

# INGENIERÍA CIVIL PARA UN MUNDO SOSTENIBLE



**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS**

*Editor: Juan Cagiao Villar*

**COLECCIÓN INGENIERÍA CIVIL N.º 4**

Portada:

Antonio Fernández Pérez

Edición:

FUNDACIÓN INGENIERÍA CIVIL DE GALICIA

© De esta edición:

FUNDACIÓN INGENIERÍA CIVIL DE GALICIA

Realización gráfica:

Tórculo Artes Gráficas  
Pza. Maestro Mateo, 9  
A Coruña

I. S. B. N.: 978-84-613-3962-4

Depósito legal: C 3165-2009

# PRÓLOGO

---

## El nuevo marco: el Espacio Europeo de Educación Superior (EEES)

En el acuerdo de Bolonia y los correspondientes a las siguientes reuniones, Praga, Berlín, Bergen y Londres, se reflejan unos acuerdos que únicamente atienden a temas de convergencia europea hacia un espacio común, o al menos comparable, de enseñanza superior, y no entran en temas específicos ni curriculares. Sin embargo, la obligada modificación que dichos acuerdos imponen a nuestros planes de estudios supone una oportunidad estratégica para modificar a fondo algunos conceptos básicos que, o bien no se contemplan en los actuales recorridos curriculares de nuestras Escuelas, o bien se plantean de una forma tangencial y casi anecdótica.

Uno de estos conceptos es el de la sostenibilidad, contemplado desde todos los puntos de vista: el desarrollo sostenible, la sostenibilidad como base y guía de la actividad constructiva, y la sostenibilidad de los propios planes de estudios.

## ¿Qué se entiende por desarrollo sostenible?

La Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN) marca un punto inicial en el año 1980 con su “Estrategia para la Conservación del Mundo: conservación de los recursos biológicos para el desarrollo sostenible, definiendo el uso sostenible de los ecosistemas: *“deberíamos utilizar las especies y los ecosistemas a los niveles y del modo que se les permita renovarse de todos los modos indefinidamente”*, y el propio término de desarrollo sostenible como *“el desarrollo que permita alcanzar una satisfacción duradera de las necesidades humanas y mejorar la calidad de la vida humana”*.

Así, a mediados de los años 80 va tomando cada vez más fuerza la idea de sostenibilidad, tanto desde la perspectiva académica de los economistas como desde la perspectiva de los ambientalistas.

El año 1987 se considera un hito en la literatura del desarrollo sostenible porque se presenta en la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo el documento “Nuestro Futuro Común” (Informe Brundtland). En este documento se define por primera vez de forma general el concepto de desarrollo sostenible como *“el desarrollo que satisface las necesidades actuales de las personas sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para*

## *Ingeniería Civil para un Mundo Sostenible*

*satisfacer las suyas*". Esta fecha posee valor de referencia ya que se considera que éste es el primer documento importante de la agenda internacional del desarrollo en donde el desarrollo sostenible se plantea como meta: *"estamos viendo que se requiere un nuevo modelo de desarrollo, uno que suponga un progreso humano sostenido no solamente en unos pocos lugares para unos pocos años, sino para todo el planeta en un futuro lejano"*.

Esta definición incorpora dos conceptos clave: el concepto de "necesidades", en particular las necesidades esenciales de los más pobres del mundo, a los que debe concederse la mayor prioridad, y la idea de "limitaciones" impuestas por el estado de la tecnología y la organización social sobre la capacidad del medio ambiente para satisfacer las necesidades presentes y futuras. El hecho es que todavía muchos de nosotros vivimos por encima de la capacidad ecológica del mundo, por ejemplo, en nuestro modelo de uso energético.

El desarrollo sostenible requiere la promoción de valores que promuevan los estándares de consumo que están dentro de los límites de lo ecológicamente posible y a los cuales todos podamos razonablemente aspirar.

Desarrollo sostenible es uno de los términos en donde la confluencia de diferentes disciplinas, como la ecología, la economía, la ética, la política, la sociología, las ingenierías y la arquitectura, el derecho o la cultura, etc., están marcando facetas diferenciadas, facetas que guardan relación con la perspectiva propia de cada disciplina. Así, como expone Font: *"las diferentes disciplinas que se han ocupado de conceptualizar el desarrollo sostenible se interesan por cuestiones de diversa índole: la perspectiva ecológica pone el acento en la necesidad de mantener la biodiversidad y los ecosistemas; la economía se interesa, entre otras cuestiones, por la internalización de las externalidades; el discurso ético recurre a principios filosóficos universales, y la ciencia política se preocupa por la gobernabilidad y la justicia distributiva"*.

La evolución del paradigma de desarrollo sostenible se inicia verdaderamente entre los años 50 y 60, centrado, desde una perspectiva puramente económica, en el crecimiento y en el incremento de la producción. Posteriormente, en los años 70, se incorpora la dimensión social, cuyos objetivos fundamentales son proveer un desarrollo más social, reduciendo la pobreza e incrementando la equidad. Más tarde, en los años 80, se incorpora el objetivo ecológico, propiciando unas nuevas pautas de relación con los objetivos económicos, mediante los instrumentos de evaluación ambiental, de las técnicas de valoración y de los procesos de internalización de los costes ambientales en los procesos productivos. La relación entre los objetivos ambientales y los sociales se articula a través de mecanismos de participación pública y consultas, así como un respeto a la diversidad cultural y la pluralidad. Algunos autores están incorporando a sus estudios indicadores de gestión además de los habituales (económicos, sociales y ecológicos). Estos nuevos indicadores están relacionados con la dimensión político-institucional.

La propuesta teórica del desarrollo sostenible tiene implícita, como cabe suponer, una clara dimensión ética; dimensión que puede alcanzar valores tanto colectivos como individuales. Se trata por tanto de un compromiso intrageneracional e intergeneracional que requiere un necesario cambio cultural.

## **El papel del conocimiento científico y de la tecnología en el desarrollo sostenible**

El desarrollo sostenible es una actividad intensiva en conocimiento y puede contemplarse como un proceso de gestión adaptativa y aprendizaje social en el que el conocimiento desempeña un papel central.

El papel del conocimiento y del aprendizaje se debate permanentemente entre la necesidad de agregar informaciones y datos discretos al enorme caudal de los existentes, y la forma en que todos estos nuevos elementos se integran en un marco teórico más amplio que permita el entendimiento del significado de cada parte, pero también del conjunto.

La comunidad académica está cada vez más obligada a aportar soluciones a los problemas de la sostenibilidad. El mensaje de mayor calado que emerge de las discusiones a partir de la Cumbre de Johannesburgo de 2002 es que la comunidad científica tiene que complementar su papel histórico como identificadora de los problemas de la sostenibilidad para trabajar en soluciones prácticas.

Para Clark y Dickson *“la ciencia de la sostenibilidad todavía no es un campo ni una disciplina autónoma, sino, más bien, un escenario vibrante que está aproximando a los académicos y a los técnicos perspectivas globales y locales del norte y del sur, y disciplinas diversas como las ciencias naturales y las sociales, la ingeniería y la medicina. Su enfoque de los temas principales, de los criterios para el control de la calidad y sus integrantes comparten elementos sustanciales, y puede esperarse que sea durante algún tiempo”*.

Un escenario más evolucionado será el que propicie el desarrollo de una forma diferente de “practicar” la técnica. Así, Cash et al. señala que: “el nuevo contrato para la ciencia y la ingeniería que se ha venido reclamando en muchas discusiones sobre la sostenibilidad necesita ser contemplado como un verdadero contrato, no solamente para proyectos o estudios concretos, sino para todas las carreras profesionales”.

## **La sostenibilidad y la ingeniería civil**

En la Cumbre de la Tierra celebrada en Río de Janeiro en 1992 surgió el programa de las Agendas 21 locales, cuyo principal objetivo es el de conseguir que haya una contribución efectiva desde los ámbitos locales al desarrollo sostenible global: actuar localmente, pensar globalmente.

La puesta en práctica de unas estrategias ambientalmente sostenibles no es una simple cuestión de tecnología o de comprensión ecosistémica, sino una cuestión política, institucional y de articulación y ejecución de una política pública.

En su comunicación “Desarrollo sostenible en Europa para un mundo mejor: estrategia de la Unión Europea para un desarrollo sostenible” (propuesta de la Comisión ante el Consejo

## *Ingeniería Civil para un Mundo Sostenible*

Europeo de Gotemburgo) la Comisión identifica las principales amenazas a la sostenibilidad en Europa y propone una estrategia centrada de manera prioritaria en ellas. Parte importante de estas amenazas a la sostenibilidad guardan una evidente relación con la construcción y gestión de las infraestructuras, el transporte, la construcción y el urbanismo, entre otros. En todos estos frentes el ingeniero de caminos, canales y puertos tiene competencias profesionales y debe por tanto ser consciente de estas amenazas y actuar en consecuencia. Así por ejemplo, en el ámbito de las ciudades, el papel del ingeniero de caminos municipal resulta cada vez más importante en su buen gobierno. Abarca diversas funciones, desde el urbanismo en general, el transporte metropolitano y el tráfico que genera, la gestión de residuos, el medio ambiente urbano, hasta el diseño, materialización y gestión de las distintas redes de servicios como las de abastecimiento y saneamiento, gas, energía, comunicaciones, etc. El planteamiento global por el que se debe regir la concepción y gestión de estos servicios es lógicamente el de la sostenibilidad de los mismos.

Como consecuencia, el ingeniero de caminos, canales y puertos ha de:

1. Pensar en clave de sostenibilidad (protección ambiental, cohesión social y productividad económica) como concepto añadido a los tradicionales de eficiencia, salud, seguridad, durabilidad, economía, etc.
2. Conseguir la información accesible y creíble de los atributos de sostenibilidad de los productos y materiales que selecciona.
3. Tener la confianza para hacer los juicios de valor y comprender mejor las implicaciones éticas de sus decisiones.

En este sentido, el Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos aprobó en el año 2002 (año europeo del desarrollo sostenible) una declaración relativa al Compromiso Ético con el Desarrollo Sostenible que consideramos de un gran interés y que indica, entre otras cosas las siguientes:

*“Las funciones de planificación, diseño, ejecución y explotación de infraestructuras, objeto principal de la actividad profesional de los Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, tienen una incidencia mayoritaria en el medio ambiente y deben ser realizadas con una visión integrada del medio natural y de los factores sociales y económicos, pues, en definitiva, el encaje de estas tres dimensiones (medio natural, dimensión social y dimensión económica) constituye el Desarrollo Sostenible y, en particular, la ingeniería civil sostenible.”*

Y desde el punto de vista que nos ocupa, el formativo, el Colegio afirma:

*“En el campo de la formación, el Colegio apoyará la inclusión de los conocimientos generales y específicos sobre la sostenibilidad, dentro de la educación en la Universidad. Asimismo, facilitará conceptos estratégicos y éticos sobre el quehacer durable en la formación permanente de los ingenieros a lo largo de su vida profesional, y apostará por la investigación y la innovación en materia de sostenibilidad.”*

## La sostenibilidad y la universidad

A pesar de las evidencias y de las buenas intenciones, el concepto de sostenibilidad global era hasta hace relativamente poco tiempo extraño a la formación universitaria. La primera actuación de cierta envergadura en esta línea fue, en opinión de los autores, la creación en la Universitat Politècnica de Catalunya de la Cátedra UNESCO de sostenibilidad creada en 1996 por convenio entre la Universidad, el Gobierno Autónomo y la UNESCO. Con anterioridad ya se había venido hablando de la imperiosa necesidad de introducir estos conceptos como básicos de la formación universitaria moderna. Por ejemplo, la declaración de Talloires de Rectores de Universidades para un Futuro Sostenible de 1990 recoge que: *“las universidades y las instituciones equivalentes de educación superior capacitan a las generaciones futuras de ciudadanos y de expertos en todos los ámbitos de la investigación, tanto en los aspectos tecnológicos como en las disciplinas de las ciencias naturales, humanas y de la ciencia social. Consecuentemente es su responsabilidad extender el pensamiento medioambiental y promover prácticas ambientalmente éticas en la sociedad, de acuerdo con los principios presentes en la Carta Magna Europea de las Universidades y de las declaraciones siguientes de las universidades, y en la línea de las recomendaciones de la UNCED (Conferencia de las Naciones Unidas en desarrollo y ambientalización) para el desarrollo del educación.”* Posteriormente se suceden distintos acuerdos como la Declaración de Halifax (Canadá 1991), la Declaración de Swansea (Reino Unido, 1993), la Declaración de Kyoto (Japón, 1993), la University Charter for Sustainable Development (Barcelona, 1993) y la Student Declaration for Sustainable Future (Liverpool, 1995). Todas ellas pueden consultarse en la web de Sustainable Development on Campus. Como resumen conciso del pensamiento que se estaba instituyendo en aquella época es paradigmático el breve comentario de la Carta Copérnico de Rectores de Universidades Europeas (CRE) de 1994: *“las universidades educan muchas de las personas que desarrollan y gestionan las instituciones de la sociedad. Por esta razón, las universidades tienen una profunda responsabilidad en incrementar el conocimiento, las tecnologías y las herramientas para conseguir de un futuro sostenible”*.

## La sostenibilidad y los nuevos planes de estudios

Consecuentemente con lo anteriormente expuesto, las universidades y dentro de ellas con mayor razón las escuelas de ingenieros en general y de ingenieros de caminos en particular, han de establecer los mecanismos necesarios para que sus egresados piensen en términos de sostenibilidad. Pero esto no significa exclusivamente la “enseñanza de asignaturas que incidan en los aspectos técnicos, sociales y económicos de la sostenibilidad”. Significa también que la totalidad del plan de estudios debe estar diseñado desde el punto de vista de la sostenibilidad curricular. Como hemos indicado anteriormente, esta cuestión fue tratada a fondo por la CRUE (Conferencia de Rectores de Universidades Españolas). En ese documento se establece que los profesionales del futuro han de ser capaces de:

1. Comprender cómo su actividad profesional interactúa con la sociedad y el medio ambiente, local y globalmente, para identificar posibles desafíos, riesgos e impactos.

## *Ingeniería Civil para un Mundo Sostenible*

2. Entender la contribución de su trabajo en diferentes contextos culturales, sociales y políticos y como éstos afectan al mismo y a la calidad ambiental de su entorno.
3. Trabajar en equipos multidisciplinares, para dar solución a las demandas impuestas por los problemas socio ambientales derivados de los estilos de vida sostenibles, incluyendo propuestas de alternativas profesionales que contribuyan al desarrollo sostenible.
4. Aplicar un enfoque holístico y sistémico a la resolución de problemas socio ambientales y la capacidad de ir más allá de la tradición de descomponer la realidad en partes inconexas.
5. Participar activamente en la discusión, la definición, diseño, implementación y evaluación de políticas y acciones tanto en el ámbito público como privado, para ayudar a redirigir la sociedad hacia un desarrollo más sostenible.
6. Aplicar los conocimientos profesionales de acuerdo con principios deontológicos y valores y principios éticos universales.
7. Recoger la percepción, demandas y propuestas de los ciudadanos y permitir que tengan voz en el desarrollo de su comunidad.

Para formar estos profesionales es necesario:

1. La revisión integral de los currícula desde la perspectiva del Desarrollo Sostenible que asegure la inclusión de los contenidos transversales básicos en sostenibilidad en todas las titulaciones, con el fin de adquirir las competencias profesionales, académicas y disciplinares necesarias. Lo anterior debe lograrse mediante el reconocimiento académico cuantificable de contenidos generales de sostenibilidad para todas las titulaciones y de contenidos específicos adaptados al contexto de cada titulación.
2. La inclusión de criterios de sostenibilidad en los sistemas de evaluación de la calidad universitaria.

Si nos fijamos en la titulación de ingeniero de caminos, canales y puertos, que, como dijimos antes, es una de las que forma profesionales con mayor incidencia en la consecución de estos principios, creemos que a corto plazo se debería fomentar:

1. Acciones de capacitación del profesorado que les capaciten para la inclusión de conceptos sobre sostenibilidad en sus asignaturas.
2. La introducción en las enseñanzas prácticas de procedimientos correctos desde los puntos de vista medioambientales y de prevención de riesgos.
3. La inclusión de itinerarios de especialización en sostenibilidad específicos para la titulación.
4. Acciones de educación ambiental no curricular que complementen la formación del estudiante, en forma de seminarios, jornadas, mesas de trabajo, voluntariado, etc. y que puedan tener valor en créditos de libre elección.



## Prólogo

5. La elaboración de recursos y materiales de apoyo a la sostenibilización curricular.
6. La incorporación de asignaturas relacionadas con el cambio climático y los desastres naturales (gestión de situaciones y condiciones extremas).
7. La evaluación de los proyectos de fin de carrera y tesinas de licenciatura desde una perspectiva de la sostenibilidad, así como una oferta específica de carácter sostenibilista.
8. La promoción de actividades de investigación (proyectos, tesis,) encaminadas a mejorar los conocimientos técnicos del desarrollo sostenible en la rama de la ingeniería civil.

Pero las lecciones en desarrollo sostenible debe continuar una vez que el ingeniero sale de la escuela, en el ejercicio profesional, y por ello a la labor docente en la escuela debe ir sumada una acción por parte del colegio en la misma línea reforzando las buenas prácticas en ética y valores.

En definitiva, la sostenibilidad empieza por pensar en clave de sostenibilidad. Debe convertirse en un modo de vivir, de entender el mundo, de proyectar desarrollo. La Universidad, y la Escuela de Ingenieros de Caminos dentro de ella, a través de las distintas disciplinas, tienen la obligación moral de comunicar, transmitir, compartir esta enseñanza. Se trata de un compromiso supranacional con la sociedad y con el entorno. Desde el punto de vista de la formación universitaria, la sostenibilidad, tanto en la educación como luego en el diseño y el desarrollo de políticas globales y sectoriales, debe ocupar el escalón más elevado.

La ingeniería civil y la arquitectura son las disciplinas que más inciden en la transformación del medio en el que vive el hombre, creando lugares artificiales como los sistemas de ciudades y sus redes de comunicación, y es por ello que deben ser conscientes de la necesidad de fomentar un desarrollo armónico basado en una ética de la tierra, es decir, comprometida con conservar el lugar natural heredado, incluso mejorarlo.

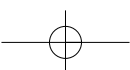
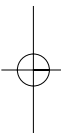
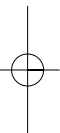
Los ingenieros de caminos deben salir de la Escuela con una formación sólida y comprometida con el desarrollo sostenible para que puedan transmitir esa forma de hacer a las empresas en las que desarrollen su trabajo. La implementación de un “modus operandi” sostenible debe abordarse de un modo técnico, es decir, debe poderse medir y evaluar, aunque su origen sea ideológico. Las ideas sin la técnica no son nada, y a la inversa, de modo que los especialistas, nuestros ingenieros, han de serlo simultáneamente en uno y otro aspecto.

**Manuel Casteleiro Maldonado**

*Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos*

**Juan Cagiao Villar**

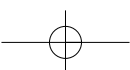
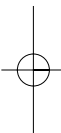
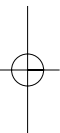
*Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos*



# ÍNDICE

---

Capítulo 1	
<b>LA INFLUENCIA DEL TERRITORIO Y SU BIODIVERSIDAD EN LAS POLÍTICAS DE PLANIFICACIÓN DE LA OBRA PÚBLICA EN ESPAÑA</b> .....	<b>13</b>
Capítulo 2	
<b>UN NUEVO URBANISMO PARA ABORDAR LOS RETOS DE LA SOCIEDAD ACTUAL</b> .....	<b>49</b>
Capítulo 3	
<b>EVALUACIÓN AMBIENTAL ESTRATÉGICA. UN INSTRUMENTO PARA LA INTRODUCCIÓN DE CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD EN LA PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO</b>	<b>85</b>
Capítulo 4	
<b>NATURALEZA, CAMINOS, CANALES Y PUERTOS</b> .....	<b>101</b>
Capítulo 5	
<b>ENERGÍA EN EL SIGLO XXI</b> .....	<b>119</b>
Capítulo 6	
<b>LA EDUCACIÓN PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE. EJE DE LA TECNOLOGÍA PARA EL DESARROLLO HUMANO</b>	<b>155</b>
Capítulo 7	
<b>HORMIGÓN CON ÁRIDOS RECICLADOS</b> .....	<b>173</b>
Capítulo 8	
<b>APLICACIONES DE LOS MODELOS MEDIOAMBIENTALES</b> ...	<b>183</b>



<b>CAPÍTULO</b> <b>7</b>	<b>HORMIGÓN CON ÁRIDOS RECICLADOS</b>
-----------------------------	---

**ENRIC VÁZQUEZ RAMONICH**

*Catedrático de Materiales de Construcción  
ETS. Ingenieros de Caminos de Barcelona.  
Universitat Politècnica de Catalunya*

## **1. CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE Y RESIDUOS**

En 1987, la ministra del gobierno noruego Gro Harlem Brundtland definió ante las Naciones Unidas el concepto de desarrollo sostenible como el que cubre las necesidades de la generación actual sin poner en peligro las necesidades de las generaciones futuras. Este desarrollo debía tener en cuenta simultáneamente el Medio Ambiente, los aspectos sociales y los aspectos económicos. Nada más lejos del llamado “desarrollo cero” que tan de moda estuvo entre algunos especuladores ambientalistas.

A partir de la definición se llega fácilmente a la necesidad de una construcción sostenible. Construcción necesaria para el desarrollo de la población y sus actividades, pero que debe partir de una forma de proyectar y construir que permita la salud humana y esté en armonía con el medio ambiente. Rápidamente acude a nuestro pensamiento la cuestión de la calidad técnica y la durabilidad de lo construido en posible conflicto con unas prácticas, como la utilización de residuos como materiales de construcción. Nada de eso debe perturbar el concepto pues el propio desarrollo del concepto de sostenibilidad lleva a la necesidad de una construcción durable.

Construcción durable es aquella que puede resistir sin pérdida de funcionalidad un tiempo dado. Cuanto mayor sea este tiempo menor será el gasto de energía y consumo de materias primas destinados a una reparación o reposición. Menores emisiones de anhídrido carbónico y disminución de impactos. Por otra parte nunca se trata de utilizar un residuo sin más, sino

## *Ingeniería Civil para un Mundo Sostenible*

de partir de él para obtener un material, un producto con calidad contrastable que cumpla la definición de material sostenible. La sostenibilidad aquí deberá ser la propiedad de un material o de un elemento constructivo que no afecte a los seres vivos, que cumpla su misión técnica correctamente y que reduzca dentro de lo posible el uso de materias primas, el consumo energético, las emisiones, la creación de residuos etc.

Un elemento principal es armonizar el proyecto y la elección de los materiales de construcción. La mayoría de expertos coinciden en preconizar la gestión en cadena de la construcción de acuerdo con los criterios de sostenibilidad (chain management según Hendricks) y este es esencialmente dirigido por el ciclo de los materiales de construcción.

Para ello hay que partir de ciertos principios como:

### **MÁXIMO CIERRE DE LOS CICLOS, EN RELACIÓN A LAS MATERIAS PRIMAS**

- Reducir el uso de materias primas no renovables.
- Promocionar el uso de materias primas renovables.
- Promocionar el uso de materias o materiales secundarios.

### **PREVENIR LA CREACIÓN DE CORRIENTES DE RESIDUOS. PROMOCIONAR EL USO DE LOS RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN DEMOLICIÓN (RCD)**

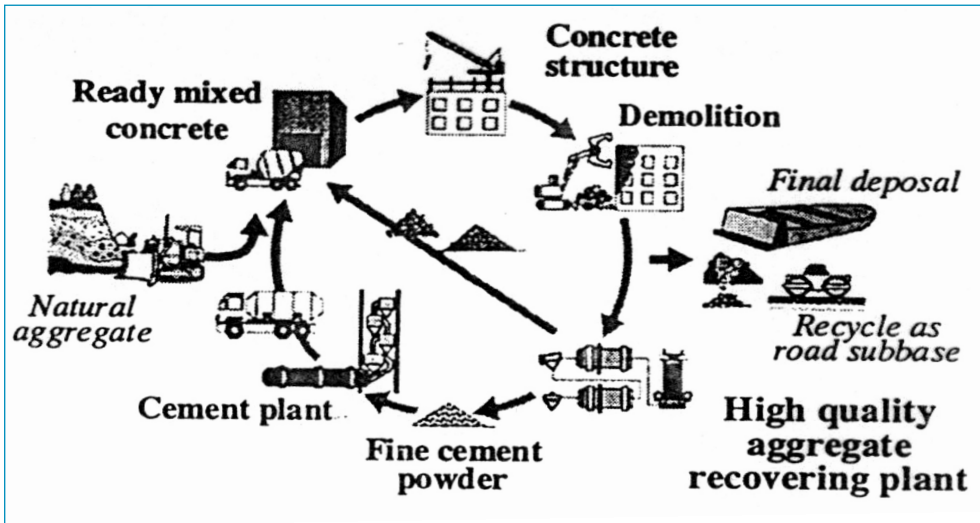
- Reducir el volumen de residuos en la construcción.
- Recolección separada de residuos “químicos”.
- Reutilizar los RCD.

## **2. EL CASO DEL HORMIGÓN**

En el Plan Nacional de Japón sobre hormigón reciclado del año 2000, se presentó el ejemplo de la figura 1. Como puede verse la simple utilización del hormigón triturado y convertido en árido para bases de carreteras, no cierra el ciclo de una forma perfecta. Ni mucho menos el llevarlo a un vertedero acondicionado. Aunque reutilizar dicho árido en la carretera no cierre el ciclo, hoy por hoy hay que admitir que es una práctica con un nivel de sostenibilidad menor pero aceptable en la etapa incipiente en que nos encontramos.

El verdadero cierre del ciclo solo se alcanza obteniendo el árido reciclado en una planta de alto nivel, que permita una calidad suficiente del nuevo árido e incorporarlo entonces directamente al hormigón. El criterio japonés se basa en que tal planta despegue el máximo de mortero posible y deje un árido muy parecido al original y en consecuencia con baja absorción. Esto significa que el mortero será convertido en finos. Estos serán llevados a una fábrica de cemento e incorporados como materia prima para clinkerizar pues, en definitiva, al proceder del cemento fraguado y arena contendrán esencialmente sílice, cal, hierro y aluminio en cantidades no lejanas de las necesarias para la obtención del clinker. En el citado país ya existe una empresa de cemento que produce clinker a partir de los finos del procesado del hormigón de demolición.

Figura 1. Ciclo del hormigón



El punto débil del hormigón son las emisiones de  $\text{CO}_2$  que produce la descarbonatación necesaria de la caliza para obtener el clinker (408 kg de  $\text{CO}_2$  por tonelada de clinker), lo que indica que la adición de un polvo, que en el peor caso contendrá una proporción mucho más baja de carbonato cálcico, solo podrá ser ambientalmente favorable. El residuo tras demolición puede representar un impacto ambiental del 40%. Por tanto reciclar RCD de hormigón no puede más que resultar beneficioso.

El árido de hormigón reciclado presenta las siguientes diferencias respecto a los áridos convencionales:

#### Comparación con el árido natural

- Densidad menor.
- Mayor absorción de agua proporcional a la cantidad de mortero retenido e inversamente proporcional al tamaño (mayor superficie específica).

#### Problemas

- Fracción < 4mm no utilizable por retener demasiada agua.
- Contaminación posible.

En la figura 2 puede verse la diferencia entre un árido de hormigón reciclado seco y otro saturado, poniendo de manifiesto la absorción. La forma y la textura superficial son también distintas, pues la rugosidad y algunas formas muy poco cúbicas pueden representar dificulta-

## *Ingeniería Civil para un Mundo Sostenible*

des en cuanto a la trabajabilidad. Tema este, superable mejorando el machaqueo y también utilizando superfluidificantes, hoy casi inevitables en un buen hormigón de cualquier índole.

**Figura 2.** Hormigón reciclado



El mortero adherido, principal causante del aumento de absorción, puede investigarse en el laboratorio por:

- Análisis de láminas pulidas.
- Separación química (ácido clorhídrico).
- Tratamiento térmico (Saturación del árido, calentamiento a 500° C, enfriamiento en agua fría, separación del árido convencional-mortero viejo, tamizado húmedo y secado con estufa).

El mortero es el causante también del aumento del desgaste en la máquina de Los Angeles. Aunque todos sabemos que este es un ensayo de poco rigor y que suele obedecer a la vieja filosofía de la seguridad del matar pájaros a cañonazos, se puede decir que los morteros adheridos de un hormigón que ha sufrido la acción del fuego presenta siempre un coeficiente Los Angeles mayor.



## Hormigón con áridos reciclados

Hay más requerimientos que debe cumplir el árido reciclado, así por ejemplo:

### LIMITACIÓN DE CONTAMINANTES

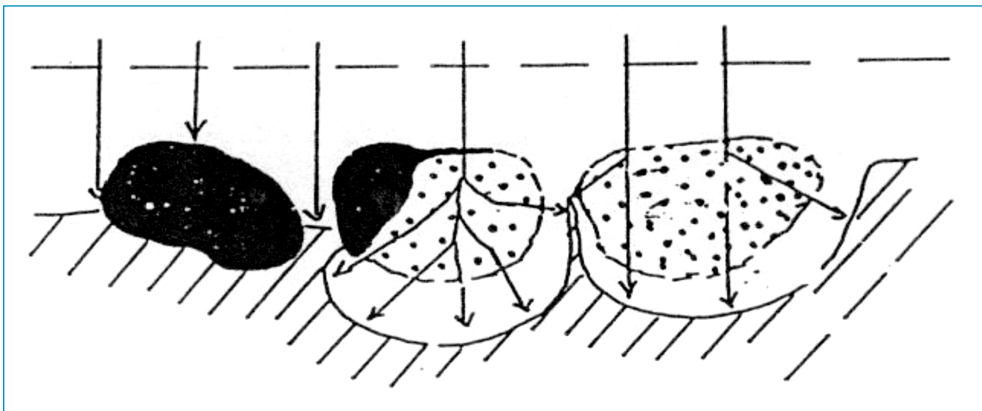
- Que puedan influir en el fraguado del cemento.
- Corrosión de armaduras (Cloruros).
- Hinchamiento por absorción humedad (p.e. madera).
- Formación de etringita (yeso).
- Reacción álcali-árido.
- Descensos de resistencia (mezcla asfáltica).

Superados los principales requisitos, nos encontraremos que las distintas propiedades del hormigón vendrán afectadas por la sustitución de un árido de cantera convencional por el reciclado de hormigón, pero permanecerán invariables cuando no se superen ciertos porcentajes de sustitución.

- La resistencia = hasta el 20-30% de sustitución.
- El módulo  $\approx$  hasta el 20-30% de sustitución.
- La fluencia = hasta el 30% de sustitución.
- La retracción = hasta el 30% de sustitución.
- La permeabilidad = hasta el 20% de sustitución.

La carbonatación depende de la cantidad de cemento y la porosidad accesible del nuevo hormigón (Barra, M. 1996) y la penetración de cloruros solo de las características del nuevo mortero (Barra, M., Vazquez, E. 2009). Ver figuras 3, 4 y 5.

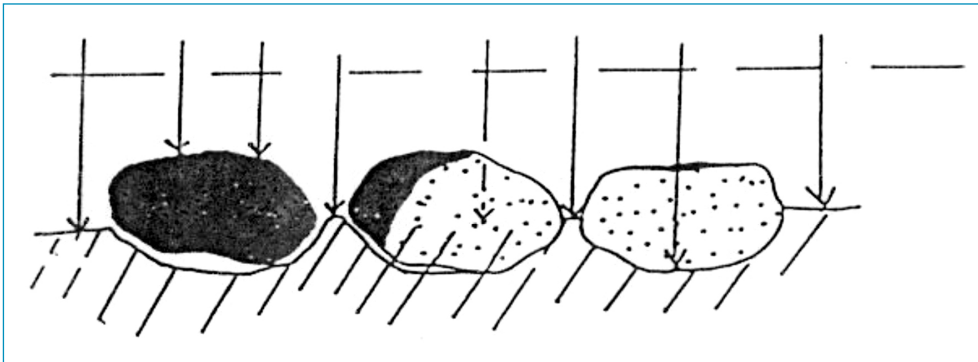
**Figura 3.** Permeabilidad árido > Permeabilidad mortero



Hipótesis de frente de carbonatación para árido más poroso que el mortero nuevo

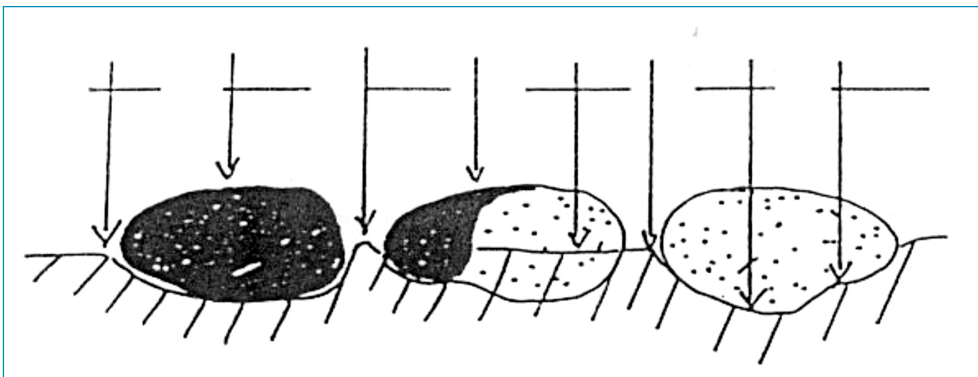
## Ingeniería Civil para un Mundo Sostenible

**Figura 4.** Permeabilidad árido = Permeabilidad mortero



Hipótesis del frente de carbonatación cuando la permeabilidad del árido es igual a la del mortero

**Figura 5.** Permeabilidad árido < Permeabilidad mortero



Hipótesis del frente de carbonatación para permeabilidad del árido menor que la del mortero

La última edición de la EHE incorpora las cautas conclusiones del correspondiente comité ad hoc, que pueden muy sucintamente resumirse en estos puntos críticos:

- Exclusión de la fracción 0/4mm - Obliga a encontrar aplicación para los finos.
- Sustitución por árido reciclado en hormigón estructural hasta el 20%.

En el no estructural se puede sustituir toda la fracción superior a 4 mm dependiendo de la aplicación. En todos los hormigones debe velarse por la no presencia de áridos susceptibles de dar la reacción álcali-sílice, por lo que dependiendo de los áridos naturales de la zona puede obligar a utilizar cementos bajos en alcalinos.

### 3. ÁRIDOS RECICLADOS DE COMPOSICIÓN MIXTA, PARA HORMIGONES

Queda abierta la cuestión del uso de áridos reciclados procedentes de demolición mixtos, con un elevado % de áridos procedentes de ladrillo, teja y otros. La norma alemana admite para ciertas aplicaciones hasta un 20 % de los mismos (ver figura 6, fuente Annette Müller, Weimar). Se añade sin embargo una limitación de aplicación en función del ambiente (fig. 7). Queda un amplio espacio para la investigación y desarrollo de hormigones no estructurales y diversos prefabricados.

Figura 6 y 7. Especificaciones Alemania

Engineering specifications for the properties of recycled aggregates for concrete				
Constituents	[% by mass]			
	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
Germany DIN 4226-100: Recycled aggregates	Concrete chippings/ Concrete crusher sand	Construction chippings/ Construction crusher sand	Masonry chippings/ Masonry crusher sand	Mixed chippings/ Mixed crusher sand
Concrete and natural aggregates acc. DIN 4226-1	≥ 90	≥ 70	≤ 20	≥ 80
Clinker, non-pored bricks	≤ 10	≤ 30	≥ 80	
Sand-lime bricks			≤ 5	
Other mineral materials such as pored brick, lightweight concrete, no-fines concrete, plaster, mortar, porous slag, pumice stone	≤ 2	≤ 3	≤ 5	≤ 20
Asphalt	≤ 1	≤ 1	≤ 1	
Foreign substances such as glass, non ferrous metal slag, lump gypsum, plastic, metal, wood, plant residue, paper, others	≤ 0.2	≤ 0.5	≤ 0.5	≤ 1
OD density (oven dry) [kg/m <sup>3</sup> ]	≥ 2000	≥ 2000	≥ 1800	≥ 1500
Maximum water absorption after 10 min [%]	10	15	20	No requirement

DIN 4226-100. Gesteinskörnungen von Beton und Mörtel, Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen. DIN-Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag, Berlin 2002.

- Application in dry environments or in environments with low humidity
- Limited portions acc. to the table

Field of application		Recycled aggregates [vol.-%]	
ASR-guideline	DIN EN 206-1 and DIN 1045-2	Type 1	Type 2
WO (dry)	Exposure class XC 1	≤ 45	≤ 35
WF (humid)	Exposure class X 0 Exposure class XC 1 to XC 4		
	Exposure class XF 1 and XF 3	≤ 35	≤ 25
	Exposure class XA 1	≤ 25	≤ 35

DAfStb-Richtlinie: Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN 4226-100. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Schlussentwurf 2003.

## Ingeniería Civil para un Mundo Sostenible

La experiencia desarrollada en nuestros laboratorios de la UPC, nos ha permitido unas primeras recomendaciones generales:

- Árido cerámico  $\approx$  árido ligero.
- Siempre  $> 4\text{mm}$ .
- Utilizar fluidificantes para controlar el agua pues la absorción se dispara.
- Pre humectación.
- Descenso de resistencia. Debe tenerse en cuenta la aplicación.

Especial consideración merece la cuestión de la resistencia a hielo-deshielo, que deberá estudiarse en cada caso.

En el proyecto Zicla-Breincó se probaron distintas proporciones, para ser utilizadas en placas no estructurales. Se estudiaron hormigones en los cuales se sustitufan cantidades crecientes del árido convencional por reciclado de hormigón (R) y reciclado cerámico (C) y también mezclas de ambos. Los resultados de resistencia a compresión a 28 días figuran en la relación adjunta.

Patrón	sin árido rec.	21,0 MPa
25R		21,1 MPa
50R		17,0 MPa
100R		14,7 MPa
25C		18,5 MPa
50C		15,8 MPa
100C		13,1 MPa
50R 50C		15,3 MPa
<b>Prueba de Fabrica</b>		
75R		23,7 MPa
50C		31,7 MPa

Siendo R = árido reciclado de hormigón y C = árido reciclado cerámico.

Como puede verse los testigos en las piezas reales (ver fig. 8) dieron mejores resultados que las probetas de laboratorio. Ello se explica por la mayor energía de compactación aplicada en fábrica. El estudio ha permitido que en estos momentos se encuentren elementos prefabricados con dichos áridos (fig. 9).

En Alemania, A.Müller de la Universidad de Weimar, ha desarrollado diversos elementos prefabricados con áridos reciclados mixtos, como bloques para muros e incluso tabiques ligeros no portantes con áridos totalmente cerámicos.

*Hormigón con áridos reciclados*

**Figura 8.** Proyecto ZICLA - BREINCO



R = árido reciclado de hormigón  
C = árido reciclado cerámico

**Figura 9.** Concreto estructural: Forum 2004



#### 4. CONCLUSIONES

En el ámbito de la construcción sostenible el reciclaje de residuos de demolición y construcción como materia primera para obtener áridos es ineludible. A corto plazo la aplicación más sencilla y menos costosa de producción, como son los áridos mixtos tienen todas las posibilidades de ser los protagonistas de una aplicación inmediata. Se difunde la idea del posible y recomendable reciclaje en el hormigón estructural, como se efectuó en la pasarela del FORUM 2004 de Barcelona (fig. 10), cuyo hormigón fue dosificado en nuestro laboratorio, o la reciente construcción de un puente en Valencia.

**Figura 10.** Elementos de hormigón pre-fabricados UPC – Breinco - Zicla



La producción de hormigones no estructurales es mucho menos exigente y permite la utilización de mayores cantidades de áridos reciclados. También se han construido tramos de carretera con bases de suelo-cemento en central con todo uno 0/25 mm y un 3,5% de cemento con pleno éxito.