

CONSTRUCCIÓN Y MEDIO AMBIENTE. EVALUACIÓN AMBIENTAL DE PRODUCTOS DERIVADOS DEL CEMENTO. APLICACIÓN A PAVIMENTOS DE HORMIGÓN

ALEJANDRO JOSA

UPC, Barcelona, España
alejandro.josa@upc.es

ANTONIO AGUADO

UPC, Barcelona, España

ARNALDO CARDIM

UPC, Barcelona, España

RAVINDRA GETTU

UPC, Barcelona, España

RESUMEN

En este artículo se presenta un resumen de la situación actual en el caso específico de productos de la construcción derivados del cemento en el contexto de la necesaria minimización del impacto medioambiental de todo tipo de actuaciones y de la tendencia a un desarrollo sostenible. Tras hacer referencia a algunas cifras globales significativas de dicho sector, se exponen, cualitativamente, las aportaciones del mismo al medio ambiente en los ámbitos de la salud, de la seguridad y del desarrollo, frecuentemente olvidadas al considerar el impacto producido. Con objeto de cuantificar éste último, se introduce el concepto y la metodología de los análisis del ciclo de vida (ACV) de procesos y productos, actualmente aceptados como la metodología de referencia para esta evaluación, y se resumen los casos en los que estos análisis se han aplicado para productos con base cemento en Europa. Como ejemplo se presentan los resultados de tres casos representativos de ACV's comparativos entre soluciones alternativas, en las que se observa el correcto comportamiento medioambiental de las basadas en productos derivados del cemento. Finalmente, se resumen las aplicaciones existentes en el campo de los pavimentos de hormigón, y se presenta sintéticamente una comparación preliminar del impacto medioambiental de los mismos con otras soluciones alternativas.

1. 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 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 evaluar e intentar 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 especialmente 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 (iluminación, acondicionamiento interior de edificios); 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 consecuente 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 (Elias, 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), material del 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, en este artículo se trata en primer lugar de las conexiones existentes entre construcción y medio ambiente, incidiendo específicamente en los aspectos positivos de las mismas, es decir, en las aportaciones de la construcción para su mejora, que frecuentemente no se consideran al analizar los impactos producidos. En segundo lugar se describe brevemente en qué consisten los Análisis del Ciclo de Vida (ACV) que constituyen la herramienta actualmente disponible para evaluar el impacto producido por procesos y productos. A continuación se resumen los estudios llevados a cabo utilizando dichos análisis en el ámbito de la construcción con productos con base cemento en Europa, y se describen brevemente varios ejemplos representativos de comparación entre soluciones alternativas. Finalmente, se hace referencia a las aplicaciones existentes en el campo de los pavimentos de hormigón, y se presenta sintéticamente una comparación del impacto medioambiental de los mismos con otras soluciones alternativas

2. CONSTRUCCIÓN Y MEDIO AMBIENTE

Como ya se ha indicado, es frecuente que la actividad del sector de la construcción se asocie únicamente con sus efectos negativos sobre el medio ambiente (consumo de recursos y de energía, emisión de contaminantes, alteración de ecosistemas, generación de residuos, etc.). Si bien es obvio que estos efectos existen, y pueden llegar a ser muy importantes si no se toman las medidas apropiadas, la construcción tiene también efectos muy favorables sobre él, si bien este punto de vista depende en buena medida de cómo se defina el medio ambiente. La construcción indiscriminada y sin ninguna conciencia de tipo medioambiental, ha contribuido de forma significativa a dicha imagen negativa, que incluso ha llevado

a que en un buen número de ocasiones la población se haya opuesto a la instalación de nuevas infraestructuras. Sobre esta última situación existen diversos ejemplos en distintos países en la construcción de autopistas, de presas, de aeropuertos o incluso de plantas depuradoras de aguas. En relación con este tema es necesario hacer previamente varias consideraciones.

En primer lugar, el medio ambiente no es estático e inmóvil, sino que está en continuo cambio, inducido en parte por las especies vivas que lo componen y también, de forma significativa, por diferentes agentes de la naturaleza (por ejemplo los meteorológicos). Por otro lado, el medio ambiente puede ser muy agresivo con dichas especies en muy diversas circunstancias (climas extremos, terremotos, inundaciones, incendios de origen natural, erupciones volcánicas, generación y diseminación de enfermedades, etc.). Al respecto se puede decir que la naturaleza y el medio ambiente proporcionan las condiciones que hacen posible la vida, pero pueden ser muy agresivos con las especies que lo habitan.

Un aspecto clave al respecto está en el hecho de que las especies vivas, y en particular el hombre, son parte del medio ambiente, por lo que debe considerarse que las alteraciones que puedan inducir en el mismo son, como punto de partida, *naturales*, de la misma forma que se consideran las producidas por otros agentes de la naturaleza. Si bien esto es normal y aceptable en la mayor parte de los casos, requiere ciertos límites en algunos de ellos, y en particular en lo relativo a la actividad inducida por el hombre. El aspecto diferencial en este último caso estriba, fundamentalmente, en la capacidad del hombre de modificar de forma muy sustancial, consciente o inconscientemente, el medio ambiente, pudiendo llegar a hacerlo inhabitable o a extinguir otras especies vivas. Por ello, aunque la actividad humana sea parte del medio ambiente y los cambios que induzca en la naturaleza puedan considerarse naturales, es preciso definir unos límites aceptables. Estos límites, es decir, hasta dónde es aceptable la actividad humana o, específicamente, hasta dónde son aceptables los cambios que puede inducir el hombre en la naturaleza, son difíciles de definir. Para tratar este tema puede ser útil considerar cuándo un *cambio* en el medio ambiente (un impacto) es *positivo* o *negativo*. En este sentido parece razonable utilizar como referencia las condiciones de habitabilidad del planeta (a corto, medio y largo plazo), de forma que un impacto podría considerarse positivo cuando indujese una mejora *global* de dichas condiciones y viceversa.

Podría pensarse que los límites citados en el párrafo anterior son suficientemente amplios como para que sea muy difícil alcanzarlos, es decir, que la naturaleza es capaz de aceptarlos sin empeorar significativamente sus condiciones de habitabilidad. Sin embargo, se tiene la sensación en diversos ámbitos de que se está en estos momentos cerca de ellos, aproximándose la actividad humana actual a la capacidad de carga máxima que puede aceptar el planeta. Esta capacidad de carga define la máxima presión de población que es aceptable, es decir, aquella a partir de la cual las condiciones de habitabilidad, y consecuentemente la población, disminuyen. Contribuye a esta sensación, por ejemplo, el hecho de que en el periodo 1950-1990 la población mundial y la explotación forestal se han duplicado, el consumo de agua se ha triplicado, el consumo de petróleo se ha sextuplicado, y la actividad económica se ha quintuplicado, sin que parezca que estas tendencias, a excepción de población, que ha iniciado una cierta desaceleración (Fig. 1), se moderen (Xercavins, 1996).

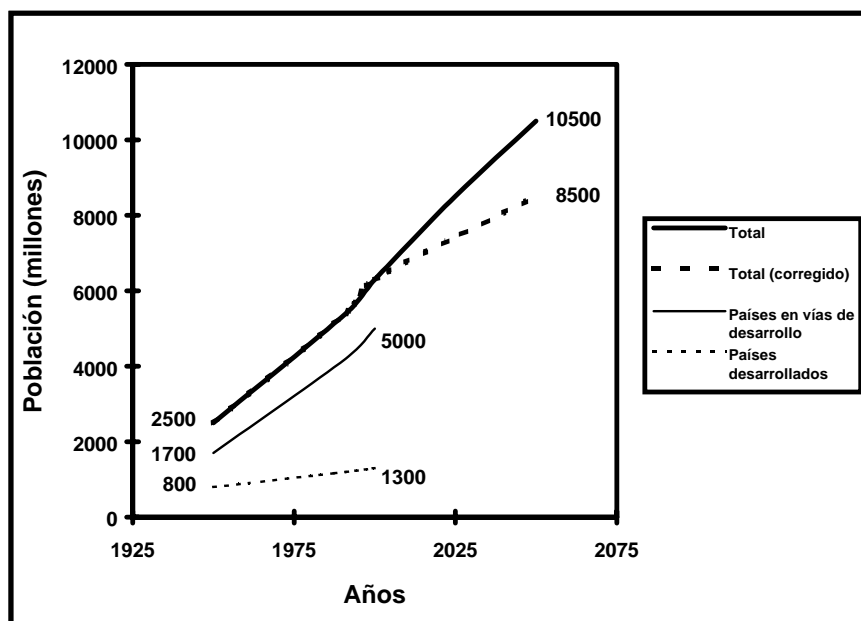


Figura 1. Evolución de la población mundial entre 1945 y 1991, y previsión hasta 2050

Estos datos globales también pueden comprobarse en casos específicos. Por ejemplo, en el parque nacional español de las Tablas de Daimiel, el número de pozos de riego ha aumentado de 1,500 a 21,000-22,000 (14 veces más) y las hectáreas de cultivo de regadío de 12,000 a 130,000 (11 veces más) en el periodo 1960-1996. Las consecuencias han sido que han desaparecido los ojos del río Guadiana (zonas con el nivel freático sobre superficie), el cauce de dicho río se ha convertido en esta zona en un valle cultivable, hay escasez en los acuíferos y se ha degradado el ecosistema.

Consecuentemente, parece claro que es importante tener en cuenta la existencia de límites en la actividad humana. Al respecto de los mismos, la Declaración de Río (ONU, 1992) define el marco de referencia a considerar. El primer principio indica que *Los seres humanos constituyen el centro de las preocupaciones relacionadas con el desarrollo sostenible - Todos ellos tienen derecho a una vida saludable y productiva en armonía con la naturaleza* y establece, de hecho, y en conjunto con los demás principios, la necesidad de un compromiso entre la actividad humana y sus efectos (consumo de recursos y energía, contaminación, etc.) en el contexto de un desarrollo sostenible y el respeto (alteración limitada) al medio ambiente. Este principio indica que los seres humanos son el aspecto clave en relación con el mantenimiento (o la degradación) de la naturaleza, pero a la vez les legitima para una vida saludable y productiva en armonía con ella. Si bien aparentemente no se determinan con precisión los límites, la referencia al desarrollo sostenible constituye un punto esencial.

El concepto de desarrollo sostenible apareció por primera vez en el llamado informe Brundland (ONU, 1987), que lo definió como aquel que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades, es decir, aquel desarrollo que en principio puede mantenerse indefinidamente. Lógicamente, este principio tiene implicaciones inmediatas en todo tipo de impactos sobre el medio (consumo de recursos y energía, contaminación, etc.) por cuanto no se puede comprometer la capacidad de desarrollo futuro. La consecución de este tipo de desarrollo puede considerarse fundamentado en los tres principios fundamentales siguientes establecidos por Daly (Xercavins, 1996):

- El ritmo de utilización de recursos renovables debe ser menor o igual que el de su regeneración.

- El ritmo de utilización de recursos no renovables debe ser menor o igual que el de generación de recursos renovables sustitutivos.
- El ritmo de generación de elementos contaminantes debe ser menor o igual que el necesario para su absorción, esterilización o reciclaje.

Lo anterior define el marco de actuación que se debe alcanzar, y justifica la necesidad de minimizar el impacto, gestionar adecuadamente los recursos, y promover el reciclaje y, consecuentemente, la utilización de materiales reciclables. La actividad humana será aceptable en la medida en la que se tienda o cumpla los principios del desarrollo sostenible.

En el ámbito de la construcción se va a incidir a continuación en su contribución a la mejora del medio ambiente en el contexto de lo indicado con anterioridad, y en particular en conexión con el *derecho a una vida saludable y productiva* reconocido en el primer principio de la Declaración de Río. Esta contribución ha sido sintetizada en *Cembureau* (1995), y se resume en los siguientes puntos en sus aspectos esenciales. La relación fundamental entre construcción y medio ambiente se establece en dicha referencia a través de la secuencia *medio ambiente* → *derecho a calidad de vida* → *salud y confortabilidad* → *necesidad de desarrollo* → *construcción* → *utilización de materiales ambientalmente apropiados*, legitimada a través de dicho principio. Este secuencia debe cumplir los principios del desarrollo sostenible y tender a la minimización del impacto sobre el medio ambiente. Los aspectos específicos que se van a considerar a continuación son los tres siguientes: construcción y salud; construcción y seguridad; y construcción y desarrollo.

3. CONSTRUCCIÓN Y SALUD

La relación entre calidad de vida y salud es muy obvia y entre salud y construcción es muy directa en diferentes aspectos. Casos claros los constituyen las infraestructuras correspondientes a abastecimiento y depuración del agua de consumo, a recogida y tratamiento de aguas residuales o residuos sólidos, o las instalaciones sanitarias. Un efecto inmediato de las mismas es dificultar la diseminación de enfermedades, toxinas o sustancias peligrosas. Como ejemplo indicativo de la magnitud de su efecto se puede considerar la evolución de la esperanza de vida en diferentes países en el último siglo y medio. La Fig. 2 muestra, como ejemplo, el caso del Reino Unido, en el que se observa que dicha esperanza se duplicó entre 1850 y 1990 (*Cembureau*, 1995). Esta evolución de la esperanza de vida no es particular del Reino Unido sino que pueden observarse incrementos análogos en otros casos (por ejemplo, en la ciudad de Barcelona la esperanza de vida de una persona de clase media pasó de los 25 años a los 77 años entre 1860 y 1992; *CICCP*, 1976). Las cifras extremadamente bajas indicadas para el siglo pasado vienen influidas muy significativamente por la alta mortalidad infantil entonces existente, por lo que la esperanza de una persona que superase los primeros años de vida, o la de una persona adulta, era muy superior a la media indicada. Este incremento tan importante ha sido fundamentalmente debido al control del agua (depuración de agua de consumo y tratamiento de aguas residuales), que no se asoció a la diseminación de enfermedades hasta bien entrado el siglo XIX, coincidiendo con numerosas epidemias en Europa. Evidentemente también han influido, aunque en menor medida (sobre todo en los incrementos más recientes), otros factores, como por ejemplo los avances en medicina y farmacología. Así mismo se pueden citar, como ya se ha indicado, las numerosas epidemias producidas en el siglo pasado en Europa, entre las que pueden destacarse la de fiebre amarilla en 1821 en Barcelona, con una mortalidad del 6.2% de la población en 111 días, o la de cólera en 1831-1832 en París, con una mortalidad del 2.4% de la población (*CICCP*, 1976).

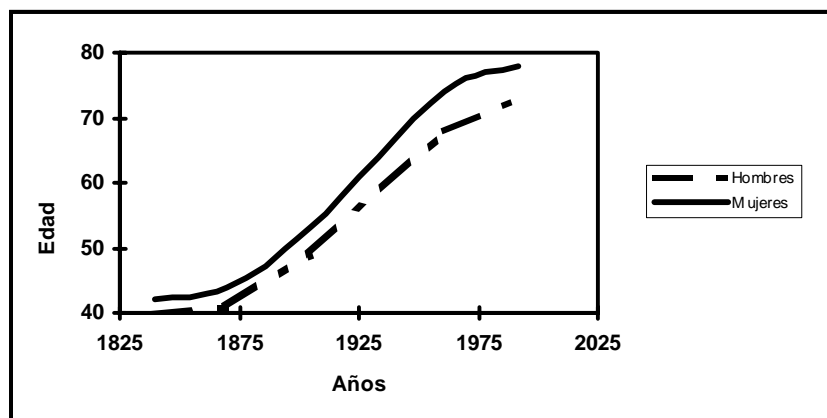


Figura 2. Evolución de la esperanza de vida en el Reino Unido entre 1840 y 1992

Los tipos de infraestructuras relacionadas con este apartado son de muy diverso tipo, entre las que pueden destacarse las siguientes:

- Abastecimiento de agua (extracción, almacenamiento, transporte, tratamiento, depuración): presas, pozos, canales, tuberías, plantas desalinizadoras, plantas depuradoras, plantas de bombeo, depósitos.
- Aguas residuales (recogida, transporte, tratamiento, reutilización, vertido): tuberías, alcantarillado, túneles, plantas de bombeo, plantas de tratamiento.
- Residuos sólidos (recogida, transporte, almacenamiento, tratamiento, clasificación, reciclaje, incineración, vertido): infraestructura del transporte, contenedores, plantas de tratamiento, plantas de clasificación y reciclaje, plantas incineradoras, vertederos.
- Instalaciones sanitarias: clínicas, hospitales, centros de investigación.

4. CONSTRUCCIÓN Y SEGURIDAD

Como ya se ha indicado, el medio ambiente está en continuo cambio, y es con frecuencia agresivo con las especies vivas. Al respecto se puede citar, como ejemplos representativos, los casos de inundaciones en zonas continentales o costeras, huracanes, corrimientos de tierras, terremotos, erupciones volcánicas, olas de frío o calor, o incendios de origen natural, de cuyos efectos se tiene periódicamente noticia, y han sido recientemente devastadores en diversos países (los fenómenos del Niño y de la Niña, el huracán Mitch, los terremotos en Japón y Turquía, las inundaciones en Mozambique, etc.). También la actividad humana, aparte de su influencia continua sobre el medio ambiente, tiene en ocasiones efectos desastrosos sobre el mismo en situaciones puntuales, en general causados por accidentes. Como ejemplos de ellas se pueden citar los casos de vertidos químicos en mares y ríos, emisiones tóxicas a la atmósfera, accidentes en centrales nucleares, incendios, o explosiones.

La aportación de la construcción en este caso se centra en la disposición de estructuras protectoras contra dichas situaciones o resistentes a ellas. Como ejemplos se pueden citar los siguientes:

- Desastres naturales.
 - Protección contra inundaciones en zonas continentales: azudes, canalizaciones, estructuras de contención, plantas de bombeo, galerías, túneles.

- Protección costera: barreras, diques, escolleras.
- Corrimientos de tierras: estructuras de contención, sistemas de drenaje.
- Terremotos: estructuras resistentes a efectos sísmicos.
- Erupciones volcánicas: bloques de conducción o estructuras de contención para canalizar los ríos de lava.
- Incendios naturales: límites pavimentados, depósitos de agua.
- Accidentes en actividades humanas:
 - Accidentes en centrales nucleares o explosiones: barreras de protección.
 - Incendios: materiales ignífugos o de máxima durabilidad incendios, sistemas y conducciones de agua.

5. CONSTRUCCIÓN Y DESARROLLO

Desarrollo se considera en este apartado en relación con aspectos de tipo social y personal. De acuerdo con el primer principio de Río, el hombre está legitimado para una vida productiva, siempre en armonía con la naturaleza. Esta vida productiva puede interpretarse desde diferentes puntos de vista. En particular, en el caso de la construcción, pueden considerarse los siguientes aspectos:

- Movilidad: libertad y facilidad de movimiento y acceso al territorio (infraestructuras del transporte). Fomento del equilibrio territorial, del desarrollo social y personal, de las zonas menos favorecidas, etc.
- Productividad: bienes y servicios suficientes y accesibles en todas las capas sociales (infraestructuras industriales para alimentación, ropa, vehículos, equipos).
- Recreo: actividades culturales, deportivas o de diversión (equipamientos específicos). Posibilidad de actividades de ocio en el tiempo libre.
- Confortabilidad: edificios acondicionados y seguros (aislamiento térmico y acústico, agua caliente, servicios).

Aunque estos aspectos puedan parecer menos directos que los correspondientes a los dos apartados anteriores (salud y seguridad), su importancia es evidente desde el punto de vista de una vida productiva. Al respecto cabe destacar de nuevo que las condiciones habituales en la naturaleza pueden ser con frecuencia poco confortables (temperatura, humedad, disponibilidad de agua potable y caliente y de alimentos suficientes y sanos, facilidad de movimientos, hostilidad de otras especies, actividades culturales o deportivas, etc.).

La aportación de la construcción en este caso es bastante clara. Como ejemplos se pueden citar los siguientes, entre los que se enmarca claramente el caso de los pavimentos:

- Movilidad: carreteras, ferrocarriles, áreas peatonales.
- Productividad: instalaciones agrícolas e industriales, plantas de procesado de alimentos, almacenes.
- Recreo: museos, teatros, bibliotecas, polideportivos, parques.
- Confortabilidad: viviendas, oficinas, hospitales, escuelas.

6. EVALUACIÓN MEDIOAMBIENTAL

En el apartado anterior se ha descrito cualitativamente algunos aspectos en los que la construcción puede afectar positivamente al medio ambiente. Sin embargo, dichos aspectos son sólo una parte de los que interesan desde un punto de vista global. Por un lado, es necesario comprobar que las aportaciones que pueda comportar la construcción en un caso concreto, compensan los impactos que paralelamente se puedan producir al utilizar materiales o ejecutar las obras (consumo de recursos y energía, contaminación del aire y del agua, etc.). Por otro lado, y aún en el caso de que se comprobase lo anterior, habría que escoger las soluciones constructivas, los materiales, el procedimiento de puesta en obra, etc., más adecuados desde el punto de vista medioambiental. Por ejemplo, en el caso de una estructura que pudiese ser de acero, de hormigón, de fábrica o de madera indistintamente, o un pavimento que pudiese ser de hormigón o de asfalto, con análogo resultado funcional, interesará escoger la alternativa que produzca menor impacto. De lo anterior se deduce la necesidad de evaluar cuantitativamente el mismo.

La herramienta más adecuada actualmente disponible para esta evaluación es el *análisis del ciclo de vida* (ACV) de los productos o procesos considerados. Un ACV, según SETAC (1993), es un proceso objetivo en el que se evalúan las cargas ambientales asociadas a una actividad, proceso o producto, a través de la identificación y cuantificación de todos los impactos sobre el medio ambiente (consumo de energía y de recursos renovables y no renovables, emisiones a la atmósfera, contaminación del agua, generación de residuos, etc.); se valoran dichos impactos; y se analizan posibles mejoras; incluyendo para todo ello, el ciclo completo de la actividad, proceso o producto considerado. Consecuentemente, un ACV debe en principio incluir todas las fases (aunque siempre existirán ciertos límites en las fases o etapas consideradas), desde las iniciales (materias primas, elaboración de las mismas, fabricación) hasta las finales (desecho llevado a vertedero) pasando por eventuales reutilizaciones o reciclajes, ya que pueden producirse impactos significativos en cualquiera de ellas (en la Fig. 3 se muestra un ejemplo). Este planteamiento no es posible con procesos específicos, como la fabricación de una viga, o con productos intermedios como el cemento y el hormigón, que tienen posteriormente aplicaciones múltiples con impactos presumiblemente diferentes en cada una de ellas. El análisis se inicia entonces en el mismo punto anteriormente indicado, y termina en el proceso considerado o en la fabricación del producto. En estos casos los resultados son de interés para analizar e introducir mejoras ambientales en los procesos o productos comprendidos o para llevar a cabo ACVs de procesos o productos posteriores. Este planteamiento global no sólo hace necesario considerar todas las etapas del ciclo de vida sino que, para minimizar el impacto final, es también necesario que dicho ciclo de vida se planifique previamente de forma apropiada incluyendo tanto las fases *constructivas* como las *desconstructivas* (reciclaje, demolición, etc.; Fig. 4).

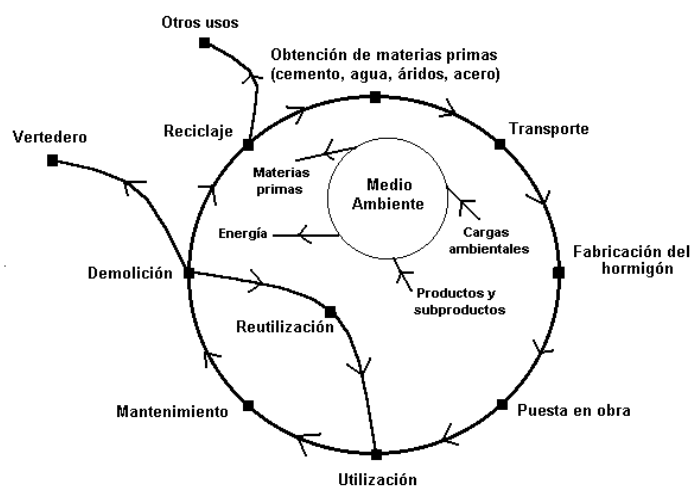


Figura 3. Ciclo de vida genérico de un producto derivado del cemento

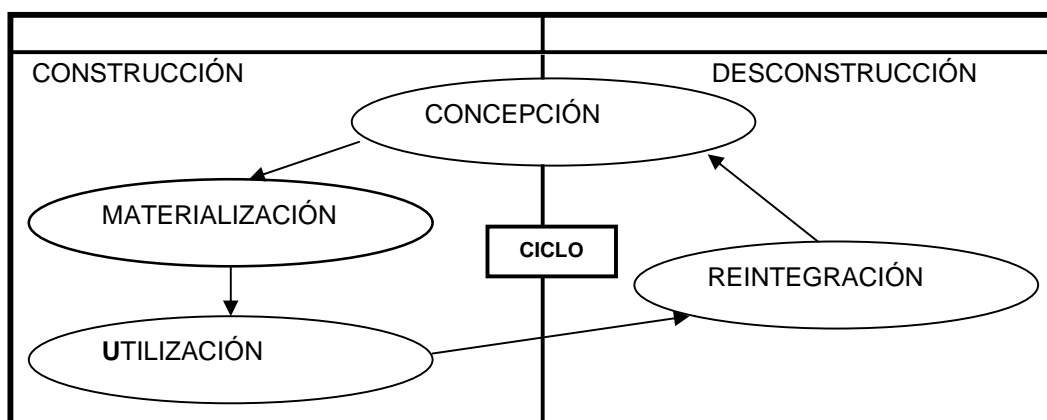


Figura 4. Fases de *construcción* y de *desconstrucción* de un ciclo de vida genérico

Es previsible que en el futuro los ACV's de procesos o productos, una vez estén completamente normalizados, lo cual no ocurre en la actualidad, se generalicen a prácticamente cualquier actividad, dado el interés que tienen como herramienta capaz de evaluar impactos ambientales, si bien, como después se indicará, presentan también algunas limitaciones. En estos momentos, el Comité Técnico 207 de ISO (ISO/TC 207, creado en junio de 1993) está desarrollando normativas internacionales para gestión ambiental. De los seis subcomités existentes, el quinto (LCA SC5) se ocupa del análisis del ciclo de vida, y es previsible que en un futuro más o menos próximo, estén disponibles todas las normas correspondientes, de las que en estos momentos ya existen las primeras (ISO 14040 e ISO 14041). Lógicamente, no es éste el lugar apropiado para describir, en detalle, en qué consiste un ACV, aunque por su interés y su novedad en el campo de la construcción se va a realizar un breve resumen.

Los ACV's han recibido distintas denominaciones conceptualmente análogas (análisis del camino de vida; eco-comparación; balance global; balance de materia, energía, emisiones y residuos; análisis de recursos y perfil ambiental; análisis desde la cuna hasta la tumba; etc.). Históricamente, son la extensión a todo tipo de cargas ambientales de los estudios energéticos realizados en la década de los 70 como consecuencia de la crisis del petróleo. La metodología para la realización de ACV's se comenzó a desarrollar en la década de los 80, y se ha extendido rápidamente en la década de los 90, particularmente en procesos industriales.

Los resultados básicos que se obtienen de un ACV, aparte de las conclusiones del propio estudio, son esencialmente de tres tipos. En primer lugar el *inventario de ciclo de vida (ICV)*, que incluye el detalle pormenorizado de todas las cargas ambientales correspondientes al ciclo de vida analizado (consumo de energía y de materiales, emisiones, residuos, etc.). El resultado para cada una de las cargas ambientales consideradas es simplemente la suma de las correspondientes a cada una de las fases en que haya podido dividirse el ciclo de vida. La lista de dichas cargas ambientales puede ser muy extensa (por ejemplo, referencia a todas las sustancias utilizadas o emitidas, por pequeña que sea su cantidad), aunque con frecuencia se limita a las más relevantes. En la Tabla 1 se incluye un ejemplo de ICV de cemento procedente de Häkkinen y Mäkelä (1996), en el que, como se ha indicado, las cargas ambientales se han limitado a las más relevantes. Por ejemplo, puede comprobarse que no han sido incluidos algunos recursos de menor importancia en este caso (por ejemplo, el consumo de arcilla o de agua).

Emissions		
CO ₂	780	g/kg
NO _x	3,7	g/kg
SO ₂	0,63	g/kg
CO	1,9	g/kg
HC	0,13	g/kg
VOC tot	0,91	g/kg
CH ₄	0,75	g/kg
PAH	3,60E-06	g/kg
Benzene	6,90E-06	g/kg
Phenol	2,10E-06	g/kg
Particulates	0,39	g/kg
N ₂ O	2,10E-06	g/kg
Cr	7,80E-06	g/kg
Pb	4,90E-07	g/kg
Zn	1,80E-07	g/kg
Hg	9,20E-06	g/kg
Tl	2,50E-07	g/kg
As	2,30E-05	g/kg
Cd	2,00E-06	g/kg
COD	0,00042	g/kg
N total	6,90E-07	g/kg
Oil (aq)	0,00014	g/kg
Energy		
Fossil fuel	4,9	MJ/kg
Electricity	0,45	MJ/kg
Limestone use	1200	g/kg

Tabla1. Ejemplo de inventario de ciclo de vida correspondiente a un cemento (Häkkinen y Mäkelä, 1996)

El segundo tipo de resultados corresponde a la evaluación de los del inventario. En la evaluación, las diferentes cargas ambientales del inventario se agrupan en categorías de impacto que corresponden a efectos negativos producidos en el medio ambiente (efecto invernadero, agujero en la capa de ozono, acidificación, eutrofización, toxicidad, consumo de materias primas y de energía, etc.). Aquellas cargas ambientales sin efecto negativo en el medio ambiente reconocido (por ejemplo, emisiones de oxígeno o de vapor de agua), son irrelevantes en lo relativo a evaluación ya que no resultan, en principio, perjudiciales. Basándose en correlaciones experimentales o teóricas, cada carga ambiental se asigna a una categoría de impacto (fase de clasificación) y se relaciona mediante un coeficiente con una unidad de referencia (fase de caracterización). Como ejemplos de categorías de impacto y de unidades de referencia se pueden citar el consumo de recursos no renovables (en % de los existentes); la emisión de gases inductores del efecto invernadero (en peso de CO₂ equivalente); la emisión de gases destructores de la capa de ozono (en peso de CFC-11 equivalente); la acidificación (en peso de SO₂ equivalente); la toxicidad humana (en peso humano expuesto a nivel toxicológico aceptable); la toxicidad medioambiental (en volumen de agua o peso de suelo contaminado); o los olores (en volumen de aire contaminado). Las categorías específicas utilizadas varían según la institución o el estudio considerados. Como ejemplos de factores de equivalencia se puede citar los casos del CH₄, que produce un efecto invernadero a 20 años 35 veces superior al del CO₂, a igualdad de masa, o el HCl que produce una acidificación 0,88 veces la

del SO₂, así mismo a igualdad de masa. Lógicamente existen multitud de coeficientes de equivalencia correspondientes a diferentes categorías de impacto y sustancias, cuyo orden de magnitud varía enormemente (desde <10⁻³ hasta >10³) dependiendo del caso (categoría y sustancia específicas). En la Tabla 2 se incluye una relación con ejemplos de categorías de impacto y sus unidades de referencia.

CATEGORÍA DE IMPACTO	UNIDAD DE REFERENCIA
Consumo de recursos renovables (bióticos)	% del total / % de la producción anual
Consumo de recursos no renovables (abióticos)	% del total
Efecto invernadero (calentamiento global)	Peso de CO2 equivalente
Agujero en la capa de ozono (agotamiento del ozono estratosférico)	Peso de CFC-11 equivalente
Impactos toxicológicos humanos	Peso humano expuesto a límites toxicológicos aceptables
Impactos ecotoxicológicos (agua, suelo)	Volumen de agua contaminada o peso de suelo contaminado
Formación de fotooxidantes	Peso de etileno equivalente
Acidificación	Peso de SO2 equivalente
Eutrofización	Peso de fosfato equivalente
Variación de la temperatura del agua	Energía incorporada al agua
Mal olor	Volumen de aire contaminado
Ruido	Distancia a la que el nivel de ruido es menor que una referencia
Utilización de espacio	Superficie
Accidentes (víctimas)	Número atribuibles directamente

Tabla 2. Ejemplos de categorías de impacto con sus unidades de referencia

Las categorías de impacto se clasifican habitualmente, según su alcance, en las de efecto global (por ejemplo el efecto invernadero o el agujero en la capa de ozono, que se producen independientemente de donde se emitan las sustancias que los inducen), las de efecto continental o regional (por ejemplo la acidificación o la eutrofización, cuyos efectos se limitan a una cierta superficie más o menos extensa, por lo que también pueden ser locales), y las de efecto local (por ejemplo los malos olores o el ruido). Por otro lado, los resultados de la evaluación pueden expresarse tanto en valor absoluto con las unidades anteriormente indicadas, o de forma relativa (*normalizados*) en relación con ciertos valores de referencia. Estos valores de referencia pueden ser los correspondientes a cada categoría de impacto en un área y periodo de tiempo específicos (por ejemplo, en el caso del efecto invernadero, las emisiones de CO₂ en el mundo durante un año).

En los dos casos anteriores el resultado que se obtiene es vectorial, ya que al no existir una unidad medioambiental única que permita comparar cargas ambientales diferentes (por ejemplo, el consumo de materias primas con la emisión de CO₂, o la contaminación del agua con la contaminación atmosférica), o categorías de impacto distintas (por ejemplo, la acidificación con la eutrofización), el resultado estará necesariamente compuesto por una serie de valores correspondientes a cada una de las cargas o de las categorías de impacto consideradas. En este caso, el resultado puede no ser definitivo cuando se comparan alternativas, si cada una o parte de ellas aventaja a las demás en algunos de dichos impactos, pero no en todos. Existe, sin embargo, un tercer tipo de resultados de un ACV en el que al final se llega a un valor único. Este valor se obtiene en la fase de *valoración* sumando los resultados de las diferentes cargas o categorías de impacto tras aplicar a cada uno de ellos un factor de ponderación específico

(Ahbe et al, 1990, Kortman et al, 1994). Consecuentemente, cuanto mayor sea el factor de ponderación de una determinada categoría de impacto, mayor será la influencia de la misma en el valor final obtenido. El llegar a un único valor final tiene la ventaja de su simplicidad y la facilidad para llevar a cabo comparaciones. Sin embargo tiene el inconveniente de que los factores de ponderación a aplicar son en principio arbitrarios, por lo que para definirlos es necesario utilizar criterios en los que deben valorarse preferencias sociales o políticas y el valor final deja de tener fundamento científico. Sin embargo puede ser muy útil para definir prioridades ambientales, aumentando los factores de ponderación de las categorías de impacto prioritarias, y disminuyendo los demás. De esta forma, si por razones medioambientales o comerciales un sector productivo o un fabricante desea rebajar el valor final del ACV de un proceso o un producto, le resultará más fácil conseguirlo disminuyendo los impactos correspondientes a las categorías con coeficientes de ponderación mayores.

Los ACV's se pueden utilizar, por ejemplo, como herramientas de análisis ambiental para identificar etapas de procesos industriales que requieren mejoras ambientales, o para comparar sistemas, procesos o productos alternativos, que son dos de sus aplicaciones básicas; o como herramientas de gestión ambiental para orientar el desarrollo e investigación de nuevos productos o procesos, y definir la *calidad* medioambiental de los mismos (concesión de *ecoetiquetas*, establecimiento de baremos ambientales o tasas, etc.). Por otro lado, proporcionan un marco de referencia común para sistematizar la nomenclatura y metodología utilizada, y poder comparar estudios medioambientales con origen diferente.

El hecho de que los ACV's no estén todavía completamente normalizados es un claro inconveniente, por cuanto metodologías diferentes (CML, 1992; Nordic, 1995; ...) pueden llevar a resultados contradictorios si, por ejemplo, se adoptan hipótesis distintas, o si los resultados finales no se agrupan de forma similar. Esto es especialmente relevante en el caso de comparaciones entre productos de consumo, en el que un resultado desfavorable puede significar una disminución drástica de mercado. Por otro lado, un ACV se enmarca claramente en unos límites específicos temporales y espaciales, cuya modificación puede ser importante en los resultados. Por ejemplo, no es posible analizar, genéricamente, un bloque de hormigón, o daría resultados poco fiables, si no se enmarca en un lugar y momento concretos que permitan determinar con cierta precisión las cargas ambientales producidas, sin extrapolaciones o rangos de variación que podrían llevar a errores muy importantes. Además, es prácticamente imposible no imponer límites al sistema. Así, por ejemplo, si una etapa del proceso es el transporte de materiales, no se incluye, salvo que excepcionalmente pudiese ser fundamental, el impacto correspondiente a la producción del vehículo utilizado, ya que dicho factor tendrá una influencia mínima (es habitual despreciar cargas ambientales suficientemente pequeñas) y no es posible retroceder indefinidamente en el sistema, ya que el problema se volvería irresoluble e implícito. Por ello es necesario que se especifiquen los límites (etapas consideradas y su ámbito), las hipótesis adoptadas y el grado de fiabilidad de los datos, lo cual, con frecuencia, no se hace con suficiente detalle. Otros ejemplos de aspectos que requieren la adopción de hipótesis son la asignación de impactos (por ejemplo en procesos que den lugar a más de un producto), cómo considerar la reciclabilidad de los productos, o el impacto asociado a residuos. A pesar de estos inconvenientes, los ACV's presentan la gran ventaja de estar aceptados con generalidad por las diferentes partes implicadas (administraciones, asociaciones ecologistas, industria, etc.), por lo que se están convirtiendo en una herramienta básica para estudios de impacto medioambiental.

Un ACV consta, habitualmente, de las siguientes etapas básicas:

- **Definición del objetivo y ámbito del estudio.** En esta primera etapa se debe definir con precisión el objetivo del estudio, los límites del sistema considerado (etapas del proceso o procesos incluidas y su ámbito), la unidad funcional de referencia (unidad de producto, cantidad de superficie o volumen, etc.), y el procedimiento de obtención y fiabilidad de los datos. La dependencia de los resultados con las hipótesis de partida hace que esta fase adquiera una notable importancia.
- **Inventario (ICV).** Esta etapa es la más laboriosa, y en ella se evalúan las distintas cargas ambientales (consumo de energía y de materiales, emisiones, residuos, etc.) de las diferentes etapas incluidas en los límites del sistema. Como ya se ha indicado, tiene como resultado una base de datos en la que se incluye toda esta información pormenorizada.

- **Análisis (evaluación) del impacto.** En esta etapa se clasifican, caracterizan, normalizan y, eventualmente, valoran, las cargas ambientales del inventario, agregando apropiadamente los resultados en las categorías de impacto correspondientes y reduciendo su número final, incluso hasta un único valor si se incluye la fase de valoración. Especialmente algunas fases de esta etapa están poco normalizadas en estos momentos.
- **Análisis de resultados y conclusiones.** En esta etapa, que como la anterior está poco normalizada, se analizan los resultados, se establecen las conclusiones, y se determinan, como aspecto fundamental, las posibles mejoras del sistema considerado. Esto último tiene especial relevancia en el caso de analizar actividades, procesos o materiales específicos para optimizarlos medioambientalmente, aunque no tanto si el objetivo es una comparación entre dos alternativas específicas.

Pese a que la metodología para los ACV's es relativamente reciente, existen ya numerosos estudios realizados, aunque no muchos de ellos son públicos, así como diferentes entidades dedicadas a su normalización y promoción.

7. COMPORTAMIENTO MEDIOAMBIENTAL DE PRODUCTOS CON BASE CEMENTO

Como ya se ha indicado, interesa minimizar el impacto medioambiental producido por cualquier proceso o producto y en cualquier actividad o sector, en el contexto de un desarrollo sostenible. En esta minimización, un aspecto importante a considerar en el campo de la construcción será el correspondiente a los materiales utilizados y su puesta en obra. En este sentido, los productos con base cemento (hormigones, morteros), son una alternativa o tienen como alternativa a otros materiales diversos dependiendo de la utilización considerada (acero, cerámica, madera, etc.) e interesará evaluarlos en sus diversas aplicaciones utilizando las herramientas citadas en el apartado anterior.

A principios de los años noventa se comenzó en distintos países europeos el análisis de productos o tecnologías alternativas en el campo de la construcción, y existen en estos momentos algunos desarrollos y ejemplos de aplicación de ACV's en dicho campo, aunque no todos ellos son públicos. Por una parte existen estudios sobre las cargas ambientales de determinados procesos y materiales utilizados en construcción, proporcionando inventarios de referencia para su utilización en la evaluación del ciclo de vida de productos específicos. Aunque cada caso requiere un estudio adaptado a las condiciones que le correspondan, estos inventarios dan en algunos casos valores o rangos útiles para consideraciones de tipo global. Por otra parte existen ejemplos concretos de comparación entre productos o tecnologías alternativas, como más adelante se detalla. Así mismo, se está avanzando en el desarrollo de nuevos materiales y productos teniendo en cuenta la minimización de la carga ambiental producida en toda su vida. Con respecto a productos con base cemento se indican a continuación algunos ejemplos de los primeros estudios realizados, así como algunas referencias específicas:

- ICV's en el campo del hormigón: cemento, áridos, aditivos, hormigón, bloques, tuberías, pilares, vigas, pavimentos (*SBI*, 1993).
- ACV's completos de productos específicos de hormigón: tuberías de saneamiento (Ankele y Steinfeldt, 1995).
- ACV's completos comparando con productos de hormigón: traviesas de ferrocarril (con madera), puentes (con acero), pavimentos (con asfalto) (*TNO e Intron*, 1994).
- ACV's parciales (ciclo de vida no completo), en el campo del hormigón: cemento, hormigón, diferentes elementos estructurales de edificación (vigas, pilares) (Vold y Rønning, 1995).
- ACV's parciales (ciclo de vida no completo) comparando con productos de hormigón: tuberías de saneamiento (con PVC y con cerámica) (*Intron*, 1995a-b).

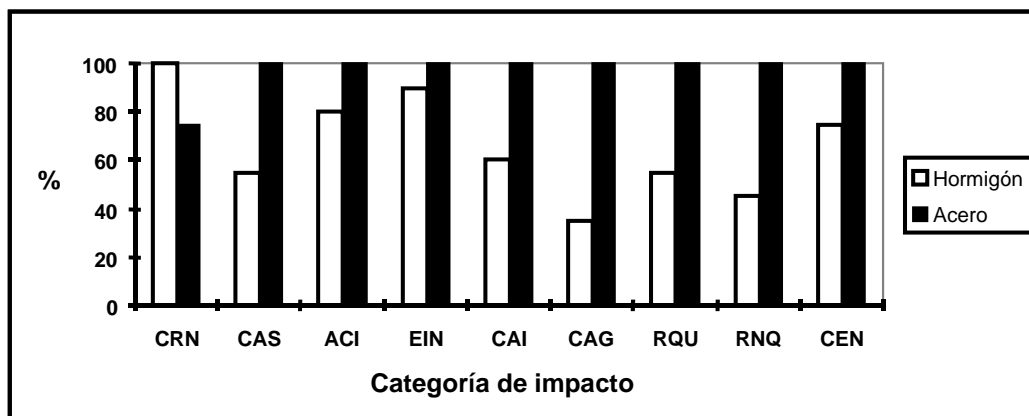
- ACV's parciales (sólo parte de los impactos) en el campo del hormigón: diferentes elementos estructurales de edificación (vigas, pilares), pavimentos (Fossdal, 1995).

Las principales ventajas que presentan los productos con base cemento, en particular desde el punto de vista medioambiental, se pueden resumir en los siguientes aspectos: son reciclables; los residuos que producen son inertes y no tóxicos; tienen una alta durabilidad y requieren un bajo mantenimiento (materiales pétreos); las materias primas son muy abundantes (caliza, arcilla); y son muy versátiles en sus aplicaciones técnicas en cuanto a resistencia (minimización de secciones estructurales), densidad y permeabilidad (muy impermeable para barreras de contaminación o muy permeables para drenaje), resistencia química, tamaño y geometría, o aspecto (formas, texturas y colores). Todo lo anterior hace que, en términos generales, los productos con base cemento presenten un comportamiento medioambiental correcto. En cuanto a sus aspectos más desfavorables, se pueden citar el consumo energético y las emisiones (CO_2 , NO_x , SO_2), fundamentalmente para la fabricación del cemento.

Como ejemplo de los resultados obtenidos en los estudios anteriormente citados, se incluye a continuación un breve resumen de algunos casos representativos de comparaciones entre soluciones alternativas. Por límites de espacio, no es posible entrar en detalle en la metodología y resultados de los mismos. Se han escogido comparaciones entre soluciones alternativas en vez de resultados de soluciones específicas para facilitar la presentación e interpretación de resultados, que se expresan en variación porcentual entre ellas. Al respecto se debe tener en cuenta que este tipo de presentación, que a primera vista es más clara, puede esconder algunos de los resultados. Así, por ejemplo, si las soluciones alternativas tienen un impacto muy bajo en una determinada categoría, pero en una de las soluciones es prácticamente nulo, la otra puede aparentar, erróneamente, un impacto muy alto al dispararse el porcentaje de diferencia. Por otro lado, determinados impactos pueden quedar ocultos dentro de otros, y no es posible diferenciar la importancia absoluta de las distintas categorías de impacto entre sí. También debe insistirse en el hecho de que mientras los ACV's no estén completamente normalizados, debe tomarse con precaución los resultados obtenidos. Finalmente, hay que recordar que estos estudios se enmarcan en condiciones temporales y espaciales y en hipótesis y metodologías específicas, cuya variación puede llegar a alterar significativamente los resultados.

8. KORTMAN Y LIM (1992)

En este estudio, publicado por la Universidad de Amsterdam, se analizaron medioambientalmente dos soluciones alternativas, una de hormigón y otra de acero, para un puente de autopista (puente de Zaltbommel, a 20 km al norte de Hertogenbosch, cruzando el río Waal, en Holanda) que debía construir la administración de carreteras holandesa. Este puente tenía que sustituir a otro de acero construido en 1933 que iba a quedar fuera de servicio al tenerse que ampliar la autopista para poder absorber el tráfico existente en la misma. La administración holandesa decidió encargar dicho estudio para escoger la alternativa que fuese menos agresiva con el medio ambiente. Adicionalmente, este estudio se utilizó también para contrastar la metodología CML (CML, 1992) desarrollada en Holanda siguiendo los principios establecidos por SETAC (SETAC, 1993). El estudio incluyó las fases fundamentales de los productos básicos de este caso (hormigón, asfalto, acero, pintura, plástico) desde la extracción de las materias primas, hasta el final del periodo de servicio adoptado (75 años), para la primera parte del puente. En la Fig. 5 se resumen comparativamente los resultados obtenidos. Cabe indicar que en este caso el estudio fue encargado y desarrollado por entidades independientes de los sectores industriales implicados, por lo que sus resultados no están en principio afectados por los intereses de los mismos. En la figura se observa el buen comportamiento de la solución con hormigón en comparación con la de acero, a la que supera en todos los aspectos salvo en el correspondiente a consumo de recursos no renovables. Este último resultado es sorprendente ya que las materias primas para la fabricación del hormigón son, como ya se ha indicado con anterioridad, muy abundantes. Ello es debido a que dicho consumo se enmarcó localmente, en el ámbito geográfico de Holanda, donde la caliza es escasa.

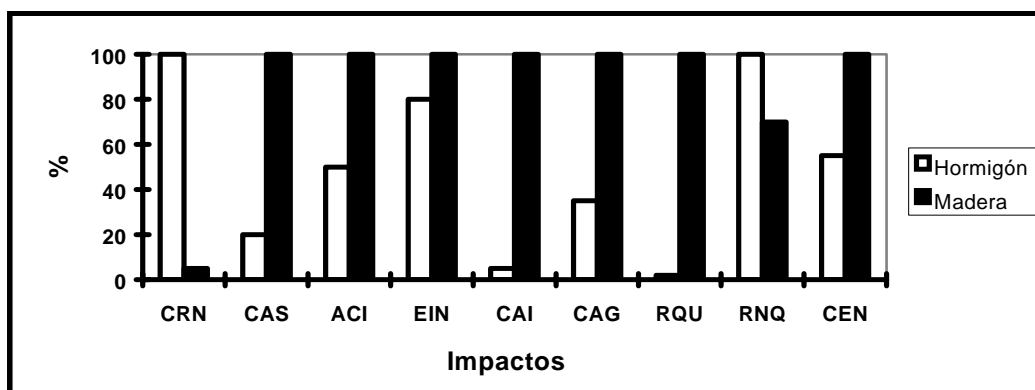


CRN: consumo de recursos naturales; CAS: consumo de agua subterránea; ACI: acidificación; EIN: efecto invernadero; CAI: contaminación del aire; CAG: contaminación del agua; RQU: residuos químicos; RNQ: residuos no químicos; CEN: consumo de energía

Figura 5. Resultados para el puente de Zaltbommel (Kortman y Lim, 1992)

9. HOEFNAGELS Y DE LANGE (1993)

En este estudio se analizaron medioambientalmente dos soluciones alternativas, una de hormigón y otra de madera, para traviesas de ferrocarril. La iniciativa de este estudio la tuvo la administración holandesa de ferrocarriles, tras evaluar que, aparte de la construcción de nuevas líneas, se renovaban anualmente 200 km de vía de su red. Desde 1950 se venían utilizando tanto traviesas de hormigón pretensado (del orden del 35% del total) como traviesas de madera tratada. El objetivo del estudio era decidir qué traviesas utilizar en el futuro basándose en el impacto medioambiental producido por cada uno de los dos tipos seleccionados. Para ello se consideraron las fases de extracción de materias primas, fabricación de productos intermedios y finales, puesta en obra, mantenimiento, reciclaje y transporte, para un periodo de 50 años y para el caso de una posición de traviesa genérica (en 50 años, una traviesa de hormigón y dos de madera). La elección de dicho periodo de análisis es fundamental, ya que la vida útil de una traviesa de madera es del orden de 25 años, y la de una traviesa de hormigón es del orden de 50 años, por lo que si se hubiese adoptado un periodo inferior, los resultados hubiesen variado claramente en favor de las traviesas de madera de forma en principio injustificada. El estudio también incluyó un análisis de la fiabilidad y sensibilidad de los resultados. En la Fig. 6 se presenta un resumen comparativo de los resultados obtenidos. En estos resultados se puede observar que las traviesas de hormigón presentan un mejor comportamiento que las de madera salvo en las categorías correspondientes a consumo de materias primas (por la misma razón indicada en el caso del puente de Zaltbommel) y en la de residuos no químicos cuando se descarta el reciclaje de las traviesas utilizadas. En el caso de las traviesas de madera gran parte de su impacto procede de los tratamientos de creosota necesarios para la conservación del material, que inciden en varias de la categorías consideradas. Como en el caso anterior, el hecho de que este estudio fuese encargado y desarrollado por entidades independiente de los sectores industriales interesados, hace que sus resultados no estén en principio afectados por los intereses de los mismos.



CRN: consumo de recursos no renovables; CAS: consumo de agua subterránea; ACI: acidificación; EIN: efecto invernadero; CAI: contaminación del aire; CAG: contaminación del agua; RQU: residuos químicos; RNQ: residuos no químicos; CEN: consumo de energía

Figura 6. Resultados para traviesas de ferrocarril (Hoefnagels y De Lange, 1993)

10. INTRON (1995A-B)

En este informe y artículo, que describen el mismo caso, se analizaron medioambientalmente diferentes soluciones alternativas (con hormigón, con tres tipos distintos de PVC y con cerámica) para un sistema de saneamiento exterior unitario (aguas pluviales y residuales) en una zona residencial urbana (Fig. 7). La unidad funcional fue 1 km de dicho sistema, con tubos de 30 cm de diámetro y arquetas de registro cada 50 m. Los tubos eran, alternativamente, de los diferentes materiales considerados, y se utilizaron en todos los casos arquetas de registro de hormigón por no existir de todos los materiales alternativos estudiados (tipos de PVC seleccionados y cerámica). El estudio fue encargado por la asociación holandesa de fabricantes de tubos de saneamiento de hormigón, y fue desarrollado por el instituto holandés *Intron*. En el análisis se consideraron las fases de extracción de materias primas, fabricación de productos intermedios y finales, puesta en obra, uso, mantenimiento, desmontaje, reciclaje y transporte, para un periodo de 40 años. La información relativa a las soluciones con tubo de hormigón fue proporcionada por los propios fabricantes, mientras que la información relativa a las soluciones con PVC o con cerámica se obtuvo de la bibliografía existente. A efectos de comparar las soluciones con diferentes materiales se utilizó como unidad funcional alternativa 1 m representativo de tubo, ya que las arquetas, al ser, como se ha indicado, en todos los casos de hormigón, no tenían influencia en la comparación en términos relativos. En las figuras 8 y 9 se presentan resultados obtenidos en este estudio en los que puede observarse que la solución con tubo de hormigón resulta ser la mejor en todas las categorías analizadas. La razón básica para este resultado es, específicamente, el consumo energético de las diferentes soluciones, que afecta a prácticamente todas las categorías de impacto. El propio informe y artículo indica que esta superioridad de la solución con tubo de hormigón en todas las categorías es un resultado sorprendente que previamente no se esperaba, especialmente por la existencia de algún otro informe anterior en el que la comparación con tuberías de PVC había resultado favorable a esta última solución. En este sentido, se indica que en dicha referencia alternativa se había sobrestimado significativamente el consumo energético de la solución con tubo de hormigón.

Los diferentes casos anteriores son ejemplos de los trabajos que se han realizado en diversos países europeos en el campo de los ACV's para materiales con base cemento, y muestran claramente el correcto comportamiento medioambiental de las soluciones con hormigón en distintos tipos de aplicaciones. Hay que recordar, sin embargo, que este tipo de conclusiones no pueden generalizarse directamente ya que los resultados obtenidos dependen de las condiciones espaciales y temporales de los análisis llevados a cabo y de las hipótesis que se haya podido adoptar en los mismos. En cuanto al caso concreto de pavimentos, que no se ha considerado en los ejemplos anteriores, se incluye en el siguiente apartado. Los países más avanzados en esta materia actualmente en Europa son Holanda y los países nórdicos, aunque se está trabajando también intensamente en Alemania o Austria. En todos ellos

se están elaborando o están disponibles *ICV's* y *ACV's* de diferentes materiales y procesos en el ámbito de la construcción. Así mismo, en distintos centros de investigación se está reorientando el desarrollo de nuevos materiales, o la modificación de los actuales, atendiendo a criterios de índole medioambiental, como pueden ser tanto nuevos productos con menores impactos en su fabricación, como la utilización de residuos o subproductos, o el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan reducir los volúmenes de material necesario, por ejemplo mediante la consecución de materiales más eficientes (con mejores prestaciones) que requieran menores secciones de proyecto. Ejemplo claros en el caso de materiales con base cemento son los estudios sobre su reutilización y reciclaje, la utilización de residuos industriales entre sus componentes, o el desarrollo de hormigones de alta resistencia o de altas prestaciones.

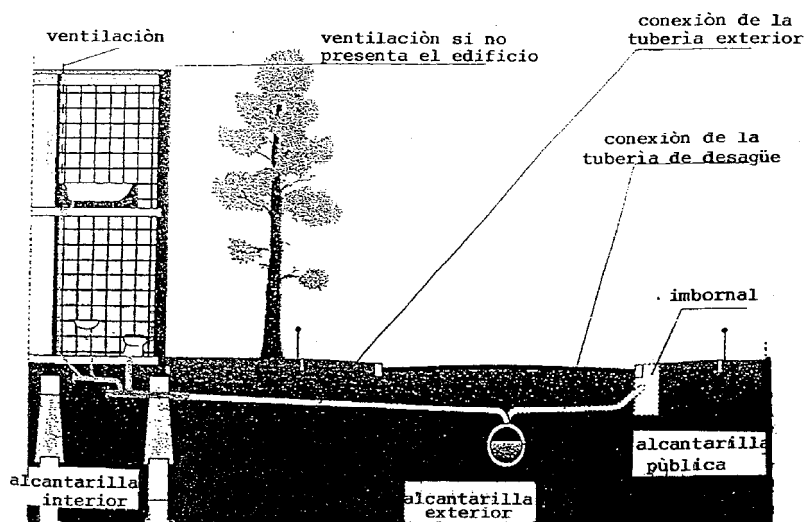
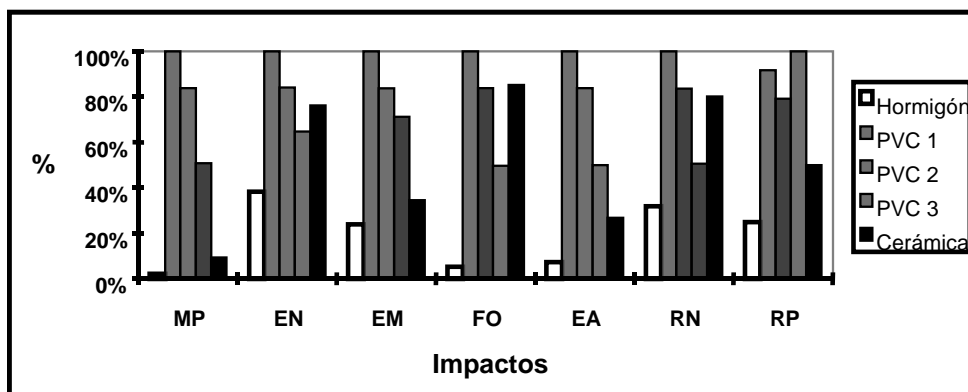


Figura 7. Esquema del sistema de saneamiento analizado en *Intron* (1995a-b)

11. APLICACIÓN A PAVIMENTOS

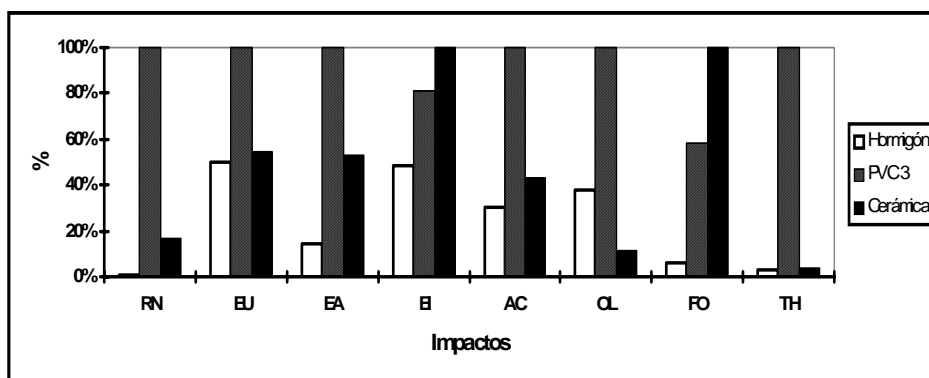
En muchos países el hormigón tiene una aplicación importante en pavimentos, tanto para carreteras de tráfico pesado, medio o ligero, como para caminos rurales, vías urbanas o zonas industriales, portuarias, etc. En estas aplicaciones las soluciones alternativas son, en gran parte de los casos, los pavimentos asfálticos, aunque existen también en ocasiones otras opciones, como es el caso de los pavimentos de adoquines. Tal y como se ha indicado anteriormente, interesa, al igual que en cualquier otra aplicación, evaluar el impacto medioambiental producido por estos pavimentos con objeto de minimizarlo y tender a un desarrollo sostenible. Para ello será necesario tener en cuenta su ciclo de vida completo, desde la obtención de las materias primas hasta la demolición y envío a vertedero de los materiales, pasando por todas las fases intermedias de fabricación de productos, puesta en obra, uso y mantenimiento, eventuales reciclajes, transportes, etc.



MP: consumo de materias primas; EN: consumo de energía; EM: emisiones; FO: formación de foto-oxidantes; EA: eco-toxicidad en agua; RN: generación de residuos no peligrosos; RP: generación de residuos peligrosos
PVC 1: PVC sólido clase 34; PVC 2: PVC sólido clase 41; PVC 3: PVC en tres capas clase 34

Figura 8. Resultados para tuberías de saneamiento *Intron* (1995a-b)

Existen diferentes estudios en los que se analiza el impacto medioambiental producido por distintos pavimentos de hormigón. Como referencia sobre el resultado obtenido al analizar medioambientalmente estos pavimentos y compararlos con otros pavimentos alternativos se va a describir a continuación brevemente el estudio expuesto en Häkinen y Mäkelä (1996), desarrollado en el Centro de Investigación Técnica de Finlandia (VTT). Este estudio es parte del denominado proyecto nórdico sobre adaptación medioambiental del hormigón promovido por la industria del cemento de Finlandia, Suecia y Noruega. En otras partes de este proyecto se estudian los impactos medioambientales producidos en plantas de fabricación de cemento, o en otras aplicaciones de este material (por ejemplo estructuras). Este estudio específico presenta un especial interés por su alto nivel de detalle y ser muy completo, por ser público y por el hecho de que, aunque en su comité de seguimiento únicamente hubo representantes de la industria del cemento, en su comité de soporte había también representantes de las administraciones estatales de carreteras de los tres países implicados y de los sectores del hormigón y del asfalto, por lo que cabe suponer que sus hipótesis y resultados no están en principio afectados, al menos significativamente, por intereses sectoriales. A continuación se va a resumir el contenido, los resultados y las conclusiones de dicho estudio. Posteriormente, y utilizando para ello los datos incluidos en el mismo, se va a presentar un ejemplo de aplicación con secciones estructurales españolas para pavimentos.



RN: consumo de recursos no renovables; EU: eutrofización; EA: eco-toxicidad en agua; EI: efecto invernadero; AC: acidificación; OL: olores; FO: formación de foto-oxidantes; HC: toxicidad humana
PVC 3: PVC en tres capas clase 34

Figura 9. Resultados para tuberías de saneamiento *Intron* (1995a-b)

12. HÄKINEN Y MÄKELÄ (1996)

El objetivo del estudio fue la evaluación medioambiental del impacto producido por pavimentos de hormigón y asfálticos. Esta evaluación se basó en la estimación del periodo de servicio de estos pavimentos y de los impactos correspondientes a su producción, uso y mantenimiento, y desmantelamiento. También se tuvieron en cuenta la influencia del pavimento en el consumo de carburante de los vehículos, el ruido producido, la iluminación, y la generación de polvo por el desgaste de los materiales. La unidad funcional utilizada fue 1 km de pavimento de la autopista de Tampere durante 50 años, suponiendo un tráfico de 20,000 vehículos por día. Un periodo de tiempo suficientemente largo, como el adoptado en este caso, es importante para no perjudicar a las soluciones más duraderas. La anchura de calzada analizada fue de 8,5 m (dos carriles de 3,75 m y un arcén interior de 1 m). En todos los casos se colocó bajo las capas superiores (desde la explanada), 1,9 a 2,5 m de roca machacada, 12 cm de grava tratada con betún y 12 cm de una capa asfáltica con un 4,4% de betún. Las secciones estudiadas fueron las siguientes:

- **Pavimento de hormigón:** 22 cm de un hormigón en masa de alta resistencia con adición de microsilíce (tamaño máximo del árido 20 mm; 17,7% de cemento; resistencia a compresión 80 MPa y a flexotracción 7,5 MPa); puesta en obra mediante equipo de encofrados deslizantes; textura mediante árido expuesto; y losas de 25 m² con juntas selladas y con pasadores.
- **Pavimento asfáltico:** 5 cm de capa de rodadura (120 kg/m²; 6,2% de betún) y 7 cm de capa intermedia (170 kg/m²; 4,4% de betún), con un tamaño máximo del árido de 2 cm.

Con respecto al mantenimiento se supusieron dos estrategias diferentes tanto para el pavimento de hormigón como para el pavimento asfáltico. En el primer caso se consideraron las hipótesis de dos o de tres fresados durante los 50 años. En el segundo caso se adoptaron, alternativamente, las prácticas habituales en Finlandia y en Suecia, consistentes en 5 operaciones diferentes de mantenimiento y refuerzo (excluidas la construcción y la demolición o reciclaje final) durante los 50 años. Como referencia en este último caso se puede indicar que si en la construcción inicial del pavimento se utilizaron del orden de 2500 t/km de betún (en las capas de rodadura e intermedia), el conjunto de estas 5 operaciones de mantenimiento y refuerzo implicaron del orden de 1800 t/km de nuevo asfalto, aunque este valor depende, lógicamente, de la estrategia de mantenimiento adoptada. Hay que señalar que, debido al clima muy frío que tienen los países nórdicos, en los que buena parte del año las temperaturas están bajo cero, se utilizan frecuentemente sales, y neumáticos con clavos, muy agresivos con la superficie de los pavimentos. Este hecho, aparte de afectar a las operaciones de mantenimiento, justifica que en el estudio realizado se incluyese la utilización de sales y la generación de polvo por desgaste de la superficie del pavimento como parámetros específicos de inventario. Evidentemente, estos parámetros serán en general irrelevantes en otros países con climas más templados.

En la publicación de referencia se detallan diversos aspectos relevantes del análisis llevado a cabo como pueden ser los límites de los sistemas considerados, las distintas hipótesis adoptadas (por ejemplo sobre la carga medioambiental de los residuos utilizados, sobre las operaciones de mantenimiento o sobre el reciclaje), el origen de la información, básicamente aportada por los productores de los materiales correspondientes (cemento, hormigón, betún), etc., y se proporcionan datos de inventario tanto de los distintos materiales básicos utilizados (áridos, cemento, betún, etc.), como de las capas de rodadura e intermedia del pavimento asfáltico o del pavimento de hormigón, y del conjunto de cada uno de los dos tipos de pavimentos, en este último caso para cada hipótesis de mantenimiento y desglosado en diversos aspectos de su ciclo de vida (materiales a lo largo del mismo, puesta en obra, trabajos de mantenimiento, consumo de energía por la diferente potencia de iluminación instalada en cada caso, consumo de combustible adicional de los vehículos por la realización de los trabajos de mantenimiento, polvo generado por abrasión de la superficie del pavimento, sales de deshielo y, finalmente, consumo de combustible del tráfico de la carretera). Sobre cada uno de estos aspectos se detalla las hipótesis adoptadas y los estudios llevados a cabo. En el análisis de los resultados se incluye un estudio de sensibilidad respecto a varios de los parámetros utilizados, una comparación entre los tipos de pavimentos considerados, una valoración de los resultados de acuerdo con diferentes metodologías y

una referencia sobre la influencia del reciclaje en los resultados obtenidos. Como aspecto peculiar adicional de este estudio cabe señalar que tuvo en cuenta el efecto de consumo de CO_2 durante la vida del pavimento debido a la carbonatación del hormigón. Este efecto es relevante en este caso debido a las especiales características de los pavimentos (losa delgada con gran superficie expuesta a la atmósfera) y el periodo de tiempo, largo, considerado, por lo que la cantidad de CO_2 consumido suponiendo una cierta profundidad de carbonatación del hormigón al final del ciclo considerado (que sería total a tiempo infinito) resulta significativa (no despreciable) respecto a la emitida durante el mismo.

Lógicamente no tiene sentido reproducir aquí todos los resultados de este estudio, pero sí se va a incluir a continuación un resumen de las conclusiones que en él se relacionan.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el impacto medioambiental de los pavimentos de hormigón depende significativamente del contenido de cemento del hormigón (cantidad total de cemento utilizada). Consecuentemente, los resultados dependen también de forma significativa del espesor de la capa de pavimento. El consumo de CO_2 atmosférico por carbonatación del hormigón, suponiendo que afectase a 4,5 cm de profundidad del pavimento en 50 años, como se considera en el estudio, sería, aproximadamente, del orden del 10% del emitido en el resto del ciclo de vida (en su mayor parte para la fabricación de productos y, en particular, del cemento). De haberse tenido en cuenta la carbonatación total del hormigón (a muy largo plazo), el resultado final hubiera cambiado de forma significativa.

El impacto medioambiental producido por la puesta en obra y el mantenimiento en el caso de los pavimentos de hormigón es bastante bajo (prácticamente despreciable en cualquiera de las dos estrategias planteadas) comparado con el de fabricación de los materiales y productos. Por otro lado, la influencia del consumo de combustible adicional de los vehículos por la realización de los trabajos de mantenimiento es muy baja y la de iluminación es alta. En relación con las emisiones de partículas por la utilización de sales y por abrasión de la superficie, irrelevantes en países más templados, son importantes en este caso, por lo que el resultado final depende de las hipótesis que se adopten sobre este tema (tanto en el caso del hormigón como en el caso del asfalto).

El impacto medioambiental producido por los materiales, la puesta en obra, el mantenimiento y la iluminación es en cualquier caso bajo comparado con el producido por el tráfico (consumo de combustibles, emisiones) durante 50 años. Esto no significa que sea irrelevante la optimización medioambiental del impacto producido por el pavimento, ya que dicha minimización es necesaria en cualquier caso y aplicación. Sin embargo, este dato sí que hace esencial estudiar la influencia del tipo de pavimento en el consumo de los vehículos que circulan sobre él. De acuerdo con el estudio, y tras analizar varios factores diferenciales (textura superficial, módulo de elasticidad, resistencia a la rodadura), se puede concluir que no existen diferencias destacables entre ambos tipos de pavimento genéricamente, aunque sí existen dichas diferencias dependiendo de las características específicas no sólo de cada pavimento (sea de hormigón o de asfalto; regularidad, textura, etc.) sino también del tráfico (características de los vehículos, de los neumáticos, velocidad) o de las condiciones meteorológicas (por ejemplo, la existencia de nieve). Según las circunstancias, cualquiera de los dos tipos de pavimento analizados puede producir mayor consumo de combustible que el otro o viceversa, aunque debe tenerse también en cuenta las condiciones de seguridad (suficiente resistencia al deslizamiento) del pavimento. Como referencia se puede indicar que, de acuerdo con el estudio, un 0,1 a 0,5% de disminución del consumo de combustible de los vehículos causado por el tipo de pavimento evitaría el mismo orden de magnitud de emisiones que el causado por el pavimento de hormigón en todo el ciclo de vida analizado.

De acuerdo con los resultados del estudio, el impacto medioambiental de los pavimentos asfálticos depende significativamente del contenido de betún de los mismos (cantidad total de betún utilizada). La producción de este material y del aglomerado asfáltico, incluyendo el secado de los áridos, influyen de forma significativa en dicho impacto. En las dos estrategias de mantenimiento consideradas en el estudio (la finlandesa y la sueca) se comprobó que la cantidad de betún total utilizada era bastante distinta, lo cual justifica el resultado diferente obtenido suponiendo cada una de ellas (del orden del 40% más de impacto con la sueca). Este hecho demuestra la significativa dependencia que tiene el impacto producido por un pavimento asfáltico con la estrategia de mantenimiento adoptada, relacionada, en cualquier caso, con el contenido de betún de las capas y su espesor.

Según los resultados obtenidos (Tabla 3), el impacto medioambiental de un pavimento de hormigón, incluyendo todo el ciclo de vida, es mayor en las emisiones de CO_2 , NO_x , CO y Hg , y el de un pavimento asfáltico, así mismo incluyendo todo el ciclo de vida, es mayor en las emisiones de SO_2 , compuestos orgánicos volátiles, partículas y energía no renovable. De estos resultados cabe destacar el del Hg , que depende en gran medida de la composición de las materias primas utilizadas para la fabricación de los productos y puede ser, consecuentemente, muy variable en otros casos con el mismo tipo de pavimento, lo cual no ocurre en la misma medida con los demás parámetros, que no debieran ser tan variables. De estos resultados no se puede concluir que ninguna de las dos soluciones supere claramente en este caso a la otra.

En el estudio no se incluyen las fases de clasificación y caracterización de los datos de inventario, aunque sí la de valoración, como se ha indicado anteriormente, aplicando para ello seis procedimientos diferentes. En dicha fase, como ya se ha expuesto, se puede llegar a un único valor final para cada caso, para lo cual se requiere la utilización de criterios en los que deben valorarse preferencias sociales o políticas, por lo que el valor final deja de tener fundamento científico. De los seis procedimientos utilizados, ambos tipos de pavimento obtuvieron un resultado muy similar en tres de ellos, en uno el pavimento de hormigón obtuvo un resultado peor y en los otros dos lo obtuvo mejor. Consecuentemente, del estudio se puede concluir un correcto comportamiento medioambiental global de los pavimentos de hormigón, en comparación con otras soluciones alternativas.

El estudio concluye que los principales impactos producidos por los pavimentos analizados, tanto de hormigón como asfálticos, son las emisiones de CO_2 , SO_2 , NO_x , y partículas, y el consumo de energía. En cuanto a las hipótesis adoptadas, cabe destacar que al tratar productos reciclados, considera siempre que el usuario de los mismos los recibe sin carga medioambiental (es decir, dicha carga se la queda el usuario anterior). En particular, el final del ciclo de vida adoptado en el estudio en todos los casos es el reciclaje de los materiales de los pavimentos para su uso posterior.

	Pavimento de hormigón	Pavimento asfáltico (mantenimiento Finlandia)	Pavimento asfáltico (mantenimiento Suecia)
CO_2 (kg/km)	940000	590000	670000
SO_2 (kg/km)	1700	2500	2800
NO_x (kg/km)	4700	3000	3600
CO (kg/km)	2000	610	670
Compuestos orgánicos volátiles (kg/km)	1000	1900	2100
Partículas (kg/km)	650000	1200000	1200000
Hg (kg/km)	0.0076	0.000042	0.000064
Energía no renovable (GJ/km)	11000	21000	25000
Ruido (espacio afectado) (ha/km)	70	52	52

Tabla 3. Resumen de datos de inventario para el ciclo de vida completo (sin consumo de tráfico) de los pavimentos analizados (Häkinen y Mäkelä, 1996)

12.1. APLICACIÓN A SECCIONES ESTRUCTURALES ESPAÑOLAS

A partir de los datos de inventario del estudio descrito en Häkinen y Mäkelä (1996), se ha llevado a cabo un ACV de pavimentos de hormigón y asfálticos, aplicado al caso de varias secciones estructurales españolas. Para ello se ha utilizado la Instrucción de secciones de firme del Ministerio de Fomento español (Ministerio de Fomento, 1997). En esta Instrucción se incluyen las soluciones a utilizar para firmes de nueva construcción o para la reconstrucción total de firmes existentes (se excluyen los

refuerzos y los pavimentos sobre estructuras) y para todo tipo de tráfico y explanadas. En relación con el tráfico se definen cinco categorías basándose en la intensidad media diaria de vehículos pesados (*IMD_p*) en el carril de proyecto y en el año de puesta en servicio (de *T0* para $IMD_p \geq 2000$ a *T4* para $IMD_p < 50$). Por otro lado, los periodos de servicio considerados son 20 años para los pavimentos asfálticos y 30 años para los de hormigón. En la Instrucción se definen todos los detalles relativos a los factores de dimensionamiento (tráfico, explanada, materiales) utilizados, a las diferentes secciones de firme recogidas, etc.

A efectos de llevar a cabo el ACV se ha procurado abarcar el mayor número de casos posibles. Para ello, se ha escogido secciones estructurales correspondientes tanto al tráfico más pesado (*T0*) como al tráfico más ligero (*T4*). En ambos casos se ha seleccionado secciones, en principio equivalentes, con pavimento de hormigón y con capas asfálticas. Respecto a la explanada, y debido a que sus características afectan especialmente a las capas inferiores de subbase que no interesan particularmente en el estudio llevado a cabo, se ha supuesto en todos los casos la de mejor calidad considerada en la Instrucción ($CBR \geq 20$). Las secciones adoptadas han sido las siguientes:

12.1.1. Pavimentos de hormigón:

- Tráfico *T0*: sección 036 constituida por 28 cm de un hormigón con resistencia característica a flexotracción de 4,5 MPa (*HP-45*; contenido de cemento 16%) o por 30 cm de un hormigón con resistencia característica a flexotracción de 4,0 MPa (*HP-40*; contenido de cemento 14%) sobre 15 cm de hormigón pobre (contenido de cemento 5,0%).
- Tráfico *T4*: sección 436 constituida por 20 cm de un hormigón con resistencia característica a flexotracción de 4,0 MPa (*HP-40*; contenido de cemento 14%) o por 22 cm de un hormigón con resistencia característica a flexotracción de 3,5 MPa (*HP-35*; contenido de cemento 12%).

12.1.2. Pavimentos asfálticos:

- Tráfico *T0*: sección 031 constituida por 6 cm de capa de rodadura (contenido de betún 5,75%), 6 cm de capa intermedia (contenido de betún 4,75%) y 23 cm de base bituminosa (contenido de betún 4,25%); o, alternativamente, sección 032 constituida por 6 cm de capa de rodadura (contenido de betún 5,75%), 6 cm de capa intermedia (contenido de betún 4,75%), 18 cm de base bituminosa (contenido de betún 4,25%) y 25 cm de subbase granular.
- Tráfico *T4*: sección 431 constituida por 5 cm de capa de rodadura (contenido de betún 5,75%) y 30 cm de subbase granular.

Como puede observarse, se han escogido únicamente firmes rígidos y firmes flexibles, y no firmes semirrígidos (pavimento asfáltico y base o subbase tratada con cemento) que serán objeto de estudio en el futuro. Por otro lado, los contenidos de cemento y de betún de las secciones seleccionadas que, como ya se ha indicado, influyen decisivamente en el resultado medioambiental obtenido, se han definido basándose en contactos con empresas fabricantes y especialistas en técnica de carreteras españoles. En cualquier caso puede observarse que dichos contenidos son distintos a los utilizados en Häkinen y Mäkelä (1996), debido a las diferencias en los parámetros de proyecto y en los materiales utilizados. En cuanto al ancho de calzada, se ha mantenido el mismo que en dicha referencia por simplicidad, suponiendo que existe otra calzada paralela en el caso del tráfico *T0* para el sentido contrario, y que se utiliza para los dos sentidos en el caso del tráfico *T4*. Cabe indicar que este dato no tiene influencia en las comparaciones que se puedan realizar. Finalmente, en el caso de los pavimentos asfálticos se han supuesto dos estrategias diferentes de mantenimiento (*A* y *B*) correspondientes a las dos utilizadas en Häkinen y Mäkelä (1996).

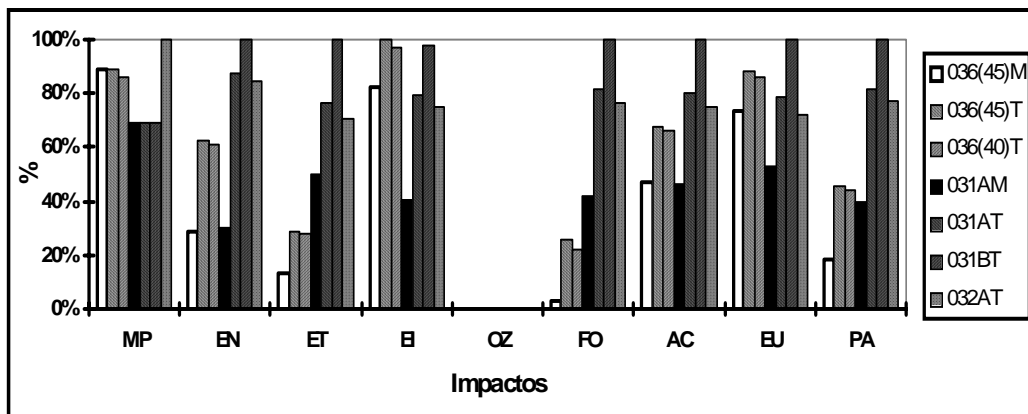
Para la obtención de los resultados se han tomado los datos de inventario aportados en esta última referencia para las diferentes secciones estructurales analizadas en la misma, y se han corregido teniendo en cuenta las diferencias en los porcentajes de ligante y en los espesores de capa a través de

los datos de inventario de los materiales, también aportados en ella. Para cada una de las secciones estructurales españolas definidas se han considerado los impactos producidos por los materiales, por una parte, y los totales, por otra, añadiendo a los de los materiales, en este último caso, los correspondientes a puesta en obra y trabajos de mantenimiento, así como, en el caso del tráfico $T0$ (no en el tráfico $T4$) los de iluminación y consumo de combustible adicional de los vehículos por la realización de los trabajos de mantenimiento. Se han excluido en todos los casos, por su menor relevancia en España los relativos a partículas generadas por abrasión de la superficie del pavimento y por sales de deshielo así como los relacionados con el consumo de combustible del tráfico de la carretera. En cuanto a los periodos de servicio, se han transformado los 50 años en 30 años mediante una simple proporción en aquellos aspectos a los que afecta (mantenimiento, iluminación). Evidentemente, este procedimiento presenta algunas inconsistencias, pero parece el más adecuado a partir de los datos disponibles. Los inventarios resultantes han sido evaluados, en su mayor parte, y sin valoración, a través del programa SimaPro, v.4.0, que es uno de los programas más extendidos actualmente para el desarrollo de ACVs de procesos y productos. A continuación se presentan algunos de los resultados obtenidos.

En la figura 10 se ha representado los resultados para las secciones estructurales correspondientes a tráfico $T0$. En la referencia de cada caso se incluye la denominación de la sección, de acuerdo con la nomenclatura anteriormente indicada, así como, entre paréntesis y en su caso, la resistencia característica a flexotracción del hormigón utilizado (45 o 40), la estrategia de mantenimiento (A o B) en el caso de los pavimentos asfálticos, M en el caso de que los resultados correspondan únicamente al impacto producido por los materiales (sin puesta en obra, mantenimiento ni iluminación) y T en el caso de que correspondan al ciclo de vida completo. En estos resultados puede comprobarse la diferencia entre el impacto producido únicamente por la fabricación de los materiales y el impacto total (con puesta en obra, mantenimiento e iluminación), mayor en varios casos en los pavimentos asfálticos que en los de hormigón, el impacto ligeramente menor producido en los pavimentos de hormigón cuando se utiliza un hormigón menos resistente con mayor espesor de losa, el nulo efecto en cualquier caso en relación con el agujero en la capa de ozono, y la importancia que tiene en el caso de los pavimentos asfálticos la estrategia de mantenimiento adoptada. Hay que destacar que estos resultados son sólo un ejemplo y que han sido obtenidos utilizando una serie de hipótesis cuya variación puede, lógicamente, modificarlos. Sin embargo muestran que los pavimentos de hormigón tienen un comportamiento medioambiental correcto en relación con otras alternativas.

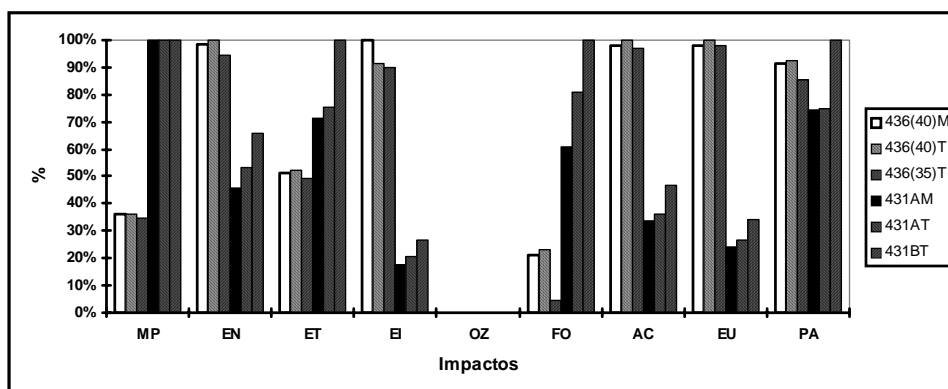
En la figura 11, en la que se ha utilizado la misma nomenclatura que en la anterior, se muestran los resultados obtenidos para las secciones estructurales correspondientes a tráfico $T4$. En este caso, sin embargo, al tratarse en principio de carreteras de bajo tráfico, presumiblemente sin luminarias, no se ha incluido en ninguno de los análisis realizados el consumo de energía por la diferente potencia de iluminación instalada. Los comentarios sobre estos resultados son análogos a los del ejemplo anterior sobre los diferentes aspectos considerados.

Más que insistir en los detalles de las comparaciones llevadas a cabo que, como ya se ha indicado, pueden variar dependiendo de las hipótesis que se adopten, lo importante es comprobar la posibilidad de evaluar medioambientalmente soluciones alternativas en casos específicos, siempre y cuando se disponga de los datos de inventario apropiados. Independientemente de que los datos aquí aportados puedan analizarse con mayor profundidad en el futuro, y extenderse a otros casos, los resultados obtenidos confirman el correcto comportamiento general de las soluciones con hormigón en relación con sus alternativas.



MP: consumo de materias primas; EN: consumo de energía sin la inherente a materiales; ET: consumo de energía total; (con la inherente a materiales); EI: efecto invernadero; OZ: agujero en la capa de ozono; FO: formación de foto-oxidantes; AC: acidificación; EU: eutrofización; PA: emisión de partículas. **Referencia de casos:** sección estructural; entre paréntesis, resistencia del hormigón; M sólo materiales; T materiales, iluminación y mantenimiento; A o B, estrategia de mantenimiento

Figura 10. Resultados para las secciones estructurales españolas con tráfico TO



MP: consumo de materias primas; EN: consumo de energía sin la inherente a materiales; ET: consumo de energía total (con la inherente a materiales); EI: efecto invernadero; OZ: agujero en la capa de ozono; FO: formación de foto-oxidantes; AC: acidificación; EU: eutrofización; PA: emisión de partículas. **Referencia de casos:** sección estructural; entre paréntesis, resistencia del hormigón; M sólo materiales; T materiales, iluminación y mantenimiento; A o B, estrategia de mantenimiento

Figura 11. Resultados para las secciones estructurales españolas con tráfico T4

13. COMENTARIOS FINALES Y CONCLUSIONES

La actividad del sector de la construcción lleva aparejada un impacto medioambiental significativo, que debe ser minimizado, como de hecho ocurre con cualquier otra actividad que se pueda considerar. La construcción presenta también, sin embargo, aportaciones favorables al medio ambiente en los campos de la salud, dificultando la diseminación de enfermedades, toxinas o sustancias peligrosas; de la seguridad, minimizando los efectos de desastres naturales o provocados por el hombre; y del desarrollo, haciendo posible una vida saludable y productiva en armonía con la naturaleza, tal y como establece el primer principio de Río. Estos efectos favorables no se deben olvidar, como en ocasiones ocurre, al evaluar globalmente el impacto producido por la construcción en el medio ambiente.

Un aspecto fundamental es la minimización del impacto producido por cualquier actividad llevada a cabo, tendiendo a un desarrollo sostenible. Para ello es necesario cuantificarlo apropiadamente, para lo cual

está hoy en día disponible la metodología de los análisis del ciclo de vida de los procesos o productos correspondientes, que, pese a sus limitaciones actuales, constituyen la herramienta más adecuada existente en estos momentos para ello. En general, los productos con base cemento presentan un comportamiento medioambiental correcto, debido fundamentalmente a que son reciclables, a que los residuos que producen son inertes y no tóxicos, a que tienen una alta durabilidad y requieren un bajo mantenimiento (materiales pétreos), y a que las materias primas son muy abundantes (caliza, arcilla). En cuanto a sus aspectos más desfavorables, se pueden citar el consumo energético y las emisiones (CO_2 , NO_x , SO_2), fundamentalmente para la fabricación del cemento.

Este comportamiento favorable se puede comprobar en los resultados de diferentes estudios llevados a cabo en Europa en los últimos años, de los que se han presentado tres ejemplos representativos correspondientes a aplicaciones diversas (un puente, traviesas prefabricadas de hormigón para ferrocarril y tubos de saneamiento así mismo prefabricados). En estos estudios, desarrollados por diferentes entidades públicas o privadas, los resultados correspondientes a las soluciones con base cemento han sido muy favorables. Debe recordarse, sin embargo, que los resultados obtenidos dependen de circunstancias (espaciales, temporales) e hipótesis diversas, que pueden hacer variar los resultados.

En el campo de los pavimentos, en el que el hormigón tiene también una amplia aplicación en muchos países, se ha podido comprobar su correcto comportamiento respecto a soluciones alternativas a través de los resultados de un detallado estudio desarrollado en los países nórdicos y de su aplicación a varias secciones estructurales españolas.

14. AGRADECIMIENTOS

Los autores de este artículo desean hacer público su agradecimiento por el apoyo recibido de la DGICYT a través de los proyectos *Compuestos pseudo-dúctiles de alta integridad mecánica con base cemento: desarrollo y caracterización, aplicaciones y evaluación del ciclo de vida (MAT96-0967)* y *Optimización técnica, económica y medioambiental de procesos constructivos mediante hormigón proyectado por vía húmeda (TRA99-0788)*; del proyecto *FEDER Diseño integrado de hormigones de altas prestaciones dirigido al usuario (DIHAPO)*; del IECA a través del proyecto *Análisis del ciclo de vida de productos derivados del cemento* y del seguimiento de los trabajos desarrollados; y de las empresas *Cementos Molins Industrial, Uniland Cementera y Compañía Valenciana de Cementos Portland* en la recopilación de información y en el seguimiento de los trabajos desarrollados y a través de su colaboración con los mismos.

15. REFERENCIAS

1. **Ahbe, S., Braunschweig, A. y Müller-Wenk, R. (1990).** *Methodik für Oekobilanzen auf der Basis ökologischer Optimierung.* 133, BUWAL, Berna.
2. **Ankele, K. y Steinfeldt, M. (1995).** *Ökobilanz für typische YTONG-Produktanwendungen.* IÖW, Inst. de Inv. de Econ. Ecol., Berlín, 175 pp.
3. **Cembureau, (1995).** *Concrete: the benefit to the environment.* Asoc. Eur. Fabr. Cem., Bruselas, 95 pp.
4. **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.
5. **CICCP (1976).** *Cerdá 1876-1976.* Col. Ing. Cam., Can. y P., 191 pp.
6. **CML (1992).** *Environmental Life-Cycle Assessment of Products - Guide - Backgrounds.* CML-TNO-B&G, NOH-9253/54, ISBN 90-5191-064-9, Leiden, 224 pp.
7. **COMAC, (1999).** *Estadísticas del sector cementero español.* COMAC, Madrid, diciembre, 85 pp.
8. **Elias, X. (1996).** *Introducción de subproductos de otras industrias - Materiales reciclados - Materiales reciclables - El mercado de segunda mano. I Jornadas: Construcción y Desarrollo Sostenible,* Barcelona, 16-18/5/96, Col. Apar. y Arq. Téc. de Barcelona, ISBN 84-87104-27-4, pp. 192-194.

9. **Fossdal, S. (1995).** *Energi- og miljøregnskap for bygg, Fremstilling av byggematerialer, Regnskap for boliger og kontorbygg.* Byggforsk 173, Oslo.
10. **Häkkinen, T. y Mäkelä, K. (1996).** *Environmental adaption of concrete. Environmental impact of concrete and asphalt pavements.* ISBN, 951-38-4907-4, 98 pp., VTT, Tech. Res. Centre of Finland, Espoo.
11. **Hoefnagels, F. y De Lange, V. (1993).** *De millieubelasting van houten en betonnen dwarsliggers.* CREM, Asesoría e Investigación para Gestión Medioambiental, Amsterdam.
12. **Intron (1995a).** *Milieu-profiel en milieumaten van een betonnen buitenriolering - Indicatieve levenscyclusanalyse van pvc en gres rioolbuizen in vergelijking met beton.* Intron 95027 y 95195, Sittard.
13. **Intron (1995b).** *LCA study – Environmental profile and environmental measures of a concrete external sewer.* Sewer Technology, 6º año, septiembre.
14. **Irigoyen, X. y Sanz, E. (1996).** *Los residuos de construcción y de derribo en Cataluña.* 1992. *I Jornadas: Construcción y Desarrollo Sostenible*, Barcelona, 16-18/5/96, Col. Apar. y Arq. Téc. de Barcelona, ISBN 84-87104-27-4, pp. 213-215.
15. **Kortman, J.G.M., Kindeijer, E.W., Sas, H. y Sprengers, M. (1995).** *Towards a single indicator for emissions - An exercise in aggregating environmental effects.* IDES, CE, Infoplan, Amsterdam.
16. **Kortman, J.G.M. y Lim, R.G. (1992).** *Milieu-Vergelijking van twee Aanbruggen.* Universidad de Amsterdam.
17. **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, ISBN 84-87104-27-4, p. 268.
18. **Ministerio de Fomento (1997).** *Secciones de firme – Instrucción 6.1-I.C. y 6.2-I.C.* Serie normativas – Instrucciones de Construcción, Ministerio de Fomento, ISBN 84-7433-648-1, Madrid, 104 pp.
19. **Nordic (1995).** *Nordic Guidelines on Life-Cycle Assessment.* Nord, ISBN 92-9120-692, Estocolmo.
20. **ONU (1987).** Informe Brundtland, ONU, Nueva York.
21. **ONU (1992).** *The Earth Summit, United Nations Conference on Environment and Development - Rio Declaration on Environment and Development.* ONU, Río de Janeiro, 3 pp.
22. **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, ISBN 84-87104-27-4, p. 267.
23. **SBI (1993).** *Environmental data for building materials.* Inst. Danés Invest. en Edif., SBI 224, Høshholm, 54 pp.
24. **SEOPAN (1999).** *Construcción - Informe anual - 1999.* Asoc. Nac. Empr. Constr. Ámb. Nac. (SEOPAN), Madrid, D.L. M.28.351-1999, 170 pp.
25. **SETAC (1993).** *A Conceptual Framework for Life-Cycle Impact Assessment - Guidelines for Life-Cycle Assessment: a 'Code of Practice'.* Soc. de Quím. y Toxic. Medioamb., Bruselas.
26. **TNO e Intron (1994).** *Black top versus concrete.* TNO/Bouw- Intron, Delft-Sittard.
27. **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, ISBN 84-87104-27-4, p. 269.
28. **Vold, M. y Rønning, A. (1995).** *LCA of Cement and Concrete.* Stiftelsen Østfoldforskning OR 32.95, ISBN 82-7520-213-2, Fredrikstad, 50 pp.
29. **Xercavins, J. (1996).** *¿Qué es el desarrollo sostenible?.* *I Jornadas: Construcción y Desarrollo Sostenible*, Barcelona, 16-18/5/96, Col. Apar. y Arq. Téc. de Barcelona, ISBN 84-87104-27-4, pp. 172-174.