Humedad relativa:		Fecha amasada:		Fecha ensayo:		Superplastif (kg):		0,030		
1° g		2° g		3° g		1° D		2° D		3° D		Pt. Agua (mm)		
Volumen (m³)		Peso (kg)		Res 7 días (Mpa)		Res 28 días (Mpa)		Tracción (Mpa)				P cámara (kg)		
1.00	29,80	29,80	29,70	15,00	12,60	0,01	2395,34	43,78					12,57	
2.00	29,80	29,80	29,80	15,00	12,73	0,01	2414,65	46,40					P sat sup s (kg)	
3.00	29,80	29,80	29,90	15,00	12,59	0,01	2385,43	48,01					12,62	
4.00	29,80	29,80	29,70	15,00	12,57	0,01	2389,64						P seca (kg)	
5.00	29,80	29,90	29,80	15,00	12,60	0,01	2389,99						32,00	
6.00	29,80	29,90	29,80	15,00	12,58	0,01	2386,20						28,00	
													31,00	
													26,00	
													3,85	
													3,89	
													26,67	
													3,31	
													0,72	
VALORES MEDIOS:														

PRUEBA		22		AMASADA		B		Consist. objet.		F		Criterio de suscit.		
Árido recibido:		Granulometría:		Desclasificado:		Resist. med. objet.:		Cono:		Plastificante (kg):		0,050		
Temperatura ambiente:		Temperatura hormigón:		Humedad relativa:		Fecha amasada:		Fecha ensayo:		Superplastif (kg):		0,080		
1° g		2° g		3° g		1° D		2° D		3° D		Pt. Agua (mm)		
Volumen (m³)		Peso (kg)		Res 7 días (Mpa)		Res 28 días (Mpa)		Tracción (Mpa)				P cámara (kg)		
1.00	29,80	29,80	29,90	15,00	12,54	0,01	2380,51	43,60					12,55	
2.00	29,80	29,80	29,80	15,00	12,55	0,01	2389,22	44,30					P sat sup s (kg)	
3.00	30,00	29,90	29,80	15,00	12,61	0,01	2386,27	43,90					12,61	
4.00	30,00	30,00	29,90	15,00	12,45	0,01	2369,92						P seca (kg)	
5.00	29,80	29,90	29,80	15,00	12,55	0,01	2374,06						32,00	
6.00	29,80	29,90	29,80	15,00	12,53	0,01	2367,63						30,00	
													24,00	
													25,00	
													4,71	
													4,08	
													4,41	
													28,83	
													3,75	
													0,48	
VALORES MEDIOS:														

PRUEBA		23		AMASADA		B		SC						
Arido reciclado:	OVIEDO	% de sustit:	13,20	Granulometría:	20,00	C.F. a=16	5,00	Resist. med. objet:	25,00	Consist. objet:	B	13-10	Criterio de sustit:	SC
Temperatura ambiente:	13,20	Temperatura hormigón:		17,20	Humedad relativa:	58,00	Fecha amasada:	03/04/2007	Cono:	01/05/2007	Plastificante (kg):	0,050	Superplastif (kg):	0,050
n° probeta	1° g	2° g	3° g	1° D	2° D	3° D	Peso (kg)	Volumen (m³)	Res 7 días (Mpa)	Res 28 días (Mpa)	Pl. Agua (mm)	Tracción (Mpa)		
1,00	30,00	30,00	30,00	15,00	15,00	15,00	12,19	0,01	25,50	35,30		P cámara (kg)		
2,00	30,00	29,90	30,00	15,00	15,00	15,00	12,28	0,01	2316,35	34,70		12,23		
3,00	29,90	29,90	30,00	15,00	15,00	15,00	12,18	0,01	2300,05	34,90		P sat sup s (kg)		
4,00	29,80	29,90	29,80	15,00	15,00	15,00	12,25	0,01	2315,84			12,31		
5,00	29,80	29,80	29,80	15,00	15,00	15,00	12,23	0,01	2319,81			P seca (kg)		
6,00	29,90	29,80	29,80	15,00	15,00	15,00	12,20	0,01	2316,71			12,22		
							12,17	0,01	2308,43			Absorción (%)		
VALORES MEDIOS:														
									2312,86	34,97	28,17	3,78	3,22	0,74

PRUEBA		24		AMASADA		B		SS						
Arido reciclado:	MADRID	% de sustit:	8,60	Granulometría:	20,00	C.G. a=11	10,00	Resist. med. objet:	35,00	Consist. objet:	B	12-9	Criterio de sustit:	SS
Temperatura ambiente:	8,60	Temperatura hormigón:		13,50	Humedad relativa:	65,10	Fecha amasada:	21/03/2007	Cono:	18/04/2007	Plastificante (kg):	0,065	Superplastif (kg):	0,065
n° probeta	1° g	2° g	3° g	1° D	2° D	3° D	Peso (kg)	Volumen (m³)	Res 7 días (Mpa)	Res 28 días (Mpa)	Pl. Agua (mm)	Tracción (Mpa)		
1,00	29,70	29,80	29,70	15,00	15,00	15,00	12,43	0,01	33,70	40,50		P cámara (kg)		
2,00	29,70	29,70	29,70	15,00	15,00	15,00	12,41	0,01	2361,87	46,70		12,41		
3,00	29,80	29,70	29,70	15,00	15,00	15,00	12,46	0,01	2374,05	49,00		P sat sup s (kg)		
4,00	29,70	29,70	29,70	15,00	15,00	15,00	12,41	0,01	2361,87			12,46		
5,00	29,80	29,70	29,80	15,00	15,00	15,00	12,41	0,01	2364,52			P seca (kg)		
6,00	29,80	29,70	29,80	15,00	15,00	15,00	12,36	0,01	2349,72			12,40		
							12,52	0,01	2382,80			Absorción (%)		
VALORES MEDIOS:														
									2385,80	45,40	34,17	4,48	3,81	0,48

Árido recibido:		MADRID		% de sustit:		0,00		PRUEBA		27		AMASADA		B		Resist. med. objet:		35,00		F		Criterio de sustit:	
Temperatura ambiente:		15,50		Temperatura homigón:		17,00		Granulometría:		C.G. a-11		Desclasificado:		0,00		Fecha amasada:		07/02/2007		21-21		Plasticante (kg):	
Temperatura ambiente:		15,50		Temperatura homigón:		17,00		Peso (kg)		Volumen (m³)		Humedad relativa:		Res 28 días (Mpa)		Fecha ensayo:		07/03/2007		Superplastif (kg):		0,109	
n° probeta	1° g	2° g	3° g	1° D	2° D	3° D	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)	Res 7 días (Mpa)	Res 28 días (Mpa)	Pt. Agua (mm)	Brasileño (Mpa)	Tracción (Mpa)	P cámara (kg)	P sat sup s (kg)	P seca (kg)	Absorción (%)					
1,00	30,00	30,00	30,00	15,00	15,00	15,00	12,75	0,01	2427,64	42,00	56,60				12,60								
2,00	29,90	30,00	30,00	15,00	15,00	15,00	12,82	0,01	2420,90		56,10												
3,00	30,00	30,00	30,00	15,00	15,00	15,00	12,87	0,01	2427,64		56,40												
4,00	29,90	29,90	30,00	15,00	15,00	15,00	12,82	0,01	2423,60			23,00	21,00	4,57				3,88					
5,00	30,00	30,00	29,90	15,00	15,00	15,00	12,79	0,01	2415,24			17,00	20,00	4,47					3,80				
6,00	30,00	29,90	30,00	15,00	15,00	15,00	12,77	0,01	2411,46			20,00	20,00	4,43					3,77				
													56,37	20,17	4,49	3,82	0,63						
													VALORES MEDIOS:										

ENSAYOS DE ABSORCIÓN

Prueba	Peso seco	Peso sat s.s.	Absorción %	Abs. Media
1	302,48	317,28	4,89	4,61
	306,52	319,80	4,33	
2	303,47	317,69	4,69	4,70
	301,43	315,65	4,72	
3	296,68	308,79	4,08	4,10
	293,92	306,03	4,12	
4	305,07	321,17	5,28	5,26
	307,53	323,63	5,24	
5	283,38	298,78	5,43	5,46
	281,22	296,62	5,48	
6	300,00	316,30	5,43	5,41
	302,20	318,50	5,39	
7	302,48	317,28	4,89	4,61
	306,52	319,80	4,33	
8	237,06	247,46	4,39	4,41
	234,94	245,34	4,43	
9	293,44	303,96	3,59	4,24
	291,56	305,84	4,90	
10	277,93	294,73	6,04	6,07
	275,87	292,67	6,09	
11	250,52	268,22	7,07	7,10
	248,28	265,98	7,13	
12	288,16	304,36	5,62	5,64
	286,04	302,24	5,66	
13	244,87	262,77	7,31	7,28
	246,93	264,83	7,25	
14	252,92	271,32	7,28	7,24
	255,08	273,48	7,21	
15	278,74	294,44	5,63	5,65
	276,66	292,36	5,67	
16	264,31	278,11	5,22	5,24
	262,29	276,09	5,26	
17	273,61	289,61	5,85	5,82
	275,79	291,79	5,80	
18	247,14	264,44	7,00	6,97
	249,26	266,56	6,94	
19	296,68	308,79	4,08	4,10
	293,92	306,03	4,12	

ENSAYOS DE ABSORCIÓN

Prueba	Peso seco	Peso sat s.s.	Absorción %	Abs. Media
20	244,22	254,82	4,34	4,36
	242,18	252,78	4,38	
21	257,62	271,52	5,40	5,42
	254,98	268,88	5,45	
22	241,39	254,19	5,30	5,28
	243,81	256,61	5,25	
23	292,07	309,37	5,92	5,95
	289,33	306,63	5,98	
24	267,53	285,83	6,84	6,81
	269,87	288,17	6,78	
25	296,68	308,79	4,08	4,10
	293,92	306,03	4,12	
26	254,69	266,39	4,59	4,57
	257,31	269,01	4,55	
27	294,47	309,87	5,23	5,25
	292,33	307,73	5,27	

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Generación y gestión de RCDs en algunos países europeos.	4
Tabla 2.1 Estudios sobre áridos reciclados llevados a cabo en España.	9
Tabla 2.2 Características de los sistemas de trituración.	19
Tabla 2.3 Mortero adherido en áridos reciclados según diversos autores.	23
Tabla 2.4 Norma japonesa. Granulometría de áridos reciclados para fabricar hormigones en obra civil.	25
Tabla 2.5 Norma japonesa. Granulometría de áridos reciclados para fabricar hormigones en edificación.	25
Tabla 2.6 Norma belga. Husos granulométricos para el árido reciclado.	26
Tabla 2.7 Densidad en áridos reciclados comparados con los naturales según diversos autores.	28
Tabla 2.8 Absorción en áridos reciclados comparados con los naturales según diversos autores.	31
Tabla 2.9 Valores de la absorción según la norma japonesa.	32
Tabla 2.10 Coeficiente de Los Ángeles en áridos reciclados según diversos autores	33
Tabla 2.11 Contenido máximo de impurezas en áridos reciclados según anejo EHE.	39
Tabla 2.12 Propiedades del árido reciclado clase H JIS A 5021.	42
Tabla 2.13 Sustancias contaminantes del árido reciclado clase H JIS A 5021.	42
Tabla 2.14 Especificaciones internacionales sobre árido reciclado.	46
Tabla 2.15 Composición de los áridos reciclados según DIN 4223.	47
Tabla 2.16 Impurezas en áridos reciclados según BS 8500-2.	47
Tabla 2.17 Resistencia a compresión del hormigón reciclado.	56
Tabla 2.18 Recomendaciones para la resistencia a compresión en hormigones reciclados.	61
Tabla 2.19 Valores del módulo de elasticidad en hormigones reciclados.	62
Tabla 2.20 Coeficientes de corrección del módulo de elasticidad en hormigones reciclados.	65
Tabla 2.21 Variación de la resistencia a tracción en hormigones reciclados.	66
Tabla 2.22 Coeficiente de reducción la resistencia a tracción en hormigones reciclados.	67
Tabla 2.23 Variación de la resistencia a flexión en hormigones reciclados.	68
Tabla 2.24 Variación de la resistencia a flexión en hormigones reciclados.	69

Tabla 2.25 Variación de la retracción por secado en hormigones reciclados.	70
Tabla 2.26 Variación de la fluencia en hormigones reciclados.	72
Tabla 2.27 Factor de durabilidad en hormigones reciclados.	75
Tabla 3.1 Propiedades físicas del cemento utilizado.	85
Tabla 3.2 Propiedades químicas del cemento utilizado.	85
Tabla 3.3 Densidad y absorción de los áridos naturales empleados.	87
Tabla 3.4 Equivalente de arena en los áridos finos empleados.	88
Tabla 3.5 Densidad y absorción de los áridos reciclados empleados.	90
Tabla 3.6 Coeficiente de forma y resistencia a la fragmentación de los áridos reciclados empleados.	90
Tabla 3.7 Porcentaje de mortero adherido en los áridos reciclados.	91
Tabla 3.8 Propiedades de los aditivos empleados.	93
Tabla 4.1 Factores y niveles de variación.	120
Tabla 4.2 Combinaciones ensayadas.	121
Tabla 4.3 Parámetro de Bolomey.	123
Tabla 4.4 Granulometrías de los áridos reciclados de la Belonga.	128
Tabla 4.5 Dosificación base.	128
Tabla 4.6 Componentes sueltos de las amasadas n° 26 y n° 16.	132
Tabla 4.7 Ensayos amasadas B.	135
Tabla 4.8 Ensayos amasadas A.	136
Tabla 5.1 Salida de Statgraphics. Primer análisis de varianza.	141
Tabla 5.2 Salida de Statgraphics. Segundo análisis de varianza.	144
Tabla 5.3 Primer análisis de varianza para la densidad media.	145
Tabla 5.4 Segundo análisis de varianza para la densidad media.	146
Tabla 5.5 Variación de la densidad en el HR.	154
Tabla 5.6 Primer análisis de varianza para la absorción.	156
Tabla 5.7 Segundo análisis de varianza para la absorción.	157
Tabla 5.8 Variación de la absorción en el HR.	162
Tabla 5.9 Primer análisis de varianza en aire ocluido.	164
Tabla 5.10 Segundo análisis de varianza en aire ocluido.	165
Tabla 5.11 Primer análisis de varianza para la resistencia media tipificada a compresión.	170
Tabla 5.12 Segundo análisis de varianza para la resistencia media tipificada a compresión.	170
Tabla 5.13 Influencia del aditivo superplastificante en la resistencia a compresión.	174

Tabla 5.14 Tipificación 2. Primer análisis de varianza para la resistencia media tipificada a compresión.	175
Tabla 5.15 Tipificación 2. Segundo análisis de varianza para la resistencia media tipificada a compresión.	175
Tabla 5.16 Tipificación 2. Variación de la resistencia media a compresión tipificada del árido reciclado de Madrid respecto al de Oviedo según el % de sustitución.	176
Tabla 5.17 Primer análisis de varianza para el módulo de elasticidad tipificado.	180
Tabla 5.18 Segundo análisis de varianza para la resistencia media tipificada a compresión.	180
Tabla 5.19 Variación del módulo de elasticidad tipificado según el % de sustitución.	181
Tabla 5.20 Primer análisis de varianza para la resistencia a tracción indirecta tipificada.	184
Tabla 5.21 Segundo análisis de varianza para la resistencia a tracción indirecta tipificada.	185
Tabla 5.22 Tipificación 2. Primer análisis de varianza para la resistencia a tracción indirecta tipificada.	188
Tabla 5.23 Tipificación 2. Segundo análisis de varianza para la resistencia a tracción indirecta tipificada.	189
Tabla 5.24 Variación de la resistencia a tracción indirecta tipificada 2 según tipo de árido y el % de sustitución.	192
Tabla 5.25 Primer análisis de varianza para la permeabilidad.	194
Tabla 5.26 Segundo análisis de varianza para la permeabilidad.	195
Tabla 5.27 Resumen de resultados del ANOVA.	199

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Composición media de los RCDs.	2
Figura 2.1 Proceso de producción de RCDs.	16
Figura 2.2 Planta móvil reciclado de RCDs.	18
Figura 2.3 Trituradora de mandíbulas.	18
Figura 2.4 Molino de impactos.	19
Figura 2.5 Molino de conos.	20
Figura 2.6 Relación entre la absorción y la densidad en áridos reciclados según su tamaño transcurridos 10 minutos.	29
Figura 2.7 Relación entre la absorción y la densidad en áridos reciclados según su tamaño transcurridas 24 horas.	30
Figura 2.8 Comparación de consistencia entre el hormigón reciclado y el de control.	51
Figura 2.9 Corrección de la consistencia por adición de superplastificante.	53
Figura 2.10 Relación entre la resistencia compresión del hormigón original y el reciclado.	58
Figura 2.11 Evolución de la resistencia compresión del hormigón reciclado.	59
Figura 2.12 Reducción del módulo de elasticidad en hormigones reciclados.	63
Figura 2.13 Relación entre la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad en hormigones reciclados según diversos autores.	65
Figura 2.14 Retracción por secado en hormigones reciclados.	71
Figura 2.15 Resistencia a la helada de hormigón reciclado y convencional.	74
Figura 2.16 Resistencia a la helada en hormigones reciclados.	75
Figura 2.17 Penetración de cloruros en hormigones reciclados.	78
Figura 3.1 Resistencia a compresión del cemento utilizado.	86
Figura 3.2 Curvas granulométricas de los áridos naturales empleados.	87
Figura 3.3 Muestra de los áridos reciclados empleados.	88
Figura 3.4 Curvas granulométricas de los áridos empleados.	89
Figura 3.5 Muestra de los aditivos empleados.	92
Figura 3.6 Tamizadora utilizada.	94
Figura 3.7 Pesada hidrostática.	95
Figura 3.8 Tamizadora empleada en el cribado de los áridos reciclados.	97
Figura 3.9 Amasadora empleada en la fabricación del hormigón.	99
Figura 3.10 Ensayo de consistencia.	101

Figura 3.11 Ensayo de aire ocluido.	103
Figura 3.12 Probetas en la cámara húmeda.	104
Figura 3.13 Ensayo de absorción en el hormigón endurecido.	106
Figura 3.14 Ensayo de resistencia a compresión.	107
Figura 3.15 Accesorios empleados en el ensayo de módulo de elasticidad.	108
Figura 3.16 Collarines y sensores de desplazamiento.	109
Figura 3.17 Primer ciclo de carga en el ensayo de módulo elástico.	110
Figura 3.18 Ensayo de módulo de elasticidad.	111
Figura 3.19 Ensayo de penetración de agua bajo presión.	112
Figura 3.20 Ensayo brasileño.	113
Figura 4.1 Curvas granulométricas de referencia.	125
Figura 4.2 Ajuste por mínimos cuadrados del árido total a la curva de Bolomey en la dosificación base 1. (Granulometría continua gruesa).	125
Figura 4.3 Ajuste por mínimos cuadrados del árido total a la curva de Bolomey en la dosificación base 2. Granulometría continua fina.	126
Figura 4.4 Ajuste por mínimos cuadrados del árido total a la curva de Bolomey en la dosificación base 1. Granulometría discontinua.	126
Figura 4.5 Ajuste del árido total con 20% de grava reciclada a la curva de Bolomey para la dosificación base 1. Granulometría discontinua. Sustitución simple.	133
Figura 4.6 Ajuste del árido total con 50% de grava reciclada a la curva de Bolomey para la dosificación base 1. Granulometría continua gruesa. Sustitución simple.	134
Figura 4.7 Ajuste del árido total con 100% de grava reciclada a la curva de Bolomey para la dosificación base 1. Granulometría continua fina. Sustitución simple.	134
Figura 5.1 Gráfico LSD.	143
Figura 5.2 Densidad media en HR 0%.	146
Figura 5.3 Densidad media en HR 20%.	147
Figura 5.4 Densidad media en HR 50%.	148
Figura 5.5 Densidad media en HR 100%.	148
Figura 5.6 Intervalos LSD de la densidad media para los dos tipos de árido.	149
Figura 5.7 Intervalos LSD de la densidad media para el % de árido reciclado.	150
Figura 5.8 Relación densidad - % de sustitución.	150
Figura 5.9 Intervalos LSD de la densidad media para el tipo de granulometría.	151
Figura 5.10 Intervalos LSD de la densidad media según la consistencia.	152
Figura 5.11 Intervalos LSD de la densidad media según el criterio de sustitución.	152
Figura 5.12 Densidad media.	155

Figura 5.13 Absorción en HR 0%.	157
Figura 5.14 Absorción en HR 20%.	158
Figura 5.15 Absorción en HR 50%.	159
Figura 5.16 Absorción en HR 100%.	159
Figura 5.17 Absorción media e intervalos LSD según el tipo de árido.	160
Figura 5.18 Absorción media e intervalo LSD según el % de árido sustituido.	160
Figura 5.19 Absorción media e intervalo LSD según la resistencia a compresión.	161
Figura 5.20 Absorción.	163
Figura 5.21 Aire ocluido medio e intervalo LSD según el % de sustitución.	165
Figura 5.22 Aire ocluido según el % de sustitución.	166
Figura 5.23 Aire ocluido medio e intervalo LSD según el tipo de árido.	166
Figura 5.24 Aire ocluido.	168
Figura 5.25 Resistencia a compresión tipificada media e intervalo LSD según el tipo de árido.	171
Figura 5.26 Resistencia a compresión tipificada media e intervalo LSD según la resistencia objetivo.	172
Figura 5.27 Resistencia a compresión tipificada media e intervalo LSD según el % de sustitución.	172
Figura 5.28 Tipificación 2. Resistencia a compresión tipificada media e intervalo LSD según el tipo de árido.	176
Figura 5.29 Tipificación 2. Resistencia media a compresión.	178
Figura 5.30 Módulo de elasticidad tipificado medio e intervalo LSD según el % de sustitución.	181
Figura 5.31 Módulo de elasticidad tipificado.	183
Figura 5.32 Resistencia a tracción indirecta tipificada media e intervalo LSD según el % tipo de árido.	185
Figura 5.33 Resistencia a tracción indirecta tipificada media e intervalo LSD según el % de sustitución.	186
Figura 5.34 Resistencia a tracción indirecta tipificada media e intervalo LSD según la resistencia objetivo.	187
Figura 5.35 Tipificación 2. Resistencia a tracción indirecta tipificada media e intervalo LSD según el tipo de árido.	189
Figura 5.36 Tipificación 2. Resistencia a tracción indirecta con el 50% de árido grueso reciclado.	190

Figura 5.37 Tipificación 2. Resistencia a tracción indirecta tipificada media e intervalo LSD según el % de sustitución.	190
Figura 5.38 Tipificación 2. Resistencia a tracción indirecta tipificada media e intervalo LSD según el % de desclasificados.	191
Figura 5.39 Tipificación 2. Resistencia a tracción indirecta tipificada media e intervalo LSD según la consistencia.	191
Figura 5.40 Tipificación 2. Tracción indirecta.	193
Figura 5.41 Permeabilidad al agua.	197