



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIEROS INDUSTRIALES

DTO. DE EXPRESIÓN GRÁFICA, DISEÑO Y PROYECTOS
ÁREA DE EXPRESIÓN GRÁFICA EN LA INGENIERÍA

PROYECTO FINAL DE CARRERA
ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN ADOQUÍN

Alumno: Francisco Pinto Oliver
Directora: María Luz García Ceballos
Ponente: José Ramón de Andrés Díaz
Titulación: Ingeniero Industrial

Índice general

1	Introducción	3
1.1	Antecedentes	3
1.2	Objetivos y alcance	4
2	Prefabricados del cemento. Adoquines	5
2.1	Descripción general	5
2.1.1	Ventajas del uso de adoquines	6
2.2	Materias primas	7
2.2.1	Cemento	8
2.2.2	Áridos	9
2.2.3	Arena	9
2.2.4	Agua	9
2.2.5	Aditivos	9
2.2.6	Pigmentos	9
3	Instalación del adoquín	10
3.1	Capas componentes	10
3.2	Determinación de la sección tipo	11
3.2.1	Tipo de explanada	11
3.2.2	Categoría de tráfico	12
3.3	Secciones tipo	12
A	Planos	17

Índice de figuras

3.1	Secciones tipo para base granular. Unidades en cm.	14
3.2	Secciones tipo para base de hormigon. Unidades en cm.	14

Índice de tablas

3.1	Índice CBR.	11
3.2	Categoría de tráfico.	12
3.3	Categoría de tráfico en viales y zonas de aparcamiento.	12
3.4	Intensidades de uso en zonas industriales.	13
3.5	Categoría de tráfico en zonas industriales.	13

Agradecimientos

A la directora de este proyecto,
por su inestimable ayuda.

A mi familia y amigos,
por esos buenos momentos.

A María y Daniel,
sin vosotros no sería lo mismo.

Memoria

Capítulo 1

Introducción

1.1 Antecedentes

La mayoría de las ciudades europeas utilizan materiales prefabricados basados en el cemento para urbanizar el terreno transformándolo en espacio público que utilizarán los ciudadanos. Estas instalaciones deben ser resistentes, económicas, funcionales y sobre todo sostenibles. La sostenibilidad es un requisito que ha ido ganando importancia en los últimos años debido no solo al aspecto económico — costes y mantenimiento principalmente — sino también al medioambiental.

El impacto medioambiental que producen las actividades humanas en la naturaleza ha pasado a ser un elemento más de estudio en cualquier proyecto de ingeniería actual. En el caso de este proyecto, el sector de las obras civiles y urbanismo supone un consumo muy elevado de materias primas y energía debido a que representa un porcentaje importante de la actividad económica de cualquier país occidental, lo que implica altas emisiones al medio ambiente. De esta manera, utilizando la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se pretende conocer con una rigurosidad adecuada el ciclo de vida de un producto y/o servicio, evaluando el impacto potencial sobre el medio ambiente a lo largo de su vida.

1.2 Objetivos y alcance

El objetivo principal de este proyecto es el Análisis de Ciclo de Vida de un adoquín común utilizado en obras civiles y urbanismo. Se pretende analizar todas las entradas y salidas tanto de materiales como de energía desde la extracción de la materia prima hasta el final de vida del producto, además de identificar y clasificar los principales aspectos medioambientales y sus correspondientes impactos en los diferentes procesos que intervienen en su fabricación. De esta forma, se pueden establecer los siguientes objetivos básicos:

- análisis del ciclo de vida de las materias primas hasta que llegan a la planta de fabricación.
- análisis del ciclo de vida de los procesos productivos involucrados en el proceso de fabricación hasta su salida.
- análisis del ciclo de vida del producto hasta su final de vida.

A su vez, la redacción del presente proyecto bajo la dirección del Departamento de Expresión Gráfica, Diseño y Proyectos de la Universidad de Málaga tiene como finalidad última la obtención del título de Ingeniero Industrial.

Capítulo 2

Prefabricados del cemento. Adoquines

2.1 Descripción general

A lo largo de la historia de la humanidad se han ido utilizando diferentes tipos de adoquines para pavimentar los suelos urbanos [EADMT04]. Los primeros adoquines eran de piedra, obtenidos a partir de los guijarros de río colocados sobre una capa de arena, usando una mezcla de cal y arena como sellante de juntas.

Debido al coste y el ruido del tráfico rodado, en la primera mitad del siglo XIX comenzaron a usarse los adoquines de madera, utilizando para el sellado residuos bituminosos. Debido a su reducida duración y a la posterior aparición de los neumáticos, los adoquines de madera son sustituidos por un modelo cerámico, con el que se usaba la misma arena tanto para la base como sellante.

Los adoquines de piedra seguían siendo más resistentes y además no eran tan deslizantes como los cerámicos, por lo que a finales del siglo XIX se comenzó la fabricación de los adoquines de hormigón. Estos proporcionaban una mayor uniformidad que los de piedra, eran muy resistentes y con un coste inferior. Alemania y Holanda fueron los primeros en incorporar este nuevo formato de adoquín a sus núcleos urbanos. Al principio se usaban modelos que imitaban a los de piedra tanto en forma como colocación, pero pronto se añadieron formas dentadas o curvas, permitiendo una mejor alineación con el trazado.

Finalmente, durante la década de los 70 se mejoraron sustancialmente los sistemas

de fabricación, permitiendo una gran variedad de modelos de adoquines y un abaratamiento de los costes de fabricación e instalación.

2.1.1 Ventajas del uso de adoquines

En comparación con otros tipos de pavimentos tales como los asfálticos o los pavimentos continuos hormigonados, los adoquines presentan las siguientes ventajas:

- **Fabricación:** no se utilizan derivados del petróleo, que suelen ser caros y contaminantes, además de requerir una mayor aportación de energía durante el proceso de fabricación. En contraposición, pueden utilizarse cementos y áridos locales, disminuyendo los costes de transporte.

El proceso de fabricación de los adoquines requiere una maquinaria específica debido a que son sometidos a presión y vibración para asegurar una resistencia y durabilidad adecuadas. Esto implica un control sobre la fabricación, consistencia y fiabilidad del producto mayor que el resto de pavimentos.

- **Instalación:** aunque los adoquines pueden colocarse de forma automatizada, están diseñados de base para ser colocados manualmente, permitiendo instalarse en zonas de difícil acceso, cargas elevadas (muelles de carga, aeropuertos, ...), resolver trazados complejos o pendientes pronunciadas. A diferencia de los pavimentos asfálticos, su ejecución no depende de la temperatura ambiente y pueden ser utilizados inmediatamente después de su finalización, lo que implica una reducción en los tiempos de ejecución de obra.
- **Comportamiento:** los adoquines pueden ser diseñados para ser muy resistentes tanto a cargas verticales (distribuidas o puntuales) como a esfuerzos horizontales (aceleración-frenada, giros,...). Además, soportan bien sin degradarse los vertidos de aceites y combustibles sobre el pavimento. Los niveles de ruido generados por el tráfico son similares o inferiores a otros pavimentos en ausencia de humedad y sensiblemente inferiores en condiciones de humedad, especialmente a bajas velocidades. La resistencia a deslizamiento es mayor al del resto de pavimentos.

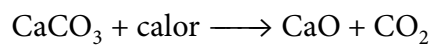
- **Mantenimiento:** la vida útil del adoquín viene determinada principalmente por el comportamiento de la base, subbase y explanada y no por el propio adoquín. La vida útil de cálculo suele ser a 30 años, aunque en condiciones normales puede superar los 50 años. De esta manera, al renovar el pavimento se pueden reutilizar entre un 90 y un 95% de los adoquines originales [EADMT04]. El adoquín es la mejor opción en zonas donde aún no se han implantado todos los servicios de públicos debido a que pueden ser levantados fácilmente para llevar tareas de instalación o reparación en el subsuelo. La conservación de los adoquines se limita al relleno de juntas erosionadas con arena de sellado cada cierto tiempo y a la reposición de adoquines fracturados.
- **Costes:** aunque inicialmente el precio del metro cuadrado instalado es algo superior a otros pavimentos, a largo plazo es mucho más barato debido al menor mantenimiento y la reutilización de piezas. Los pavimentos asfálticos y hormigonados requieren un mayor esfuerzo e inversión a la hora de ser reparados o retirados para acceder al subsuelo.
- **Aspecto estético:** actualmente los adoquines pueden diseñarse de todas formas, texturas, colores y disposiciones según las necesidades de la obra.

2.2 Materias primas

Las características de las materias primas que se pueden emplear en la fabricación de los adoquines se contemplan en la norma *UNE EN 1338:2004/AC:2006*. En ella se especifican detalladamente los materiales, propiedades, requisitos y métodos de ensayo de los adoquines prefabricados de hormigón no armados y accesorios complementarios, previstos para uso peatonal, uso en áreas sometidas a tráfico de vehículos y cubiertas, como por ejemplo: aceras, límites de áreas, sendas para bicicletas, aparcamientos, carreteras, autopistas, áreas industriales, aeropuertos, estaciones de autobuses y gasolineras. Esta norma no trata la visibilidad y la tactibilidad de los adoquines ni los adoquines permeables.

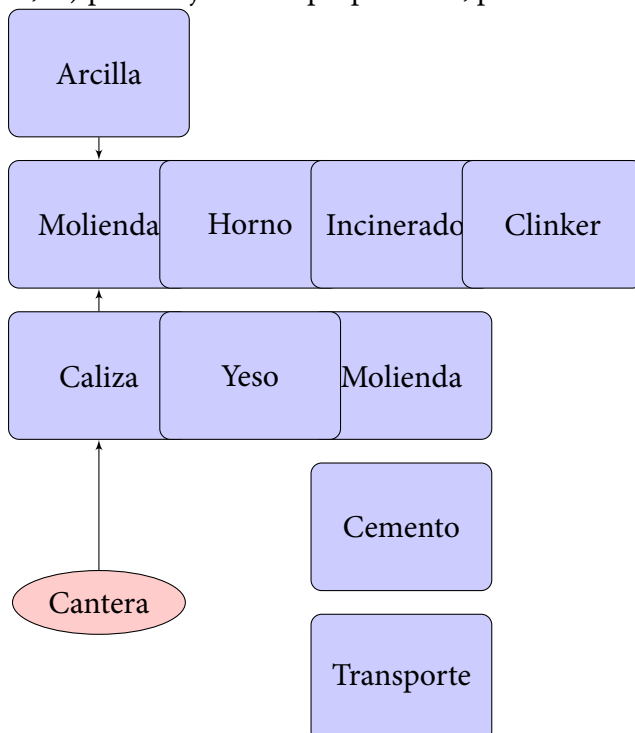
2.2.1 Cemento

El cemento es un conglomerante, formado a partir de arcilla y caliza (CaCO_3), que se endure al mezclarse con agua. Para producir cemento, la arcilla y la caliza se muelen juntas. A esta mezcla se le añade yeso para conferirle la propiedad de fraguar y endurecerse. El resultado se introduce en un horno rotatorio, normalmente seco por ser más eficiente energéticamente, a una temperatura aproximada de 1450°C . A continuación se introduce el material en un incinerador donde el calentamiento produce la liberación del CO_2 de la caliza y se produce el cemento *clinker*.



El clinker es el óxido de calcio (CaO) obtenido de la reacción anterior, que puede encontrarse acompañado de otros minerales como hierro, aluminio o silicio. El aporte de calor necesario para obtener el clinker representa la mayor parte del coste energético en la producción de cemento.

Por último, se produce la molienda del clinker junto yeso y otros materiales (bauxita, arena,...) para mejorar sus propiedades, produciendo el cemento.



Cuando se utiliza la palabra *cemento* se refiere normalmente a un cemento tipo Portland (supone un 95% de la producción de cementos [JSJUN05]), nombre no comercial que implica un proceso de producción y una composición característicos. De acuerdo a la norma UNE-EN 197-1:2011 [UNE1971], el cemento se divide en tres grupos en función de la cantidad de cemento Portland incluido: CEM I, CEM II y CEM III. El CEM I (95% a 100% de contenido de cemento Portland) es el más usado en la fabricación de adoquines.

Con respecto a la normativa específica de adoquines, la norma UNE 80301:1996 [?] en el ámbito de España establece los requisitos que debe tener el cemento común. Si se utilizan cementos especiales se recurrirá a la norma UNE 80303:2013, y si son blancos a la norma UNE 80305:2012.

2.2.2 Áridos

Se emplearán procedentes de río, de mina o piedras trituradas. La granulometría de los áridos que se utilicen será estudiada por el fabricante de manera que el producto terminado cumpla las características señaladas en la norma prEN 12620 (norma Europea).

2.2.3 Arena

2.2.4 Agua

Serán utilizadas, tanto para el amasado como para el curado, todas las aguas que no perjudiquen el fraguado y endurecimiento de los hormigones.

2.2.5 Aditivos

Se podrán utilizar adicciones y aditivos siempre que la sustancia agregada en las proporciones previstas, produzca el efecto deseado, sin perturbar las demás características del hormigón o mortero.

2.2.6 Pigmentos

Inorgánicos.

Capítulo 3

Instalación del adoquín

3.1 Capas componentes

(Fuente: Manual Técnico para la correcta colocación de los Euroadoquines (MTCE 04))

- Explanada: Terreno natural adecuadamente compactado hasta alcanzar una capacidad portante mínima.
- Subbase: Conjunto de capas naturales, de material granular seleccionado, estabilizado y compactado, situadas directamente sobre la explanada.
- Base: Principal elemento portante de la estructura, situada sobre la subbase. Puede ser realizada con material granular, zahorra artificial, con un mayor grado de compactación que el alcanzado en la subbase (Base Flexible), o estar realizada con hormigón magro (Base Rígida).
- Lecho de árido: Base de apoyo de los adoquines, destinada a absorber sus diferencias de espesor debidas a la tolerancia de fabricación, de manera que estos una vez compactados formen una superficie homogénea.
- Adoquines: Elementos prefabricados de hormigón, cuya cara exterior, una vez colocados, forman la capa de rodadura de la superficie a pavimentar.

- Relleno final: Una vez encastrados en el lecho de árido, sus juntas precisan un relleno final para transferir a los elementos contiguos las cargas a las que sean sometidos por acción del tráfico.

3.2 Determinación de la sección tipo

Se consideran los siguientes casos:

1. Viales y zonas de aparcamiento¹.
2. Zonas industriales.

Para cada caso, viales o zonas industriales, la sección puede obtenerse de forma abreviada en función de dos variables:

- Tipo de explanadas.
- Categoría de tráfico.

3.2.1 Tipo de explanada

Se utiliza un sistema de clasificación de su capacidad portante mediante el índice CBR (California Bearing Ratio), indicando el tanto por ciento de la presión ejercida por un pistón sobre el suelo para alcanzar una determinada penetración baremado según un juego de muestras normalizados (ver tabla 3.1).

Calidad de la explanada	Índice CBR
E1	$5 \leq \text{CBR} = 10$
E2	$10 \leq \text{CBR} = 20$
E3	$20 \leq \text{CBR}$

Tabla 3.1: Índice CBR.

¹No suelen existir zonas peatonales puras (paso eventual de vehículos de mantenimiento, limpieza y servicios).

3.2.2 Categoría de tráfico

Tipo	Categoría de tráfico
Viales y zonas de aparcamiento	C0 ...C4
Zonas industriales	A ...D

Tabla 3.2: Categoría de tráfico.

Categorías de tráfico en viales y zonas de aparcamiento

Si en un área limitada existen diversos usos, a efectos de unificación se debería emplear para toda la zona la carga de cálculo más exigente.

Uso previsto	Categoría de tráfico
Arterias principales con gran afluencia de tráfico, paradas de bus, estaciones de servicio, etc. (50 a 149 v.p.d.)	C0
Arterias principales (25 a 49 v.p.d.)	C1
Calles comerciales con gran actividad (16 a 24 v.p.d.)	C2
Calles comerciales con escasa actividad (15 v.p.d.)	C3
Áreas peatonales, calles residenciales	C4

Tabla 3.3: Categoría de tráfico en viales y zonas de aparcamiento.

Categorías de tráfico en zonas industriales

3.3 Secciones tipo

Las secciones tipo según la base y el uso previsto del área vistas en la sección 3.2 pueden resumirse en cinco tipos para cada tipo de base, granular (figura 3.1) u hormigón magro (figura 3.2).

Área		Uso	Intensidad de uso
Comercial	De operación		Alta
	Almacenamiento	Mercancía convencional	Media
		Mercancía pesada	Alta
	Manipulación		Alta
	Estacionamiento	Vehículos pesados y ligeros	Media
		Vehículos pesados exclusivamente	Alta
		Semirremolques	Alta
Militar	De operación		Alta
	Almacenamiento	Mercancía convencional	Media
		Mercancía pesada y semirremolques	Alta
Pesquera	Almacenamiento		Media
	Manipulación		Alta
	Clasificación y venta		Media
Industrial	De operación		Alta
	Almacenamiento	Mercancía convencional	Media
		Mercancía pesada	Alta

Tabla 3.4: Intensidades de uso en zonas industriales.

Intensidad de uso	Carga de cálculo		
	Alta	Media	Baja
Elevada	A	B	C
Media	A	B	D
Reducida	B	C	D

Tabla 3.5: Categoría de tráfico en zonas industriales.

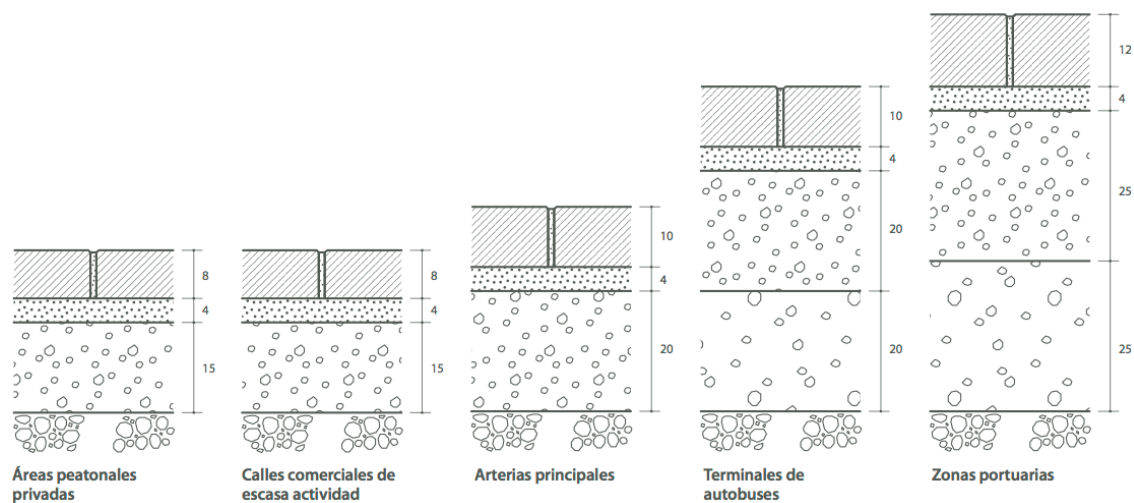


Figura 3.1: Secciones tipo para base granular. Unidades en cm.

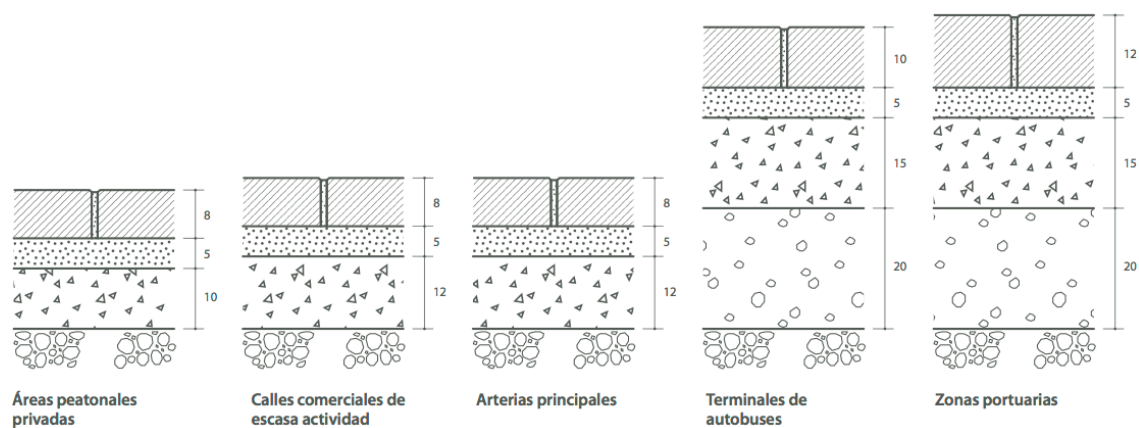


Figura 3.2: Secciones tipo para base de hormigon. Unidades en cm.

Pliego de condiciones

Condiciones generales

- Artículo 1.- El autor de este proyecto cede al 50% los derechos derivados de este proyecto al Departamento de Expresión Gráfica, Diseño y Proyectos de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de la Universidad de Málaga.
- Artículo 2.- El presente proyecto será realizado por el autor del mismo, bajo dirección y supervisión del tutor. Si esto no fuera posible, dicha realización y asesoría debería ser llevada a cabo por personal del Departamento de Expresión Gráfica, Diseño y Proyectos de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de la Universidad de Málaga.
- Artículo 3.- El autor del presente proyecto deberá ser puntualmente informado de los posibles cambios o modificaciones que pudiesen realizarse en el mismo.
- Artículo 4.- Se autoriza la consulta de este proyecto a toda persona autorizada por parte del Departamento de Expresión Gráfica, Diseño y Proyectos y a cualquier persona matriculada en la Universidad de Málaga que podrá solicitar el Proyecto en la Biblioteca de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de la Universidad de Málaga.
- Artículo 5.- En el caso de cambios o desarrollos posteriores de este proyecto se informará al autor para colaborar en el estudio o investigación que se este realizando.

31 de agosto de 2013

Fdo. Francisco José Pinto Oliver

Apéndice A

Planos

En este apéndice se incluyen los planos de la planta de fabricación de materiales prefabricados y los modelos de fabricación del adoquín y su molde.

Bibliografía

- [PFULL97] Fullana, P. y Puig, R., *Análisis de Ciclo de Vida*, Editorial Rubens, Barcelona (España), 1997.
- [MLGAR13] García Ceballos, M. L., *Tesis Doctoral. Análisis de Ciclo de Vida de Puntos de Luz de Alumbrado Exterior*, Universidad de Málaga, Málaga (España), 2013, pp.56.
- [MGOED10] Goedkoop, M. et al., *SimaPro 7 Tutorial*, Pré Consultants, Amersfoort (Holanda), 2010, disponible en <http://http://www.pre-sustainability.com/manuals>.
- [NJUNG11] Jungbluth, N. et al., *Environmetal Impacts of Swiss Consumption and Production*. Federal Office for the Environment, Ginebra (Suiza), 2011.
- [JSJUN05] Sjunnesson, J., *Life Cycle Assessment of Concrete Master Thesis*, Environmental and Energy Systems Studies, Lund University, Lund (Suecia), 2005.
- [ISO14040] International Organization for Standardization, *UNE-EN-ISO 14040:2006, Gestión Ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia*, AENOR, Madrid (España), 2006.
- [ISO14440] International Organization for Standardization, *UNE-EN-ISO 14440:2006, Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Requisitos y Directrices*, AENOR, Madrid (España), 2006.

- [ISO150041] International Organization for Standardization, *UNE-EN-ISO 150041EX:1998, Análisis de ciclo de vida simplificado*, AENOR, Madrid (España), 2006.
- [UNE127338] Una Norma Española, *UNE 127338:2007 Propiedades y condiciones de suministro y recepción de los adoquines de hormigón. Complemento nacional a la Norma UNE EN 1338.*, AENOR, Madrid (España), 2007.
- [UNE1338] Una Norma Española, *UNE EN 1338:2004/AC:2006 Adoquines de hormigón. Especificaciones y métodos de ensayo.*, AENOR, Madrid (España), 2006.
- [EADMT04] Asociación Española para la Investigación y Desarrollo del Adoquín de Hormigón, *Manual Técnico del Euroadoquín, MTE-04*, Madrid (España), 2004.
- [EADMC04] Asociación Española para la Investigación y Desarrollo del Adoquín de Hormigón, *Manual Técnico para la correcta colocación de los Euroadoquines, MTCE-04*, Madrid (España), 2004.
- [UNE1971] Una Norma Española, *UNE-EN 197-1:2011 La norma europea de especificaciones de cementos comunes.*, AENOR, Madrid (España), 2011.
- [UNE1971] Una Norma Española, *UNE 80301:1996 Cementos. Cementos comunes. Composición, especificaciones y criterios de conformidad.*, AENOR, Madrid (España), 1996.
- [ANDEC13] Asociación Nacional de la Industria del Prefabricado de Hormigón (AN-DECE), *Los prefabricados de hormigón*, Madrid (España), consultado el 03-07-2013, disponible en <http://www.andece.org>.
- [IECA13] Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA), *Guías Técnicas*, Madrid (España), consultado el 24-07-2013, disponible en http://www.ieca.es/lstFichas.asp?id_cat=113.
- [ALBER12] Prefabricados Alberdi, *Preguntas frecuentes*, Vizcaya (España), consultado el 28-06-2013, disponible en <http://www.prefabricadosalberdi.com/alberdi/dm/faq.asp?nombre=2370&hoja=0&sesion=1>