

Universidad Politécnica De Valencia

Universita politecnica delle marche

Estudio di conglomerati cementizi contenenti diferentes percentuali di calcestruzzo riciclato

ALUMNO: Herminio José Gabaldón Pérez

DIRECTORES DEL PROYECTO: Ricardo Perello

Valeria Corinaldesi

CURSO: 2012-2013



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
INGENIERÍA DE
EDIFICACIÓN

“Me gustaría agradecer especialmente a mi compañera en Ancona, Sindy Seara Paz, por toda la ayuda que me ha prestado para la realización de este proyecto. Por otro lado agradecer a mis amigos por todos los buenos momentos que me han hecho vivir durante estos años. Y por último agradecer a mi familia por su apoyo total e incondicional.”

Un cordial saludo.

Herminio.

INDICE

1-INTRODUCCIÓN	1
1.1 - DESARROLLO SOSTENIBLE.....	2
1.2 - APLICACIÓN EN EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN.....	3
1.1 - ESTUDIOS Y MEDIDAS PARA EL USO DE LOS RCDs.....	5
1.2 - OBJETIVOS GENERALES.....	12
2-ESTADO DEL ARTE	13
2.1- EL ÁRIDO RECICLADO.....	14
2.2 - PROPIEDADES DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS.....	20
2.3 - HORMIGÓN RECICLADO.....	24
2.4 - MARCO NORMATIVO.....	29
2.5 - ACTUACIONES REALES CON HORMIGÓN RECICLADO.....	33
3-MATERIALES A EMPLEAR	37
3.1 - CRITERIOS DE SELECCIÓN.....	38
3.2 - CEMENTO.....	39
3.3 - AGUA.....	40
3.4 – ADITIVO.....	41

3.5 – ARIDOS.....	42
3.5.1 – ARENA.....	42
3.5.2 – ARIDO GRUESO NATURAL.....	42
3.5.3 – ARIDO RECICLADO.....	43
3.6 - COMPOSICIÓN DEL ÁRIDO RECICLADO.....	44
4-HORMIGONES.....	49
4.1 – DOSIFICACIONES.....	50
4.1.1 – AJUSTE DE DOSIFICACIONES.....	50
4.1.2 – DOSIFICACIONES FINALES.....	52
4.2 – PREPARACION DE LAS PROBETAS.....	53
4.3 – PREPARACION DE LOS MATERIALES.....	54
4.4 – PROCESO DE AMASADO.....	56
4.5 – CONSISTENCIA MEDIANTE CONO DE ABRAMS.....	57
4.6 – VIBRADO YFRAGUADO.....	58
4.7 – DESMOLDE YCURADO.....	59
5-RESULTADOS.....	60
5.1 – ENSAYO A COMPRESIÓN.....	61
5.1.1 – METODO DE ENSAYO.....	61
5.1.2 – RESULTADOS	62
5.1.3 – CONCLUSIONES.....	67
5.2 – ENSAYO A TRACCIÓN.....	68
5.2.1 – METODO DE ENSAYO.....	68
5.2.2 – RESULTADOS	69
5.2.3 – CONCLUSIONES.....	71

5.3 – ENSAYO A RETRACCIÓN.....	72
5.3.1 – METODO DE ENSAYO.....	72
5.3.2 – RESULTADOS	73
5.3.3 – CONCLUSIONES.....	75
5.4 – MODULO ELASTICO.....	75
5.4.1 – METODO DE ENSAYO.....	76
5.4.2 – RESULTADOS	78
5.4.3 – CONCLUSIONES.....	79
6-CONCLUSIONES.....	80
6.1 – CONCLUSIONES.....	81
7-BIBLIOGRAFÍA.....	82

1-INTRODUCCIÓN

1.1. DESARROLLO SOSTENIBLE

*1.2. APLICACIÓN EN EL SECTOR DE LA
CONSTRUCCIÓN*

1.3. ESTUDIOS Y MEDIDAS PARA EL USO DE LOS RCDs

1.4. OBJETIVOS GENERALES

1.1 DESARROLLO SOSTENIBLE

Desde la publicación del informe del Club de Roma en 1971, las dudas planteadas acerca de la viabilidad del modelo de crecimiento económico mundial evolucionaron hasta la evidencia actualmente aceptada y materializada mediante el concepto de Desarrollo Sostenible: “el desarrollo debe satisfacer las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer las suyas”.

Este camino ha sido posible a través de la progresiva concienciación de organismos, países, sectores empresariales y, en definitiva, de la sociedad mundial, que ha requerido de una generación para aceptar que los efectos de la actividad humana pueden superar la capacidad regenerativa de la naturaleza. Desde ese lejano 1971, varios hitos internacionales han marcado los avances producidos y los retos pendientes: el informe Bruntland remitido a la ONU en 1987, la Cumbre de la Tierra en Río en 1992, las cartas de Lisboa y Aalborg en 1994 y 1996, el protocolo de Kyoto en 1997 o la cumbre mundial sobre el Desarrollo Sostenible, celebrada en Johannesburgo en 2002, son quizá los más representativos por su impacto y difusión.

El modelo productivo del desarrollo industrial se basa en un aporte constante de recursos materiales, provenientes del medio natural, que más pronto o más tarde acabarán convirtiéndose en residuos. Si éstos no se aprovechan como fuente de nuevos recursos, el modelo es incompatible con el modelo de Desarrollo Sostenible, inseparable de la necesidad de mantener la capacidad productiva del medio para las generaciones futuras. Es por ello que, bajo la perspectiva histórica arriba planteada, la Unión Europea introdujo a través de la Directiva Marco de Residuos 75/442/CEE (concretada en la Directiva 91/156/CE) los principios básicos que debían regir la política de residuos, entre los que destaca el de la jerarquía en la gestión de los mismos. En virtud de éste, la gestión debe incidir especialmente en la reducción o prevención en la generación de residuos, y una vez generados éstos deben seguir una estrategia, con interés decreciente, que arranca con la reutilización directa, el reciclaje, la valorización y, por último, la eliminación o el vertido controlado. La figura 1.1. ilustra esquemáticamente esta jerarquía.



Figura 1.1. Jerarquía en la gestión de los residuos.

1.2- APLICACIÓN EN EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN

El sector de la construcción se rige por parámetros comparables a los de otros sectores. En él se hace evidente el continuo flujo de materiales que alimenta el ciclo constructivo, necesariamente marcado por un fin de la vida útil de todas las construcciones, momento en que éstas deben recibir nuevos aportes materiales para hacerlas sobrevivir más tiempo, o deben ser desconstruidas con la consiguiente generación de volúmenes materiales sobre los que pueden aplicarse las estrategias de la jerarquía enunciada. No se ha caracterizado la industria constructora por su interés en la etapa de la desconstrucción, lo que incide de modo singular en el conjunto de etapas que marcan su actividad. En efecto, es difícil plantearse retos como la reducción o la reutilización de materiales desconstruidos, llamémosles residuos, si en la planificación del proyecto y la obra no se introduce ese objetivo hasta sus últimas consecuencias. El profesor Antonio Aguado plasma esta idea en su conocido diagrama del Ciclo de la Construcción, que sintetiza bien las ideas apuntadas.

El Dr. Gerardo Wadel hace un profundo análisis de esta situación, concluyendo que “la reconversión de los residuos en nuevos recursos es una necesidad del sistema técnico para afrontar el reto de la sostenibilidad”. Para ello, “asegurar el retorno del material a fábrica una vez haya acabado su vida útil en la edificación es el punto clave en este proceso. Esto, combinado con un diseño de proceso y producto que garantice la incorporación del material retornado en la fabricación del nuevo producto, es condición necesaria para la reciclabilidad. Y la reciclabilidad lo es para el cierre de los materiales” (véase la figura 1.2.).

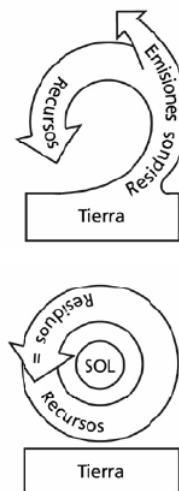


Figura 1.2. Ciclos de reciclaje

Una estimación realizada por ANPA (Agencia Nacional para la Protección del Ambiente) informó en Italia, que surgían 1.630.451 toneladas de residuos de C & D derivados de las actividades de macro demolición, en comparación con 10.812.475 y 7.953.738 toneladas de residuos de C & D que surgían de actividades residenciales y micro demoliciones respectivamente. Micro demoler significa, producir cantidades de residuos de C & D pequeñas hasta el punto de que los operadores deben depositar el mismo en los bordes de los caminos no recorridos o tirarlos fuera del término municipal o en los contenedores para la recogida de residuos sólidos urbanos, desarrollando así la práctica de la eliminación ilegal.

Se encontró, que en Italia, menos del 9% de los residuos totales es reciclado o recuperado, con un retraso significativo en comparación con otros países de Europa: de hecho, en 2006, según estimaciones de la Asociación Europea de Demolición (EDA), los Países Bajos y Bélgica recuperan o reutilizan, el 60% de la cantidad total de residuos, en el Reino Unido 50% y hasta 80% en Alemania.

En España, el Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición nace en el año 2001 y aborda el período 2001-2006 con más deseos que realidades. Hace una estimación grosera de la generación de residuos basándose en el informe Symonds de la UE de la década anterior y en los planes de diferentes autonomías españolas, lo que conduce a cuantificarlos en una amplia horquilla (entre 19 y 42 millones de toneladas). Los objetivos del plan se presentan a continuación, observándose la aplicación del principio de la jerarquía en la gestión, aunque con un peso considerable del vertido controlado:

En el marco del Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) 2007-2015, el Anexo 6 desarrolla el II Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición (II PNRCD). Con muchos más datos que el primer Plan se hace una estimación bastante solvente de la generación de residuos, que en el año 2005 se cuantifican en casi 35 millones de toneladas, y de su evolución (en 2010 se prevén casi 39 millones de toneladas). Los objetivos del II Plan son múltiples, y se desarrollan diversos instrumentos que aplique diversos principios rectores, entre ellos el de la jerarquía en la gestión. Trasladados a cifras, se fija como meta:

- a) La recogida controlada y correcta gestión del 95% de los RCD a partir de 2011
- b) La reducción o reutilización del 15% de RCD en 2011
- c) El reciclaje del 40% de RCD, a partir de 2011
- d) La valorización del 70% de los residuos de envases de materiales de construcción a partir de 2010

1.3- ESTUDIOS Y MEDIDAS PARA EL USO DE LOS RCDS

Entre los instrumentos se citan, por ejemplo, las medidas para fomentar el reciclado frente a la eliminación de RCD, concretándose este capítulo en diversas acciones que tienen como protagonista a la propia administración, que se obliga a fomentar las “medidas tendentes a una disminución en la utilización de recursos naturales, mediante el empleo en las unidades de obra de áridos y otros productos procedentes de valorización de residuos”. Para ello, indica la estrategia de introducir en los pliegos y procedimientos de adjudicación herramientas que valoren el uso de RCDS aunque, consciente de las exigencias técnicas, propone explícitamente:

“La modificación de los pliegos de prescripciones técnicas generales de aquellas obras susceptibles de absorber materiales procedentes de la valorización de RCD, para incorporar los requisitos que garanticen su empleo seguro; en particular, se propone la modificación, en el sentido expuesto, del Pliego General de Prescripciones Técnicas para Obras de Carreteras (PG-3) y en la modificación de la Instrucción sobre Hormigón Estructural (EHE). Asimismo se plantea la colaboración con otras administraciones públicas para que otros pliegos de prescripciones y utilizaciones todavía no abordadas (de Entes locales, de hormigón en masa, etc) también incluyan prescripciones técnicas que faciliten la utilización de materiales procedentes del reciclaje de RCD.”

En esta tarea ya se habían embarcado diversas entidades. El CEDEX, unido a varios centros de investigación de toda España, recibió en 2005 una subvención del Ministerio de medio Ambiente para realizar un “*Estudio experimental pronormativo sobre la utilización de RCDS en la aplicación de hormigón reciclado estructural (RECNHOR)*”. En el marco del Grupo de Trabajo, se recibió el encargo conjunto de la Asociación Científico Técnica del Hormigón Estructural (ACHE) y de la Comisión Permanente del Hormigón para desarrollar un Anejo que diese las pautas para el empleo de hormigón reciclado en elementos estructurales. Se daba cumplimiento, así, a una de líneas estratégicas definidas en el II PNRC, según se ha visto. La EHE, efectivamente, incluyó en su Anejo 15 los resultados del trabajo desarrollado, en un ámbito restringido pero esperanzador. Se propone en el citado anejo la posibilidad de sustituir hasta un 20% del árido grueso por árido reciclado procedente de residuos de hormigón, siempre para hormigón en masa o armado y limitando su resistencia a 40 MPa.

El tipo de residuo aparece con fuerza tras esta consideración. Estudios particulares de las diferentes administraciones autonómicas y de organismos de investigación (ITEC, CEDEX, UDC,...) fijaron la composición mayoritaria de los RCDS, que contiene cerca de un 75% de material de tipo pétreo (áridos, hormigón, y material cerámico), aunque cada obra produce un tipo de residuo diferente, en función del tipo de obra demolida y, sobre todo, del procedimiento más o menos selectivo de demolición. Del conjunto de residuos posibles, aquellos con más de un 90% de hormigón demolido son los que presentan, una vez reciclados, las prestaciones más elevadas en los aspectos físico-mecánicos. Son, por ello, los residuos más capaces de afrontar las exigencias requeridas a los áridos para hormigón estructural.

No obstante, una parte importante de los RCDS son de tipo cerámico (más de un 90% de material de este tipo) o mixto (casos intermedios), lo que repercute en una disminución de densidad y un aumento de la absorción.

Numerosos países han desarrollado normativa o recomendaciones específicas para el uso de áridos reciclados de uno u otro tipo (RILEM, BS, DIN,...). El grupo de RECINHOR consultó todas ellas y desarrolló investigaciones específicas para el caso español, aunque no consideró otro origen de áridos más allá del apuntado. Ello obedeció a la prudencia natural que debe prevalecer cuando se lanzan nuevas aplicaciones, para las que falta experiencia industrial y en las que se requiere de unas primeras experiencias exitosas. El anejo, no obstante, da pautas para sustituciones superiores al 20%, aunque aconseja la realización de estudios en tal caso, esos estudios, y los relativos a la inclusión de áridos mixtos y cerámicos en el hormigón, obtuvieron un fuerte impulso con el arranque de dos nuevos proyectos nacionales de gran envergadura. El CLEAM (Construcción Limpia, Eficaz y Amigable con el Medio Ambiente) fue concedido por el CDTI bajo el paraguas de los proyectos CENIT, y entre otras grandes líneas propias de la Construcción Sostenible incluye investigación específica sobre el empleo de áridos reciclados en hormigón estructural y no estructural. Por otro lado, alrededor del Gremio de Reciclaje y Derribos (GERD), se articuló el proyecto GEAR (Guía Española de Áridos Reciclados), concedido por el Ministerio de Medio Ambiente. Vinculando a decenas de empresas de reciclaje de RCDS y a varios centros de investigación, se está apunto de elaborar una guía de áridos reciclados con distintos usos, entre los que se encuentra el del hormigón en masa, estructural o no estructural.

Por otra parte, en Italia, el marco regulatorio actual, al menos en lo que respecta los residuos en general y los de la construcción y demolición, en particular, se compone de las siguientes medidas:

- Decreto Legislativo N ° 152, de 2006, sus modificaciones, y su decretos de aplicación, denominada "Código del Medio Ambiente";
- Decreto Ministerial n ° 203, de 08/05/2003 y sus reformas, conocido como "Decreto 30%";
- Decreto Ministerial de 14 de enero 2008 "Normas Técnicas para la Construcción", la revisión de las normas técnicas para la construcción de la Orden Ministerial de 14 de septiembre de 2005;

El Código del Medio Ambiente, que ahora es el único texto en el campo de la protección y preservación del medio ambiente y los recursos naturales en relación con las acciones humanas, en el artículo 184, teniendo a lo establecido en la Comunidad, clasifica los residuos de construcción y demolición así como los que resultan de las actividades de excavación, tales como residuos especiales. Mientras que para los escombros y los productos generados por las actividades de demolición, su definición no se presta a la interpretación, no se puede decir lo mismo con respecto a la tierra y las rocas que resultan de las actividades de excavación.

El Código toma en gran medida los conceptos del viejo Decreto Legislativo N ° 22 de 5 de febrero de 1997 (Decreto Ronchi) proporciona un conjunto de objetivos generales, algunos de los cuales también se aplican a la industria de la construcción, que se pueden resumir de la siguiente manera:

- La prevención de la producción de residuos mediante el desarrollo de tecnologías limpias y la reutilización o el reciclaje de los productos que pueden ser comercializados;
- El desarrollo de técnicas adecuadas para la eliminación de sustancias peligrosas contenidas en los residuos destinados a la valorización o eliminación;
- Fomentar el reciclado y la valorización de los residuos como materias primas secundarias;
- Realizar recuperación y disposición residuos limitando el posibles daños salud y ambiente;
- Escrito por las autoridades competentes de los planes de gestión de residuos;
- El uso de los residuos como fuente de energía

La filosofía detrás de la norma, que incorpora los principios formulados y se acordó en Europa, cree que los residuos pueden ser un recurso, por lo que el objetivo es fomentar el desarrollo y las actividades de recuperación o reutilización.

Para los residuos inertes y cerámicos, o los desechos de ladrillos, yeso, cemento y conglomerados (armados o no), incluidos traviesas ferroviarias, soportes y pilotes de hormigón armado de líneas de ferrocarril, de telecomunicaciones, eléctricos y fragmentos de calzadas, siempre que estén libres de amianto. Sus posibles sectores de reutilización son:

- Construcción de terraplenes y carreteras fundaciones, ferrocarriles, aeropuertos y estaciones industriales;
- La recuperación del medio ambiente;
- Tapa de relleno sanitario;
- Cerámica y la industria de ladrillos;
- La producción de cemento y hormigón bituminoso.

- Producción de materias primas secundarias mediante etapas mecánicas, cribado, selección y separación del tamaño de las partículas de metal y las fracciones deseadas para obtener fracciones inertes de piedra de la naturaleza y el tamaño de partícula adecuado seleccionado.

Así que la interacción directa de estos materiales con el medio ambiente no causa daños al mismo. Es necesario para llevar a cabo una transferencia de pruebas para la determinación de la cantidad de micro-contaminantes, que pueden dañar el medio ambiente debido a infiltración.

Hasta ahora, una de las limitaciones que impedían el uso de áridos reciclados, especialmente en Italia, estaba vinculado a la metodología de los ensayos de lixiviación especificados en el "Decreto Ronchi". Esta metodología fue un fuerte límite para el uso real de los materiales procedentes del reciclado de residuos de la construcción y demolición, debido a los altos valores que se registraron al final del análisis. En particular, este era extremadamente evidente cuando el mismo material se analizó mediante dos países diferentes y por lo tanto clasificado como "utilizables" para uno de ellos y "no utilizables" para el otro. Afortunadamente, la caracterización de los residuos que hoy se realiza a través de un sistema normalizado y aceptado por todos los miembros de la Unión (véase la sección 2.3).

El Decreto Ministerial N ° 203 del 08/05/2003, también conocido por el nombre de "Decreto de 30%", fue publicado con el objetivo de fomentar el uso de materias primas secundarias y de apoyo a la creación y desarrollo de un mercado de materiales reciclados o regenerados. El poder legislativo, con la promulgación de este decreto, impuestos, administraciones públicas y empresas bajo control público, el uso de productos reciclados para cubrir al menos el 30% de las necesidades anuales de materiales y mercancías.

Teniendo en cuenta que el edificio italiano se distingue por el hecho de que el mayor porcentaje de residuos de construcción y demolición se compone de materiales inertes (escombros de hormigón y ladrillos), es de particular importancia en la introducción de las "Normas Técnicas para la Construcción" (Decreto Ministerial de 14 de septiembre de 2005, el capítulo 11.1.9.2 -. Agregados), la posibilidad de uso de los agregados reciclados también para la producción de elementos estructurales en Hormigón Armado.

La entrada efectiva en vigor de este decreto dando lugar a la derogación de las leyes anteriores, después de haber sido pospuesta debido a tener la misma alineación que los Eurocódigos para el diseño estructural, entra finalmente en vigor en marzo de 2008.

La Orden Ministerial de 14 de septiembre 2005 entró en vigor el 23 de octubre de 2005, después de un largo proceso legislativo concluyó con una medida que hubiera tenido que modificar todas las normas en el sector de la construcción. El texto, sin embargo, no ha tenido una vida fácil: primero, las Normas Técnicas para la Construcción (NTC) se emitieron simultáneamente con la entrada en vigor de la Ordenanza 3274 de la Protección Civil, en algunos aspectos discordantes. La ordenanza de 3274 no ha entrado en vigor debido a una extensión (3467 preparado por la Orden de 13 de octubre de 2005).

Se creó una Comisión para supervisar las aplicaciones de las Normas Técnicas, y controlar las dificultades de interpretación y aplicación de las mismas.

Después de varios obstáculos técnicos para la ampliación fue aprobada por el Consejo de ministros en diciembre de 2006, pero sólo en febrero de 2007 se incluyó en el llamado decreto "milleproroghe" posteriormente fue aprobado por el Senado.

En marzo de 2008, fueron publicados en las "Normas Técnicas para la Construcción" en el que, en el apartado 11.1.9.2 "agregados", se definen como aptas para la producción de hormigón para uso estructural de los agregados resultantes de la transformación de materiales naturales, artificiales o de los procesos de reciclaje de cumplir con la parte armonizada de la UNI EN 12620.

El sistema de certificación de la conformidad de los agregados, de conformidad con el Decreto Presidencial N° 246/93, se muestra en la Tabla 2.1.

Specifica tecnica europea di riferimento	Uso previsto	Sistema di Attestazione della Conformità
UNI EN 12620 e UNI EN 13055-1	Calcestruzzo strutturale	2+

Tabla 1.3 Normas Técnicas para la Construcción - Tabla 11.1.II

Sistema 2 + (certificación del control de producción en fábrica) es la especificada en el artículo 7, apartado 1, letra B, Procedimiento 1, del Decreto Presidencial no. 246/93, incluida la vigilancia, evaluación y aprobación del control de producción en fábrica.

Está permitido el uso de agregados gruesos de reciclaje, de acuerdo a los límites indicados en la tabla 2.2, a condición de que la mezcla de concreto hecho con estos agregados, se califica y se documenta por medio de pruebas de laboratorio. Para los áridos reciclados, la evidencia del control de producción en fábrica (tablas H1, H2 y H3 Anexo ZA de la norma UNI EN 12620) debe ser hecha a las partes pertinentes, cada 100 toneladas de producto global y, de todos modos, en el plantas de reciclaje, por cada día de producción.

Origine del materiale da riciclo	Classe del calcestruzzo	Percentuale di impiego
demolizioni di edifici (macerie)	= C 8/10	fino al 100 %
demolizioni di solo calcestruzzo e c.a.	≤ C 30/37	≤30%
	≤ C 20/25	Fino al 60 %
Riutilizzo di calcestruzzo interno negli stabilimenti di prefabbricazione qualificati -da qualsiasi classe da calcestruzzi > C 45/50	≤ C 45/55	fino al 15%
	Stessa classe del calcestruzzo di origine	fino al 5%

Tabla 1.3.1 Normas Técnicas para la Construcción - Tabla 11.1.III

En los requisitos de diseño se puede hacer referencia a las normas UNI 8520 acciones 1 y 2 con el fin de identificar los requisitos físico-químicas, además de las establecidas para los áridos naturales, áridos reciclados que deben cumplir, en función del destino final del hormigón y sus propiedades de rendimiento (riesgo mecánico, durabilidad y del medio ambiente, etc.) y la cantidad de uso máximo de los áridos reciclado, o clases de resistencia del hormigón, la reducción de los niveles especificados en la tabla anterior.

En cuanto al árido fino, éstos deben cumplir con la norma armonizada europea UNI EN 13055-1. El sistema de certificación de la conformidad se presenta en la Tabla 2.1.

Con respecto a cualquier control de aceptación, estos están dirigidos a la determinación de las características técnicas que se muestran en la tabla 11.1.IV, junto con los métodos de ensayo pertinentes.

Caratteristiche tecniche	Metodo di prova
Descrizione petrografica semplificata	UNI EN 932-3
Dimensione dell'aggregato (analisi granulometrica e contenuto dei fini)	UNI EN 933-1
Indice di appiattimento	UNI EN 933-3
Dimensione per il filler	UNI EN 933-10
Forma dell'aggregato grosso (per aggregato proveniente da riciclo)	UNI EN 933-4
Resistenza alla frammentazione/frantumazione (per calcestruzzo $R_{ck} \geq C50/60$)	UNI EN 1097-2

Tabla 1.3.2 Normas Técnicas para la Construcción - Tabla 11.1.IV - Control de la aceptación de los agregados para el hormigón estructural.

El proyecto, de los requisitos específicos, se puede hacer referencia a la UNI 8520 acciones 1 y 2 con el fin de identificar los límites de aceptabilidad de las características técnicas de los agregados.

Antes de la publicación de la NTC, signos de apertura relacionadas con el posible uso de áridos reciclados se han producido en 1999, con la introducción de la UNI 10006 "Construcción y mantenimiento de carreteras - Técnica de uso de la tierra" en el Apéndice A, titulada " Los agregados de las actividades de demolición y residuos de la construcción y sus mezclas con mineral recuperable para uso en carretera y similares - Requisitos".

Esta regla, que ha sido sustituido por la UNI EN 13242 "Áridos para capas granulares y hidráulicos para uso en obras de ingeniería civil y la construcción de carreteras", fuertemente limitado el campo de la utilización de áridos reciclados relegando aplicaciones sólo en el sector de la carretera o la construcción de muros de contención (carretera y ferrocarril), sustratos para caminos y plazas, obras para las que no se requieren altos rendimientos mecánicos tales como los que deben garantizar un hormigón estructural.

La Orden Ministerial de 9 de enero de 1996 ("Normas técnicas para el cálculo, la construcción y las pruebas de las estructuras de hormigón armado, pretensadas y metal ") antes de la NTC, necesaria para la producción de hormigón estructural "inerte, natural o aplastamiento", añadió que, podrían ser utilizados, materiales y productos de conformidad con una norma armonizada o una homologación técnica europea si la especificación tenía un nivel de seguridad equivalente, que cumpliera con los requisitos esenciales de la Directiva 89/106/CEE relativa a los materiales de construcción.

Esta equivalencia tuvo que ser evaluada por el Consejo de Obras Públicas, y por lo tanto resultó prácticamente inviable el uso de materiales que no cumplieran los requisitos de la UNI 9858 ("hormigón. Rendimiento, producción, colocación y criterios de cumplimiento") sustituido por la norma armonizada EN 206-1 ("hormigón - Especificación, rendimiento, producción y conformidad"), que, a su vez, señaló a la UNI 8520:1999 ("Áridos para hormigón"), en la que era específica expresamente que los áridos inertes debían ser de origen natural.

En octubre de 2003, UNI ha publicado la norma armonizada EN 12620 ("Áridos para hormigón"), preparada por el Comité Técnico CEN / TC 154, que cumple con los requisitos esenciales de la Directiva 89/106/CEE sobre productos de construcción europea. En esta norma se especifican las propiedades que deben tener los agregados y materiales de origen natural, o industriales reciclados para ser utilizados en la producción de hormigón.

La norma también especifica las características del sistema de gestión de la producción de áridos y los requisitos del sistema de evaluación y de la conformidad de los productos a la regla.

Sin embargo, quien establece los requisitos que el árido final debe tener a fin de ser utilizado en la producción del hormigón, y proporciona un sistema de clasificación para los requisitos geométricos, físicos y químicos, a través del cual se hace la elección de los diferentes áridos es la UNI 8520:2005.

La permanencia en Europa, ya en el Eurocódigo 2 "Diseño de estructuras de hormigón. - Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación "hace referencia a la posibilidad de utilización de áridos reciclados, en referencia a la mencionada EN 206-1, que especificará los requisitos generales y, en particular, especifica que los materiales de la mezcla del hormigón no pueden contener sustancias nocivas y/o que puedan afectar a la durabilidad del hormigón, en referencia, a las normas específicas publicados en una fecha posterior, (UNI EN 12620) y (UNI EN 13055).

La presente investigación tiene por objeto el estudio de la inclusión de porcentajes elevados de árido reciclado procedente de hormigón en el hormigón estructural, alcanzándose hasta el 100% de sustitución del árido grueso. Se trata, por tanto, de establecer los límites que deberán marcar los futuros desarrollos normativos en este campo.



1.4- OBJETIVOS GENERALES

La fabricación de hormigones con áridos reciclados procedentes de residuos de hormigón estructural no es frecuente aún en España, ni tampoco en Italia. La norma EHE del 2008 contiene un anejo en el que se presentan las recomendaciones orientadas a introducir la sustitución de parte del árido grueso por árido reciclado, bien garantizado para sustituciones de hasta el 20%.

En Italia es la Norma Técnica para la Construcción, la que lo rige, la cual se indica en el apartado anterior (tablas 1.3).

Los objetivos en el marco general de los trabajos pretenden determinar el comportamiento a tracción, compresión, retracción y módulo elástico de los hormigones reciclados para todo el rango de sustitución (0, 20, 50 y 100%) de la fracción gruesa del árido a 28 días.

2-ESTADO DEL ARTE

2.1 EL ÁRIDO RECICLADO

2.2 PROPIEDADES DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS

2.3 HORMIGÓN RECICLADO

2.4 MARCO NORMATIVO

2.5 ACTUACIONES REALES CON HORMIGÓN RECICLADO

2.1- EL ÁRIDO RECICLADO

En muchas partes de Europa, existe una disponibilidad de áridos naturales cada vez más reducidos, en comparación con una alta demanda, lo que resulta en un aumento en el precio del metro cúbico de hormigón, todo lo cual podría ayudar a que el árido reciclado entre a competir económicamente con los áridos naturales.

En Italia y España estamos lejos de esto, ya que como podemos ver en la tabla siguiente, la cantidad de árido reciclado que utilizamos esta en torno al 1% en ambos casos, muy lejos de cifras como el 9% de Alemania, el 20% del Reino Unido y lejísimos del 42% de árido reciclado de Holanda.

País	Árido Redondeado	Árido Triturado	Árido Reciclado	Árido Artificial
Austria	66,0	32,0	3,5	3,0
Bélgica	13,9	38,0	12,0	1,2
Dinamarca	58,0	0,3	-	-
Finlandia	53,0	45,0	0,5	-
Francia	170,0	223,0	10,0	7,0
Alemania	263,0	174,0	46,0	30,0
Irlanda	54,0	79,0	1,0	-
Italia	210,0	135,0	5,5	35,0
Noruega	15,0	38,0	0,2	-
Holanda	24,0	4,0	20,2	-
Polonia	104,3	37,7	7,2	1,6
Portugal	6,3	82,0	-	-
Reino Unido	124,0	85,0	56,0	12,0
Rep. Checa	25,5	38,0	3,4	0,3
Eslovaquia	8,9	16,9	0,2	0,3
España	159,0	300,0	1,3	-
Suecia	23,0	49,0	7,9	0,2
Suiza	46,5	5,3	5,3	-

Tabla 2.1 Producción de árido para hormigón. (millones de toneladas)

En el actual mercado de consumo es cada día mayor la presión de ciertos colectivos ecologistas, unidos a una creciente concienciación ciudadana, respecto a la necesidad de potenciar el reciclaje de los materiales que han cumplido su vida útil. Esta política presenta grandes atractivos frente a la utilización de materias primas naturales. La ventaja más destacada es que soluciona, a un mismo tiempo, la problemática originada por la eliminación de unos subproductos de desecho y que, mediante el aprovechamiento de estos residuos se obtiene una nueva materia prima, con lo que se reduce la cantidad de recursos naturales primarios a extraer.

Otros beneficios asociados a las ventajas señaladas son los de reducir tanto el espacio destinado a escombreras de residuos, como el número de explotaciones mineras necesarias para suministrar la materia prima original, minimizando el impacto medio ambiental y favoreciendo la protección de unos recursos naturales siempre limitados.

Bajo estas ideas surge el concepto del reciclaje, cuyo éxito está condicionado a la capacidad de superar el obstáculo que supone el bajo precio, tanto de los materiales de construcción tradicionales como del traslado a vertedero de los residuos generados.

En las siguientes líneas se recogen las definiciones, tipos de áridos reciclados y el origen de los mismos.

Se entiende por árido reciclado aquel “árido resultante del procesamiento de materiales inorgánicos utilizados previamente en la construcción”. Se define también árido reciclado de hormigón como “aquellos residuos de hormigón de cemento con clinker Portland y áridos naturales, machacados, cribados y procesados en plantas de reciclado”. El material obtenido de esta forma no puede considerarse uniforme. Las diferencias en la composición pueden ser notables en función de la proporción de mortero presente en el residuo y de ciertos subcomponentes que pueden admitirse hasta un cierto límite.

Otros tipos de áridos reciclados son:

- “*Árido reciclado cerámico*”: obtenido por procesamiento de material predominantemente cerámico. El 85% de este árido debe tener una densidad seca superior a 1600 kg/m^3 en la norma holandesa, para evitar materiales excesivamente porosos y ligeros.
- “*Árido reciclado mixto*”: definido en la norma holandesa como un árido que deberá contener un porcentaje mayor del 50% de hormigón con una densidad seca superior a 2100 kg/m^3 y no más del 50% de materiales pétreos reciclados de distinta naturaleza que el hormigón, incluyendo los cerámicos con una densidad seca mayor de 1600 kg/m^3 .

El árido reciclado cerámico puede compararse al árido ligero. Su empleo aumenta el contenido de aire y obliga también a una relación agua/cemento (a/c) mayor. Adicionalmente, la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad del hormigón pueden verse afectados muy negativamente.

El único tipo de árido reciclado que puede ser admisible para hormigón armado es el “árido reciclado de hormigón” y deben imponérsele valores límite para las impurezas que puedan tener efectos negativos sobre la resistencia y durabilidad. El resto de tipos de áridos podrían ser utilizados en otras aplicaciones, como por ejemplo capas de firmes de carreteras u hormigones en masa.

El uso de las fracciones finas del árido reciclado de hormigón implica un aumento muy notable de la retracción por secado y de la fluencia debido a la mayor cantidad de agua que precisan en su dosificación. Por ello, en Europa sólo se permite el uso de las fracciones gruesas que reducen notablemente las diferencias con respecto a un hormigón con áridos convencionales.

En general puede decirse que los áridos reciclados de hormigón de tamaño $\geq 4\text{mm}$ son potencialmente aptos para la fabricación de hormigón, cumpliendo en su caso las especificaciones complementarias para cada aplicación concreta.

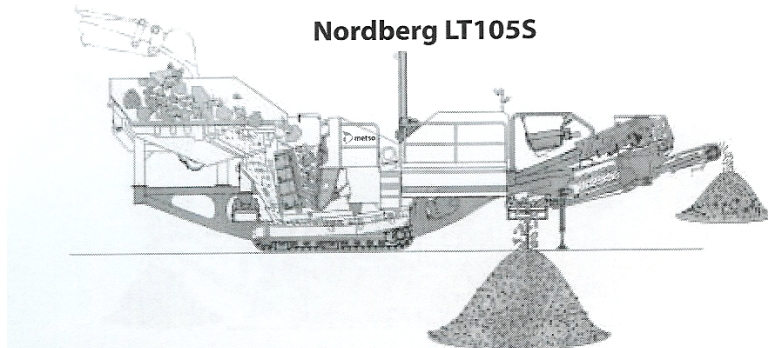
Si la sustitución del árido grueso convencional es menor o igual al 20%, las propiedades mecánicas permanecen prácticamente constantes, por lo que está permitida su utilización en España, bajo las recomendaciones establecidas en el anejo 15 de la EHE-08.

La obtención del árido reciclado procede de dos fuentes principales: los residuos fruto del propio proceso de construcción y de la demolición de estructuras existentes. Independientemente de otros factores, el origen de los mismos, induce distintas características en el árido, fundamentalmente vinculadas al envejecimiento y grado de hidratación del mortero adherido, el cual siempre está presente, en mayor o menor medida, en el árido reciclado procedente del hormigón.

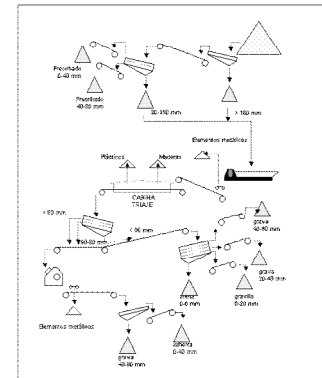
La operación de demolición debe considerarse de forma que permita el máximo grado de reutilización de componentes y materiales. La manera de mejorar la calidad del residuo de demolición es la demolición selectiva, más cara en comparación con los métodos tradicionales de demolición. Dicho proceso, favorece el conocimiento del futuro árido reciclado, permite una preselección según la calidad del hormigón a demoler y favorece la uniformidad en la calidad.

Los procesos para la producción de los áridos reciclados se realizan en plantas de tratamiento que, en líneas generales, son similares a las empleadas en áridos naturales, si bien incorporan de forma específica elementos para la separación de impurezas y otros contaminantes. Pueden clasificarse según su capacidad de transporte en plantas fijas y plantas móviles. En España existen 39 plantas fijas o semifijas de reciclado de RCDs.

- Plantas móviles: se llevan hasta el lugar de la demolición. Tienen una única entrada de alimentación, una cinta transportadora, una machacadora y una o dos cribas, Fotografía 2.1.
- Plantas fijas: instalaciones permanentes con cintas y elementos transportadores, varias cribas y frecuentemente dos tipos de machacadoras Fotografía 2.2.



Fotografía 2.1. Planta móvil



Fotografía 2.2. Planta fija

Las etapas de actuación de una planta fija son: precibado del material, trituración primaria, separación magnética, separación manual, trituración secundaria en caso de ser necesaria y finalmente clasificación del árido en dos fracciones, zahorra y grava. Las trituraciones, tanto primarias como secundarias, pueden ser repetidas las veces que sean necesarias hasta que se obtenga el tamaño de árido requerido para pasar a la siguiente fase del proceso.

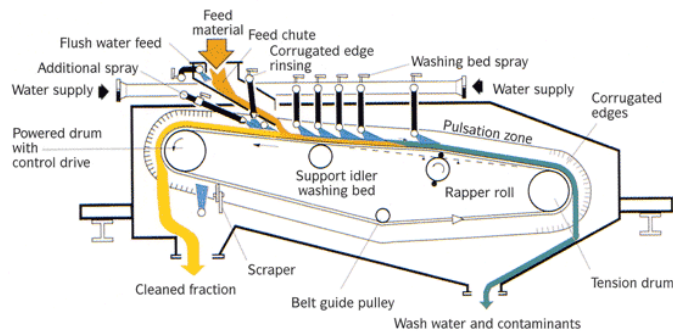
Las machacadoras utilizadas pueden ser: de mandíbulas, de impactos o de conos. La combinación más utilizada en los Países Bajos, donde cuentan con una amplia experiencia en el reciclado, es la machacadora de mandíbulas para la trituración primaria debido a su alta capacidad y reducido coste; y de impacto en la trituración secundaria, consiguiendo así una mayor calidad en el árido.

Un aspecto específico del procesado del árido reciclado respecto al árido natural es la eliminación de las impurezas y otros contaminantes. Durante la demolición, debe evitarse que los escombros de hormigón se mezclen con tierras, y otros materiales de construcción no deseables.

Los contaminantes de mayor tamaño pueden eliminarse manualmente, mientras que mediante el tamizado se eliminan las impurezas de menor tamaño, como puede ser la tierra, pudiéndose realizar en varias etapas para que resulte más efectivo.

Los residuos de demolición contienen importantes cantidades de acero que puede separarse magnéticamente. En los residuos puede haber además aluminio, cobre, plomo, zinc y aleaciones. Éstos no son magnéticos y la forma más moderna de separación es por corrientes de Foucault.

La separación de los materiales de baja densidad puede tener lugar en seco, por separación manual, mecánica y corrientes de aire; o por vía húmeda, con baño de agua (Aquamator).



Fotografía 2.3. Sistema Aquamator

El hormigón que constituye la materia prima para la obtención del nuevo árido reciclado de hormigón debe ser examinado previamente a su procesado para evitar la presencia de áridos potencialmente reactivos frente a los alcalinos. Debe evitarse también el hormigón de cemento aluminoso y determinarse los contenidos originales de sulfatos y cloruros.

La calidad del árido obtenido puede contener como principales contaminantes madera, yeso, arcilla, aluminio y plásticos, sin olvidar el vidrio que, según el tipo, puede acarrear una futura reacción álcali-sílice. Es preciso limitar los porcentajes máximos de contaminantes y analizar con la frecuencia debida los áridos obtenidos.

La presencia de yeso debe ser reducida a través de severos criterios de aceptación previa del residuo de demolición, rechazándose la partida que contenga cantidades importantes de tal naturaleza. Además, el material fino ya triturado puede eliminarse en el lavado. En cualquier caso el control de sulfatos en el árido reciclado resultante debe ser sistemático.

Los áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición no suelen tener problemas de impacto ambiental por lixiviación de metales, ya que no suelen estar presentes en los materiales de origen. En cambio, las cantidades de sulfatos, que proceden casi siempre del yeso, pueden superar los límites establecidos en las aguas de lixiviación, estos pueden ser reducidos significativamente por lavado.



Una vez obtenidos los áridos reciclados, es necesario tener en cuenta una serie de recomendaciones para el correcto almacenamiento de los mismos.

- Es aconsejable que los áridos reciclados procedentes de hormigón de distintas calidades se almacenen separadamente.
- Almacenar en lugar distinto el árido grueso reciclado y el árido fino reciclado.
- Separar los áridos reciclados de los áridos naturales.
- Es aconsejable utilizar los áridos en condiciones de saturación.
- Conviene no almacenar los áridos finos durante un largo periodo de tiempo.

2.2- PROPIEDADES DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS

Las propiedades de los áridos reciclados a tener en cuenta para su utilización en hormigones son:

- **Granulometría:**

El porcentaje de árido grueso que se obtiene suele variar entre 70% y 90% del árido total producido. Este porcentaje depende además del tamaño máximo del árido grueso reciclado producido y de la composición del hormigón original. La fracción gruesa posee una curva granulométrica adecuada, que se puede englobar dentro de los usos granulométricos que recomiendan algunas normas internacionales para el empleo de árido grueso en hormigón estructural (ASTM, EN, norma japonesa, belga,...).

El árido reciclado genera finos durante su manipulación debido a la aparición de pequeñas partículas de mortero que se desprenden. Según algunos ensayos españoles, la generación de finos sobre fracciones gruesas ya clasificadas en el laboratorio puede variar entre 0,27% y 1,14%, situándose en la mayoría de los casos por debajo del límite del 1% del árido grueso establecido por la EHE.

La presencia de partículas finas en la superficie del árido reciclado puede originar problemas de adherencia entre éste y la pasta de cemento, además de provocar un aumento en la cantidad de agua de amasado necesaria.

Los áridos gruesos pueden obtener pequeños porcentajes de arena debido a la disgregación sufrida por el árido durante su manipulación. Dicho contenido de finos está limitado al 5%, según las recomendaciones de la Rilem.

- **Forma y textura:**

La presencia del mortero que queda adherido a los áridos del hormigón original provoca que la textura de los áridos reciclados sea más rugosa y porosa que la de aquéllos.

El coeficiente de forma del árido reciclado es similar al que puede presentar el árido natural. Sin embargo, los estudios que han empleado el método del índice de lajas para determinar la forma del árido grueso han encontrado diferencias entre el natural y reciclado, siendo menor el valor del índice de lajas en el caso del árido reciclado. Las únicas especificaciones para esta propiedad son las recogidas en las recomendaciones de Hong Kong, que fijan un valor del índice de lajas del 40%.

- **Densidad y absorción:**

La densidad del árido reciclado es inferior a la del árido natural y suele oscilar entre 2.100 y 2.400 kg/m³.

La absorción es una de las propiedades físicas del árido reciclado que presenta una mayor diferencia con respecto al árido natural, debido a la elevada absorción de la pasta que queda adherida a él. Los valores habituales de absorción están comprendidos entre 4-10%, incumpliendo en la mayoría de los casos el límite del 5% que establece la EHE-08.

Las fracciones más pequeñas presentan una menor densidad y una mayor absorción que las gruesas, debido a que en las primeras se concentra un mayor porcentaje de pasta.

La calidad del hormigón original y las técnicas de procesado también influyen en el valor de la densidad y la absorción del árido reciclado. En hormigones de baja relación a/c y por lo tanto alta resistencia, suelen darse áridos de mayor calidad (menor absorción y mayor densidad). Ocurre lo mismo cuando el procesado del árido grueso se realiza en etapas sucesivas de trituración, al eliminarse un mayor contenido de mortero la calida mejora sustancialmente.

Las diferentes normativas internacionales, establecen límites para la absorción que oscilan entre el 6 y el 10% y la densidad mínima, que también se limita entre 2000 y 2200 kg/m³. Además, establecen clasificaciones del hormigón reciclado según su composición (Rilem, norma belga, norma alemana,...) o su origen (norma inglesa), y limitan la resistencia del hormigón (25-35 MPa) en función del porcentaje de árido reciclado incorporado para ambientes no agresivos; siendo necesarias para ambientes agresivos, la comprobación del comportamiento del hormigón frente a reacciones álcali-árido.

Estudios españoles establecen en el 7% un límite recomendable de la absorción del árido reciclado.

- **Coefficiente de Los Ángeles:**

El árido reciclado presenta un elevado coeficiente de los Ángeles ya que en el ensayo se elimina todo el mortero que queda adherido al árido, además de la pérdida de peso propia del árido natural.

El valor esperable del coeficiente de Los Ángeles del árido reciclado puede situarse en un rango muy amplio de 25-42%, dependiendo entre otros factores del tamaño de partícula y la calidad del hormigón original, así como del propio coeficiente de Los Ángeles del árido natural que contenga. Generalmente, aumenta en fracciones granulométricas de menor tamaño.

- Propiedades químicas y durabilidad:

Los áridos reciclados pueden presentar un contenido apreciable de cloruros, en función de la procedencia del hormigón usado como materia prima, especialmente en hormigones procedentes de obras marítimas, puentes o pavimentos expuestos a las sales para el deshielo. Asimismo, los hormigones en los que se haya utilizado aditivos acelerantes, pueden también contener una elevada cantidad de cloruros.

Los países que disponen de recomendaciones para el empleo de árido reciclado en hormigón, establecen los mismos límites en ión cloro fijados para los áridos naturales. Para el caso español en hormigón estructural se fijaría en un contenido máximo de 0,05% de ión cloruro.

También pueden aparecer concentraciones elevadas de sulfatos en los áridos reciclados, ya que al contenido propio del árido natural, se le añaden los sulfatos que contiene la pasta adherida y la presencia de contaminantes como el yeso cuando el hormigón procede de edificación, que pueden producir problemas debido a la carbonatación y expansiones en el hormigón. Una de las posibles medidas para reducir el contenido de yeso es eliminar del árido reciclado los tamaños más finos, ya que es en ellos donde se concentra una mayor cantidad de yeso.

Las recomendaciones sobre utilización de árido reciclado establecen el mismo límite de sulfatos que para el árido natural.

En cuanto a la resistencia a la helada, algunos autores rechazan el ensayo de resistencia a la helada realizado con soluciones de sulfato no es adecuado para evaluar la durabilidad de los áridos reciclados, teniendo en cuenta que estas soluciones tienen un efecto químico destructivo sobre la pasta de cemento, pudiendo dar resultados no representativos.

Los áridos reciclados procedentes de hormigón de pavimentos, presentan mejor comportamiento en este ensayo, posiblemente debido a la buena calidad del árido que se suele utilizar en esta aplicación y a la incorporación de aireantes en el hormigón.

La única norma que introduce para el árido reciclado especificaciones adicionales sobre esta propiedad es la norma japonesa, haciéndolo exclusivamente para aquellos áridos utilizados en obra pública (no siendo necesarios para aplicaciones de edificación).

Finalmente, se tienen en cuenta las reacciones del árido reciclado con los álcalis del cemento, especialmente en ambientes húmedos cuando el contenido de alcalinos del hormigón es elevado, dando lugar a expansiones en el hormigón. El uso de árido reciclado puede favorecer estas reacciones al incorporar mayor contenido de alcalinos debido a la pasta adherida. Por este motivo se recomienda, un estudio complementario de reactividad potencial del árido, tanto natural como reciclado, para ser utilizado en la mezcla.



- **Contaminantes e impurezas:**

La presencia de contaminantes e impurezas, es uno de los mayores problemas que presenta este tipo de árido. Estos contaminantes pueden ser muy variados, como plástico, madera, yeso, ladrillo, vidrio, materia orgánica, aluminio, asfalto, etc.

Estas impurezas producen en todos los casos un descenso de resistencia en el hormigón, más pronunciado cuando son elementos como cal o arcilla, y en menor grado cuando se trata de asfalto o pinturas. Además, pueden presentar otros problemas, como reacciones álcali-árido (vidrio), ataque por sulfatos (yeso), desconchados superficiales (madera o papel), elevada retracción (tierras arcillosas) o mal comportamiento hielo-deshielo (ladrillos).

El árido procedente de escombros de hormigón presenta generalmente un reducido contenido de impurezas, mientras que la incorporación incluso de pequeños porcentajes de escombros de un edificio, aumenta generalmente la presencia de diferentes materiales como cerámica, madera, yeso o vidrio. Además las fracciones más finas suelen incorporar un mayor contenido de impurezas.

2.3- HORMIGÓN RECICLADO

Para la dosificación del hormigón reciclado, en principio se pueden emplear los métodos convencionales de dosificación, aunque se han desarrollado algunas experiencias específicas.

La determinación del diagrama de dosificación específico para sustituciones del 100% del árido reciclado permite verificar la influencia de las características intrínsecas del mismo en las propiedades del hormigón. El diagrama está construido a partir de 3 gráficas:

- La variación de la resistencia a compresión con la relación agua cemento (ley de Abrams); $f_c = \frac{K_1}{K_2^{A/C}}$
- La dependencia de la trabajabilidad con la relación agua / materiales secos (ley de Lyse); $m = K_3 + K_4 \times A/C$; (m = contenido de áridos/contenido de cemento)
- El consumo de cemento para 1m^3 de hormigón es inversamente proporcional a la relación agua/cemento y a la cantidad de áridos. $C = \frac{1}{A/C + K_5 \times m}$

Para determinar el contenido de agua en la dosificación de hormigón con áridos reciclados, hay que tener en cuenta que la absorción de agua es mucho mayor en los áridos reciclados que en los convencionales. Así, se puede considerar que el hormigón reciclado elaborado con áridos gruesos reciclados y arena natural requiere entre un 5% y un 10% más de agua que los hormigones producidos con áridos naturales para conseguir la misma consistencia.

Para asumir el incremento en la demanda de agua se puede presaturar el árido o incrementar el agua de amasado. También es posible corregir este efecto mediante la utilización de aditivos.

Los tipos de cemento utilizados serán los mismos que se emplearían en un hormigón convencional para las mismas prestaciones, incrementando el contenido de cemento en la dosificación para mantener la misma resistencia y consistencia, debido a la menor calidad del árido reciclado. Según algunos estudios, este incremento será superior al 5% cuando se utilice el 100% de árido grueso reciclado y superior al 15% cuando se emplee tanto árido grueso como árido fino reciclado. Otros estudios confirman estos resultados, obteniendo incrementos entre el 7% y el 17% tanto mayor cuanto mayor sea la resistencia deseada.

La relación a/c se considera la misma que para un hormigón convencional cuando se trate de un porcentaje pequeño de árido reciclado, sufriendo variaciones para porcentajes mayores del 50%.

Las propiedades del hormigón fabricado con áridos reciclados tienden a empeorar a medida que aumenta el porcentaje de sustitución. En la práctica, los valores aconsejables de sustitución llegan hasta el 50 %. Únicamente se suele utilizar un 100% de árido reciclado como árido grueso en hormigones no estructurales, por ejemplo como hormigón de limpieza o pavimentos de tránsito reducido. En Holanda se han llevado a cabo experimentos de este tipo, resultando satisfactorios. Esto se recoge en diferentes normativas, estableciéndose limitaciones a su dosificación.

En la mayor parte de las experiencias realizadas, no se ha considerado el empleo de árido fino reciclado por las deficientes prestaciones que suele proporcionar, debido a sus características, que difieren en gran medida de las que posee el correspondiente árido natural: elevada presencia de contaminantes, dificultad en el control del agua libre, acusadas pérdidas de resistencia y elevada absorción de agua con consecuencias negativas para las características del nuevo hormigón.

El empleo de adiciones, como humo de sílice y cenizas volantes, han dado resultados positivos obteniendo efectos beneficiosos similares a los hormigones convencionales.

Algunos estudios españoles confirman lo anterior, indicando que en los hormigones reciclados que incorporan humo de sílice (en un porcentaje del 8% sobre peso de cemento), se constata el efecto beneficioso de esta adición en lo que a resistencias a compresión, cansancio y control de fisuración en elementos estructurales se refiere, si bien, unido a su mayor demanda de agua se genera un mayor volumen de huecos. Asimismo, se constata que estas mezclas presentan trabajabilidades similares a las del resto de hormigones mientras que es mayor su resistencia al vibrado y compactación.

La utilización de aditivos en las dosificaciones de hormigones con áridos reciclados, al igual que en los convencionales, permite conseguir adecuadas trabajabilidades, siendo especialmente ventajosa la utilización de aditivos superplastificantes para mejorar los aspectos relativos a la demanda de agua, especialmente en los casos en los que se utilice árido no presaturado.

Para la realización de una dosificación con árido reciclado, es necesario tener en cuenta una serie de pautas:

- Realizar dosificaciones previas para ajustar la cantidad de agua para obtener la consistencia requerida, la relación agua/cemento para obtener la resistencia exigida y la proporción entre árido fino y grueso para alcanzar la cohesión del hormigón fresco.
- Para una misma consistencia, la demanda de agua del hormigón con árido grueso reciclado es del orden de 5-10 % mayor que para el hormigón convencional.
- Debido a la mayor demanda de agua del hormigón con áridos reciclados, el contenido de cemento necesario será algo mayor para el hormigón con áridos reciclados que para el hormigón convencional. Se han desarrollado métodos específicos que han tenido en cuenta estos aspectos.

- Cuando se esté estimando la relación entre el árido fino y grueso, se debe tener en cuenta que la curva granulométrica de referencia para el árido reciclado es la misma que para el árido convencional.
- Si las dosificaciones son en peso se debe tener en cuenta la menor densidad del árido reciclado.
- Los métodos de dosificación utilizados para los hormigones convencionales pueden emplearse para los hormigones reciclados, debiéndose emplear los coeficientes de corrección para la resistencia a compresión, que dependen del porcentaje de árido reciclado utilizado y de la categoría resistente del hormigón. A las fórmulas establecidas por los distintos métodos de dosificación para los áridos convencionales se debe aplicar el factor de corrección r , debiéndose dosificar el hormigón reciclado para una resistencia igual a la que se quiere alcanzar, dividida por el factor r .

Una vez realizada la dosificación el siguiente paso es el amasado, en el que se encuentran distintas experiencias, tanto a nivel nacional como internacional. Se han empleado diferentes métodos de amasado del hormigón preparado con áridos reciclados, distinguiéndose fundamentalmente unos de otros en la necesidad de presaturar el árido, o bien de su premezclado en seco. Estas alternativas son adecuadas para altos porcentajes de sustitución. En el caso de porcentajes de árido reciclado reducidos, el procedimiento de fabricación puede ser el mismo que en un hormigón convencional.

- **Presaturación del árido:**

Para mitigar las variaciones de trabajabilidad y uniformidad, algunos autores, recomiendan saturar los áridos reciclados en agua mediante inmersión durante cierto tiempo; un mínimo de diez minutos, tiempo en el que el árido absorbe aproximadamente el 80% de su capacidad.

El principal inconveniente de este método es la dificultad de saber cuando está saturado el árido, con superficie seca y qué cantidad de agua utilizada en la saturación se combina o no con el cemento, además de presentar importantes problemas operativos a escala industrial, en cuanto a disponibilidad de instalaciones. Para reducir este efecto se recomienda el regado de los acopios de áridos (aspersión).

- **Mezclado en seco:**

Otra posibilidad de amasado consiste en el mezclado en seco de los distintos componentes del hormigón, añadiendo posteriormente el agua. La principal ventaja de este método radica en que las características mecánicas (resistencia a compresión, resistencia a tracción y módulo de elasticidad) pueden mejorar si los áridos reciclados son mezclados en seco con los naturales, posiblemente por un incremento del coeficiente de forma y por la pérdida de mortero viejo adherido en forma de polvo, cuyas partículas finas pueden influir en un aceleración de la hidratación del cemento.

Este método origina, en el caso de altos porcentajes de áridos reciclados, una rápida pérdida de fluidez durante los primeros 10 minutos, debido a que el árido reciclado grueso en condiciones secas se satura con el agua de amasado, aunque esto no parece afectar a la resistencia a compresión ni a otras propiedades del hormigón endurecido.

Para obtener la consistencia deseada en ambos casos, son posibles distintas alternativas:

- Cuantificar la cantidad de agua adicional que se debe añadir al hormigón durante el amasado mediante ensayos previos.
- Utilizar el árido saturado
- Añadir superplastificante en el hormigón

La última etapa del proceso, sería el transporte, puesta en obra y curado del hormigón reciclado. El transporte mediante camiones hormigonera es adecuado y permite realizar un reamasado final, antes de colocar el hormigón, añadiendo un superfluidificante que permita obtener la consistencia que proporcione la docilidad requerida a la masa de hormigón.

La puesta en obra del hormigón con áridos reciclados es análoga a la del hormigón convencional. En el caso de que se utilice bombeo, que es un procedimiento adecuado, se tendrá en cuenta que, en función de la altura a alcanzar, los ciclos de presión de bombeo pueden aumentar la absorción de agua por parte del árido reciclado y demandar un mayor control de este procedimiento.

En cuanto a la compactación, la vibración con vibradores internos es un procedimiento adecuado.

La tendencia del hormigón con áridos reciclados a sufrir mayor retracción y su reducida exudación aconseja, durante el proceso de curado, evitar las pérdidas prematuras de agua por evaporación, especialmente en condiciones meteorológicas desfavorables (ambiente seco, caluroso y con viento).

Todas las precauciones derivadas de las indicaciones anteriores adquieren mayor importancia cuanto más alto sea el porcentaje de sustitución en el que se emplea el árido reciclado y no tienen mayor trascendencia que en el hormigón convencional cuando el porcentaje de sustitución no supera el 20%,

Para concluir este apartado de hormigones reciclados, se recogen a continuación una serie de características propias del hormigón reciclado.

- La resistencia a compresión de los hormigones reciclados, para la misma relación a/c, es inferior a los de control convencionales.
- Los hormigones reciclados pueden presentar resistencias similares, o incluso superiores a los hormigones de origen de los áridos.

- La cantidad de mortero adherido del árido reciclado influye en la resistencia a compresión del hormigón.
- Diversas investigaciones demuestran que la sustitución de la arena natural por reciclada, puede sufrir pérdidas de resistencia de hasta el 50%.
- El aumento de la resistencia de los hormigones reciclados a partir de los 28 días es ligeramente superior que en los hormigones de control.
- El módulo de elasticidad de los hormigones reciclados es inferior al de los convencionales. Diversos autores indican mayores disminuciones que las observadas en resistencia a compresión y a su vez crecientes al aumentar el porcentaje de sustitución.
- Aunque con escasa información, se ha evaluado el diagrama tensión-deformación del hormigón reciclado, y éste presenta un comportamiento similar al de un hormigón convencional.
- El árido reciclado produce una mayor retracción en el hormigón que el natural.
- Tanto la fluencia como la retracción son superiores a las de los hormigones de control.
- Las resistencias a tracción y flexión presentan dispersión de resultados, debido a las diferentes calidades de los hormigones ensayados, aunque la tracción es una de las propiedades menos afectadas por la sustitución de los áridos naturales por reciclados.
- La densidad, como ya se ha mencionado, es inferior a la del hormigón convencional, tanto en hormigón fresco como endurecido.
- La incorporación de árido reciclado en el hormigón representa un aumento de su porosidad, capacidad de absorción y permeabilidad.
- La protección que ofrece el hormigón reciclado a las armaduras es inferior, especialmente para altos porcentajes de sustitución utilizando un árido reciclado de baja calidad. Es necesario garantizar el espesor del recubrimiento.

2.4- MARCO NORMATIVO

La fabricación de hormigones con áridos reciclados procedentes de residuos de hormigón estructural no es frecuente aún en España. La norma EHE del 2008 contiene, en el anejo 15, recomendaciones orientadas a introducir la sustitución de parte del árido grueso por árido reciclado, bien garantizado para sustituciones de hasta el 20%. Para porcentajes superiores, el efecto sobre las distintas propiedades físicas, mecánicas o químicas puede variar.

Al margen de estas recomendaciones de la EHE-08, no se encuentra ninguna norma de ámbito nacional, que garantice el empleo de áridos reciclados con total conocimiento de su comportamiento y respuesta una vez puesto en servicio, algo que también pasa en Italia, donde son las "Normas Técnicas para la Construcción" en el que, en el apartado 11.1.9.2 "agregados", se definen como aptas para la producción de hormigón para uso estructural de los agregados resultantes de la transformación de materiales naturales, pero que al igual que en España no tienen una norma específica, como si la tienen muchos países europeos que veremos a continuación.

En el ámbito internacional, son muchos los países que disponen ya de sus propias normativas y recomendaciones en este campo.

Cada normativa define unos coeficientes correctores a aplicar a los valores de resistencia, módulo, retracción,... varían en función del tipo de árido reciclado utilizado en la sustitución.

Según la RILEM (Unión internacional de laboratorios y expertos en materiales de construcción y estructuras), se puede emplear una proporción de hasta un 20% de árido reciclado sin ninguna limitación en su resistencia y su aplicación, siempre que el contenido de material cerámico sea inferior al 10%. Además, limitan la resistencia del hormigón en función del contenido de árido reciclado. De esta forma, en hormigones reciclados con áridos tipo I se limita la resistencia a 16 N/mm^2 , con áridos tipo II a 50 N/mm^2 , mientras que en el caso de emplear una combinación del 20% de árido grueso reciclado y 80% de árido natural, no se imponen límites a la resistencia a compresión del hormigón reciclado.

La normativa belga describe parámetros parecidos a los de la RILEM, estableciendo limitaciones a la absorción. Permiten la utilización de árido reciclado GBSB I en hormigones hasta 16 N/mm^2 , aumentando dicho valor a 30 N/mm^2 cuando se emplea árido GBSB II.

	GBSB I	GBSB II
Clase resistente	C16	C30
Clase de exposición	<ul style="list-style-type: none">- Interiores de edificios con ambiente seco- Elementos en suelos no agresivos y/o en contacto con agua no expuesta a heladas	<ul style="list-style-type: none">- Interiores de edificios con ambiente seco- Elementos en suelos no agresivos y/o en contacto con agua

Tabla 2.4. Límites de utilización de los hormigones en función del tipo de árido

La norma alemana DIN 1045, permite un empleo de hasta un 5% en peso de árido reciclado sin establecer restricciones adicionales al hormigón. Según el ambiente de aplicación esta norma establece ciertas limitaciones en relación con los porcentajes de sustitución.

La normativa inglesa no establece limitaciones en porcentajes de sustitución, sino en propiedades específicas. Por una parte, recomienda no utilizar el material que pasa por el tamiz de 5 mm por su efecto adverso en la demanda de agua y por contener un elevado nivel de contaminación, y por otra llevar a cabo un control de la posible reacción álcali – árido. Para los tipos de áridos definidos por esta norma, se establecen límites resistentes a los hormigones reciclados con ellos fabricados.

Las recomendaciones de Holanda sobre la utilización de árido reciclado son menos estrictas, permitiendo su empleo en hormigones hasta 45 MPa (medido en probeta cúbica). Para conseguir una resistencia adecuada, estas recomendaciones indican que se debe utilizar un mayor contenido de cemento, del orden de 40 kg/m³ más para una resistencia de 22.5 MPa y de 50 kg/m³ para conseguir 45 MPa. Cuando las sustituciones afectan únicamente al 20% de las fracciones gruesas no se especifican límites a la resistencia del hormigón reciclado.

Según el proyecto de norma japonesa “Uso de árido reciclado y hormigón reciclado”, para el empleo de árido reciclado en hormigón se distinguen dos grandes grupos: uso en obra civil y uso en edificación. Dentro de ellos se establecen clasificaciones del árido en función de aplicaciones más concretas. El árido tipo 1 es el de mayor calidad y se puede emplear en hormigón en masa o armado con fines estructurales, mientras que el árido tipo 2 es adecuado para hormigón en masa o losas de hormigón y el tipo 3 para hormigones pobres. Las recomendaciones sobre la categoría resistente de los distintos tipos de hormigón reciclado y sus posibles aplicaciones se recogen en la tabla 2.2.

Tipo	Árido grueso	Árido fino	Resistencia característica (MPa)	Usos recomendados
OBRA CIVIL				
I	Tipo 1	Natural	18-24	Hormigón armado o en masa, pequeñas estructuras de puentes, túneles, muros
II	Tipo 2	Natural o Tipo 1	16-18	Hormigón en masa, muros de gravedad...
III	Tipo 3	Tipo 2	<16	Hormigón de baja calidad, rellenos, hormigón de nivelación...
EDIFICACIÓN				
A	Tipo 1	Natural	≥ 18	Hormigón convencional de edificación
B	Tipo 2	Natural	≥ 18	Cimentaciones, pilares in situ, losas de hormigón
C	Tipo 2	Tipo 1	≥ 18	Losas de cimentación, suelos-cemento, rellenos, hormigón de nivelación
D	Tipo 3	Tipo 2	≥ 18	Hormigón de baja calidad, rellenos, hormigón de nivelación...

Tabla 2.4.1 Criterios de utilización de los hormigones en función del tipo de árido



En Hong Kong se establece un criterio similar, basado en el porcentaje de árido reciclado utilizado, aunque las resistencias permitidas son mucho menores. Así, está permitido el uso de árido reciclado para la fabricación de hormigón, cuya categoría resistente viene definida por dos intervalos en función del porcentaje de árido reciclado presente. La resistencia queda limitada a 20 MPa si todo el árido es reciclado, aumentando a 25 MPa si el árido reciclado se incorpora en un porcentaje máximo del 20%.

Según las recomendaciones para la utilización de árido reciclado en la producción de hormigón reciclado existentes en Australia (“Guide for Specification of Recycled Concrete Aggregates (RCA) for Concrete Production”), el árido reciclado procedente de hormigón (Clase 1) puede utilizarse para la fabricación tanto de hormigón en masa como de hormigón armado de resistencia a compresión hasta 40 MPa, en aplicaciones no estructurales. La sustitución puede alcanzar la utilización de hasta el 100% de árido grueso reciclado. Se debe prestar especial cuidado en la uniformidad de los resultados obtenidos en la resistencia a compresión del hormigón reciclado.

El control de los áridos en Estados Unidos se hace siguiendo la normativa ASTM y, aunque no existe una normativa específica para los áridos reciclados, la experiencia estadounidense hace se definan los usos recomendados para cada tipo de árido reciclado.

Finalmente, se adjunta una tabla comparativa de la situación del marco legal internacional en esta materia en el año 2006.

PROCEDENCIA	Árido grueso reciclado	Categoría resistente (MPa)
Rilem	100% AG Tipo I	16
	100% AG Tipo II	50
	AG Tipo III (mezcla con reciclado < 20%)	Sin límite
Hong Kong	100% AG reciclado	20
	AG reciclado < 20%	25-30
Bélgica	100% AG GBSB I	16
	100% AG GBSB II	30
	AG reciclado < 20%	--
Holanda	100% AG reciclado y aumento de cemento en 40 kg/m ³	17,5-22,5 (cúbica)
	100% AG reciclado y aumento de cemento en 50 kg/m ³	27,5-45 (cúbica)
	AG reciclado < 20%	Sin límite
Reino Unido	100% AG (RCA)	40
	100% AG (RA)	16
	AG reciclado < 20%	Sin límite
Japón (obra civil)	I	18-24
	II	16-18
	III	<16
	AG reciclado < 20%	--
Australia (aplicación no estructural)	Clase 1	40
	AG reciclado < 20%	--

(*) **RCA: Árido reciclado procedente de hormigón**

(**) **RA: Árido reciclado procedente de residuos de distinta naturaleza (cerámicos, hormigón, asfalto).**

Tabla 2.3. Comparación de normativas (2006)

2.5- ACTUACIONES REALES CON HORMIGÓN RECICLADO

En España existen pocas realizaciones de hormigón que, con fines estructurales, empleen árido reciclado en su composición. Sin embargo, varios países europeos poseen una reconocida experiencia en este tema e, incluso, su aplicación es frecuente. Este es el caso de los Países Bajos, en donde, desde 1991, se exige la utilización de árido procedente de hormigón reciclado en un porcentaje del 20% de la fracción gruesa en todos los proyectos de hormigón, con excepción de las estructuras de hormigón pretensado. En otros países como Alemania, Reino Unido, Bélgica, Dinamarca o Australia, también existen experiencias prácticas de utilización de áridos reciclados procedente del derribo de estructuras.

Las obras portuarias, puentes y edificaciones más representativas realizadas con árido reciclado se exponen a continuación.

- Esclusa del puerto de Amberes (Bélgica)

Para la ampliación del puerto de Amberes, se procedió, en 1987, a la demolición de varios muros del puerto y la construcción de una esclusa mayor. La demolición se realizó con explosivos, originando unos 80.000 m³ de escombros. Por consideraciones tanto ambientales como económicas, se optó por la utilización de los escombros de hormigón para la fabricación de hormigón reciclado.



Fotografía 2.1. Puerto de Amberes

- **Compuerta de Almelo (Países Bajos)**

En las obras de la compuerta del puerto situado en las proximidades de Almelo (1988) se emplearon unos 2000 m³ de hormigón reciclado para la construcción de la losa de cimentación bajo el agua.



Fotografía 2.2. Compuerta de Almelo

- **Esclusa de un dique en Schijndel (Países Bajos)**

En las obras de la esclusa de un dique próximo a la ciudad de Schijndel, en los Países Bajos, se emplearon unos 300 m³ de hormigón, en el cual todo el árido grueso fue reemplazado por áridos reciclados.

- **Esclusa de un dique en Nieuw Statenzijl (Países Bajos)**

Para la construcción de la esclusa de un dique de Nieuw Statenzijl, se emplearon unos 3000 m³ de hormigón reciclado.

- **Bloque de oficinas en Watford (Reino Unido)**

La primera experiencia práctica en la que se utilizó hormigón con áridos reciclados en el Reino Unido se llevó a cabo en Watford, en el año 1995, con la construcción de un bloque de oficinas. Se empleó hormigón triturado procedente de la demolición de un edificio de doce plantas situado en el centro de Londres. El árido grueso se utilizó para la construcción de cimentaciones, pilares y forjados.

- Casa reciclada de Odense (Dinamarca)

Uno de los proyectos más significativos sobre reutilización de escombros de demolición para la fabricación de hormigón ha tenido lugar en Dinamarca con la construcción del Great Belt Link, una gran red de enlace entre Dinamarca y Suecia, que suponía la modificación de la red de carreteras existentes y la demolición de varias estructuras, entre las que se encontraba la demolición de un puente de hormigón armado. En esta demolición se llevaron a cabo distintas investigaciones sobre técnicas de demolición y utilización del hormigón triturado como árido para un nuevo hormigón. Finalmente, los escombros fueron procesados y empleados en la fabricación de hormigón, que se utilizó para la construcción de "La casa reciclada", en Odense y las cimentaciones de pantallas acústicas. Esta casa reciclada consiste en un bloque de catorce apartamentos de tres pisos con sótano.



Fotografía 2.3. Casa reciclada de Odense

- Hong Kong Wetland Park (Hong Kong)

Hong Kong Wetland Park está situado al noroeste de la ciudad de Hong Kong. Completada su construcción, prevista para finales del año 2005, el mismo dispondrá de 10.000 m² para el área de visitantes repartidos en galerías de exhibición, teatros, tiendas de regalos, cafeterías, área de juegos para niños y aulas. En la construcción de dicho parque, se han empleado áridos reciclados para sustituir parte del árido natural en la fabricación del hormigón de algunos elementos estructurales. En total se han colocado unos 5000 m³ de hormigón reciclado.

- Edificio Vilbeler Weg en Darmstadt (Alemania)

Su construcción se inició en noviembre de 1997 y finalizó en febrero de 1998. Se colocaron más de 480 m³ de hormigón con árido reciclado fabricado en una central puesta en marcha en junio de 1997, que recibió la aprobación para elaborar dicho hormigón en septiembre del mismo año, tras cuatro meses de pruebas.

La premisa de partida fue emplear, tanto para el árido grueso como para el fino, material reciclado.

- Edificio Waldspirale en Darmstadt (Alemania)

Se trata del segundo proyecto de edificación realizado con hormigón de árido reciclado en esta localidad, construido de noviembre de 1998 a septiembre de 1999. Para su ejecución, se utilizó un método para controlar la consistencia del hormigón durante el proceso de amasado.

- Viaducto de la carretera RW 32 cerca de Meppel (Países Bajos)

En el año 1990, para la construcción de los elementos de un viaducto cerca de Meppel en los Países Bajos, se utilizó árido grueso reciclado (en un porcentaje de un 20 %) para todas las partidas de hormigón del puente. La cantidad total de hormigón reciclado que se usó fue de 11.000 m³. También, durante el año 1988, en la misma carretera RW 32, se emplearon aproximadamente 500 m³ de hormigón reciclado en la construcción de los estribos de otro viaducto.

- Puente atirantado sobre el río Turia

- La experiencia piloto, que finalizó en el año 2008, propuso la utilización de hormigón reciclado en un puente atirantado de hormigón armado, situado en Manises (Valencia), propiedad de la Diputación de Valencia.

Este puente se ejecutó como sustitución de una estructura de hormigón existente. El objetivo del proyecto era reciclar el material de hormigón procedente de esta estructura para la fabricación de parte del hormigón de la nueva estructura, utilizando una sustitución del 20% del árido natural por árido reciclado en el hormigón de un tramo de la losa.



Fotografía 2.3. Puente atirantado sobre el río Turia.

3-MATERIALES A EMPLEAR

3.1 CRITERIOS DE SELECCIÓN

3.2 CEMENTO

3.3 AGUA

3.4 ADITIVO

3.5 ARIDOS

3.6 COMPOSICIÓN DEL ÁRIDO RECICLADO



3.1- CRITERIOS DE SELECCIÓN

Los materiales a emplear han sido seleccionados por el tutor del proyecto, condicionados por la disponibilidad de material en el momento de desarrollo de la fase experimental.

Unos materiales como el cemento, han sido transportados hasta el laboratorio por compañeros que también desarrollaban su proyecto en el mismo, y otros como la arena y los áridos, han sido reunidos del mismo laboratorio, siendo restos de proyectos anteriores, por lo tanto no han sido exactamente los mismos en todos los ensayos, algo que para un proyecto de estas características, nunca debería de ser así.

A continuación, se detallan los diferentes materiales empleados en la fabricación de los hormigones de estudio.

3.2- CEMENTO

Se ha utilizado en todos los casos un cemento CEM-I 52.5R . Se ha decidido seleccionar este cemento ya que es uno de los más ampliamente utilizados en hormigón estructural.

La cantidad de cemento utilizado para los 30 litros de que consta cada amasada es de 11.40 kg para la relación A/C= 0.50 y de 8.25 kg para la relación A/C= 0.65.

Fabricado según la norma UNE-EN 197-1.

CARACTERÍSTICAS DEL CEMENTO:			Resultados			Especificaciones según UNE-EN 197-1
			media	Inferior	Superior	
CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS	Resistencia a Compresión MPa	2 días	41,9	37,5	46,3	≥ 30 MPa
		28 días	61,7	57,8	65,6	≥ 52.5 Mpa
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	Tiempos de fraguado (min)	Inicio	170	150	200	≥ 45 min
		Fin	220	195	240	≤ 12 h
	Expansión (mm)		0,4	0,0	0,7	≤ 10 mm
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS	Pérdida por calcinación (%)		2,7	-	-	≤ 5%
	Residuo Insoluble (%)		0,6	-	-	≤ 5%
	Contenido en sulfatos (%)		2,99	2,85	3,32	≤ 4%
	Contenido en Cloruros (%)		0,07	-	-	≤ 0.1%
	Composición en núcleo de cemento (%)	% Clinker	96,88	96,05	97,71	95 - 100 %
		% Componentes minoritarios	3,12	-	-	≤ 5%
Contenido en Cr VI soluble (%)		0,0000	0,0000	0,0000	≤ 0.0002%	

Tabla 3.2 Características del cemento.

3.3- AGUA

Los requisitos del agua son exactamente los mismos exigidos en el caso de hormigones tradicionales.

Se debe prestar especial atención a la humedad de los materiales, que pueden presentar diferentes grados, teniendo por tanto que regular el agua en cada dosificación ya que de no ser así y añadir a la mezcla un porcentaje de agua superior al que le corresponde, influiría negativamente en la investigación, variando su relación A/C, e invalidando los resultados.

En esta investigación ha sido el árido fino, el que variaba su humedad, dado que se han utilizado nuevos sacos cerrados, pero también restos de otros ensayos que había en el laboratorio, dando lugar a áridos finos muy secos. Debido a esto se han tenido que recalcular las dosificaciones, calculadas previamente.

3.4- ADITIVO

El tipo de aditivo utilizado, es un aditivo superplastificante Sikament 500 HE. Se han utilizado cantidades comprendidas entre el 0.7 y el 2% del peso del cemento.

Aunque en la fabricación del hormigón se ha empleado el árido presaturado (sumergido en agua durante 10 minutos), se ha decidido utilizar un aditivo superplastificante en las mezclas, con el fin de que las amasadas en las que se preveía una mayor consistencia (aquellas con menor relación agua/cemento y una utilización total del árido reciclado) puedan presentar una fluidez adecuada.

El superplastificante cumple con los requisitos establecidos en la norma UNE- 934-2, “Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 2: Aditivos para hormigones.

Definiciones y requisitos”. Las características se muestran en la siguiente tabla:

Tipo:	Copolímeros vinílicos modificados y agentes orgánicos minerales
Aspecto:	Líquido marrón.
Densidad (25 C°):	Aprox 1.23 kg/lit
Contenido de sólidos:	30%
PH:	7-9

Tabla 3.3. Características del superplastificante.

3.5- ÁRIDOS

Se han empleado áridos naturales, finos y gruesos, y árido grueso reciclado.

3.5.1- ARENA

Es el único árido fino utilizado, y constituye la fracción granulométrica 0-4 mm con una humedad del 10%.

Se ha utilizado arena de río para todo el estudio (fotografía 3.5).



Fotografía 3.4

3.5.2- ARIDO GRUESO NATURAL

El árido grueso utilizado, es un árido de machaqueo, se ha empleado una fracción comprendida entre 4-20 mm para todos los hormigones.



Fotografía 3.5.2

3.5.3- ARIDO RECICLADO

Se ha utilizado un árido reciclado procedente de demolición de hormigón, con una fracción granulométrica de 4-16 mm.

El árido reciclado procedente de demolición de hormigón se caracteriza por tener como componente mayoritario árido y mortero adherido. En este caso, se realiza un análisis de composición del mismo de forma que se garantiza el tipo de árido a emplear.



Fotografía 3.5.3

3.6- COMPOSICIÓN DEL ÁRIDO RECICLADO

Este ensayo se hace atendiendo a la norma EN 933-11.

Se han cogido 3 muestras de 1 kg cada una (Masa inicial), y han sido secadas en la estufa a 50 C° durante 48 horas (M0). Al finalizar este primer periodo de secado, separamos las partículas retenidas en el tamiz 63 mm (M63), y las que pasan por el tamiz 4 mm (M4). Así obtenemos nuestra masa de muestra de ensayo (M1), $M1 = M0 - M63 - M4$.

Después se sumerge la muestra en agua y se agita, para así poder separar los flotantes (papel, madera etc...) de los no flotantes. Secamos la superficie de los flotantes y determinamos su volumen Vf. A continuación se secan los no flotantes en estufa durante 24 horas, y por último se separan en los distintos componentes.



Fotografía 3.6

- MUESTRA 1:

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	Árido reciclado 1/3
Tara	11,8 gr
Masa inicial (30-abr, 48h en estufa a 50C°)	1012,03 gr
M0 (2-may, peso seco)	1003,80 gr
Masa retenida en el tamiz de 63, M63	0 gr
Masa que pasa por el tamiz de 4, M4	2,66 gr
Masa de la muestra de ensayo, M1	1001,14 gr
Masa tras saturar 30 min	1068,29 gr
Masa tras secado en estufa 24 h	1007,63 gr
No-flotantes, M2	978,55 gr
No-flotantes reducido a 1000 part, M3	978,55 gr

Tabla 3.5

No flotantes

Clase	Denominación	Masa seca (gr)	P (%)	Formulas
X	Otros: -arcilla, tierra, metales,			100 x Mx/M1
	-madera, plásticos y gomas no flotantes	0	0,00	
	- yesos	22,59	2,24	
Rc	Hormigón	363,01	36,03	100 x (M2/M1) x (MRc/M3)
	Productos fabricados con hormigón	349,7	34,71	
Ru	Áridos redondeados	283,46	28,13	100 x (M2/M1) x (MRu/M3)
	Áridos angulosos		0,00	
Rb	Azulejos, arcillas, ladrillo,...	31,99	3,17	100 x (M2/M1) x (MRb/M3)
Ra	Materiales Bituminosos Aridos con betún	14,41	1,43	100 x (M2/M1) x (MRa/M3)
Rg	Cristal	0	0,00	100 x (M2/M1) x (MRg/M3)

Tabla 3.6

- MUESTRA 2:

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	Árido reciclado 2/3
Tara	11,81
Masa inicial (30- abr 48 h en estufa a 50 C°)	1032,81
M0 (2-may peso seco)	1024,80
Masa retenida en el tamiz de 63,M63	0
Masa que pasa por el tamiz de 4, M4	1,85
Masa de la muestra de ensayo, M1	1022,95
Masa tras saturar 30 min	1092,80
Masa tras secado en estufa 24 h	1030,46
No-flotantes, M2	1001,94
No-flotantes reducido a 1000 part, M3	1001,94

Tabla 3.7

No flotantes

Clase	Denominacion	Masa seca (gr)	P (%)	
X	Otros:-arcilla, tierra, metales, -madera, plásticos y gomas no flotantes - yesos	0	0,00	100 x M _x /M ₁
		21,01	2,04	
Rc	Hormigón Productos fabricados con hormigón	350,08	33,97	100 x (M ₂ /M ₁) x (MR _c /M ₃)
		358,5	34,79	
Ru	Áridos redondeados Áridos angulosos	316,95	30,76	100 x (M ₂ /M ₁) x (MR _u /M ₃)
			0,00	
Rb	Azulejos, arcillas, ladrillo,...	28,09	2,73	100 x (M ₂ /M ₁) x (MR _b /M ₃)
Ra	Materiales Bituminosos Aridos con betún	14,08	1,37	100 x (M ₂ /M ₁) x (MR _a /M ₃)
Rg	Cristal	0	0,00	100 x (M ₂ /M ₁) x (MR _g /M ₃)

Tabla 3.8

- MUESTRA 3:

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	Árido reciclado 3/3 (gr)
Tara	11,71
Masa inicial (30-abr 48 h en estufa a 50 C°)	1014,71
M0 (2-may peso seco)	1007,49
Masa retenida en el tamiz de 63, M63	0
Masa que pasa por el tamiz de 4, M4	1,85
Masa de la muestra de ensayo, M1	1005,64
Masa tras saturar 30 min	1063,58
Masa tras secado en estufa 24 h	1011,88
No-flotantes, M2	990,33
No-flotantes reducido a 1000 part, M3	990,33

Tabla 3.9

No flotantes

Clase	Denominación	Masa seca (gr)	P (%)	
X	Otros:-arcilla, tierra, metales,			100 x Mx/M1
	-madera, plásticos y gomas	0	0,00	
	no flotantes	15,31	1,51	
Rc	Hormigón	298,17	29,47	100 x (M2/M1) x (MRc/M3)
	Productos fabricados con hormigón	309,57	30,59	
Ru	Áridos redondeados	395,25	39,06	100 x (M2/M1) x (MRu/M3)
	Áridos angulosos		0,00	
Rb	Azulejos, arcillas, ladrillo,...	33,75	3,34	100 x (M2/M1) x (MRb/M3)
Ra	Materiales Bituminosos Áridos con betún	16,85	1,67	100 x (M2/M1) x (MRa/M3)
Rg	Cristal	0	0,00	100 x (M2/M1) x (MRg/M3)

Tabla 3.10

- Comparativa

DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN	Resultados experimentales	Valores máx. EHE 08
Flotantes	Plástico,papel,...		1%
Rx	Yeso	0.843	
Rg	Cristal	0.003	
Ra	Materiales Bituminosos	7.843	1%
	Áridos con Betún		
Rb	Material cerámico	2.76	5%
Ru	Áridos redondeados	24.91	
	Áridos angulosos		
Rc	Hormigón	65.34	
	Áridos con hormigón		

Tabla 3.11

4- HORMIGONES

4.1 DOSIFICACIONES

4.2 PREPARACION DE LAS PROBETAS

4.3 PREPARACIÓN DE LOS MATERIALES

4.4 PROCESO DE AMASADO

4.5 CONO DE ABRAMS

4.6 VIBRADO Y FRAGUADO

4.7 DESMOLDE Y CURADO

4.1- DOSIFICACIONES

4.1.1- AJUSTE DE DOSIFICACIONES

Se han tenido que ajustar las dosificaciones teóricas calculadas previamente, debido en gran medida a la humedad de la arena, dado que se han utilizado nuevos sacos cerrados, pero también restos de otros ensayos que había en el laboratorio, dando lugar a áridos finos muy secos, que variaban la humedad principal de la arena.

- Para la relación A/C= 0.50

	18/03/2013		08/04/2013	19/03/2013
	H0.50-0%	H0.50-20%	H0.50-50%	H0.50-100%
Humedad	10%	10%	10%	10%
Absorción	2%	2%	2%	2%
	8%	8%	8%	8%
Cantidad real de arena	25,32	23,83	25,46	27,34
Aporte de agua	2,03	1,91	0,44	2,19
Agua real	3,47	3,46	5,08	3,51
Agua total	5,49	5,36	5,52	5,70
A/C real	0,48	0,47	0,48	0,50
Árido reciclado	Absorción 8%	Absorción 8%	Absorción 8%	Absorción 8%
Cono de Abrams	3 cm (seca)	3 cm (seca)	10 cm	15 cm(líquida)
Peso Sat. Máx. teórico		6,01	14,22	25,90
Peso Rec. Tras Sat		6,12	14,245	25,33
Saturación Rec		0,495	0,934	1,091
70% retenido Abs.		0,346	0,654	0,764
Aporte de agua		0,148	0,280	0,327
A/C efectiva		0,48	0,51	0,53

Tabla 4.1.

- Para la relación A/C= 0.65

	09/04/2013		08/04/2013	19/03/2013
	H65-0%	H65-20%	H65-50%	H65-100%
Humedad	10%	10%	10%	10%
Absorción	2%	2%	2%	2%
	8%	8%	8%	8%
Cantidad real de arena	29,95	30,59	31,39	32,78
Aporte de agua de la arena	2,396	2,447	2,511	2,622
Agua real	2,966	2,915	2,851	2,740
Agua total	5,363	5,363	5,363	5,362
A/C real	0.65	0,65	0,65	0,65
Árido reciclado	Absorción 8%	Absorción 8%	Absorción 8%	Absorción 8%
Cono	15 cm (líquida)	18 cm	17 cm	15 cm (líquida)
Peso Sat. Máx. teórico		5,79	13,58	24,25
Peso Rec. Tras Sat		5,825	13,18	23,9
Saturación Rec		0,402	0,467	1,206
80% retenido abs.		0,281	0,327	0,844
Aporte de agua		0,121	0,140	0,362
A/C efectiva		0,66	0,67	0,69

Tabla 4.1.1

4.1.2- DOSIFICACIONES FINALES

En las tablas 4.1 y 4.2 podemos observar las dosificaciones finales de todos nuestros hormigones. Estas dosificaciones están hechas para 30 litros de mezcla, por amasada.

- Para la relación A/C= 0.50

H0.50	unidades	H0.50-0%	H0.50-20%	H0.50-50%	H0.50-100%
CEMENTO	kg	11,40	11,40	11,40	11,40
AGUA	kg	3,66	3,63	3,58	3,51
(0-4c)	kg	25,48	25,90	26,46	27,34
4-20C	kg	29,20	22,50	13,31	0,00
(4-16R)	kg	0,00	5,63	13,31	24,24
A/C	%	0,32	0,32	0,31	0,31
ADITIVO	%	0,70	0,70	0,70	0,70
ADITIVO	kg	0,08	0,08	0,08	0,08

Tabla 4.1.2

- Para la relación A/C= 0.65

H0.65	unidades	H0.65-0%	H0.65-20%	H0.65-50%	H0.65-100%
CEMENTO	kg	8,25	8,25	8,25	8,25
AGUA	kg	2,97	2,92	2,85	2,74
(0-4C)	kg	29,95	30,59	31,39	32,78
4-20C	kg	28,32	21,69	12,71	0,00
(4-16R)	kg	0,00	5,42	12,71	22,69
A/C	%	0,36	0,35	0,35	0,33
ADITIVO	%	0,70	0,70	0,70	0,48
ADITIVO	kg	0,06	0,06	0,06	0,04

Tabla 4.1.3

4.2- PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS

Hemos utilizado un total de 17 probetas por amasada, 14 cúbicas de 10x10, 2 cilíndricas de 30x10 y 1 prismática de medidas 50x10x10.

En la preparación, hemos reunido todas las probetas necesarias para nuestras amasadas y hemos procedido a limpiarlas (Fotografía 4.2), saltando con espátulas y cepillo metálico, cualquier partícula de hormigón que hubiera podido quedar de amasadas anteriores.

Las cilíndricas, hechas con tubos de PVC, deben ser selladas con cinta adhesiva, tanto por el lateral, como por la cara inferior (Fotografía 4.2.2).

La probeta prismática es de piezas de acero, y debe ser montada correctamente para evitar cualquier tipo de fuga de la pasta.

Una vez preparadas, untamos todas las probetas con desmoldante, asegurando de esta manera un buen desmoldado (Fotografía 4.2.1).



Fotografía 4.2



Fotografía 4.2.1



Fotografía 4.2.2

4.3- PREPARACIÓN DE LOS MATERIALES

Los materiales se han mantenido en el laboratorio un mínimo de 24 horas antes de la fabricación a una temperatura entre 20-25 °C. Se han pesado por separado las distintas fracciones de árido utilizadas: en nuestro caso, grava natural (4/20) mm , arena (0/4) mm y árido reciclado (4/16) mm (Fotografía 4.2), empleando un peso electrónico con un error máximo de ± 0.5 % (Fotografía 4.2.1), seguidamente se han pesado la arena, el cemento el agua y el aditivo superplastificante.



Fotografía 4.3



Fotografía 4.3.1

Debido a la elevada absorción que presenta el árido reciclado, y tras comprobar en el estudio bibliográfico la conveniencia de utilizar el árido reciclado saturado para evitar una pérdida rápida de trabajabilidad del hormigón, tal y como aconsejan algunas normas y estudios, se ha optado por pre-saturar el árido grueso reciclado antes de ser introducido en la hormigonera.

El proceso seguido ha sido el siguiente:

- Se pesa por separado el árido reciclado.
- Se sumerge el árido en un recipiente con agua, durante 10 minutos (fotografía 4.3.2). De esta forma se consigue que el árido absorba aproximadamente un 75% de su capacidad, aproximándose a su condición de saturado con superficie seca.
- Después de este tiempo se vierte a un recipiente con pequeños agujeros, los cuales permitan la salida del agua, pero no la de los áridos (fotografía 4.3.3), se dejan escurrir durante otros 10 minutos, que es un tiempo suficiente para que el árido pierda el agua superficial.



Fotografía 4.3.2



Fotografía 4.3.3

4.4- PROCESO DE AMASADO

Para la fabricación de todos los hormigones (tanto de control como reciclados) se ha seguido el procedimiento descrito en la norma **ASTM C192 “Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory”** el cual detallo a continuación.

- Se humedece el interior del tambor de la hormigonera, se añaden los áridos gruesos mezclados (grava natural y reciclado) tras el proceso de saturación (Fotografía 4.4), y se vierte la mitad del agua de amasado.
- Se dan dos vueltas a la hormigonera para extender los áridos, añadiendo después el árido fino y el cemento (Fotografía 4.4.1)
- Se pone en marcha la hormigonera iniciándose el tiempo de amasado. Una vez esté en marcha se va añadiendo despacio el agua restante esta operación se ha completado en los primeros 15 segundos de amasado.
- El amasado se realiza en los siguientes intervalos de tiempo: 3 minutos de amasado, 3 minutos de reposo y 2 minutos más de amasado (Fotografía 4.4.2)
- El aditivo se ha incorporado disuelto con una parte del agua de amasado al final del proceso de fabricación y se ha tenido en cuenta el agua que aporta para mantener la relación agua/cemento.



Fotografía 4.4



Fotografía 4.4.1



Fotografía 4.4.

4.5-CONSISTENCIA MEDIANTE CONO DE ABRAMS

Es el ensayo que se realiza para medir la consistencia del hormigón fresco en su estado fresco.

El ensayo consiste en rellenar un molde metálico tronco cónico de dimensiones normalizadas. Se rellena mediante tres capas apisonadas con 25 golpes de varilla distribuidos uniformemente. Después al retirar el molde, se mide el asentamiento que experimenta la masa de hormigón colocada en su interior.

% ARIDO RECICLADO	CONO DE ABRAMS	
	A/C	
	0,5	0,65
0%	3	15
20%	3	18
50%	10	17
100%	15	15

Tabla 4.5 Resultados en cm.

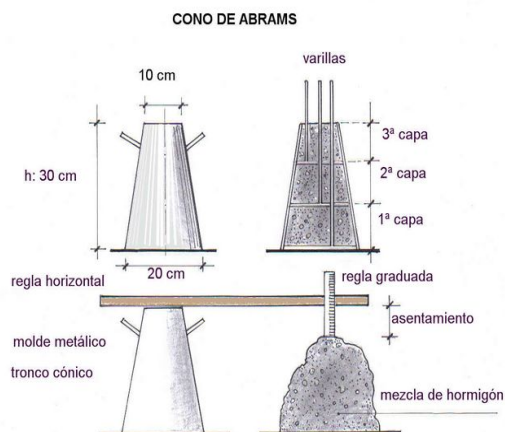


Imagen 4.5.2



Fotografía 4.5.1

4.6- VIBRADO Y FRAGUADO

Las probetas se compactaron mediante mesa vibratoria (Fotografía 4.4), después las colocamos todas en una mesa, tapadas con un film para evitar una pérdida prematura del agua por evaporación y favorecer así el curado del hormigón impidiendo la aparición de poros en superficie que perjudiquen la durabilidad del mismo (Fotografía 4.4.1). Posteriormente, las dejamos 24 horas curando, pasadas estas, procedimos a desmoldarlas.



Fotografía 4.6



Fotografía 4.6.1



Fotografía 4.6.2



Fotografía 4.6.3

4.7- DESMOLDE Y CURADO

Después de 24 horas fraguando bajo un plástico o film, procedemos a desmoldar, con un compresor de aire (Fotografía 4.5) y trasladamos únicamente las probetas fabricadas para determinar su retracción a la cámara húmeda (Fotografía 4.5.1), a una temperatura de 20 °C y una humedad del 50% (Fotografía 4.5.2) como indica la norma UNI 6555:1973, el resto son transportadas hasta el almacén del laboratorio, envueltas en un film para aislarlas de la humedad (fotografía 4.5.3), y acopiadas allí hasta su rotura (Fotografía 4.5.4), debido a que en la cámara de curado era muy pequeña para albergar las probetas de todos los alumnos que trabajábamos allí.



Fotografía 4.7



Fotografía 4.7.1



Fotografía 4.7.2



Fotografía 4.7.3



Fotografía 4.7.4

5- RESULTADOS

5.1 ENSAYO A COMPRESIÓN

5.2 ENSAYO A TRACCIÓN

5.3 ENSAYO DE RETRACCIÓN

5.4 ENSAYO DE MODULO ELASTICO

5.1- ENSAYO A COMPRESIÓN

5.1.1- METODO DE ENSAYO

El ensayo a compresión es un ensayo técnico para determinar la resistencia de un material o su deformación. La resistencia a la compresión simple es la característica mecánica principal del hormigón, la forma de expresarla es, en términos de esfuerzos, generalmente en Mpa. Se realiza preparando probetas normalizadas que se someten a compresión en una máquina universal (Fotografía 5.1 y 5.1.2).

Los distintos tipos de hormigones realizados, han sido ensayados a compresión, rompiendo para cada uno de ellos tres probetas a 3,7 y 28 días, según la norma UNE-EN 12390-2. Se han empleado probetas cubicas de 10 cm de arista.

Todos los métodos de cálculo y las especificaciones de esta instrucción se refieren a características del hormigón endurecido obtenidas mediante ensayos sobre probetas cilíndricas de 15x30 cm. No obstante, para la determinación de la resistencia a compresión, podrán emplearse también:

- Probetas cubicas de 15 cm de arista.
- Probetas cubicas de 10 cm de arista, en el caso de hormigones con $f_{ck} \geq 50\text{N/mm}^2$ y siempre que el tamaño máximo del árido sea inferior a 12mm.

Dado que nuestro tamaño máximo de árido es 16mm, no se cumple la normativa española, y nuestro ensayo queda recogido únicamente por la normativa italiana UNI-EN 12390-3:2003 Pruebas de hormigón endurecido- Resistencia a compresión de las probetas.



Fotografía 5.1



Fotografía 5.1.2



5.1.2- RESULTADOS

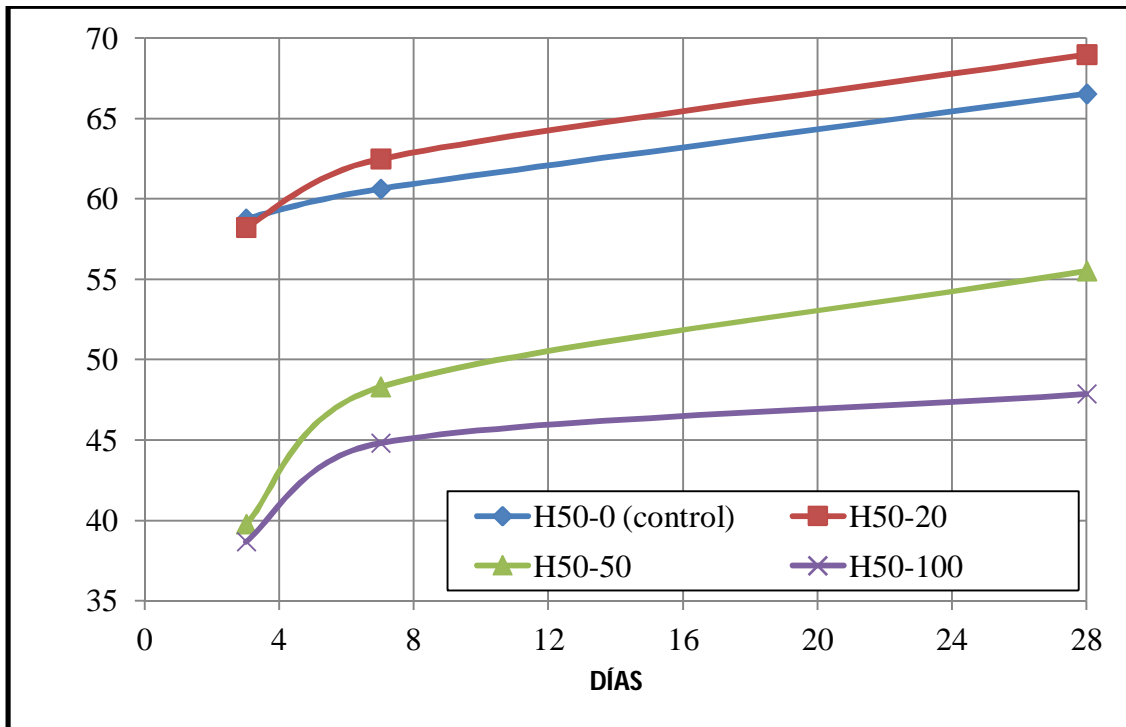
La utilización del árido reciclado en distintos porcentajes, ha provocado la disminución de la resistencia a compresión del hormigón reciclado, esta situación se ha dado en todos los casos excepto en el H50-20. Los valores medios de la resistencia a compresión del hormigón de control y reciclado, de las 3 probetas ensayadas cada día, y los porcentajes de aumento o disminución de la resistencia con respecto al hormigón de control, y a los mismos hormigones ensayados días anteriores, se recogen en la tabla 5.1.2 .

Resultados para las relaciones $A/C=0.5$ Y $A/C=0.65$.

	3 días		7 días			28 días		
	MPA	% respecto al H. de control	MPA	% respecto al H. de control	% respecto al H. de 3 días	MPA	% respecto al H. de control	% respecto al H. de 7 días
H50-0	58,76		60,31		2,63%	66,52		10,30%
H50-20	58,22	0,92%	62,48	-3,61%	7,32%	68,97	-3,68%	10,37%
H50-50	39,76	32,33%	48,30	19,91%	21,48%	55,51	16,55%	14,93%
H50-100	38,67	34,19%	44,81	25,70%	15,88%	47,86	28,05%	6,81%
H65-0	50,37		56,64		12,44%	63,16		11,51%
H65-20	44,42	11,82%	47,51	16,12%	6,95%	55,38	12,32%	16,57%
H65-50	31,10	38,26%	41,37	26,96%	33,02%	45,74	27,58%	10,57%
H65-100	25,69	49,00%	34,34	39,37%	33,67%	36,69	41,91%	6,85%

Tabla 5.1.2 Resistencia a compresión y porcentaje de aumento o disminución de la resistencia

La siguiente grafica compara los resultados de la resistencia a compresión, en los diferentes hormigones con relación A/C= 0.50.

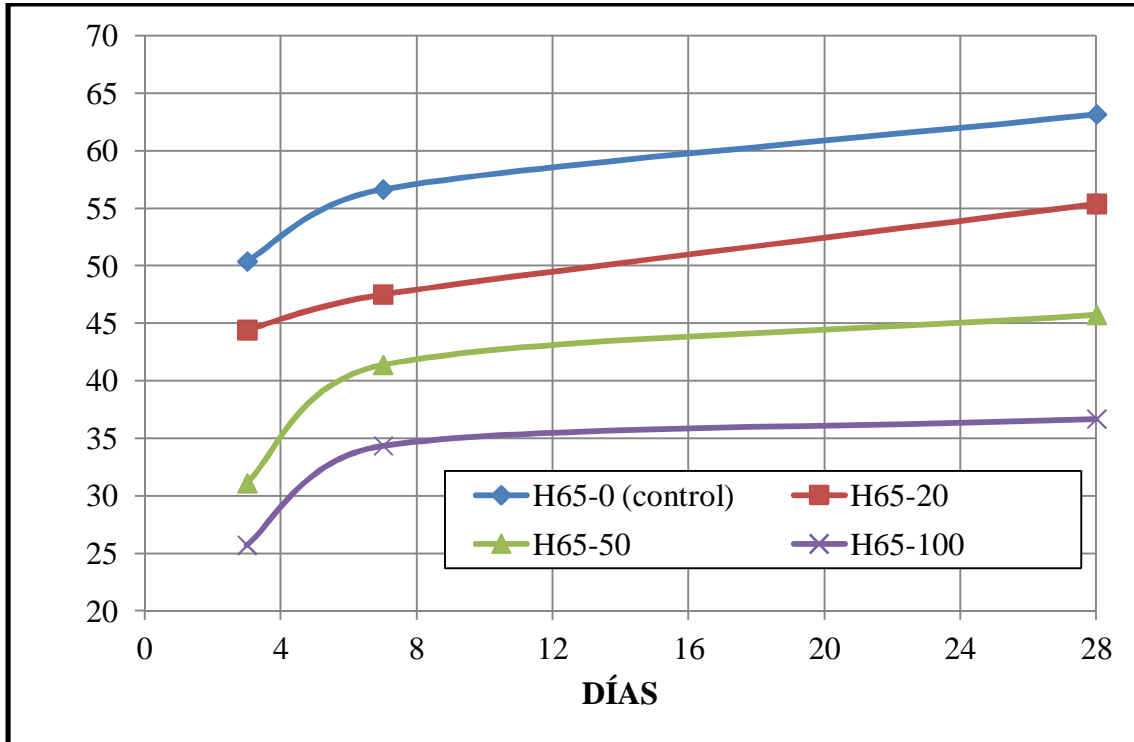


GRAFICA 5.1.2

Como podemos observar en esta grafica y en los cálculos previamente realizados y expuestos en la tabla 5.1.2, todos nuestros hormigones descienden en su resistencia con respecto al hormigón de control, menos el H50-20, vamos a analizar los resultados más detenidamente:

- H50-20: En la realización del primer ensayo a los 3 días, vemos que su resistencia con el hormigón de control es solamente un 0.92% menos. A los 7 días su comparativa con el hormigón de control, nos indica que su resistencia es mayor en un 3.61%. Y a los 28 días es mayor en un 3.68%.
- H50-50: Su resistencia es menor en todos los casos, un 32.33% a 3 días, 19.91% a 7 días y 16.55% a 28 días. Como podemos ver su resistencia experimenta un gran crecimiento, llegando a los 16 Mpa, entre el ensayo a 3 días y el ensayo a 28 días.
- H50-100: 34.19% menos de resistencia a 3 días, 25.70% a 7 días y 28.05% a 28 días con respecto al hormigón de control.

Resultados de la resistencia a compresión, en los diferentes hormigones para la relación A/C= 0.65



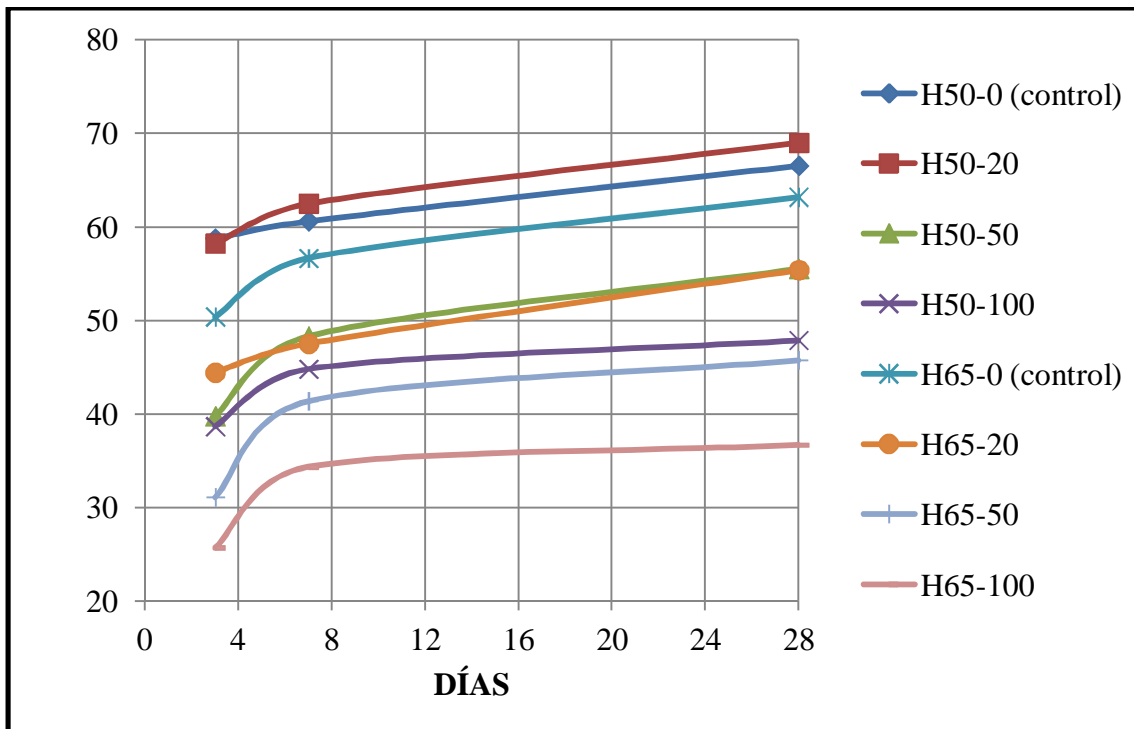
GRAFICA 5.1.3

Al igual que en la grafica 5.1.2 anterior, en esta también podemos observar que todos nuestros hormigones descienden en su resistencia con respecto al hormigón de control.

Resultados:

- H65-20: A los 3 días, vemos que su resistencia con el hormigón de control es 11.82% menos. A los 7 días su resistencia es un 16.12% menor, y a los 28 días la diferencia es de 12.32% también inferior. Como podemos observar, entre 7 y 28 días su aumento de resistencia es muy similar al hormigón de control.
- H65-50: Desciende un 38.26% a 3 días, 26.96% a 7 días y 27.58% a 28 días. Tiene un gran aumento de resistencia entre 3 y 7 días, mas de 10 MPA, después entre 7 y 28 experimenta un aumento moderado.
- H65-100: 49.00% menos de resistencia a 3 días, 39.37% a 7 días y 41.91% a 28 días con respecto al hormigón de control. Gran aumento de resistencia entre 3 y 7 días, casi 10 MPA, llegando casi a alcanzar su resistencia total, ya que después entre 7 y 28 días su aumento es de 2 MPA.

En la grafica siguiente, hacemos una comparativa entre los ensayos a compresión de los 8 tipos diferentes de hormigones que hemos realizado, viendo similitudes en muchos de ellos, sobre todo entre los que tienen el mismo porcentaje de reciclado, con una evolución en el tiempo muy parecida. En los resultados extraídos de la bibliografía se constatan diferentes tendencias de evolución en el tiempo, pero en la mayoría de los casos, estas diferencias de discrepancia son a partir de la edad de 28 días.



GRAFICA 5.1.4

5.1.3- CONCLUSIONES

Hemos podido comprobar que la resistencia a compresión disminuye, cuanto mayor es el porcentaje de árido reciclado.

Para hormigones fabricados íntegramente con áridos reciclados, las reducciones están comprendidas entre un 10 y un 35% según diferentes investigaciones. Los resultados experimentales obtenidos en este caso, muestran reducciones de la resistencia a compresión del 28.05% para el H50-100, la cual estaría dentro de este rango, y del 41.91% para el H65-100 el cual excede los valores habituales.

Para hormigones con un porcentaje de sustitución entre el 20-100% hemos encontrado investigaciones y artículos que hablan de reducciones entre el 3.5-13%, aunque Valeria Corinaldesi en 2011 halló variaciones de entre 18-23% para hormigones con el 30% de árido reciclado y con independencia de la relación A/C. Siendo las nuestras entre el -3 y el 16% para el H50 y entre el 16-27% para el H65.

Para mantener la misma resistencia a compresión en un hormigón reciclado y un hormigón convencional con la misma consistencia, el primero requerirá un mayor contenido de cemento, que puede variar para hormigones de categoría resistente 25 N/mm² y 50 N/mm².

5.2- ENSAYO A TRACCIÓN

5.2.1- METODO DE ENSAYO

El método de ensayo utilizado es el descrito en la norma UNE-EN 12390-6 y en la UNI-EN 12390-6:2002, Ensayos de hormigón-Rotura por tracción indirecta (Ensayo brasileño).

El ensayo consiste en aplicar una fuerza de compresión en una banda estrecha en toda su longitud, en consecuencia, el resultado de la fuerza de tracción ortogonal resultante origina que la probeta se rompa a tracción.

Aunque este ensayo se suele hacer con probetas cilíndricas, la norma también prevé la posibilidad de llevarlo a cabo con probetas prismáticas o cúbicas, que es nuestro caso.

Este ensayo se ha realizado a los 28 días de edad de las probetas, siendo estas 5 por cada hormigón.



Fotografía 5.2



Fotografía 5.2.1



Fotografía 5.2.2

5.2.2- RESULTADOS

La Tabla 5.2.2 recoge los resultados obtenidos al evaluar la resistencia a tracción indirecta tanto en los hormigones de control como en los hormigones reciclados.

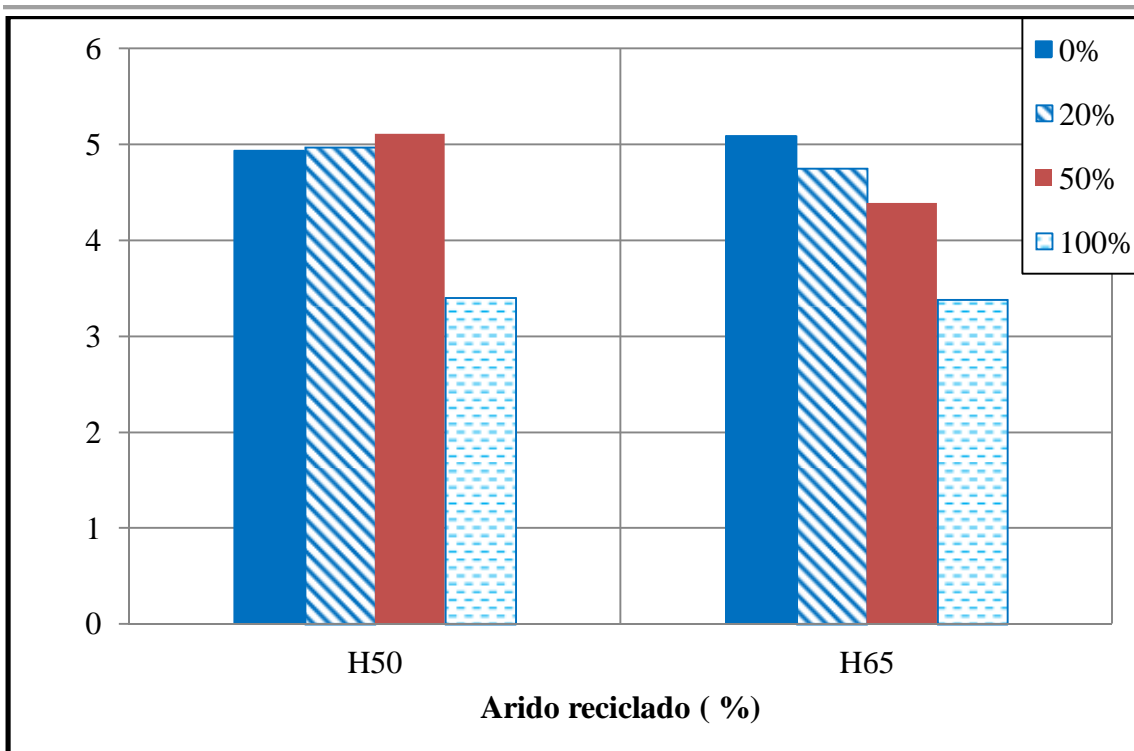
Tipo de hormigón	28 días	
	MPA	% respecto al H. de control
H50-0	4,93	
H50-20	4,97	-0,72%
H50-50	5,11	-3,60%
H50-100	3,40	31,04%
H65-0	5,09	
H65-20	4,75	6,60%
H65-50	4,39	13,67%
H65-100	3,38	33,55%

Tabla 5.2.2

Aunque se han obtenido una gran dispersión de resultados, en general los mayores descensos han correspondido a los hormigones con un contenido de árido reciclado del 100%, con un descenso medio del 32% respecto al hormigón de control, según refleja la tabla 5.2.2.

Para sustituciones menores, del 20% y 50%, se han obtenido menores reducciones en el caso de hormigones con una relación A/C= 0.65, siendo de 6.60% y 13.67% respectivamente. En cambio para una relación A/C=0.50, la resistencia ha resultado elevada, con incrementos del 0.72% y 3.60% respectivamente (tabla 5.2.2).

En esta gráfica podemos también apreciar, que el rango de resistencias a tracción de los hormigones H-100% es mucho menor que en el resto de los casos, al igual que sucede en otras propiedades. Cuando se utiliza un porcentaje de grava reciclada inferior al 50% (grafica 5.2.2), la resistencia a tracción del hormigón reciclado no solo se mantiene, sino que como podemos observar, en ocasiones aumenta.



Grafica 5.2.2

5.2.3- CONCLUSIONES

No existen conclusiones unánimes entre las investigaciones, ya que existe una gran dispersión entre resultados, algunos estudios muestran caídas despreciables para el 100% de árido reciclado, en contraposición con otros que alcanzan reducciones del 30%, como es nuestro caso.

Según otras investigaciones, para sustituciones del 100% las pérdidas oscilan entre el 6-20% mientras que para sustituciones inferiores al 50% las diferencias son inapreciables.

Hay dos factores que influyen en la resistencia a tracción, al igual que en otras propiedades:

- El porcentaje de sustitución
- Calidad del árido con el que se fabrica.

5.3- ENSAYO DE RETRACCIÓN

5.3.1- METODO DE ENSAYO

Se ha realizado el estudio de la retracción del hormigón empleando el método descrito en la norma UNE 83318:94 “Ensayos de Hormigón. Determinación de los cambios de longitud”, para este ensayo la normativa italiana es la UNI 6555:1973. En cada una de las amasadas se ha fabricado una probeta de 50x10x10.

Después del desmolde se toma una primera medida y posteriormente se guardan las probetas en la cámara climática a 20 ± 0.5 °C de temperatura y humedad relativa del 50% tal y como se especifica en la norma.

Se ha utilizado un reloj comparador (Fotografía 5.3 y 5.3.1) con precisión de una micra, con el que se tomaron medidas de longitud de cada probeta después de periodos de mantenimiento.

En cada una de las medidas, el extensómetro debe calibrarse al comienzo y al final de las lecturas. Para ello se utiliza una barra de calibrado (Fotografía 5.3.1)



Fotografía 5.3

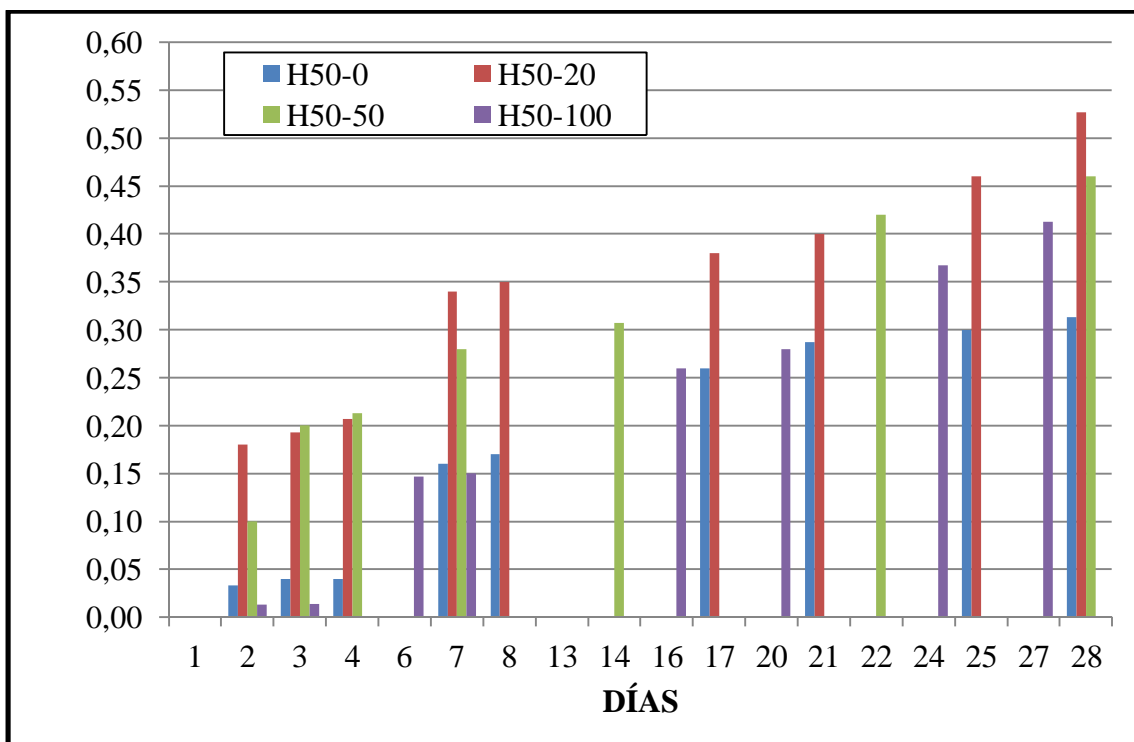


Fotografía 5.3.1

5.3.2- RESULTADOS

El uso del árido reciclado produce un aumento de la retracción del hormigón, para cualquier porcentaje de árido reciclado utilizado, según se recoge en las gráficas 5.3.2 y 5.3.3.

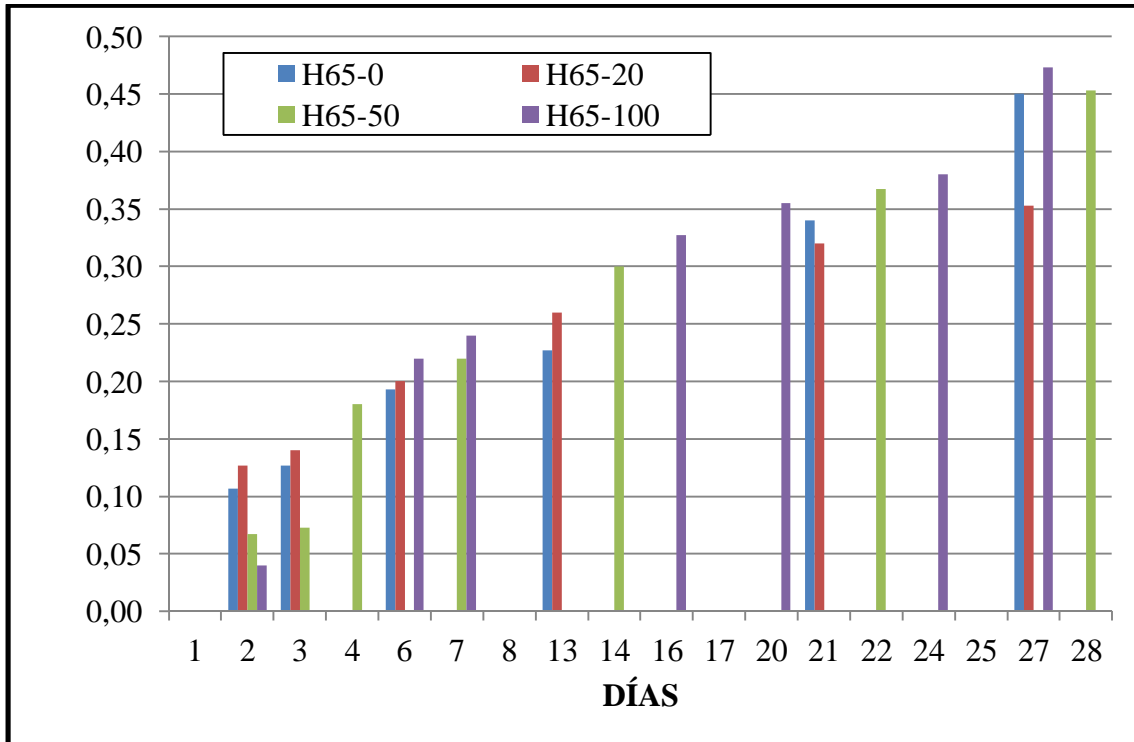
Para la relación $A/C = 0.50$



Grafica 5.3.2

Como podemos observar en la grafica 5.3.2, para edades menores a 7 días la retracción del hormigón reciclado es en algunos casos incluso menor a la del hormigón de control, en concreto el H50-100, igualándose en el intervalo de tiempo entre 7 y 21 días, siendo a partir de esta edad cuando se obtienen mayores retracciones en todos los hormigones reciclados.

Para la relación $A/C= 0.65$



Grafica 5.3.3

Al igual que para la relación $A/C=0.50$, vemos en esta grafica (5.3.3), que para edades menores a 7 días la retracción del hormigón reciclado es en los casos del H65-50 y H65-100 menor a la del hormigón de control, este hecho llama la atención ya que son los dos hormigones con mayor porcentaje de árido reciclado. A partir de los 20 días de edad es el hormigón H65-20, el que tiene una retracción menor al hormigón de control.

5.3.3- CONCLUSIONES

Este fenómeno aparece en todos los hormigones, en mayor o menor repercusión dependiendo de las condiciones de curado. Se debe principalmente al movimiento de las partículas de agua en el interior del hormigón durante el proceso de curado del mismo.

Según la EHE, el único parámetro que condiciona la retracción es la resistencia del hormigón, aquellos hormigones con mayor relación A/C son los que presentan mayor retracción. Sin embargo influyen también otros parámetros como la naturaleza de los áridos o la relación árido/cemento que posea el hormigón, que cuando aumenta origina una reducción en la retracción.

También se presupone que el árido reciclado produce mayor retracción, debido principalmente al mortero adherido, la mayor absorción y el mayor contenido de la relación A/C. Sin embargo, como hemos podido comprobar en nuestros ensayos experimentales, no se cumplen estas premisas, para una relación mayor, $A/C = 0.65$, los resultados son muy similares entre los hormigones con árido reciclado y el hormigón de control, además de alcanzar unas retracciones más bajas que para la relación $A/C = 0.50$.

A diferencia con lo que ocurre con otras propiedades antes estudiadas, la ausencia de grandes cantidades de árido reciclado también puede tener un efecto importante en la retracción.

5.4- MODULO ELASTICO

5.4.1- METODO DE ENSAYO

El método de ensayo utilizado para la realización del modulo elástico, es el que recoge la normativa italiana UNI 6556:1976 “Ensayos de hormigón. Determinación del modulo de elasticidad secante en compresión.

En esta norma se considera el módulo de elasticidad secante entre dos tensiones después de un cierto número de ciclos de carga.

Para la realización de este ensayo hemos utilizado probetas de 290 mm de altura y 95mm de diámetro, a una edad de 28 días.

Para la obtención del modulo es necesario conocer la resistencia a compresión que presenta el hormigón, por lo que previamente a la realización de este ensayo se han roto a compresión 3 probetas, destinadas a la obtención de la resistencia a compresión.

Cálculos para la realización del ensayo:

$$\text{- Fc media (MPa)} = \frac{fc1+fc2+fc3}{3} \times 0.8$$

$$\text{- Superficie de la cara superior de la probeta (mm}^2\text{)} = \pi r^2$$

$$\text{- Fc (KN)} = \frac{fc \text{ media} \times Sup}{1000}$$

- Fc / 9 (KN)= El resultado del límite de la primera carga.

- Dividimos fc entre 9 para obtener el resultado de la primera carga, después lo multiplicamos por 2 para obtener la segunda y x 3 para obtener la tercera (que es un tercio de fc).

- El ensayo fue realizado manualmente, es decir el técnico de laboratorio era el encargado de parar la maquina una vez alcanzada la resistencia indicada en cada intervalo, dejaba 30 segundos de reposo, y volvía a aplicarle la fuerza de compresión, así con las tres fuerzas calculadas, dejando por última instancia romper a la probeta.



Fotografía 5.4



Fotografía 5.4.1



Fotografía 5.4.2



Fotografía 5.4.3

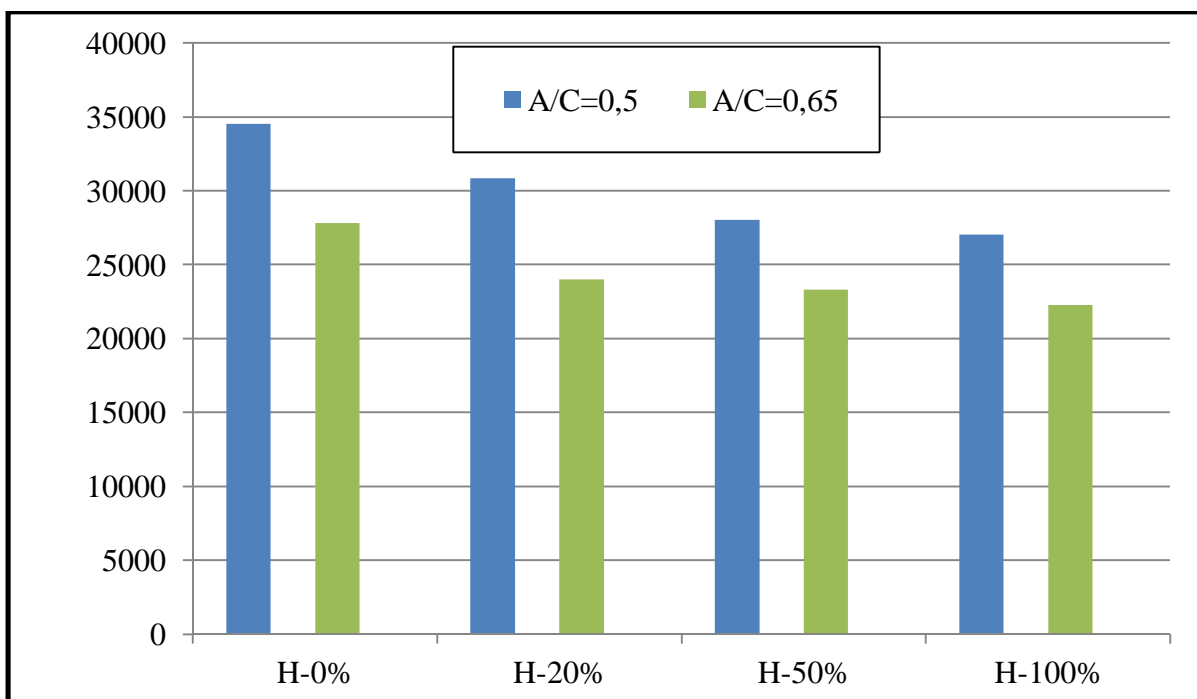
5.4.2- RESULTADOS

La utilización de árido reciclado en distintos porcentajes ha provocado la disminución en todos los casos del módulo de elasticidad del hormigón reciclado, presentando los valores medios que recoge la tabla 5.4.2.

Relación A/C	Módulo de elasticidad del hormigón (N/mm ²)			
	H-0%	H-20%	H-50%	H-100%
0,5	34532,51	30846,97	28025,785	27019,15
0,65	27801,88	23999,565	23328,215	22282,07

Tabla 5.4.2.

Como se observa en la gráfica 5.4.3, la influencia de la relación agua/cemento sobre el módulo de elasticidad se ve ligeramente atenuada a medida que aumenta el contenido de árido reciclado en el hormigón, presentando en los hormigones H-100% un descenso mucho menor, para un amplio rango de relaciones a/c, que en el resto de los casos.



Gráfica 5.4.3

Cuanto mayor es el porcentaje de árido reciclado utilizado, mayor es la reducción esperable en el módulo de elasticidad, encontrándose pequeñas variaciones para distintas relaciones agua/cemento del hormigón. En el caso del hormigón con relación $A/C=0.50$, para sustituciones del 20% el módulo se reduce aproximadamente un 10%, mientras que para sustituciones del 50% y 100% el descenso se sitúa en torno al 20%.

En cambio, para hormigones con relación $A/C=0.65$ el porcentaje de reducción varía entre un 10 y un 15% para todos los porcentajes de sustitución.

5.4.3- CONCLUSIONES

El módulo de elasticidad es una de las propiedades del hormigón reciclado que se ve afectada en mayor medida.

Los descensos obtenidos son independientes de la categoría resistente del hormigón para sustituciones inferiores al 50% (H-20% y H-50%) en el rango de resistencias ensayado. Sin embargo, los hormigones H-100% sufren mayores pérdidas de módulo respecto a un hormigón convencional de la misma dosificación, cuanto mayor es su resistencia.

Otras investigaciones ofrecen resultados muy parecidos a los que aquí exponemos. Los hormigones reciclados H-20% presentan, en términos medios, módulos similares a los del hormigón de control. Esto puede ser debido al contenido de pequeños porcentajes de arena reciclada y a la calidad del árido reciclado utilizado en el estudio experimental.

6- CONCLUSIONES

6.1 CONCLUSIONES

6.1-CONCLUSIONES

La primera conclusión a la que se llega debido a los resultados obtenidos en esta tesis y a los analizados de investigaciones anteriores, es que la utilización de árido reciclado para fabricar hormigón estructural debe limitarse mayoritariamente a los residuos exclusivamente de hormigón, ya que la mezcla con otros tipos de materiales merma las capacidades del hormigón.

La peor calidad del árido reciclado repercute directamente en las propiedades mecánicas del hormigón que se fabrica con él, siendo el módulo de elasticidad y la retracción, sobre todo a edades tempranas, las propiedades que se ven más afectadas, sobre todo cuanto mayor es la resistencia del hormigón reciclado. Este hecho hace necesario combinarlo con árido natural, en un porcentaje máximo recomendable del 20%, y también limitar la resistencia máxima admisible del hormigón reciclado.

Quedando demostrado que la propiedad más desfavorable de los áridos reciclados es la gran absorción que tienen, es necesario limitar esta característica al 7% para que al utilizarse mezclándolo con el árido natural, se cumplan las especificaciones que exige la EHE-08.

Para finalizar, se puede afirmar que un hormigón realizado con árido reciclado, que cumpla con todas las especificaciones que afirma la normativa existente hasta ahora, ofrece total garantía a la hora de utilizarlo como hormigón estructural.

7-BIBLIOGRAFÍA

- [1] EHE08. Spanish Structural Concrete Code. Publicaciones del Ministerio de Fomento. Secretaría General Técnica.
- [2] Sánchez de Juan M. Estudio sobre la Utilización de Árido Reciclado para la Fabricación de Hormigón Estructural. Thesis, E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid; 2005.
- [3] Ravindrarajah RS, Loo YH, Tam CT. Recycled Concrete as Fine and Coarse Aggregate in Concrete. Magazine of Concrete Research 1987; 39: 214-220.
- [4] Rühl M. Water Absorption Capacity of Recycled Demolition Rubbish. Darmstadt Concrete 97 1992; Ausgabe 12.
- [5] Hansen TC, Schulz RR, Hendricks ChF, Molin C, Lauritzen EK. Recycling of demolished concrete and masonry. Report of Technical Committee 37-DCR, RILEM, U.K., 1992.
- [6] González-Fonteboa B, Martínez-Abella F. Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. Materials and mechanical properties. Build Environ 2008; 43: 429-437, doi:10.1016/j.buildenv.2007.01.008.
- [7] Xiao J, Li J, Zhang Ch. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. Cem Concr Res 2005; 35:1187-1194.
- [8] Shehata IAEM., Shehata LCD, Mattos TS. Stress-strain curve for the design of high-strength concrete elements. Mater Struct 2000; 33: 411-418.
- [9] Ibrahim HHH, MacGregor JG. Flexural behaviour of laterally reinforced high-strength concrete sections. ACI Struct J 1996; 93:674-684.
- [10] Yip WK. Generic form of stress-strain equations for concrete. Cem Concr Res 1998; 28:33-39.
- [11] Etxeberria M, Vázquez E, Marí A, Barra M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete, Cem Concr Res 2007 37:735-742, doi:10.1016/j.cemconres.2007.02.002.
- [15] Hendriks ChF, Pietersen HS, Fraay AFA. Recycling of Buildings and Demolition Waste – An Integrated approach, in: Dhir, Henderson, Limbachiya, editors. Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate; 1998, p. 419-432, ISBN 0-7277-2726-5.
- [13] Hognestad E, Hanson NW, McHenry D. Concrete stress distribution in ultimate strength design. ACI J. 1995; 54:455-480.
- [14] Yi ST, JKim JK, Oh TK. Effect of strength and age on the stress-strain curves of concrete specimens. Cem Concr Res 2003; 33:1235-1244.

[15] Wee TH, Chin MS, Mansur MA. Stress-strain relationship of high-strength concrete in compression. *J Mater Civil Eng* 1996; 8:70-76.

(1) Walraven, J.C.: “Fundamental Analysis of Aggregate Interlock”, ASCE, *Journal of the Structural Division*, Vol. 107, ST11 (noviembre 1981), pp. 2245-2270.

(2) Peng, L.: *Shear Strength of Beams by Shear-Friction*, p. 164, Tesis de la University of Calgary, Alberta, enero 1999.

(4) Walraven J. C.: “High Performance Concrete: Exploring a new material”, *Structural Engineering International*, Vol. 5, nº 3 (agosto 1995), pp. 182-187.

(6) Birkeland, P.W., Birkeland, H.W.: “Connections in Precast concrete construction”, *ACI Journal*, Vol. 63, nº 3 (marzo 1966), pp. 345-368.

(7) Raths, C.H.: Reader Comments on “Designs Proposals for Reinforced Concrete Corbels” by A.H. Mattock; *PCI Journal*, Vol. 22, nº 2 (marzo-abril 1977), pp. 93-98.

(8) Shaikh, A. F.: “Proposed Revisions to Shear-Friction Provisions”, *PCI Journal*, Vol. 23, nº 2 (marzo-abril 1978), pp. 12-21.

(9) Mattock, A.H.: “Shear Transfer in Concrete having reinforcement at an angle to the shear Plane”, *ACI Special Publication*, Vol.42, (enero 1974), pp. 17-42.

(10) Walraven, J.C., Frenay, J., Puijssers, A.: “Influence of concrete strength and Load History on the Shear Friction Capacity of Concrete Members”, *PCI Journal*, Vol. 32, nº 1 (1987), pp. 66-84.

(11) Mattock, A.H.: Reader Comments on “Influence of concrete strength and Load History on the Shear Friction Capacity of Concrete Members”, by J.C. Walraven, J. Frenay & A. Puijssers, *PCI Journal*, Vol. 33, nº 1 (enero-febrero 1988), pp. 165-166.

(12) Mau, S.T., Hsu, T.T.C.: Reader comments on “Influence of concrete strength and Load History on the Shear Friction Capacity of Concrete Members”, by J.C. Walraven, J. Frenay & A. Puijssers, *PCI Journal*, Vol. 33, nº 1 (enero-febrero 1988), pp. 166-168.

(13) Loov, R.E., Patnaik, A.K.: “Horizontal Shear Strength of Composite Concrete Beams with a Rough Interface”, *PCI Journal*, Vol. 39, nº 1 (enero-febrero 1994), pp.48-69.

(14) EHE. Instrucción de Hormigón Estructural. Publicaciones del Ministerio de Fomento. Secretaría General Técnica.

(15) 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; (noviembre 1988), pp 575-584, ISBN 0-412-32110-6.

(16) Banta, T.E.: *Horizontal Shear Transfer Between Ultra High Performance Concrete and Lightweight concrete*, p. 130, thesis submitted to the faculty of the Virginia Polytechnic Institute, febrero 2005.

- (17) Hwang, S.J., Yu, H.W., Lee, H.J.: “Theory of interface shear capacity of reinforced concrete”, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 126, nº 6 (junio 2000), pp. 700-707.
- (18) Ibell, T., Burgoyne, C.: “Use of fiber-reinforced plastics versus steel for shear reinforcement of concrete”, *ACI Structural Journal*, Vol. 96, nº 6 (noviembre-diciembre 1999), pp. 997-1002.
- (19) Balaguru, P., Dipsia, M. G.: “Properties of fiber reinforced high-strength semilightweight concrete”, *ACI Materials Journal*, Vol.90, nº 5 (septiembre-octubre 1993), pp. 399-405.
- (20) Duthinh, D., Carino, N. J.: Shear design of high-strength concrete beams: a review of the state-of-the art, p. 198, en Report NISTIR 5870, Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, agosto 1996.
- (21) Duthinh, D.: “Sensitivity of shear strength of reinforced concrete and prestressed concrete beams to shear friction and concrete softening according to modified compression field theory”, *ACI Structural Journal*, Vol. 96, nº 4 (Julio-agosto 1999), pp. 495-508.
- (25) Rahal, K.: “Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate”, *Building and Environmental*, Vol. 42, nº 1 (enero 2005), pp. 407-415.
- (26) Hendriks, Ch. F., Pietersen, H. S., Fraay, A. F. A.: “Recycling of Buildings and Demolition Waste – An Integrated approach” *Use of Recycled Concrete Aggregate, Sustainable Construction*; Ed. Dhir, Henderson y Limbachiya; pp 419-432, 1998, ISBN 0-7277-2726-5.
- (27) Carrasquillo, R.L., Slate, F. O., Nilson, A. H.: “Properties of High Strength Concrete Subject to Short - term Loading”, *ACI journal*, Vol. 78, nº 3 (mayo-junio 1981), pp. 171-178.
- (28) Hansen, T.C., Narud, H.: “Strength of Recycled Concrete Made from Crushed Concrete Coarse Aggregate”; *Concrete International*, Vol. 5, nº 1 (enero 1983), pp. 79-83.
- (29) Comisión 2. Grupo de trabajo 2/5 “Hormigón Reciclado”: Utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural, p. 189, Ed. ACHE (Asociación Científico-técnica del Hormigón Estructural), España, 2006. ISBN 84-89670-55-2.
- (1) Symonds, Argus, Cowi y PRC Bouwcentrum; “Construction and Demolition Waste Management Practices, and Their Economic Impacts”; Report to DGXI European Commission; (Febrero 1999).
- (2) Concrete – Complementary British Standard to BS EN 206-1: Part 2: Specification for constituent materials and concrete.
- (3) RILEM, Technical Committee, TC121: “121-DGR, Guidance for Demolition and Re-use of Concrete and Masonry. Specifications for Concrete with Recycled Aggregates”; *Materials and Structures* Vol27, Nº173, (1994), pp 557 – 559.
- (4) B. P. Simons, F. Henderieckx: “Guidelines for Demolition with Respect to the Reuse of Building Materials: Guidelines and Experiences in Belgium”; *Demolition and Reuse of*

Concrete and Masonry, Proceedings of the Third International RILEM Symposium; Ed. Erik K. Lauritzen; (1993), pp 25-34; ISBN 0-412-32110-6.

(5) S. Nishibayashi, K. Yamura: “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; Ed. Y. Kasai; (November 1988), pp 652-659, ISBN 0-412-32110-6.

(6) M. Etxeberria Larrañaga: “Experimental study on microstructure and structural behaviour of recycled aggregate concrete”; Tesis doctoral dirigida por Antonio R. Marí Bernat y Enric Vázquez I Ramonich; en la Universitat Politècnica de Catalunya. (Marzo 2004), pp 1-230.

(7) Y. Kasai: “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; Ed. Erik K. Lauritzen; (1993), pp 93-104; ISBN 0-412-32110-6.

(8) Roos: “Verification of the Dimensioning Values for Concrete with Recycled Concrete Aggregate”; Use of Recycled Concrete Aggregate, Sustainable Construction; Ed. Dhir, Henderson y Limbachiya; (1998) pp 309-320, ISBN 0-7277-2726-5.

(9) B(W) 209/32/105 Group 5, 12. Works Bureau Technical circular 12/2002: Specifications Facilitating the Use of Recycled Aggregates.

(11) R. S. Ravindrarajah, C.T. Tam: “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; (November 1988), pp 575-584, ISBN 0-412-32110-6.

[1] Symonds, Argus, Cowi y PRC Bouwcentrum; “Construction and Demolition Waste Management Practices, and Their Economic Impacts”; Report to DGXI European Commission; Febrero 1999

[2] 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; pp 670-679, November 1988, ISBN 0-412-32110-6

[3] 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; pp 575-584, November 1988, ISBN 0-412-32110-6

[4] Concrete – Complementary British Standard to BS EN 206-1: Part 2: Specification for constituent materials and concrete.

- [5] RILEM, Technical Committee, TC121: “121-DGR, Guidance for Demolition and Re-use of Concrete and Masonry. Specifications for Concrete with Recycled Aggregates”; Materials and Structures Vol27, N°173, (1994), pp 557 – 559.
- [6] B. P. Simons, F. Henderieckx: “Guidelines for Demolition with Respect to the Reuse of Building Materials: Guidelines and Experiences in Belgium”; Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Proceedings of the Third International RILEM Symposium; Ed. Erik K. Lauritzen; (1993), pp 25-34; ISBN 0-412-32110-6.
- [7] S. Nishibayashi, K. Yamura: “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; Ed. Y. Kasai; (November 1988), pp 652-659, ISBN 0-412-32110-6.
- [8] Hansen, T.C.; Narud, H.; “Strength of Recycled Concrete Made from Crushed Concrete Coarse Aggregate”; Concrete International Vol. 5 N° 1, pp 79-83, January 1983
- [9] Dhir, R.K.; Limbachiya, M.C.; Leelawat, T.; “Suitability of Recycled Concrete Aggregate for Use in BS 5328 Designated Mixes”; Structures and Buildings Vol. 134, pp 257-274, August 1999
- [10] Y. Kasai: “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; Ed. Erik K. Lauritzen; (1993), pp 93-104; ISBN 0-412-32110-6.
- [11] Roos: “Verification of the Dimensioning Values for Concrete with Recycled Concrete Aggregate”; Use of Recycled Concrete Aggregate, Sustainable Construction; Ed. Dhir, Henderson and Limbachiya; (1998) pp 309-320, ISBN 0-7277-2726-5.
- [12] B(W) 209/32/105 Group 5, 12. Works Bureau Technical circular 12/2002: Specifications Facilitating the Use of Recycled Aggregates.
- [13] CUR. Rapport 125: Betonpùngranulaat en metselwerk-puigranulaat als toeslangmateriaal voor beton.
- [14] R. S. Ravindrarajah, C.T. Tam: “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; (November 1988), pp 575-584, ISBN 0-412-32110-6.
- [15] Topcu, I. B.; Guncan, N. F.; “Using Waste Concrete as Aggregate”; Cement and Concrete Research, Vol 25 N°7; pp 1385 – 1390, June 1995.
- [16] Wainwright, A.; Trevorrow, Y. YU.; 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; Ed. Erik K. Lauritzen; pp 319-330; 1993; ISBN 0-412-32110-6

- [17] De 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 and Limbachiya; pp 213-226, 1998, ISBN 0-7277-2726-5
- [18] Barra, M.; Vázquez, E.; “Properties of Concretes with Recycled Aggregates: Influence of Properties of the Aggregates and their Interpretation”; Use of Recycled Concrete Aggregate, Sustainable Construction; Ed. Dhir, Henderson y Limbachiya; pp 19-30, 1998, ISBN 0-7277-2726-5
- [19] Wainwright, A.; Trevorrow, Y. YU.; 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; Ed. Erik K. Lauritzen; pp 319-330; 1993; ISBN 0-412-32110-6
- [20] Maultzsth, M.; Mellmann, G.; “Properties of Large-Scale Processed Building Rubble with Respect to the Reuse as Aggregate in Concrete”; Use of Recycled Concrete Aggregate, Sustainable Construction; Ed. Dhir, Henderson y Limbachiya; pp 99-108, 1998, ISBN 0-7277-2726-5
- [21] Rahal, K.; “Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate”. Building and Environmental 2005
- [22] 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; pp 643-651, Noviembre 1988, ISBN 0-412-32110-6
- [23] Aitcin, P. C.; “High – Performance concrete”, E&FN Spon, 1998. ISBN 0 419 19270 0
- [24] Hendriks, Ch. F.; Pietersen, H. S.; Fraay, A. F. A.; “Recycling of Buildings and Demolition Waste – An Integrated approach” Use of Recycled Concrete Aggregate, Sustainable Construction; Ed. Dhir, Henderson y Limbachiya; pp 419-432, 1998, ISBN 0-7277-2726-5

Università Politecnica Delle Marche

Universidad Politécnica de Valencia

Estudio di conglomerati cementizi contenenti differenti percentuali di calcestruzzo riciclato

ALUMNO: Herminio José Gabaldón Pérez

DIRECTORES DEL PROYECTO: Ricardo Perello
Valeria Corinaldesi

CURSO: 2012-2013



Contenido

1. Introducción
2. Normativa
3. Actuaciones con H.R
4. Objetivos generales
5. Materiales a emplear
6. Hormigones
7. Resultados
8. Conclusiones

Introducción

“el desarrollo debe satisfacer las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer las suyas”.

Informe bruntland, 1987.

Introducción

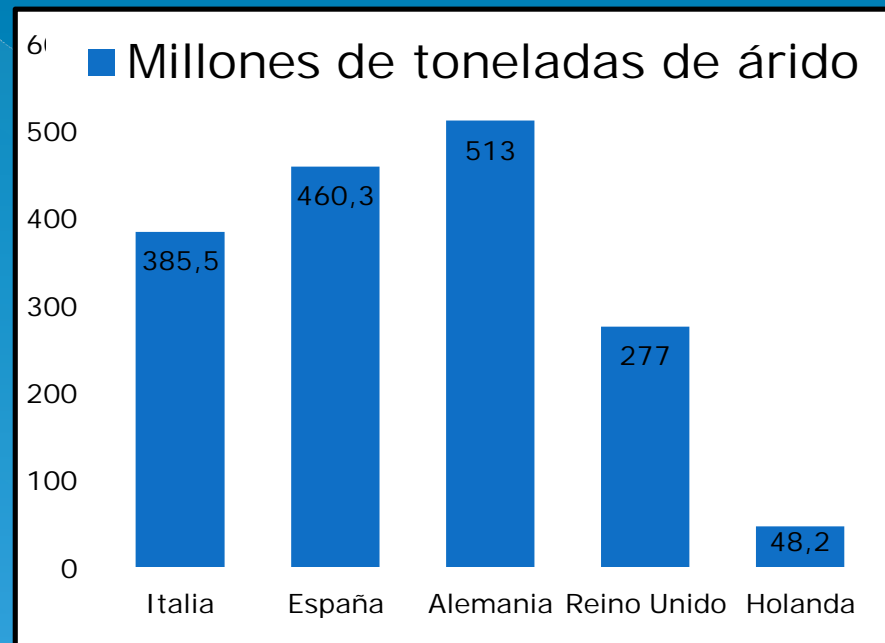
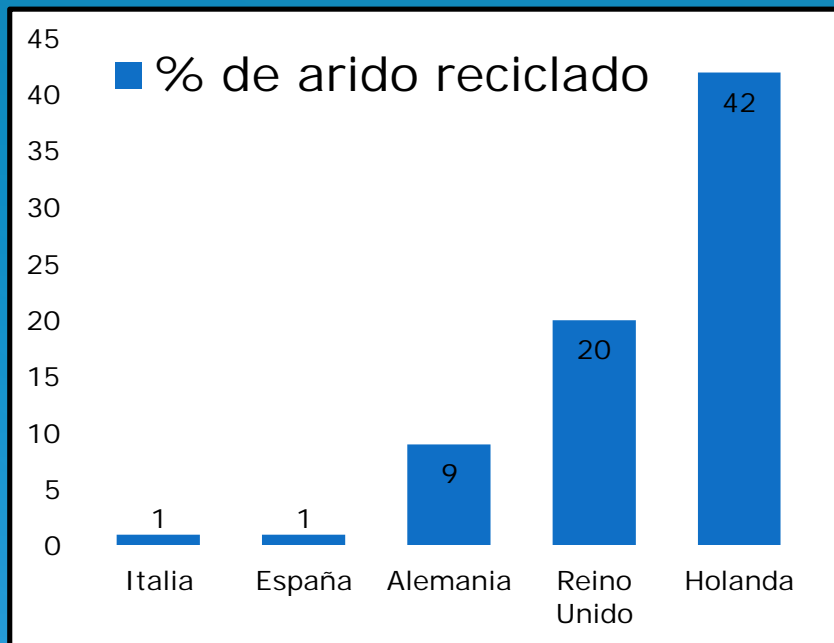
¿Que son RCDs?

Los RCD son los Residuos de Construcción y Demolición, y proceden generalmente de derribos de edificación. Están regulados en las siguientes normativas:

- **I Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2001-2006**
- **Real decreto 105/2008**

Introducción

En muchas partes de Europa los áridos naturales son cada vez mas reducidos, lo que resulta un aumento en el precio del hormigón, esto podría ayudar a que el árido reciclado entre a competir económicamente con los naturales.



Introducción

ARIDOS RECICLADOS:

- Árido de hormigón: Procedente de residuos de hormigón. Es el único tipo que puede ser admisible para hormigón armado.
- Árido cerámico
- Árido mixto

Estos dos últimos podrían ser utilizados para rellenos o firmes de carreteras



Normativa

En España la EHE-08, en el anejo 15, quien regula estos ensayos, bien garantizado para sustituciones de hasta el 20%.

En Italia, son las "Normas Técnicas para la Construcción", en el apartado 11.1.9.2 "agregati".

No tienen una norma específica, como si la tienen muchos países.

PROCEDENCIA	ARIDO GRUESO RECICLADO	CATEGORÍA RESISTENTE (MPA)
Rilem	100% AG Tipo I	16
	100% AG Tipo II	50
	AG Tipo III (mezcla con reciclado < 20%)	Sin limite
Hong kong	100% AG reciclado	20
	AG reciclado < 20%	25-30
Holanda	100% AG reciclado y aumento de cemento en 40 kg/m ³	17,5-22,5 (cúbica)
	100% AG reciclado y aumento de cemento en 50 kg/m ³	27,5-45 (cúbica)
	AG reciclado < 20%	Sin limite
Reino Unido	100% AG (RCA)	40
	100% AG (RA)	16
	AG reciclado < 20%	Sin limite

(*)RCA: Árido reciclado procedente de hormigón

(**)RA: Árido reciclado procedente de residuos de distinta naturaleza (cerámicos, hormigón, asfalto).

Actuaciones con H.R

Puente atirantado sobre el rio Turia (Manises):

Sustitución del 20% del árido natural por árido reciclado en el hormigón de un tramo de la losa.



Casa reciclada de Odense (Dinamarca)

Objetivos generales

Determinar el comportamiento a:

- Tracción
- Compresión
- Retracción
- Modulo elástico

Materiales a emplear

Cemento: CEM-I 52.5R

Agua

Aditivo: Sikament 500 HE.

Áridos: Arena (0-4 mm), árido natural (4-20 mm), árido reciclado (4-16mm).



Composición del árido reciclado

Este ensayo se hace atendiendo a la norma EN 933-11.

- 3 muestras de 1kg, secadas a 50C°, durante 24h. M0.
- Tamiz 63 y tamiz 4mm.
- M1 = M0 - M63 - M4
- Separación de flotantes.
- No flotantes, se secan en estufa durante 24h.
- Separación .



Denominación	Descripción	Resultados experimentales	Valores máx. EHE 08
Flotantes	Plástico, papel,...		1%
Rx	Yeso	0.843	
Rg	Cristal	0.003	
Ra	Materiales Bituminosos	7.843	1%
	Áridos con Betún		
Rb	Material cerámico	2.76	5%
Ru	Áridos redondeados	24.91	
	Áridos angulosos		
Rc	Hormigón	65.34	
	Áridos con hormigón		

Hormigones

DOSIFICACIONES:

- Dos relaciones A/C: 0.50 y 0.65
- % de árido grueso reciclado 0,20,50 y 100%
- Identificación de las amasadas:

HA-B

Siendo:

A=La relación a/c del hormigón

B=% de árido grueso reciclado

Hormigones

Dosificaciones teóricas para 1m³:

H0.50	UNIDADES	H0.50-0%	H0.50-20%	H0.50-50%	H0.50-100%
CEMENTO	kg	380,00	380,00	380,00	380,00
AGUA	kg	190,00	190,00	190,00	190,00
(0-4c)	kg	781,43	794,31	811,37	838,29
(8-20C)	kg	665,44	512,76	303,34	0,00
(4-16R)	kg	0,00	187,51	443,71	807,97
ADITIVO	%	0,70	0,70	0,70	0,70

H-0.65	UNIDADES	H0.65-0%	H0.65-20%	H0.65-50%	H0.65-100%
CEMENTO	kg	275,00	275,00	275,00	275,00
AGUA	kg	178,75	178,75	178,75	178,75
(0-4C)	kg	918,49	938,05	962,73	1005,18
(8-20C)	kg	486,19	372,47	218,29	0,00
(4-16R)	kg	0,00	180,77	423,77	756,46
ADITIVO	%	0,70	0,70	0,70	0,70

Hormigones

Dosificaciones para 30 litros:

H0.50	unidades	H0.50-0%	H0.50-20%	H0.50-50%	H0.50-100%
CEMENTO	kg	11,40	11,40	11,40	11,40
AGUA	kg	3,66	3,63	3,58	3,51
(0-4c)	kg	25,48	25,90	26,46	27,34
4-20C	kg	29,20	22,50	13,31	0,00
(4-16R)	kg	0,00	5,63	13,31	24,24
ADITIVO	%	0,70	0,70	0,70	0,70
ADITIVO	kg	0,08	0,08	0,08	0,08

H0.65	unidades	H0.65-0%	H0.65-20%	H0.65-50%	H0.65-100%
CEMENTO	kg	8,25	8,25	8,25	8,25
AGUA	kg	2,97	2,92	2,85	2,74
(0-4C)	kg	29,95	30,59	31,39	32,78
4-20C	kg	28,32	21,69	12,71	0,00
(4-16R)	kg	0,00	5,42	12,71	22,69
ADITIVO	%	0,70	0,70	0,70	0,48
ADITIVO	kg	0,06	0,06	0,06	0,04

Hormigones

-Preparación de probetas y materiales.



Hormigones

Para la fabricación de todos los hormigones se ha seguido el procedimiento descrito en la norma **ASTM C192 "Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory"**.

1. Se humedece el tambor y se añaden los áridos ya saturados.
2. Dos vueltas y se añaden árido fino y cemento.
3. Una vez este en marcha se añade el agua restante, dejando una poca para añadir el aditivo al final.
4. Tres minutos de amasado, tres de reposo y dos mas de amasado.



Hormigones

Consistencia, Vibrado y fraguado.

% ARIDO REICLADO	CONO DE ABRAMS	
	A/C	
	0,5	0,65
0%	3	15
20%	3	18
50%	10	17
100%	15	15

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



según la norma UNE-EN 12350-2



Evitar pérdida por evaporación

Desmolde y curado



Compresor de aire



Cámara de curado



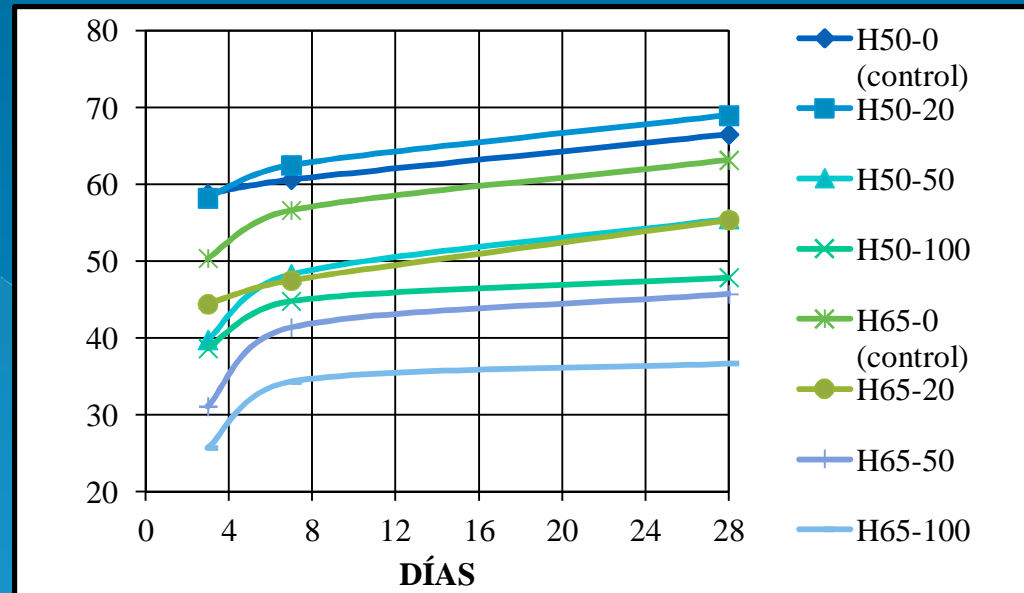
UNI 6555:1973



Resultados

Ensayo de compresión:

UNI-EN 12390-3:2003

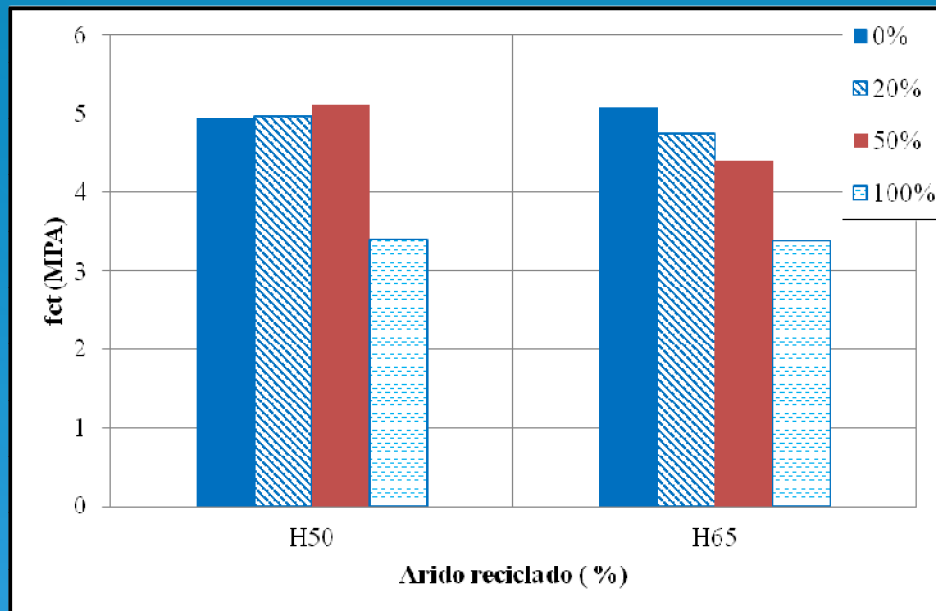


A mayor % de árido reciclado menor resistencia a compresión (excepción, H50-20).

Para hormigones fabricados íntegramente con áridos reciclados, los resultados obtenidos muestran reducciones de la del 28.05% para el H50-100, la cual estaría dentro del rango de otras investigaciones (10-35%), y del 41.91% para el H65-100 el cual excede los valores habituales.

Resultados

Ensayo a tracción: UNI-EN 12390-6:2002 (ensayo brasileño)



Tipo de hormigón	28 días	
	MPA	% respecto al H. de control
H50-0	4,93	
H50-20	4,97	-0,72%
H50-50	5,11	-3,60%
H50-100	3,40	31,04%
H65-0	5,09	
H65-20	4,75	6,60%
H65-50	4,39	13,67%
H65-100	3,38	33,55%

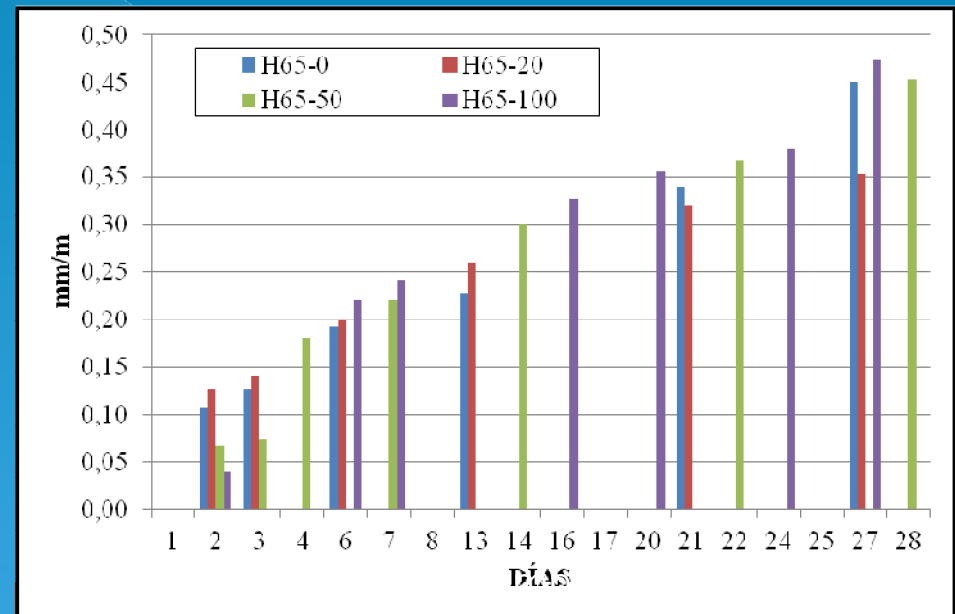
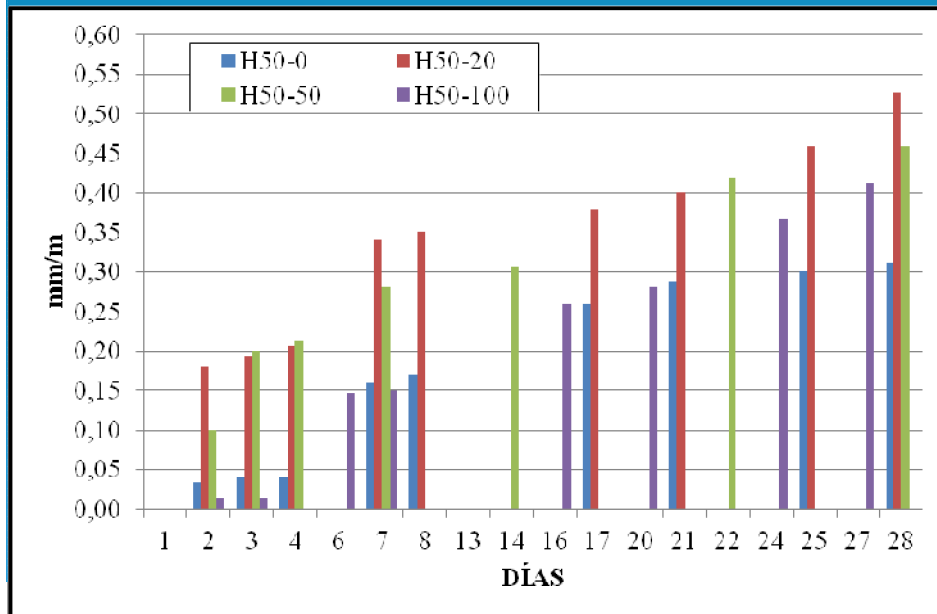
- Gran dispersión de resultados.
- Mayores descensos en los H-100%
- Además del % de sustitución también influye en los resultados la calidad del árido con que se fabrica.

Resultados

Ensayo de retracción: UNI 6555:1973

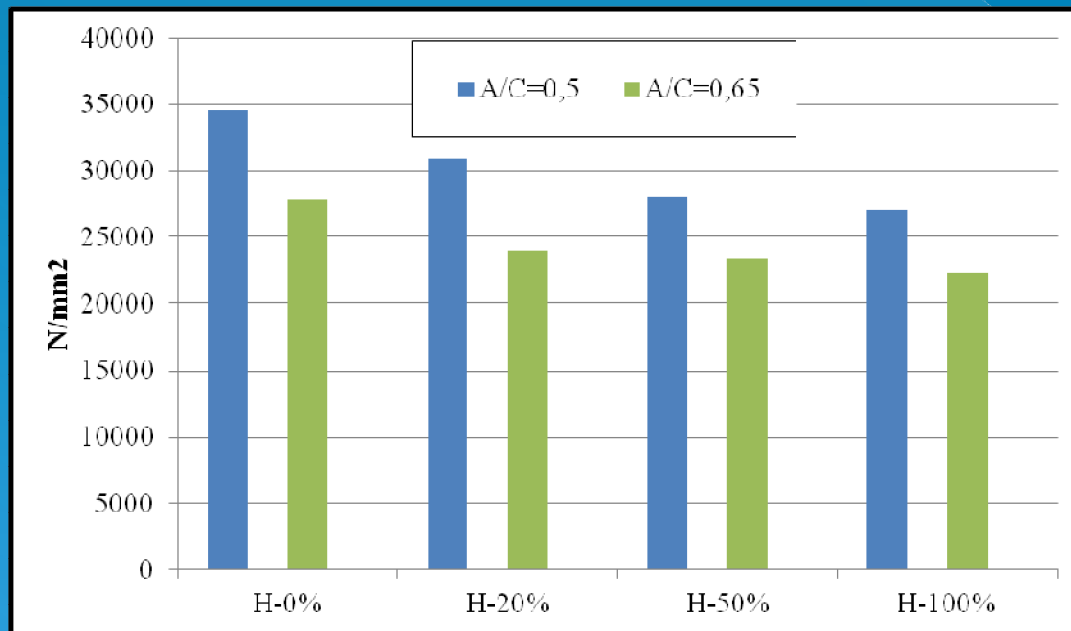


- Este fenómeno aparece en todos los hormigones.
- A edades tempranas los H-100% menores retracciones.
- A mayor relación A/C mayor retracción (no en nuestros ensayos).
- A mayor % de A.R , mayor retracción.
- Influyen también la naturaleza de los áridos o la relación árido/cemento que cuando aumenta origina una reducción en la retracción.



RESULTADOS

MODULO ELASTICO: UNI 6556:1976



- Es de las propiedades más afectadas.
- A mayor relación A/C, menor modulo elástico.
- Para la relación A/C=0.50, y 20% de A.R, se reduce aprox. un 10%, mientras que para sustituciones del 50% y 100% el descenso se sitúa en torno al 20%, respecto al H.Control.
- Para hormigones con relación A/C=0.65 el la reducción varía entre un 10 y un 15% para todos los porcentajes de sustitución.

Conclusiones

- Utilización de residuos exclusivamente de hormigón.
- Máximo 20% de árido reciclado.
- Limitar la resistencia máxima admisible del hormigón.
- Limitar la absorción al 7%.
- Un H.R que cumpla todos estos requisitos, ofrece una garantía total como Hormigón Estructural.

Muchas gracias por su
atención.

¿¿¿¿ ?????

