

# Materiales sostenibles en la edificación

Residuos de Construcción y Demolición, hormigón reciclado.

***PFG EN INTERCAMBIO ACADÉMICO 2011-2012***

***Alumno: Mamen MIÑAN ARENAS***

***tutor destino: Giacomo MORICONI***

***tutor ETSGE: Ricardo PERELLO***

***Universidad de destino: Università Politecnica delle Marche***





# INDICE

---

1. Introducción.....	5
1.1. Definición de los RCD.....	5
1.2. Historia.....	8
1.3. Agentes implicados en el proceso.....	10
1.4. Ventajas e inconvenientes de los materiales reciclados.....	11
1.5. Materiales sostenibles.....	14
2. Clasificación de los RCDs.....	18
2.1. Según el material.....	19
2.2. Según su origen.....	20
3. Propiedades de los áridos reciclados.....	22
3.1. Generalidades.....	22
3.2. Áridos reciclados procedentes del hormigón.....	29
3.3. Áridos reciclados procedentes de mixtos o cerámico.....	33
4. Proceso de producción de árido reciclado.....	40
4.1. Demolición selectiva.....	40
4.2. Etapas del proceso de producción de áridos reciclados.....	41
4.3. Plantas de producción de áridos reciclados.....	42
4.4. Otros tratamientos.....	44
5. Propiedades del hormigón reciclado.....	47
5.1. Hormigón reciclado fresco.....	47
5.2. Hormigón reciclado endurecido.....	49
6. Aplicaciones.....	54
7. Caso aplicable: Diferencia entre hormigón convencional y reciclado.....	56
7.1. Definición de parámetros.....	56
7.2. Definición de los límites del sistema.....	57
7.3. LCI: Life Cycle Inventory.....	58
7.4. Entradas: Materia y energía.....	66
7.5. Salidas: Emisiones.....	72
7.6. Valoración de factibilidad económica.....	78

8. Normativa .....	81
8.1. Legislación RCD .....	81
8.2. Legislación áridos reciclados .....	82
8.3. Legislación Hormigón reciclado .....	82
9. Conclusiones .....	94
Bibliografía .....	96

# 1. Introducción

## 1.1. Definición de los materiales reciclados en la construcción

La construcción sostenible es un concepto global que identifica un proceso completo en el que influyen numerosos parámetros que, apoyados unos sobre otros, tienen como consecuencia productos urbanos eficientes y respetuosos con el Medio Ambiente.

La reutilización y el reciclaje de los residuos de la construcción a lo largo del ciclo de vida de los edificios y las infraestructuras es una de las estrategias fundamentales para alcanzar la sostenibilidad en el sector de la construcción. Y para ello, el concepto de “residuo” debería tender a desaparecer y dejar paso a la consideración de este flujo de materiales como un “recurso”.

Es importante la necesidad de ordenar y mejorar la actual gestión y valoración de los residuos de un sector que genera alrededor de 800 m<sup>2</sup> por persona al año, (los residuos urbanos se sitúan en aproximadamente 525 m<sup>3</sup> por persona al año) y que todavía, de forma mayoritaria, van a parar a los vertederos controlados e incontrolados. Las opciones ambientalmente más recomendables son la reutilización y el reciclaje.

Según la normativa Española, en la que nos basaremos durante todo el proyecto, el I Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2001-2006 define este tipo de residuos, a partir de ahora llamado RCD, como aquellos que “proceden en su mayor parte de derribos de edificios o de rechazos de los materiales de construcción de las obras de otras de nueva planta y de pequeñas obras de reformas en viviendas o urbanizaciones”. En esta línea, el Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición, los define, en su Art. 2.a), como “cualquier sustancia u objeto que, cumpliendo la definición de “Residuo” incluida en el Art. 3.a) de la Ley 10/1998 de 21 de abril, se genere en una obra de construcción y demolición”.

Aunque, desde el punto de vista conceptual, la definición de RCD abarca a cualquier residuo que se genera en una obra de construcción y demolición, en el presente apartado se analizarán los residuos que se incluyen dentro de la definición de RCD, con excepción de:

- Los residuos que generen en obras de construcción y/o demolición regulados por una legislación específica, distinta del Real Decreto 105/2008 y Decreto 200/2004, cuando no estén mezclados con otros residuos de construcción y demolición. Es el caso, por ejemplo, de los residuos de aceites industriales usados, de los residuos peligrosos en general, de los residuos de envases, de los

neumáticos fuera de uso, o de los residuos de apartados eléctricos y electrónicos.

- Los residuos regulados por la Directiva 2006/21/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de marzo, sobre la gestión de los residuos de industrias extractivas.

El sector de la construcción, con todos los subsectores en los que influye, es uno de los que genera mayor impacto ambiental. Existen datos que corroboran que los edificios consumen entre el 20% y el 50% de los recursos naturales, contribuyen en gran manera al aumento de las emisiones y la contaminación, tanto durante el proceso constructivo como a lo largo de su vida útil una vez terminados. También resulta evidente el elevado impacto de su emplazamiento sobre el territorio, en torno al 80% de las personas reside en zonas urbanas, con influencia negativa en otros sectores como el del transporte y la energía. Otro tema fundamental es la importante generación de residuos, constructivos, de mantenimiento y de derribo de los edificios, con perspectivas de aumento y dificultades para su reutilización o reciclaje.

La construcción sostenible abarca no sólo la adecuada elección de materiales y procesos constructivos, si no que se refiere también al entorno urbano y al desarrollo del mismo. Se basa en la adecuada gestión y reutilización de los recursos naturales, la conservación de la energía. Habla de planificación y comportamiento social, hábitos de conducta y cambios en el uso de los edificios con el objeto de incrementar su vida útil. Analiza todo el ciclo de vida: desde el diseño arquitectónico del edificio y la obtención de las materias primas, hasta que éstas regresan al medio en forma de residuos.

### *Crterios y parámetros sostenibles*

Dentro de la amplia posibilidad de líneas a seguir, es necesario establecer una serie de criterios básicos que nos permitan fijar objetivos que sea posible analizar y medir tanto al inicio del proceso como a lo largo de la vida útil de los edificios. Considerando los recursos de los que disponemos en el ciclo constructivo: energía, terreno, materias primas y agua, se establecen unos criterios básicos sostenibles:

- Grado de ocupación del territorio.
- Aportación al cambio climático.
- Variación del ciclo natural del agua.
- Modificación del ciclo de los materiales.
- Calidad de espacios habitables.

Los criterios deberán ser puestos en marcha mediante parámetros que definirán una actuación constructiva sostenible. La consecución de los mismos se debe llevar a

cabo mediante acciones concretas que influirán en uno o varios de los puntos que se enumeran a continuación:

#### Correcta integración en el ambiente físico

- Restricción en la utilización del terreno
- Salud y ecología del lugar
- Reducción de la fragmentación
- Prevención de las emisiones tóxicas
- Realización de estudios geobiológicos
- Conservación de áreas naturales y biodiversidad
- Utilización de tipologías adaptadas a la zona

#### Adecuada elección de materiales y procesos

- Prohibición en el uso de materiales potencialmente peligroso
- Uso eficaz de los materiales no renovables
- Potenciar reutilización y reciclaje
- Utilización de materiales naturales y transpirables
- Uso preferible de materiales procedentes de recursos renovables
- Utilización de materiales con bajas emisiones tóxicas
- Aumento de la durabilidad, transformación y flexibilidad
- Incremento de la vida útil de los materiales fomentando un aumento de la calidad
- Utilización de barreras fónicas y materiales aislantes naturales

#### Gestión eficiente del agua y la energía

- Reducción del consumo en fuentes no renovables
- Reciclaje y reducción del consumo del agua
- Disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub> y sustancias tóxicas (NO<sub>x</sub> y SO<sub>x</sub>) en la atmósfera
- Incremento de aislamiento edificación, ventilación natural, etc.
- Ahorro energético y utilización de energías renovables

#### Planificación y control de la generación de residuos

- Disminución de los residuos inertes mediante reducción en su origen y fomento del reciclaje
- Adaptabilidad y flexibilidad física y funcional
- Minimización de contaminación electromagnética
- Adopción de criterios de proyecto que faciliten el desmontaje y la separación selectiva de los residuos durante lo procesos de rehabilitación y demolición

### Creación de atmósfera interior saludable

- Utilización de materiales con bajas emisiones tóxicas
- Optimización de los equipos de ventilación
- Compatibilidad con las necesidades de los ocupantes
- Previsiones de transporte y seguridad
- Disminución de ruidos y olores
- Gestión del ciclo de vida
- Control de los elementos contaminantes del aire
- Mantenimiento del ambiente interior saludable y de la calidad de los ambientes urbanizados

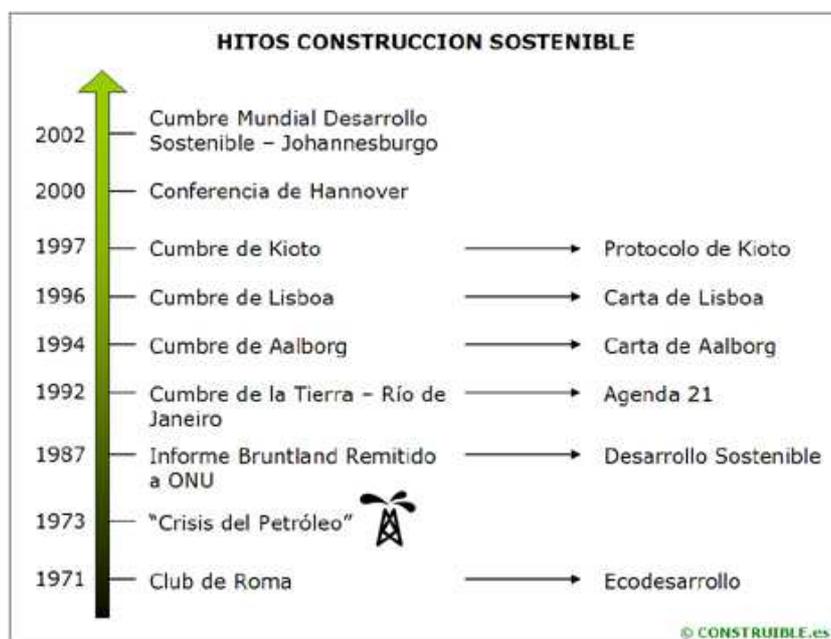
### Eficiencia calidad-coste (coste eficaz)

- Aumento de la calidad en todo el proceso
- Reducción costes de mantenimiento
- Incremento de la estandarización tecnológica y de sistemas
- Desarrollo sistemas de control de calidad
- Establecimiento mecanismos de mercado estándar
- Bajo coste económico y social

## 1.2. Historia

A principio de los años setenta comienzan a vislumbrarse las consecuencias ambientales de la llamada Sociedad Industrial que empiezan a plantear reflexiones sobre el Medio Ambiente y los recursos disponibles. El primer informe del Club de Roma de 1971 sobre los límites del crecimiento ya planteaba dudas sobre la viabilidad del crecimiento económico a

nivel mundial. Es en este contexto también cuando aparece el término “eco-desarrollo” que nunca llegó a encajar realmente en los círculos económicos convencionales aunque contribuyó al aumento de la conciencia social. Con la crisis del petróleo de 1973 se empieza a plantear la necesidad del ahorro energético, al tiempo que comienzan las críticas hacia la denominada sociedad de “usar y tirar”.



Durante estos años palabras como ecología o medioambiente se encuentran presentes en todos los ámbitos y es en los ochenta cuando surge el uso del concepto de “Desarrollo sostenible” aparecido dentro del marco de las Naciones Unidas y actualmente referente obligatorio en todas las políticas de desarrollo económico. Este término planteó, dentro del Informe Brundtland “Nuestro futuro común” en el año 1987, “satisfacer nuestras necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer las suyas”. Es decir, se propone la viabilidad de un desarrollo con condiciones que permita a las generaciones futuras disponer de recursos para su desarrollo futuro.

Desde entonces y a lo largo de los años noventa y principios del siglo actual se han realizado esfuerzos notables en todos los campos con experimentación en el uso de energías alternativas, nuevos materiales, esfuerzos en inversión I+D y aumento de la eficiencia energética a todos los niveles, todo ello mediante la generación de documentos y normativas específicas que han permitido identificar los temas fundamentales y cómo abordarlos. Especial mención merece la denominada Carta de Aalborg, resultado de la Conferencia Europea de Ciudades y Pueblos Sostenibles realizada en 1994 en Dinamarca, o el, por todos conocido, Protocolo de Kioto, resultado del Convenio sobre el cambio climático del año 1997.

El “Desarrollo sostenible” pretende conciliar el crecimiento económico con la idea de sostenibilidad, vinculando lo abstracto con lo físico para perseguir un objetivo común. Se aceptan límites medioambientales a nuestra forma de vivir pero a la vez se confía en las posibilidades de crecimiento o desarrollo. Para ello se establecen pautas sostenibles a tener en cuenta a nivel global:

- Reducción del consumo
- Aumento de la eficiencia del sistema
- Control de la población mundial

A estas pautas generales y relativamente ambiguas se les ha intentado dar un contenido concreto recurriendo a una relación de parámetros y recomendaciones a aplicar en los diferentes sectores económicos ligados al medio físico. Indudablemente el sector de la construcción es uno de ellos, considerando además que su crecimiento se encuentra intrínsecamente relacionado con el desarrollo económico y que la sostenibilidad es ya un objetivo formalmente asumido por todos.

### 1.3. Agentes implicados en el proceso

La definición planteada de la Construcción Sostenible como proceso completo y complejo implica que en el mismo existen numerosos agentes identificables cuya actuación puede ser valorada desde el punto de vista de la sostenibilidad.

Dentro del sector de la construcción se evidencian una serie de tendencias a seguir por parte de todos los participantes en el proceso:

- Es constatable la voluntad creciente en todos los ámbitos del sector de incorporar criterios medioambientales y sostenibles.
- Se toma progresivamente conciencia de los límites medioambientales y de los efectos negativos de proyectos urbanos o edificios insostenibles.
- Se está haciendo un esfuerzo normativo importante para perseguir el objetivo de mejora ambiental.
- Se trabaja en el desarrollo de soluciones técnicas viables y eficientes aplicables en el proceso.
- Se establecen sistemas de medición y control que permitan ir validando las acciones de cada uno de los agentes implicados por separado así como valorar las acciones conjuntas entre los mismos.

A continuación pasamos a describir los agentes más representativos implicados en el proceso de la Construcción Sostenible:

#### La Administración Pública

Es la encargada de establecer las bases del proceso aportando los criterios básicos a aplicar mediante legislación reguladora a todos los niveles. Además tiene que asumir su responsabilidad como modelo formativo, potenciando las experiencias prácticas y los ejemplos para que puedan ser compartidos por la sociedad en general. Su aportación es fundamental y es perfectamente exigible su implicación y ayuda por parte de todos los agentes intervinientes, incluidos los usuarios.

#### Las organizaciones no gubernamentales

Las ONG juegan un papel clave en la concienciación de la sociedad, siendo a día de hoy transmisoras de información y conocimiento sobre todos los ámbitos relacionados con el medioambiente.

### Proveedores energéticos

Los proveedores energéticos han tomado la iniciativa en lo que se refiere al consumo eficiente de la energía y cumplimiento de las exigencias del Protocolo de Kioto. La tendencia es a la diversificación de fuentes de energía con clara potenciación de las energías renovables y campañas de información internas y externas para el fomento de la eficiencia energética.

En un mercado competitivo se están realizando esfuerzos en desarrollo I+D+i sacando al mercado productos y servicios con clara vocación sostenible y aportando información al usuario final y al profesional del sector.

### Promotores inmobiliarios y constructores

Los promotores inmobiliarios y constructores representan un papel clave en el proceso de construcción sostenible ya que de ellos depende en último término el diseño de la obra y la edificación. Son ellos los que marcan las pautas, eligen a los profesionales responsables del diseño y a los prescriptores de la obra. Su implicación es fundamental para realizar cambios en los modelos y la gestión de la obra considerando además la inminente nueva normativa de aplicación de criterios y tecnologías más eficientes en los nuevos edificios.

Un objetivo básico dentro del sector debería ser el aumento del grado de formación y profesionalización en torno a la sostenibilidad y a las grandes posibilidades que desde su posición tienen para interactuar en la reducción de los impactos de los productos inmobiliarios base de su negocio.

### Profesionales del sector

Dentro del bloque de profesionales del sector se incluyen todos aquellos que intervienen en el desarrollo proyectual y en la materialización de la obra: Arquitectos, ingenieros, gestores energéticos, etc. Su predisposición es vital para hacer viables todas las ideas, medidas o criterios generales que hay que concretar en realidades físicas y en cifras concretas.

Los colegios profesionales y los organismos responsables de su formación son fundamentales para el aumento de su profesionalización en temas de sostenibilidad.

### Fabricantes de materiales

Los fabricantes de materiales deberán realizar un análisis de los procesos de fabricación, distribución y transporte para mejorar su eficiencia y desecharán todas aquellas materias primas negativas para el medioambiente potenciando en lo posible

el ahorro energético y el uso de las energías renovables como el resto de los agentes implicados. Dentro de sus posibilidades asumirán un papel divulgativo e informativo sobre las posibilidades de reutilización y reciclaje de los productos que distribuyen.

### Organismos responsables de la formación

Entes u organismos cuya misión es doble, por un lado deben potenciar la investigación en los procesos para poder desarrollar de criterios y tecnologías viables y por otro han de contribuir a la formación eficaz de los profesionales del sector mediante el desarrollo de actualizados y completos programas que incluyan pautas claras de sostenibilidad a todos los niveles.

### Usuario final

El usuario final del producto inmobiliario tiene una concienciación creciente respecto al medioambiente aunque echa en falta orientación y productos de mercado que le permitan poner en práctica ese deseo de sostenibilidad.

Dentro de sus posibilidades, el usuario tiene capacidad de influir en el proceso de dos formas, mediante la elección medioambientalmente responsable del producto más acorde con sus necesidades, y en su manera de ejercer el uso y mantenimiento del producto seleccionado.

Un aumento de la demanda de edificios y servicios asociados a su uso de carácter sostenible contribuirá automáticamente a un incremento de la oferta y mejora de los productos urbanos existentes. Por ello es necesario incidir desde la administración y desde todos los agentes implicados en el aumento de la formación y ayuda para el establecimiento de pautas útiles para convertirnos en usuarios responsables.

## **1.4. Ventajas e inconvenientes de los materiales reciclados**

Como todos los sistemas de producción de materiales, los materiales sostenibles tienen sus ventajas y sus inconvenientes. Pese que a primera vista se piense que tiene más inconvenientes que ventajas debido a su elevado coste, a largo plazo los pros son mayores que los contras.

Desde el punto de vista medioambiental, las ventajas de los materiales reciclados son mucho mayores que sus inconvenientes, no sólo por reducir sus emisiones al medio ambiente sino también por su reducción de costes a largo plazo y consumo energético.

## *Ventajas*

### Medio ambiente más saludable

En promedio, la gente pasa el 80 por ciento o más, de su tiempo libre disponible en el interior de sus viviendas. Los materiales sostenibles son naturales y son hechos sin los productos químicos contaminantes que si tienen muchos materiales de construcción tradicional.

El uso de materiales cuyos recursos no provengan de ecosistemas sensibles, es otro punto a tener en cuenta. Como la bauxita que proviene de las selvas tropicales para fabricar el aluminio o las maderas tropicales sin garantías de su origen.

### Reducción de residuos

Una consideración importante en la arquitectura sostenible es la reutilización y el reciclado. Esto equivale a una reducción de los residuos y un óptimo reciclado.

La capa de ozono se redujo, entre otras razones, por la emisión de los clorofluorocarbonos (CFC)

El PVC, defensor en la causa en la industria del cloro, debido a sus emisiones de furanos y dioxinas, tan contaminantes, van siendo prohibidos en cada vez más usos, como el suministro de agua para consumo humano.

### Consumo de energía

Utilizar materiales de bajo consumo energético en todo su ciclo vital, será uno de los mejores indicadores de sostenibilidad. Los materiales pétreos como la tierra, la grava o la arena, y otros como la madera, presentan el mejor comportamiento energético, y los plásticos y los metales -sobre todo el aluminio- el más negativo.

### Consumo de recursos naturales

El consumo a gran escala de ciertos materiales puede llevar a su desaparición. Sería una opción interesante el uso de materiales que provengan de recursos renovables y abundantes, como la madera.

### Presupuesto a largo plazo

Los costes iniciales asociados con el diseño sostenible será compensado con los años, resultando en ahorros a largo plazo para el propietario. Además, hay numerosos incentivos fiscales y descuentos disponibles para fomentar la arquitectura sostenible.

## *Inconvenientes*

### *El presupuesto a corto plazo*

La construcción sostenible es normalmente más cara que la construcción normal, utiliza materiales que no es común encontrar, aunque quizás esa tendencia cambie con los años, y debido a la gran demanda, se tenga una mejor distribución de los materiales sostenibles.

### *Métodos de construcción y diseño especializados*

La construcción sostenible es todavía un método nuevo. Muchos arquitectos o constructores pueden no estar familiarizados con los materiales y métodos utilizados, por lo cual es un poco difícil encontrar los profesionales adecuados.

### *Otros materiales con mejor aislamiento y resistencia*

Los plásticos y los metales consumen mucha energía en el proceso de fabricación; sin embargo, los plásticos son muy aislantes y los metales, muy resistentes.

La utilización de otras alternativas en el cual su proceso de fabricación sea de un consumo energético inferior, puede no verse compensado con el alto aislamiento y resistencia de estos materiales.

## **1.5. Materiales sostenibles**

Dentro de la construcción sostenible podemos encontrar diversos materiales que son compatibles el medioambiente. Podemos encontrar desde los más sencillos como el caso de las maderas, que podemos encontrarla en la naturaleza, hasta materiales más complejos que necesitan un elaborado proceso de fabricación.

### *Maderas*

La madera es uno de los materiales más sostenibles, mientras se satisfagan algunas pautas. En primer lugar, los tratamientos de conservación ante los insectos, los hongos y la humedad pueden ser tóxicos. Actualmente, se comercializan tratamientos compuestos de resinas vegetales. Por otro lado, debemos tener garantías de la sostenibilidad de la gestión del espacio forestal de donde proviene. Para ello se creó una certificación, el sello FSC.

Al concluir su vida útil, la madera puede reciclarse para fabricar tableros aglomerados o para su valorización energética como biomasa.

Se aconseja el uso de maderas locales, ya que una gran porción de la madera semi-manufacturada que se utiliza en nuestro país proviene de Norteamérica, países bálticos y países nórdicos, con alto consumo energético para su traslado.

### *Metales*

Los principales, son el acero y el aluminio.

Implican un alto consumo de energía y emiten sustancias que perjudican a la atmósfera. Sin embargo, sus prestaciones mecánicas, con menos material, pueden resistir las mismas cargas, y, además, son materiales muy valorizables en obra.

### *Plásticos*

Provenientes del petróleo, se comportan de un modo parecido a los metales, por sus altos consumos de energía y contaminaciones en su elaboración. También, en caso de accidentes de petroleros, generan riesgos sobre el medio ambiente e inestabilidad geopolítica por su control.

Como material de construcción tiene amplias propiedades, como su estabilidad, ligereza y alta resistencia, así también posibilidades de uso como aislamiento.

Algunos materiales tradicionales utilizados para instalaciones como plomo y cobre, se están reemplazando por plásticos como polietilenos y polibutilenos por sus excelentes prestaciones y mejor comportamiento ambiental.

### *Pinturas*

Las hay de muy diversa composición, como disolventes, pigmentos, resinas, la mayoría derivados del petróleo. Han aparecido variedad de productos que reemplazan a los hidrocarburos por componentes naturales, lo que se da en llamar pinturas ecológicas y naturales.

Los problemas surgen cuando los sobrantes son echados en sitios inapropiados con el peligro de emanaciones que contaminan.

Las pinturas plásticas o de base acuosa son las que usan el agua como disolvente.

## *Aislantes*

Los más utilizados en construcción son las espumas en forma de panel o de proyectado. Al ser causantes de la reducción de la capa de ozono, los CFC se reemplazaron por otros productos como el HFC y el HCFC, que a pesar de no afectar la capa de ozono, provocan el calentamiento global.

Hay otras opciones, como la fibra de vidrio o de roca, el vidrio celular, y otras más saludables para el ambiente, ya que provienen de fuentes renovables como la celulosa, el corcho o el cáñamo.

## *Pétreos*

Muestran un impacto pequeño. El impacto más notorio gravita en la etapa de extracción, por la variación que provoca en el terreno, el cambio de paisaje y de ecosistemas. Por su uso generalizado, este tipo de material es el que ocasiona mayores problemas en el colapso de vertederos.

Generalmente se sugiere el uso de materiales del lugar, ya que debido a su peso, trasladarlos implica un alto consumo energético. El mayor beneficio radica en su larga duración, una de las máximas de los materiales sostenibles.

El hormigón (áridos gruesos y finos y cemento), tiene un impacto bastante grande, pero su alto calor específico lo vuelve muy necesario para utilizar estrategias pasivas de aprovechamiento de la radiación solar (inercia térmica).

El cemento consume mucha energía y puede ser peligroso para la salud.

Por este motivo, se deben tomar medidas de precaución en la manipulación para prevenir tanto la inhalación de polvo como las quemaduras o irritación que pueden darse al contacto con la piel, teniendo como prioridad el uso de los componentes libres de cromo VII.

Dentro de lo pétreos cabe destacar el hormigón reciclado, reduciendo la emisión de escombros y pudiendo reutilizarlo para realizar una nueva construcción. Posteriormente desarrollaremos este concepto en el punto 2 con mucho más detenimiento.

## *Materiales con Criterios de Sostenibilidad existentes en el Mercado*

Este es un análisis comparado de las más significativas unidades de obra desde el punto de vista de la sostenibilidad, como también una guía de los materiales que podemos hallar en el mercado.

Como ya hemos visto, el hormigón es el material universal para las cimentaciones. Por su empleo masivo, conlleva un gran impacto ambiental.

Si hiciésemos la comparación de los dos tipos de hormigones a utilizar, tendríamos el hormigón en masa o el armado. El armado, al agregar otro material como las varillas de acero, provoca un impacto más grande.

Desde luego, por la resistencia del material, muchas veces optaremos por el hormigón armado.

En distintos países europeos, se vienen usando desde hace algunos años, áridos reciclados en la fabricación de hormigones, armados o en masa, y en distintas proporciones.

La estabilización de suelos con cal, es otra técnica, aún poco empleada.

El mercado presenta aditivos, elaborados con fibras de polipropileno, que mejoran la resistencia del hormigón, lo que haría posible la reducción del uso de las barras de acero del armado. Otras mejoras logradas, son los aditivos aceleradores del fraguado o desencofrantes sin residuos tóxicos.

Los materiales pétreos son los mejores para las estructuras. Hay ciertas limitaciones en los que constituyen la construcción tradicional, como el adobe, la mampostería, el tapial.

El adobe (ladrillo de barro sin cocer secado al sol), conlleva muchos beneficios para el ambiente, su bajo consumo de energía y contaminación, sus propiedades aislantes, su carácter local.

Como muro estructural podrían utilizarse también bloques cerámicos y otros elaborados con distintos materiales naturales con un buen comportamiento aislante.

La madera es el mejor sistema para pilares, vigas o jácenas.

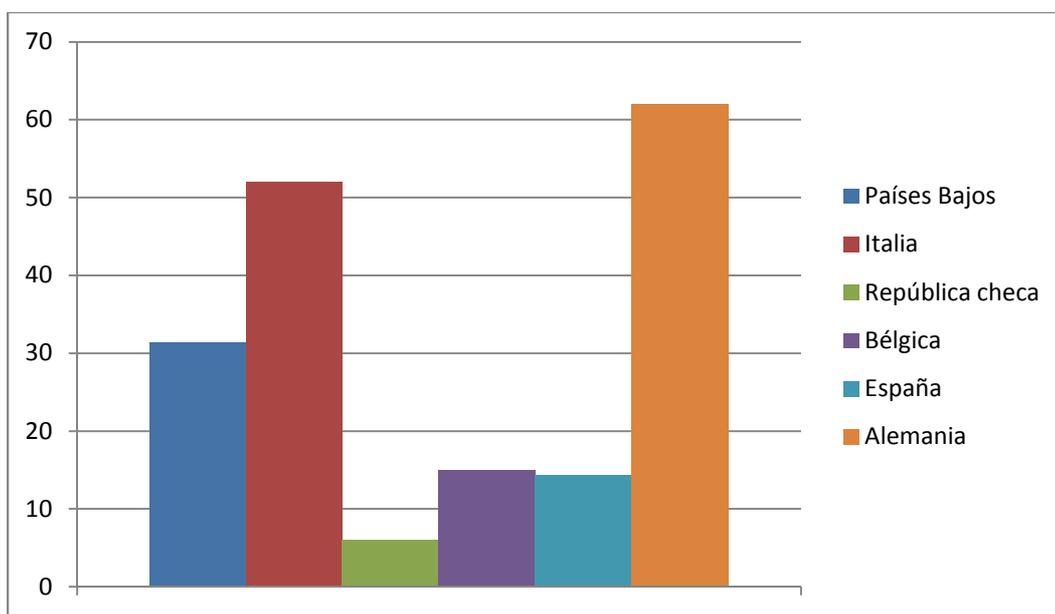
Para nivelar forjados en rehabilitación, es conveniente utilizar materiales que ofrezcan ligereza y aislación acústica y térmica.

## 2. Clasificación de los RCDs

En el campo de los materiales de construcción, la situación actual de nuestra edificación se caracteriza por el uso masivo de materiales pétreos (más del 50% de su peso) debido al dominio del hormigón armado como material base de la edificación, en una situación radicalmente diferente a la de hace cincuenta años, en la que el hormigón armado tenía un papel limitado a elementos estructurales muy concretos.

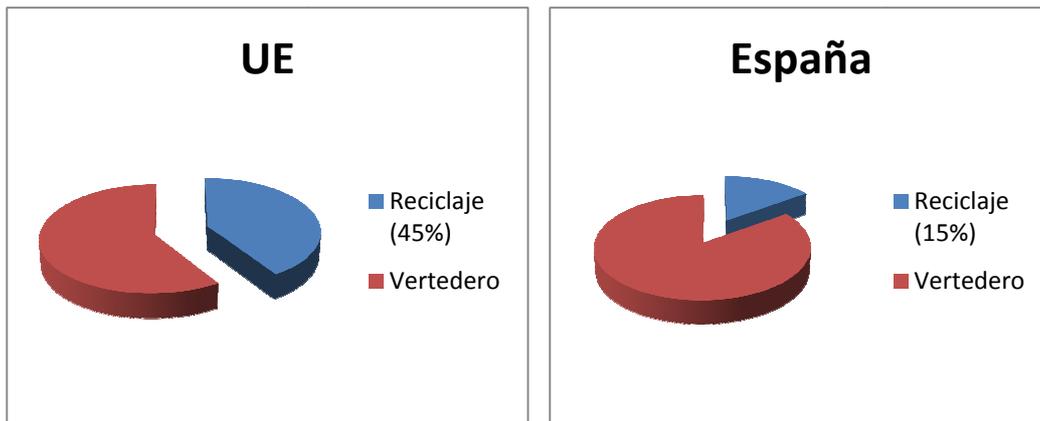
Reciclar el hormigón es la mejor forma de eliminar los escombros procedentes de la demolición de edificaciones realizadas con hormigón. Esta solución es mejor que como se hace habitualmente llevándolos a vertederos, además de ahorrar costes, es una solución más ecológica al disminuir la explotación minera.

En España, se generan cada año 30 y 40 millones de toneladas de RCD previamente utilizados en construcción. Estos RCD en cumplimiento de toda la legislación Medioambiental vigente tanto Europa como del Estado y de las Comunidades Autónomas que regula la correcta gestión de estos residuos, esperan ser reciclados para convertirse en materiales de construcción. El 80% de los RCD pueden valorizarse, transformándose un 35% en áridos reciclados y el resto ser valorizados por gestores especializado (metal, madera, plástico, papel-cartón).



Reciclado de RCD en la UE en el 2009 (fuente FIR)

El porcentaje de reciclaje actual en España se sitúa actualmente cerca del 15 % de la producción respecto a una media europea situada en un 45%, aunque contamos con países como Holanda o Alemania con porcentajes cercanos al 80%.



## 2.1. Según el material

Tras hacernos una idea de los porcentajes de los RCDs en los distintos países, vamos a centrarnos en su clasificación según el tipo de material. Desde el punto de vista conceptual la definición de RCD abarca a cualquier residuo que se genere en una obra de construcción y demolición, realmente la legislación existente limita el concepto de RCD a los residuos codificados en la Lista Europea de Residuos (lista LER), aprobada por la Orden MAM/304/2002, de 8 de febrero, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos, en el capítulo 17 (Residuos de la construcción y demolición). Dicho capítulo se divide en:

- 17 01 Hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos
- 17 02 Madera, vidrio y plástico
- 17 03 Mezclas bituminosas, alquitrán de hulla y otros productos alquitranados
- 17 04 Metales (incluidas sus aleaciones)
- 17 05 Tierra (incluida la excavada de zonas contaminadas), piedras y lodos de drenaje
- 17 06 Materiales de aislamiento y materiales de construcción que contienen amianto
- 17 08 Materiales de construcción a partir de yeso
- 17 09 Otros residuos de construcción y demolición

Quedan excluidas las tierras y piedras no contaminadas por sustancias peligrosas, los residuos generados en las obras de construcción/demolición regulados por una legislación específica y los residuos generados en las Industrias Extractivas.

El Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el cual se regula la producción y gestión de residuos de construcción y demolición, complementa los residuos anteriormente citados siendo:

- Hormigón y escombros limpios
- Ladrillos, tejas, cerámicos
- Metal

- Madera
- Vidrio
- Plástico
- Papel y cartón

## 2.2. Según su origen

Buena parte de los residuos de construcción y demolición son residuos inertes. Según el Real Decreto 1/2009, de 21 de julio, se entiende como residuo inerte “aquel residuo no peligroso que no experimenta transformaciones físicas, químicas o biológicas significativas, no es soluble ni combustible, ni reacciona físicamente ni químicamente ni de ninguna otra manera, no es biodegradable, no afecta negativamente a otras materias con las cuales entra en contacto de forma que pueda dar lugar a contaminación del medioambiente o perjudicar a la salud humana. La lixiviado deberán ser insignificantes, y en particular no deberán suponer un riesgo para la calidad de las aguas superficiales o subterráneas.”

Con respecto a los residuos inertes, el Decreto 200/2004, de 1 de octubre, del Consell de la Generalitat, el que se regula la utilización de residuos inertes adecuados en obras de restauración, acondicionamiento y relleno, o con fines de construcción, define el concepto de residuo inerte adecuado. A tal efecto se considerarán adecuados los siguientes:

- Los excedentes no aprovechados de tierras y piedras no contaminadas de excavaciones y desmonte, codificados de acuerdo con la Lista Europea de Residuos como LER 17 05 04, tierra y piedras que no contienen sustancias peligrosas, y LER 20 02 02, tierra y piedra, y los residuos inertes homogéneos generados en el desarrollo de obras de infraestructuras hidráulicas, de transporte, comunicaciones, suministro energético y eléctrico, cuando la utilización prevista para estos tipos de residuos suponga el empleo de un volumen inferior a 50.000 m<sup>3</sup>.
- Residuos inertes procedentes de la prospección, extracción de minas y canteras y tratamientos físicos y químicos de minerales, incluidos en el capítulo 1 de la Lista Europea de Residuos, con un contenido en humedad inferior al 70% en peso.
- Residuos que de conformidad con la legislación sectorial aplicable a materiales de construcción, sean aptos para su utilización en obras de restauración, acondicionamiento y relleno, o con fines de construcción.

- Aquellos otros residuos a los que se refiere el artículo 5 del Decreto 200/2004, de 1 de octubre, cuando sean declarados como tales por la conselleria competente en medio ambiente, de acuerdo con el procedimiento establecido en los artículos 6 y siguientes.

Aclarados los conceptos de residuo inerte y residuo inerte adecuado, podemos clasificar los RCD según su origen en:

#### RCD domiciliarios

Proceden de obras menores de construcción y reparación domiciliaria y tienen la consideración de residuos urbanos, según la definición del artículo 4.e) de la Ley 10/2000, de 12 de diciembre, de Residuos de la Comunidad Valenciana.

#### RCD industriales

Proceden de obras de construcción o demolición.

### 3. Propiedades de los áridos reciclados

#### 3.1. Generalidades

##### *Mortero adherido*

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

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

Autores	% Mortero adherido	Tamaño árido
Ravindrarajah 1987	54% (a/c = 0,51)	5/37,5 mm
Ravindrarajah 1988	20%	20/30 mm
	45-65%	< 0,30 mm
yaglishita 1993	40,2% (a/c = 0,45)	10/20 mm
Barra M. 1996	51,70%	12/20 mm
	52,90%	6/12 mm
Nagataki 2000	52,30%	AG
Vázquez E. 2002	40,50%	10/12 mm
	49,50%	5/10 mm
Sánchez M. 2005	30,80%	4/16 mm

En la tabla superior se recoge los valores, obtenidos en diversos estudios, correspondientes a la cantidad de mortero adherido en áridos reciclados. En todos ellos pueden observarse el incremento de dicha cantidad conforme disminuye el tamaño del árido repercutiendo negativamente en sus propiedades, esto es debido a

la dificultad para la eliminación del mortero adherido conforme menor sea el árido. La calidad del hormigón de origen apenas influye en la cantidad de mortero adherido, observándose porcentajes ligeramente mayores en aquellos áridos que proceden de hormigones con resistencias elevadas. La reducción de la cantidad de mortero adherido puede lograrse mediante trituraciones sucesivas.

### *Granulometría*

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

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

La cantidad de árido grueso generado oscila entre 70% y el 90% de la producción. Por lo general, esta fracción gruesa se ajusta a los requerimientos que exigen las normativas vigentes quedando enmarcada dentro de los husos granulométricos de referencia en ellas. Es evidente que el tamaño obtenido en la trituración depende fundamentalmente del tamaño que tenía el hormigón de procedencia. Los áridos reciclados presentan formas angulosas debido al proceso de machaqueo y un aspecto rugoso como consecuencia del mortero adherido a ellos.

Para el mismo tamaño máximo de árido, un árido reciclado experimenta pequeñas variaciones de su módulo granulométrico si el sistema de trituración empleado ha sido el mismo que para el árido natural.

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

El porcentaje de finos generado, al desprenderse pequeñas partículas de mortero durante la manipulación del árido grueso reciclado, varía entre el 0,27% y el 1,14% según estudios realizado en nuestro país. Nuestra Norma establece el límite, en

relación a la cantidad de finos admisibles, en un 1% del árido grueso observándose que dicho valores quedan por debajo del mismo en la mayoría de los casos. El problema que plantean los finos, al estar presentes en exceso en la superficie del árido, es que la adherencia entre el árido y la pasta de mortero decrece. Por otra parte hace que la cantidad de agua de amasado aumente.

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

### *Forma y textura superficial*

Por lo general el coeficiente de forma del árido grueso reciclado supera el valor de 0.20, correspondiente al menor valor establecido por la EHE.

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

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

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

### *Densidad*

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

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

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

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

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

### *Absorción*

La absorción en los áridos reciclados alcanza valores muy superiores a los obtenidos en los áridos naturales. Sin duda alguna esto es debido a la cantidad de mortero adherido que presentan dichos áridos. En áridos naturales los valores de la absorción oscilan entre un 0% y un 4% mientras que en los diferentes estudios consultados los valores obtenidos en áridos reciclados van desde 3,3% hasta un 13% aunque, por lo general, la mayoría sobrepasan el valor límite de un 7% establecido por la EHE -08.

El tamaño del árido reciclado influye de manera decisiva sobre la absorción. En las fracciones más finas la absorción es mayor, que en ellas la cantidad de mortero adherido es superior que en las fracciones más gruesas, siendo más acusada dicho efecto cuando menor sea la densidad del árido reciclado.

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

El sistema empleado en el proceso de los RCDs para la obtención de áridos reciclados permite reducir la absorción, ya que a medida que los RCDs pasan por diferentes trituradoras, la cantidad de mortero adherido a los áridos disminuye. Algún

estudio realizado ha obtenido valores de la absorción algo mayores cuando se utilizan machacadoras de mandíbulas o molinos de impactos.

Cuando los áridos reciclados proceden de hormigones que presentan resistencia elevadas, la absorción es menor que en los de resistencia más bajas.

### *Resistencia a la fragmentación*

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

En las fracciones más finas el coeficiente de Los Ángeles es mayor debido a que, como ya se ha comentado anteriormente, el porcentaje de mortero adherido es mayor.

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

El hormigón del que proceden los áridos reciclados también influye en el valor obtenido en el ensayo observándose que, al aumentar la resistencia, el valor del coeficiente de Los Ángeles disminuye.

Autores	Tamaño árido	Coeficiente de reducción	
		Árido convencional	Árido reciclado
Ravindrarajah 1987	5/37,5 mm	18,1	37
Barra M. 1996	12/20 mm	24,7	31
	6/12 mm	20,4	29,5
Yamato 2000	AG	19,4	30,1
González B. 2002	12/25 mm	27	34
Sánchez M. 2005	4/16 mm	35,8	38,9

### *Resistencia a la helada*

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

Cuando el ensayo se realiza utilizando soluciones de sulfato sódico o magnésico, cabe señalar que algunos estudios ponen de manifiesto que los resultados pueden

dejar de ser representativos debido a que dichas soluciones producen un efecto químico destructivo sobre la pasta de cemento.

Algunos estudios realizados en Japón ponen de manifiesto que los áridos reciclados sobrepasan las limitaciones impuestas a los áridos naturales en lo referente a la resistencia a la helada. En otros trabajos se observa que en hormigones reciclados procedentes de áridos utilizados en pavimentos del hormigón la pérdida de peso por tratamiento con sulfatos ha estado entre el 0% y el 2%.

Los estudios consultados proporcionan unos valores de pérdida de peso comprendida entre el 2% y el 22% sobrepasando en algunas ocasiones el límite del 18% establecido en la EHE-08.

Los hormigones que presentan elevadas resistencias se obtienen de áridos gruesos reciclados con mejor comportamiento a la helada, aunque cuando la relación agua/cemento toma valores superiores a 0,55 la pérdida de peso aumenta notablemente.

Si el proceso de obtención del árido consistió en realizar varias trituraciones sucesivas el comportamiento del producto final será muy parecido al del árido natural, esto es debido a la menor adherencia de mortero que se produce en el árido reciclado. Mientras que una única trituración llevada a cabo mediante una trituradora de impacto proporciona valores comprendidos entre el 23% y el 32% de pérdida de masa en el árido grueso. Si el proceso se realiza mediante trituraciones consecutivas dichos valores se reducen entre el 6% y el 18%.

### *Contenido de cloruros*

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

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

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

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

### *Contenido de sulfatos*

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

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

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

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

### *Relación álcali-árido*

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

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

Los áridos reciclados que vayan a emplearse en la fabricación de hormigón deberá evaluarse el contenido en álcalis que aportan.

### *Contaminantes e impurezas*

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

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

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

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

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

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

Posteriormente, en el punto 8 donde se habla de la normativa específica para el hormigón reciclado, se da una mayor información indicando los porcentajes de las impurezas máximas en el árido reciclado.

## **3.2. Áridos reciclados procedentes del hormigón**

### *Árido para hormigón estructural*

En general los árido gruesos reciclados procedentes de hormigón, pueden ser utilizados tanto para hormigón en masa como para hormigón armado, manteniéndose los criterios de dosificación de los hormigones convencionales.

### *Demanda de agua*

El hormigón fresco reciclado tiene una demanda de agua mayor que la de hormigón fresco hecho con gravas naturales y el consumo de cemento para la misma resistencia ligeramente superior.

### *Densidad*

La densidad del hormigón reciclado es inferior a la del hormigón original; con el remplazo del 100% del árido grueso, se puede obtener una densidad entre 10-20% menor. Como se ha explicado en el punto anterior, esto es debido al mortero adherido de los áridos reciclados.

### *Resistencia a compresión*

Sustituciones de hasta 30% del árido convencional por árido reciclado, no alteran de forma significativa la resistencia a compresión del hormigón reciclado. Cuando se producen sustituciones del 100% del árido grueso, la resistencia a compresión puede disminuir entre un 10 y un 20%, en función de la calidad del árido reciclado utilizado.

### *Módulo de elasticidad*

El módulo de elasticidad del hormigón reciclado es siempre inferior (entre un 15 y un 40% al hormigón de referencia, y alcanza los valores menores cuando se utiliza también árido fino reciclado.

### *Retracción del hormigón*

La retracción del hormigón reciclado se mantienen cuando el remplazo del árido grueso reciclados es inferior al 20%, como indica la Instrucción EHE-08, mientras que con un remplazo del 100% del árido grueso la retracción puede aumentar hasta un 50%. Si se utiliza árido fino reciclado los valores aumenta aún más.

### *Fluencia del hormigón*

Al igual que la retracción, la fluencia del hormigón reciclado se mantiene cuando el árido grueso reciclado es inferior al 20%. Para un reemplazo del 100% del árido grueso, la fluencia puede aumentar entre 30-60%, aumentando su valor en áridos finos.

### Absorción

Para una dosificación igual a la del hormigón convencional, la absorción del hormigón con árido reciclado aumenta. Según estudios españoles, en un hormigón convencional de referencia con absorciones comprendidas entre 5 y 6%, puede alcanzar valores de absorción de orden del 8-9% para hormigón reciclado.

### Porosidad

Para una dosificación igual a la del hormigón convencional, la porosidad del hormigón con árido reciclado aumenta. Según estudios españoles, en un hormigón convencional de referencia con una porosidad entre 11-13%, puede alcanzarse valores entre 16-20% para hormigón reciclado.

### Requisitos químicos

El árido reciclado puede funcionar como un foco de propagación de la carbonatación, por su mayor porosidad. A cambio, debido a su cemento adherido proporciona una alcalinidad extra al hormigón reciclado que compensa parcialmente este efecto al colaborar en frenar el avance hacia el interior del CO<sub>2</sub>.

Los áridos reciclados deberán limitar tanto el contenido de cloruros como de SO<sub>3</sub> para su uso en hormigones, al mismo valor que se contempla en las normas para los áridos convencionales.

Según el Anejo 15 de la EHE-08, recomienda limitar el contenido de árido grueso reciclado al 20% en peso sobre el contenido total de árido grueso. Con esta limitación, las propiedades finales del hormigón reciclado (mecánicas y de durabilidad) apenas se ven afectadas en relación a las que presenta un hormigón convencional, siendo necesaria, para porcentajes superiores, la realización de estudios específicos y experimentación complementaria en cada aplicación.

Los siguientes datos recogen las especificaciones que debe cumplir el árido reciclado para esta aplicación, que se desarrollaran posteriormente en el punto 8 de la normativa:

Desclasificados inferiores	≤ 4%
Partículas que pasan por el tamiz de 4 mm	≤ 5%
Terrones de arcilla (*)	≤ 0,6%
Desgaste de Los Ángeles	≤ 40%
Absorción agua árido total	≤ 7%

### Contenido en reciclados

<b>Composición media por m3 hormigón (kg)</b>	<b>Reciclados Pre consumidor</b>	<b>Reciclados Post consumidor</b>	<b>% Reciclados LEED MR 4.1/4.2</b>
Cemento	300	Hasta 45 kg	0
Árido fino	950	0	0
Árido grueso	950	0	190 kg
Agua	125	0	125 kg
Aditivo	-	-	-
Total (kg)	2225	Hasta 45 kg	315 kg
Total (%)		Hasta 2%	Hasta 14,2% Hasta el 15,2%

- Recomendado cemento tipo CEM II A-V 42,5 R con un 15% de cenizas volantes.
- Bajo disponibilidad empleo de agua reciclada 100%.
- 20 % de árido grueso reciclado.
- Contenido en reciclados LEED MR 4.1: % reciclados pos consumidor + ½ reciclados pre consumidor.

### *Árido para hormigón no estructural*

La utilización de árido reciclado procedente de hormigón en hormigón no estructural está incluida en el Anejo 18 de la EHE, permitiéndose hasta un 100% de árido grueso reciclado, siempre que cumpla las especificaciones definidas en el Anejo 15 de la EHE “Recomendaciones para utilización de hormigones reciclados”.

### *Árido fino para morteros*

Una alternativa al empleo de estos áridos reciclados es su utilización como arena para la producción de morteros.

### Demanda de agua

Estos morteros con árido fino reciclado experimentan un aumento notable de la demanda de agua, hasta un 67% adicional para el 100% de arena reciclada, para mantener la consistencia.

### Resistencia a compresión

Para áridos finos para mortero, la resistencia a compresión se reduce en un 33%, mientras que la resistencia a flexotracción que no muestra diferencias apreciables respecto a morteros con arenas naturales.

### Resistencia a compresión

Considerando que los finos procedentes del hormigón machacado contienen una cierta cantidad de hidróxido de calcio, al mezclarlos con agua y materiales puzolánicos como cenizas volantes, humo de sílice o escorias de alto horno a temperatura ambiente adquieren propiedades hidráulicas y forman unos productos con cierta resistencia a compresión.

La sustitución parcial de la arena en un 25%, permite fabricar morteros reciclados sin pérdidas apreciables de propiedades.

### *Cementos fabricados con finos procedentes de hormigón triturado*

Para este fin se utiliza una mezcla de finos menores de 5 mm procedentes de hormigón machacado (que se pulveriza para obtener la finura del cemento), escorias de horno alto pulverizadas o lodos con desechos de cemento procedente de las plantas de fabricación de hormigón, 2-3% de yeso y un acelerador inorgánico de fraguado.

Comparando hormigones que tienen la misma consistencia y resistencia a compresión, hechos con cemento reciclado y con cemento Portland con escorias, se obtiene que presentan características similares en cuanto al desarrollo de la resistencia en el tiempo, retracción de secado y la resistencia a las heladas, mientras que el calor de hidratación es menor y la profundidad de carbonatación mayor al utilizar cementos reciclados.

En España no se fabrican esta clase de cemento sin llegar a ser su producción destacable. En Japón en el año 1988 ya se producían unos 2000 m<sup>3</sup> de hormigón hecho con cementos reciclados cada mes, para ser utilizados en elementos no estructurales, como aplicaciones para cimentaciones, muros de revestimiento o aplicaciones de hormigón en masa. El precio del hormigón fabricado con cemento reciclado resulta aproximadamente un 4% menor que el hormigón normal.

## **3.3. Áridos reciclados procedentes de mixtos o cerámicos**

### *Árido para hormigón estructural*

Una de las aplicaciones del árido reciclado mixto o cerámico es la fabricación de hormigones y mortero.

Dada la reducida densidad del árido mayoritariamente cerámico, estaría en la condición de árido ligero, por lo que puede ser de aplicación para la obtención de hormigones ligeros sin finos. En cambio, el árido mixto puede utilizarse para la

fabricación de un hormigón no ligero de aplicación en la construcción de estructuras de hormigón en masa y hormigón armado, tales como: muros de sótano, pilas de hormigón, chimeneas, todo tipo de productos de hormigón armado prefabricado, elementos para tejados, bloques de hormigón o tejas de hormigón para tejados. La resistencia de este tipo de hormigón reciclado disminuye considerablemente en relación con la del hormigón normal.

### Dosificación

El contenido de cemento cuando se utilizan áridos gruesos reciclados pueden ser hasta un 20% superior al de un hormigón convencional, tanto mayor cuanto mayor es el contenido de partículas cerámicas y la resistencia del hormigón que se quiere fabricar.

Si se usa la fracción 0/4 mm de los escombros de albañilería triturada, se necesita una mayor cantidad de cemento para alcanzar la equivalente resistencia del hormigón. Para hormigones ligeros sin finos con ladrillos triturados, el contenido de cemento puede variar entre 130 y 170 kg/cm<sup>3</sup>, aunque se recomienda aumentar estos valores hasta 200-230 kg/m<sup>3</sup>.

El hormigón reciclado presenta una peor trabajabilidad, debido a la mayor absorción del árido reciclado. Por esta razón, es recomendable presaturar los áridos reciclados, evitando el empleo de aditivos para su fabricación. La presaturación de los áridos provoca además que el agua en superficie del árido retenga una gran cantidad de partículas de cemento proporcionando una mejor adherencia entre la pasta de cemento y el árido.

### Densidad

La densidad del hormigón reciclado no sólo depende del contenido de cemento, sino también de la densidad y la granulometría de los escombros, así como del contenido de árido reciclado utilizado.

La utilización de hasta un 50% de árido reciclado mixto o cerámico en el hormigón produce un descenso limitado de la densidad con un valor medio del 7%. El descenso es más pronunciado en hormigones con sustituciones de árido reciclado superiores al 50%, situándose en un valor medio del 14%.

En términos generales, la densidad del hormigón fabricado con árido reciclado mixto suele estar comprendida entre 1700-2300 kg/m<sup>3</sup>, si el árido reciclado es cerámico varía entre 1600-2100 kg/m<sup>3</sup>, mientras que la densidad de los hormigones ligeros sin finos está comprendida entre 1400-1700 kg/m<sup>3</sup>.

### Resistencia a compresión

La resistencia a compresión del hormigón reciclado con áridos mixtos suele variar entre 10 y 40 N/mm<sup>2</sup>. Sus valores son inferiores a los del hormigón convencional debido a su descenso en la densidad.

Para un porcentaje de sustitución del 50% de árido reciclado, se suele obtener en término medio, un descenso del 10% de la resistencia a compresión. Para una sustitución del 100%, su resistencia a compresión disminuye un 15%.

La resistencia a compresión del hormigón fabricado con áridos reciclados finos evidencia mayores pérdidas, situándose el valor medio del descenso en un 20% para hormigón reciclado con una sustitución de áridos reciclados del 50%. Para una sustitución del 100% de áridos reciclados el valor es de 43%.

Asimismo, el descenso de la resistencia a compresión del hormigón reciclado respecto al hormigón de control, para una misma relación agua/cemento, es más acentuada a bajas relaciones agua/cemento y por lo tanto mayor categoría resistente, no sufriendo importantes pérdidas por debajo de los 20 N/mm<sup>2</sup>.

Para los áridos reciclados cerámicos, la resistencia a compresión de este tipo de hormigones es reducida; las máximas resistencias alcanzadas están en 30 N/mm<sup>2</sup> con 350 kg/cm<sup>3</sup> de cemento y ladrillos de densidad cercana a 2 t/m<sup>3</sup>. Los valores más normales están entre 10-20 N/mm<sup>2</sup>.

### Resistencia a tracción y flexión

La resistencia a tracción y flexión del hormigón con áridos reciclados mixtos son unas de las propiedades del hormigón reciclado que presentan menores variaciones respecto a un hormigón convencional. En cuanto a los hormigones fabricados con áridos procedentes de ladrillos triturados no sufre grandes variaciones pudiendo alcanzar en ocasiones valores superiores, hasta un 10%, a los del hormigón normal.

### Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad del hormigón reciclado con árido mixto, presenta una reducción respecto a un hormigón convencional comprendido entre 10-30%. Cuando las sustituciones son inferiores del 50%, el valor medido se sitúa sobre el 10%. Para una sustitución del 100% de los áridos reciclados el valor medio es del 25%.

Para hormigones con árido reciclado cerámico, el módulo de elasticidad está comprendido entre la mitad y dos tercios del de un hormigón normal de la misma resistencia. Como orden de magnitud, diferentes ensayos han obtenido en hormigones

de resistencia a compresión igual a 32 N/mm<sup>2</sup> en un módulo alrededor de 15000 N/mm<sup>2</sup>.

### Fluencia

La fluencia es mayor para todo tipo de hormigones con árido reciclado mixto o cerámico.

### Retracción

La retracción de secado final del hormigón con árido reciclado mixto es aproximadamente un 40% mayor que la de un hormigón convencional. En particular, para hormigones de ladrillos triturados la retracción está entre 20-60%. Cuando los ladrillos son silico-calcareos triturados, su valor está cerca de un 49%.

### Permeabilidad

La permeabilidad en los ensayos de penetración de agua, dan profundidades hasta un 50% superiores a las obtenidas de los hormigones convencionales.

### Absorción

La absorción, debido a la alta porosidad del árido reciclado y su cemento adherido, el hormigón reciclado tiene una elevada capacidad para absorber agua. La bibliografía consultada es muy escasa respecto a estos aspectos pero se ha contemplado en estudios puntuales una absorción de agua entre dos y tres veces superior del hormigón reciclado respecto al hormigón convencional.

### Resistencia a las heladas

La resistencia a las heladas del hormigón con ladrillos triturados se considera inadecuada. Se produce una intensa descamación sobre los áridos cercanos a la superficie del hormigón.

Los ladrillos tienen una mala resistencia a las heladas, al estar formado el hormigón reciclado con restos de estos materiales, produce una reacción negativa en sus propiedades.

### Requisitos químicos

La velocidad de carbonatación del hormigón con árido reciclado procedente de ladrillos o ladrillos silico-calcareo, es mayor que en hormigones convencionales, debido a la porosidad del árido y su adherencia de cemento. Este efecto puede compensarse incrementando el contenido de cemento en el hormigón.

En cuanto a la resistencia a los sulfatos, los hormigones fabricados con 100% de árido reciclado se comportan ligeramente peor que el hormigón convencional; no obstante, su comportamiento no es tan diferente como para concluir que el árido reciclado no resista la acción de sulfatos.

El hormigón con árido reciclado cerámico presenta una buena resistencia al fuego si se conserva convenientemente seco.

En función de las propiedades tanto del árido reciclado mixto como del hormigón reciclado y las aplicaciones en hormigones no estructurales (para prefabricados y hormigones in situ), estudios españoles han concluido que los áridos reciclados mixtos son adecuados para su empleo en hormigones no estructurales in situ, ya que pueden conseguirse consistencia y resistencia adecuadas para estas aplicaciones. Sin embargo, su utilización en elementos prefabricados sería difícil, debido principalmente a los requisitos de absorción que se fijan en estos elementos (6%).

Debido a la peor durabilidad que presentan estos hormigones, se recomienda limitar el uso de hormigones reciclados con áridos mixtos para hormigones en masa. En el caso de utilizar algún tipo de armadura, se debería limitar su uso a una clase de exposición I (no agresiva).

Aunque no hay actualmente normativa que permita el uso de este tipo de áridos en el hormigón, los estudios españoles consultados recomiendan, a título orientativo, los siguientes requisitos para los áridos reciclados.

### Requisitos propuestos para el árido reciclado mixto

Absorción	≤12%
Contenido de compuestos totales de azufre (S)	≤1%
Contenido de sulfatos solubles en ácido (SO <sub>3</sub> )	≤1%
Contenido de materiales no deseados (vidrio, plástico, papel)	≤1%
Índice de lajas	≤35%
Coefficiente de Los Ángeles	≤50%
Desclasificados inferiores	≤5%
Contenido de finos	≤4%
Partículas de peso específico inferior a 1	≤1%

El control de calidad del árido reciclado podría hacerse a través de otros parámetros, que según el estudio realizado se relacionan con la absorción del árido reciclado y el contenido de compuestos de azufre. Estos parámetros se consideran únicamente orientativos, no limitativos.

Límites complementarios orientativos del árido reciclado mixto

Contenido de materiales cerámicos	≤50%
Densidad saturada con superficie seca	≥2,15 kg/dm <sup>3</sup>
Densidad de partícula tras secado en estufa	≥1,95 kg/dm <sup>3</sup>
Absorción a los 10 min.	≤10,5%
Contenido de yeso	≤2%

La principales características que se le exige al árido grueso reciclado cerámico para la fabricación del hormigón se incluyen en la siguiente tabla (según las recomendaciones del TC 121 DRG de Rilem, 1994).

Exigencias obligatorias	RCAC Tipo I	Método de ensayo
Densidad seca mínima de las partículas (kg/m <sup>3</sup> )	1500	ISO 6783 y 7033
Máxima absorción del agua (%)	20	ISO 6783 y 7033
Máx. contenido de material de densidad (*) <1800 kg/m <sup>3</sup> (%)	10	ASTM C123
Máx. contenido de material de densidad (*) <1000 kg/m <sup>3</sup> (%)	1	ASTM C123
Máx. contenido de materiales extraño (metales, vidrios, materiales blandos, betún) (%)	5	Visual
Máx. contenido de metales (%)	1	Visual
Máx. contenido de materia orgánica (%)	1	NEN 5933
Máx. contenido de fino (<0,063 mm) (%)	3	PrEN 933-1
Máx. contenido de arena (<4mm)	5	PrEN 933-1
Máx. contenido de sulfatos (calculado como SO <sub>3</sub> )	1	Bsv812
Contenido máx. de partículas con textura superficial lisa (%)	30	NEN 5941
Pérdida de peso en los ciclos hielo-deshielo (%)	3	NEN 5924

(\*) determinada en condiciones de árido saturado con la superficie seca.

Se debe limitar también el contenido de cloruros en función del tipo de hormigón a los siguientes valores:

Fracción	Máximo contenido de cloruros en % del peso de árido seco		
	Hormigón en masa	Hormigón armado	Hormigón pretensado
Fracción 0/4	1,0	0,1	0,015
Resto de fracciones	1,0	0,05	0,007

Es importante el control de calidad para evitar reducir la calidad del hormigón fabricado, que de acuerdo con las experiencias prácticas, ha tenido su origen en la presencia de impurezas, en la utilización de un árido que originó segregación y en la falta de agua para hidratar el cemento.

En general los áridos gruesos reciclados procedentes de residuos cerámicos, pueden ser utilizados tanto para hormigón en masa como para hormigón armado. Según las recomendaciones de la RILEM, el árido reciclado procedente de escombros de albañilería se podría utilizar en hormigones con categoría resistente de hasta C 16/20, excepto en ambientes agresivos, en los que estaría prohibida su utilización.

La categoría resistente se puede incrementar a C 30/37 dependiendo de que la densidad de los áridos reciclados, determinada en condiciones de saturación con la superficie seca, sea superior a 2000 kg/m<sup>3</sup>.

En ausencia de datos precisos relacionados con un material reciclado específico, se han propuesto una serie de factores para evaluar las propiedades del hormigón reciclado, que se reflejan en la siguiente tabla.

*Coefficientes de corrección para estimar las propiedades del hormigón reciclado fabricado con árido reciclado*

Resistencia a tracción	1
Módulo de elasticidad	0,65
Coefficiente de fluencia	1
Retracción	2

El aumento de la fluencia al utilizar áridos reciclados se tiene en cuenta a través de la disminución del módulo de elasticidad.

## 4. Procesos de producción de áridos reciclados

La producción de áridos reciclados procedentes de residuos de hormigón se realiza de forma similar al proceso que se emplea para producir áridos naturales machacados. Las plantas que se emplean con dicha finalidad incorporan varios tipos de triturados, tamizadoras y equipos para eliminar los residuos no deseados. Si los residuos son seleccionados adecuadamente en origen, los sistemas de eliminación de materiales no deseados se ven reducidos sensiblemente.

Las plantas de producción de áridos reciclados pueden clasificarse, en función de su capacidad de transporte, en plantas fijas y plantas móviles presentando las primeras una capacidad de producción sustancialmente mayor. En España, según datos facilitados por el GERD, existen actualmente unas 120 instalaciones de reciclaje de RCD repartidas por todas las Comunidades Autónomas, siendo Cataluña y Madrid las que cuentan con un mayor número de instalaciones.

Las instalaciones de reciclaje autorizadas han producido y comercializado en los últimos años cerca de 1,5 millones de toneladas anuales de áridos reciclados, 2 millones de toneladas anuales como materiales para restauración, y un millón de toneladas anuales se ha reciclado directamente en obra.

### 4.1. Demolición selectiva

Se lleva a cabo con el fin de separar y prevenir la mezcla de materiales perjudiciales como madera, cartón, plásticos, etc., de los áridos reciclados que se desean obtener. Los escombros procedentes de los RCDs de estructuras de edificación, si no se realiza una demolición selectiva, el proceso de separación y selección ha de realizar, posteriormente, en la planta de reciclaje con el consiguiente aumento de costes.

Es indudable que el proceso de demolición selectiva resultará más caro que la demolición tradicional, pero puede compensarse en parte al reducirse los costes de transporte y las tasas de vertido. No obstante presenta algunas ventajas como la reutilización directa de diversos materiales o destinar al vertido una masa que representa el 65% de la demolición total.

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

## 4.2. Etapas del proceso de producción de áridos reciclados

El proceso de producción de áridos reciclados varía de unas plantas productoras a otras, según las necesidades y el destino final de producción obtenido. De forma resumida puede describirse a través de las siguientes operaciones:

- 1- Los RCDs llegan a la planta mezclados en un contenedor descargándose en el suelo. Mediante grúa se extraen las piezas mayores de madera, de acero, paredes aislantes y otros metales.
- 2- Antes de triturar y clasificar el material se realiza un precibado del mismo con el fin de realizar un control de tamaño separando los más pequeños, para aprovecharlos directamente, de aquellos cuyo tamaño es mayor. Dicho sistema consta de una criba de tamaño normal 160 mm dispuesta en serie con otras cuyos tamaños habituales son 80 mm y 40 mm. Los rechazos en las dos primeras alimentan el molino primero.
- 3- La trituración primaria consta, por lo general, en las plantas fijas de un molino de impactos, un separador magnético, cabina de triaje, cribas y cintas transportadoras.
- 4- Una pala cargadora realiza el transporte de los residuos de hormigón desde el acopio hasta la cinta de alimentación de molino primario. Dicho molino rompe los bloques a través de la acción de pantallas solidarias al bastidor de trituración mediante esfuerzos de compresión y cizalladura. Admite tamaños hasta de 500 mm. Como molino primario también puede disponerse una machacadora de mandíbulas.
- 5- El separador magnético, situado a la salida del molino, separa los elementos metálicos que pueden haber quedado mezclados con el hormigón. Un separador neumático permitiría eliminar los materiales de baja densidad.
- 6- El material resultante pasa a una cabina de triaje donde, de manera manual, se eliminan los restos de plásticos, maderas, o metales no detectados en el separador magnético.
- 7- El árido reciclado se introduce en una tolva con una criba de corte de 40 mm a través de una cinta transportadora. Todo lo que pasa se transporta a otras cribas dispuestas en serie y con luces de malla correspondientes a los cortes de la grava, la gravilla y la arena formando los diferentes acopios. Lo que queda retenido pasa a la trituración secundaria.

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

### 4.3. Plantas de producción de áridos reciclados

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

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

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

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

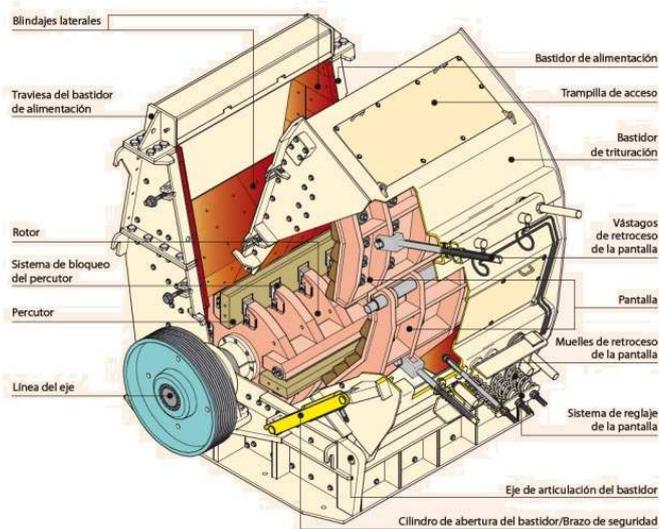
La tecnología de las plantas móviles ha experimentado cambios significativos. Dichas plantas son muy utilizadas como elementos auxiliares en plantas fijas o como alternativa de las mismas. En la actualidad llegan a procesar hasta 400 t/hora. Algunos modelos pueden trabajar como plantas de proceso completo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

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

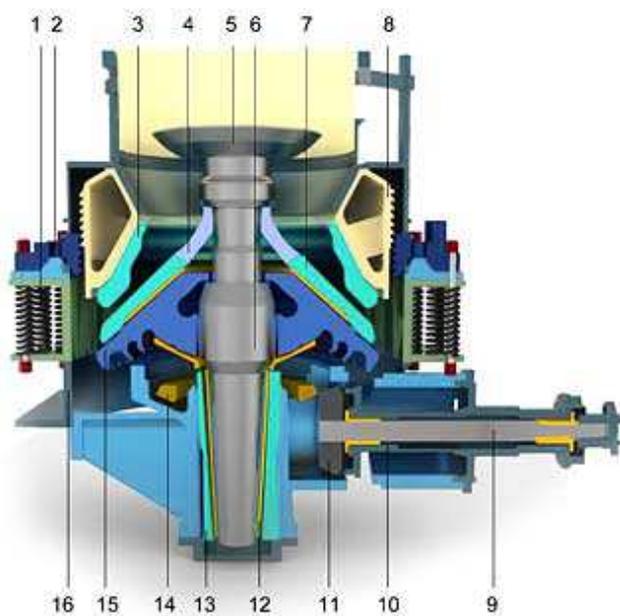
Las trituradoras de mandíbulas generan una cantidad de finos inferior al 10% del material triturado con una buena distribución del tamaño del árido para fabricar hormigón. La forma de las partículas es angulosa. Es la más apropiada para la trituración primaria y la incorporan tanto plantas fijas como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



Las trituradoras o molinos de impactos permiten obtener altos valores de reducción y un producto más fino obtenido en menos etapas de trituración lo que supone reducir los costes de inversión y de explotación. Generan hasta un 40% de finos. El mayor inconveniente es el gran desgaste que sufren los martillos.



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



1. La seguridad de Primavera
2. Pistón
3. Cono Cono
4. Principal eje de Bush
5. Plate Cono placa de alimentación
6. Shaft Eje principal
7. Mantle Manto
8. Anillo de ajuste
9. De ejes de transmisión
10. Marco del eje conductor
11. Pinion Piñón
12. Casquillo del cono
13. Manga del eje principal
14. Equipo
15. Cono de trituración
16. Marco

En la tabla siguiente, se resumen las principales propiedades de los tres sistemas de trituración.

Características	Mandíbulas	Impactos	Cono
Capacidad	Alta	Media	Baja
Costes producción	Bajo	Medio	Alto
Desgaste	Bajo	Bajo	Alto
Calidad del árido	Bajo	Medio	Alto
Contenido de finos	Bajo	Medio	Alto
Consumo energético	Bajo	Medio	Alto

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

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

#### 4.4. Otros tratamientos

La eliminación de impurezas y contaminantes en el árido reciclado se realiza habitualmente mediante tamizado, con separadores magnéticos y de forma manual. Como ya comentamos anteriormente el empleo de técnicas con aire y agua permiten la eliminación de materiales ligeros como la madera, los plásticos o el papel. Los residuos de otros materiales metálicos como el cobre, zinc, aluminio, plomo o

aleaciones de ellos se separan, por lo general, manualmente. Otra vía de separación de estos materiales está basada en las corrientes de Foucault. Este principio de separación está basado en la generación de un campo magnético variable. Al atravesar estos materiales conductores dicho campo se generan en estos materiales las corrientes de Foucault que permiten la separación por repulsión de los materiales no magnéticos y no férricos. Aunque se trata, sin duda, de una novedosa mejora las plantas de reciclaje aún no la incorporan.

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

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

Otros investigadores han desarrollado otros tratamientos con lo que se consiguen áridos reciclados de elevada calidad separando así en su totalidad el mortero adherido al árido. Son sistemas caros y pocos habituales.

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

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

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

Otro sistema patentado para la obtención de áridos reciclados de buena calidad se denomina Cyclite. Dicho sistema consta de una primera etapa de trituración mediante machacadora de mandíbulas hasta la reducción del material a un tamaño que no exceda los 40 mm. A continuación el material obtenido se introduce en un sistema de trituración con cierta similitud a las grandes trituradoras primarias giratorias. En este sistema un cilindro metálico girando sobre un eje excéntrico ejerce de útil contra las paredes interiores de otro cilindro de mayor diámetro. Según los resultados obtenidos

por este procedimiento la calidad del árido reciclado permite su utilización in reparos en la fabricación de hormigón.

## 5. Propiedades del hormigón reciclado

### 5.1. Hormigón reciclado fresco

#### *Consistencia*

La fabricación de hormigones con áridos reciclados conlleva un aumento de la consistencia para una misma relación agua-cemento, respecto a un hormigón convencional. Al presentar los áridos reciclados valores elevados en su absorción, la cantidad de agua absorbida por los áridos durante el proceso de amasado del hormigón será tanto importante cuanto mayor sea el porcentaje de sustitución del árido. Como consecuencia se producirá una reducción de la relación agua-cemento efectiva y, por lo tanto, un aumento de la consistencia del hormigón fresco.

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

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

Para obtener una determinada consistencia puede procederse varios modos:

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

Respecto a la primera opción cabe indicar que, debido a la heterogeneidad de los diversos áridos reciclados que intervienen en el proceso, establecer el valor adecuado para una correcta relación agua-cemento será difícil.

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

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

encofrado. Este método sería el más adecuado, de las tres opciones, por su mayor eficacia permitiéndonos obtener un hormigón reciclado fresco con una consistencia muy similar al hormigón convencional.

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

### *Densidad*

La densidad del hormigón fresco fabricado con árido reciclado es inferior a la del hormigón normal, debido a la menor densidad que presenta el árido reciclado como consecuencia del mortero adherido que envuelve la matriz rocosa. Los valores oscilan entre 2,13 y 2,40 kg/dm<sup>3</sup> mientras que los áridos convencionales tienen unos valores de 2.23 y 2.41 kg/dm<sup>3</sup>.

### *Aire ocluido*

Algunos estudios realizados han determinado incrementos en la cantidad de aire ocluido en hormigones fabricados con árido reciclado, con variaciones entre el hormigón de control y el hormigón reciclado inferiores al 7%. Sin embargo, la mayoría de los hormigones con árido reciclado no presentan variaciones considerables a tener en cuenta.

### *Exudación*

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

## 5.2. Hormigón reciclado endurecido

### *Densidad*

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

### *Resistencia a compresión*

En general, la resistencia a compresión en los hormigones fabricados con árido reciclado disminuye con respecto a lo convencionales, manteniendo en ambos la misma relación agua-cemento, siendo dicha disminución más significativa cuanto mayor sea el porcentaje de árido grueso sustituido. Las posibles causas de dicha disminución pueden darse por diversos motivos.

El primero, por la cantidad de mortero adherido a la matriz rocosa produciendo una menor resistencia mecánica del árido reciclado con respecto al árido natural.

Otra de las causas es el aumento de zonas débiles en la masa de hormigón endurecido, debido a que la superficie de contacto entre el árido natural y el mortero adherido que lleva se suma la superficie de contacto, más débil aún, existente entre los áridos reciclados y el mortero nuevo.

Este aumento de zonas débiles en la masa de hormigón endurecido también se ve influenciado por el aumento de aire ocluido en el hormigón reciclado. La ausencia de superficie de contacto entre algunas zonas produce el debilitamiento con respecto a los hormigones convencionales. Esta causa no se tendría muy en cuenta, puesto que los estudios realizados, como hemos indicado anteriormente, no muestran grandes diferencia entre los hormigones fabricados con áridos reciclados y los convencionales.

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

- Sustitución de diferentes porcentajes del árido grueso natural por árido reciclado.
- Sustitución de diferentes porcentajes del árido grueso y del árido fin natural por árido reciclado.

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

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

Cuando se sustituyen íntegramente el árido grueso y el árido fino las pérdidas de resistencia se hacen más acusadas situándose en una horquilla comprendida entre el 6% y el 30%. Algún estudio puntual, en el que se han utilizado áridos saturados, presentan resultados en los que llegan a producirse incrementos en la resistencia de hasta el 16%.

Aunque hay muy pocos estudios al respecto, las pérdidas en el valor de la resistencia a compresión son moderadas cuando se sustituye, únicamente, el árido fino, fluctuando entre el 0,8% y el 7,6%.

### *Módulo de elasticidad*

Cuanto mayor sea el módulo de elasticidad del árido total y su proporción en la que se mezclen con los demás componentes, más alto será el valor del módulo de elasticidad del hormigón fabricado con ellos. El módulo de elasticidad de la pasta que envuelve los áridos reciclados es inferior al del árido y al del hormigón. Debido a esta circunstancia, los áridos reciclados presentarán un módulo de elasticidad inferior al de los áridos naturales y, por consiguiente, el módulo de elasticidad del hormigón reciclado será inferior al del hormigón convencional.

El módulo de elasticidad se ve reducido debido a la textura superficial más rugosa de los áridos reciclados y las pequeñas microfisuras que puede presentar el mortero adherido.

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

### Resistencia a tracción

Lo estudios consultados proporcionan valores dispersos en la resistencia a tracción indirecta de los hormigones reciclados. Dichas variaciones pueden producirse al utilizarse áridos reciclados con distintas calidades para la fabricación de hormigón reciclado. Las pérdidas de resistencia a tracción son muy pequeñas cuando el porcentaje es inferior al 50%, tanto sustituyendo árido grueso o árido fino. Cuando la sustitución es del 100% los valores van desde 6% hasta el 32% en el caso de árido grueso, en el caso del árido fino su valor es del 30%.

En los estudios que reflejan un aumento significativo de la resistencia a tracción la relación agua-cemento efectiva se redujo en relación con la del hormigón de control. La heterogeneidad en los resultados expuestos es debida a la variación en las condiciones de dosificación, consistencia o resistencia de los hormigones ensayados.

Estudios realizados en nuestro país parecen indicar que la reducción de la resistencia a tracción en los hormigones reciclados es pequeña en niveles de resistencia bajas, pero se incrementa al aumentar la resistencia del hormigón. A tal respecto proponen los coeficientes de reducción de la resistencia a tracción indirecta.

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

### Resistencia a flexotracción

Las variaciones de la resistencia a flexotracción en los hormigones reciclados presentan unas oscilaciones, en función del porcentaje del árido sustituido, similar a las experimentadas en la resistencia a tracción. Según los datos de los estudios consultados, las reducciones son pequeñas cuando la sustitución del árido grueso no es superior al 50% siendo la media alrededor del 5%. Cuando la sustitución del árido grueso es del 100% los valores son más notables, pero sin una gran diferencia de los porcentajes de los áridos gruesos con una sustitución inferior al 50% en algunas estudios, siendo el valor medio alrededor del 10%. Si realizamos una sustitución del 100% del árido grueso y fino, los valores son aun mayores siendo desde un 15% hasta un 29%.

### *Resistencia a cortante*

La disminución de la resistencia a cortante, según los estudios consultados, alcanzan el 26% cuando se sustituye únicamente el árido grueso. Dichas pérdidas alcanzan el 41% cuando la sustitución también se realiza en el árido fino.

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

### *Retracción por secado*

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

Es evidente que el valor de la resistencia será tanto mayor cuanto más alto sea el porcentaje de sustitución del árido natural por el árido reciclado. Cuando se lleva a cabo una sustitución del 100% en el árido grueso el valor medio del incremento de la retracción puede establecerse alrededor del 50%. En sustituciones que no llegan al 50% los valores se ven reducidos significativamente oscilando entre 5% y 19%. Cuando se lleva a cabo el 100% de la sustitución de los áridos finos los valores son inferiores respecto a la sustitución del árido grueso, siendo su valor medio alrededor del 25%. En sustituciones del 100% en áridos gruesos y finos la variación es del 100% en todos los resultados con excepción de uno siendo del 50%.

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

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

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

### *Fluencia*

La fluencia en los hormigones reciclados es superior a la experimentada por los hormigones convencionales, debido al mortero adherido que incorporan los áridos reciclados. A medida que aumenta el porcentaje de árido sustituido mayor es la fluencia. Cuando la sustitución del árido grueso no es superior del 50% la variación no es superior del 22%. En sustituciones del 100% del árido grueso los valores oscilan entre 30% y 65%.

## 6. Aplicaciones

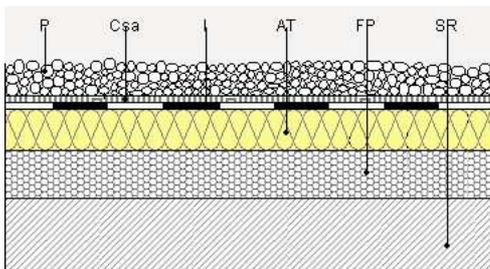
Los áridos reciclados tienen diversas aplicaciones en el campo de la construcción como son la restauración de canchales, pistas forestales, pistas auxiliares en obras y pistas en vertederos, cubiertas planas, zanjas, terraplenes y rellenos, rellenos bajo solera y subbase de secciones peatonales, bases de bidegorris, rellenos de trasdós de muro, rellenos que conforman muros, explanadas, capas de base/subbase de firmes, hormigón no estructural y hormigón estructural.

De todos ellos nos centraremos en aquellos que nos interesan en nuestro campo de investigación y que hacen referencia al ámbito de la edificación.

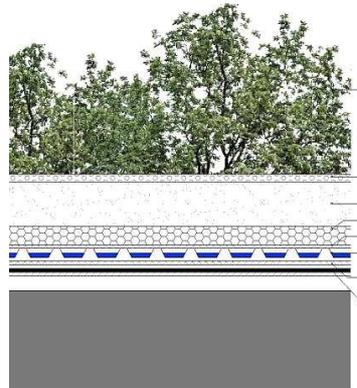
### *Cubiertas planas*

Dentro de las cubiertas planas, diferenciamos dos tipologías de cubiertas donde se puede aplicar el árido reciclado de los escombros y demolición.

#### Cubierta invertida no transitable con material granular



#### Capa drenaje bajo sustrato vegetal (en cubierta vegetal)



Hay que tener unas consideraciones para la utilización de los áridos reciclados en las cubiertas invertidas no transitables con material granular y son las siguientes.

- Debe utilizarse árido reciclado drenante.
- Considerar el aspecto de la coronación de la cubierta con árido reciclado y la visibilidad de esta parte de la cubierta. En caso de que este remate no se considere estéticamente aceptable, podrá terminarse con un pequeño espesor de otro material.

Para la capa drenaje bajo sustrato vegetal (en cubierta vegetal), la consideración técnica es la siguiente.

- Debe utilizarse árido reciclado drenante.

No hay normas aplicables para esta tipología estructural en las que nos podamos basar para su correcta aplicación. Debido a su exposición al exterior y a las posibles condiciones meteorológicas, el árido reciclado debe de ser de una óptima calidad intentando eliminar el máximo mortero adherido en su superficie. De este modo, facilitaremos el drenaje de la posible agua que se encuentre en su superficie sin obstruir su descenso a la capa inferior permitiendo su evacuación.

### *Hormigón estructural*

El uso principal de los hormigones reciclados es el estructural (pilares, cimentaciones, forjados, etc.). En los hormigones estructurales con áridos reciclados se recomienda la utilización de materiales con áridos reciclados seleccionados de hormigón.

La nueva EHE incluye el Anejo 15 sobre hormigón reciclado, que indica que hasta un 20% del árido grueso podrá ser árido reciclado procedente de hormigón (siendo equiparable a los hormigones convencionales).

La normativa de aplicación para los hormigones estructurales con áridos reciclados es la EHE-08 en su Anejo 15, especifica todas las consideraciones a tener en cuenta para su correcta aplicación.

### *Hormigones no estructurales*

Los hormigones no estructurales con áridos reciclados pueden verse aplicados en elementos no prefabricados como es el caso del hormigón de limpieza, hormigón de nivelación, hormigón de relleno, etc.

Las consideraciones técnicas a tener en cuenta para la aplicación de hormigón no estructural con árido reciclado es la siguiente:

- Se recomienda la utilización de árido reciclado de hormigón, al igual que sucedía con el hormigón estructural realizado con árido reciclado.
- Se está investigando, a nivel prenormativo, el hormigón no estructural con árido mixto, tanto para fabricación in situ como para prefabricación.
- En general no suele especificarse la tipología de estos hormigones en proyecto.
- En el caso de los prefabricados que sean vistos, considerar que el aspecto y color del hormigón reciclado podrá resultar distinto, aunque podrán utilizarse técnicas habituales en el sector del prefabricado para modificarlo, en caso de que sea considerado necesario.

Al igual que en el hormigón estructural realizado con árido reciclado, la normativa de aplicación es el Anejo 15 de la EHE-08.

## 7. Caso aplicado: Comparación entre Hormigón convencional y reciclado

El objetivo de este punto es comparar el hormigón convencional y aquel que contenga árido reciclado, con un porcentaje máximo según la normativa para la confección del hormigón reciclado estructural.

Cada hormigón estará formado por elementos distintos, estando constituido el hormigón convencional por áridos triturados nuevos y el hormigón reciclado constituido por un 70% de árido triturado nuevo y un 30% de árido reciclado.

### 7.1. Definición de parámetros

El primer paso para realizar el análisis es definir los parámetros en los que se han basado para su realización. En el análisis se ha utilizado un metro cubico de hormigón convencional, al igual que para el hormigón reciclado, con el fin de ver los resultados y poder comparar ambos hormigones para introducir en el mercado un producto ambientalmente sostenible.

A continuación se muestra en la tabla las cantidades a tener en cuenta para la confección de 1 m<sup>3</sup> de hormigón convencional y reciclado.

Componentes	Hormigón convencional	Hormigón reciclado
a/c	0,55	0,53
a (Kg)	185	185
Cemento CEM II-B/L Kg	335	350
Arena (0-4) Kg (% volumen tot inerte)	346	343
Grava (0-5) Kg (% volumen tot inerte)	348	345 (20)
Árido fino triturado (6-12) Kg (% volumen tot inerte)	526 (20)	-
Árido reciclado (6-12) Kg (% volumen tot inerte)	-	499 (30)
Árido triturado (11-22) Kg (% volumen tot inerte)	527 (30)	524 (30)
Superfluidificante Kg (% peso cemento)	3,3 (1,0)	3,5 (1,0)

Con el fin de analizar las propiedades mecánicas y elásticas de ambos hormigones, se muestra en la siguiente tabla los distintos valores que se ha obtenido de los datos de las pruebas realizadas.

Características	Hormigón convencional	Hormigón reciclado
Resistencia a Compresión a 28 días (Mpa)	30	30
Resistencia a Tracción a 28 días (Mpa)	1,92	1,96
Módulo Elástico Cortante a 28 días (Gpa)	31,18	31,08

La comparación del hormigón convencional y reciclado a partir de sus propiedades elástico-mecánicas da como resultado que las dos mezclas se diferencian en la cantidad de cemento, que es de 15 Kg superior en el hormigón reciclado. Además la obtención de los áridos finos triturados (6-11) mm es diverso en ambos hormigones, en el hormigón convencional proviene de la trituración de las piedras de cantera, mientras que el hormigón reciclado se utiliza árido reciclado proveniente de los plantas de reciclado.

## 7.2. Definición de los límites del sistema

Los límites del sistema están delimitados por el campo de estudio en base de los criterios geográficos, tecnológicos y de otras naturalezas. Según el análisis en los que nos basamos, los datos tecnológicos no son los suficientemente específicos para obtener una información específica.

Para el posterior análisis del LCI (Life Cycle Inventory), tendremos en cuenta los diferentes materiales utilizados en la confección de hormigón convencional y hormigón reciclado. Como anteriormente se ha indicado, los materiales que desarrollaremos posteriormente serán:

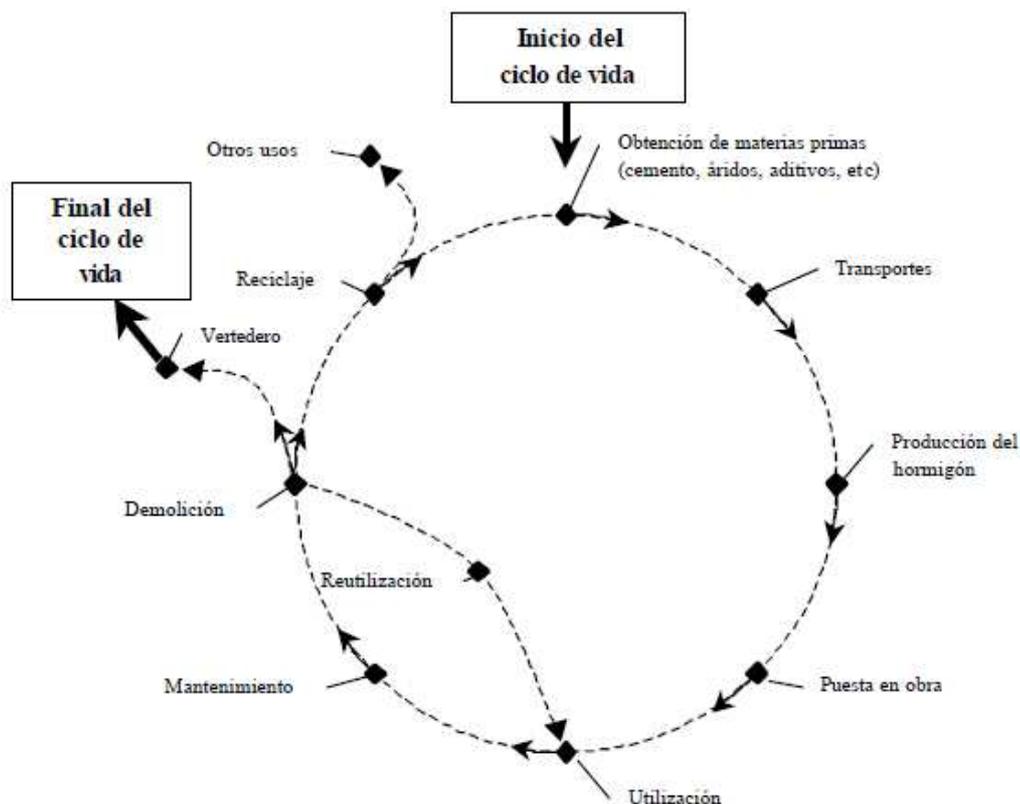
- Árido fino triturado de cantera (6-11 mm), su producción será de 526 kg y solo se utilizará para la confección del hormigón convencional.
- Árido reciclado (6-11 mm), su producción será de 499 kg y solo se utilizara para la confección del hormigón reciclado.
- Cemento, su producción será de 15 kg y lo utilizaremos para la confección de ambos hormigones.

### 7.3. LCI: Life Cycle Inventory

Durante esta fase se recogen los datos e informaciones necesarias para construir el modelo analógico del proceso de estudio; tendremos en cuenta los materiales citados en el punto anterior. Los resultados serán energéticos (consumos y tipo de combustibles utilizados) y ambientales (cantidad y tipología de residuos generados, emisiones producidas) y serán tanto más comprensibles cuanto más detallada resulte el conocimiento de los sistemas productivos involucrados.

Para este análisis del ciclo de la vida deberemos aclarar dicho concepto, se trata de una herramienta adecuada para la recopilación y valoración de las entradas (materia y energía necesaria para la producción), salidas (productos, emisiones y residuos tras la producción) e impactos potenciales de un sistema de producción o servicio a lo largo de su ciclo de vida. Esta herramienta no nos permite analizar por completo el ciclo de la vida de los materiales, pero nos es muy útil para identificar el foco del problema y encontrar la solución más adecuada optimizando los recursos energéticos y materiales.

Entendemos como entradas, el material o energía que entra en un sistema o subsistema de un proceso de producción (los materiales pueden incluir recursos materias primas y productos). Las salidas son el material o energía que dejan el subsistema o sistema en el proceso de producción (los materiales pueden incluir recursos, productos intermedios, productos, emisiones y residuos).



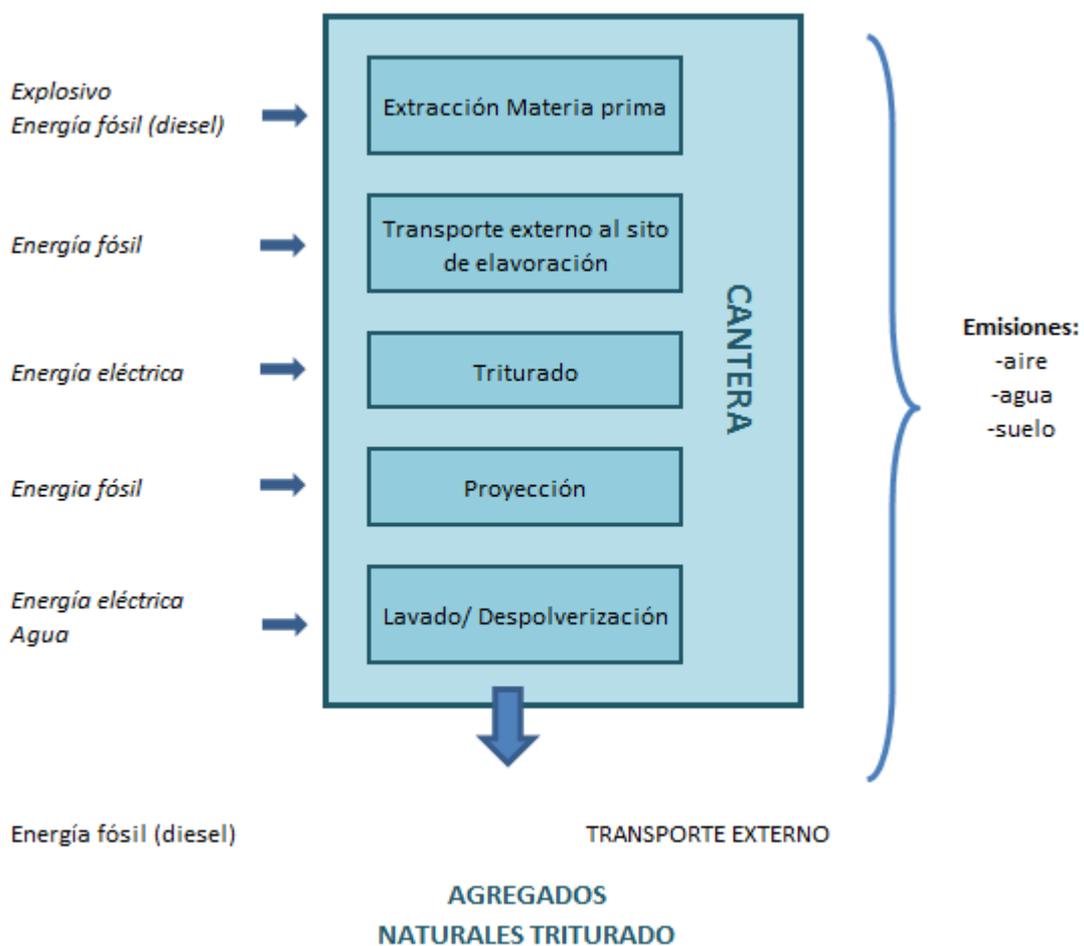
Esquema del ciclo de la vida del hormigón

El esquema nos muestra el ciclo de vida del hormigón, en dicho esquema se indica el fin del hormigón convencional y como puede proseguir la continuación de los materiales reutilizados para la confección del hormigón reciclado.

A continuación analizaremos el ciclo de la vida de los distintos materiales que intervienen en la producción tanto del hormigón convencional como el hormigón reciclado. En dicho análisis diferenciaremos los distintos agregados para su producción siendo los agregados naturales para el hormigón convencional y los agregados reciclados para el hormigón reciclado. Respecto al cemento interviene por igual en ambos hormigones, realizando un análisis del ciclo de la vida y viendo cómo afecta su producción en el consumo energético y fósil.

### *Agregados naturales*

En relación a la producción de agregados naturales (caliza, arcilla, arenisca y corrector de hierro) el sistema entrada/salida es, en líneas generales, el siguiente:



Los consumos totales en términos de energía fósil para el transporte, sea interno (movimiento frente-cantera) o externo (cantera y planta de hormigón) y de energía eléctrica para el funcionamiento de la maquinaria vienen sintetizados en la siguiente tabla:

Energía eléctrica		Energía fósil (diesel)	
Tolva vibrante		Perforadora	40 l/h
Sistema transporte del áridos (cintas)		Martillo hidráulico	60 l/h
Pre-selección/selección		Excavadora Hidráulica	85 l/h
Molinos de impactos		Dumper	25 l/h
Extractor/Alimentadores		Pala cargadora	50 l/h
Secadoras vibratorias		Camión	48 l/h
Consumo total	2,484 kWh/t	Densidad diesel	0,84 kg/l
Factor de conversión	3,6 MJ/kWh	Poder calorífico	42,3 MJ/kg
	<b>8,942 MJ/t<sub>inerte</sub></b>		<b>27,659 MJ/t<sub>inerte</sub></b>

Los criterios utilizados para algunos datos de la tabla anterior derivan de la heterogeneidad de las fuentes y de los márgenes de incertidumbre de los valores. Para la elaboración de los datos se utiliza los siguientes criterios y fuentes:

- El consumo horario de gasóleo de las diversas maquinarias para los diversos tipos de materiales extraídos han sido obtenidos de la búsqueda del estudio universitario de la Universidad Politécnica de Cataluña (A. Cardim de Carvalho Filho, 2001).
- El consumo de diesel por hora para cubrir la distancia entre la cantera y el almacenamiento por medio de camiones (transporte interno) está incluido en "La extracción de materias primas", mientras que en el que está conectado con el transporte desde la cantera hasta la planta de producción (transporte externo), esto en términos del consumo específico de combustible (por tonelada unidad transportada y kilómetro) de la ETH-ESU base de datos contenidos en el software SimaPro (bajo "Diesel-Truck 40t"), que supone una distribución homogénea de las canteras dentro de la zona clasificada nacional (en este sentido, cabe destacar que en el cálculo se han utilizado los valores medios de todo el territorio, pero ha proporcionado unos valores específicos más detallados de las diversas macro-zonas)
- El consumo de gasóleo indicado para las máquinas de cantera implican también un consumo de aceite lubricante que ha estado cuantificado en el precedente estudio (A. Cardim de Carvalho Filho, 2001) y viene sintetizado en la siguiente tabla:

<b>Maquinaria</b>	<b>ml/h lubricante</b>	<b>t<sub>natural</sub>/h</b>	<b>l<sub>lubricante</sub>/t<sub>natural</sub></b>
Perforadora mecánica	120	217	0,0006
Martillo hidráulico	300		0,0014
Excavadora	370		0,0017
Pala cargadora	450		0,0021
Dumper	930		0,0043
<b>Consumo total</b>			<b>0,0100</b>

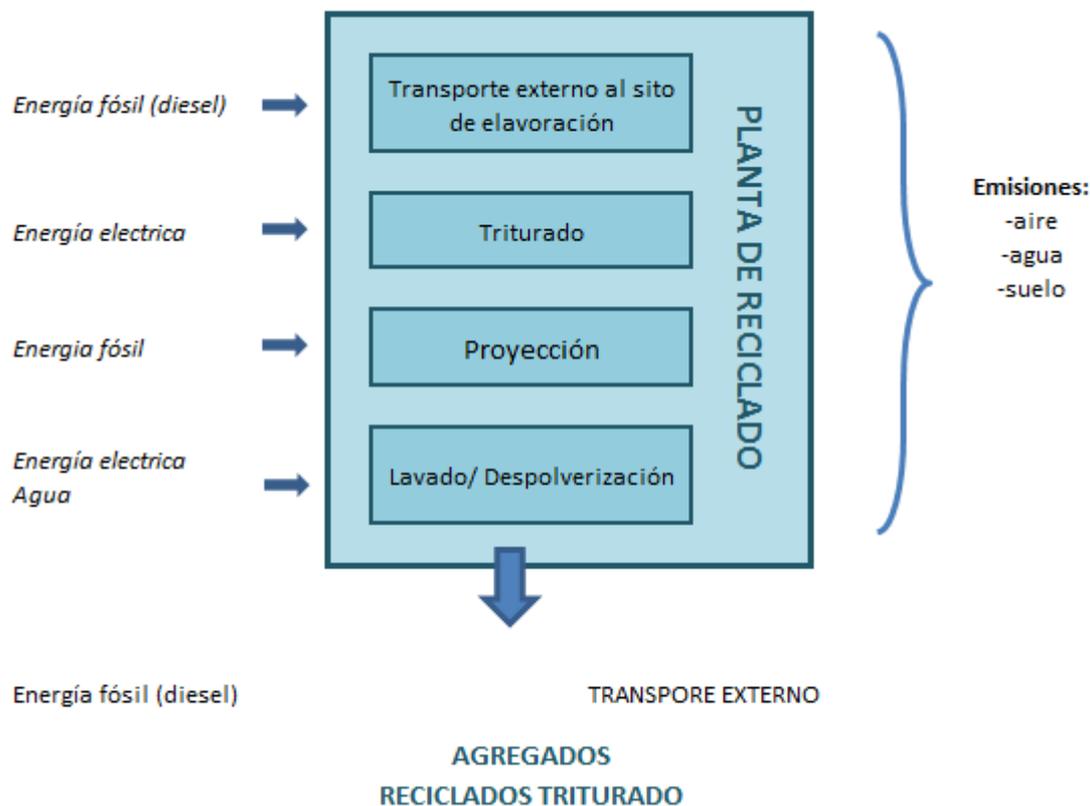
- La utilización de material de cantera sacados mediante explosivo prevé además la utilización de maquinaria específicos (perforadora y martillo para la ejecución de los agujeros), la utilización del mismo material explosivo (con su ciclo de vida específico) que resulta cuantificado con los siguientes datos:

<b>Explosivo</b>	<b>g/t<sub>natural</sub></b>
Goma2	24
Anagolita	96
<b>Consumo total</b>	<b>120</b>

- El combustible utilizado a tener en cuenta, tiene una densidad de 0.84 kg/l y un poder calorífico de 42.3 MJ/kg de acuerdo con el "Plan de eficiencia energético 2007" sobre los aceites combustibles con respecto a los acuerdos de Kyoto.
- La producción de áridos para el hormigón se asume que vengan extraídos de todas las canteras clasificados: en la realidad los materiales inertes excavados no son todos para la producción de árido para hormigón.
- Para los consumos de energía eléctrica, conectada a la elaboración de materiales inertes, los datos de referencia son aquellos de una planta-tipo con tecnología mediamente avanzada. El consumo total se encuentra alrededor de los 600 kW con una eficiencia para la planta del 90% y capacidad productiva de 100-110 m<sup>3</sup>/h. Es de destacar que el valor relativo del consumo de energía es proporcionada por compañías como la de las instalaciones adicionales, tales como oficinas administrativas y servicios en general.

## Agregados reciclados

En relación a la producción de agregados reciclados el sistema entrada/salida es, en líneas generales, el siguiente:



Y el consumo energético total se adjunta en la tabla siguiente:

Energía eléctrica		Energía fósil (diesel)	
Tolva vibrante		Camión	48l/h
Sistema transporte del árido (cintas)			
Pre-selección/selección			
Molinos de impactos			
Separador magnético			
Separador por aire			
Consumo total	2,970 kWh/t	Densidad diesel	0,84 kg/l
Factor de conversión	3,6 MJ/kWh	Poder calorífico	42,3 MJ/kg
	<b>10,692 MJ/t<sub>inerte</sub></b>		<b>123,897 MJ/t<sub>inerte</sub></b>

En este caso al igual que en el anterior punto, indicaremos a continuación los distintos criterios y fuentes utilizados para obtener los datos de la tabla anterior:

- Las distancias de transporte desde el lugar de demolición, de donde provienen los materiales, hasta la planta de reciclado, para la producción de árido reciclado, es difícil de estimar por tanto su estudio se limita al tratamiento del material una vez alcanzado dentro de la misma.
- La distancia para el transporte desde la planta de reciclaje hasta la de hormigonado, tiene los mismos criterios que en el caso de agregados naturales.
- Para la densidad de gasóleo y el relativo poder calorífico sirven las hipótesis utilizadas para los agregados naturales.
- El consumo de energía eléctrica relativa a la instalación completa son las proporcionadas por el sitio de Pescale Spa se refiere a una instalación fija con la tecnología actual.

Es de destacar la notable cantidad de energía fósil utilizada en el proceso de transporte de agregados reciclados debido a sus escasas instalaciones que se pueden encontrar dentro del territorio español y como consecuencia, las grandes distancias de los transportes de materiales hasta las instalaciones de tratamiento.

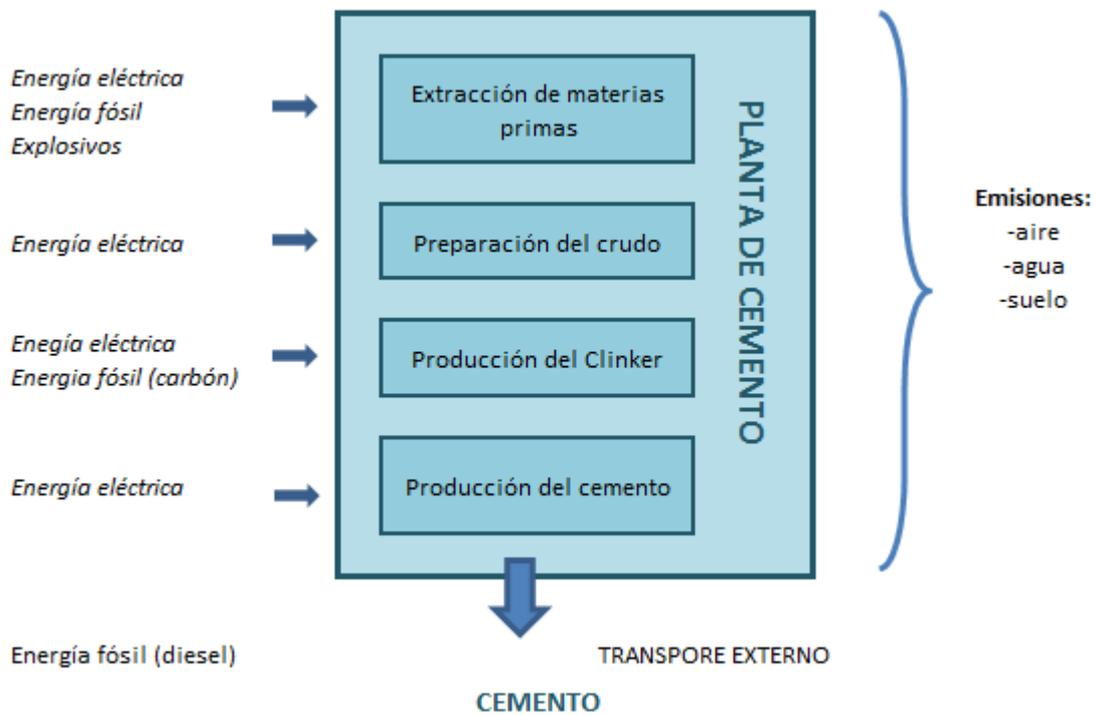
### *Cemento*

Diversas investigaciones apuntan al cemento es uno de los principales materiales que influye significativamente en el proceso de producción del hormigón, teniendo en cuenta sus consumos energéticos para su producción y sus emisiones a las atmósferas.

Para la producción de cemento, la primera observación refiere al tipo de cemento utilizado (clasificado según la UNI EN 197) y por lo tanto a la cantidad de materias primas empleadas. En este caso, con el fin de una mayor generalidad, se considera que en lugar del tipo CEM II B-L se indica en la mezcla un “cemento promedio”, utilizado en el estudio Azienda Buzzi Unicem del 2003.

Los valores relativos a la misma se calcula como un promedio ponderado, basado en la producción, las contribuciones de los distintos productos en el año y que afianza aún más el establecimiento de referencia (cementos son considerados: I 52,5R; II B/P 32,5R; II A/LL 32,5R; IV A 32,5R).

En relación a la producción de cemento el sistema entrada/salida es, en líneas generales, el siguiente:



El consumo energético fósil (diesel), térmico y eléctrico se muestra en las siguientes tablas:

Consumo de energía eléctrica por fase de la producción del cemento

Consumo	MJ/t <sub>cemento</sub>
Triturado de la caliza	18,75
Prehomo. De la caliza	1,45
Prehomo. De la arcilla	1,75
Tratamiento de la arenisca y del corrector de Fe	1,78
Triturado del crudo	134,35
Cocción del crudo a clinker	116,70
Preparación del cemento	129,15
Expedición del cemento	1,68
Preparación del carbón	13,69
	<b>432,99</b>

Consumo de gasóleo por tonelada de cemento

Consumos	$l_{\text{gasóleo}}/t_{\text{cemento}}$	MJ/ $t_{\text{cemento}}$
Canteras caliza	0,482	18,35
Canteras arcilla	0,196	7,555
Canteras arenisca	0,157	6,03
Camión caliza	0,986	38
Camión arcilla	0,098	3,755
Camión arenisca	0,031	1,193
Camión Corrector Fe	0,018	0,694
		<b>75,577</b>

Consumo de energía térmica en el horno de clinker

Consumo	MJ/ $t_{\text{cemento}}$
Combustible del horno (coque+hulla)	<b>3339,45</b>

Para la obtención de datos de estas tablas tendremos en cuenta lo siguientes criterios utilizados:

- La composición del cemento medio, definido anteriormente, está constituido por las materias primas de caliza, arcilla y materias primas no naturales en las siguientes cantidades:

Materia prima natural	Kg/ $t_{\text{cemento}}$
Caliza	623,45
Arcilla	679,15
<i>Total naturales</i>	<i>1302,6</i>
<b>Materias primas no naturales</b>	<b>140,2</b>
	<b>1442,8</b>

- Para el consumo del gasóleo nos basaremos en el estudio (A. Cardim de Carvalho Filho) donde la equivalencia utilizada es de 41 MJ/kg de fuel-oil que corresponde a su poder calorífico a la que se tiene que añadir, para completar la conversión, la relación 0,94 kg/l gasóleo, que es el peso específico del gasóleo a 15°C. Los valores del consumo de gasóleo por maquinaria en la cantera son los siguientes:

Canteras	Perforadora	Martillo hidráulico	Pala cargadora	Excavadora hidráulica	Dúmper	Camión
Gasóleo (l/h)	40	60	50	85	25	48

- El consumo de energía eléctrica relativo a la maquinaria utilizada para la producción del cemento en su distintas fases hacen referencia al mismo estudio utilizado para lo datos del consumo de gasóleo (A. Cardim de Carvalho Filho).
- El consumo de energía térmica que hace referencia al horno de clinker, está basado en el mismo estudio que los dos puntos anteriores (A. Cardim de Carvalho Filho).

#### 7.4. Entradas: Materia y energía

Analizaremos a continuación la cantidad de entrada y salidas para ambos tipos de hormigones. Partiendo de los datos de entrada (materia y energía), se distinguen por una parte los 526 kg de áridos triturados para la producción de hormigón convencional frente a los 499 kg de áridos reciclados para la producción de hormigón reciclado (derivados de la diferencia de las dos mezclas).

##### *Agregado convencional*

##### Recursos materiales

La obtención de 526 kg de árido triturado con la granulometría deseada, 6-11 mm, estable que el material de entrada es igual a 4 veces esta cantidad. Esto es debido a la suposición de que la materia que se obtiene en su producción se distribuye de manera uniforme en las cuatro clases de tamaños producidos por lo general (0-3 mm, 3-6 mm, 6-12 mm, 12-25 mm), siendo los áridos triturados que nos interesan los comprendidos entre 6-12 mm.

Esta división se supone insignificante en lo que se refiere al procedente de la trituración primaria en las canteras que se utiliza generalmente para el traslado de la obra, mientras que el que surge por las acciones posteriores coincide casi exclusivamente con lo que queda unido a las cintas transportadoras (a partir de la información obtenida de los operadores de la sector sugieren que esta cantidad es igual a aproximadamente al 1, 5%).

Una hipótesis más simplificado que la anterior sería tomar como proceso independiente la producción de árido triturado de granulometría 6-11 mm, en cuyo caso, y sin tener en cuenta los otros tamaños, la cantidad de agregados naturales en la entrada coincide con el de salida.

### Recursos energéticos

Teniendo en cuenta los datos obtenidos anteriormente calculados para saber la cantidad de consumo de energía, tanto eléctrica como fósil, necesarios para la producción de 1 t de agregados naturales; podemos obtener la energía necesaria para 526 kg de agregado natural. Siendo el resultado las siguientes operaciones:

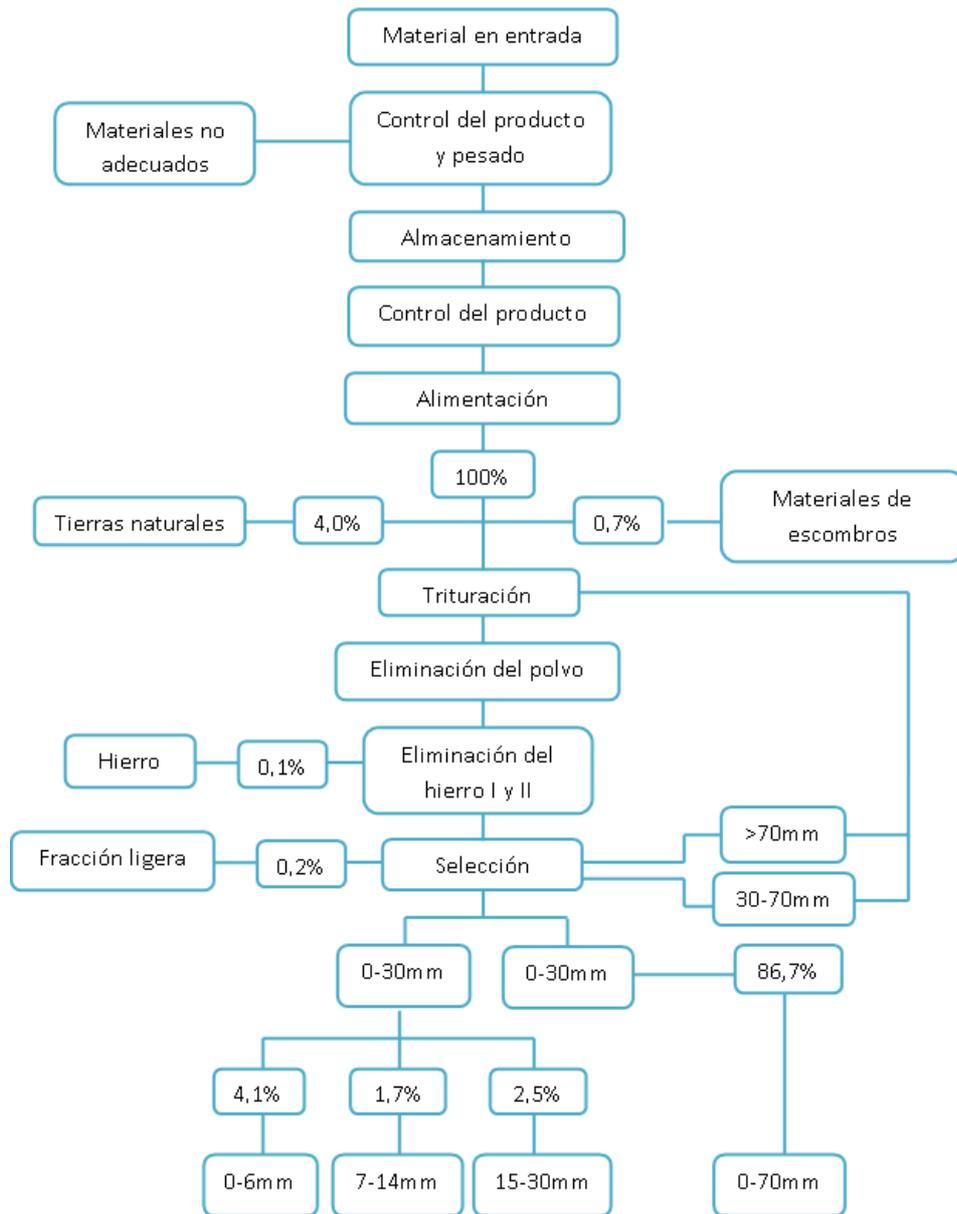
$$8,942 \text{ MJ/t}_{\text{inerte}} \times 0,526 \text{ t}_{\text{inerte}} = 4,703 \text{ MJ}_{\text{eléctrico}}$$

$$27,659 \text{ MJ/t}_{\text{inerte}} \times 0,526 \text{ t}_{\text{inerte}} = 14,549 \text{ MJ}_{\text{fósil}}$$

### *Agregado reciclado*

### Recursos materiales

Para la obtención de 499 kg de áridos reciclados de una granulometría comprendida entre 6-11 mm, se necesitan más de 30 toneladas de escombros en la entrada para una distribución de tamaños como la indicada anteriormente. De este modo, la fracción de áridos reciclados comprendidos entre 6-14 mm es de un 1,7% de materia saliente como se observa en el siguiente esquema:



También en este caso de una hipótesis simplificada de los procesos de producción de las diferentes clases de granulometrías de agregados reciclados, siendo distintos los unos de los otros, el producto de desecho sobre el total de materia requerida en la salida es de alrededor de 5%.

Para la producción de hormigón reciclado se necesitan 15 kg más de cemento con respecto a los agregados naturales. En el apartado anterior se mostraban las cantidades de materias primas utilizadas para la producción de 1 t de cemento, siendo las necesarias para 15 kg:

$$623,45 \text{ kg/t}_{\text{cemento}} \times 0,015 \text{ t}_{\text{cemento}} = 9,352 \text{ kg CALIZA}$$

$$679,15 \text{ kg/t}_{\text{cemento}} \times 0,015 \text{ t}_{\text{cemento}} = 10,187 \text{ kg ARCILLA}$$

Para las materias primas de entrada, no hay que subestimar el consumo de agua tanto en la producción de agregados como en la de cemento.

En el caso de agregados, no se tiene en cuenta el consumo de agua puesto que la cantidad utilizada para el lavado y la eliminación del polvo es igual tanto en los agregados naturales como los reciclados.

En el caso del cemento, los datos proporcionados por la industria del sector estiman un consumo para las operaciones de producción y lavado de aproximadamente 0,24 m<sup>3</sup> de agua por tonelada de cemento producido y un consumo de 0,01 m<sup>3</sup> de agua por tonelada de cemento para uso civil y anexos. Si tenemos en cuenta que en la mayoría de los casos, el agua utilizada para la producción y lavado se vuelve a introducir en el ciclo productivo después de ser tratada, el consumo coincide con el uso civil, que resulta despreciable respecto al total de entrada.

### Recursos energéticos

Teniendo en cuenta los datos obtenidos anteriormente calculados para saber la cantidad de consumo de energía, tanto eléctrica como fósil, necesarios para la producción de 1 t de agregados reciclados; podemos obtener la energía necesaria para 499 kg de agregado reciclado. Siendo el resultado las siguientes operaciones:

$$10,692 \text{ MJ/t}_{\text{inerte}} \times 0,499 \text{ t}_{\text{inerte}} = 5,335 \text{ MJ}_{\text{eléctrico}}$$

$$123,897 \text{ MJ/t}_{\text{inerte}} \times 0,499 \text{ t}_{\text{inerte}} = 61,825 \text{ MJ}_{\text{fósil}}$$

Para la producción de 15 kg de cemento, el consumo energético eléctrico, fósil y térmico es el siguiente:

$$432,99 \text{ MJ/t}_{\text{cemento}} \times 0,015 \text{ t}_{\text{cemento}} = 6,495 \text{ MJ}_{\text{eléctrico}}$$

$$75,577 \text{ MJ/t}_{\text{cemento}} \times 0,015 \text{ t}_{\text{cemento}} = 1,134 \text{ MJ}_{\text{fósil}}$$

$$3339,45 \text{ MJ/t}_{\text{cemento}} \times 0,015 \text{ t}_{\text{cemento}} = 50,092 \text{ MJ}_{\text{térmico}}$$

En términos de consumo energético total para el hormigón reciclado será:

$$5,335 \text{ MJ}_{\text{eléctrico}} + 6,495 \text{ MJ}_{\text{eléctrico}} = 11,83 \text{ MJ}_{\text{eléctrico}}$$

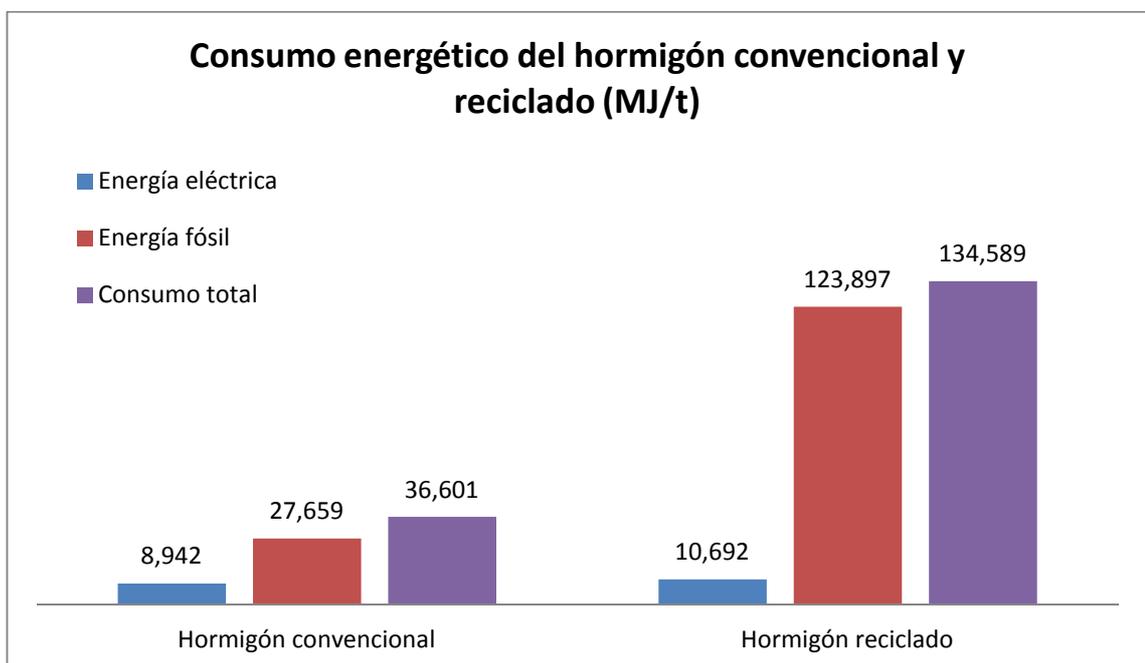
$$61,825 \text{ MJ}_{\text{fósil}} + 1,134 \text{ MJ}_{\text{fósil}} = 62,959 \text{ MJ}_{\text{fósil}}$$

$$50,092 \text{ MJ}_{\text{térmico}}$$

## Comparaciones de los resultados

Una vez obtenidos los resultados de los consumos energéticos podremos realizar un estudio comparativo entre el hormigón convencional y el hormigón reciclado. En este estudio también veremos el consumo energético del cemento, puesto que afecta al consumo del hormigón reciclado al tener que añadirle más cantidad para su producción.

Iniciaremos comparando los consumos energéticos para la producción de una tonelada de agregados naturales, para la producción de hormigón convencional, y una tonelada de agregados reciclados, para la producción de hormigón reciclado.

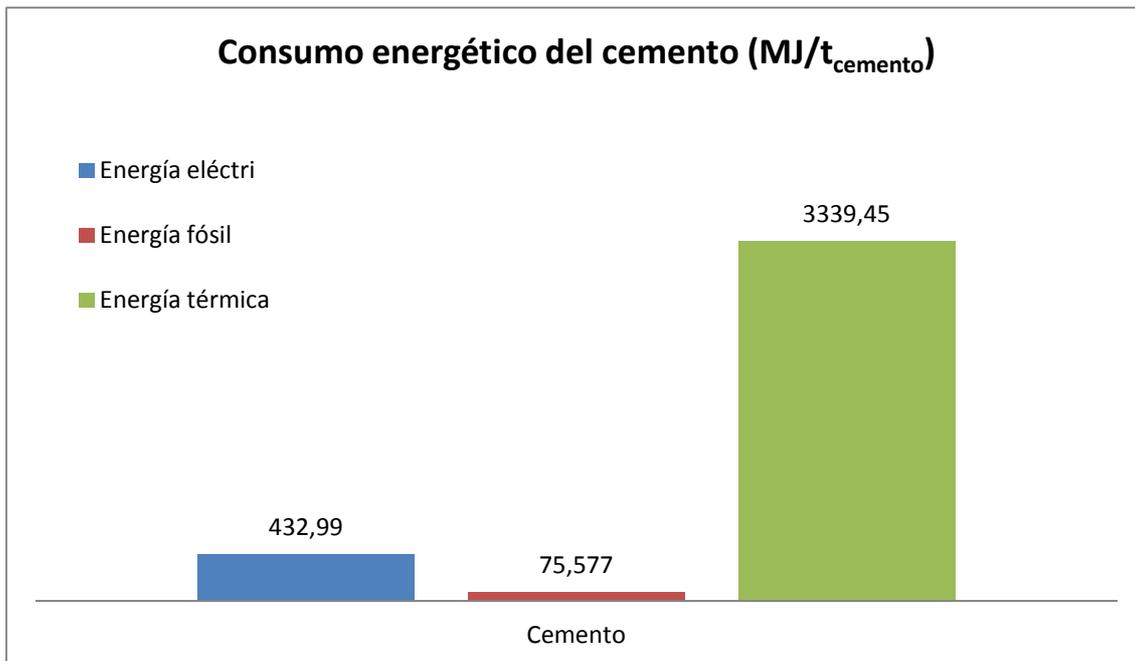


El consumo de energía necesario para la producción del hormigón reciclado es más del triple que el del hormigón convencional, como podemos observar en la gráfica.

La energía eléctrica en ambos hormigones es muy similar, siendo un poco más elevada en la del hormigón reciclado. Por ello, no se tiene en cuenta la diferencia de dicho consumo entre los dos hormigones.

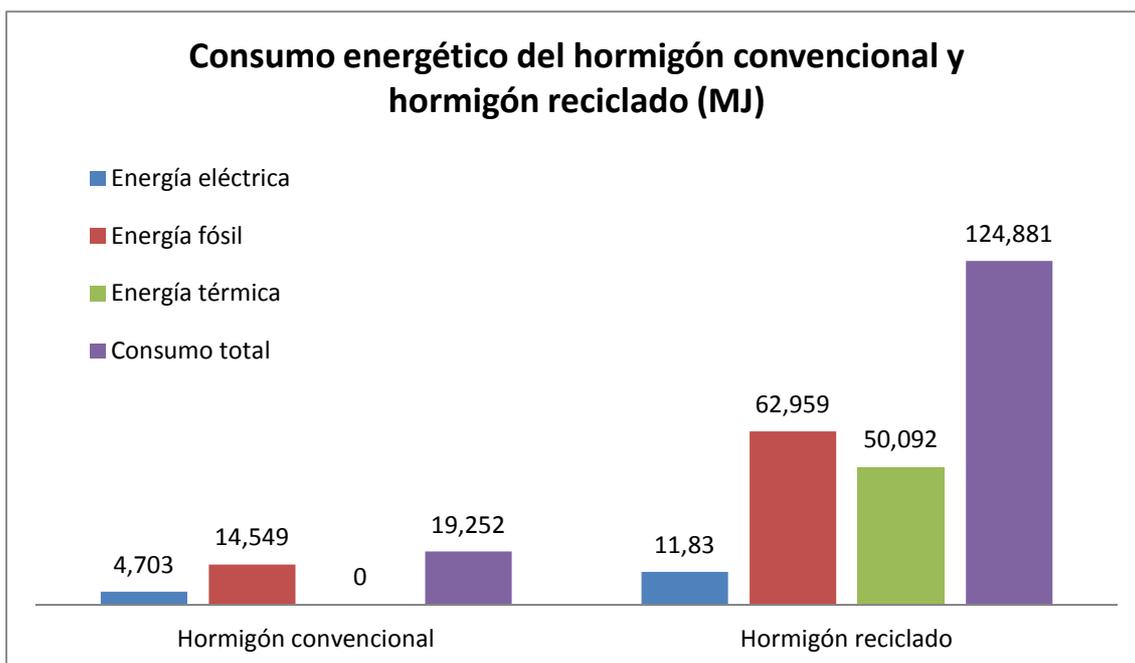
En el caso de la energía fósil observamos una gran diferencia entre ambos hormigones, siendo mucho más elevada en el hormigón reciclado. Esto es debido a la lejanía de las plantas de reciclado, en nuestro país no son tan comunes las plantas de áridos reciclado produciendo un alto consumo fósil para realizar su transporte.

Después de ver los consumos de los hormigones, proseguiremos con el consumo de energía para la producción de una tonelada de cemento.



En la producción de cemento se ve un alto consumo de energía térmica, en comparación con el resto. La cocción del clínker necesita mucha energía térmica siendo este proceso casi el 90% del consumo energético total.

A continuación compararemos el consumo energético necesario para la producción de 1m<sup>3</sup> de hormigón convencional y hormigón reciclado. Primero compararemos la energía consumida por los agregados naturales, para la producción de hormigón convencional, y los agregados reciclados, para la producción de hormigón reciclado.



El consumo energético total del hormigón reciclado es más de 6 veces que el del hormigón convencional.

La energía eléctrica de agregados naturales y agregados reciclados son muy similares (4,073 MJ y 5,335 MJ respectivamente), en cambio para la producción de hormigón reciclada se ve doblado dicho valor con respecto al hormigón convencional. Sumando la energía eléctrica de los agregados reciclados y del cemento, producen este aumento en el consumo de energía.

Como anteriormente hemos indicado, la gran diferencia entre el consumo energético fósil del hormigón convencional y hormigón reciclado es debida a la distancias de las plantas de reciclaje. La energía fósil que necesita el cemento para su producción, en este caso, es indiferente con respecto al elevado consumo de los agregados reciclados.

El consumo energético térmico produce un aumento a tener en cuenta en el hormigón reciclado, respecto con el del hormigón convencional que es nulo.

## 7.5. Salidas: Emisiones

Otro de los parámetros fundamentales en el análisis de fiabilidad son las emisiones más significativas del sistema. Por ello, de las diferentes salidas que producen la producción de los hormigones convencionales y reciclados, sólo nos vamos a centrar en cuatro factores principales:

- CO<sub>2</sub>: Por su importante influencia en el efecto invernadero (cambio climático) y el carácter global de la misma.
- NO<sub>x</sub>: Por su influencia en la acidificación atribuidos a los procesos energéticos de los sistemas que usan combustible fósil (hornos, maquinarias mecánicas y vehículos de transporte) y la eutrofización (abundancia anormalmente alta de nutrientes), teniendo un carácter regional.
- SO<sub>2</sub>: Por su influencia en la acidificación atribuido al consumo de combustibles fósiles (centrales termoeléctricas, equipos mecánicos y vehículos de transporte) y efecto regional.
- Polvo: Por la importante repercusión visual y directa con un efecto local sobre imagen y salud del entorno y sus habitantes.

Las emisiones de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> y polvo en gramos para una tonelada de cemento son los siguientes, siendo los datos obtenidos del estudio de A. Cardim de Carvalho Filho.

### Salidas energía eléctrica

Consumo	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	Polvo
Triturado de la caliza	2750	6,12	14,41	4
Prehomo. De la caliza	213	0,47	1,12	0,31
Prehomo. De la arcilla	258	0,57	1,35	0,375
Tratamiento de la arenisca y del corrector de Fe	261	0,58	1,37	0,3805
Triturado del crudo	19749	43,93	103,45	28,75
Cocción del crudo a clinker	17154	38,16	89,86	25
Preparación del cemento	18985	42,23	99,45	27,65
Expedición del cemento	247	0,55	1,29	0,3595
Preparación del carbón	2064	4,59	10,81	3,005
	<b>61681</b>	<b>137,2</b>	<b>323,11</b>	<b>89,83</b>

### Salidas energía fósil

Consumos	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	Polvo
Canteras caliza	1747	27,01	2,58	0,174
Canteras arcilla	712	11	1,05	0,071
Canteras arenisca	566	8,75	0,84	0,0565
Camión caliza	3576	52,29	5,29	0,3565
Camión arcilla	354	5,47	0,52	0,0355
Camión arenisca	112	1,74	0,17	0,0115
Camión Corrector Fe	65	1,01	0,00965	0,0065
	<b>7132</b>	<b>107,27</b>	<b>10,4597</b>	<b>0,7115</b>

### Salidas totales

Consumos	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	Polvo
Energía eléctri (g/tcemento)	61681	137,2	323,11	89,83
Energía fósil (g/tcemento)	7132	107,27	10,55	0,7115
Energía térmica (g/tcemento)	898766	665	1,45	46,9
	<b>967579</b>	<b>909,47</b>	<b>335,11</b>	<b>137,442</b>

Tras obtener los resultados de las salidas para la producción de cemento, podemos calcular las emisiones que se producen en cada uno de los factores para 1 MJ. Primero calcularemos los gramos emitidos para 15 kg de cemento. Siendo el resultado el siguiente.

### CO<sub>2</sub>

$$61681 \text{ g(CO}_2\text{)}/t_{\text{cemento}} \times 0,015 t_{\text{cemento}} = 925,215 \text{ g(CO}_2\text{)}_{\text{eléctrico}}$$

$$7132 \text{ g(CO}_2\text{)}/t_{\text{cemento}} \times 0,015 t_{\text{cemento}} = 106,96 \text{ g(CO}_2\text{)}_{\text{fósil}}$$

### NO<sub>x</sub>

$$137,2 \text{ g(NO}_x\text{)}/t_{\text{cemento}} \times 0,015 t_{\text{cemento}} = 2,058 \text{ g(NO}_x\text{)}_{\text{eléctrico}}$$

$$107,27 \text{ g(NO}_x\text{)}/t_{\text{cemento}} \times 0,015 t_{\text{cemento}} = 1,601 \text{ g(NO}_x\text{)}_{\text{fósil}}$$

### SO<sub>2</sub>

$$323,11 \text{ g(SO}_2\text{)}/t_{\text{cemento}} \times 0,015 t_{\text{cemento}} = 4,847 \text{ g(SO}_2\text{)}_{\text{eléctrico}}$$

$$10,55 \text{ g(SO}_2\text{)}/t_{\text{cemento}} \times 0,015 t_{\text{cemento}} = 0,158 \text{ g(SO}_2\text{)}_{\text{fósil}}$$

### Polvo

$$89,83 \text{ g(polvo)}/t_{\text{cemento}} \times 0,015 t_{\text{cemento}} = 1,347 \text{ g(polvo)}_{\text{eléctrico}}$$

$$0,7115 \text{ g(polvo)}/t_{\text{cemento}} \times 0,015 t_{\text{cemento}} = 0,011 \text{ g(polvo)}_{\text{fósil}}$$

Una vez que sabemos los gramos emitidos para 15 kg de cemento, pasamos a calcular los gramos emitidos para 1 MJ. Para ello tendremos en cuenta el consumo energético, calculado anteriormente, para la producción de 15 kg.

### CO<sub>2</sub>

$$925,215 \text{ g(CO}_2\text{)}_{\text{eléctrico}} / 6,495 \text{ MJ}_{\text{eléctrico}} = 142,45 \text{ g(CO}_2\text{)}/ \text{MJ}_{\text{eléctrico}}$$

$$106,96 \text{ g(CO}_2\text{)}_{\text{fósil}} / 1,134 \text{ MJ}_{\text{fósil}} = 94,32 \text{ g(CO}_2\text{)}/ \text{MJ}_{\text{fósil}}$$

### NOx

$$2,058 \text{ g(NO}_x\text{)}_{\text{eléctrico}} / 6,495 \text{ MJ}_{\text{eléctrico}} = 0,317 \text{ g(NO}_x\text{)/ MJ}_{\text{eléctrico}}$$

$$1,601 \text{ g(NO}_x\text{)}_{\text{fósil}} / 1,134 \text{ MJ}_{\text{fósil}} = 1,412 \text{ g(NO}_x\text{)/ MJ}_{\text{fósil}}$$

### SO2

$$4,847 \text{ g(SO}_2\text{)}_{\text{eléctrico}} / 6,495 \text{ MJ}_{\text{eléctrico}} = 0,746 \text{ g(SO}_2\text{)/ MJ}_{\text{eléctrico}}$$

$$0,158 \text{ g(SO}_2\text{)}_{\text{fósil}} / 1,134 \text{ MJ}_{\text{fósil}} = 0,139 \text{ g(SO}_2\text{)/ MJ}_{\text{fósil}}$$

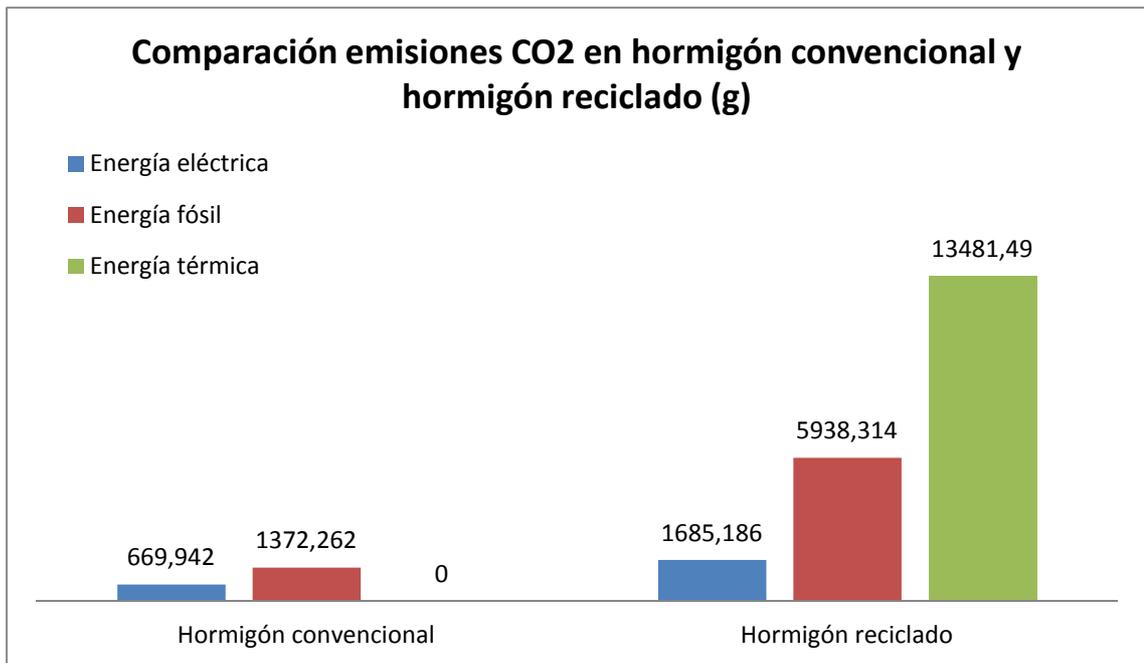
### Polvo

$$1,347 \text{ g(polvo)}_{\text{eléctrico}} / 6,495 \text{ MJ}_{\text{eléctrico}} = 0,207 \text{ g(polvo)/ MJ}_{\text{eléctrico}}$$

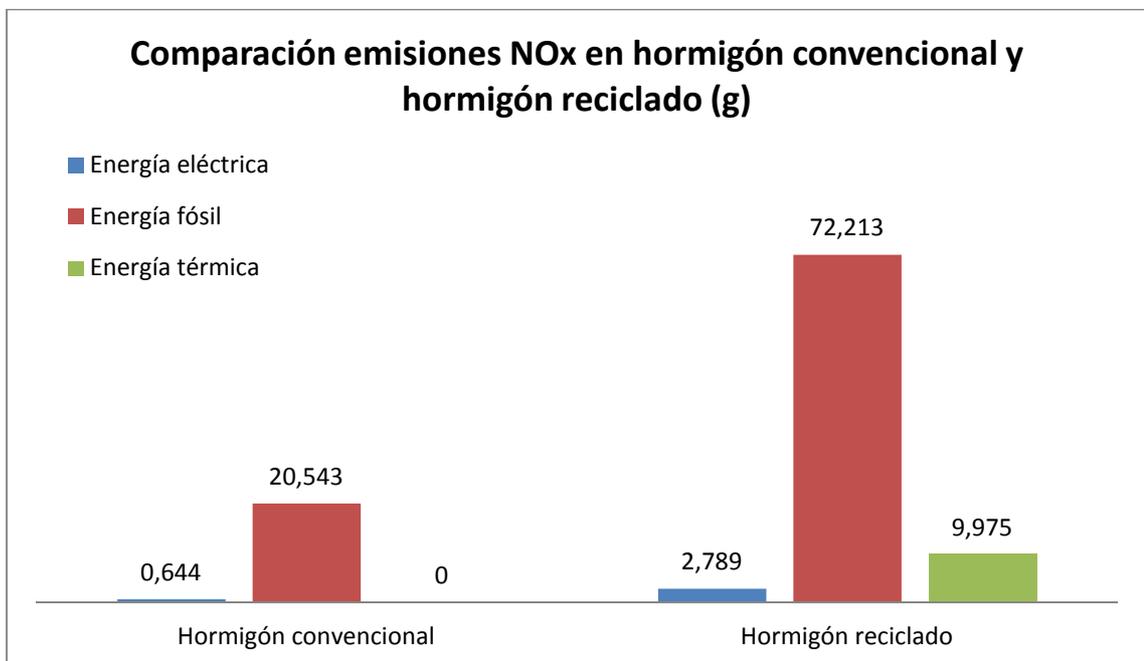
$$0,011 \text{ g(polvo)}_{\text{fósil}} / 1,134 \text{ MJ}_{\text{fósil}} = 0,0097 \text{ g(polvo)/ MJ}_{\text{fósil}}$$

Teniendo todos los datos calculados anteriormente, podemos obtener el valor de emisión para la producción de hormigón convencional y hormigón reciclado. Simplemente tendremos que multiplicar los datos anteriores con el consumo energético para la producción de ambos hormigones y en el caso del hormigón reciclado añadirle los valores 15 kg de cemento.

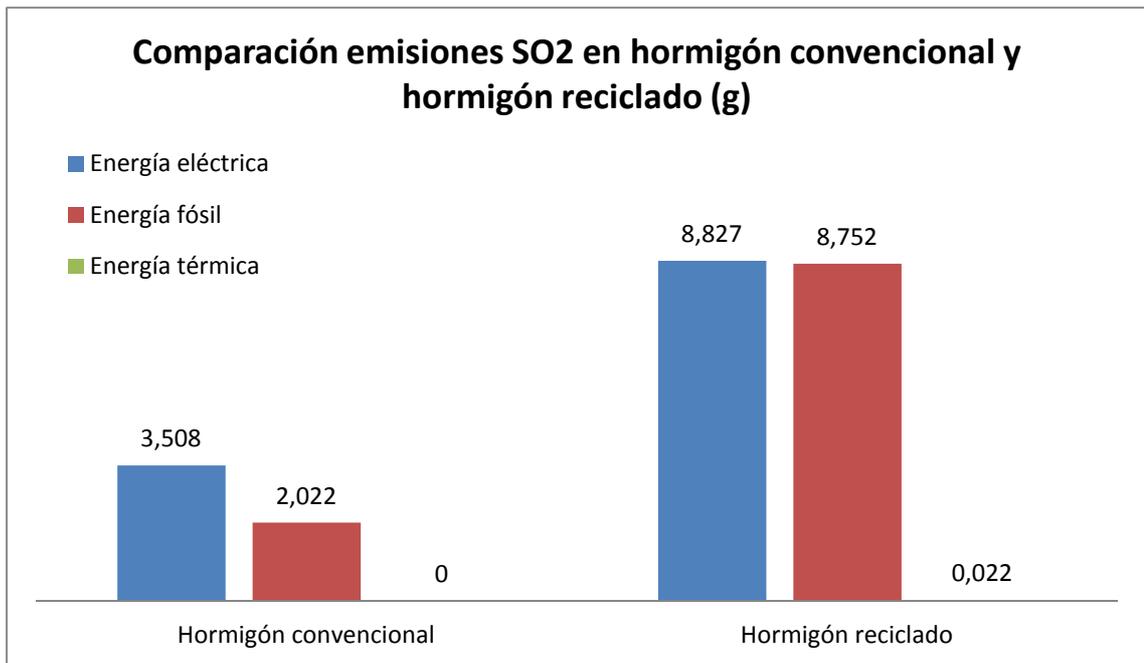
Fuente		Energía eléctrica	Energía fósil	Energía térmica
Emisiones (g)				
CO2				
Hormigón convencional		669,942	1372,262	-
Hormigón reciclado		1685,186	5938,314	13481,490
Nox				
Hormigón convencional		0,644	20,543	-
Hormigón reciclado		2,789	72,213	9,975
SO2				
Hormigón convencional		3,508	2,022	-
Hormigón reciclado		8,827	8,752	0,022
Polvo				
Hormigón convencional		0,974	0,141	-
Hormigón reciclado		2,452	0,610	0,704



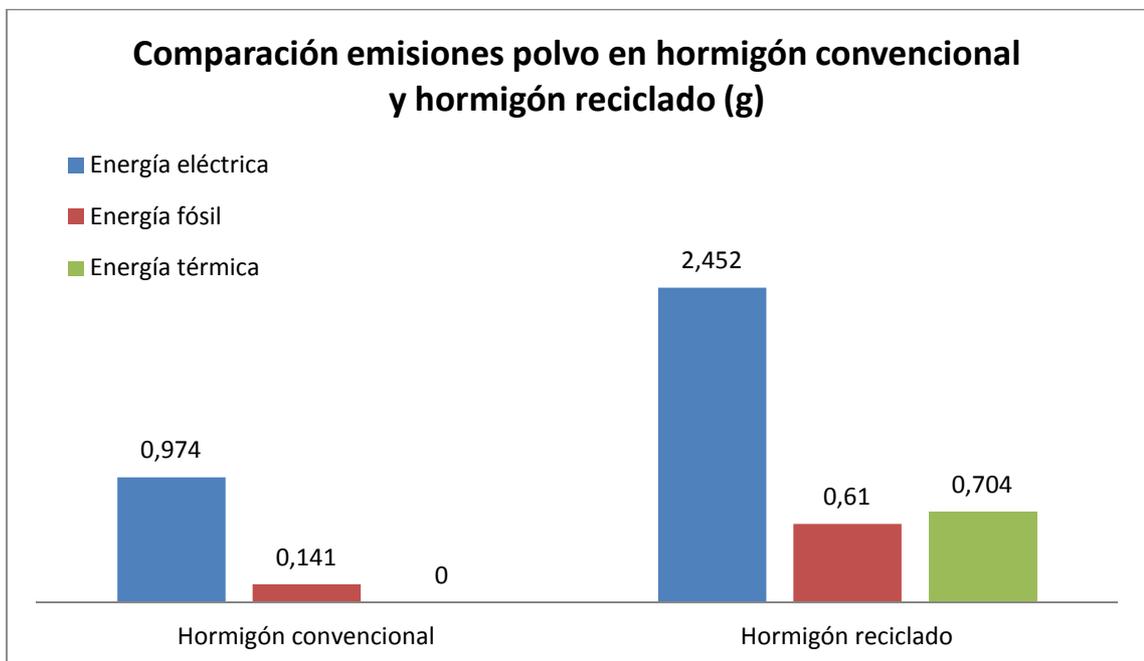
El consumo de CO2 se ve desproporcionadamente elevado en el hormigón reciclado debido a los 15 kg de cemento que se le añade de más, siendo tan solo la emisión para la energía térmica seis veces más que sumando todas las energías del hormigón convencional.



La emisión de NOx es mucho más elevado en el hormigón reciclado que en el hormigón convencional. En un principio en la energía eléctrica no hay una gran diferencia, mientras que en el resto de energías son muy elevados su diferencia.



Al contrario que los anteriores casos, la emisión de SO2 respecto a la energía térmica es despreciable. En cambio, los valores de la energía eléctrica y energía fósil se disparan siendo más del doble y cuádruple, respectivamente, en el caso del hormigón reciclado.



Al igual que hemos estado en el resto de las gráficas, los valores del hormigón reciclado son mucho mayores que los del hormigón convencional, disparándose en la energía fósil siendo más del cuádruple para el hormigón reciclado.

En el caso de la energía eléctrica, no hay una gran diferencia de emisiones entre el hormigón convencional y el hormigón reciclado. Si vemos que los valores se disparan en las gráficas, es debido los 15 kg de cemento que añadimos en el hormigón reciclado.

Para el caso de la energía fósil, la dificultad para encontrar una central de hormigón reciclado cercana hace que los valores sean superiores a los del hormigón convencional. Si consiguiéramos aumentar el número de centrales, estos valores serían similares llegando a ser despreciables para su comparación.

En el caso de energía térmica, todas las emisiones que se producen son debidas al cemento, siendo nulas en el caso del hormigón convencional.

## 7.6. Valoración de factibilidad económica

En estos últimos años, debido al creciente interés por la problemática del medio ambiente, se han realizado restricciones cada vez más duras en el ámbito de la construcción. Estas restricciones se ven afectadas tanto en las canteras de áridos naturales como en los vertederos de escombros de residuos de la construcción. Por este motivo, los áridos reciclados están teniendo un incremento en su utilización.

La Política de Productos Integrada, de 7 de febrero de 2001, pretende reducir los efectos ambientales de los productos durante su ciclo de vida, que van desde la extracción minera de materias primas hasta la gestión de residuos, pasando por la producción, distribución y utilización. Asimismo, tiene por estrategia reforzar y reorientar la política medioambiental relativa a los productos con objeto de promover el desarrollo de un mercado de productos más ecológicos. La Política de Productos Integrada identifica como objetivos de la Construcción:

- Reducción y gestión de los residuos generados por los materiales de la construcción.
- La innovación del producto verde, incluyendo su desarrollo tecnológico e investigación y la difusión de la información sobre las mejores prácticas.
- La creación de mercados para productos verdes con instrumentos fiscales.
- La transmisión de la información de arriba hacia abajo en la cadena del producto.
- La responsabilidad extendida al productor.

Para valorar los costes que implican la utilización de áridos reciclados, analizaremos todos los procesos que ello conlleva. Desde su demolición y eliminación hasta su producción.

Gracias a las ayudas del gobierno, en ciertos países se facilita el reciclaje en la construcción. Esto hace que se abaraten los costes de los áridos reciclados y puedan

utilizarse, realizando una construcción más sostenible. En comparación con los países que no reciben estas ayudas, se ve que la utilización de áridos reciclados es mucho inferior a los que si tienen ayudas. Por lo tanto, éste es un factor importante para la elección de los productos a la hora de la elaboración del hormigón.

Uno de los problemas hoy en día es el elevado nivel de residuos, necesitando mucho espacio para su eliminación. Debido a su demanda y la menor extensión de terreno en los vertederos, hace que se tengan que buscar alternativas más económicas y ecológicas. Una buena alternativa es su reciclaje, evitando ocupar estos espacios y contribuyendo a mejorar el medioambiente.

La elección del método de demolición afecta al coste final del producto. En su elección no tendremos solo en cuenta la estructura del edificio, también hay que fijarse en la mejor forma para su posterior reciclaje. Una demolición selectiva es mucho más costosa que una demolición tradicional, llegando a aumentar sus costes entre 10-20%. Sin embargo, la demolición selectiva permite facilitar el trabajo del reciclaje, siendo mucho más eficiente y llegando a compensar, en algunos casos, con el método tradicional.

En la producción del árido reciclado, se plantean diversas cuestiones, teniendo que elegir entre planta fija o planta móvil. Para ésta elección se tendrá en cuenta:

- Localización de las instalaciones
- Análisis condiciones del mercado

Para la localización de instalaciones, tendremos en cuenta la distancia de los residuos respecto a la planta de reciclaje. En el caso de que se encuentre a una distancia menor de 20 km se utilizará la planta fija más cercana, en caso contrario se utilizará la planta móvil. El problema de las plantas de reciclajes es que en nuestro país no existen demasiadas, debido a su escaso tiempo de funcionamiento de estos nuevos procesos aumentando el coste de la producción de hormigón reciclado debido a sus largas distancias.

El mercado de la construcción nos ofrece dos opciones tras la demolición de un edificio. Por una parte se eliminan los residuos de la demolición llevándolos al vertedero terminando aquí su ciclo de vida. Por otra parte, existe la opción de reciclar los residuos de la demolición transformándolos en árido reciclado que continúa con su ciclo de vida. En la actualidad, es más económica la eliminación de los residuos, por ello el precio del árido reciclado siendo su precio entre 80-90% del precio del árido natural.

Tras analizar los elementos que influyen para la elección de hormigón convencional u hormigón reciclado compararemos los precios de los distintos productos.

El coste de la admisión de los residuos de construcción y demolición a las plantas de reciclaje, dentro de los distintos municipios de España, encontramos valores desde

1 €/t (Pamplona) hasta 25,20 €/t (Madrid), mientras que la admisión de los residuos de construcción y demolición a vertedero, en la Comunidad Valenciana (datos del IVE 2012), tiene un cote entre 4,31 €/t hasta 8,8 €/t, según la capacidad de contenedor.

Según los datos de la planta de Bages y las canteras de sus alrededores (2004), el precio de los materiales reciclados con un tamaño entre 0-40 mm es de 4,40 €/m<sup>3</sup>, mientras que los provenientes de la cantera con un tamaño entre 0-40 mm cuesta entre 6,3-6,7 €/m<sup>3</sup>.

El hormigón reciclado HRA-25/B/20/Ila, de consistencia blanda, tamaño máximo del árido 10 mm, con  $\geq 275$  kg/m<sup>3</sup> de cemento, apto para clase de exposición Ila, con un  $\leq 20\%$  del árido grueso reciclado su cote es de 66,75 €/m<sup>3</sup>. Para un hormigón convencional HA-25/B/20/Ila, en la Comunidad Valenciana (datos del IVE), de consistencia blanda, tamaño máximo del árido 20 mm, apto para clase de exposición Ila su coste se encuentra comprendido entre 66,60 €/m<sup>3</sup>.

A estos valores tradicionales tendremos que analizar también su cote ambiental (eco-cotes) que equivalen a los gastos necesarios para eliminar el impacto ambiental causado de la extracción de los áridos, siendo este valor superior en el hormigón convencional.

## 8. Normativa

Dentro del marco legislativo para los RDC diferenciaremos tres grupos de normativas: Residuos de Demolición y Construcción, áridos reciclados y hormigón reciclado. De los dos grupos nos centraremos en este último desglosando la normativa aplicable basada en la EHE-08.

### 8.1. Legislación RCD

En primer lugar, veremos la legislación aplicable de los Residuos de Demolición y Construcción en sus diversos niveles que van desde la Unión Europea hasta la Autonómica.

#### *Marco legislativo en la Unión Europea*

- Directiva 1996/61 “Prevención y Control integrados de la Contaminación –IPPC”
- Directiva 1999/31 “Vertido de Residuos”
- Decisión 738/2000 “Aplicación de la Directiva 1999/31”
- Decisión de la Comisión 2000/532/CE, que establece una lista de residuos de conformidad con la Directiva 75/442/CEE, y sus modificaciones, efectuadas mediante la Decisión de la Comisión 2001/119/CE.
- Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas.

#### *Legislación aplicable en España*

- Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos
- Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.
- La Decisión de la Comisión, de 22 de enero de 2001, que modifica la Decisión 2000/532/CE de 3 de mayo de 2000.
- El Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2008-2011. (PNRCD)
- Real Decreto 105/2008 por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición.

## *Normativa autonómica aplicable en la Comunidad Valenciana*

- Decreto 202/97, Plan Integral de Residuos
- Decreto 32/99, Modifica el Plan Integral de Residuos
- Ley 10/00, de Residuos
- Orden 4/10/01, Plan Zonal de Residuos de la Zona I
- Orden 12/11/01, Plan Zonal de Residuos de la Zona XV
- Orden 18/01/02, Plan Zona I de Residuos de la Zona III y VIII (Corrección de errores en Orden 8/05/02)

## **8.2. Legislación árido reciclado**

La legislación de áridos reciclados abarca todos los ámbitos de la construcción, por lo que en el siguiente apartado indicaremos la legislación específica para la construcción en la edificación. A continuación se indica la legislación para todos los ámbitos de la construcción.

- Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Carreteras y Caminos Vecinales (PG3)
- Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Conservación de Carreteras (PG4)
- Instrucción Técnica de Hormigones Estructurales EHE

## **8.3. Legislación hormigón reciclado**

Dentro de la legislación que hace referencia al hormigón reciclado, podemos diferenciar aquella que es específica de nuestro país y las pertenecientes al resto de Europa.

### *España*

En Noviembre de 2002 se constituyó el Grupo de Trabajo “Hormigón Reciclado” a instancias de la Comisión Permanente del Hormigón y de ACHE para elaborar un documento que complementara a la reglamentación actual de hormigón estructural (Instrucción EHE). La nueva EHE incluye un anejo (Anejo 15), que recoge las recomendaciones específicas sobre la utilización del árido reciclado procedente de hormigón en hormigón estructural.

Además, la utilización de árido reciclado procedente de hormigón en hormigón no estructural está incluida en el Anejo 18 de la EHE.

## *Europa*

### Rilem

- RILEM (International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures): "Specifications for Concrete with Recycled Aggregates". Materials and Structures, Nº27. p.p. 557-559, 1994.

### Japón

- "Standart for Usage of Concrete with Recycled Aggregate". Ministerio de la Construcción - 2005.

### Bélgica

- VINCKE, J.; ROUSSEAU, E.: "Recycling of Construction and Demolition Waste in Belgium: Actual Situation and Future Evolution". Demolition and Reuse of Concrete and Masonry. 1994.

### Australia

- CSIRO (Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation): Guide to the use of recycled concrete and masonry materials, 2002.

### Hong Kong

- "Specifications Facilitating the Use of Recycled Aggregates". Works Bureau Technical Circular WBTC 12/2002.

### Alemania

- DIN 4226-100 (2002) "Aggregates for mortar and concrete - Part 100: Recycled-aggregates"
- DIN 1045 – Concrete. German code for the design of concrete structures.

### Reino Unido

- "Recycled Aggregates: BRE Digest 433" 1998.

- "Quality Control: The production of Recycled Aggregates" Building Research Establishment Report BR 392, Construction Research Communications - 2000.
- WRAP "Mix Design Specification for Low Strength Concretes Containing Recycled and Secondary Aggregates". 2002.
- BS 8500-2:2006: "Concrete-Complementary British Standard to BS EN 206-1. Part2: Specification for Constituent Materials and Concrete".

#### Holanda

- -NEN 5905:1997 "Aggregates for concrete. Materials with a density of at least 2000 kg/m<sup>3</sup>"

#### Portugal

- -Especificação LNEC "Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de gigantes hidráulicos" – 2006.

#### Brasil

- -"Recycled Aggregate Standardization in Brazil". Universidade Estadual Paulista, Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, Universidade de Taubaté. 2004.

#### Francia

- -Guide technique pour l'utilisation des matériaux régionaux d'Ile-de-France: les bétons et produits de démolition recyclés-LCPC, Paris. Diciembre 1996.

#### Dinamarca

- -Danish Concrete Code. "Use of recycled demolition rubble". 1989.
- -Danish Concrete Association. "Recommendations for the use of recycled aggregates for concrete in passive environmental class". Publicación N°34, 1990.

#### Paises Bajos

- -CUR report nr. 125 "Crushed Concrete Rubble and Masonry Rubble as Aggregate for Concrete". 1986

## Australia

- -Austrian Quality Protection Association for Recycled Building Materials. "Guidelines for recycled building materials". 1992.

## *EHE-08 (Anejo 15)*

La EHE-08 en su Anejo 15 habla de las recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados. Veremos el alcance y las distintas especificaciones de los artículos que se encuentran dentro de la normativa.

## Alcance

Se define a los efectos del Anejo 15 de la EHE-08 como hormigón reciclado (HR), el hormigón fabricado con árido grueso reciclado procedente del machaqueo de residuos de hormigón.

Para su aplicación en hormigón estructural, se recomienda limitar el contenido de árido grueso reciclado al 20% en peso sobre el contenido total de árido grueso (las propiedades finales apenas se ven afectadas en relación con las del hormigón convencional). Para porcentajes superiores, es necesario, la realización de estudios específicos y experimentación complementaria en cada aplicación.

El árido reciclado puede emplearse tanto para hormigón en masa como hormigón armado de resistencia característica no superior a  $40 \text{ N/mm}^2$ , quedando excluidos su empleo en hormigones pretensados.

Queda fuera de los objetivo del Anejo 15 de la EHE-08:

- Los hormigones fabricados con árido fino reciclado
- Los hormigones fabricados con áridos reciclados de naturales distinta del hormigón (áridos mayoritariamente cerámicos, asfálticos, etc.)
- Los hormigones fabricados con áridos reciclados procedentes de estructuras de hormigón con patologías que afectan a la calidad del hormigón tales como álcali-árido, ataque por sulfatos, fuego, etc.
- Hormigones fabricados con áridos reciclados procedentes de hormigones especiales tales como aluminoso, con fibras, con polímeros, etc.

### Artículo 10. Valores característicos de las acciones (10.2 valores característicos de las acciones permanentes)

En el caso de hormigones reciclados con un porcentaje de árido reciclado menor o igual al 20%, los valores característicos del peso propio se obtienen a partir de los mismos valores de densidad que establece la Instrucción:

- Hormigón en masa 2.300 kg/m<sup>3</sup>
- Hormigón armado 2.500 kg/m<sup>3</sup>

Para porcentajes de árido grueso reciclado superiores al 20%, la densidad resultante del hormigón reciclado es inferior a la de un hormigón convencional por la menor densidad que presenta el árido reciclado, a causa del mortero que permanece adherido al árido natural. Para sustituciones totales de árido grueso, los descensos se sitúan entre 5-15 % de la densidad de un hormigón convencional.

### Artículo 26. Cementos

Los tipos de cementos utilizados en la fabricación de hormigones con áridos reciclados serán los mismos que se emplean en un hormigón convencional para las mismas aplicaciones.

### Artículo 28. Áridos

La combinación de árido grueso natural y reciclado ha de satisfacer las especiaciones recogidas en el Artículo 28 de la Instrucción. En la fabricación de hormigones reciclados se podrán emplear áridos naturales rodados o procedentes de rocas machacadas.

Las partidas de árido reciclado deben disponer de un documento de identificación de los escombros de origen que incluya los siguientes aspectos:

- Naturaleza del material (hormigón en masa, armado, mezcla de hormigón, etc.)
- Planta productora de árido y empresa transportista del escombro
- Presencia de impurezas (cerámico, madera, asfalto)
- Detalles sobre su procedencia (origen o el tipo de estructura de la que procede)
- Cualquier otra información que resulte de interés (causa de la demolición, contaminación de cloruros, hormigón afectado por reacciones álcali-árido, etc.)

Se deberán establecer acopios separado e identificados para los áridos reciclados y los áridos naturales, así como lo áridos reciclados procedentes de hormigones de muy distintas calidades debido a su influencia en la calidad del árido reciclado.

Los áridos reciclados se designarán con el formato que se recoge en el Artículo 28 de la Instrucción, y en el apartado “Naturaleza” se denominarán “R”.

d/D – IL – N

donde:

d/D Fracción granulométrica, comprendida entre un tamaño mínimo, d, y un tamaño máximo, D, en mm.

IL Forma de presentación: R, rodado; T, triturado (de machaqueo); M, mezcla.

N Naturaleza

El tamaño mínimo permitido de árido reciclado es de 4 mm.

Lo áridos reciclados deberán presentar un contenido de desclasificados inferiores menor o igual al 10% y un contenido de partículas que pasan por el tamiz de 4 mm no superior al 5%. El contenido de desclasificados inferiores del árido reciclado suelen ser superior al de los áridos naturales, debido a que éstos pueden generarse después del tamizado, durante el almacenamiento y transporte, por su mayor friabilidad.

En hormigón reciclado con un contenido no superior al 20% de árido reciclado, el contenido de terrones de arcilla de éste no será superior al 0,6 %, y el del árido grueso natural no superior al 0,15%. Si incorpora cantidades de árido reciclado superiores al 20%, habrá que extremar las precauciones durante su producción para eliminar al máximo las impurezas de tierras que lleve la materia prima. En el caso extremo de utilizar el 100% de árido grueso reciclado, éste debe cumplir la especificación máxima del 0,25% de terrones de arcilla.

En el hormigón reciclado con un contenido de árido reciclado no superior al 20%, éste deberá tener una absorción no superior al 7%. Adicionalmente, el árido grueso natural deberá tener una absorción no superior al 4,5%.

Para la resistencia al desgaste de la grava se mantiene el mismo requisito que para los áridos naturales (coeficiente de Los Ángeles no superior al 40%).

En hormigones reciclados con más del 20% de árido reciclado, la combinación de árido grueso natural y reciclado debería cumplir la especificación que establece la Instrucción, presentando un coeficiente de absorción no superior al 5%.

Los requisitos químicos se mantienen las especificaciones del Articulado relativas al contenido de cloruros, contenido de sulfatos. Los áridos reciclados pueden incorporar impurezas, dependiendo del tipo de impureza se pueden presentar problemas como reacciones álcali-árido (vidrio), ataque por sulfatos (yeso), desconchados superficiales (madera o papel), elevada retracción (tierras arcillosas) o mal comportamiento hielo-deshielo (algunos cerámicos). Los contenidos de impurezas deben limitarse a los siguientes:

Elementos	Max. Contenido de impurezas % del peso total de la muestra
Material cerámico	5
Partículas ligeras	1
Asfalto	1
Otros materiales (vidrio, plásticos, metales, etc.)	1,0

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

En hormigones reciclados con sustitución mayor al 20%, la utilización de aditivos que modifiquen la reología es recomendable para la mejora de la trabajabilidad, compensando la mayor absorción de agua del árido reciclado si este se utiliza en estado seco.

#### Artículo 37. Durabilidad del hormigón y de las armaduras

La Instrucción establece unos recubrimientos mínimos, que serán de aplicación para los hormigones con un contenido de árido reciclado no superior al 20%. Para hormigones con mayor contenido de árido reciclado se podrán también mantener los recubrimientos de la Instrucción si las dosificaciones adoptadas de hormigón garantizan una durabilidad similar a la del hormigón convencional en cada ambiente. En caso de mantener las mismas dosificaciones que para el hormigón convencional podría ser necesario disponer mayor recubrimientos para compensar el aumento de porosidad del hormigón reciclado.

La durabilidad del hormigón reciclado con un porcentaje de árido reciclado no superior al 20%, es similar a la que presenta un hormigón convencional, por lo que son de aplicación las prescripciones recogidas en el articulado. Se deberán tomar medidas especiales cuando se utilice en ambientes agresivos y en porcentajes superiores al 20% de árido reciclado. Este comportamiento deberá tenerse en cuenta en la dosificación de la mezcla, incrementando el contenido de cemento o una disminución de relación agua/cemento; otra posibilidad es aumentar el recubrimiento de las armaduras necesario en determinados ambientes agresivos.

En hormigones reciclados con más de un 20% de árido reciclado, los valores recogidos en la Tabla 37.3.2.a pueden ser insuficientes, siendo recomendables ajustar la dosificación de forma que se cumplan los requisitos referentes al resultado del

ensayo de penetración de agua, según se recoge en el artículo, para todas las clases de exposición excepto la I y IIb. Para sustituciones de árido reciclado superiores al 20%, las resistencias mínimas compatibles con los requisitos de durabilidad pueden ser superiores a las que se recogen en la tabla 37.3.2.b.

Tabla 37.3.2.a Máxima relación agua/cemento y mínimo contenido de cemento

Parámetro de dosificación	Tipo de hormigón	CLASE DE EXPOSICIÓN													
		I	IIa	IIb	IIIa	IIIb	IIIc	IV	Qa	Qb	Qc	H	F	E	
Máxima Relación a/c	masa	0,65	-	-	-	-	-	-	-	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,50
	armado	0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,50	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,50	
	pretensado	0,60	0,60	0,55	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,45	0,45	0,55	0,50	0,50	
Mínimo contenido de cemento (kg/m <sup>3</sup> )	masa	200	-	-	-	-	-	-	-	275	300	325	275	300	275
	armado	250	275	300	300	325	350	325	325	350	350	300	325	300	
	pretensado	275	300	300	300	325	350	325	325	350	350	300	325	300	

Tabla 37.3.2.b Resistencias mínimas recomendadas en función de los requisitos de durabilidad (\*)

Parámetro de dosificación	Tipo de hormigón	CLASE DE EXPOSICIÓN													
		I	IIa	IIb	IIIa	IIIb	IIIc	IV	Qa	Qb	Qc	H	F	E	
resistencia Mínima (N/mm <sup>2</sup> )	masa	20	-	-	-	-	-	-	-	30	30	35	30	30	30
	armado	25	25	30	30	30	35	30	30	30	35	30	30	30	
	pretensado	25	25	30	30	35	35	35	30	35	35	30	30	30	

Cuando el hormigón reciclado esté sometido a una clase de exposición H ó F, se deberá introducir un contenido mínimo de aire ocluido de 4,5%. En el caso de hormigones con más de un 20% de árido reciclado, se deberán realizar ensayos específicos con la dosificación del hormigón reciclado adoptado.

En exposiciones a sulfatos o agua de mar, el árido reciclado está condicionado a que se conozca la procedencia del hormigón origen, debiendo éste haber sido fabricado con cementos resistentes a los sulfatos o al agua del mar, respectivamente.

Frente a la erosión, el árido reciclado debe cumplir las especificaciones que recoge el articulado relativo al coeficiente de Los Ángeles, que debe ser inferior al 30%.

Frente a la reactividad álcali-árido en ambientes de exposición húmedos, aquellos distintos al I y IIb, se recomienda utilizar áridos reciclados procedentes de un único hormigón de origen controlado. En ese caso, los ensayos de reactividad se llevarán a cabo sobre la mezcla de árido reciclado y natural que se vaya a utilizar en obra.

Al igual que en otras propiedades, los hormigones con contenido de árido reciclado no superior al 20% presentan un comportamiento adecuado frente a la corrosión. Para hormigones con porcentajes de árido reciclado superiores al 20%, la protección

frente a la corrosión es inferior que la que ofrece un hormigón convencional con la misma dosificación, por lo que se recomienda la realización de ensayos específicos en cada caso.

### Artículo 39. Características del hormigón

Para hormigón reciclado con un porcentaje de árido grueso reciclado no superior al 20% se pueden utilizar las fórmulas del articulado para el cálculo de la resistencia a tracción. Para porcentajes de sustitución mayores del 20% esta propiedad se ve poco afectada, aunque se recomienda la realización de ensayos en cada caso.

Para la tipificación de los hormigones, la sigla T indicativa del tipo de hormigón será HRM ó HRA para el caso de hormigones en masa o armados, respectivamente, fabricados con árido reciclado. En cuanto a la resistencia característica, se recomienda utilizar la serie incluida en el articulado con el límite superior de 40 N/mm<sup>2</sup>.

El diagrama tensión-deformación del cálculo del hormigón del articulado es válido para los hormigones reciclados con un porcentaje de sustitución del árido grueso no superior al 20%.

Para porcentajes de árido reciclado superiores al 20%, hay dos aspectos del diagrama tensión-deformación que pueden verse afectados:

- Por una parte se produce un aumento de la deformación en pico  $\varepsilon_{c1}$  a medida que aumenta el porcentaje de árido reciclado, debido a la mayor deformabilidad de estos áridos.
- Por otra parte, se pueden acusar mayores pérdidas de resistencia, en comparación con el hormigón convencional, en ensayos bajo cargas sostenidas.

La fórmula y las tablas de los comentarios del articulado para calcular el módulo de deformación longitudinal del hormigón, son válidos para hormigones con un porcentaje de árido grueso reciclado no superior al 20%. Para sustituciones de árido reciclado por encima del 20%, el módulo de deformación longitudinal disminuye progresivamente al aumentar el porcentaje del árido reciclado. Como valor orientativo, y para un 100% de árido grueso reciclado, el módulo del hormigón será 0,8 veces el del hormigón convencional.

La fórmula y las tablas del articulado, así como sus comentarios, para estimar la fluencia del hormigón son válidos para sustituciones de árido grueso reciclado no superiores al 20%. Para sustituciones de árido reciclado por encima del 20%, la fluencia aumenta progresivamente al aumentar el porcentaje de árido reciclado. Así, como valor orientativo para un 100% de árido grueso reciclado, la fluencia será 1,25 veces la de un hormigón convencional.

#### Artículo 49. Estado límite de fisuración

Se mantiene la redacción del articulado de la Instrucción salvo en lo relativo a la separación máxima entre estribos que, con el fin de mejorar la respuesta frente a fisuración bajo esfuerzo cortante, para hormigón reciclado adopta un valor máximo de 200 mm. Para porcentajes de árido grueso superiores al 20% deberían realizarse estudios específicos o desarrollar una campaña experimental.

#### Artículo 69. Procesos de elaboración, armado y montaje de las armaduras

Para hormigones con sustitución no superior al 20 % de árido reciclado son válidas las prescripciones recogidas en el artículo de la Instrucción, con respecto a los criterios específicos para el anclaje y empalme de las armaduras. Para sustituciones superiores al 20% se ha constatado una ligera reducción en la capacidad adherente entre las barras y el hormigón reciclado. A falta de resultados experimentales específicos, se puede adoptar la siguiente expresión para las longitudes básicas de anclaje:

- Para barras en posición I:  
 $l_{bl} = 1,1 m \phi^2 \geq (f_{yk}/20) \phi$
- Para barras en posición II:  
 $l_{bl} = 1,55 m \phi^2 \geq (f_{yk}/14) \phi$

#### Artículo 71. Elaboración y puesta en obra del hormigón

La absorción de agua del árido grueso reciclado es elevada, por lo que para hormigones con más del 20% de árido reciclado es aconsejable utilizar los áridos en condiciones de saturación. Para mantener la humedad, se pueden instalar en las plantas de dosificación sistemas que humedezcan los áridos en las cintas transportadoras, o aspersores de agua en las tolvas de los áridos.

Se recomienda que el hormigón con árido reciclado se fabrique en central amasadora.

Los métodos de dosificación habituales para los hormigones convencionales son válidos para los hormigones reciclados con un porcentaje de árido reciclado no superior al 20%. En hormigones reciclados con sustituciones superiores al 20%, y debido a la menor calidad de los áridos reciclados, para mantener la misma resistencia y durabilidad que un hormigón convencional, el hormigón fabricado con áridos reciclados necesitará un contenido mayor de cemento o una menor relación agua/cemento en su dosificación.

El amasado del hormigón con árido reciclados en estado seco puede requerir más tiempo que el de un hormigón convencional, lo que permite la humectación de los áridos con objeto de evitar que la absorción de agua por parte del árido reciclado

afecte a la consistencia del hormigón. No obstante, el tiempo de amasado tampoco debe ser excesivamente prolongado para evitar la generación de finos debido a la friabilidad del mortero adherido del árido reciclado.

El volumen del hormigón reciclado transportado no excederá en ningún caso los dos tercios del volumen total del tambor del elemento de transporte.

En el caso del hormigón bombeado, puede ocurrir que la presión de bombeo altere la homogeneidad de las características del hormigón reciclado, debido a su influencia sobre la absorción del agua por parte del árido reciclado. Se deberá, por tanto, ajustar la dosificación del hormigón realizando ensayos característicos y tomando muestras a la salida de la tubería.

**Artículo 79. Condiciones para la conformidad de la estructura**

Los áridos reciclados que proceden de varios tipo de hormigón de origen, hace necesario un mayor control de sus propiedades. En este caso, la frecuencia de los ensayos de control de producción vendrá definida por el criterio más conservador de los recogidos en la tabla siguiente:

TABLA A.15.2  
Frecuencia de ensayos de control de producción

PROPIEDAD	NORMA	FRECUENCIA	
Granulometría. Desclasificados inferiores	UNE-EN 933-1	1/semana	Cada 2000 t.
Coefficiente de forma	UNE-EN 933 -4	1/mes	Cada 10000 t.
Contenido de finos	UNE-EN 933-2	1/semana	Cada 2000 t.
Coefficiente de los Ángeles	UNE-EN 1097-2	1/mes	Cada 2000 t.
Absorción	UNE-EN 1097-6	1/semana	Cada 2000 t.
Estabilidad frente a soluciones de MgSO <sub>4</sub> (*)	UNE-EN 1367-2	1/ 6 meses	Cada 10000 t.
Terrones de arcilla	UNE 7133	1/semana	Cada 2000 t.
Partículas ligeras	UNE 7244	1/ mes	Cada 10000 t.
Determinación de compuestos de azufre (SO <sub>3</sub> )	UNE-EN 1744-1	1/ 3 mes	Cada 10000 t.
Determinación de sulfatos solubles en ácido	UNE-EN 1744-1	1/ 3 mes	Cada 10000 t.
Determinación de cloruros totales	UNE-EN 1744-1	1/ 3 mes	Cada 10000 t.
Impurezas	UNE-EN 933-11	1/semana	Cada 2000 t.

(\*) Sólo de aplicación en ambiente de helada o sales fundentes

## Artículo 86. Control del hormigón

### Control previo al suministro

La experiencia en la dosificación del hormigón convencional no es de aplicación directa en el hormigón reciclado, por lo que los ensayos previos resultan muy recomendables. Así, estos ensayos deben servir para analizar la viabilidad y conveniencia de presaturar el árido previamente a su utilización. En el caso de hormigón reciclado, la resistencia que debe alcanzar con estos ensayos, para asegurar que la resistencia característica de obra será satisfactoria, puede ser algo superior a la esperada con un hormigón convencional, teniendo en cuenta el aumento en la dispersión de resultados derivada de la falta de uniformidad del árido reciclado empleado.

### Control durante el suministro

La incorporación de áridos reciclados en el hormigón puede producir variaciones en la consistencia, incluso cuando se mantiene la misma relación agua/cemento de las diferentes amasadas, debido a la diferente calidad de los áridos reciclados. Este efecto es más pronunciado en mezclas con más del 20% de sustitución por lo que, en tales casos, se recomienda presaturar el árido reciclado o bien ajustar la consistencia en obra mediante la incorporación de aditivos plastificantes o superplastificantes siguiendo las indicaciones del fabricante del hormigón.

A los efectos del control se dividirá la obra en lotes, siendo válidos los límites máximos establecidos en la Instrucción para el caso de hormigones con sustituciones no superiores al 20%. En elementos de especial responsabilidad, o para el caso de hormigones con más del 20% de árido reciclado, se recomienda aumentar el control, reduciendo los lotes que establece la Instrucción y adoptando los recogidos en la siguiente tabla:

TABLA A.15.3  
Tamaño recomendado lotes en hormigones con más del 20% de árido reciclado o elementos especiales

Límite superior	Tipo de elementos estructurales		
	Elementos comprimidos	Elementos en flexión simple	Macizos
Volumen de hormigón	50 m <sup>3</sup>	50 m <sup>3</sup>	100 m <sup>3</sup>
Tiempo de hormigonado	2 semanas	2 semanas	1 semana
Superficie construida	500 m <sup>2</sup>	500 m <sup>2</sup>	-
Número de plantas	1	1	-

## 9. Conclusiones

Tras analizar el hormigón reciclado y haberlo comparado con el hormigón convencional, debemos reflexionar sobre todos estos datos. No solo los aspectos prácticos, sino también los aspectos ambientales, políticos, económicos y sociales.

El hormigón reciclado, en la actualidad, es una buena alternativa para combatir el impacto medioambiental tan problemático y que cada vez se va teniendo más consciencia de él. Es una alternativa para reutilizar la materia que ya tenemos sin tener que agotar los pocos recursos naturales que nos quedan, de esta forma podemos dar un respiro al planeta Tierra y continuar con nuestro ritmo de producción.

No nos podemos basar en la búsqueda de nuevos materiales extraídos del planeta debido a la extinción de los ya utilizados. La clave está en la reutilización de los materiales, evitando tenerlo que obtenerlo del medioambiente y a su vez contaminándolo al desecharlo en los vertederos, siendo su tiempo de degradación muy largo.

Pese a ser una buena alternativa, aun hay mucho camino que recorrer para que sea una material completamente limpio. Las altas emisiones de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> y polvo, al tener que añadir más cemento, hacen que no sea tan ecológico pese a su reciclaje en la materia. También influye las pocas empresas de reciclaje que podemos encontrar en nuestro territorio Español, que contribuye al aumento de estas emisiones debido a las largas distancias de transportes que se ven sometidos.

Además, se debe de mejorar el proceso de producción de árido reciclado, solucionando mucho de los problemas de sus propiedades físicas y mecánicas. Tan solo consiguiendo eliminar por completo el cemento adherido del árido reciclado, podríamos mejorar notablemente todas sus propiedades.

La menor resistencia a compresión, como se ha indicado anteriormente, no difiere de un hormigón convencional si su porcentaje de árido reciclado es inferior al 20%. Para poder lograr llegar a un 100% y obtener el mismo resultado que en el caso anterior, debemos eliminar por completo la capa de cemento adherido logrando un árido de similares características que uno de cantera.

Para el resto de propiedades, se puede aplicar dicha mejora para obtener el mismo resultado, una mejora en todas sus propiedades siendo igual al hormigón convencional. Por ello, se debe centrar las investigaciones en una mejora de la maquinaria para poder lograr este objetivo.

Respecto al aspecto económico, la diferencia de costes entres un hormigón convencional y un hormigón reciclado no difiere demasiado. Logrando que las distancias de las plantas de reciclaje sean inferiores, puede llegar el punto de ser más económico el hormigón reciclado que el convencional.

Hay que tener en cuenta que el gobierno también ayuda económicamente en la producción de hormigón reciclado. Debemos ver cuál es el porcentaje de ayuda para comparar si realmente la diferencia de costes es indiferente o no.

Con estas medidas mejoraremos el material, pero no sólo debemos quedarnos aquí, también hay que realizar una eficiente acción política. El gobierno debe dar la vuelta a los métodos actuales de eliminación de residuos de construcción y demolición, apoyando el reciclaje de estos residuos y eliminando en su mayoría los vertederos existentes.

Además, se debería realizar una normativa más específica de la gestión de los residuos, puesto que actualmente la que existe es muy deficiente y necesita una mejora. Junto con esta normativa de gestión de residuos, también se debería mejorar la normativa para la producción del hormigón reciclado, aunque actualmente el Anejo 15 de la EHE-08 especifica con claridad los aspectos relacionados con el árido y hormigón reciclado.

En el aspecto social es importante que cambiemos de mentalidad y no veamos los productos reciclados como de peor calidad. Se suele tender a pensar que un producto de un material que ya ha tenido su ciclo de vida, va a trabajar peor puesto que ya ha estado sometido a un trabajo.

La gente se tiene que concienciar que el futuro está en el reciclaje y que sus productos son de igual calidad que aquellos producidos con materia virgen. En ellos está el cambio, demandando productos reciclados y rechazando los productos convencionales.

# Bibliografía

---

- [1] MARTÍNEZ BERTRAND, C.; TOMÉ TRUJILLO, M.: Congreso Nacional del Medio Ambiente Cumbre del desarrollo sostenible: Gestión de residuos de construcción y demolición (RCDS): importancia de la recogida para optimizar su posterior valorización.
- [2] A.CUCHÍ y A. SAGREGA. Reutilización y reciclaje de los residuos del sector de la construcción.
- [3] A.CUCHÍ. Edificación Sostenible. UPC.
- [4] PÉREZ NAVARRO, J.; PERIAGO CARRETERO, J.; TORNERO FRANCO, J.; SEGURA DÍAZ, D.: "Guía de Materiales para una Construcción Sostenible". Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de la Región de Murcia.
- [5] JANET LIAO. Construcción ecológica (parte 2): Elección de materiales sostenibles. Marzo 2008.
- [6] IBER (Instituto de Bioconstrucción y Energías Renovables).  
<http://www.bioconstruccion.biz/index.php?ref=construccionsostenible.php>
- [7] "La innovación en materiales y sistemas constructivos". Los nuevos materiales. Los materiales aligerados. Master Oficial en técnicas y sistemas de edificación.
- [8] Programa Nacional de proyectos de desarrollo experimental subprograma de medio ambiente y ecoinnovación. "Guía Española de áridos reciclados procedentes de RCD".
- [9] Manual de directrices para el uso de áridos reciclados en Obras Públicas de la Comunidad Autónoma del País Vasco.
- [10] Catálogo de Residuos utilizables en la construcción.  
[http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/ficha\\_imprimir.aspx?idresidu...](http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/ficha_imprimir.aspx?idresidu...)
- [11] LÓPEZ GAYARRE, F.: "Influencia de la Variación de los Parámetros de la Dosificación y Fabricación de Hormigón Reciclado Estructural sobre sus Propiedades Físicas y Mecánicas". Tesis doctoral. Octubre 2008.
- [12] TRIVISONNO, L.: "La Sostenibilità nelle Costruzioni: Life Cycle Assessment del Calcestruzzo con Inerti di Riciclo". 2008.
- [13] CARDIM de CARVALHO FILHO, A.: "Análisis del ciclo de la vida de productos derivados del cemento – Aportaciones al análisis de los inventarios del ciclo de vida del cemento". Tesis doctoral. Julio 2001.

[14] GERD Asociación Española de Gestores de Residuos de Construcción y Demolición. Control de Residuos de Construcción y Demolición, RCD, de los Ayuntamientos (Noviembre 2010).

[15] Hormiespeciales CEMEX. Ficha Hormigón estructural con árido reciclado.

[16] EHE-08. Anejo 15, Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados.

[17] GENERALITAT VALENCIANA. Dirección General para el Cambio Climático. Plan Integral de Residuos de la Comunitat Valenciana 2010.

[18] [http://huespedes.cica.es/aliens/gimadus/17/03\\_materiales.html](http://huespedes.cica.es/aliens/gimadus/17/03_materiales.html)

[19] [http://www.concretonline.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=379&catid=31:articulos-tecnicos--aridos&Itemid=0](http://www.concretonline.com/index.php?option=com_content&view=article&id=379&catid=31:articulos-tecnicos--aridos&Itemid=0)

[20] <http://www.construmatica.com/bedec/f/20951/5>

[21] <http://www.five.es/>

[22] <http://www.materialsustentable.com.ar/sustentable.html>

[23] [http://www.construmatica.com/construpedia/Construcci%C3%B3n\\_Sostenible#Conceptos\\_B.C3.A1sicos](http://www.construmatica.com/construpedia/Construcci%C3%B3n_Sostenible#Conceptos_B.C3.A1sicos)

[24] [http://www.construmatica.com/construpedia/Construcci%C3%B3n\\_Sostenible:\\_Historia](http://www.construmatica.com/construpedia/Construcci%C3%B3n_Sostenible:_Historia)

[25] [http://www.construmatica.com/construpedia/Construcci%C3%B3n\\_Sostenible:\\_Mercado](http://www.construmatica.com/construpedia/Construcci%C3%B3n_Sostenible:_Mercado)

[26] [http://www.construmatica.com/construpedia/Construcci%C3%B3n\\_Sostenible:\\_Actores](http://www.construmatica.com/construpedia/Construcci%C3%B3n_Sostenible:_Actores)

