

# **Desarrollo sostenible del cemento y del hormigón**

Editor: R. Gettu

# **Desarrollo sostenible del cemento y del hormigón**

Editor:

**Ravindra Gettu**

Monografía CIMNE Nº-67, Octubre 2002



## Prólogo

Esta publicación contiene algunas de las comunicaciones presentadas al Seminario Internacional CANMET/ACI/UPC sobre Desarrollo Sostenible del Cemento y Hormigón celebrado los días 4 y 5 de noviembre de 2002 en Barcelona, España.

La organización del seminario, que trata un tema de importancia creciente, fue posible gracias a la iniciativa del Dr. V. Mohan Malhotra y del Comité para la Organización de Congresos Internacionales CANMET/ACI.

El comité organizador desea agradecer las valiosas contribuciones de los ponentes, de los presidentes de las sesiones del seminario y de los autores de las comunicaciones.

La organización del evento no habría sido posible sin el apoyo de varios colaboradores, en particular Antonio Aguado, Alejandro Josa, Enric Vázquez, Luis Agulló, Pere Alavedra, Muriel Idelsohn, Bryan Barragán, Joana Roncero, Tomàs Garcia y Padma Gettu.

Ravindra Gettu

Barcelona, Octubre de 2002



## Preface

This compilation consists of some of the papers presented at the Seminario Internacional CANMET/ACI/UPC sobre Desarrollo Sostenible del Cemento y Hormigón (CANMET/ACI/UPC International Seminar on Sustainable Development of Cement and Concrete) held at Barcelona, Spain, during November 4-5, 2002.

The organization of the seminar, which deals with an area of growing importance, was made possible by initiative taken by Dr. V. Mohan Malhotra and the Committee for the Organization of CANMET/ACI International Conferences (ACI Council).

The seminar speakers, session chairpersons and the authors of the papers included here are thanked for their contributions.

Thanks are also extended to all those who have collaborated in the organization of the event, especially Antonio Aguado, Alejandro Josa, Enric Vázquez, Luis Agulló, Pere Alavedra, Muriel Idelsohn, Bryan Barragán, Joana Roncero, Tomàs Garcia and Padma Gettu.

Ravindra Gettu

October 2002



## COMITÉ ORGANIZADOR DE CONGRESOS CANMET/ACI (ACI Council)

### **Presidente**

**V. Mohan Malhotra**  
ICON/CANMET  
Ottawa, Canadá

### *Secretario-Tesorero*

**Harry S. Wilson**  
Ottawa, Canadá

### **Miembros**

**Theodore W. Bremner**  
University of New Brunswick  
Fredericton, Canadá

### **Wilbert S. Langley**

W.S. Langley Concrete and Materials Technology Inc.  
Sackville, Canadá

### **Noël P. Mailvaganam**

Institute for Research in Construction/NRC  
Ottawa, Canadá

### **Nelu Spiratos**

Handy Chemicals Ltd.  
Candiac, Canadá

## ORGANIZACIÓN DEL SEMINARIO

### **Ravindra Gettu** (*Coordinador*)

**Antonio Aguado**  
**Pere Alavedra**  
**Bryan Barragán**  
**Tomàs Garcia**  
**Joana Roncero**

**Luis Agulló**  
**Marilda Barra**  
**Alejandro Josa**  
**Padma Gettu**  
**Enric Vázquez**



## Índice

CICLO DE VIDA, DURABILIDAD Y TRASCENDENCIA DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN Eduardo Peris Mora	1
INICIATIVAS EUROPEAS PARA LA CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE Pere Alavedra	19
DESARROLLO DE HORMIGONES AUTOCOMPACTABLES DE ALTA RESISTENCIA CON CENIZAS VOLANTES: HACIA UNA TECNOLOGÍA DEL HORMIGÓN MÁS SOSTENIBLE Ravindra Gettu, Alejandro Josa, Luis Agulló, Paulo C.C. Gomes, Jesús Izquierdo	27
RECICLAJE Y REUTILIZACIÓN DEL HORMIGÓN Enric Vázquez, Marilda Barra	43
GREENER CONCRETE FOR SUSTAINABLE CONCRETE CONSTRUCTION Tarun R. Naik	67
SISTEMA INTEGRADO DE TOMA DE DECISIONES PARA PROYECTO Y OBRA Antonio Aguado de Cea y Gaizka Ormazabal	89 (87)



# CICLO DE VIDA, DURABILIDAD Y TRASCENDENCIA DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Eduardo Peris Mora

Universidad Politécnica de Valencia, España.

## Resumen

El metabolismo de las ciudades es una de las principales causas del deterioro medioambiental y las tendencias actuales permiten prever que el desarrollo urbano y de infraestructuras va a seguir aumentando. Aunque se viene usando cada vez más la expresión "construcción sostenible" la interpretación de la misma permite diferenciar la sostenibilidad de la actividad y la de las obras a que da lugar. Los materiales de construcción utilizados desde la antigüedad han permitido que muchas obras del pasado hayan durado miles de años. Algunas están realizadas con materiales permanentes como la piedra; otras, fueron realizadas en materiales como el adobe o el tapial. El cemento romano apareció como resultado de la interrelación de los ingenieros a su medio ambiente, al utilizar para las obras marítimas los materiales más accesibles, la cal tradicional de utilización milenaria y la arena volcánica de su entorno portuario. Algunas de las obras construidas con cemento romano permanecen en pie después de veinte siglos. La durabilidad de las obras depende de la durabilidad de los materiales, pero es posible la construcción trascendente con materiales más efímeros si en el proyecto se ha considerado la necesidad de mantenimiento y la obra ha sido concebida con carácter modular, que haga posible la actuación reparadora de modificar materiales o partes de la obra sin destruir la estructura. El hormigón en masa, con los conocimientos actuales, permite proyectos de obras que podrán durar varios siglos y ser utilizados en obras trascendentes.

## Introducción

En un seminario como éste que trata de reflexionar sobre las relaciones entre ciertos materiales de construcción y el medio ambiente me voy a permitir juntar, como en un guiso, las cuatro ideas que se recogen en el título de la ponencia para intentar proponer algunos puntos de vista que colaboren en la provocación intelectual que debe ser todo seminario que tenga éxito. En otras ponencias se habla con gran conocimiento de causa acerca de la durabilidad, del ciclo de vida y de la sostenibilidad asociada a la utilización de los materiales. El añadir la dimensión de la trascendencia resulta casi obligatoria sin más que extender la durabilidad a escalas mayores que la que permite el análisis referido a más de una generación humana.

Como mediterráneos que somos muchos de los que participamos en esta reunión, nuestra cultura está condicionada por el entorno geográfico e histórico, pero la geografía humana, la antropología o la ciencia de los materiales que nos ocupa pueden ser entendidas también como sub-ciencias que permitirían intentar comprender mejor el mundo (o al menos una porción del mundo: el medio) como es la ecología. Y así se explica que ingenieros, arquitectos, científicos experimentales y otros especialistas nos reunamos para hablar desde nuestro parcial punto de vista de un poco de ecología aplicada, el que corresponde a los efectos de nuestros materiales sobre la sostenibilidad. El profesor Pineda, transmite un fenómeno que inquieta a Margalef por no saber interpretarlo: la naturaleza, dice Margalef, (excluyendo al hombre) evoluciona de una tal forma que las etapas más desarrolladas de los ecosistemas no antrópicos culminan por la acumulación de madera; mientras que la especie humana, y sobre todo durante el último medio siglo, se comporta de una forma inexplicable en su frenético proceso de acumulación de hormigón. Los romanos construyeron obras de hormigón, con cemento no muy diferente al que seguimos usando masivamente en la actualidad y dejaron obras que han trascendido temporal e intelectualmente sobre muchas generaciones. Las vías romanas que todavía existen –algunas por debajo de nuestras modernas autopistas- eran la forma más eficiente en su momento de mantener un imperio bien comunicado, lo que ha dado lugar a una expresión usual en varias lenguas europeas de que “todos los caminos conducen a Roma”. Sin embargo, la expresión no se justificaría del todo si no pensamos en unos caminos más efímeros (Caminante no hay camino, sino estelas en la mar” que escribió Machado) que completaban el sistema de comunicaciones mediante el la construcción y uso de puertos en todo el perímetro mediterráneo, puertos que permitieron

también alcanzar los mares del Norte de Europa. Aunque se conservan algunos de los puertos romanos, el basculamiento continental, la variación de los niveles marinos y la sobreocupación del litoral ha hecho desaparecer a la mayor parte de esas nobles ruinas.

Los condicionantes medioambientales de la actividad portuaria, en el caso de la flota imperial romana se aprovecharon de la circunstancia de que en un poblado próximo a lo que hoy conocemos como Nápoles existe un gran número de cráteres volcánicos de pequeña altura inmediatos a la línea de la costa, que tienen forma de lagunas circulares o pozos (Puzzuoli se llama la población). Algunos de ellos están abiertos al mar y constituyen lo que podría ser la instalación portuaria natural más perfecta, y así fue entendido por Agrippa quien construyó importantes instalaciones portuarias en el S. I a.C. (Portus Julius)(ONMN, 2002). El empleo de la cal común puede tener más de 9000 años de antigüedad (Cassar, 2002) pero la circunstancia de utilizar cal impurificada con las cenizas volcánicas del entorno de Puzzuoli dio lugar al feliz descubrimiento (que no invención) del conglomerante desde entonces más universal y revolucionario. Sin duda la integración de la actividad portuaria al medio ambiente jugó a favor del descubrimiento del material y el desarrollo de la tecnología. Puertos y vías, además de sistemas de irrigación, acueductos, construidos por Roma o por culturas todavía más antiguas constituyen un patrimonio de obras a las que deberíamos valorar como "trascendentes", además de por el impacto cultural a que dan lugar, por la evidente constatación de poseer la propiedad de ser durables.

### **La Construcción: Las Ciudades y las Infraestructuras**

El metabolismo de las ciudades es el responsable de los mayores consumos de materiales, energía, y agua (Shimoda & Mizuno, 2000). Se espera que la población mundial aumente en casi 2 mil millones personas entre 2000 y 2030, casi todas ellos en ciudades en África, Asia, y América Latina (O'Meara Sheehan 2002). Las ciudades del "Norte Industrial" fueron polos de atracción demográfico en torno a 1900. En el año 2000 sin embargo, solo Tokio, New York y Los Angeles se encuentran en la lista de las diez poblaciones más grandes del mundo. Los demógrafos esperan que para el 2015 Los Ángeles será sobrepasada por ciudades como Lagos, Doha, Karachi y Yakarta que están creciendo muy rápidamente. El número de habitantes que actualmente habita en grandes zonas urbanas alcanza ya los 3.000 millones; entre 2000 y 2015, 972 millones se sumarán a esa cifra; la población urbana se duplica cada

cinco años en África, América Latina y Asia. Se estima sin embargo que en más de un 60 % de esa población urbana vive en condiciones de miseria indescriptible.

Cuando se hace una estimación de las emisiones totales a la atmósfera de las cinco sustancias que nos sirven para medir la contaminación (CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, HC y partículas) sorprende el hecho de que las emisiones naturales superan ampliamente a las emisiones antropogénicas en su conjunto. Los problemas de la contaminación atmosférica en lo que se refiere a esas sustancias provienen en mayor medida de la concentración espacial y temporal más que de la cantidad total liberada (Peris Mora, 1992) y esa concentración, se produce especialmente en las atmósferas urbanas. Además de las inmisiones, también los problemas medioambientales planetarios tienen sus raíces en las ciudades: Desde los escapes de los automóviles que calientan la atmósfera, a la demanda de madera para construcción que deforesta la tierra y amenaza la biodiversidad, pasando por la sed municipal que provoca graves consumos de agua, las ciudades son el lugar en donde se consume finalmente el mayor volumen de los recursos del mundo. Aproximadamente 78 por ciento de emisiones del carbono procedente de los combustibles fósiles que se queman para fabricar cemento y el 76 por ciento de la madera industrial mundial se usa en las áreas metropolitanas. Un 60 por ciento del agua que circula por conducciones para el consumo humano en nuestro planeta va a las ciudades de una u otra forma (O'Meara Sheehan, M. 2002).

Y sin embargo, las ciudades constituyen una fuerza motriz para el desarrollo económico y social en la mayoría de los países; las ciudades generan el 55% del PNB en los países de economías más débiles, el 73% del PNB en los países de desarrollo medio y el 85% en los de mayor desarrollo. Es ese crecimiento económico el que asegura el que las comunidades puedan dotarse de infraestructuras y proveer de servicios generalizados a la población (NNUU 2002)

Resulta lógico pensar que en un futuro inmediato el crecimiento de la ciudad y sus infraestructuras hará que se siga produciendo el máximo de impacto sobre el medio ambiente a través del empleo de materiales y del consumo de materias primas y energía. Seguirá aumentando el número de obras construidas pero, poco a poco, se desarrollarán intentando aproximarse al paradigma de la sostenibilidad, exigiendo más y más durabilidad a lo construido, con el objeto de minimizar el impacto ambiental. Algunos proyectos incorporarán

la voluntad de convertirse en obras trascendentes de arquitectura, infraestructuras o monumentos que quedarán como patrimonio cultural de cada generación para las siguientes.

### **Sostenibilidad**

El concepto de sostenibilidad tiene, como punto de partida, una interpretación económica. Se puede gestionar un negocio de manera sostenible si las condiciones permiten que la explotación se prolongue indefinidamente en el tiempo. Siguiendo el ejemplo propuesto por González Bernáldez (1973) una explotación minera es conceptualmente insostenible más allá del agotamiento del depósito; un bosque puede ser explotado de manera sostenible si se plantea su beneficio a la manera de una explotación agrícola, valorando cuanta madera se produce por año y retirando solo una cantidad, como máximo igual a la producida, seleccionando para el corte los árboles más viejos o de crecimiento más lento. Alternativamente el mismo bosque podría explotarse con "tecnología minera", es decir de modo no sostenible: esa explotación consistiría en retirar indiscriminadamente la totalidad de la madera existente, arrasando la plantación de uno a otro extremo como si se tratase de una veta mineral y sólo con criterios que dependan del mercado.

Se ha aplicado el concepto de sostenibilidad para caracterizar un tipo de desarrollo. El *desarrollo sostenible*, expresión felizmente popularizada como consecuencia de su recomendación en el informe Brundlant, constituye una referencia importante ya que ha sido aplicado para marcar pautas en diversos programas políticos, así como al desarrollo de proyectos de índole muy variada. La unión de los dos conceptos, el sustantivo desarrollo y el adjetivo de sostenible, contiene una contradicción en términos si se considera el contexto en el que apareció dentro del informe mencionado. El estudio de prospectiva producido por el MIT para el Club de Roma a finales de los sesenta ("Los Límites del Desarrollo") venía a demostrar la imposibilidad de generalizar los métodos de producción y de consumo, que practican los países tecnológica y económicamente más desarrollados del planeta, al resto de los llamados eufemísticamente "países en desarrollo". El agotamiento de materias primas y la incapacidad del ecosistema terrestre de recuperarse de las heridas que producen las tecnologías generadoras de grandes impactos, permitió anunciar una situación crítica a la que desde hace tiempo ya se debería haber hecho frente. Un segundo informe realizado para el

mismo Club cuatro decenios después, estudiando el deterioro ambiental mundial sobrevenido en ese tiempo, vino lamentablemente a confirmar los pronósticos más pesimistas.

Para hacer frente a las justas aspiraciones de crecimiento económico de los grupos humanos más pobres del planeta se adoptó el nuevo paradigma del desarrollo sostenible, y su aplicación a las economías de los países más pobres como "crecimiento sostenible". Sobre la interpretación de esas expresiones existen muchos matices pero en todo caso constituyen un "objetivo utópico" más que una verdadera metodología de actuación. En rigor, desarrollo y crecimiento no son la misma cosa. Eso debería ser aceptado por las sociedades más opulentas del planeta que pueden legítimamente aspirar a hacer posible y *sustentable el desarrollo* de sus economías; mientras que los países más pobres *necesitan crecer* de modo sostenible para alcanzar las condiciones en las que la vida humana pueda discurrir hacia la consecución y el disfrute de los derechos humanos fundamentales. El desarrollo igualitario universal no sería justo y el crecimiento de todas las economías no es posible.

La característica de sostenible aplicada a la construcción resulta cuanto menos difícil de interpretar. Podemos hablar de "construcción sostenible" refiriéndonos al *hecho-de-construir* -la actividad- o, alternativamente, refiriéndonos a la *obra construida -objeto*. La sostenibilidad no es una propiedad categórica ("sí o no sostenible") ni una característica parametrizable ("el valor de la sostenibilidad es X"). En la construcción resulta difícil establecer una analogía con la explotación sostenible de un bosque, al que nos hemos referido anteriormente. El hecho de construir representa un consumo de materias primas y energía y un uso de territorio en donde se implanta la obra. La sostenibilidad en términos absolutos solamente sería posible en tanto la construcción solamente utilizase recursos energéticos renovables, materiales igualmente renovables -o, en su defecto materiales procedentes de residuos de actividades precedentes- y una utilización del espacio (suelo) que no lo hipotecase para siempre irreversiblemente. Como esa situación es un objetivo utópico ideal, será necesario interpretar la sostenibilidad de la construcción como lo hacen diversos autores, en una aproximación que haga referencia a ese objetivo ideal. Se ha usado el concepto de "construcción sostenible" (Hendriks, 2001 Huren & col, 02) para caracterizar *la construcción que incorpora los criterios medioambientales en la concepción del proyecto, en la manera de construir, mantener y, llegado el momento, deconstruir las obras*. La construcción sostenible es la contribución que puede hacer la industria de la construcción al desarrollo sostenible (Uren & col 2000).

El empleo de residuos es una de las maneras de integrar a la industria de la construcción en los planteamientos de sostenibilidad. Kumar Metha (2001) citando a Hawken señala que solamente el 6 % del flujo de las materias primas usadas por el hombre –unos 500.000 millones de toneladas cada año- se convierten en productos aprovechables; el resto vuelve a la naturaleza pero convertido en residuos peligrosos o molestos que perjudican al medio ambiente. La construcción es la responsable del 7 % de las emisiones globales de CO<sub>2</sub> las cuales en gran medida (1 Kg de CO<sub>2</sub> por cada Kg. de cemento producido) son debidas a la producción del conglomerante más empleado, del que se espera consumir 2.000 millones de toneladas anuales en el presente decenio. Así pues, siguiendo al autor referenciado, la forma más eficiente de acercar la construcción a la sostenibilidad es: a) la de reutilizar residuos procedentes de otras actividades industriales y b) alargar la vida útil de las obras. Las dos formas no solo no son contradictorias sino que en la actualidad sabemos que la utilización de cenizas volantes de central térmica y las escorias siderúrgicas como sustitución de cemento en hormigones parece ser la alternativa más ventajosa que puede satisfacer los dos propósitos.

El Consejo Mundial de Comercio para el Desarrollo sostenible (WBCDS) ha promovido una iniciativa con WWF y diez empresas cementeras, entre ellas Lafargue, Holcim, Italcementi, Cemex, Cimpor y RCM, consistente en la adopción de una “Agenda de Acción para el Desarrollo Sostenible”, dentro de una iniciativa para la Sostenibilidad del Cemento. Se pretende mejorar la gestión ambiental de esa producción, reduciendo el efecto invernadero, las emisiones de volátiles, y la utilización conjunta de indicadores específicos para la actividad. (Infocer, 2002). Lo cierto es que la utilización de residuos en la construcción constituye no solamente una respuesta racional en la mejora de la gestión ambiental de la actividad industrial, sino también una necesidad, como se tiene asumido en buena parte de la industria de la construcción de algunos países como Holanda y Japón -que carecen virtualmente de materias primas- sino una fuente de beneficios económicos directos (Barker, 2000)

Mulder (2000) describe la reutilización de escombros de hormigón mediante previo tratamiento térmico, en la fabricación de cementos y hormigones de alta calidad. Más que por razones morales de búsqueda de la sostenibilidad, por estrictas razones económicas las dos partes en que quedó dividida Alemania utilizaron los escombros de construcción en la reconstrucción de sus ciudades arrasadas por la guerra. La oportunidad de aprovechar

escombros de construcción en nuevas edificaciones también fue aprovechada en Barcelona con motivo de las obras realizadas en 1992 para la Ciudad Olímpica y otras, de lo que se obtuvo importantes "casos de estudio" muy bien aprovechados por los Prfs. Vazquez Ramonich (1997) y J. M. Gómez Soberón (2001)

### **Durabilidad**

Es la característica de los objetos o materiales que mantienen sus propiedades durante tiempo prolongado de servicio. La durabilidad tiene su final cuando el objeto o material ha de ser sustituido o reemplazado por otro, o, en su caso, finiquitado el uso que se hacía hasta ese momento del material o de la obra de que éste forma parte. Un material u objeto durable es útil durante más tiempo que otro que lo es menos. En lo que respecta a la construcción, si aumentáramos la durabilidad de las obras de hormigón de 50 a 500 años, el factor 10 sería una medida de la reducción del impacto ambiental de dichas obras (Metha, 2001) en la medida en que sería innecesario reproducir la actividad productora del impacto cada vez que es necesario reconstruir la obra.

La calidad de una construcción es una medida de cómo la obra reúne los requerimientos exigidos y definidos en su proyecto; el parámetro de "durabilidad" -que, al contrario de lo que sucedía con la sostenibilidad sí que es una magnitud medible- es el principal indicador que permite describir la aptitud para mantener esa calidad en la medida de que materiales y conjunto cumplen con dichos requerimientos (Caffi & Rejna, 2000). El planteamiento de un buen programa de mantenimiento de una obra debe ser concebido desde el inicio mismo del proyecto. Cuanto mayor es la durabilidad del material menor tiempo y recursos requiere su mantenimiento.

Las estructuras de hormigón son construidas para dar servicio durante un periodo de tiempo limitado y previstas, en su caso, las necesidades de mantenimiento. La vida útil de algunos bienes como automóviles, máquinas diversas y en la actualidad equipos informáticos o de alta tecnología, es un concepto generalmente bien asumido y a lo largo de la vida útil la mayoría de los artefactos han sido concebidos pensando en que recibirán un adecuado programa de mantenimiento. En la construcción no estamos seguros de que las cosas suceden siempre de igual manera. Hognestad (ACIComp.24) describe un ejemplo en el que la vida útil de una

construcción tuvo que ser especialmente garantizada por tratarse de una plataforma petrolífera en el Mar del Norte; en ese caso los cálculos fueron realizados para prever la magnitud del deterioro progresivo de los materiales que se consideraba imposible de afrontar. Radomski (2000) hace referencia a las necesidades de reparación de un elevado número de estructuras (puentes sobre todo) construidos en Polonia pero, cuando se refiere a las intervenciones realizadas para el mantenimiento, los trabajos a los que alude son más bien tareas de reparación que de estricto mantenimiento.

Es interesante destacar que algunos errores de construcción que han afectado a las obras han sido más sencillos de remediar cuando la utilización de los materiales de baja durabilidad ha sido realizada en partes modulares de las construcciones. Así, por ejemplo, los problemas de aluminosis que aparecieron en España hace dos décadas pudieron ser mejor resueltos en aquellos casos en los que el material afectaba a partes modulares –sustituibles, por tanto- de las obras (prefabricados de cemento) que, pudieron ser sustituidas.

### **Ciclo de vida**

De acuerdo con la Norma USO-UNE- 14.040 se llama Análisis de Ciclo de vida a: las *“Etapas consecutivas e interrelacionadas del sistema del producto desde la adquisición de materias primas o generación de recursos naturales hasta su eliminación final”*.

El análisis del Ciclo de Vida (Life Cycle Assessment, LCA) que es, según la misma Norma : *Recopilación y evaluación de las entradas y salidas y de los potenciales impactos medioambientales del sistema del producto a lo largo de su ciclo de vida”* permite conocer los efectos ambientales de una obra o producto. En el LCA debe ser tenido en cuenta tanto los efectos ambientales de la construcción, la vida de servicio y la deconstrucción; en su caso teniendo en cuenta las posibilidades de utilización repetida (por ejemplo envases), el reciclado o la recuperación de los materiales o energía. Por lo señalado unos párrafos más arriba, un aspecto importante, que debería ser considerado en el análisis del ciclo de vida de las obras, es el que corresponde a la necesidad de mantenimiento. Con frecuencia en construcción se sustituye la previsión de la necesidad de mantenimiento (prevención) por la actuación remediadora (reparación, restauración, reconstrucción) que hace frente a los deterioros que ponen en peligro la obra o alguna de las prestaciones que la obra proporciona.

La metodología del Análisis del "Ciclo de Vida" (LCA) que desde hace tiempo se viene aplicando para valorar el impacto ambiental de los productos industriales (ISO 14.040) tiene también sentido en la construcción y puede ser aplicado a las obras civiles y a la arquitectura (Yokoyama & Oka, 2000, 02; Kibert & col 2000). El impacto ambiental de las obras debe ser evaluado "desde la cuna" considerando conceptos de partida como la EIA del proyecto global e incluyendo en su caso las evaluaciones estratégicas previas a que hubiera lugar, el uso del suelo y la alteración del paisaje, la selección de materiales y su impacto, etc. El LCA debe estudiar el ciclo de vida útil de la obra en servicio y los efectos ambientales derivados de las tareas de mantenimiento; agotada la vida útil se debe analizar los efectos ambientales de su abandono o deconstrucción en cuyo proceso los materiales pueden ser total o parcialmente reutilizados si se aplican las tecnologías de deconstrucción adecuadas (ITEC, 98; Mulder, 2000). Aquí reside una de las principales claves de la sostenibilidad, pues la gestión de los materiales de recuperación (reducción, reutilización, recuperación etc.) libera los materiales que "temporalmente" han formado parte de la obra, pero que en su recuperabilidad confieren al proceso –por muy largo que éste haya sido– el carácter de realmente sostenible, al ofrecer a las futuras generaciones la devolución de los recursos naturales finitos. En el LCA debe considerarse la posible irreversibilidad de los impactos ambientales valorando, si ha lugar, la capacidad de recuperación del entorno. El LCA no debe olvidar –el proyectista de la obra tampoco– la necesidad de esfuerzo que representarán las tareas de mantenimiento de la obra o proyecto y que en ocasiones comprometen en gran medida a las generaciones venideras, sobre todo cuando resulta comprometedor no mantener las instalaciones en buen uso. Sean las razones funcionales o estéticas algunas obras son concebidas con vocación de trascendencia.

### **Trascendencia**

Ocasionalmente el arquitecto o el ingeniero civil abordan proyectos que intrínsecamente poseen una "vocación trascendente", es decir superar con su ciclo de vida útil el tiempo que corresponde a varias generaciones o a varios siglos. La historia humana se ha podido escribir, en parte, analizando los restos de instrumentos y construcciones que cuando fueron inventadas solo perseguían objetivos utilitarios, junto a otros restos de obras que conscientemente fueron concebidas para dejar señales –casi siempre firmadas por el autor o su cliente– para la posteridad. Entre las construcciones más antiguas del planeta tierra figuran los monumentos funerarios –o religiosos en general– que, por su propio carácter, fueron

concebidos para permanecer “en uso” eternamente. Monolitos, mastabas y pirámides dan fe de la preocupación de construir para durar de nuestros antepasados ilustres y de los ingenieros y arquitectos que trabajaban para ellos. Algunas obras más utilitarias también han llegado hasta nosotros sin que, seguramente, en su proyecto se aspirase a perdurar: silos, almacenes construcciones industriales o canalizaciones para la agricultura, la industria, la pesca o el esparcimiento.

Nos podríamos preguntar cuales fueron los criterios que los antiguos ingenieros y arquitectos tuvieron en consideración para abordar el diseño, la elección de materiales y los procesos (el proyecto en fin) de las obras trascendentes en relación con las obras utilitarias y, en todo caso, por que razón algunas obras utilitarias han llegado a convertirse en trascendentes.

Nuestra cultura es un fenómeno urbano. En la configuración del pensamiento de los hombres, en su educación y sistema de valores, el entorno urbano constituye lo que podríamos llamar un marco de referencia interactivo. Se es lo que ha ayudado a configurar la historia personal de cada hombre y cada colectivo humano. Y esa historia se construye sobre todo –en la mayoría de los ciudadanos- en un entorno urbano; así pues las obras y las infraestructuras que vemos, en las que vivimos, dan forma a nuestro pensamiento. Las ciudades tienen –o carecen de- personalidad no solo por sus monumentos singulares, sino también por sus infraestructuras, la forma de sus habitaciones y la manera en que los urbanitas hacen uso de la calle. Las ciudades medievales –plazas, mercados, burgos- europeos tienen un carácter diferente del de las poblaciones ordenadas en procesos de colonización planificada; el crecimiento urbano de las ciudades mediterráneas se adapta más a la forma de un organismo biológico mientras que la forma más racional –casi cristalina, inorgánica- es la que adoptaban muchas veces los cartógrafos militares o los colonos del nuevo mundo.

El ingeniero o arquitecto diseñan sus obras para dar solución a los problemas de construcción de habitación o infraestructuras; a veces construyendo obras que por su naturaleza son perdurables en el tiempo y pasan a formar parte del patrimonio de la generación en que se construye y de las siguientes. Algunas de esas obras son creadas con decidida vocación de trascendencia y el que las diseña asume una responsabilidad especial al comprometer en su obra a personas de futuras generaciones con las que no va a convivir. Un caso especialmente delicado en lo que representa la vocación de trascendencia lo constituyen los depósitos de residuos peligrosos que seguirán presentando peligrosidad pasados muchos años. Los

depósitos de alta seguridad para residuos radiactivos comprometen inversiones y exigirán en el futuro recursos que no es posible prever con precisión desde nuestros días.

Muchas de las construcciones que hoy consideramos patrimoniales fueron, en todo caso, diseñadas en su momento con vocación a la vez trascendente y funcional. Tanto una vía, un acueducto o un monumento funerario son, cuando se conciben, obras que van a dar un servicio práctico, con independencia de que se espere de ellas recoger los beneficios de su uso a corto o largos plazo.

Si para construir obras con vocación trascendente son utilizados los mismos materiales que para las construcciones simplemente funcionales las posibilidades de éxito pueden verse frustradas y eso resulta especialmente delicado en el caso del hormigón. Aunque en la actualidad existen en el mundo muchas construcciones de hormigón que tienen entre 50 y 90 años de antigüedad (Metha, 2000). Mehta & Langley (2000) presentan un interesante – excepcional- caso de una obra en la que se exige una durabilidad mínima de 1000 años. Se trata de un templo Hindú que ha sido construido en Kauai, en Haway, y cuya base de cimentación está formada, entre otros materiales, por una losa de hormigón en masa –sin armaduras- de unos 380 m<sup>3</sup>.

La mayoría de las construcciones de hormigón que han sido construidas hasta nuestros días no han tenido, ni se espera de ellas, una vida de servicio superior a los cien años. El hormigón posee un ciclo de vida que se ve limitado como consecuencia de los conocidos factores interrelacionados de deterioro: fisuraciones por retracciones térmicas o de secado, efecto hielo/deshielo, carbonatación/corrosión de armaduras, ataque químico ambiental, reacción árido álcali o erosión mecánica de diverso tipo. Resulta aparentemente contradictoria la circunstancia de que hasta nuestros días han llegado diversas construcciones que constituyen nuestro importante patrimonio cultural y han sido construidas con materiales muy modestos, de los que no se espera gran durabilidad pero que permiten una reparación sencilla. Obras construidas con materiales tan simples como el adobe y el tapial se mantienen en pie desde hace varios milenios, como sucede por ejemplo en las construcciones de Agar-Guf en Oriente Medio (S.XIV a.C.) (Dethier1986) o las murallas que rodean el templo de Orús en Edfú (Egipto) . Otras, han sido construidas con un hormigón muy primitivo, pero meticulosamente fabricado, constituyen referencias tan importantes como el Coliseo Romano (S.II dC) o Santa Sofía (S.IV d.C). Las obras de la antigüedad construidas directamente con piedra natural son

abundantes y en ellas prolongar su durabilidad para conservar el valor patrimonial no resulta difícil.

El hormigón es un material medioambientalmente amigable para construir enormes infraestructuras (Malhotra, 2002) pese a los impactos ambientales que genera la producción de los materiales con los que se produce. Aumentar la durabilidad del hormigón que se construye en la actualidad sería sencillo aplicando algunos de los procedimientos que usaron nuestros antepasados, por ejemplo reduciendo el agua de amasado o usando muy racionalmente las sustitución de parte del cemento por cenizas.(Payá y col, 1995; 1996; 1995). Probablemente la puesta en obra de los hormigones romanos aplicase las fatigosas pero eficaces maneras de compactar apisonando la mezcla, procedimiento que invariablemente se usa desde hace milenios en la construcción de tapial en donde no se utiliza más conglomerante que el que proporciona las propiedades cohesivas de las arcillas.

### Conclusiones

La construcción moderna exige a los ingenieros y arquitectos la asunción de ciertos riesgos que pueden, en un futuro de pocas generaciones, desencadenar deterioros de construcciones en las que nuestra generación compromete frente a las futuras su imagen cultural, científica y tecnológica. Obras realizadas con hormigón de grandes esbelteces, con unas secciones de armaduras que se alejan de lo que conceptualmente es *hormigón armado* para convertirse en "*acero revestido*" tienen asegurada –según los conocimientos actuales- una durabilidad limitada que solo permitirá su reparación si la obra ha sido concebida pensando en que en su día deberá ser reparada y previendo cual será la reparación. Así mismo, el empleo de materiales especiales sobre los que no se dispone de memoria histórica como el cemento blanco en hormigón armado masivo o el titanio para cubiertas en atmósferas con contaminación industrial puede provocar pérdidas de calidad en las obras que habrían sido evitadas si se incorpora al proyecto el mejor conocimiento científico disponible.

La posibilidad de construir para las futuras generaciones exige en definitiva tener en cuenta que en las obras funcionales es preciso aceptar que la durabilidad es limitada. La durabilidad de los hormigones armados se amplía cada vez más; el hormigón armado utilizado para el eurotúnel ha sido diseñado previendo una vida útil de 120 años (Metha, 2000) pero es de

esperar que el propio túnel sea más duradero. Esto nos sugiere la idea de que es preciso considerar por separado lo que constituye la durabilidad de las obras y la durabilidad de los materiales con que están construidas. Para esa discusión proponemos las siguientes consideraciones:

- a) Algunos materiales pueden ser considerados *permanentes* si, en condiciones de agresividad ambiental media resultan indefinidamente estables, como es el caso de algunos tipos de piedra natural. Las obras construidas solo con esa piedra pueden tener el carácter de trascendentes.
- b) Las construcciones con materiales *no permanentes* también pueden prolongar su ciclo de vida a varias generaciones si esos materiales admiten mantenimiento y/o reparación que al ser llevada a cabo no modifique destructivamente al conjunto de obra. Esa exigencia obliga a que la construcción haya sido concebida con carácter "modular", es decir permitiendo la intervención –reparación, sustitución, en su caso- en una parte de su estructura sin que se vea destruida la totalidad del conjunto.
- c) En ocasiones se utilizan materiales sobre los que existen dudas razonables sobre su durabilidad. Así, por ejemplo, el hormigón con armaduras no permite con los conocimientos disponibles en la actualidad, superar un tiempo cuyo orden de magnitud se encuentra en torno a un siglo. El hormigón en masa con cementos modernos no tiene esa limitación si bien los sistemas de fabricación y puesta en obra y la dosificación de los componentes exige cuidados especiales. Incluso la tierra cruda, ese material universal de utilización milenaria, ha permitido y permite mantener en pie durante milenios algunas construcciones.
- d) Tanto para la construcción de obras con vocación trascendente como para intervenciones en torno a las mismas, el empleo de materiales cuya durabilidad es limitada, como el hormigón armado, debería realizarse siempre contando con la posibilidad de abordar en el futuro reparaciones modulares que no afecten a la totalidad de la obra. Por ejemplo, la bóveda artificial en la que se ha instalado la nueva ubicación del templo de Abbu Simbel, en Egipto ha sido construida con hormigón armado. Ese material tendrá, muy posiblemente, una vida larga, pero en ningún caso del orden de magnitud de la del monumento que alberga.

## Bibliografía

Barker, L. 2000. Sustainable Construction Practiques. Sustainable Building 2000 & Green Building Challenge 2000. Maastricht NL. Aeneas Technical Publishers.

Cafi, V.; Rejna, M.G. 2000. DISET. Politecnico de Milano. Maintenance design and scheduling to support Sustainable Construction. Sustainable Building 2000 & Green Building Challenge 2000.

Cassar, J. 2002. The materials used in the 19th and 20thcentury plasters: from lime and gypsum to Pórtland Cement. Essay. Culture 200 European Union.  
<http://www.plasterarc.net/essay/joa.html>

Dethier, J.. 1986. Arquitectures de Terre. Editions del Centre Pompidou. Paris

Gómez Soberón, J.M.; Vázquez Ramonich, E.; Agulló Fité.L. 2001. Hormigón con Áridos Reciclados. Una Guía de Diseño para el Material. Monografía Centro Internacional Métodos Numéricos en Ingeniería nº 60. Mayo 2001- ISBN: 84-89925-80-1. Barcelona

González Bernáldez, F. (1973) El impacto ambiental del femnómento turístico. Curso de doctorado, Universidad de Sevilla.

Hendriks, Ch.F. Durable and Sustainable Construction Materials. AENEAS. NL. 2000

Hognestad, Eivind. (ACI 24). Design Considerations for Service Life. Durable Concrete American Concrete Institute. ACI Compilation nº 24

INFOCER, 2002. Instituto para la Sostenibilidad de los Recursos. España. Boletín 24/07/2002

ITEC. 1998 Proyecto LIFE: Minimización y Gestión de Residuos de la Construcción. Programa LIFE. Dirección General de Medio Ambiente. DGXI EU.

Kibert, Ch.J. 2000. Construction Ecology and Metabolism. Sustainable Building 2000 & Green Building Challenge 2000. Ibd.

Mehta, P.K. 2000. Durability of Concrete: Fifty Years of Progress. Fifth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete. Supplementary papers. pp. 2-31

Mehta, P.K. & Langley, S. Langley 2000. Monolithic Foundation: Built to Last a "1000 Years". Concrete International. July 2000. pp.2732

Mehta, P.K. 2001. Reducing the Environmental Impact of Concrete. Concrete can be durable and environmentally friendly. Concrete International. Oct. 2001. Vol. 23, N° 10

Mehta, P.K. 2002. Reducing the Environmental Impact of Concrete. Concrete International. Vol 23, N° 10, Oct. 2001. pp. 61-66

Mehta, P.K. 2002. Greening of the Concrete Industry for Sustainable Development. Concrete International. Vol 24, N° 7 pp. 23-28.

Malhotra, V.M. 2002. Sustainable Development and Concrete Technology, Concrete International. Vol 24, N° 7 pp 22.

Mulder, Evert 2000 TNO Netherland. To close Material Cycles for Concrete and Masonry in Construction. Sustainable Building 2000 & Green Building Challenge 2000.

NNUU. Summit 2002. CONFERENCE DE PRESSE SUR L'URBANISATION DURABLE. Sommet mondial pour le développement durable. Département de l'information - Division de l'information et des médias - New York. Johannesburg, Afrique du Sud. 26 août-4 septembre 2002.

O'Meara Sheehan, M. 2002. Desde Rio a Johannesburgo. Gobernanza urbana- Pensar globalmente, Actuar Localmente World Watch Institute, World Summit Policy Briefs, 29 Agosto 2002.

ONMN (Oasi Naturalistica di Monte Nuovo) Il Territorio di Tripergole dall'antichità ad Oggi. 2002. <http://www.tightrope.it/monten/storia.htm>

Peris Mora, E. 1992. Temas de Química: Atmósfera y su Contaminación. Serv. Pub. Universidad Politécnica de Valencia. ISBN 84.7721-171-X

Payá, J.; Monzó, J.; Peris Mora, E.; Borrachero, MV.; Pinillos, C.; Tercero, C. 1995. Early-Strength Development of Portland Cement Mortars Containing Air-Classified Fly Ashes. Cement and Concrete Research. Vol. 25, pp. 449-456

Payá, J.; Monzó, J.; Borrachero, MV.; Peris-Mora, E. 1996. Comparisons Among Magnetic and Non-magnetic Fly Ash Fractions: Strength Development of Cement-Fly Ash Mortars. Waste Management. Vol. 16, pp. 119-124

Payá, J.; Monzó, J.; Borrachero, MV.; Peris-Mora, E.; González-López, E. 1997. Mechanical Treatment of Fly Ashes. Part III: Studies on Strength Development of Ground Fly Ashes (GFA)-Cement Mortars. Cement and Concrete Research, Vol. 27, pp. 1365-1377

Shimoda, Y., Minuzo, M. 2000. Material and Energy Metabolism in Urban Area. Sustainable Building 2000. Ibd.

UPC (Universitat Politècnica de Catalunya). 1999. Informe MIES. Una aproximación al Impacto Ambiental de la Escuela de Arquitectura del Vallés. Pub. UPC. Generalitat Catalunya

Uren, Sally; Brown, Andrew; Gooch, Fiona, Sustainable Construction in Practice. Sustainable Building 2000. Ibd

Vázquez, E., Luxan, M.P., Barra, M. 1997. Los materiales secundarios de la demolición de estructuras y su reutilización. Demolición y Reutilización de Estructuras de Hormigón. pp 101-116, Ed. Col.Ing.de C.C.P. Madrid

Yokohama, K., Oka, T. XXXX. Energy/Carbon Intensities of Building Materials and Life Cycle Assessment of SI (Skeleton/Infill) Housing. Sustainable Building 2000 & Green Building Challenge 2000. Ibd.



## INICIATIVAS EUROPEAS PARA LA CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE

Pere Alavedra, Dr. Ingeniero Industrial, Profesor Titular, Departamento de Ingeniería de la Construcción, Universitat Politècnica de Catalunya

### *Resumen*

El concepto sostenible ha entrado con fuerza en la cultura humana y la construcción no es un entorno aislado por ello en la Conferencia de Tampa de 1994 se definió el concepto de Construcción Sostenible y a lo largo de los siguientes años diversos programas de la Unión Europea han impulsado la aplicación de la Sostenibilidad al sector de la construcción. En este trabajo se presentan algunas de las iniciativas europeas en el sector de la construcción se han hecho especial énfasis a aquellas que inciden en los apartados social e institucional del concepto Sostenible. Las acciones desarrolladas son las siguientes: BEQUEST, PRESCO, CRISP, SUREURO, HQE<sup>2</sup>R, en ellas se observa como va incidiendo con fuerza los aspectos sociales del concepto sostenible.

La acción BEQUEST es un primer intento de definición del concepto Sostenible aplicada al entorno Urbano, que se va concretando con la acción PRESCO que se centra en los nuevos edificios y los temas medioambientales, la acción CRISP se centra en las nuevas acciones en el entorno urbano ya sean desde un aspecto del urbanismo o de la edificación haciendo especial incidencia en los aspectos medioambientales con ciertos apuntes en los aspectos sociales y económicos, las dos acciones siguientes hacen especialmente hincapié en la rehabilitación y en los aspectos sociales y económicos, SUREURO, se centra en la edificación y HQE<sup>2</sup>R en el urbanismo

### *El concepto de sostenibilidad*

El termino Sostenible no es la eclosión de un momento sino que es la culminación de un proceso de maduración y análisis colectivo que nace en las reflexiones del club de Roma, y va haciendo camino a lo largo de los años setenta a través de hitos importantes como es la conferencia d'Estocolmo de 1972 y finalmente en el año 1987 llega en el marco de la conferencia mundial sobre el Medio Ambiente el informe Brundtland con el titulo "Nuestro Futuro Común" en el que se define lo que es el desarrollo sostenible como: *"Aquel desarrollo que permite atender las necesidades del mundo actual sin despilfarrar los recursos de las generaciones futuras"*

Si se analiza el concepto se puede apreciar que estamos delante de un concepto fuerte como lo fueron:

- En el siglo XVIII los conceptos de Libertad, Igualdad, y Fraternidad, que surgieron en la revolución Francesa y que impregnaron toda la revolución social, industrial y económica del siglo XIX.
- O los conceptos derivados de las teorías de Marx, que nacidas en el siglo XIX impregnaron todo el siglo XX

Hoy aquellos conceptos desnudos de las visiones mas o menos utópicas, una vez consolidadas y asentadas en la realidad cotidiana, vemos que los mismos se han integrado y formen parte del bagaje cultural de la civilización actual.

De igual forma el concepto Sostenible nacido al final del siglo XX formara parte del bagaje cultural del ciudadano del siglo XXI.

El problema que se presenta de forma acuciante es como se hace visible y creíble este concepto al Ciudadano Europeo del siglo XXI dicho de otra forma ¿cómo se puede poner en practica el Concepto de la Sostenibilidad en las Ciudades Europeas del siglo XXI ?.

El concepto Sostenible no puede ser una palabra alejada de la realidad social del mundo occidental, siendo necesario que los ciudadanos de los países Europeos lo entiendan como algo propio, actualmente junto a una minoría muy concienciada una amplia mayoría de los

ciudadanos de la Vieja Europa lo entienden como algo vinculado a los países en vías de desarrollo, o al medio ambiente ya sea por cosas como *"El cambio climático, la protección de la Selva del Amazonas o la protección de la Biodiversidad"*, todas ellas cosas muy importantes; Pero muy alejadas de los problemas cotidianos de nuestros conciudadanos de las ciudades del primer mundo.

Dado que el concepto Sostenible no puede ser un concepto utópico alejado del Ciudadano, sino que ha de ser una herramienta que permita mejorar la calidad de vida de todos los Ciudadanos y el que es más importante que lo perciban en este sentido.

Por ello es necesario abrir una vía de Dialogo en las ciudades del primer mundo, de forma que seamos capaces de explicar a nuestros conciudadanos que la sostenibilidad esta directamente ligada a la cualidad de vida.

De esta forma ninguno de los cuatro pilares sobre los que se sustenta el Concepto de Desarrollo Sostenible no puede verse disminuida si lo que se quiere es conseguir un clima de convivencia y estabilidad en nuestras Ciudades Europeas.

Se hace necesario trabajar para lograr el progreso de forma conjunta y equilibrada de cada uno de los pilares que forman el concepto Sostenible que son:

- ❑ El respeto al Medio Ambiente
- ❑ El respeto Social
- ❑ El desarrollo Económico
- ❑ La potenciación de las Relaciones Institucionales

### ***Iniciativas de la Unión Europea***

Conforme lo que se ha expuesto anteriormente la Unión Europea ha focalizado una serie de acciones dentro de su sexto programa, que quieren dar respuesta a las demandas de los ciudadanos y que quiere ser continuación de la acción denominada *"El Legado Cultural y La Ciudad del Mañana"* que se ha desarrollado dentro del quinto programa.

Dentro de este programa se han desarrollado 41 proyectos en el entorno de la Gestión de la Ciudad (*Urban Management*). 38 en el entorno del Legado Cultural (*Cultural Heritage*). 13 en el entorno de la

Construcción Sostenible (*Sustainable Built Environment*). 16 proyectos en el entorno del Transporte sostenible

En este entorno vamos a centrarnos en aquellas iniciativas en las que se ha participado ya sea directamente como miembro o indirectamente por la realización de actividades de forma conjunta.

La acción BEQUEST ha sido una de las primeras actividades nació con el cuarto programa y ha sido la fuente que ha dado origen a otras acciones que se han desarrollado dentro del quinto programa.

Se trata de una red internacional desarrollada dentro del cuarto programa para trabajar sobre el desarrollo sostenible en el medio urbano, con la vista puesta en la protección del medio ambiente y de la calidad de vida.

Más información sobre la acción BEQUEST puede obtenerse en :

<http://www.surveying.salford.ac.uk/bqextra/>

La acción PRESCO (*Practical Recommendations for Sustainable Construction*) cuenta con 29 grupos participantes procedentes de 16 países europeos unos de la Unión Europea y los otros de países en trámite de unión.

En dicha acción se han identificado tres actividades principales que son:

La primera actividad principal de la acción está dedicada a la definición de un Código de Buenas Prácticas para la Edificación Sostenible. Para ello se parte de las experiencias realizadas en otros entornos ya sean referidos a un ámbito pequeño o internacional, es decir buscar en primer lugar la compilación de las recomendaciones existentes, para que de forma posterior poder proceder a su integración y definir los ámbitos de aplicabilidad, para ello se han realizado más de 2500 contactos con una red europea de profesionales y usuarios finales.

La segunda actividad se orienta al estudio comparativo de las diferentes herramientas de ayuda para la definición de lo que es un edificio sostenible, esta es una actividad sumamente compleja ya que en dicha verificación se cruzan intereses diversos además de los propiamente científicos.

La tercera actividad se centra en la transferencia de la información no solo a los miembros participantes sino de forma especial como la misma se disemina en toda la comunidad no solo científica sino profesional en el ámbito de la Edificación.

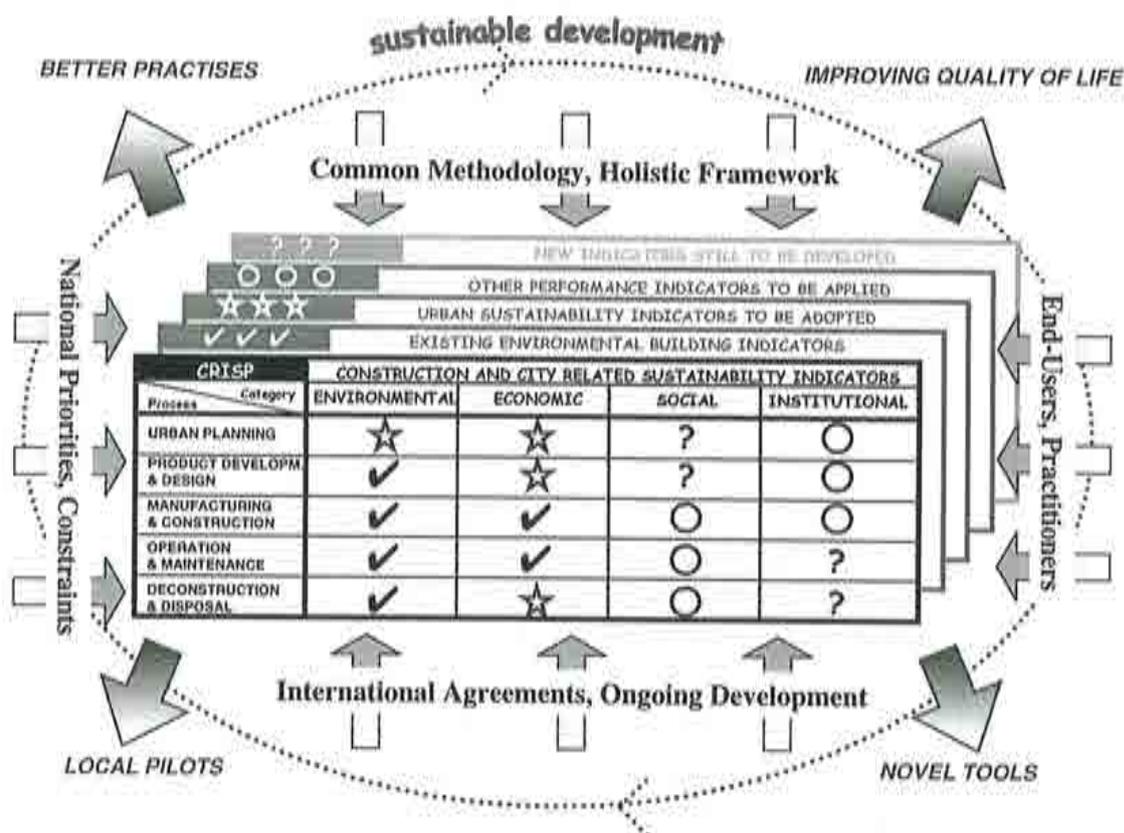
Más información sobre la acción PRESCO puede obtenerse <http://go.to/presco.net>

La acción CRISP (*Construction and city related Sustainability indicators*) es una red temática cuyo principal objetivo es la creación de un grupo dinámico en el campo de los indicadores de Sostenibilidad en la Edificación y el Urbanismo

En dicha acción participan 24 equipos de 16 países europeos unos pertenecientes a la Unión y otros en vías de integración.

La acción CRISP quiere desarrollar una red de indicadores que puedan ayudar a tomar decisiones en el marco de la construcción sostenible. Ya que como se ha indicado en el inicio del presente trabajo se hace muy difícil conjugar los factores económicos, sociales, medio ambientales e institucionales que afectan al entorno construidos en todos sus niveles ya sea en la fase del urbanismo, los materiales de la construcción, o de la edificación.

Como puede verse en el siguiente gráfico:



Para el desarrollo de la acción se ha subdividido el trabajo en cuatro grupos que son los siguientes:

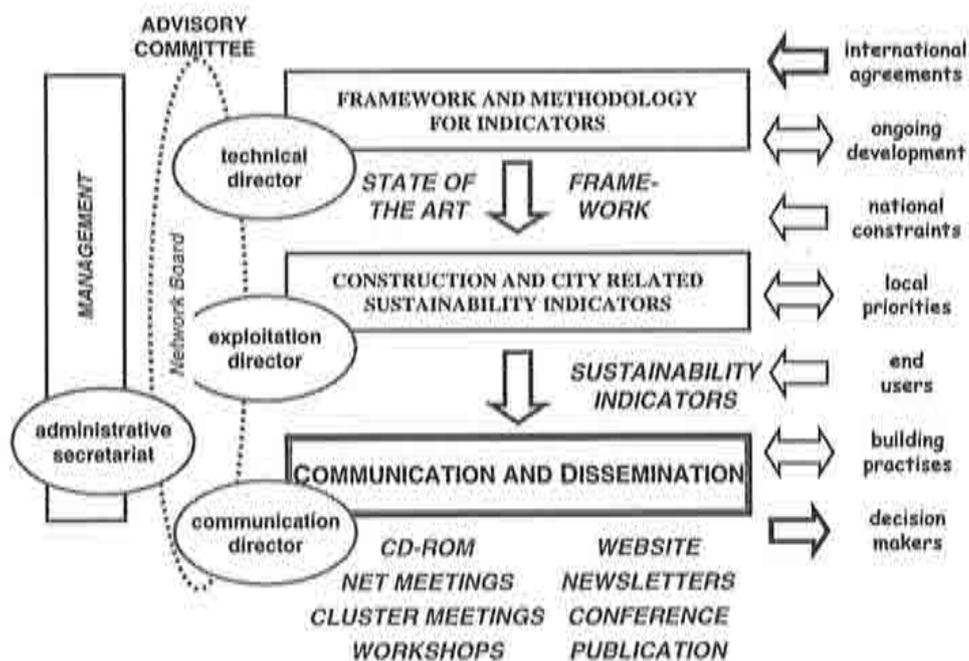
- ❑ Urbanismo
- ❑ Edificación
- ❑ Materiales
- ❑ Proceso Constructivo

Tal como se indica en el siguiente grafico:

CONSTRUCTION AND CITY RELATED SUSTAINABILITY INDICATORS				
CATEGORIES	ENVIRONMENTAL	ECONOMIC	SOCIAL	INSTITUTIONAL
PROCESS				
URBAN PLANNING	URBAN BLOCK CLUSTER			PROCESS/ STRATEGY CLUSTER
PRODUCT DEVELOPMENT & DESIGN	BUILDING CLUSTER			
MANUFACTURING & CONSTRUCTION	PRODUCT CLUSTER			
OPERATION & MAINTENANCE				
DECONSTRUCTION & DISPOSAL				

- CRISP structure with focused expert clusters -

La organización de todas estas acciones es muy semejante a continuación se presenta el organigrama previsto para la acción CRISP.



- CRISP networking process organisation -

Mas información sobre la acción CRISP puede obtenerse <http://crisp.cstb.fr>

Otra acción es la SUREURO (sustainable refurbishment in Europe) que pretende la rehabilitación de forma sostenible de los distritos construidos al finalizar la segunda Guerra mundial se trata de un parque de 56 millones de viviendas en las que viven 170 millones de personas que corresponden a 80.000 distritos o áreas residenciales con los problemas sociales derivados de la no integración de muchos de sus habitantes en el entorno.

Mas información sobre la acción SUREURO puede obtenerse [http:// www. Sureuro.com](http://www.Sureuro.com)

Con la finalidad de incidir de forma más eficiente en el entorno social se ha iniciado una nueva acción denominada HQE<sup>2</sup>R (*Sustainable renovation of buildings for sustainable neighbourhoods*) y tiene como principal objetivo el proporcionar metodologías y herramientas al servicio de las autoridades locales y sus agentes. Para ello se han analizado 15 distritos de 14 ciudades situadas en 7 países europeos.

Es decir se trata de definir las mejores formas para analizar un distrito dentro de una ciudad para luego plantear las acciones prioritarias analizando, los objetivos locales para el desarrollo sostenible, los métodos de diagnostico que le son aplicables, la definición de los problemas, analizando las herramientas disponibles para poder definir un plan de acción que mejore la calidad de vida de los vecinos, la calidad del medio ambiente edificado controlando la movilidad y los costes de la acción a la vez que implicando a los vecinos en la renovación de sus distritos (o Barrios).

Mas información sobre la acción HQE<sup>2</sup>R puede obtenerse <http://hq2er.cstb.fr>

### **Bibliografía**

<http://www.surveying.salford.ac.uk/bqextra/>

<http://go.to/presco.net>

<http://crisp.cstb.fr>

[http:// www. Sureuro.com](http://www.Sureuro.com)

<http://hq2er.cstb.fr>



# **DESARROLLO DE HORMIGONES AUTOCOMPACTABLES DE ALTA RESISTENCIA CON CENIZAS VOLANTES: HACIA UNA TECNOLOGÍA DEL HORMIGÓN MÁS SOSTENIBLE**

Ravindra Gettu, Alejandro Josa, Luis Agulló, Paulo C.C. Gomes y Jesús Izquierdo  
Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona

## **Resumen**

El desarrollo de hormigones autocompactables de alta resistencia que incorporen cenizas volantes contribuye positivamente al desarrollo sostenible de la tecnología del hormigón. El artículo presenta las aportaciones de estos hormigones y detalla una metodología de dosificación para los mismos basada en cuatro etapas en las que se utilizan ensayos simples. Con esta metodología se han obtenido hormigones autocompactables con resistencias a compresión a 90 días del orden de 100 MPa.

## **Introducción**

Cada vez es mayor la concienciación de los diferentes agentes implicados (población, administración, sectores productivos, etc.) sobre el efecto producido en el medio ambiente por todo tipo de actuaciones. Si bien hasta hace unos pocos años parecía que los recursos naturales y la energía disponible eran prácticamente inagotables y que podían emitirse, casi sin límite, todo tipo de contaminantes sólidos, líquidos y gaseosos sin que la naturaleza sufriese cambios apreciables, hoy se tiene constancia de que esto no es ni debe ser así. El efecto invernadero, el agujero en la capa de ozono, la acidificación o la eutrofización, entre otros, son fenómenos indeseables comprobados, que los expertos y también el conjunto de la población conoce. La consecuencia inmediata de esta situación es la necesidad de optimizar en la medida de lo posible el consumo de recursos y, sobre todo, de reducir la contaminación de todo tipo producida, especialmente, por la actividad humana. La presión de la población, por su concienciación en el tema, o, en muchos casos, afortunadamente, la propia iniciativa de los sectores industriales, es un factor importante para ello. Todo ello justifica la necesidad de minimizar el impacto medioambiental producido por cualquier proceso o fabricación de materiales, y que este aspecto esté convirtiéndose en esencial en los criterios utilizados para la

toma de decisiones relativas a los mismos (diseño de instalaciones, infraestructuras, productos, etc.).

Al respecto cabe indicar que, en el caso de procesos, instalaciones o infraestructuras, la evaluación y minimización del impacto negativo producido se está ya generalizando. Respecto a los materiales y productos, se está avanzando, en determinados campos industriales, condicionados con frecuencia por la legislación y la presión social. Sin embargo, en el ámbito de la construcción, pese a su importancia desde el punto de vista económico, la consideración de aspectos medioambientales en el diseño, fabricación y utilización de materiales y productos, está todavía en una fase incipiente.

Esta importancia económica del sector de la construcción puede evaluarse indicando que su cifra de ventas en España en 1998 fue cercana a 70 mil millones de euros, con una aportación al PIB de casi el 7,5% (SEOPAN, 1999), y una población directa ocupada del orden del 10% del total, que podría llegar al 50% si se incluyesen los puestos de trabajo directos e indirectos (Mañà, 1996). Dichas cifras relativas son presumiblemente similares en otros países. Esta importancia económica va acompañada de un significativo impacto en el medio ambiente en sus diferentes vertientes, como pueden ser los casos del consumo de recursos renovables o no renovables o la contaminación del aire y del agua para la fabricación de productos; el consumo de energía tanto para dicha fabricación como para el mantenimiento de infraestructuras; la alteración de ecosistemas en diferentes tipos de obra (por ejemplo, en presas); o la generación de residuos, reciclables o no reciclables, como consecuencia, en buena parte, de la demolición de distintos tipos de obras. Aunque es difícil evaluar estos impactos y su efecto sobre el medio (consumo de recursos, emisión de gases inductores del efecto invernadero o destructores de la capa de ozono, toxicidad humana o medioambiental, etc.), se puede indicar como ejemplos indicativos que la generación de residuos de la construcción fue cercana a 1,5 millones de toneladas en Cataluña en 1995 (Irigoyen y Sanz, 1996), y superior a los 18 millones de toneladas en España en 1991 (Eliás, 1996); que un 40% del total de la producción industrial, del orden del 25% del consumo de madera o más del 15% del consumo de agua en el mundo se dirigen al sector de la construcción (Romano, 1996); o que el 50% de las emisiones que producen el efecto invernadero, proceden del mismo, incluyendo al respecto las derivadas del mantenimiento de edificios (Vilanova, 1996).

Los datos anteriores dan idea de la importancia, tanto económica como desde el punto de vista de impacto medioambiental, del sector de la construcción. Dentro del mismo, una parte importante corresponde a la fabricación y utilización de productos con base cemento (morteros, hormigones), materiales de los que se consumieron más de 1400 millones de toneladas en el mundo en 1995 (de ellas cerca de 60 millones en Sudamérica y de 235 en Europa; Cembureau, 1998), y casi 35 millones en España (COMAC, 1999).

En el contexto de todo lo anterior, este artículo trata sobre el desarrollo de los hormigones autocompactables de alta resistencia con cenizas volantes (HACAR) que contribuyen, sin duda, a que el hormigón minimice su impacto en el medio ambiente y sea más sostenible. También se discute y aplica un procedimiento de dosificación con cuatro etapas basadas en la realización de ensayos simples. Se utilizan cementos, áridos y superplastificantes disponibles localmente, así como cenizas volantes. La autocompactabilidad se evalúa a través de ensayos, en el hormigón fresco, de fluidez, de capacidad para pasar a través de espacios reducidos y de segregación. La resistencia a compresión del hormigón endurecido se ha evaluado a 7, 28 y 91 días para evaluar las resistencias máximas que podían alcanzarse.

### **HACAR con cenizas volantes: un hormigón más sostenible**

Según Mehta (1999), los tres elementos fundamentales que hacen que la tecnología del hormigón sea medioambientalmente aceptable y contribuya a un desarrollo más sostenible son la conservación de materias primas, la mejora de la durabilidad de las estructuras y un planteamiento global (holístico) de la tecnología.

Respecto a la conservación de materias primas, las principales medidas a tomar para reducir el uso de recursos no renovables y el impacto negativo en el medio ambiente son la disminución del consumo de cemento, áridos y agua, conjuntamente con la utilización de residuos y subproductos industriales. En este sentido, Malhotra muestra que el aprovechamiento a través de hormigones con alto contenido de cenizas volantes es una de las aplicaciones con mayor valor añadido para un residuo (Malhotra y Bilodeau, 1999). Obviamente, la prolongación de la vida útil de una estructura retrasa la necesidad de reemplazarla. Esto se puede conseguir mediante el desarrollo de hormigones que sean más duraderos y con mejores prestaciones. Al respecto, el uso de hormigones de alta resistencia

con bajas relaciones agua/cemento (a/c) conduce en general a un mejor comportamiento estructural. Finalmente, un planteamiento global de la tecnología del hormigón debe insistir en la necesidad de considerar todos los aspectos críticos de la fabricación, utilización y uso del material para minimizar las cantidades utilizadas y su impacto medioambiental, a la vez que se optimiza la relación coste/beneficio. El éxito en un planteamiento global depende de la facilidad con que puedan introducirse, aceptarse y utilizarse materiales medioambientalmente aceptables en estructuras. Para ello se ha de promover el uso de estos materiales a través de actividades de formación, investigación, desarrollo de normativa y adaptación de métodos de cálculo y disponiendo de proyectos de muestra.

El desarrollo de hormigones autocompactables de alta resistencia con cenizas volantes contribuye a que la tecnología del hormigón sea más sostenible. La utilización de cenizas volantes reduce el consumo de cemento, de la fracción fina de los áridos y de arena (Khurana y Saccone, 2001), de los que se requieren cantidades importantes en hormigones autocompactables (HAC). Además, la incorporación de cenizas volantes permite evitar la utilización de aditivos químicos para mejorar la viscosidad del hormigón. La baja relación a/c del hormigón conduce a una mayor durabilidad de la estructura, aparte de conferirle una mejor integridad mecánica. Y, lo que es más importante, se evitan en su totalidad eventuales defectos producidos por una vibración inapropiada al compactar el hormigón que, con frecuencia, reducen la durabilidad de la estructura (Okamura et al., 2000). Para aplicar un planteamiento global a la tecnología del HAC, es necesario avanzar simultáneamente en diversas líneas de actuación, como por ejemplo el desarrollo de nuevos procedimientos de ensayo y control de calidad, la modificación de normativas que restringen el uso de cantidades elevadas de cenizas volantes y superplastificante, y la formación de los usuarios. Por otro lado, con el uso de HAC se producen beneficios obvios que son de interés en un sentido amplio como pueden ser la reducción de la contaminación acústica y sus efectos sobre la salud de los operarios que realizan la puesta en obra del material.

### **Metodología de dosificación**

La metodología utilizada para la dosificación de HAC de alta resistencia (HACAR) es una extensión de la planteada por Toralles-Carbonari et al. (1996) para hormigones de alta resistencia con microsilíce, posteriormente modificada por Gomes et al. (2001) para HAC. En

ella se considera al hormigón compuesto por dos fases; por una parte la pasta que proporciona fluidez y cohesión, y por otra el esqueleto granular (de áridos) que proporciona la integridad mecánica. En la Figura 1 se presenta un esquema del procedimiento planteado, en donde  $a/c$ ,  $sp/c$  y  $cv/c$  son, respectivamente, los cocientes entre la dosificación de agua, superplastificante (componente sólido o activo) y de cenizas volantes respecto al peso de cemento.

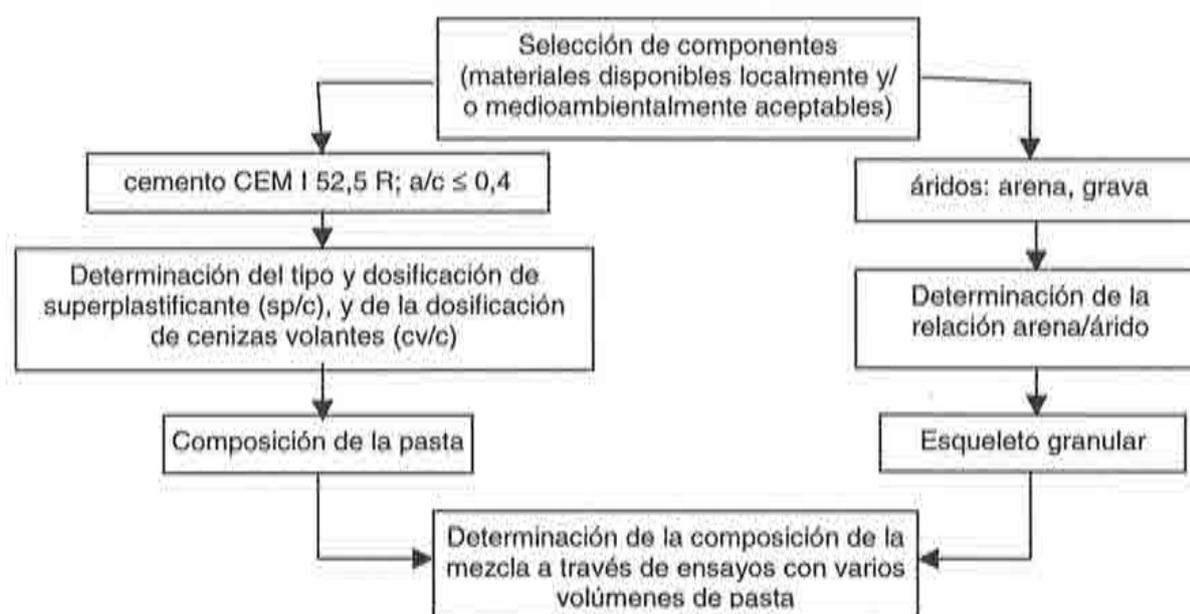


Figura 1. Esquema del procedimiento de determinación de la dosificación

Inicialmente se mantiene la relación  $a/c$  en un valor bajo (por ejemplo,  $a/c \leq 0,4$ ) para asegurar unas altas prestaciones mecánicas y durabilidad; si no se alcanza el nivel de resistencia deseado la relación  $a/c$  se reduce progresivamente a partir de dicho valor. Dentro de la primera etapa se fija el tipo y la dosificación de superplastificante, y en la segunda etapa se optimiza la dosificación de cenizas volantes. En estas dos etapas la optimización se basa en obtener una pasta con alta fluidez y buena cohesión. En la tercera etapa se obtienen las proporciones del esqueleto granular que conduzcan a un contenido de poros mínimo en estado seco y sin compactar. En general se usan arenas y gravas limpias con un tamaño máximo de árido de 10-20 mm. Para esta combinación binaria sólo se ha de determinar la relación arena/grava óptima. En la etapa final se ensayan mezclas de hormigón con volúmenes de pasta variables, todas ellas con la pasta de cemento y la relación arena/grava optimizadas, para determinar la composición del hormigón que presenta autocompactabilidad y alta resistencia a compresión.

### Etapas 1: dosificación del superplastificante

En la primera etapa se usa el cono de Marsh para determinar la dosificación óptima de superplastificante (sp/c). El ensayo consiste en determinar con varias relaciones sp/c el tiempo necesario para que un cierto volumen de pasta fluya a través de dicho cono. Se usa un cono metálico con una apertura de 8 mm, como el de la Figura 2a, en el que se introduce 1 litro de pasta y se mide el tiempo para que fluyan 500 ml. Estos tiempos (tiempos de flujo T) se dibujan en escala logarítmica respecto a la relación sp/c, y la relación sp/c óptima se define como el punto de saturación a partir del cual el tiempo de flujo no decrece significativamente (ver Figura 2b). Para disponer de una definición objetiva, el punto de saturación se toma como la dosificación para la que el ángulo interno en la curva es  $140^{\circ} \pm 10^{\circ}$ . Este procedimiento define el límite práctico de la dosificación de superplastificante en términos de fluidez de la pasta (Toralles-Carbonari et al., 1996; Agulló et al., 1999; Gomes et al., 2001). También se puede usar para comparar la efectividad de diferentes superplastificantes cuando se dispone de más de uno.

Como en la primera etapa se desconoce la dosificación de cenizas volantes, los ensayos se repiten para varias dosificaciones de las mismas; por ejemplo, pueden llevarse a cabo ensayos en un rango razonable de la relación cv/c y con incrementos de 0,1.

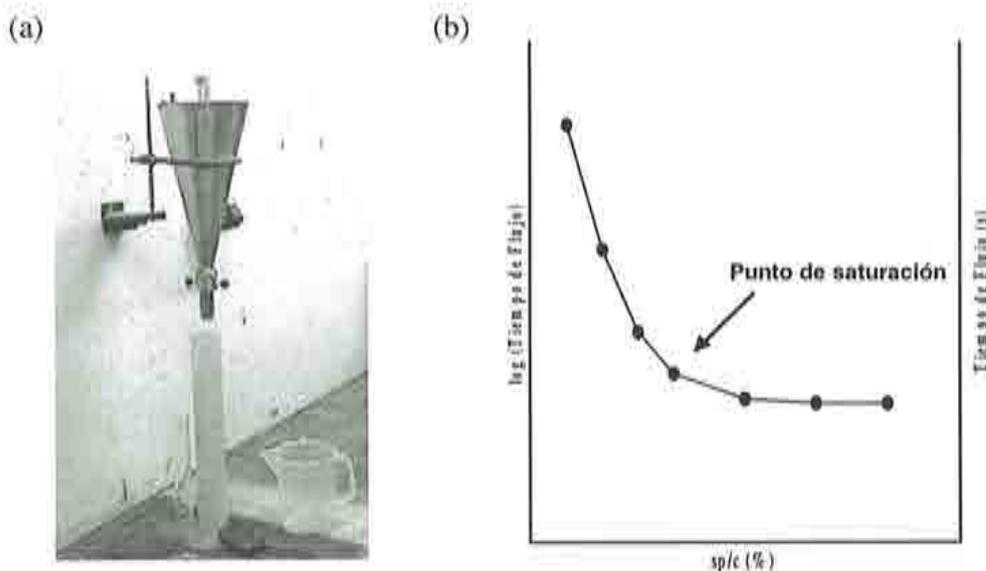


Figura 2. Determinación de la dosificación óptima de superplastificante

### Etapa 2: dosificación de cenizas volantes

En la segunda etapa se utiliza el ensayo de mini-slump para determinar la dosificación óptima de cenizas volantes y, consecuentemente, la composición de la pasta con la relación a/c adoptada. En dicho ensayo se rellena con pasta el molde con forma de cono truncado mostrado en la Figura 3. Tras llenarlo se levanta el molde y se deja que la pasta fluya sobre la plataforma de base. Se mide el diámetro de la superficie de pasta sobre la plataforma y el tiempo transcurrido para alcanzar un diámetro de 115 mm ( $T_{115}$ ). Se ensayan pastas con diferentes relaciones cv/c, todas ellas con la dosificación de superplastificante correspondiente a saturación determinada en el cono de Marsh en la etapa 1. Se toma como óptima la pasta con la dosificación máxima de cenizas volantes que presenta un diámetro de la superficie de  $180 \pm 10$  mm y un valor de  $T_{115}$  de 2-3,5 segundos. Estos límites para los resultados de este ensayo han sido propuestos para asegurar una pasta con una buena fluidez y una moderada cohesión (Kantro, 1990).

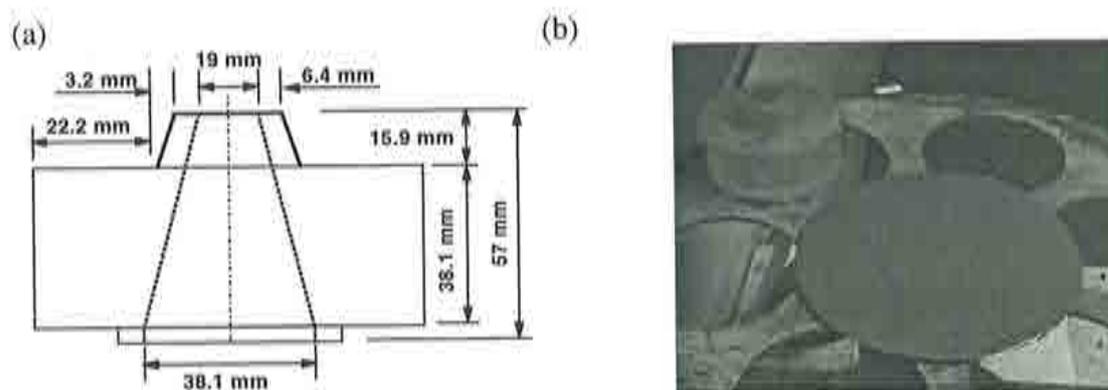


Figura 3. Ensayo de mini-slump: (a) dimensiones del molde y (b) extensión final de la pasta

### Etapa 3: Proporciones de áridos

El contenido mínimo de vacíos del esqueleto granular (de áridos) se determina rellenando un contenedor grande (en este caso, un cilindro de 5 litros de volumen) con mezclas en seco sin compactar de áridos con diferentes relaciones arena/grava. En cada caso se determina el peso específico de la mezcla de áridos y se calcula el contenido de vacíos a partir de las densidades de la arena y de la grava. Se toma como relación arena/grava óptima la combinación con el mínimo contenido de vacíos. Este procedimiento tiene en cuenta la forma, textura y granulometría de los áridos (Toralles-Carbonari et al., 1996).

#### Etapa 4: Ensayos con hormigón para determinar la composición óptima

En la etapa final se fabrican y ensayan hormigones con diferentes volúmenes de pasta (mayores que el contenido de vacíos del esqueleto granular) y la relación arena/grava óptima. En primer lugar se evalúa la autocompactabilidad en el hormigón fresco con los siguientes ensayos:

- La fluidez se mide con los ensayos de extensión de flujo (o *slump flow*; JSCE, 1990; ver Figura 4a) y de embudo en V (o *V-funnel*; Ozawa et al., 1994; ver Figura 4b). Las especificaciones respectivas son un diámetro final de 60-70 cm y un tiempo de flujo de  $10 \pm 3$  s. Asimismo, el tiempo para alcanzar un diámetro de 50 cm ( $T_{50}$ ) en el ensayo de extensión de flujo debe ser  $5 \pm 2$  s.
- La habilidad para pasar a través de espacios reducidos (sin bloqueo) se determina utilizando el ensayo de la caja en L (o *L-box*; Petersson et al., 1996; ver Figura 4c) en el que las especificaciones son el tiempo para fluir hasta 20 cm ( $T_{L20}$ ), que debe ser  $1 \pm 0,5$  s, el tiempo para fluir hasta 40 cm ( $T_{L40}$ ), que debe ser  $2,5 \pm 0,5$  s, y el cociente entre las alturas de hormigón en cada extremo o relación de bloqueo (RB), que debe ser  $\geq 0,8$ . La separación entre las barras de refuerzo es en este caso de 42,5 cm.
- La resistencia a la segregación se determina haciendo fluir hormigón sin compactar a través de un tubo en U de 16 cm de diámetro (ver Figura 4d). Una vez el hormigón ha comenzado a endurecer se abre lateralmente el tubo, se seccionan rebanadas cilíndricas de unos 10 cm de espesor en diferentes secciones, y se lavan las mismas sobre un tamiz de 5 mm para eliminar el mortero. Se seca la grava retenida y se determina el contenido de árido grueso de cada muestra. Se define como relación de segregación (RS) al cociente entre el menor de los contenidos de árido grueso obtenido y el que teóricamente debiera tener el material. Como especificación debe obtenerse  $RS \geq 0,90$ .

Aparte de los ensayos de autocompactabilidad pueden realizarse otros ensayos para evaluar el cumplimiento de otros requisitos. En este caso, se especificó una resistencia mínima a compresión simple de 50 MPa a 7 días y se determinaron también las resistencias a

28 y 90 días. En estos ensayos se utilizaron probetas estándar cilíndricas de 150×300 mm, curadas en ambiente húmedo y elaboradas sin compactar.

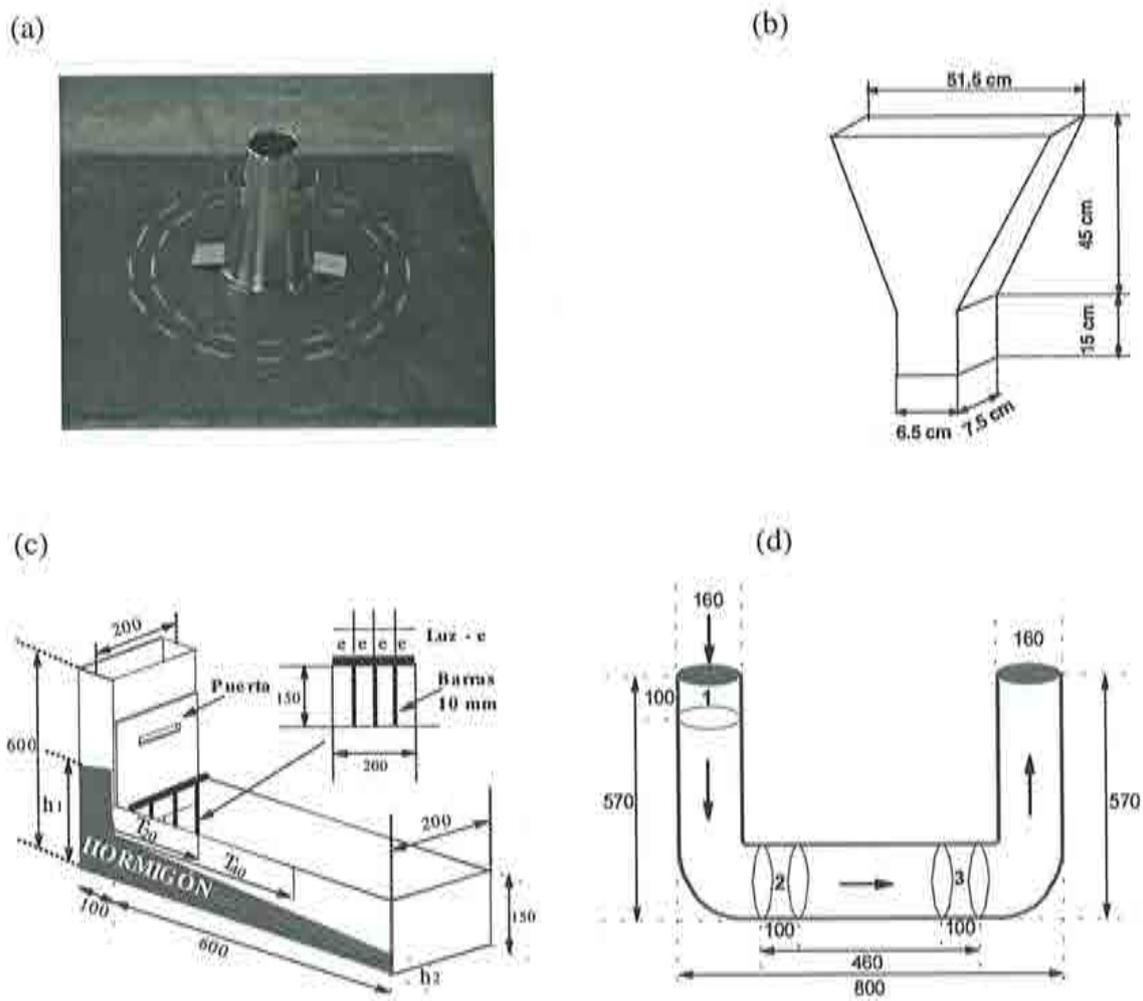


Figura 4. Equipos utilizados en los ensayos de autocompactabilidad: (a) extensión de flujo, (b) embudo en V, (c) caja en L y (d) tubo en U para evaluar la segregación

### Materiales utilizados

Los materiales utilizados en los ensayos llevados a cabo son un cemento CEM I 52,5 R (norma europea EN 197-1:2000), un superplastificante tipo copolímero vinílico (con una densidad de 1,4 g/ml y un contenido de sólidos del 25%), cenizas volantes con las características que se muestran en la Tabla 1, y arena y grava calizas de machaqueo (con un tamaño máximo de los áridos de 12 mm). La cantidad de superplastificante se considera siempre en términos de su componente sólido o activo, y su contenido de agua se tiene en

cuenta en la relación a/c. En los ensayos de pastas se utilizó agua destilada para evitar la posible influencia de impurezas.

Tabla 1. Características de las cenizas volantes

% Retenido en el tamiz de 200 $\mu\text{m}$	0,24
% Pasa a través del tamiz de 63 $\mu\text{m}$	87,0
Superficie Blaine ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	2935
Densidad ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2,58
Demanda de agua para consistencia normal en el ensayo de penetración de Vicat	0,19

## Resultados

En las etapas 1 y 2 del procedimiento de dosificación descrito en los apartados anteriores, se utilizan pastas tanto en el cono de Marsh como en el ensayo de mini-slump. La relación a/c se fijó en 0,4, y se determinó el tiempo de flujo en el cono de Marsh para relaciones cv/c hasta 0,6 y diferentes valores de la relación sp/c. En la Figura 5 se muestran los resultados obtenidos para pastas con buena fluidez. En general al incrementar la dosificación de cenizas volantes (cv/c), aumenta el tiempo de flujo (las curvas de tiempo de flujo ascienden), lo cual implica un descenso de fluidez, como era de esperar. La dosificación de saturación del superplastificante, a partir de la cual el tiempo de flujo no aumenta significativamente, se indica con el correspondiente ángulo interno para cada relación cv/c. El incremento de la relación cv/c tiende a aumentar la dosificación de saturación, o la demanda de superplastificante, para la máxima fluidez.

Los ensayos de mini-slump se realizaron utilizando pastas con cada una de las relaciones cv/c anteriormente consideradas, y con las dosificaciones de saturación del superplastificante respectivas. En la Tabla 2 se resumen los resultados y se indica también el peso específico de cada pasta. Si se considera el rango de 2-3,5 s prescrito para el tiempo de flujo ( $T_{115}$ ), las pastas con cv/c de 0,4 a 0,6 cumplen con el requisito. Debe señalarse que todas las pastas tuvieron diámetros finales dentro del rango 170-190 mm prescrito. Dado que uno de los objetivos de este trabajo es maximizar el uso de cenizas volantes, se ha considerado que la pasta con cv/c = 0,6 es la óptima.

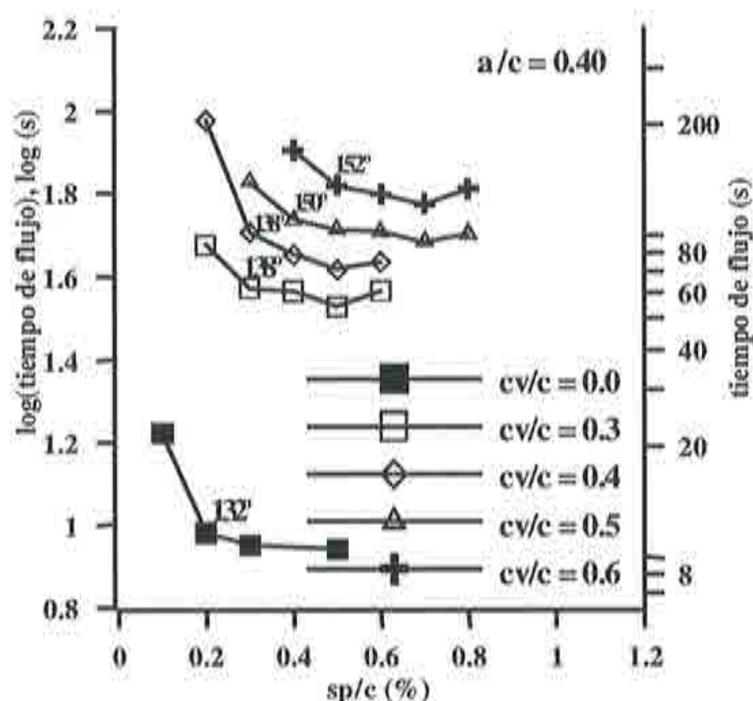


Figura 5. Curvas de tiempo de flujo para diferentes dosificaciones de cenizas volantes

Tabla 2. Resultados de los ensayos de mini-slump

cv/c	0,3	0,4	0,5	0,6
Saturación sp/c (%)	0,3	0,3	0,4	0,5
Diámetro final (mm)	188	170	195	183
Tiempo de flujo T <sub>115</sub> (s)	1,7	2,0	2,5	2,7
Densidad específica de la pasta (kg/lit.)	1,95	2,00	2,02	2,05

Para optimizar el esqueleto granular, se determinaron los pesos específicos de mezclas en seco con diferentes proporciones de arena y grava. Se calculó el contenido de vacíos de cada mezcla a partir de la densidad de cada componente. Se obtuvo que el mínimo contenido de vacíos, del 35%, correspondía a una mezcla con una relación arena/grava de 52,5/47,5, que se consideró la óptima.

En la etapa final del procedimiento de dosificación se fabricaron varios hormigones con la composición de la pasta optimizada y la relación arena/grava óptima, pero variando el contenido de pasta (del 40 al 45%). En la Tabla 3 se muestran las dosificaciones y las propiedades correspondientes. Debe señalarse que el agua añadida incluye la necesaria para saturar los áridos en condiciones de saturado superficie seco y excluye el contenido de agua

del superplastificante y la humedad de los áridos. Puede observarse que la densidad en fresco está en el rango normal para un hormigón a pesar de que los volúmenes de pasta son relativamente altos. Según los dos primeros ensayos (extensión de flujo y embudo en V), para obtener un hormigón con una fluidez adecuada, el volumen de pasta ha de ser mayor del 43%, que es cuando la extensión de flujo alcanza el rango 60-75 cm y el  $T_{50}$  y el tiempo de flujo en el embudo en V están en los rangos prescritos. En términos de la habilidad para pasar, los hormigones con el 43 y el 45% de volumen de pasta cumplen los requisitos de tiempo de flujo y relación de bloqueo en el ensayo de caja en L. En el ensayo del tubo en U, sólo los hormigones con volúmenes de pasta más altos pudieron fluir a través del tubo, y ambos presentaron una buena resistencia a la segregación ( $RS > 0,9$ ).

Tabla 3. Pruebas de dosificación de hormigones y sus propiedades

		Contenidos (kg/m <sup>3</sup> )			
Volumen de pasta (%)		40	42	43	45
Cemento		407	428	438	458
Cenizas volantes (cv/c=0,6)		244	257	263	275
Agua añadida		181	188	191	190
Superplastificante		7,5	7,9	8,1	8,4
Arena (0-5 mm)		815	788	774	748
Árido (5-12 mm)		761	736	723	698
Resultados de ensayos en el hormigón fresco					
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )		2410	2404	2400	2398
Extensión de flujo (cm)		44	48	58	66
Tiempo de flujo $T_{50}$ (s)		-	-	4,1	3,6
Tiempo de flujo en el embudo en V (s)		31	13	10	12
Caja en L con una separación de 42,5 mm	$T_{1,20}$ (s)	2,8	1,8	1,3	1,3
	$T_{L40}$ (s)	6,3	4,3	2,9	3,0
	RB ( $h_2/h_1$ )	0,0	0,2	0,8	0,9
Segregación en el tubo en U	RS	-	-	0,96	1,02
Resistencia a compresión (MPa)					
a 7 días		60,4 (± 1,4%)	63,1 (± 1,3%)	60,7 (± 1,6%)	60,8 (± 1,2%)
a 28 días		70,4 (± 1,3%)	74,5 (± 0,7%)	69,5 (± 1,1%)	68,2 (± 1,0%)
a 91 días		96,2 (± 2,7%)	100,1 (± 2,8%)	100,5 (± 3,4%)	98,6 (± 2,3%)

En la Tabla 3 se muestran también los resultados de resistencia a compresión obtenidos a las edades de 7, 28 y 91 días, expresados como valores medios y coeficientes de variación (en

%) a partir de tres probetas. En general la variabilidad es baja y los niveles de resistencia alcanzados son satisfactorios en todas las mezclas. Esto implica que no se debe reducir más la relación a/c y puede mantenerse en 0,4.

Como los requisitos en términos de autocompactabilidad son más críticos que el límite de resistencia, puede concluirse que, en el contexto de este estudio, el hormigón con un contenido de pasta del 45% puede considerarse como la mezcla óptima. Indudablemente se pueden conseguir mejoras adicionales mediante pruebas basadas en esta mezcla para maximizar la dosificación de cenizas volantes, minimizar las dosificaciones de superplastificante y cemento, otras.

### Conclusiones

En este artículo se ha presentado un procedimiento de dosificación para desarrollar hormigones de alta resistencia autocompactables con cenizas volantes. El procedimiento está constituido por cuatro etapas, todas ellas basadas en ensayos simples. Cada etapa sirve para determinar uno de los parámetros de la mezcla y optimizar progresivamente la composición del hormigón, considerando a éste último como un compuesto pasta-árido. La pasta se optimiza en las dos primeras etapas usando el cono de Marsh y el ensayo de mini-slump, con los que se escogen las dosificaciones de superplastificante y de cenizas volantes para una relación agua-cemento dada (por ejemplo, 0,4). El esqueleto mineral de los áridos se optimiza en la tercera etapa tomando como objetivo minimizar el contenido de vacíos en la mezcla seca sin compactar. En la cuarta y última etapa se ensayan hormigones con volúmenes de pasta variables para evaluar la autocompactabilidad y otros requisitos. En esta etapa se determina el volumen de pasta y se define la composición final del hormigón. La autocompactabilidad del hormigón fresco se evalúa a través de los ensayos de extensión de flujo y embudo en V para la fluidez, el ensayo de caja en L para la habilidad para pasar (sin bloqueo) y el ensayo de tubo en U para la resistencia a la segregación. En cuanto a las propiedades mecánicas, las resistencias a compresión de los hormigones obtenidos en este caso superan los 50 MPa a 7 días y los 90 MPa a la edad de 91 días.

El uso de cenizas volantes y relaciones a/c bajas para obtener hormigones de alta resistencia que puedan ponerse en obra con una contaminación acústica más baja y menores

riesgos para la salud de los trabajadores contribuye a que la tecnología del hormigón sea más sostenible. Además, las propiedades de estos hormigones conducen a estructuras más duraderas. Para alcanzar un tratamiento más global de la aplicación de estos hormigones deben desarrollarse normas de ensayo para su caracterización y control de calidad, considerando métodos como los utilizados en este estudio

### **Agradecimientos**

El Dr. V.M. Malhotra sugirió en julio de 2001 al primer autor de este artículo el uso de cenizas volantes en HAC, lo cual motivó el presente trabajo. Los autores agradecen la financiación parcial de este trabajo procedente de los proyectos PB98-0298 y TRA99-0788 de la CICYT, y el proyecto FEDER 2FD97-1973-C02-02 subvencionado por la CICYT y FEDER de la Comisión Europea. Cementos Molins Industrial, SIKA y Uniland Cementera donaron los materiales utilizados.

### **Referencias**

Agulló, L., Toralles-Carbonari, B., Gettu, R., y Aguado, A. (1999), "Fluidity of Cement Pastes with Mineral Admixtures and Superplasticizer - A Study Based on the Marsh Cone Test", *Mater. Struct.*, Vol. 32, 479-485.

Cembureau (1998), *World Statistical Review – No 18*, Special Edition – Cement Production, Trade, Consumption Data – World Cement Market in Figures – 1913/1995, Cembureau, Bruselas, 242 pp.

COMAC (1999), *Estadísticas del sector cementero español*, COMAC, Madrid, 85 pp.

Elias, X. (1996), "Introducción de subproductos de otras industrias - Materiales reciclados - Materiales reciclables - El mercado de segunda mano", *I Jornadas: Construcción y Desarrollo Sostenible*, Col. Apar. y Arq. Téc. de Barcelona, 192-194.

Gomes, P.C.C., Gettu, R., Agulló, L., y Bernad, C. (2001), "Experimental Optimization of High-Strength Self-Compacting Concrete", *Proc. Second Intl. Symp. on Self-Compacting*

Concrete, Eds. K. Ozawa y M. Ouchi, COMS Engineering Corporation, Fukui, Kochi, Japón, 377-386.

Irigoyen, X. y Sanz, E. (1996), "Los residuos de construcción y de derribo en Cataluña 1992". *I Jornadas: Construcción y Desarrollo Sostenible*, Col. Apar. y Arq. Téc. de Barcelona, 213-215.

JSCE (1990), Method of Test for the Slump Flow of Concrete, Standards of the Japan Soc. of Civil Engineers, F03.

Kantro, D.L. (1980), "Influence of Water Reducing Admixtures on Properties of Cement Pastes - A Miniature Slump Test", *Cem. Concr. Aggregates*, Vol. 2, 95-102.

Khurana, R., y Saccone, R. (2001), "Fly Ash in Self-Compacting Concrete", *Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, ACI SP-199, Ed. V.M. Malhotra, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, EE.UU., 259-274.

Ozawa, K., Sakata, N., y Okamura, H., "Evaluation of Self Compactability of Fresh Concrete - Using the Funnel Test", *J. Japan Soc. of Civil Engineers*, Vol. 23, n°. 490, 1994, 71-80.

Malhotra, V.M., y Bilodeau, A. (1999), "High-Volume Fly Ash System: The Concrete Solution for Sustainable Development", *Concrete Technology for Sustainable Development in the Twenty-First Century*, Ed. P.K. Mehta, Cement Manufacturers' Association, Nueva Delhi, India, 43-64.

Mañà, F. (1996), Mesa redonda: Las diferentes visiones. *I Jornadas: Construcción y Desarrollo Sostenible* (Barcelona, 16-18/5/96), Col. Apar. y Arq. Téc. de Barcelona, 268.

Mehta, P.K. (1999), "Concrete Technology for Sustainable Development – An Overview of Essential Principles", *Concrete Technology for Sustainable Development in the Twenty-First Century*, Ed. P.K. Mehta, Cement Manufacturers' Association, Nueva Delhi, India, 1-22.

Okamura, H., Ozawa, K., y Ouchi, M. (2000), "Self-Compacting Concrete", *Structural Concrete*, Vol. 1, n°. 1, 3-17.

Petersson, O., Billberg, P., y Van, B.K., "A Model for Self-Compacting Concrete", *Production Methods and Workability of Concrete*, Eds. P.J.M. Bartos, D.L. Marris y D.J. Cleand, E&FN Spon, Londres, 1996, 483-492.

Romano, D. (1996), Mesa redonda: Las diferentes visiones, *I Jornadas: Construcción y Desarrollo Sostenible* (Barcelona, 16-18/5/96), Col. Apar. y Arq. Téc. de Barcelona, p. 267.

SEOPAN (1999), *Construcción - Informe anual*, Asoc. Nac. Empr. Constr. Ámb. Nac. (SEOPAN), Madrid, D.L. M.28.351-1999, 170 pp.

Toralles-Carbonari, B., Gettu, R., Agulló, L., Aguado, A., y Aceña, V. (1996), "A Synthetic Approach for the Experimental Optimization of High Strength Concrete", *Proc. 4th Intl. Symp. on Utilization of High Strength/High Performance Concrete*, Eds. F. de Larrard y R. Lacroix, Presses ENPC, Paris, 161-167.

Vilanova, S. (1996), Mesa redonda: Las políticas medioambientales, *I Jornadas: Construcción y Desarrollo Sostenible* (Barcelona, 16-18/5/96), Col. Apar. y Arq. Téc. de Barcelona, p. 269.

# RECICLAJE Y REUTILIZACIÓN DEL HORMIGÓN

**Enric Vázquez**

**Marilda Barra**

**Universidad Politécnica de Cataluña, España**

## **Resumen**

Desde el punto de vista ambiental el uso del hormigón reciclado como árido para hormigón da el máximo nivel a la reutilización y constituye la más deseable de las formas de acercarse al ciclo cerrado ideal. Se examinan los impactos ambientales de la práctica recicladora, recomendándose incluir el reciclaje de los finos en la obtención de cemento. Tras revisar la situación de la producción de áridos reciclados en Europa y en especial en España, vemos las condiciones de producción del árido reciclado y se estudia la influencia del mortero adherido en las propiedades del mismo. Se propone un coeficiente de absorción efectivo para determinar la cantidad de agua que los áridos absorben durante la amasada. Tras pasar revista a los aspectos más importantes de la dosificación y producción del hormigón de reciclados, se estudian sus propiedades resistentes y deformacionales y los puntos críticos de su durabilidad.

*Whether in energy generation or environmental protection, materials research has already made many contributions. But the community has further to go to reduce the impacts of entire cycles of materials use. (Nature, Vol. 419, n° 6907, October 2002)*

### **Introducción**

La producción industrial no tiene lugar en ciclo cerrado. En sus procesos genera productos, subproductos y residuos a partir de las materias primas. El producto es consumido y pasa a engrosar la categoría de residuo. Se consumen cantidades muy importantes de recursos energéticos en dicha producción. Además la aparición de residuos, que deben ser eliminados, provoca gastos de transformación, inertización, almacenamiento, transporte y vertido, que repercuten en el balance energético.

El reciclaje industrial de subproductos y residuos, su reincorporación al proceso productivo, contribuye a cerrar el ciclo de la producción industrial, a la economía de materias primas y energía, a la disminución de los gastos de producción y de los costes sociales.

La construcción y demolición forman parte de un mismo ciclo que debe tender a cerrarse, reduciendo al mínimo los impactos ambiental, energético, económico y social. La disminución de recursos en materias primas como los áridos para hormigón, el descenso en el consumo energético asociado a los procesos de producción y eliminación de los residuos de la demolición y el moderar los impactos ambientales que representan los vertederos son factores interdependientes. Las medidas tomadas para disminuir los efectos de uno introducen variaciones en los otros dos. Toda intervención debe tender a reducir a la vez los tres factores. Es fácil calcular la disminución del consumo energético que representa una acción recicladora y existen herramientas que permiten evaluar los efectos sobre los otros dos factores, pero la interacción del reciclaje con la economía no tiene siempre una solución sencilla y satisfactoria.(Vázquez)<sup>(1)</sup>.

Hansen<sup>(2)</sup> considera que en lo que queda de la década de fin de siglo se generará una creciente presión económica y de conservación ambiental sobre la demolición que impulsará el reciclaje del hormigón y de otros materiales asociados a él. Esta presión provocará la toma de medidas para reducir los impactos y para evitar el agotamiento de las fuentes de materias primas. Esta última cuestión tiene, desde hace años un carácter crítico en puntos como las

cercanías de grandes ciudades, parajes bajo protección y zonas con pocas posibilidades de explotación de áridos válidos.

Hendriks <sup>(3)</sup>, en una consideración sobre las cantidades de residuos que genera la demolición, señala que estas pueden doblar en diez años y que ante este crecimiento la reutilización de estos será la mejor solución. Observa como la investigación combinada con el ingenio de algunos empresarios ha mostrado ya que la recolección selectiva de estos residuos es posible y la reutilización en tales condiciones alcanza costes perfectamente defendibles. La demolición y la recolección selectiva suelen ser obra de las mismas compañías.

En 1994, Schulz <sup>(4)</sup>, describiendo la situación en Alemania dice “ el reciclaje del material estructural está aún lejos de convertirse en un sistema de ciclo cerrado verdadero. Es probable que no se pueda conseguir cerrarlo por completo. Pero desde un punto de vista técnico y económico el uso del hormigón y ladrillo reciclados como áridos para hormigón da el máximo nivel de la reutilización y constituye la más deseable de las formas de acercarse al ciclo cerrado ideal”.

En Europa el árido reciclado en los últimos 10 años se ha venido utilizando mayoritariamente en bases y subbases de carreteras y solo el 1% del del hormigón europeo contiene áridos reciclados. Holanda <sup>(5)</sup>, Dinamarca <sup>(6)</sup> y Alemania <sup>(7)</sup> tienen normas y recomendaciones para dichos áridos y su uso en hormigón.

En otras naciones de dicho continente no existen normas específicas y la practica queda limitada, y en la realidad prohibida por que se les aplican ilógicamente las normas para áridos primarios, sin una reflexión científica.

En Japón 2/3 del hormigón demolido es reciclado como árido para bases y subbases y se producen unas 400.000 t/año de hormigón reciclado.

En un reciente trabajo de un equipo de la Universidad de Niigata (Japón) dirigido por el profesor Nagataki <sup>(8)</sup>, se hace una evaluación global del reciclaje de hormigón y de su ciclo de vida desde el punto de vista medioambiental.

Se calculan el consumo de recursos naturales, el consumo de energía y las emisiones de dióxido de carbono asociadas a la fabricación de 1 t. de hormigón para los dos casos: a) hormigón nuevo con materiales no reciclados y b) cuando el hormigón se confecciona con un 90% de áridos reciclados y el chinker del cemento se fabrica con un 53% de materias primas y un 47 % de finos procedentes de la demolición de hormigón. El ahorro de materias primas es del 91% en árido y el 51% en materias primas para obtener cemento. El consumo de energía es 1,6 veces más elevado en el caso del hormigón reciclado y la reducción del CO<sub>2</sub> es del 11% si se recicla, siendo ésta reducción esencialmente producida por la práctica recicladora del cemento. Por tanto ésta última práctica es decisiva para que el balance ambiental resulte muy beneficioso. Ello refuerza la idea expuesta en el comienzo de éste artículo respecto a la necesidad de abordar los problemas recicladores en todo el contexto y contemplando ciclos de vida totales.

Las ausencias de normas y especificaciones en unos lugares y la barrera psicológica que impone el hecho de que el árido señalado es un residuo son las principales causas de la aún limitada extensión del hormigón de reciclados.

Hoy podemos decir que existe un conocimiento teórico y práctico razonable de los cambios de propiedades, cuando los hay, de los hormigones con áridos reciclados, existen técnicas para producirlos y optimizarlos y se han definido tipos adecuados a las aplicaciones. Pero el futuro de estos hormigones está relacionado con aspectos económicos que dependen en alto grado de las políticas ambientales y del rigor con que las apliquen las administraciones.

### **Situación del Reciclaje de Árido en España**

El Acta Española sobre Residuos que traducía la Council Directive 91/156/EEC, fue aprobada en abril de 1998. Sin embargo la comunidades autónomas con competencias ambientales- Catalunya, País Vasco y Navarra- habían ya hecho un esfuerzo previo en éste sentido.

El Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición prevé una inversión de 3,6 millones de Euros y exige que dentro de 6 años se alcance el 40% de áridos reciclados sobre la producción total del residuo. El sector privado tomó ya hace tiempo la iniciativa invirtiendo en plantas móviles situadas cerca de las obras y algunas plantas fijas que centralizan la

actividad recicladora. Esta situación empezó en Cataluña en 1990 y se está extendiendo con rapidez a otras comunidades, lo que podría describirse como una primera etapa del reciclaje, según la definición del Symonds Report.

Se espera para el próximo año un notable incremento del % reciclado por la aplicación del Plan Nacional 2001-2006 citado, que conllevará el desarrollo de Planes Regionales tendentes a un modelo de "mínimo residuo" y la extensión del concepto ambiental en la construcción y demolición.

En la actualidad solo se produce Hormigón Reciclado en Barcelona a nivel experimental para la investigación, destacando en el campo de la aplicación la construcción de una pasarela de hormigón reciclado en el campus de Castelldefels de la Universidad Politécnica de Cataluña, proyectado, dirigido y monitorizado por los equipos de los profesores Marí y Vázquez del Departamento de Ingeniería de la Construcción.

### **Áridos Reciclados para hormigón**

#### Producción

Las plantas de producción de áridos reciclados son muy parecidas a las de producción de áridos primarios. Incorporan varios tipos de machacadoras, cribas, equipos de transporte y distintos sistemas para eliminar contaminantes. El nivel de complejidad de la planta lo define el grado de dicha contaminación y la aplicación del material. Así vemos claras diferencias cuando el objetivo es obtener áridos reciclados para hormigón.

El sistema llamado abierto <sup>(9)</sup> es el más recomendable cuando tratamos hormigón limpio. En este caso el sistema abierto incorpora una eliminación previa de contaminantes de gran tamaño que puede ser manual o mecánica y después del machaqueo se añade un sistema de clasificación en seco o húmedo para limpiar el producto final.

En el Japón se han desarrollado plantas que consiguen eliminar un altísimo porcentaje del hormigón adherido al árido primario, hasta dejar el % de absorción de agua por debajo del 3%. En las plantas europeas se obtienen áridos de hormigón con absorciones en el entorno 5-7%. Recientemente <sup>(10)</sup> se ha presentado en Japón un sistema de mejora de calidad del árido

reciclado tratado en plantas normales y que consiste en sumergir los áridos obtenidos en lo que se denomina un "líquido puzolánico" lo que provoca un relleno de fisuras y poros con nuevo CSH. El líquido no es otra cosa que una suspensión de sílice coloidal, el tiempo de inmersión óptimo es de 30 minutos, se suele mezclar además un reductor de tensión superficial que a la vez es un agente reductor de retracción. Con los áridos tratados si se desea pueden obtenerse hormigones de resistencia superior a  $50 \text{ N/mm}^2$ .

### Propiedades de los áridos reciclados

- El mortero adherido y su influencia en las propiedades

El árido reciclado de hormigón puede presentar cualquier de las tres tipologías siguientes:



**Fig.1.** Tipología de los áridos reciclados de hormigón.

El mortero en el árido reciclado puede estar adherido a un trozo de roca o constituir él mismo un grano. El árido reciclado es por lo tanto un material heterogéneo que está constituido por dos fases distintas; mortero y roca. Cada una de las fases presenta propiedades distintas. La diferencia fundamental es la porosidad, que a su vez determina una serie de otras propiedades como la masa específica, la capacidad de absorción de agua, la resistencia, la dureza, el módulo de elasticidad y la durabilidad.

Las características de un árido convencional dependen en una primera instancia de las características de la roca matriz. Las del árido reciclado dependerán de las características de la roca y del mortero del hormigón original. También es función de las cantidades relativas en que estos dos elementos se presenten en el árido.

La cantidad de mortero adherido va del 25 al 60 % dependiendo del hormigón original y de las condiciones de la planta de procesamiento. El % de mortero adherido influye en el % de absorción de agua, en la densidad y en la resistencia a la abrasión. En la Tabla 1 vemos algunos valores que revelan esta influencia.

**Tabla 1.** Propiedades de los áridos reciclados de hormigón en función del % de mortero adherido (Hansen, Narud 1983) y de la a/c del hormigón de procedencia

Árido	Tamaño	Densidad kg/m <sup>3</sup>	Absorción de Agua	Los Angeles	% de mortero adherido en volumen
Árido primario	4-8	2.500	3,7	25,9	0
	8-16	2.620	1,8	22,7	0
Árido reciclado (a/c = 0,4)	4-8	2.340	8,5	30,1	58
	8-16	2.450	5,0	26,7	38
Árido reciclado (a/c = 0,7)	4-8	2.350	8,7	32,6	64
	8-16	2.440	5,4	29,2	39

- La absorción efectiva

Capacidad de Absorción es la relación entre la cantidad total de agua requerida para cambiar la condición del árido de seco en estufa a la condición de saturado superficie seca, y la masa seca en estufa de la muestra.

$$A_p = \frac{(M_{sat} - M_s)}{M_s} * 100 \quad (1)$$

en la que:

$A_p$  = capacidad de absorción

Para el propósito de este trabajo hemos considerado especialmente útil definir y utilizar el que llamaremos:

Coefficiente de Absorción Efectiva Barra<sup>(1)</sup>. Lo entenderemos como la relación entre la cantidad de agua que el árido es capaz de absorber de la mezcla fresca, desde la amasada hasta su endurecimiento, y la masa seca del árido.

$$A_{pe} = \frac{(M_f - M)}{M_s} * 100 \quad (2)$$

en la que;

$A_{pe}$  = coeficiente de absorción efectivo en la mezcla

$M_f$  = masa del árido después de estar en contacto con el agua de la mezcla ( después de estar sumergido en el hormigón fresco)

$M$  = masa del árido con el contenido de agua en que es empleado en la mezcla.

Los datos relativos a la capacidad de absorción y coeficiente de absorción efectivo son necesarios para las correcciones de las proporciones de agua y árido en la mezcla de hormigón.

El bajo coeficiente de absorción efectivo de los áridos convencionales determina que prácticamente no se produzca ninguna variación del contenido de agua del mortero fresco a causa de la absorción de los áridos. Esto no sucederá con los áridos reciclados ya que poseen un elevado coeficiente de absorción. Ésta es la característica que más distingue estos áridos de los convencionales.

La cantidad de agua que el árido reciclado puede succionar depende de que el árido entre en contacto directo sólo con el agua, con el agua de la pasta o con el agua del mortero. Depende también de su condición inicial de humedad y del tiempo en que permanece en contacto con el agua.

Cuando el árido se mezcla con agua inicialmente durante un cierto tiempo podemos determinar la cantidad de agua que éste es capaz de absorber en el amasado, para ello basta reproducir a escala las condiciones de amasado. La determinación no es posible cuando el árido es adicionado a la pasta o al mortero previamente preparado.

La pasta es una suspensión concentrada estable. Cuando mezclamos agua con el cemento los productos solubles pasan a la solución y la fase acuosa queda saturada de iones. La superficie de los granos está cargada eléctricamente y los iones disueltos se distribuyen más o menos por igual alrededor de los mismos, captando moléculas de agua que forman capas ligadas por atracción electrostática. Alejándose de la superficie del grano el tejido iónico va teniendo menor concentración y las moléculas de agua se encuentran menos fijadas. En la pasta, el cemento está en forma de copos, formando una red continua. Las uniones son enlaces coulombianos directos entre los granos.

Nos interesa pues determinar la cantidad de agua que será absorbida por el árido durante la amasada. Esto ha sido posible en uno de los procedimientos adoptados para la producción de hormigón en el cual mezclamos inicialmente el árido con el agua, y después el cemento y el árido fino.

El ensayo consiste en reproducir a pequeña escala y manualmente, las condiciones de la mezcla de árido grueso y agua, adoptadas en la fabricación del hormigón, y determinar la cantidad de agua absorbida por el árido.

#### Metodología para la determinación del Coeficiente de Absorción Efectivo

- a) Determinar inicialmente el contenido de agua del árido
- b) Sacar una muestra de aproximadamente 1 Kg del árido en la misma condición de humedad en que va a ser empleado para la fabricación del hormigón y pesarla (M).
- c) Poner el árido en un recipiente y añadir agua. La cantidad de agua se determina manteniendo constante la relación agua / árido de la fabricación y por tanto depende de (M). Anotar la hora.
- d) Mezclar manualmente el árido y el agua, siguiendo el procedimiento y manteniendo el tiempo de la fabricación. En general la cantidad de agua no es suficiente para sumergir totalmente los áridos y la homogeneidad tanto en la fabricación cuanto en el ensayo se consigue removiendo los materiales. En este trabajo la secuencia fue:
  - remover manualmente durante 2 minutos
  - dejar reposar por 3 minutos, manteniendo el recipiente cerrado.
  - repetir el procedimiento previamente citado dos veces más.

El tiempo que el árido permanece en contacto con el agua es el mismo de la fabricación e igual a 15 minutos.

- e) Secar superficialmente los granos y pesarlos en la condición que denominamos semisaturada ( $M_f$ )
- f) Secar los áridos en estufa y pesarlos en la condición que llamamos seco en estufa ( $M_s$ ).  
A partir de estos datos es posible determinar el coeficiente de absorción efectivo ( $A_{pe}$ ) y por lo tanto determinar las proporciones de árido y agua reales en el hormigón.

Todas las propiedades dependientes de la porosidad descritas anteriormente son determinadas a partir de las relaciones entre los siguientes parámetros:

M- masa de la muestra con el contenido de agua tal como se encuentra  
 $M_{st}$ - masa de la muestra en la condición saturada superficie seca

$M_s$ - masa de la muestra seca en estufa

$M_e$ - masa de la muestra en la condición saturada superficie seca, determinada en agua.

La condición seco en estufa se obtiene secando las muestras en estufa a  $105 \pm 5^\circ \text{C}$  hasta masa constante.

Para la saturación, la muestra se mantiene en un vacío de  $-2,66 \text{ Pa}$  durante 1 hora para eliminar parte del aire contenido en los poros y facilitar la penetración del agua. Después el agua se añade, gota a gota, hasta cubrir completamente la muestra y se mantiene el sistema a vacío. A continuación se deja la muestra sumergida a presión atmosférica durante 24 horas.

La masa de las muestras varían entre 800g. a 1000g. Se determinan con una precisión de 0,1g. El contenido de agua y el coeficiente de absorción efectivo de los áridos reciclados varían en función de las condiciones ambientales de temperatura y humedad. Es pues necesario determinarlos siempre que fabricamos hormigones. Los otros ensayos se efectuaron en seis (6) muestras. Los resultados que figuran en la tabla 2 son la media de los valores obtenidos.

**Tabla 2.** Propiedades función de la porosidad

	árido convencional		árido reciclado			
	grava (12/20)	gravilla (6/12)	(hormigón)		(ladrillo)	
			grava (12/20)	gravilla (6/12)	grava (12/20)	gravilla (6/12)
densidad ( $\text{Kg/m}^3$ )						
$d_s$	2.680	2660	2.270	2.270	1.870	1.866
$d_{ms}$	2.694	2.682	2.427	2.406	2.141	2.135
$d_A$	2.718	2.720	2.690	2.689	2.564	2.560
porosidad (%)						
p	1,4	2,2	15,6	16,8	27,1	27,1
absorción (%)						
$A_p$	0,50	0,80	6,85	7,49	14,5	14,4
$A_{pe}$	0	0	4,24	4,62	12,85	13,05
contenido de agua (%)						
h	0,1	0,1	2,14	2,15	0,1	0,1

- Granulometría

La granulometría deseada se puede obtener mediante pequeños ajustes en la planta procesadora. La granulometría de la fracción gruesa se puede adaptar a cualquier aplicación. La fracción fina no se utiliza en Europa debido a su alta absorción e influencia sobre la retracción que experimentará el nuevo hormigón.

- Resistencia a la abrasión

Como se ha visto depende de la a/c, tamaño y naturaleza de los áridos del hormigón original. Existen estudios que concluyen que los valores altos de pérdida en el ensayo Los Angeles permiten además distinguir a los hormigones afectados por patologías químicas graves (árido-alkali, sulfatos).

- Forma

Es muy similar, aunque se registra textura superficial más áspera y porosa.

- Contaminantes

Los principales son las arcillas, la madera, el betún polímeros de sellado de juntas, filleres expansivos, yeso, ladrillo refractario con MgO, cloruros, materia orgánica, metales, vidrio, áridos ligeros y pinturas. Debe controlarse su presencia. A tipo orientativo podemos dar la tabla que presenta las relativas proporciones de contaminantes que provocan una pérdida del 15% en la resistencia del futuro hormigón.

Tabla 3. Contaminación

	Arcilla	Madera	Yeso	Aglomerado Asfáltico	Pintura acetato virilo
% Contenido en volumen	5	4	6	2	0,2

Ni el vidrio, ni ladrillo, ni otra cerámica influyen para nada cuando están presentes en cantidades inferiores al 10%.

## Hormigones

### Dosificación de hormigones con áridos reciclados

La dosificación es un proceso con el cual se obtiene la proporción óptima entre cemento, áridos, agua y aditivos, atendiendo a determinadas especificaciones. El estudio de dosificación viene delimitado tanto por las características de los materiales componentes del hormigón y por las condiciones de la obra, como por el proyecto estructural, los equipos disponibles para manipulación, etc.

La trabajabilidad del hormigón fresco y la resistencia del hormigón endurecido a una edad definida son en general los parámetros más importantes. La trabajabilidad viene definida por las condiciones de producción y ejecución de la obra. Una vez definida la trabajabilidad nos queda por especificar la resistencia. Conforme a lo visto anteriormente, el árido reciclado presenta una serie de características diferentes de las del árido convencional. Las diferencias principales en lo que se refiere al árido reciclado son:

- mayor heterogeneidad
- menor resistencia de la matriz de origen (hormigón original)
- mayor porosidad

En líneas generales, los hormigones reciclados pueden ser clasificados en función del porcentaje de árido reciclado empleado.

**Tabla 4.** Tipos de hormigones reciclados.

CATEGORÍA	% DE ÁRIDO REICLADO	
	ÁRIDO GRUESO	ÁRIDO FINO
1	≤G	≤F
2	> G	≤F
3	>G	>F

G = % límite de árido grueso que no altera las propiedades especificadas del hormigón.

F = % límite de árido fino que no altera las propiedades especificadas del hormigón.

Los límites G y F dependen principalmente de:

Nivel de resistencia del hormigón

$\uparrow f_c \rightarrow \downarrow G \downarrow F$

Propiedades de los áridos reciclados

Áridos de mejor calidad  $\rightarrow \uparrow F \uparrow G$

#### Estudio comparativo de hormigón de árido grueso reciclado y hormigón convencional

Para comparar las propiedades de los hormigones reciclados con los de árido calizo en el estudio de dosificación se ha adoptado la metodología propuesta por Helene, P y Terzian, P<sup>(12)</sup> que consiste en construir un diagrama de dosificación que correlaciona la resistencia a compresión, la relación agua/ cemento (A/C), la composición, (1:m) y la cantidad de cemento ( C ). Se establecen las ecuaciones para determinar la resistencia y la cantidad de cemento, para una determinada consistencia y unas características de los materiales componentes constantes. Con los datos obtenidos construimos el diagrama de dosificación. El diagrama engloba toda una franja de resistencias de lo que calificamos como hormigones normales, claramente no especiales. La resistencia a compresión es escogida como la propiedad a ser evaluada por tratarse de una característica muy sensible, capaz de indicar con presteza las variaciones de calidad del hormigón.

Al mantener constantes los parámetros externos relacionados con la producción y también el tipo de cemento y la arena, en el diagrama de dosificación se evidencia la influencia de las características de los áridos gruesos en las propiedades del hormigón además de permitirnos comparar los hormigones reciclados con los hormigones convencionales.

#### Esquema del estudio de dosificación

- a) Caracterización de los materiales constituyentes.
- b) Determinación de los porcentajes relativos de los áridos gruesos (grava y gravilla) que proporcionan la composición de áridos de mayor compacidad.
- c) Determinación de la relación agua/cemento (a/c) que atienda a las exigencias de resistencia y durabilidad
- d) Determinación del porcentaje ideal de mortero ( $\phi$ ) para composición normal ( 1:5).
- e) Determinación de las composiciones auxiliares
- f) Construcción del diagrama de dosificación.

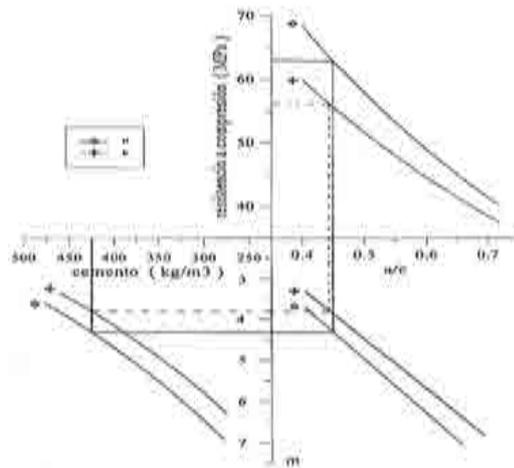


Fig. 2. Diagrama de dosificación.

### Producción del hormigón

El proceso de producción del hormigón afecta las propiedades del mismo en el estado fresco y endurecido. La calidad y operaciones de los equipos de dosificación y amasado influyen en muchas propiedades del hormigón además de la resistencia, ya que el amasado condiciona los contactos y por lo tanto influye en las condiciones e interacciones de superficie de los constituyentes del hormigón.

Abrams<sup>(13)</sup> a principio de este siglo ya mostraba en sus experiencias la influencia de la calidad del amasado en la resistencia del hormigón producido. Helene<sup>(14)</sup> sugiere que el factor de variabilidad del tiempo y procedimiento del amasado puede representar hasta un 30% de reducción de la resistencia del hormigón. Muchos otros investigadores han estudiado y cuantificado este efecto, pero no existen procedimientos generales ya que tales recomendaciones dependen de las propiedades de la mezcla y de la hormigonera. La optimización del proceso de producción del hormigón es por lo tanto un estudio específico para determinadas condiciones y significa la garantía de la elaboración de un material uniforme y trabajable que después de endurecido presentará una actuación que coincide con su desempeño potencial.

Para una determinada unidad de producción, el proceso de amasado presenta dos variables; el orden de introducción de los materiales y el tiempo de amasado. El orden como son añadidos

los materiales en la hormigonera nos parece particularmente importante, sobretodo si consideramos la gran capacidad de absorción de los áridos reciclados comparada a la de los áridos convencionales.

Cuando el árido grueso reciclado, en la condición de seco al aire, es adicionado a una pasta o mortero, se supone que absorberá agua de la pasta. La determinación de la cantidad de agua que el árido absorberá es complicada. Este fenómeno es difícil de cuantificar, pero podemos hacer algunas consideraciones cualitativas del mismo.

La pérdida de agua de la pasta o mortero en beneficio del árido no será uniforme. el árido absorberá agua de la pasta que esté en la zona de contacto árido-pasta. La relación agua /cemento de la pasta probablemente será variable, presentando un gradiente decreciente hacia la superficie del árido.

La cantidad de agua que el árido absorberá de la pasta depende de las características del árido y también de la consistencia de la pasta o mortero. La absorción será tanto mayor cuanto más fluida sea la pasta.

En el caso en que el árido sea mezclado inicialmente con el agua, conocido su coeficiente de absorción efectivo y su contenido de agua es posible determinar la cantidad de agua que será absorbida por el árido y por lo tanto, la cantidad de agua que determina la relación agua/cemento (A/C) de la pasta.

En la condición seco al aire, el árido reciclado tiene una determinada cantidad de agua ( $A_a$ ).

Considerando:

$A_c$  = agua que será añadida en la fabricación del hormigón

$A_t$  = agua total en el hormigón

$A_b$  = agua que el árido absorberá durante la mezcla

$A$  = agua que mezclará con el cemento formando la pasta.

Tenemos:

$$A_t = A_c + A_a \quad (3)$$

$$A = A_c - A_b$$

La relación agua/cemento efectiva en la pasta solo puede ser determinado en los hormigones reciclados producidos siguiendo el orden de mezcla: árido reciclado + agua + otros materiales.

- Consideraciones respecto a la interfase pasta-árido grueso

El coeficiente de absorción efectivo puede variar mucho dependiendo del orden en que se introducen los materiales en la hormigonera.

• *Áridos reciclados mezclados con agua*

- *Árido no saturado*

En esta situación tiene lugar una movilización de agua hacia el interior del árido. El árido absorbe agua y puede llegar o no a la saturación dependiendo de su contenido de agua inicial y del tiempo en que permanece en contacto con el agua.

En el caso de que no llegue a saturarse, el árido puede seguir absorbiendo agua de la mezcla fresca.

Al añadir el cemento, el árido presenta agua en la superficie. Esta agua superficial provoca la retención de una gran cantidad de partículas de cemento en la superficie del árido. La pasta en contacto con el árido es más rica en cemento lo que produce una mejor adherencia. El agua que ha sido absorbida y que se encuentra en el interior del árido es una agua libre, que se puede movilizar. Dependiendo del tiempo en que comience, o que sea significativa esta movilización de agua del árido hacia la pasta podremos tener diferentes consecuencias.

Una de las posibilidades es la de que el agua emigre hacia la pasta después de finalizado el fraguado. En estas condiciones el agua del interior del árido podría proporcionar un curado interno que también ayudaría mejorar la adherencia. La otra posibilidad es que el desplazamiento del agua tenga lugar antes del final del fraguado, con la pasta en el estado plástico. En estas condiciones la salida de agua del árido representará un aumento de la relación agua/ cemento y por lo tanto de la porosidad en la pasta que toca el árido. En realidad es probable que el mecanismo exista en las dos situaciones citadas y que el resultado sea la suma de los dos efectos. El estudio de los mecanismos de transporte, sus causas y consecuencias podrán elucidar en el futuro esta cuestión.

- *Árido saturado*

El hecho de que el árido esté completamente saturado determina que no habrá movilización de agua hacia el interior. Esto significa que serán mucho mayores las probabilidades de que el desplazamiento de agua del árido hacia la pasta ocurra antes del fraguado, con el consecuente aumento de la porosidad de la misma en la zona de transición entre la pasta y el árido.

• *Árido reciclado mezclado con pasta o mortero*

En líneas generales, las consideraciones hechas para la pasta son válidas también para el mortero. La diferencia está en que para una determinada mezcla, en el mortero la relación “agua/ sólido” es menor y por tanto que tienen menor cantidad de agua disponible.

La penetración del mortero en los huecos superficiales será más difícil porque el mortero es menos fluido que la pasta y las dimensiones del árido fino (arena) son mucho mayores que las de las partículas de cemento.

- *Árido reciclado saturado*

El agua presente en la superficie y en los poros superficiales actúan aumentando la relación agua/cemento (A/C) de la pasta que toca al árido. Este aumento significa un empeoramiento de la calidad de las interfases árido grueso-pasta.

Por el contrario, la dilución de la pasta facilita su penetración en los huecos del árido, lo que puede no ocurrir si se emplea el árido seco, pues no habrá dilución.

- *Árido reciclado seco*

El árido no saturado está con la superficie seca al entrar en contacto con la pasta y absorberá una determinada cantidad de agua. La cantidad de agua que será absorbida depende del coeficiente de absorción efectivo del árido y de la relación agua/cemento de la pasta (A/C). La pasta en contacto con el árido tendrá como consecuencia una relación (A/C) menor. Dependiendo de las características del árido y de la pasta pueden producirse las siguientes situaciones:

La reducción de la relación (A/C) es tal que mejora la adherencia pasta-árido.

La reducción de la relación (A/C) es tal que falta agua para la hidratación del cemento, y por lo tanto la adherencia pasta-árido empeora.

Resistencia a compresión

El diagrama de dosificación de los hormigones convencionales y el de los hormigones reciclados se han elaborado considerando los mismos ejes para facilitar el estudio comparativo entre ellos. En la tabla 5 está presentada la nomenclatura utilizada para los hormigones estudiados.

Tabla 5. Nomenclatura de los hormigones

Hormigón	Árido grueso	Nivel de resistencia	Composición de la mezcla				
			cemento	arena	gravilla	Grava	Ac/C
<b>Hr</b>	caliza	Rico	1	1,21	1,05	1,57	0,40
<b>Hn</b>	caliza	Normal	1	1,94	1,39	2,09	0,53
<b>Hp</b>	caliza	Pobre	1	2,68	1,74	2,60	0,66
<b>Rr</b>	Hormigón reciclado	Rico	1	1,21	0,92 @	1,37 @	0,52
<b>Rn</b>	Hormigón reciclado	Normal	1	1,94	1,22 @	1,84 @	0,64
<b>Rp</b>	Hormigón reciclado	Pobre	1	2,68	1,53 @	2,29 @	0,83
<b>Rr 40</b>	Hormigón reciclado + ladrillo	Rico	1	1,21	R 0,55 / L 0,30	R 0,82 / L 0,45	0,52
<b>Rn 10</b>	Hormigón reciclado + ladrillo	Normal	1	1,94	R 1,08 / L 0,10	R 1,62 / L 0,15	0,70
<b>Rn 20</b>	Hormigón reciclado + ladrillo	Normal	1	1,94	R 0,98 / L 0,20	R 1,47 / L 0,30	0,70
<b>Rn 40</b>	Hormigón reciclado + ladrillo	Normal	1	1,94	R 0,73 / L 0,40	R 1,10 / L 0,60	0,70
<b>Rp 40</b>	Hormigón reciclado + ladrillo	Pobre	1	2,68	R 0,92 / L 0,50	R 1,38 / L 0,74	0,83

Hormigón pobre             $C < 300 \text{ kg/m}^3$   
Hormigón normal         $300 \text{ kg/m}^3 < C < 400 \text{ kg/m}^3$   
Hormigón rico             $C > 400 \text{ kg/m}^3$

Comparando los resultados obtenidos verificamos que para una determinada resistencia, el consumo de cemento de los hormigones reciclados es mayor, y que para resistencias mayores la diferencia de consumo entre los hormigones reciclados y convencionales se amplía.

Es importante señalar que disminuyendo progresivamente la relación agua/cemento en los hormigones reciclados objeto de este estudio, siempre se ha conseguido un aumento de resistencia y no se ha detectado un límite.

Los incrementos de resistencias correspondientes a las disminuciones de A/C no son proporcionales a los observados en los hormigones convencionales. Dicho de otra forma, en el gráfico de dosificación las curvas A/C frente a  $f_{c28}$  para hormigones convencionales y reciclados tienden a separarse para relaciones A/C más bajas.

Existen numerosas publicaciones que relaciona la resistencia del hormigón original con las de el hormigón reciclado y el referencia o convencional, sin embargo sus conclusiones no son ni

uniformes, ni coincidentes yendo desde descensos de hasta el 40% hasta incluso ligeros incrementos 8,5%. El problema esencial consiste en saber exactamente lo que se compara y que parámetros se mantienen realmente constantes.

Es importante considerar que los resultados relativos a las prestaciones resistentes de los hormigones, reciclado y convencional, dependerán siempre de las características específicas de cada uno de los materiales que son comparados, o sea de las propiedades del árido reciclado y de las del árido convencional disponibles.

Del mismo modo que en rigor no pueden generalizarse las propiedades de áridos convencionales considerándolas únicas, mucho menos puede hacerse lo mismo con las de los áridos reciclados. El estudio de la dosificación será siempre particular.

#### Módulo de elasticidad

Existen numerosas publicaciones que relacionan el módulo de deformación del hormigón reciclado y el del hormigón referencia o convencional de misma resistencia y las conclusiones son bastante uniformes. El módulo de deformación de los hormigones de árido reciclados es menor y se dan descensos de 15 hasta 40%. Hansen <sup>(15)</sup> considera que el contenido de mortero viejo presente el árido reciclado es el responsable de la reducción del módulo de elasticidad de los hormigones reciclados.

Ravindrarrabh y Tam <sup>(16)</sup> sugiere que el módulo elástico del hormigón de áridos reciclados es menor que el de los hormigones de áridos convencionales y además que la diferencia aumenta con el aumento de la resistencia. Sugiere también que la influencia del árido fino reciclado es similar a la del árido grueso reciclado. La sustitución de 100% de los áridos por áridos reciclados es la que conduce a mayores reducciones en el módulo de elasticidad ya que incorporan el efecto del árido grueso y del árido fino.

Takizaki et al. <sup>(17)</sup> cita la ecuación propuesta por el Instituto Japonés de Arquitectura mostrada a continuación:

$$E_c = 2,1 \times \left( \frac{d_s}{2,3} \right)^{1,5} \times \left( \frac{f_c}{200} \right)^{0,5} \quad (4)$$

donde:

$E_c$  = módulo de elasticidad (Mpa) del hormigón.  
 $f_c$  = resistencia a compresión del hormigón  
 $\rho_s$  = densidad del hormigón

en el código modelo CEB FIB 1990, el módulo de deformación de hormigones estructurales de peso normal puede ser estimado por:

$$E_{ci} = 2,15 \times (f_m / 10)^{1/3} \quad (5)$$

donde:

$E_{ci}$  = módulo de elasticidad (Mpa) para una edad del hormigón de 28 días

$f_{cm}$  = resistencia media a compresión a la edad de 28 días.

El módulo de elasticidad que se obtiene de la fórmula del CEB FIB se define como el módulo tangente de elasticidad en el origen del diagrama tensión-deformación y la ecuación es válida para hormigones fabricados con áridos cuarcíticos. Para hormigones fabricados con otros áridos, el módulo de elasticidad puede ser obtenido multiplicando  $E_{ci}$  por el factor  $\alpha_E$  de la tabla 7.

Tabla 7. Factor de corrección por el tipo de árido.

Tipo de árido	$\alpha_E$
Basalto, caliza densa	1.2
Áridos cuarcíticos	1.0
Caliza	0.9
Arenisca	0.7

Los valores determinados a partir de la ecuación citada anteriormente son aproximaciones, y por lo tanto, para tener en cuenta con precisión las diferencias en la rigidez o módulo del árido, es necesario realizar medidas directas de  $E_{ci}$ .

En nuestros trabajos se han determinado los módulos de deformación de algunos de los hormigones estudiados.

En la tabla 6 se presenta los valores medios, determinados para cada tipo de hormigón, los valores estimados a partir de la ecuación nº 5 CEB y también la resistencia media determinada en probetas cilíndricas.

Tabla 8. Módulo de elasticidad de los hormigones.

Referencia	$f_c$ 28 (Mpa)	E (Mpa)	E est (CEB) (Mpa)	E /E est
	48,0	29.861	36.267	0,82
<b>Rn</b>	44,2	27.158	35.284	0,77
<b>Rp</b>	32,5	25.294	31.649	0,80
<b>Rr 40</b>	51,7	28.159	37.176	0,76
<b>rn 10</b>	41,2	26.058	34.467	0,76
<b>Rn 20</b>	46,2	27.048	35.808	0,77
<b>Rn 40</b>	50,0	28.795	36.764	0,78
<b>Rp 40</b>	40,1	26.198	34.157	0,77
<b>HO</b>	38,1	29.416	33.580	0,88

En la tabla 9 son presentados los valores medios de la densidad en seco, de la resistencia a compresión determinada en probetas cilíndricas, del módulo de elasticidad determinado conforme citado anteriormente y los valores estimados a partir de la ecuación n° 4 del Instituto Japonés de Arquitectura.

Tabla 9. Módulo de elasticidad de los hormigones reciclados.

Referencia	$f_c$ (Mpa)	$d_s$ Kg/m <sup>3</sup>	E (Mpa)	E est (J) (Mpa)	E/E est (J)
<b>Rr</b>	48,0	2131	29.861	29.014	1,03
<b>Rn</b>	44,2	2148	27.158	28.176	0,96
<b>Rp</b>	32,5	2129	25.294	23.841	1,06
<b>Rr 40</b>	51,7	2113	28.159	29.731	0,95
<b>Rn 10</b>	41,2	2152	26.058	27.279	0,95
<b>Rn 20</b>	46,2	2100	27.048	27.846	0,97
<b>Rn 40</b>	50,0	2109	28.795	29.155	0,98
<b>Rp 40</b>	40,1	2099	26.198	25.924	1,01

### Durabilidad

La mayor porosidad de los áridos reciclados los sitúan como “sospechosos potenciales” frente a los procesos que pueden afectar la durabilidad de las estructuras en hormigón armado.

### Carbonatación

Muchas investigaciones han sido desarrolladas en el intento de cualificar y cuantificar el comportamiento de los hormigones de áridos reciclados frente al ataque del CO<sub>2</sub> y los resultados no son concomitantes.

El árido reciclado puede funcionar como un foco de propagación de la carbonatación, porque no impide el paso del CO<sub>2</sub> como un árido convencional. Este efecto dependerá fuertemente de

la relación entre las porosidades del mortero del nuevo hormigón y de la del mortero adherido al árido reciclado. (Barra)<sup>(18)</sup>

#### Retracción por secado

En Europa no se utiliza la fracción reciclado 0-2 mm debido a la fuerte absorción del agua. La retracción en el caso de que ésta fracción se utilice puede aumentar hasta un 70% con respecto a la del hormigón con áridos convencionales.

La retracción por secado de los hormigones reciclados sin la fracción 0/2 mm, carece de importancia cuando la cantidad árido reciclado presente (>2mm) no supera el 30%. Para el caso de un 100% de árido reciclado (>2mm) la retracción es un 28 % superior a la del hormigón sin árido reciclado. (Gómez, J.M.)<sup>(19)</sup>.

#### Fluencia

Como en el caso anterior los hormigones que contienen hasta un 30% de árido reciclado (<2mm) no presentan aumentos importantes. Para una sustitución del 100%, la fluencia total casi cuadruplica la de referencia. (Gómez, J.M.)<sup>(19)</sup>.

### **Referencias Bibliográficas**

1. Vazquez, E.: Recycling of aggregates in Spain, in Int. Work. on Rec. Con. Proc. pp27-42, JSPS, Tokyo, 2000.
2. Hansen, T. C.: Recycling of demolished concrete and masonry. Report of Technical Committee 7-DRC Demolition and Reuse of Concrete, RILEM, E&FN Spon, 1992.
3. Hendriks, C. F.: Certification system for aggregates produced from building waste and demolished buildings, in Proc. Int. Conf. Environmental Implications of Construction Materials and Technology Developments, pp 821-834, Elsevier, Maastricht, 1994.
4. Schulz, R. R.: The processing of building rubble as concrete aggregate in Germany, in Proc. 3d Int. RILEM Symp. Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, E&FN Spon, pp105-116, 1994.
5. NEN 5905: 1997 Aggregates for concrete; Materials with a density of at least 2000 kg/m<sup>3</sup>, 1997.
6. Danish Concrete Association: Guidelines for application of recycled aggregate in concrete, 1989.
7. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, DafStb-Richtlinie: Beton mit rezykliertem Zuschlag, 1998.
8. Iida K., Saeki T., Nagataki S. (2001) An integrated concrete recycling system including cement. *Concrete library of JSCE*, N° 38, pp. 95 – 103.
9. Hansen, T. C.: Recycling of demolished concrete and masonry. Report of Technical Committee 7-DRC Demolition and Reuse of Concrete, RILEM, E&FN Spon, 1992.

10. Tsuji, M., Sawamoto, T., Kimachi, Y.: Technical method to improve properties of recycled aggregate in concrete on Rec. Con, Tokyo, vol 1, pp 157-176, 2000.
11. Barra, M., Vázquez, E.: Properties of concrete with recycled aggregates: Influence of properties of the aggregates and their interpretation, Int. Symp. Sust. Constr: Use of Recycled Concrete Aggregate, Proc. pp 19-30, Thomas Telford, London, 1998.
12. Helene, P., Terzian, P.: Manual de dosagem e controle do concreto, Editora Pini, Sao Paulo, 1992.
13. Abrams, D. A.: Effect of time of mixing on the strength of concrete, The Canadian Engineer, 25<sup>th</sup> July, 1<sup>st</sup> Aug., Reprinted by Lewis Institute, 1918.
14. Helene, P.: Controle de qualidade do concreto, Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Un. De Sao Paulo. 1981
15. Hansen, T. C.: Recycling of demolished concrete and masonry. Report of Technical Committee 7-DRC Demolition and Reuse of Concrete, RILEM, E&FN Spon, 1992.
16. Ravindrarajah, R. S., Tam, T. C.: Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregates, Magazine of Concrete Research, Proc. of 2on Int. RILEM Symp.on Demolition and Reuse of Concrete and Mansory, vol 2, Nihon Daigaku Kaikan, Tokyo, Chapman & Hall, pp 575-584, 1988.
17. Kakizaki, M.: Strength and elastic modulus of recycled aggregate concrete, Proc. of 2on Int. RILEM Symp.on Demolition and Reuse of Concrete and Mansory, vol 2, Nihon Daigaku Kaikan, Tokyo, Chapman & Hall, pp 565-574, 1988
18. Barra, M., Vázquez, E.: Particularidades do processo de carbonatação en concretos de agregados reciclados, CONPAT 97, Proc. Vol.1, pp 217-224, Univ.Fed.RGS, Porto Alegre, 1997.
19. Gomez, J.M, Vázquez E., Agulló L. Strength and Deformation Properties of Recycled Agrégate Concrete, Proz. Fifth CANMET/ACI Int. Conference Recent Advances in Concrete Technology, Suppl. Papers, pp 103-120, Singapur, 2001.



## **GREENER CONCRETE FOR SUSTAINABLE CONCRETE CONSTRUCTION**

Tarun R. Naik

Director, UWM Center for By-Products Utilization  
Department of Civil Engineering and Mechanics  
University of Wisconsin-Milwaukee, P.O. Box 784, Milwaukee, WI 53201

*Over 4.5 billion tones (5 billion tons) of non-hazardous by-product materials are produced each year in the United States. It consists of by-products from agricultural sources, domestic sources, industrial sources, and materials processing sources. This paper presents the use of used foundry sand, foundry slag, post-consumer glass, wood ash, and residual solids from pulp and paper mills. Results have shown that structural-grade concrete can be produced by utilizing these by-product materials.*

Keywords: By-products materials, concrete, foundry sand, foundry slag, post-consumer glass, pulp/paper residual solids, wood ash.

### **INTRODUCTION**

In the United States, each year, more than 4.5 billion tones (5 billion tones) of non-hazardous materials from agricultural sources, industrial sources, and cement- & concrete-making and other materials processing sources, are produced. Some of these materials, also generally referred to as post-consumer wastes and industrial by-product materials, are readily recyclable. The most successful examples being coal fly ash in making high-quality, durable concrete, as well as recycling of old concrete demolition materials for aggregates to make new concrete. Such well established and successful by-product materials are not covered in this paper. Some of the more

recently (since about 1990s) established success stories of use of by-products in concrete, such as used foundry sand and cupola slag from cast-metals industries, post-consumer mixed colored broken glass, wood ash from pulp mills, saw mills, and wood-products manufacturing industries, as well as sludge from primary clarifiers at pulp and paper mills and de-ink solids from paper recycling companies, are discussed in this paper. Recent concrete construction demonstration information using such by-products is also given in this paper.

### **USE OF USED FOUNDRY SAND AND CUPOLA SLAG IN CONCRETE**

Metal casting industries use sand molds to cast materials into desired shapes. Cores are used in the sand molds to shape the casting. Metal casting industry (foundry) by-products are produced mainly by core-making and sand molding operations in foundries. The remainder is generated primarily by melting operations (as cupola slag), and minor contributions from cleaning of castings and dust collectors. The foundry by-products primarily include used foundry sand, slag, and bag-house dust. Foundry sand consists of clean, uniformly sized, high-quality silica sand that is bonded with a binder to form molds for ferrous (iron and steel) and non-ferrous (copper, aluminum, brass) metal castings. The automotive industry and its parts suppliers are the major generators of foundry by-products in USA.

U.S. foundries generate approximately 15 million tones of by-products annually. The commonly used green sands for molds making are composed of four major materials: sand, clay,

additives, and water. Sand usually constitutes 50 to 95% of the total materials in a molding <sup>1</sup>. Clay acts as a binder for the green sand. The major types of clay used are Bentonites (western and southern), Fireclays, and other clays such as Illite and Halloysite. Amount of clays varies from four to ten percent of the green sand mixture. Cores are composed primarily of silica sand with small percentages of either organic-type or inorganic-type binders. The organic binders include oil, synthetics, cereal proteins, etc. The inorganic binders include portland cement, fly ash, and sodium silicate. Typical physical properties of foundry sand are shown in Table 1.

Table 1. Typical Physical Properties of Foundry Sand

Property	Results	Test Method
Specific Gravity	2.39	ASTM D854
Bulk Relative Density, kg/m <sup>3</sup>	2590	ASTM C48/AASHTO T84
Absorption, %	0.45	ASTM C128
Moisture Content, %	0.1 – 10.1	ASTM D2216
Clay Lumps and Friable Particles	1- 4.4	ASTM C142/AASHTO T112
Coefficient of Permeability, cm/sec	10 <sup>-3</sup>	AASHTO T215/ASTM D2434

Naik<sup>1</sup> has reported physical and chemical properties of clean/new and used foundry sand. Used foundry sand properties vary due to factors such as the type of foundry processing equipment used, types of additives used for mold making, number of times sand is re-used, and type and amount of binder used. Used foundry sand particles are weaker than regular concrete sand particles.

Foundry cupola slag has been used as coarse aggregates in concrete. Naik, et al.<sup>2</sup> have reported that the unit weight ( $1280 \text{ kg/m}^3$ ) of foundry slag is lower when compared with normal weight aggregate ( $2400 \text{ kg/m}^3$ ) but higher than the structural lightweight aggregate ( $1120 \text{ kg/m}^3$ ). The SSD absorption was lower for foundry slag relative to the structural lightweight aggregate. The soundness of foundry slag was equivalent to the structural lightweight aggregate.

### **Applications of Used Foundry Sand**

Some work indicated replacement of regular concrete sand by used foundry sand up to about 8% only by weight.<sup>2</sup> However, extensive investigations by Naik, et al.<sup>2,3</sup> have revealed that foundry sand can be used as a replacement of regular concrete sand up to 35% by weight, to meet various requirements of structural-grade concrete; but, test results showed small loss in concrete strength due to the use of the used foundry sand. Further investigations<sup>4</sup> established that this loss could be compensated through the judicious use of Class C fly ash in foundry sand concrete.

Naik et al.<sup>4</sup> have reported the development of concrete mixtures incorporating used foundry sand with compressive strength of 42 MPa at the age of 28 days. Ratio of used foundry sand to replaced regular concrete sand was between 20 to 40%. Class C fly ash was also used as an additional cementitious material up to 25% of total cementitious material used. Tests were performed for compressive strength, flexural strength, modulus of elasticity, and abrasion resistance. Based on the test results, they concluded that inclusion of foundry sand up to 40% replacement of regular concrete sand produced compressive strength equivalent to that of the control concrete (42 MPa). Even 40% foundry sand mixture showed slightly higher strength than

the control concrete. The effect of foundry sand and fly ash on the flexural strength of concrete mixtures was similar to that observed for the compressive strength; and the modulus of elasticity of concrete was not considerably affected by the inclusion of foundry sand. Furthermore, concrete mixtures with and without foundry sand exhibited high resistance to abrasion also.

Naik, et al.<sup>2</sup> also evaluated the performance of foundry by-products in concrete and masonry products. Two series of mixtures were made. In the first series, air-cooled foundry slag was used as a partial replacement (50 and 100%) of coarse aggregate. In the second series, foundry sand was used as a partial replacement (up to 35%) of fine aggregate for masonry blocks and paving stones. Test results indicate that: (1) Compressive strength of concrete decreased slightly due to the replacement of regular coarse aggregate with foundry slag, (2) Masonry blocks made with up to 35% used foundry sands passed ASTM requirements for compressive strength, absorption, and bulk density. Fig. 1 shows the bricks made of used foundry sand.

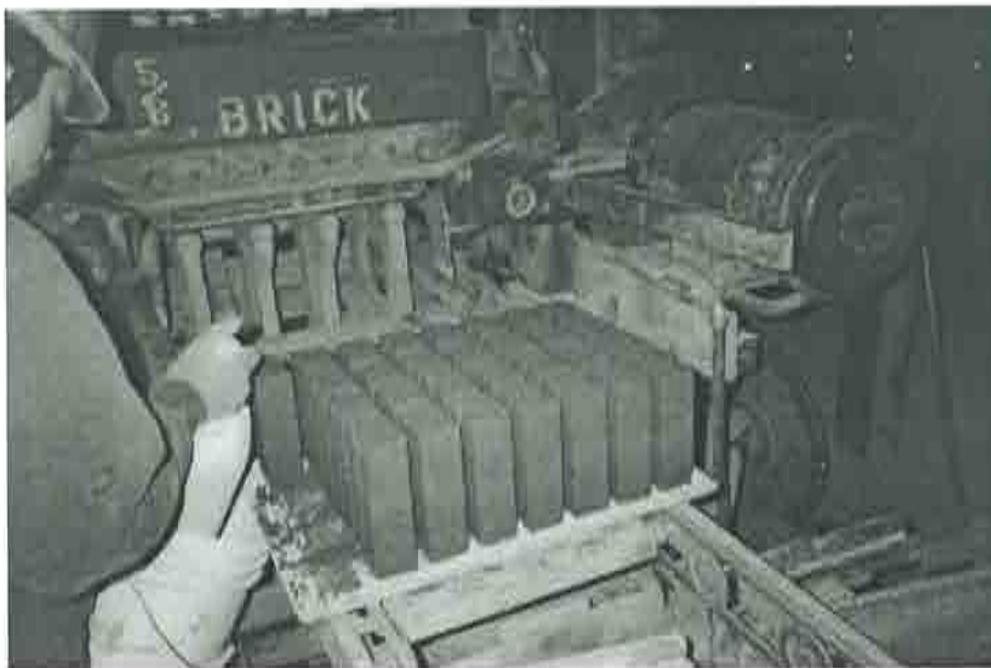


Fig. 1 Manufacturing of bricks with used foundry sand.

Naik, et al.<sup>5</sup> reported the use of used foundry sand in the performance of controlled low strength material (CLSM) and its leaching assessment. CLSM mixtures were proportioned for a compressive strength levels of 0.3 to 0.7 MPa at 28 days. They used two sources of ASTM Class F fly ash and two sources of used foundry sand as a replacement for the fly ash in the range of 30-85%. Test results indicated that: (1) Excavatable flowable slurry incorporating foundry sand as a replacement of fly ash up to 85% can be produced. (2) Water permeability of CLSM mixtures was relatively unaffected by the inclusion of foundry sand for fly ash replacement up to 70%. (3) Foundry sand caused reduction in concentration of certain contaminants. The use of used foundry sand in CLSM slurry, therefore, provided a favorable environmental performance.

### **Applications of Foundry Slag**

Naik et al.<sup>2</sup> have demonstrated that foundry cupola slag is appropriate for a use as coarse semi-lightweight aggregate in cement-based materials. Foundry slag was used as a replacement of normal weight aggregate (in the 50-100% range) in manufacture of structural-grade concrete. In fact, total replacement of normal weight aggregates with cupola slag produced higher strength concrete.

### **Concluding Remarks**

Used foundry sand can be used as a replacement of regular concrete sand in manufacture of portland cement concrete, cast-concrete concrete products, flowable slurry (CLSM), and other cement-based materials of construction. Cupola slag from steel and iron foundries can also be successfully used in making semi-lightweight structural concrete.

## **USE OF POST-CONSUMER GLASS IN CONCRETE**

Approximately ten million tonnes of post-consumer glass by-product is produced each year in the USA. About 3.4 million tonnes were used primarily as cullet for glass manufacturing.<sup>6</sup> Glass consists primarily of silica or silica sand and smaller amounts of lime sand, and soda ash. Three types of glass, namely borosilicate, soda lime, and lead glass are generally manufactured. The chemical composition of these glasses are presented in Table 2.<sup>6</sup> The majority of glasses manufactured in the USA are soda-lime variety. Crushed glass has a unit weight of approximately 1120 kg/m.<sup>3</sup>

### **Applications of Post-Consumer Glass**

Some limited applications of post-consumer glass have been found in asphaltic concrete mixtures commonly known as glassphalt. Naik and Kraus<sup>7</sup> demonstrated that mixed colored broken glass can be utilized in flowable concrete. They further reported that flowable concrete incorporating mixed glass exhibited decreased permeability, which would be a benefit for the potential future leaching. Efforts have been made in the concrete industry to use post-consumer glass as a partial replacement of the coarse aggregate or fine aggregates. Due to the strong reaction between the alkali in cement and the reactive silica in glass (alkali-silica reaction – ASR), the use of glass in concrete as part of the coarse aggregate must be managed with use of Class F fly ash. Naik and Wu<sup>8</sup> studied the feasibility of using crushed post-consumer glass as a partial replacement of sand in concrete. In order to minimize the deleterious reactions between the alkali in cement and silica in crushed post-consumer glass, they used Class F fly ash with cement replacement of 15, 30, and 45% by weight. For each combination of cement and fly ash, 15, 30, and 45% of sand was replaced with crushed glass. Compressive and splitting tensile strengths were determined for each mixture. Alkali-Silica reaction was also evaluated. Based on the test results, they concluded: (1) The compressive strength of concrete is slightly reduced when sand is partially replaced by crushed glass. (2) Crushed glass is highly reactive in alkali-silica reaction. Expansion of mortar bars without fly ash increased almost linearly with the increase of crushed glass. (3) At the cement replacement level (up to 30%), fly ash acts only as the delayer of the onset of expansion, but long-term expansion is still high. (4) The deleterious expansion can be successfully suppressed by 45% or higher cement replacement with Class F fly ash, regardless of the amount of crushed glass in concrete.

Table 2 - Chemical Composition of Glass <sup>6</sup>

Constituent	Borosilicate	Soda-Lime	Lead
SiO <sub>2</sub>	81	73	63
R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2	1	1
Na <sub>2</sub> O	4	17	7
K <sub>2</sub> O	-	-	7
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13	Trace	-
CaO	-	5	-
MgO	-	3	-
PbO	-	-	22

Most types of glass do not contain material that can have any adverse environmental impact. However, leachate from lead glass may have negative environmental impact on ground water quality due to the presence of lead. Use of glass containing lead in structural-grade concrete may be acceptable due to encapsulation characteristics of the concrete; allowing addition of the leaded-glass in concrete without any significant environmental impact.

### Concluding Remarks

Post-consumer mixed colored glass can be used as a partial replacement of fine aggregates in regular and flowable concrete, as well as in CLSM. However, it would be necessary to use effective Class F coal fly ash in appropriate amount to control expansion related to ASR.

## USE OF WOOD ASH IN CONCRETE

Wood ash is generated due to combustion of wood products for energy production at pulp and paper mills, saw mills, and wood-products manufacturing facilities. Wood burned for fuel consists of saw dust, wood chips, bark, saw mill scraps, hard-chips rejected from pulping, excess from screenings such as sheaves, primary residuals without mixed secondary sludge, etc. Typically other supplementary fuels, such as coal, petroleum coke, oil, and gas, are also used along with wood. Physical and chemical properties of wood ash are of special importance in determining their beneficial uses. These properties are influenced by species of trees, tree-growing regions and conditions, method and manner of combustion including combustion temperature, efficiency of the boiler, and other supplementary fuel used with wood. Wood ash is composed of both inorganic and organic compounds.

### Properties of Wood Ash

Naik<sup>10</sup> determined physical and chemical properties of wood ashes derived from over 15 different wood-burning boilers. The SEM micrographs indicate wood ashes as a heterogeneous mixture of particles of varying sizes, which were often angular in shape. Some wood fly ash particles have cellular structure, which are unburned, or partially burned wood or bark particles. A Typical SEM picture of wood ash is shown in Fig. 2. Chemical composition of wood ash is given in Table 3.

The average moisture content values for the wood ash studied, were about 13% (ranged from 0.1% to 78.9%) for fly ash and 22% (ranged from 0.2% to 68.8%) for bottom ash. Test

results for unit weight or bulk density (ASTM C 29) exhibited average density values of 490 kg/m<sup>3</sup> (ranged from 365 to 920 kg/m<sup>3</sup>) for fly ash and 827 kg/m<sup>3</sup> (ranged from 663 to 977 kg/m<sup>3</sup>) for bottom ash. Specific gravity (ASTM C 188) tests showed an average specific gravity value of 2.48 (varied between 2.32 to 2.76) for wood fly ash; and values for bottom ash showed an average specific gravity value of 1.65 (varied between 1.55 to 1.75). The average saturated surface dry (SSD) moisture content (ASTM C 128) values were 10.3% (varied between 10.0 to 10.5) for coarse fly ash and 7.5% (varied between 7.3 to 7.7) for bottom ash. The average cement activity index ASTM C 311/C 109 at the age of 28 days for fly ash was about 66% (varied between 48.9% to 89.8%) of the control. The average water requirement (ASTM C 311) for fly ash exhibited a value of 116% (varied between 103 to 122). Autoclave expansion tests for fly ash exhibited a low average expansion value of 0.2 percent. Overall, the wood fly ash had properties in between Class C coal fly ash and volcanic ash.<sup>10</sup>

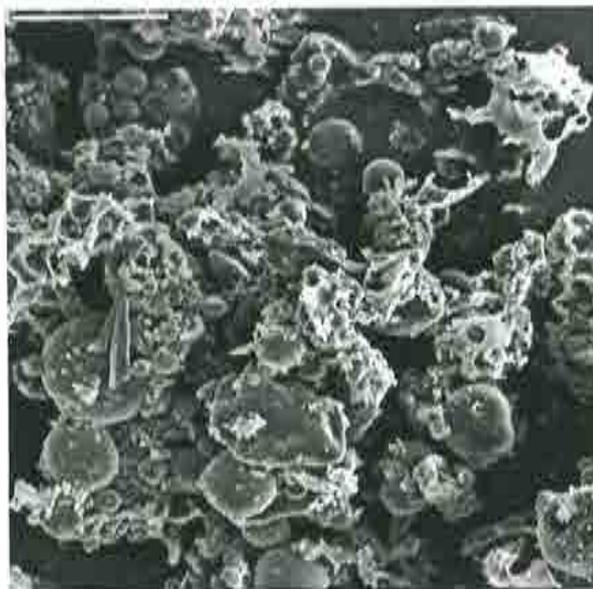


Fig. 2 Typical SEM picture of ash produced by burning wood and coal as combined fuels

Table 3. Chemical Composition of Wood Ash

Analysis Parameter	Fly Ash		Bottom Ash		ASTM C 618		
	Average (%)	Range (%)	Average (%)	Range (%)	Class N	Class C	Class F
Silicon Dioxide, SiO <sub>2</sub>	26.5	4.0-59.3	42.3	32.2-50.7		-	-
Aluminum Oxide, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.0	5.0-17.0	17.9	15.5-20.3		-	-
Iron Oxide, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.4	1.0-16.7	12.6	4.7-20.8		-	-
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40.7	10.0-72.2	73.8	56.9-93.4	70 Min	50.0 Min	70.0 Min
Calcium Oxide, CaO	16.0	2.2-36.7	11.4	4.2-22.2		-	-
Magnesium Oxide, MgO	3.0	0.7-6.5	2.5	0.9-4.8		-	-
Titanium Oxide, TiO <sub>2</sub>	0.51	0.0-1.2	1.0	0.7-1.5		-	-
Potassium Oxide, K <sub>2</sub> O	5.0	0.4-13.7	1.3	0.5-2.2		-	-
Sodium Oxide, Na <sub>2</sub> O	1.7	0.5-14.3	0.9	0.5-1.3		-	-
Sulfate, SO <sub>3</sub>	4.8	0.1-15.3	0.4	0.1-0.7	5.0 Max	5.0 Max	5.0 Max
Loss on Ignition, LOI	23.4	6.7-58.1	9.9	1.4-33.2	10.0 Max	6.0 Max	6.0 Max.*
Moisture Content	2.6	0.1-21.5	0.6	0.2-0.9	3.0 Max	3.0 Max	3.0 Max
Available Alkali, Na <sub>2</sub> O Equivalent (ASTM C 311)	3.3	0.4-20.4	N. A.	N. A.	1.5 Max	1.5 Max.**	1.5 Max.**

\* Under certain circumstances, up to 12% max. may be allowed

\*\* Optional, required for ASR minimization, N. A. = Not Available

### Uses of Wood Ash

Approximately 70% of the wood ash generated in the U.S.A. is landfilled. Additional 20% is applied on land as soil supplement. The remaining 10% have been used for miscellaneous applications<sup>12</sup>. Based on the physical, chemical, and morphological properties, Naik and Kraus<sup>11</sup> reported that wood ash has a substantial potential for use as a pozzolanic mineral admixture and an activator in cement-based materials. They carried out extensive study on the use of wood ash in the making of concrete and CLSM. They reported air-entrained concrete with upto 35% of wood ash, to achieve a compressive strength of 35 MPa, which is very suitable for many structural applications.

Naik, et al.<sup>13</sup> carried out production of concrete mixtures incorporating wood fly ash. These mixtures were developed to have wood ash contents of approximately 15%, 25% , and 35% as a partial replacement of cement. Some mixtures were produced with blends of wood ash and Class C fly ash. Two levels of blended ash of approximately 25% and 35% were used. Tests were performed for fresh concrete properties, compressive strength, and splitting tensile strength. Based on the test results, they concluded that: (1) Pozzolanic contributions of wood ashes were found to be significant. (2) Blending of wood ash and Class C fly ash resulted in significant improvement in performance of concrete. (3) Structural-grade concrete can be made using wood ash and/or its blends to achieve a compressive strength up to 50 MPa at the 28-day age. A construction demonstration was carried out with the production of structural-grade concrete at Rothschild, Wisconsin, in 2001. Figs. 3 through 5 show the part of the construction activities.



Fig. 3. Concrete made with wood ash



Fig. 4 Wood ash concrete being placed over wood ash flowable slurry base



Fig. 5 Finishing operations

### **Concluding Remarks**

Source of wood products along with other types of fuels burned with wood and type of combustion boiler affects the physical & chemical composition and morphology of the wood ash produced. Typical wood ashes tested from USA and Canada have higher than normally desirable loss-on-ignition (i. e., unburned organic matter). Wood ashes have significant pozzolanic property, typically found to be higher than natural pozzolans but lower than ASTM Class C coal fly ash. Structural-grade concrete and cast-concrete products have been manufactured using wood fly ash.

## USE OF PULP AND PAPER MILLS RESIDUAL SOLIDS IN CONCRETE

More than four million tonnes of the pulp and paper mill residual solids from primary clarifiers are generated in the USA. Pulp and paper mill sludge (or residual solids when water content is reduced) is composed of cellulose fibers (and occasional wood particles), clay, ash-bearing compounds, chemicals, and moisture. About half residuals are landfilled, a quarter is incinerated, and the rest is utilized in some way. Applications for the sludge includes mine reclamation, farmland soil improvement, bulking agent for composting, raw material for composting, filler in recycled paperboard, oil absorbent granules, cat litter, additive in cement manufacture, etc.<sup>14</sup> The composition of a typical sludge is composed of moisture (75%), solids (25%), ash (7.8%), nitrogen (740 ppm), kjeldahl nitrogen (sum of organic and ammonia nitrogens) (740 ppm), potassium (20 ppm), phosphorus (102 ppm), calcium (2670 ppm), magnesium (234 ppm), sulfur (15 ppm), boron (0.5 ppm), chloride (185 ppm), iron (1280 ppm), manganese (3.0 ppm), molybdenum (4.2 ppm), zinc (170 ppm), nickel (1.1 ppm), lead (5.3 ppm), mercury (0.1 ppm), chromium (4.2 ppm), copper (7.0 ppm), organic carbons (12.0%), and PCB (2.5 ppm)<sup>14</sup>.

### Previous Research

Approximately 300 kg of sludge is produced for each tonne of paper. Soroushian, et al.<sup>15</sup> used recycled fibers for production of extruded thin-sheet cement products. Test results showed improvement in flexural strength and toughness but at reduced stiffness.

Naik<sup>14</sup> studied the use of de-ink residual solids and primary clarifier residual solids in

concrete. These solids had moisture content of about 50% and specific gravity of about two. Organic content and ash content were both about 50%. Before mixing, the residual solids were pre-mixed with water and high-range water reducing admixture (HRWRA) to de-flocculate them. Mixtures of concrete were produced with residual solid contents of 0 to 1.2% by weight of the concrete mixture (0 to 45 lbs/cu. yd.). At 28-day, compressive strength, splitting tensile strength, and flexural strength of concrete containing de-ink residual solids were about 50 to 65%, 65 to 75%, and 45 to 65% of the corresponding strengths of the control concrete (with 0% residual solids).

### **Current Research**

Naik<sup>14</sup> have examined the use of primary clarifier residual solids from many different sources of pulp and paper mills for use in ready-mixed concrete. They reported that: (1) the moisture content ranged from about 84% to 220 percent. Overall, mean value was about 140 percent. (2) Specific gravity ranged from 0.89 to 1.88. Overall average was about 1.6. (3) Unit weight of residual solids ranged between 119-343 kg/m<sup>3</sup>. Overall average was about 220 kg/m<sup>3</sup>. (4) Overall, presence of CaO (0.55 to 31.46%), SiO<sub>2</sub> (9.29 to 21.78), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (3.37 to 19.13), MgO (0.20 to 1.70), and TiO<sub>2</sub> (0.04 to 4.62) were dominant among oxides. LOI at 1000°C varied between 55.4 to 83.8.

Naik<sup>14</sup> made several series of concrete mixtures containing residual solids. While calculating water to cementitious materials ratio (W/Cm), all the water contained in residual solids was included in the amount of water added to the concrete batch. Water contained in HRWR was also taken into account. The percentage of residual solids was expressed on as-

received basis. The mixture had cement content of  $364\text{kg/m}^3$ , sand content  $849\text{kg/m}^3$ , coarse aggregate content of  $1026\text{kg/m}^3$ , and residual solid content between 0.35 to 0.65%. Compressive was determined, and the results are shown in Fig. 6. Strength results showed that it is possible to get equal strength regardless of residual solid content. Similar results were obtained for splitting tensile strength, flexural strength, and modulus of elasticity.

It was reported by Naik<sup>14</sup> that use of residual solids increased impenetrability of chloride ions in the concrete. Length change of residual solid concrete was comparable to that of the control concrete. Residual solid concrete showed higher resistance to salt-scaling and freezing and thawing than control concrete.

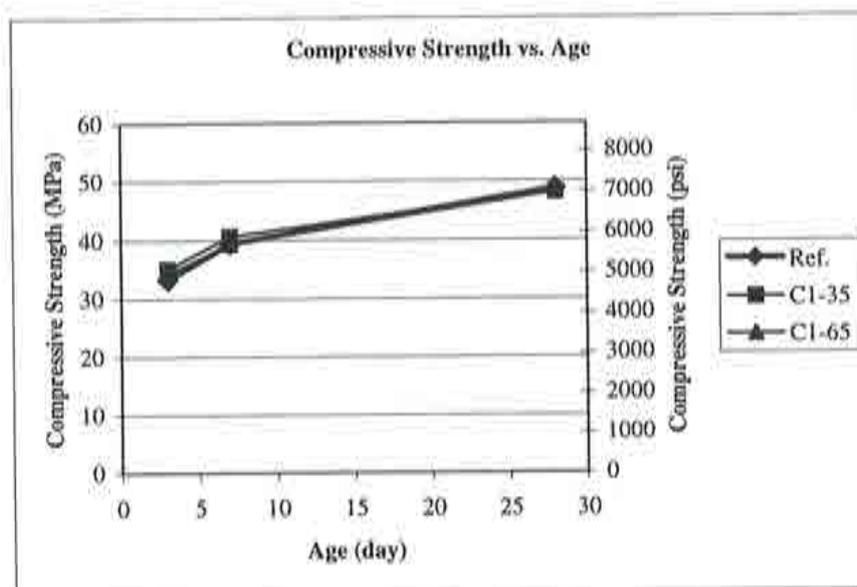


Fig. 6 Compressive strength of concrete

### **Concluding Remarks**

Pulp and paper mills residuals, as well as de-ink solids from paper recycling plants, should be properly dispersed in water, preferably using hot water, before using such sludges in making structural-grade portland cement concrete. Concrete with improved penetration to chloride-ions and improved freezing and thawing resistance can be made, without loss of strength characteristics for such concrete, using residual solids from pulp and paper mills and paper recycling plants.

### **GENERAL CONCLUSIONS**

By-product materials, such as used foundry sand, cupola slag, post-consumer mixed color broken glass, wood ash, and pulp and paper mills residual solids including de-ink solids, can be effectively used in cement-based materials such as structural-grade concrete, dry-cast and wet-cast precast concrete products such as bricks, architectural panels, as well as flowable slurry.

### **REFERENCES**

1. Naik, T. R., "Foundry Industry By-Products Utilization." CBU-1989-01, UWM Center for By-Products Utilization, University of Wisconsin-Milwaukee, 1989, 23 pages.
2. Naik, T. R., Singh, S. S., Tharaniyil, M. P., and Wendorf, R. B., "Application of Foundry By-Product Materials in Manufacture of Concrete and Masonry Products." ACI Materials Journal, Vol. 93, No. 1, 1996, pp. 41-50.

3. Naik, T. R., and Singh, S. S., "Flowable Slurry Containing Foundry Sands", *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 9, No. 2, 1997, pp. 93-102.
4. Naik, T. R., Singh, S. S., Kraus, R. N., Ramme, B. W., and Domann, R. A., "Enhanced Materials for Concrete Construction Using Foundry By-Products." V. M. Malhotra, Editor, *CANMET/ACI International Symposium on "Sustainable Development and Concrete Technology"*, San Francisco, AC, September 2001.
5. Naik, T. R., Singh, S. S., and Ramme, B. W., "Performance and Leaching Assessment of Flowable Slurry," *ASCE Journal of Environmental Engineering*, Vol. 127, No.4, April 2001, pp.359-368.
6. Miller, R. H., and Collins, R. J., "Waste Materials as Potential Replacements for Highway Aggregates." NCHRP Report No. 166, TRB, NRC, Washington D.C., 1976, 94 pages.
7. Naik, T. R., and Kraus, R. N., "Use of Glass Cullet as Aggregates in Flowable Concrete with Fly Ash," CBU-1999-03, UWM Center for By-Products Utilization, University of Wisconsin-Milwaukee, February, 1999, 6 pages.
8. Naik, T. R., and Wu, Z., "Crushed Post-Consumer Glass as a Partial Replacement of sand in Concrete." V. M. Malhotra, Editor, *Fifth CANMET/ACI International Conference on Recent Advances of Concrete Technology*, Singapore, July 29-Aug 1, 2001.
9. Campbell, A. G., "Recycling and Disposing of Wood Ash," *TAPPI Journal*, TAPPI Press, Norcross, GA, Vol. 73, No. 9, September 1990, pp.141-143.
10. Naik, T. R., "Tests of Wood Ash as a Potential Source for Construction Materials," CBU-1999-09, UWM Center for By-Products Utilization, University of Wisconsin-Milwaukee, Milwaukee, August 1999, 61 pages.

11. Naik, T. R., and Kraus, R. N., "Wood Ash: A New Source of Pozzolanic Material," Submitted to ACI Concrete International, October 2001, 23 pages.
12. National Council for Air and Stream Improvement, Inc. (NCASI), "Alternative Management of Pulp and Paper Industry Solid Wastes," Technical Bulletin No. 655, NCASI, New York, NY, November 1993, 44 pages.
13. Naik, T. R., Kraus, R. N., Singh, S. S., Pennock, Lori-Lynn C., and Ramme, B. W., "Greener Concrete from Wood Fly Ash and Coal Fly Ash," V. M. Malhotra, Editor, CANMET/ACI International Symposium on Sustainable Development and Concrete Technology," , San Francisco, September 2001.
14. Naik, T. R., "Use of Residual Solids from Pulp and Paper Mills for Enhancing Strength and Durability of Ready-Mixed Concrete," CBU-2002-03, UWM Center for By-Products Utilization, University of Wisconsin-Milwaukee, January 2002, 67 pages.
15. Soroushian, P. Shah, S. P., and Won, J. P., "Optimization of waste paper fiber-cement composites," ACI Materials Journal, Vol. 92, No. 1, Jan- Feb 1995, pp. 82-92.



## SISTEMA INTEGRADO DE TOMA DE DECISIONES PARA PROYECTO Y OBRA

**Antonio Aguado de Cea y Gaizka Ormazabal**

E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos  
Universidad Politécnica de Cataluña  
E-mail: antonio.aguado@upc.es

### **Resumen:**

La evolución del mercado y por ende de la demanda del sector de la construcción hace que hoy en día sea cada vez más necesario el desarrollo de un plano transversal de estudio que integre las diversas vertientes del proyecto en vistas a buscar una mayor competitividad y la sostenibilidad de la estructura. La nueva clave del éxito no será ya tan sólo la alta productividad, sino la gestión orientada a los requerimientos de cada cliente y la capacidad de adaptarse a una demanda y un entorno en cambio continuo y rápido. Dicho plano transversal está constituido por los aspectos de gestión del proyecto, en los que adquiere una singular importancia el problema de la toma de decisión.

Desde esta perspectiva, en lo relativo a la vertiente metodológica, este artículo presenta un instrumento de toma de decisiones de nueva creación, al que se denomina IDS (Integrated Decision System) Ormazabal (2001). Dicho sistema se articula en torno a dos conceptos que constituyen los ejes principales de la propuesta: el valor y el riesgo. Por otro lado, la razón de ser de la denominación de "sistema" corresponde a su concepción como conjunto de elementos: conceptos, formulaciones, métodos y herramientas.

La propuesta se define y describe con un carácter general, aplicable a cualquier ámbito de la gestión, si bien se adapta y particulariza el estudio para el campo específico de la gestión de proyectos constructivos. Asimismo, se ha explorado su potencialidad a través del estudio de su aplicabilidad, en primer lugar en el ámbito de una técnica de gestión, la metodología del valor o *Value Management*, y posteriormente en el campo más general de la gestión de proyectos o *Project Management*. En el primer caso se ha realizado también un estudio para su aplicabilidad en el seno del sector de la construcción española. Finalmente se hace una ulterior investigación de la aplicabilidad del sistema propuesto en el ámbito de la gestión de organizaciones.

De entre todas las potenciales aplicaciones, este artículo centra su atención en la aplicación de la toma de decisiones entre una solución de hormigón realizada in situ o bien prefabricada.

**Palabras claves:** Sostenibilidad, sistema integrado, análisis de valor, estructuras hormigón, prefabricación

## 1. INTRODUCCIÓN

La trascendencia de la toma de decisión en la gestión de proyectos constructivos es algo universalmente reconocido, tanto en el mundo profesional como en el ámbito académico (Heredia, 1995; Kenzner, 2001; Serer, 2001). La cuestión empezó a tratarse de forma teórica en el ámbito de la economía y la gestión empresarial. Entre las aportaciones más notables desde el punto de vista histórico destacan, entre otras, las de Von Neumann y Morgenstern (1947), Allais (1953), Ellsberg (1954 y 1961), Keeney y Raiffa (1976), Simon (1979) y Kahnemann y Tversky (1979).

Sin embargo, a lo largo de los años empezó a despertarse el interés por la cuestión en el ámbito de la construcción (e.g. Stone, 1966; Markus, 1973; Hutton y Devonald, 1973; Burt, 1978), hasta el reciente desarrollo de diversos modelos para la toma de decisión en diversos aspectos de la gestión de la construcción, principalmente entorno a la contratación (e.g. Pedwell et al., 1998; Alhazmi et al., 2000; Ashraf y Metwally, 2000; Al-Subhi, 2001) y el diseño (Wong et al. 2000; Rogers, 2000).

En el marco de la prefabricación, el problema de la toma de decisión adquiere especial relevancia al plantearse el frecuente dilema entre la ejecución *in situ* y una posible solución prefabricada. La cuestión no es trivial, ya que en ella inciden aspectos no sólo de carácter técnico, sino que la creciente complejidad de la demanda del sector de la construcción, motivada por los recientes cambios que ha experimentado nuestra sociedad, hacen que intervengan cada vez más parámetros en la toma de decisión. A las cada vez más exigentes variables tradicionales: el coste, el plazo y la calidad, se añaden nuevos requisitos como la seguridad de los operarios, el respeto al medioambiente o el ahorro de recursos naturales.

En este marco, el presente artículo propone la aplicación de una herramienta de toma de decisiones denominada IDS (Ormazabal, 2001) en la elección entre una solución *in situ* y otra prefabricada. Las siglas IDS son un acrónimo de "Integrated Decision System". El citado instrumento aporta un modelo o estructura de razonamiento para el o los responsables de tomar la decisión que integra los diversos aspectos anteriormente mencionados.

También se incorpora un aparato matemático que a través de la lógica difusa ("fuzzy logic") permite una evaluación flexible de las diversas alternativas, teniendo en cuenta que algunos de los parámetros serán de carácter cuantitativo (costes, plazos, variables físicas) y otros tendrán un cariz más intangible (aspectos estéticos, sociales, etc.).

Por consiguiente, el objetivo del sistema de decisiones propuesto es servir de apoyo metodológico para conseguir un estudio más riguroso de la decisión, objetivizándola al máximo e integrando de forma coherente las diversas vertientes y las múltiples variables del problema, las cuales dependerán de las características del caso considerado.

Para dar una visión de la aplicabilidad del sistema integrado de toma de decisiones se desarrolla un ejemplo, en el que se adopta una discusión entre una solución *in situ* de hormigón u otra solución prefabricada

## 2.- MARCO GENERAL DEL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN

En muchos sectores industriales han existido tradicionalmente una mayor receptividad hacía aspectos de calidad, seguridad, costes, medio ambiente, sociales, etc, que la existente en el sector de la construcción, lo que ha llevado a creer a numerosos técnicos que se trata de un sector muy diferente donde no se pueden introducir todos los planteamientos que son válidos en otros sectores.

Esta percepción es un error en sus aspectos conceptuales, ya que el proceso constructivo constituye un ciclo, como al que estamos más acostumbrados del ciclo del agua o del ciclo de vida de envases. Las diferencias vienen de las condiciones de contorno y del tiempo de vida útil, que en el caso de la construcción, suele trascender a la vida profesional o real de los agentes que intervienen en la misma. Ese ciclo de vida que representa al sector puede verse en la figura 1.

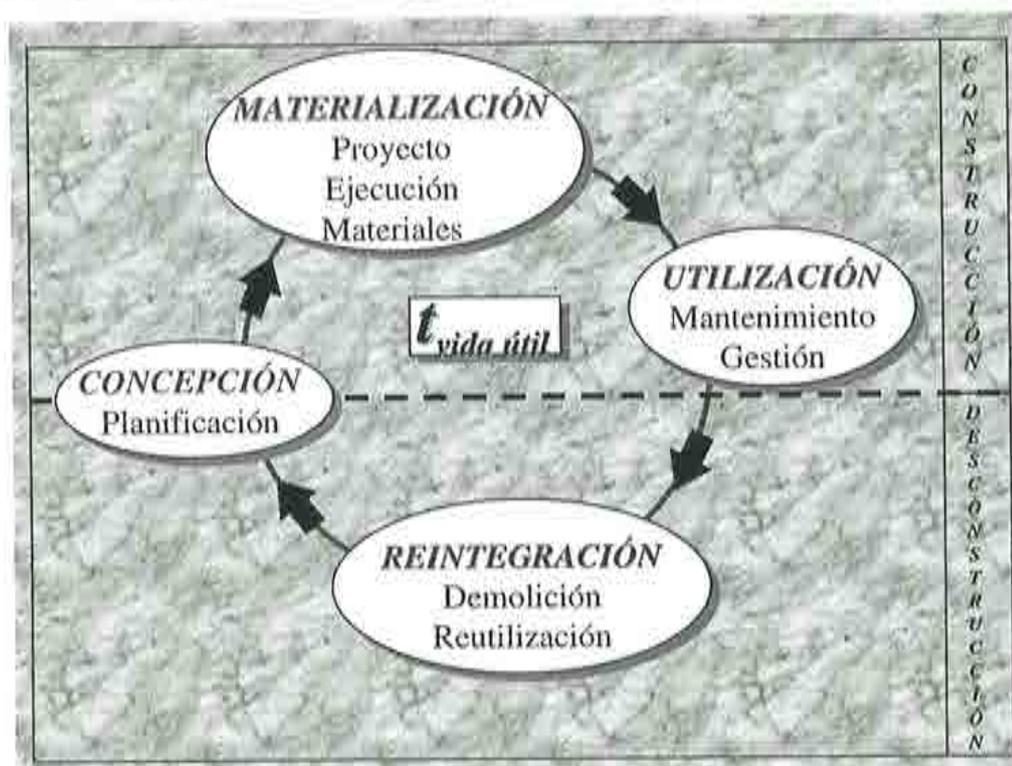


Figura 1. Ciclo de vida del sector de la construcción (Aguado, A. y Casanova, I. 1997)

El **alcance** del ciclo descrito en la figura 1 sería completo de los denominados ciclos *de la cuna a la tumba*, ya que comienza en la planificación de la obra o estructura y termina, con la reintegración de la misma a las condiciones inicialmente previstas en aras a mantener un desarrollo sostenible. Ahora bien, no siempre el análisis corresponderá a toda la vida útil de la estructura u obra, sino a parte de ella o algunas de las etapas, como elemento de comparación relativo, entre dos o más productos diferentes. De ahí surge la necesidad de definir los **límites de los sistemas** que se quieran estudiar, sin que por ello tenga que olvidarse de la visión global, ya que el resultado final será la suma de los logros conseguidos en cada una de las etapas.

El proceso constructivo que se pretende reflejar en la citada figura 1 se entiende que constituye como un *organismo vivo*, con una estructura lineal, formado por numerosas *células* y que cada una de estas células contiene la misma filosofía de trabajo. Por ello en la figura 2 se pretende reflejar lo que sería una célula base del sistema, en la que existen unas entradas, unos procesos, unas salidas.

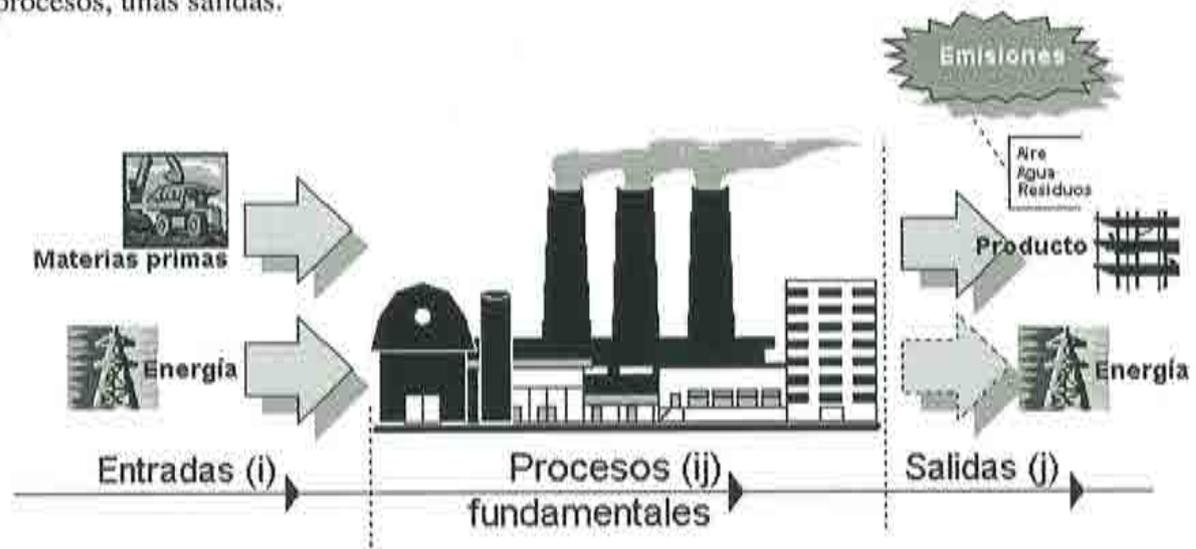


Figura 2.- Célula base de relación

Dentro de cada célula básica, en la parte de procesos, existen 3 tipos:

- Procesos estratégicos
- Procesos fundamentales
- Procesos de soporte

Los *procesos estratégicos* son aquellos que no están en la cadena de producción pero son necesarios para la visualización del producto y su uso, por ejemplo, las campañas de propaganda de un determinado producto, o las campañas de imagen de la empresa o marca.

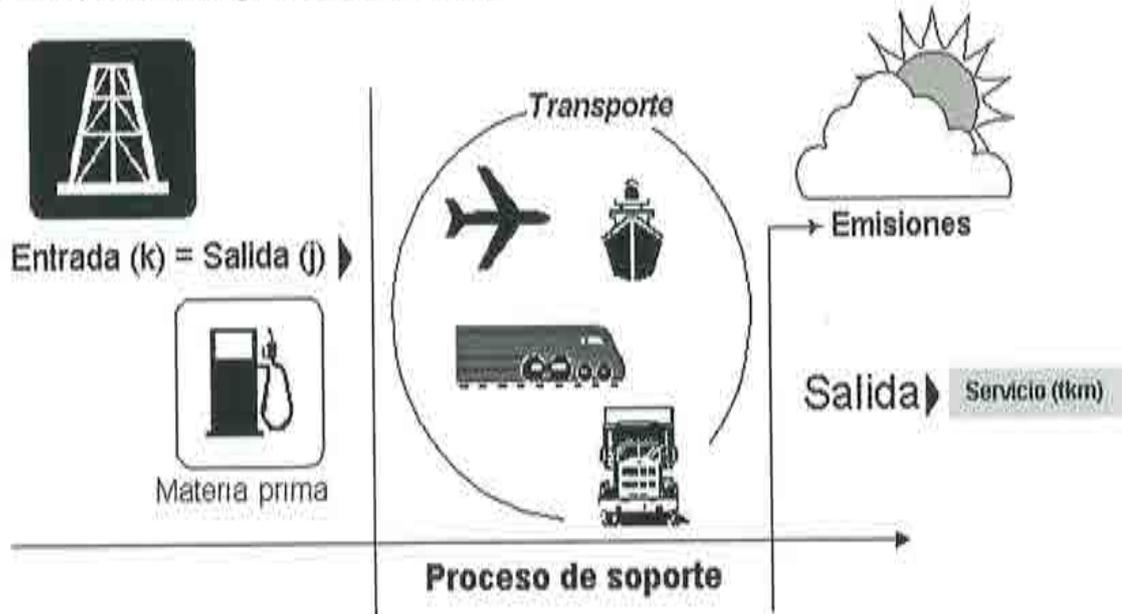
Los *procesos fundamentales*, Corresponden a los procesos específicos de producción de un producto o un servicio, por ejemplo, la cadena de montaje de un producto industrial (coche, televisor, etc). Estos son los usualmente considerados en temas medioambientales, por ejemplo, evaluación a través del Análisis del Ciclo de Vida.

Mientras que los *procesos de soporte* son procesos de apoyo para dar competitividad a un producto o un servicio, por ejemplo, los procesos de gestión económica e informática. En definitiva, todos aquellos, que sin ser básicos en la fabricación, son complementarios en dicho período.

Con frecuencia, con relación a los **procesos**, sólo se hace referencia a los denominados procesos fundamentales en la nomenclatura actual (asociados a los aspectos productivos directos), no incidiéndose en los denominados procesos estratégicos ni en los procesos de soporte. Esta simplificación puede ser razonable en la mayoría de las células básicas en las que

se divida el proceso, pero esa sistemática no consideración puede conducir a olvidos o derivas sobre temas estratégicos, que, en definitiva responden a satisfacción del cliente, esto es sobre la calidad. La consecuencia de esos olvidos o derivas puede ser muy negativa para la empresa por razones estratégicas.

Por otro lado, en ese afán de ver todas las etapas como un conjunto de procesos integrados hay que contemplar todos y en ellos, evidentemente, se incluyen los transportes, esto es los temas de logística, los cuales son determinantes en la calidad. En la figura 3 se muestra en la misma configuración que la figura 2, el transporte como un proceso, con el conjunto de entradas, operaciones y salidas.



*Figura 3.- Visualización de un transporte como un proceso*

Si se ha bajado al detalle de la visualización del servicio transporte como un proceso, ahora conviene subir mentalmente a la abstracción de ver el proceso general como un sistema complejo en el que además de la estructura lineal que puede suponer el desarrollo del ciclo de vida en los temas de calidad se superpongan otros planos de prescripciones. Esta idea se intenta visualizar en la figura 4, en la que se aprecia en 3 dimensiones el conjunto de prescripciones, las etapas, etc.

Todo ello puede ser tratado de forma matemática, ya sea de forma determinista o con herramientas de matemáticas difusas, en aras a obtener unos productos que cumplan todas las prescripciones y sean considerados de valor. Para ello hay que evitar errores por indefinición de los límites del sistema y subsistemas considerados en cada caso, lo cual resulta determinante en este planteamiento. Evidentemente, en una estructura de sumatorios como la que se presenta, los subsistemas pueden articularse como se estimen oportuno, si bien deben sumar entre todos el 100 %, esto es que no queden lagunas ni que existan superposiciones.

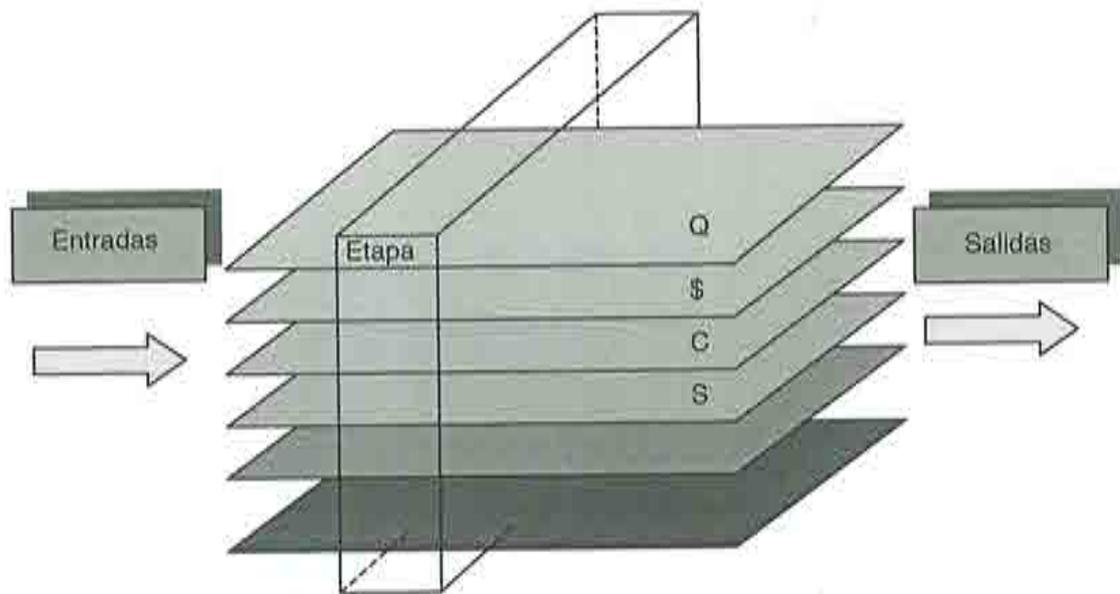


Figura 4.- Visualización en 3 dimensiones del proceso global con todos los requisitos y etapas

En la actualidad existen métodos de evaluación en cada uno de los planos, si bien el tratamiento integrado de todos ellos, está en primeras fases, resultando, en numerosos casos, difícil la integración fruto de la incompatibilidad de los sistemas de estudio.

Además, como ya se ha puesto de manifiesto, existen dificultades en la definición de los límites de los sistemas y, lo que es más complejo, en la adopción de unos pesos, en la toma de decisiones, en función del punto de vista del que hace el análisis o bien de los sujetos que intervienen en el proceso.

### 3. LA HERRAMIENTA DE ANÁLISIS: EL SISTEMA IDS

El sistema IDS se estructura en tres elementos principales (Ormazabal, 2001):

- el concepto de VALOR y su modo de medición o evaluación
- el concepto de RIESGO y su tratamiento matemático
- un proceso metodológico denominado ACE con relación a sus fases principales (Análisis, Creatividad y Evaluación), donde se integran los dos elementos anteriormente especificados.

#### 3.1. El valor. Concepto y medición.

Para la definición del concepto de valor se introduce el modelo sistémico recogido en la figura 5. Tal como se observa en ella, el valor de una alternativa relativa a una cierta decisión a tomar en el marco del desarrollo de un proyecto de construcción se define como el grado de satisfacción que produce, medido como la respuesta a los requerimientos del proyecto, considerando diversos planos: económico (\$), temporal (T), funcional (F), social (S) y medioambiental (M).

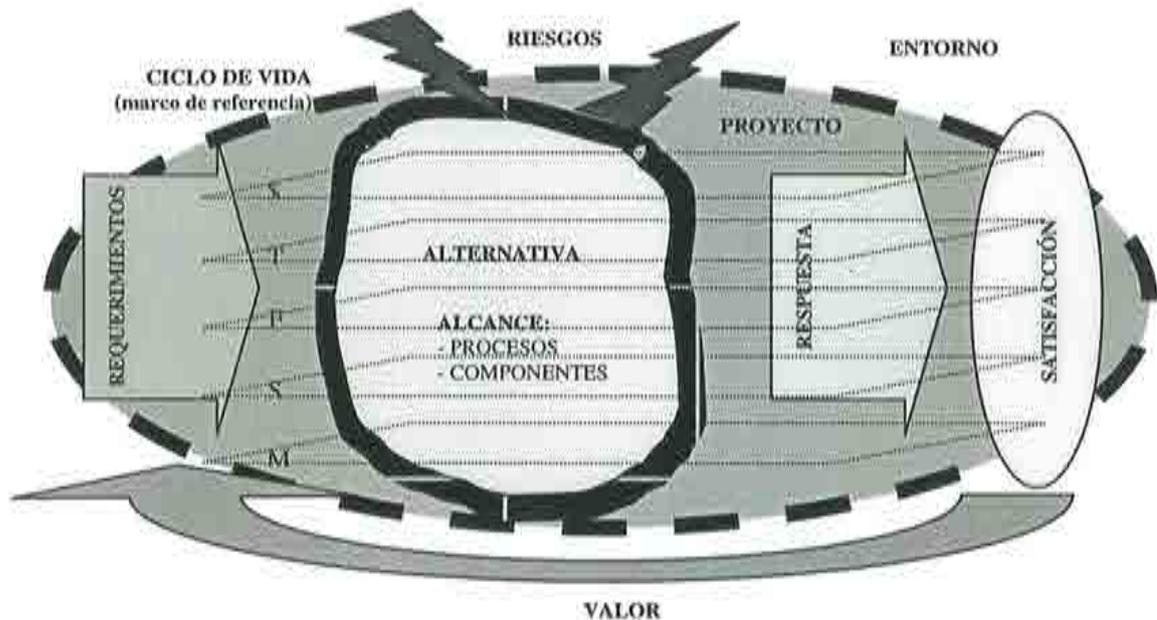


Figura 5.- Elementos principales de la definición sistémica del valor adaptada a proyectos constructivos (Ormazabal, 2001)

La medición del valor se articula a través de una función,  $v(x)$ , definida entre 1 y -1 que representa el grado de satisfacción que produce un parámetro de respuesta respecto a un cierto requerimiento. Las funciones de valor de los diversos requerimientos se integran mediante un árbol de requerimientos, donde se pondera la importancia relativa de cada uno de ellos y sus relaciones correspondientes. El despliegue de dicho árbol dará pie al cálculo del valor global de la alternativa, medido mediante las expresiones (1) y (2).

$$V = \sum_{i=1}^{n_1} k_{i_1}^1 \cdot \left( \sum_{i_2=1}^{n_2} k_{i_2}^2 \cdot \dots \left( \sum_{i_m=1}^{n_m} k_{i_m}^m \cdot v_{i_m}^m(x_1^{i_m}, x_2^{i_m}, \dots, x_{i_m}^{i_m}) \dots \right) \right) \quad (1)$$

$$\text{donde } v_{i_m}^m(x_1^{i_m}, x_2^{i_m}, \dots, x_{i_m}^{i_m}) = \sum_{k=1}^{n_m} w_k^{i_m} \cdot v_{i_m}^m(x_k^{i_m}) \quad (2)$$

donde  $v_j^i(\cdot)$  son las funciones de valor de los diversos requerimientos,  $x_j^i$  los parámetros de respuesta,  $k_j^i$  es el peso relativo de cada (sub)requerimiento según el árbol definido y  $w_j^i$  la importancia relativa de los diversos parámetros que intervienen en la evaluación de un cierto requerimiento. La ponderación de los pesos se realizará aplicando el método AHP (Analytical Hierarquy Process) de Saaty (1980), a través de una comparación por pares de los mismos, según se describe en Ormazabal (2001).

## 2.2. El riesgo. Concepto y tratamiento matemático.

El concepto de riesgo se define como una incertidumbre en el juicio por la falta de conocimiento perfecto en la previsión de los resultados relativos a los diversos planos de estudio considerados o por la posible variación de estos a causa de sucesos o agentes que

tengan influencia sobre la realidad considerada. Se distingue, por tanto, entre dos tipos de riesgo, con un tratamiento matemático diferenciado:

- *riesgos especulativos*: se define así la incertidumbre asociada al conocimiento de un cierto resultado.
- *riesgos puros*: son los factores que pueden producir una variación en el valor del proyecto, produciendo una modificación en los parámetros de respuesta (sobrecostes, retrasos, etc.).

El tratamiento de los riesgos especulativos se articula a través del uso de la matemática difusa (fuzzy logic), usualmente aplicada en el entorno de las técnicas de inteligencia artificial. En concreto, se diseñan un elemento al que se le denomina "trapecio difuso" (figura 6) y que constituye la base del planteamiento. Según se observa en la figura, dicho trapecio modeliza la incertidumbre asociada al conocimiento de un cierto parámetro (por ejemplo el coste o el tiempo de ejecución de una determinada unidad de obra). En él se representa un intervalo más probable (a,b), y dos intervalos donde es menos posible que se encuadre el valor numérico del parámetro (a-b y c-d). El grado de posibilidad se modeliza mediante la función de pertenencia,  $\mu(x)$ , usual en el ámbito de la matemática difusa.

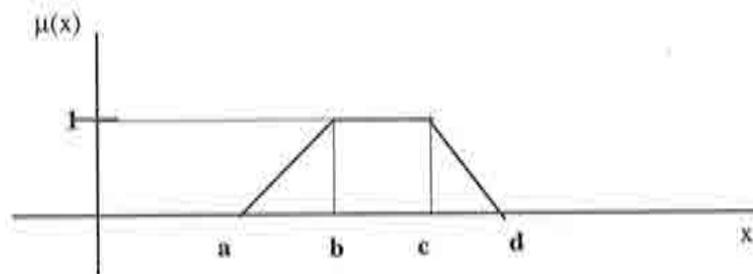


Figura 6.- Trapecio difuso genérico

La ventaja principal de este nuevo planteamiento es que evita el uso de la probabilidad, lo cual es especialmente importante en un sector como la construcción, donde los productos son singulares y no existe la repetibilidad necesaria para plantear la evaluación de probabilidades.

Por otro lado, la evaluación de los riesgos puros se articula mediante una función de severidad, definida como la pérdida de valor que produce el factor de riesgo respecto al requerimiento considerado. Su medición se define a partir de la función de valor inicialmente planteada, según las expresiones (3) y (4), visualizada en la figura 7.

$$s(y, x_0) = \text{abs}(v(x_0) - v(y)) \quad (3)$$

donde "y" es el valor del parámetro x tras el impacto del factor de riesgo considerado, es decir,

$$y = x_0 + \Delta x \quad (4)$$

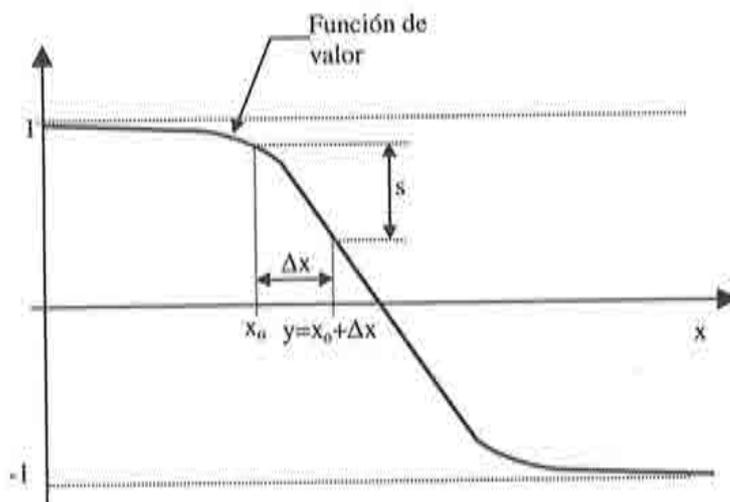


Figura 7.- Definición de la severidad a partir de la función de valor

A partir de las funciones de severidad relativas a cada uno requerimientos a los que afecta el riesgo puro considerado, se calculará una severidad total del modo análogo al indicado en las expresiones (1) y (2), a través de la media ponderada según la estructura y pesos del árbol de requerimientos. Dicha severidad deberá substraerse del valor inicial, teniendo en cuenta los diversos riesgos puros que intervienen, lo cual se expresa matemáticamente de modo general en la expresión (5)

$$v = v^* - s \quad (5)$$

donde  $v^*$  es el valor calculado sin tener en cuenta la influencia de los riesgos puros y  $s$  es la severidad esperada considerando los distintos riesgos que intervienen ( $R_1, \dots, R_n$ ), es decir,

$$s = P_{R_1} \cdot s_{R_1} + \dots + P_{R_n} \cdot s_{R_n} + P_{R_1 \cap R_2} \cdot s_{R_1 \cap R_2} + \dots + P_{R_1 \cap R_2 \cap \dots \cap R_n} \cdot s_{R_1 \cap R_2 \cap \dots \cap R_n} \quad (6)$$

### 3.3. El proceso ACE de toma de decisión

Los conceptos y modos de evaluación definidos anteriormente se integran en un proceso metodológico denominado ACE (Análisis-Creatividad-Evaluación), cuya estructura es la indicada en la figura 8. Este proceso es una simplificación, entendemos realista, de los planteamientos anglosajones en el ámbito del management.

Según se visualiza en la citada figura, dicho proceso se define de forma flexible, de modo que permite una retroalimentación continua entre sus fases. Por otro lado, dicho proceso se plantea como una estructura de razonamiento, aplicable de modo cuantitativo mediante el uso de los modos de medición anteriormente explicados, o de manera cualitativa, a través de la consideración de los modelos conceptuales y la estructura de trabajo que introduce.

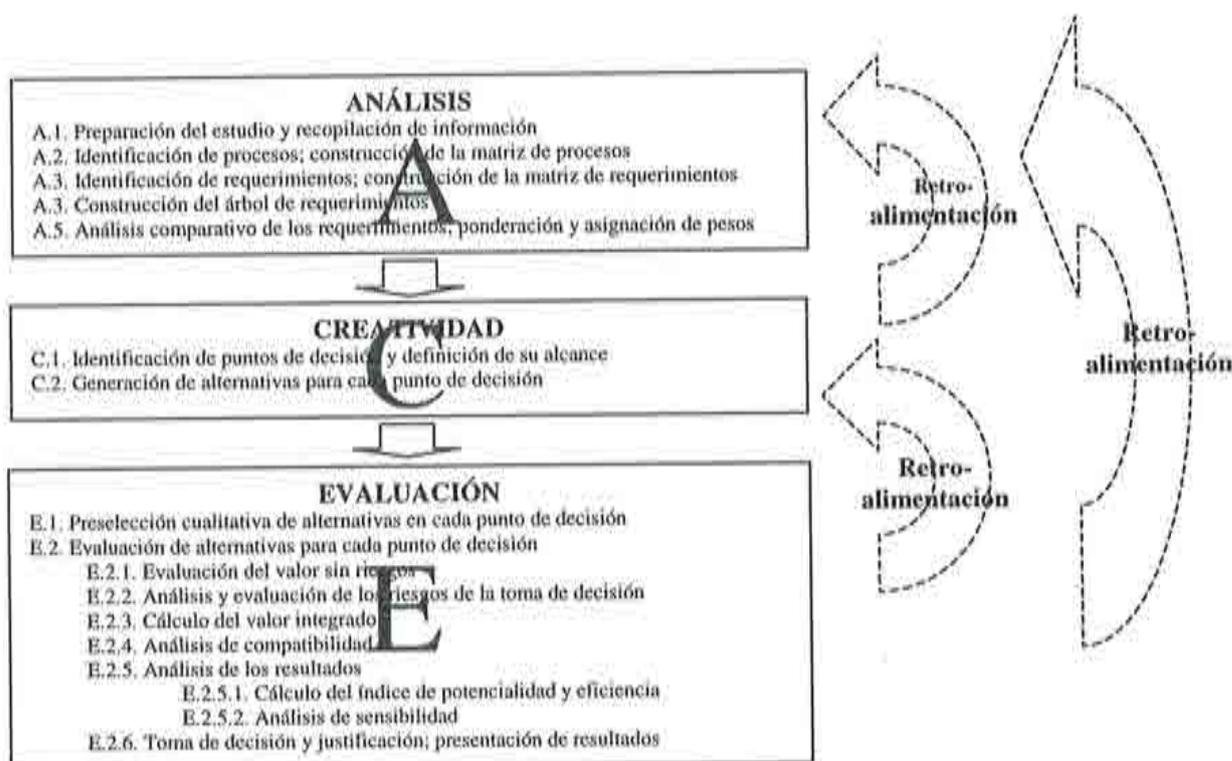


Figura 8.- Esquema del proceso ACE (Ormazabal, 2001)

## 5. CASO DE APLICACIÓN

El presente caso de estudio se encuadra en las obras de una urbanización de la cala Calafató, en Atmetlla de Mar (Tarragona), a pocos metros de la costa, en un paraje de gran valor ecológico. En este caso, la propiedad de la obra corresponde a la promotora VERTIX, y el contratista es la empresa COPCISA. En dicho proyecto se disponen tres obras de drenaje para permitir el flujo de pequeños torrentes hacia el mar por debajo de los viales. En este contexto, se plantea la alternativa de substituir la solución inicial del proyecto, prevista para ejecutar in situ, por una solución con clave prefabricada y hastiales in situ. Ambas alternativas, se representan respectivamente en las figuras 9 y 10.

Como puede observarse en la figura 9, la solución prefabricada se compone de unos hastiales in situ y una clave prefabricada. Ello es debido a la falta de disponibilidad de elementos prefabricados en el mercado. Los hastiales se ejecutarían in situ al no existir en el mercado moldes con tanta altura de hastial para la O.D 1; al ser una obra pequeña ningún industrial está dispuesto a comprar un molde para tan poco metraje. Además, en caso de llevarlo a cabo redundaría en un aumento considerable de plazo. El diseño se modifica ligeramente respecto a la solución inicial por varios motivos. En primer lugar, para adaptar el diseño in situ a los moldes disponibles. Por otro lado, se busca unificar las secciones de la O.D 1 y la O.D 2 a la misma pieza prefabricada para bajar el precio unitario aumentando el número de piezas prefabricadas. Finalmente, se pretende adaptar la sección de la O.D 3 a otra que, en ese momento, se estaba fabricando para otro cliente, lo cual permite bajar el precio al dar continuidad a una producción ya iniciada.

Con el objetivo de discernir si la nueva solución prefabricada es más satisfactoria que la alternativa inicial *in situ* se plantea la aplicación del sistema IDS. Para ello se aplica el proceso ACE anteriormente descrito. El interés de este caso radica en que este tipo de sustitución de bóvedas prefabricadas es muy común en las estructuras de carreteras, y en ocasiones suponen muchos metros lineales, y por tanto grandes sumas de dinero.

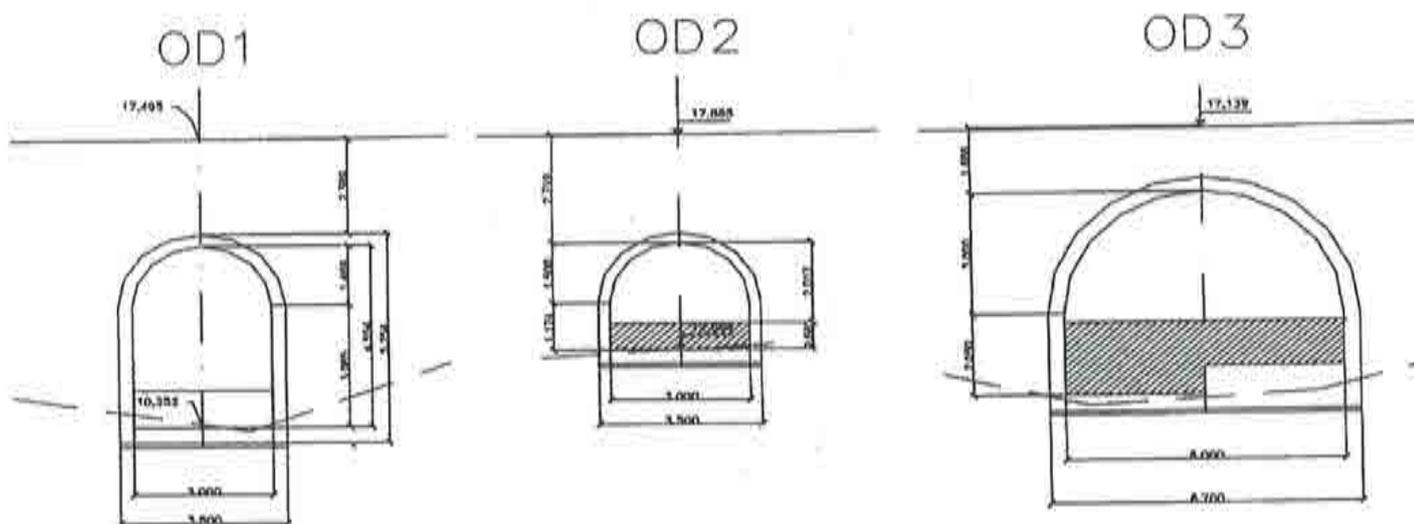


Figura 9.- Secciones prefabricadas

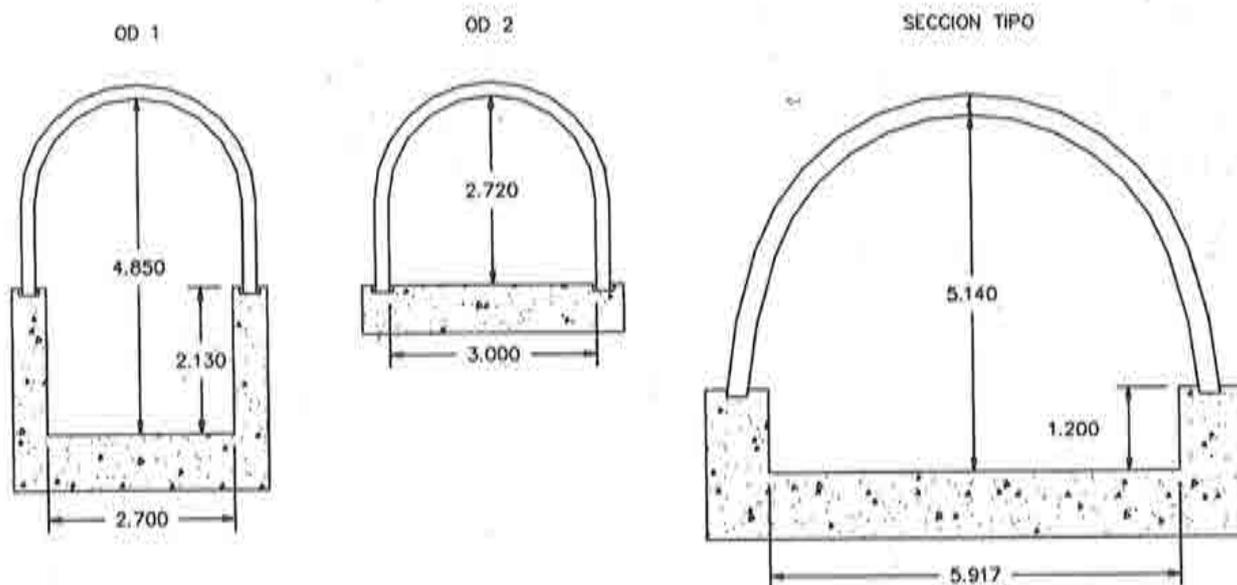


Figura 10.- Secciones *in situ*

### 5.1. Fase de Análisis

La identificación de los requerimientos del proyecto se realiza a través del esquema matricial considerando dos ejes: las diversas etapas del ciclo de vida del proyecto y los planos de análisis integrados en el concepto de valor propuesto, según se mostraba en la figura 5 (económico, temporal, funcional, social y medioambiental). A partir de esta identificación se construye el árbol de requerimientos, mostrado en la figura 11, y se lleva a cabo su ponderación relativa según el método descrito en Ormazabal (2001).

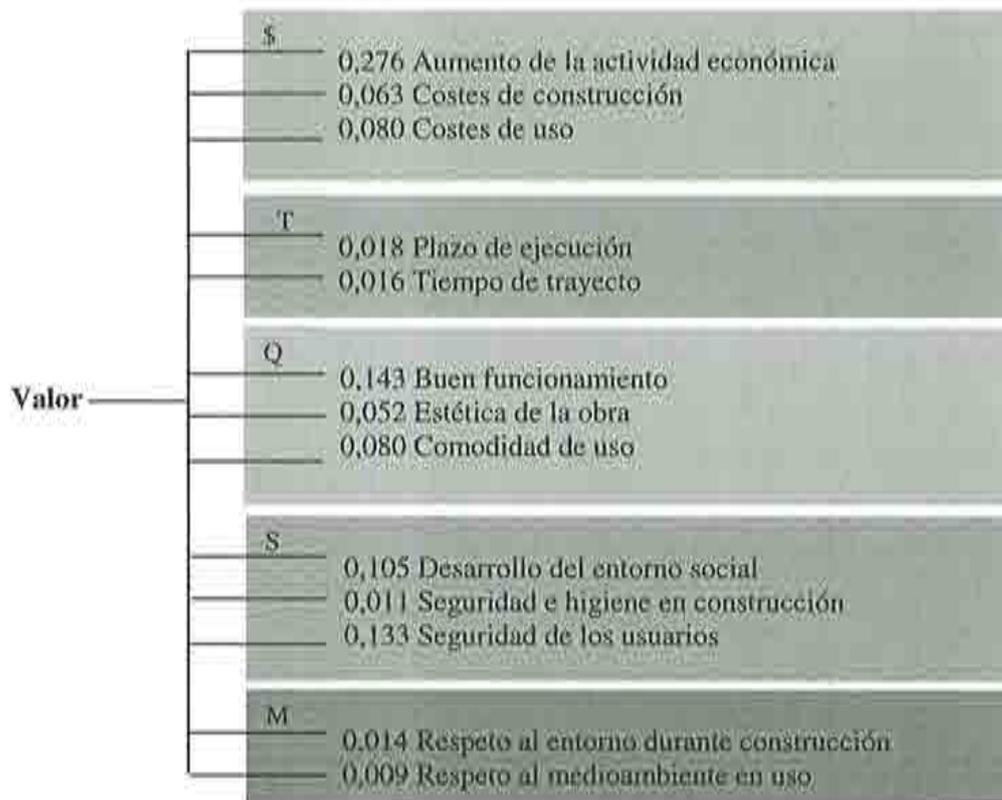
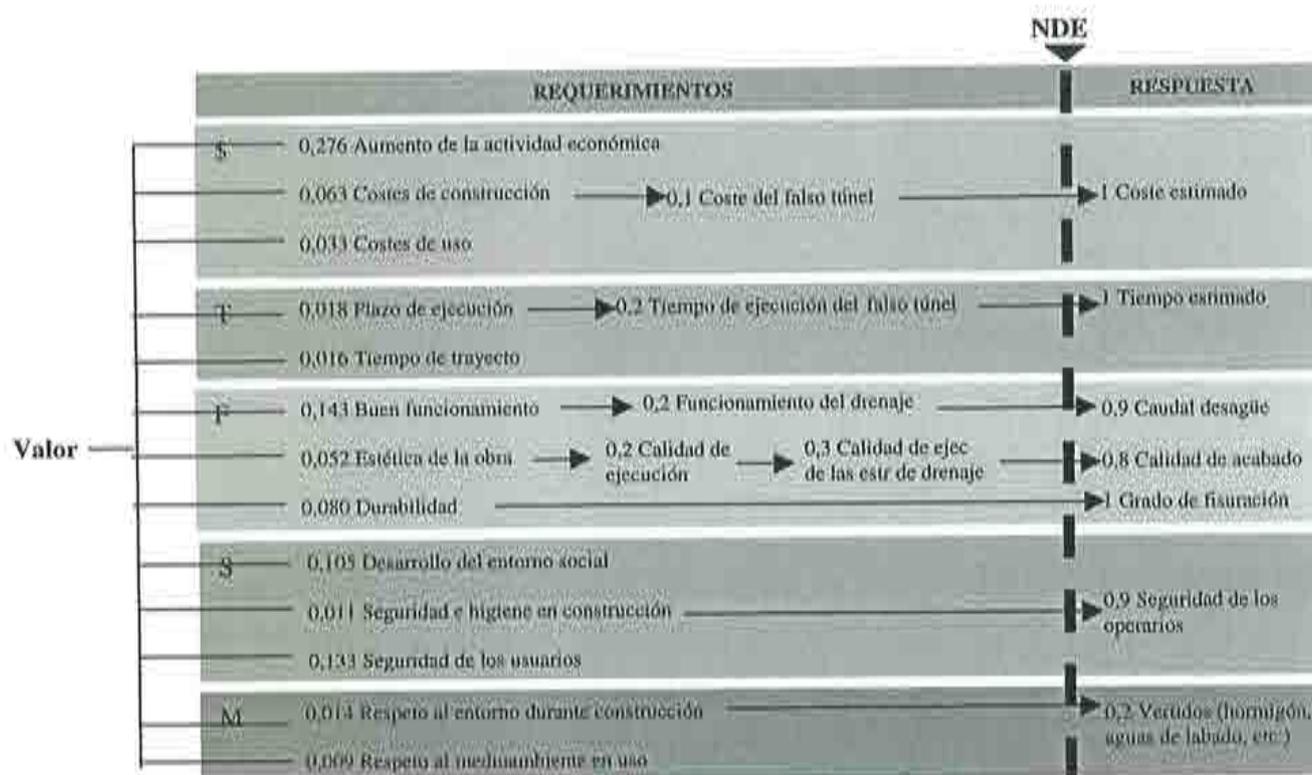


Figura 11.- Árbol de requerimientos del proyecto estudiado

Los requerimientos identificados hacen referencia al conjunto del proyecto, de modo que la decisión aquí considerada no afectará a muchos de ellos. Por otro lado, la figura 11 no se muestran otros requerimientos identificados por considerarlos de menor importancia en el conjunto del valor del proyecto. Como es obvio, en este caso huelga llevar a cabo la fase de creatividad del proceso ACE, pues el punto de decisión y las alternativas ya están fijados.

### 5.2. Fase de evaluación

Para el cálculo del valor sin considerar los riesgos puros de la toma de decisión, el director de obra despliega el árbol inicial de requerimientos identificando los parámetros de respuesta correspondientes según lo indicado en la figura 12.



*Figura 12.- Despliegue del árbol de valor para la evaluación de alternativas (NDE: Nivel deseado de estudio)*

En la figura anterior puede observarse que los parámetros de medición de la respuesta de las alternativas llevan asociado un peso, correspondiente a su grado de participación en el conjunto de la satisfacción del (sub)requerimiento correspondiente.

Respecto al coste, debe considerarse, en primer lugar, que el prefabricado lleva consigo la necesidad de transporte, que en algunos casos redonda de forma importante en el precio. En este caso, dado el tamaño de las piezas, no tiene una gran importancia. Sin embargo, el diseño del prefabricado, más optimizado al ejecutarse con un control más intenso, permite abaratar costes al disminuir factores de seguridad. De hecho, en este caso, la solución prefabricada supone un coste algo inferior a la inicialmente proyectada. Asimismo, la asistencia técnica del prefabricador puede ahorrar horas de ingeniería a la constructora, además de aportarle una experiencia y asesoramiento técnico de gran valor.

En lo relativo al plazo, la prefabricación supone un claro ahorro de tiempo, pues evita los inconvenientes propios de la producción a pie de obra y los tiempos de vertido, vibrado, fraguado desencofrado y curado.

Desde un punto de vista funcional, la prefabricación supone en este caso tres claras ventajas. Por un lado, implica un acabado mejor, consecuencia de un trabajo en condiciones menos adversas. Además, supone una mayor durabilidad, la cual se asocia al nivel de fisuración (se impone el mismo límite al hormigón prefabricado e in situ) y a la  $f_{ck}$ . El prefabricado aportará ventajas en este sentido al conseguir resistencias mayores que las

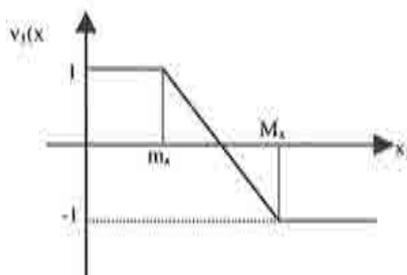
relativas a la ejecución in situ. Finalmente, el mejor acabado del producto prefabricado redunda en una menor rugosidad del conducto de drenaje, lo que implica una mayor capacidad de desaguar (por tener un coeficiente de Manning menor y por tanto un caudal de desagüe mayor), obviamente en igualdad del resto de condiciones ( $R_h$ ,  $i$ ,  $S$ , etc.).

En el plano social, en lo relativo a la seguridad e higiene en el trabajo, al prefabricar se evitan buena parte de los trabajos de obra sobre andamio, lo cual redunda en una disminución de la siniestrabilidad. Finalmente, y aunque en este caso es despreciable, no debe negarse un cierto interés social de la ejecución in situ, al considerar la creación de empleo en la zona del emplazamiento.

Respecto al medioambiente, al prefabricar se evitan vertidos de hormigón en obra, lo cual adquiere especial importancia al considerar el valor ecológico del emplazamiento; en una planta de prefabricados el volumen de hormigón sobrante se minimiza, y los restos –así como las aguas de lavado, etc.- se tratan con mayor pulcritud.

A partir de esta primera evaluación se plantea una cuantificación más detallada, a través de la construcción de las funciones de valor de los requerimientos afectados, recogidas en la figura 13.

#### Funciones decrecientes:

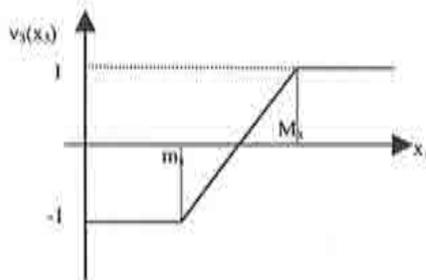


$X_1$ : Coste de las O.D:  $m_x=150.000$  euros  
 $M_x=190.000$  euros

$X_2$ : Tiempo de ejecución de las O.D.:  $m_x = 15$  días y  $M_x = 40$  días

$X_7$ : Vertidos en construcción:  $m_x = 0$  y  $M_x = 10$

#### Funciones crecientes:



$X_3$ : Caudal de desagüe:  $m_x = 600$  m<sup>3</sup>/s y  $M_x = 670$  m<sup>3</sup>/s  
(\* Medido en la OD 3, donde la necesidad de desagüe es mayor)

$X_4$ : Calidad de acabado:  $m_x = 0$  y  $M_x = 10$

$X_5$ : Grado de fisuración:  $m_x = 0$  y  $M_x = 10$

$X_6$ : Seguridad de los operarios:  $m_x = 0$  y  $M_x = 10$

*Figura 13 .- Funciones de valor consideradas en la evaluación de la decisión*

Nota: los valores que no tienen ninguna unidad adjunta se han evaluado mediante puntuación

A partir de este despliegue del árbol se articula la medición según el tratamiento difuso explicado anteriormente. Las estimaciones son las recogidos en la tabla 1.

Parámetros	Medida	Estimación	Solución prefabricada	Solución in situ
X1: Coste de construcción de las OD	Miles de euros	a		
		b	159.000	176.000
		c		185.000
		d		
X2: Tiempo de ejecución de las OD	días	a		
		b	18	30
		c	15	35
		d		
X3: Caudal de desagüe	m <sup>3</sup> /s	a		
		b	660,44	619,17
		c		
		d		
X4: Calidad de acabado	Puntuación	a		
		b	7	5
		c	8	6
		d		
X5: Grado de fisuración	Escala cualitativa del 1 al 10	a		
		b	1	3
		c	2	4
		d		
X6: Seguridad de los operarios	Escala cualitativa del 1 al 10	a		
		b	7	5
		c	8	6
		d		
X7: Vertidos en obra	Escala cualitativa del 1 al 10	a		
		b	8	5
		c	9	6
		d		

Tabla. 1.- Estimaciones relativas a los parámetros de respuesta.

Mediante la agregación y la obtención de las imágenes mediante la función  $v(\cdot)$  se obtiene el resultado para cada alternativa, según se recoge en la figura 14. En este caso particular, al realizarse la estimación por intervalos, los trapecios genéricos a los que se aludía en la figura 2 adoptan una forma rectangular ( $a = b$  y  $c = d$ ).



Figura 14. Resultado de la evaluación de alternativas sin considerar riesgos

A continuación se lleva a cabo la indentificación, análisis y evaluación de riesgos.

*Alternativa 1: Solución prefabricada*

Los riesgos identificados y las medidas de respuesta se recogen en la tabla 2. En dicha tabla se muestran también los parámetros considerados para el cálculo de la severidad una vez adoptadas las medidas de respuesta.

Riesgo considerado		Medida	Parámetros de evaluación de la severidad (xi)
1	Filtración por incorrecto sellado de las juntas.	Ninguna. Se considera que no vale la pena limpiarlo	- Estética de acabado (regueros)
2	Mal acabado por fallos en el montaje (resaltos entre piezas, desconchados por golpes, etc.) o defectos de fabricación	Exigir a la casa de prefabricados la reparación	- Estética de acabado (aunque se repare siempre se ve el mortero o similar)

*Tabla 2.- Medición de los riesgos considerados en la decisión*

Estas pérdidas de calidad de acabado se miden a través de puntuación en una escala del 1 al 10. Para ello se utiliza una vez más el árbol de requerimientos desplegado convenientemente. En este caso, al hacer referencia ambos al mismo parámetro, ya utilizado en el cálculo del valor sin considerar los riesgos puros, no es necesario repetir el proceso de despliegue e identificación de parámetros. Como se observa en la tabla anterior, no se ha considerado la influencia en el coste y el tiempo de construcción. El resultado de la estimación de pérdida de calidad de acabado es la recogida en la tabla 3.

Riesgo	Probabilidad	Medición	Estimación	$\Delta x^1$
R1:	0,2	Pérdida de calidad de acabado (Puntuación)	a	2
			b	2
			c	3
			d	3
R2:	0,3	Pérdida de calidad de acabado (Puntuación)	a	1
			b	1
			c	2
			d	2

*Tabla 3.- Estimación de los riesgos considerados en la decisión*

<sup>1</sup>  $\Delta x$ : posible pérdida producida por el riesgo medida en el parámetro x. Puntuación sobre una escala de 1 a 10

Las probabilidades se calculan de forma subjetiva (no existen en esta caso datos que permitan otra alternativa para su estimación). Por otro lado, la severidad se evalúa según lo explicado en el apartado 2, de modo que, por ejemplo, el riesgo 1 supone una severidad correspondiente a la pérdida de valor que implica la peor calidad de acabado (figura 15).

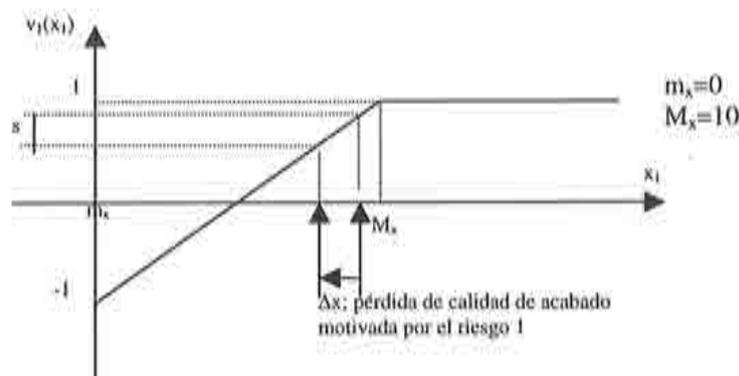


Figura 15.- Visualización de la pérdida de valor producida por el efecto del riesgo

### Alternativa 2: Solución in situ

Riesgos identificados:

	Riesgo considerado	Parámetros de evaluación de la severidad ( $x_i$ )
1	Mala ejecución por defectos de encofrado, amasada de hormigón defectuosa, etc.	- Estética de acabado
2	Sobrecostes	- Aumentos de coste
3	Retrasos	- Aumentos de plazo

Tabla 4.- Medición de los riesgos considerados

Desde el punto de vista del riesgo, el prefabricado aporta otras dos claras ventajas respecto a la ejecución in situ. En primer lugar, esta última presenta el problema de la carencia actual en el mercado de mano de obra especializada. Ello implica que la impericia de los operarios pueda dar lugar a defectos en la ejecución que redundarán, como mínimo, en unas peores características estéticas. Sin embargo, en la industria de la prefabricación, la especialización y la optimización de rendimientos de trabajo es mayor, lo cual reduce el problema.

Por otro lado, no existe incertidumbre sobre los valores del coste y del plazo. En cualquier caso, el coste de la parte prefabricada viene fijado por el contrato, mientras que el plazo no queda totalmente asegurado, pero sí cubierto por penalizaciones contractuales. De hecho, si el prefabricador es suficientemente fiable esta incertidumbre puede considerarse despreciable. El resultado de la estimación de la posible pérdida de valor producida por estos riesgos considerados sobre la alternativa de ejecución in situ es la que se muestra en la tabla 5.

Riesgos	Probabilidad	Medida	Estimación	$\Delta x^1$
R1:	0,2	Pérdida de calidad de acabado (puntuación)	a	3
			b	3
			c	4
			d	4
R2:	0,1	Posible sobrecoste por imprevistos (euros)	a	3000
			b	3000
			c	6000
			d	6000
R2:	0,2	Posible retraso por imprevistos (días)	a	10
			b	10
			c	15
			d	15

Tabla 5.- Estimación de los riesgos considerados.

<sup>1</sup>  $\Delta x$ : posible pérdida producida por el riesgo medida en el parámetro x

A partir de estos resultados se calcula la pérdida de valor que supone la posible existencia de estos riesgos restando las citadas severidades al valor calculado inicialmente. El resultado es el recogido en la tabla 6 y la figura 16.

	Alternativa 1: Solución prefabricada					Alternativa 2: Solución in situ				
	$p_i$	a	b	c	d	$p_i$	a	b	c	d
Valor sin riesgo ( $v^*$ )	1		0,0755	0,0938		1		0,0114	0,0319	
Severidad riesgo 1 ( $s_1$ )	0,2		0,0016	0,0009		0,2		0,0021	0,0014	
Severidad riesgo 2 ( $s_2$ )	0,3		0,0011	0,0004		0,1		0,0031	0,0015	
Severidad riesgo 3 ( $s_3$ )								0,0018	0,0017	
<b>Valor integrado</b>			<b>0,0748</b>	<b>0,0935</b>				<b>0,0103</b>	<b>0,0311</b>	

Tabla 6.- Cálculo del valor integrado



Figura 16.- Valor integrado de las alternativas considerando el efecto de los riesgos puros

A continuación, siguiendo el flujo del proceso ACE cabría plantear la posible incompatibilidad de alguna de las alternativas consideradas con otros aspectos del proyecto. En este caso no se observa ninguna.

Posteriormente se realiza un análisis de sensibilidad consistente en variar algunos de los valores de los pesos y de los parámetros para sopesar la variación que imprimen al resultado final del valor de las diversas alternativas, con el objetivo de comprobar que la ligeras variaciones. Los tanteos realizados no introducen variaciones significativos en la evaluación realizada, es decir, las pequeñas modificaciones no producen cambios importantes en el resultado final.

Dado que no se han detectado incompatibilidades ni el análisis de resultados ha producido variaciones, los resultados finales corresponden a los recogidos en la figura 16. Según se observa, el conjunto difuso asociado a la alternativa prefabricada presenta valores más elevados que los de la otra opción. Por tanto, a la vista de estos resultados se escoge la alternativa prefabricada por estimarse que aporta un mayor valor al conjunto del proyecto.

## 6. CONCLUSIONES

A lo largo del desarrollo del presente artículo se ha hecho hincapié, por un lado, en la trascendencia de la decisión acerca de adoptar una solución prefabricada frente a la ejecución in situ. En este contexto, se ha introducido una herramienta de toma de decisiones aplicable al contexto de la gestión de proyectos constructivos: el sistema IDS (Integrated Decision System). Dicho instrumento se fundamenta en una redefinición de los conceptos de valor y riesgo y un modo de evaluarlos adaptado a las características específicas del ámbito de la construcción. Ambos elementos se integran en un proceso metodológico denominado ACE.

Las principales ventajas de la aplicación de esta herramienta se han verificado a través de un caso real, relativo a la sustitución de unas bóvedas de hormigón para tres estructuras de drenaje en una obra de urbanización. En el desarrollo del caso mediante el IDS se ha comprobado que permite llevar a cabo un estudio de gran profundidad sobre la cuestión, cuantificando e integrando aspectos de muy diversa índole. Asimismo hace posible contextualizar la decisión en el marco del proyecto teniendo en cuenta los diversos planos del problema: económico, temporal, funcional, social y medioambiental. Finalmente, permite destacar las ventajas de la prefabricación desde una perspectiva amplia e integrada.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores de este artículo expresan su agradecimiento, en primer lugar, hacia las empresas que han facilitado la información necesaria para la realización de este trabajo: VERTEX, COPCISA y JAO Ingeniería Civil. Asimismo, merece una mención especial la Generalitat de Catalunya por la ayuda prestada para la realización de la tesis doctoral que constituye la base del artículo. Y el MCYT por la concesión del proyecto MIVES (2002)

## BIBLIOGRAFÍA

- Aguado, A. y Casanovas, I. (1997). Introducción. Capítulo 1. En monografía sobre Demolición de Estructuras de Hormigón. GEHO-ATEP. Colegio de ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Al-Subhi, K.M. (2001) "Application of the AHP in project management". *International Journal of Project Management*, v.19, pg. 19-28.
- Allais, M. (1953) "Le comportement de l'homme rationnel devant le risque: critique de postulata et l'ecole americaine". *Econometrica*, 21, 503-546
- Burt, M. (1978) "A Survey of Quality and Value in Building", Building Research Establishment (BRE). Garston.
- Ellsberg, D. (1954) "Classic and current notions of measurement utility". *Economic Journal*, 64, 528-556.
- Ellsberg, D. (1961) "Risk, Ambiguty and the Savage Axioms". *Quarterly Journal of Economics*, 75, 643-669
- Heredia, R. de (1995). "Dirección Integrada de Proyecto – DIP – Project Management". Ed. E.T.S. de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de (2ª edición. 1ª edición en 1985).
- Hutton, G.H. and Devonald, A.D.G. (1973) "The value of buildings". En "Value in Building", Hutton, G.H. and Devonald, A.D.G. (eds), Ed. Applied Science Publishers. Pag. 1-12.
- Kahneman & Tversky (1979) "Prospect theory: an analysis of decision under risk". *Econometrica*, 47, 263-291.
- Keeney R.L. & Raiffa, H. (1976). "Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs". Ed. Wiley (1ª edición).
- Kenzner, H. (2001) "Project Management. A system Approach to Planning, Scheduling and Controlling". Ed. Van Nostrand Reinhold. (7ª edición).
- Marcus, T.A. (1973) "Optimisation by evaluation in the appraisal of building", en "Value in Building", Hutton, G.H & Devonhald, A.D.G. (eds). Ed. Applied Science Publishers. Pag. 82-111.
- Ormazabal, G. (2001) "El IDS: un nuevo sistema integrado de toma de decisiones para la gestión de proyectos constructivos". Tesis doctoral. Dpto. de Ingeniería de la Construcción. Universidad Politécnica de Catalunya (UPC).
- Rogers, M. (2000) "Using Electre III to aid the choice of housing construction process with structural engineering". *Construction Management y Economics*, 18 (3), 333-342.
- Saaty, T. (1980) "Analitical Hierarquy Process planning, priority setting, resource allocation". Ed. McGraw-Hill.
- Serer, M. (2001) "Gestión integrada de proyectos". Ed. UPC.
- Simon, H.A. (1979) "Rational Decision Making in Business Organizations", *American Economical Review*, 69, 493-513.
- Stone, P.A. (1966) "Building Economy: Design, Production and Organisation: A Synoptic View". Ed. Pergamon Press.
- Von Neumann, J. & Morgenstern, O. (1947) "Theory of games and Economic behavior". Ed. Princeton University Press. (2ª edición).
- Wong, E.T.T. , Norman G. & Flanagan, R. (2000) "A fuzzy stochastic technique for project selection". *Construction Management and Economics*, 18 (4), 407-414.