



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

<b>I</b>	<b>Memoria</b>	<b>2</b>
<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>3</b>
1.1	Antecedentes . . . . .	3
1.2	Objetivos y alcance . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Prefabricados del cemento. Adoquines</b>	<b>5</b>
2.1	Descripción general . . . . .	5
2.1.1	Ventajas del uso de adoquines . . . . .	6
2.1.2	Desventajas del uso de adoquines. Otros detalles . . . . .	7
2.2	Materias primas . . . . .	7
2.2.1	Cemento . . . . .	8
2.2.2	Áridos . . . . .	8
2.2.3	Agua . . . . .	10
2.2.4	Aditivos . . . . .	11
2.3	Reciclado . . . . .	11
<b>3</b>	<b>El Análisis de Ciclo de Vida</b>	<b>13</b>
3.1	Introducción . . . . .	13
3.2	Relación entre la construcción y el medioambiente . . . . .	14
3.3	Descripción del ciclo de vida de un producto de la construcción . . . . .	15
3.4	Impactos potenciales del adoquín al medio ambiente . . . . .	15
3.5	Análisis de Ciclo de Vida. Proceso completo . . . . .	18
3.6	SimaPro . . . . .	18

3.6.1	Bases de datos en SimaPro . . . . .	19
<b>4</b>	<b>Análisis de Ciclo de Vida: fabricación</b>	<b>22</b>
4.1	Cemento . . . . .	22
4.2	Arena y áridos . . . . .	22
4.3	Agua . . . . .	23
4.4	Cintas transportadoras . . . . .	24
4.5	Dosificación . . . . .	25
4.6	Amasado . . . . .	25
4.7	Vibrocompresión . . . . .	25
4.8	Curado . . . . .	25
4.9	Embalaje y almacenamiento . . . . .	25
4.10	Suministro . . . . .	25
4.11	Recepción . . . . .	25
<b>5</b>	<b>Instalación del adoquín</b>	<b>26</b>
5.1	Capas componentes . . . . .	26
5.2	Determinación de la sección tipo . . . . .	27
5.2.1	Tipo de explanada . . . . .	27
5.2.2	Categoría de tráfico . . . . .	28
5.3	Secciones tipo . . . . .	28
<b>6</b>	<b>Fin de vida</b>	<b>31</b>
6.1	Introducción . . . . .	31
6.2	Reciclaje . . . . .	31
6.3	Procesos . . . . .	31
<b>II</b>	<b>Pliego de condiciones</b>	<b>32</b>
<b>7</b>	<b>Condiciones generales</b>	<b>33</b>

<b>III</b>	<b>Presupuesto</b>	<b>35</b>
8	Coste de materiales	36
9	Coste de desarrollo	38
10	Presupuesto completo	39
A	Planos	40
B	Resultados de SimaPro	41

# Índice de figuras

2.1	Diagrama de flujo de la fabricación del cemento. . . . .	9
3.1	Flujo genérico del ciclo de vida de un producto . . . . .	16
3.2	Niveles de estudio del ciclo de vida. . . . .	17
3.3	Estructura de SimaPro. . . . .	18
3.4	Estructura de una base de datos de SimaPro. . . . .	20
3.5	Estructura de la base de datos de <i>ecoinvent</i> . . . . .	21
4.1	Diagrama de flujo de la fabricación de adoquines. . . . .	23
5.1	Secciones tipo para base granular. Unidades en cm. . . . .	30
5.2	Secciones tipo para base de hormigon. Unidades en cm. . . . .	30

# Índice de tablas

5.1	Índice CBR. . . . .	27
5.2	Categoría de tráfico. . . . .	28
5.3	Categoría de tráfico en viales y zonas de aparcamiento. . . . .	28
5.4	Intensidades de uso en zonas industriales. . . . .	29
5.5	Categoría de tráfico en zonas industriales. . . . .	29
8.1	Presupuesto de materiales. . . . .	37
9.1	Presupuesto de desarrollo. . . . .	38
10.1	Presupuesto completo. . . . .	39

# 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.

# **Parte I**

## **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 [Aso04]. 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 [Aso04]. 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.

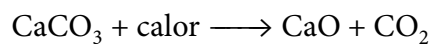
### **2.1.2 Desventajas del uso de adoquines. Otros detalles**

## **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 ( $\text{CaCO}_3$ ), que se endure al mezclarse con agua. Para producir cemento (ver figura 2.1), 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  $1450^\circ\text{C}$ . A continuación se introduce el material en un incinerador donde el calentamiento produce la liberación del  $\text{CO}_2$  de la caliza y se produce el cemento *clinker*.



El clinker es el óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) 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 [Sju05]), nombre no comercial que implica un proceso de producción y una composición característicos. De acuerdo a la norma UNE-EN 197-1:2011 [UNE11], 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 [UNE96] 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

Los áridos (entre los que se incluye la arena) son partículas de roca puede ser tanto gravas (piedras de forma natural) como macadán (piedras trituradas), teniendo cada tipo

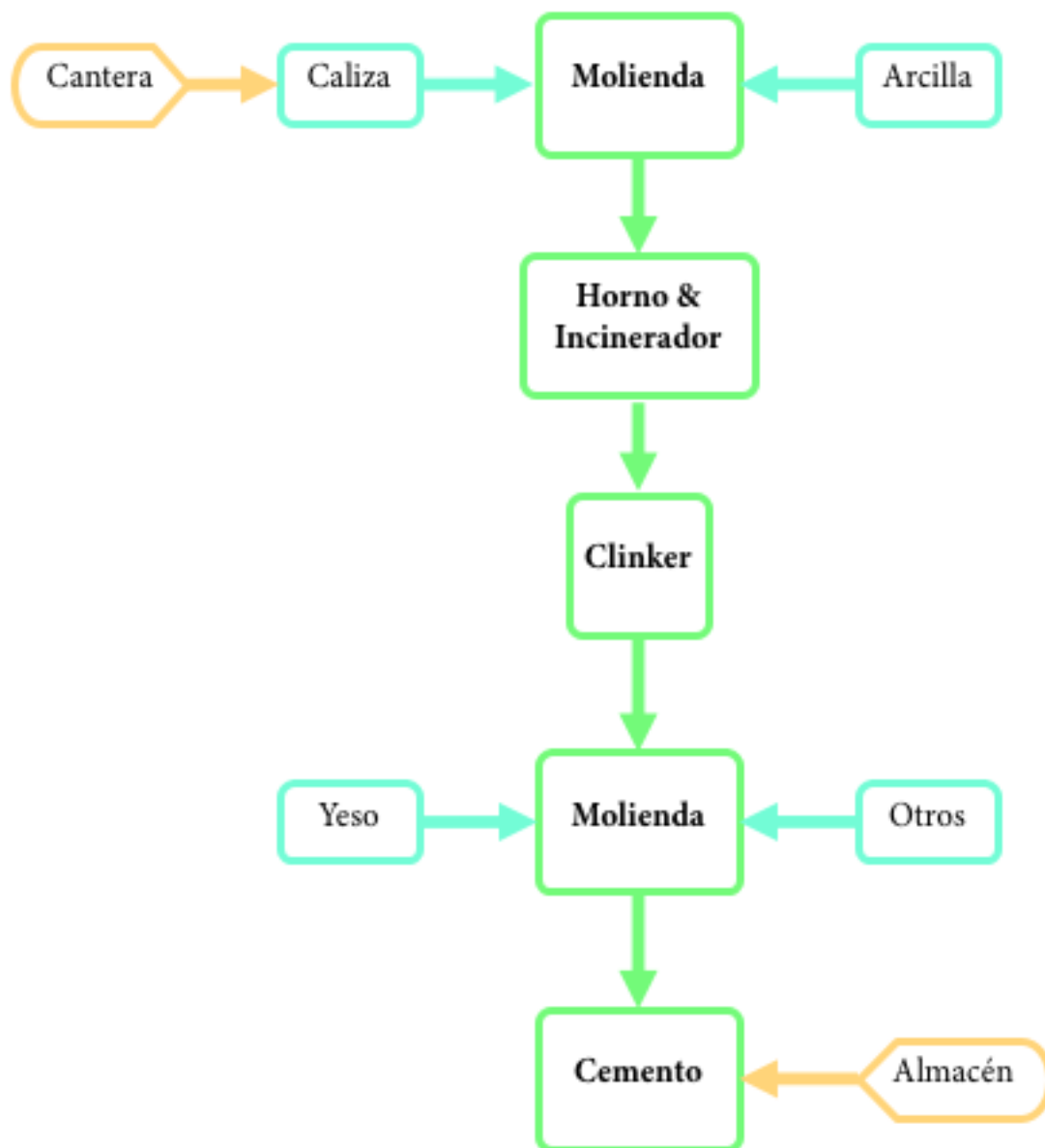


Figura 2.1: Diagrama de flujo de la fabricación del cemento.

una textura diferente. Se pueden añadir diferentes tamaños de áridos para ejercer una función diferente según el mismo. Fracciones menores rellenarán las cavidades que haya entre partículas mayores, aportando adherencia a costa de un mayor peso.

El material de machaqueo para la producción de macadán se criba para eliminar las

partículas menores. Debido a que las partículas que forman el macadán son más irregulares, es más fiable como material de relleno por su capacidad de incrustamiento (la grava tiene una forma más redondeada). El macadán se puede ser utilizado de forma más generalizada en función de la localización ya que la grava natural es un recurso más limitado.

La fuente de recursos de áridos son principalmente de río, mina o cantera o piedras trituradas (macadán). La granulometría de los áridos que se utilicen deberá cumplir las características indicada en la norma UNE EN 1338:2004/AC:2006.

### **2.2.3 Agua**

El agua es muy importante en la constitución del hormigón. Reacciona químicamente con el cemento —hidratación— para proporcionar las propiedades deseadas del hormigón [Nat13]. El agua de amasado es la cantidad de agua que toma contacto con el cemento y se usa para determinar las proporciones del resto de elementos para formar la mezcla. La fuerza y la durabilidad del cemento viene dado en gran parte por la cantidad de agua.

Además de su cantidad, la calidad del agua utilizada tiene efectos importantes en las propiedades del hormigón fresco, tales como el tiempo de fraguado y la facilidad de trabajo. También tiene importantes en la fuerza y durabilidad del hormigón endurecido.

#### **Fuentes posibles de agua**

Por norma general el agua adecuada para el consumo humano —agua potable— es válida. No obstante, el agua no potable puede ser utilizada siempre que no tenga un impacto negativo en las propiedades del hormigón. La mayoría de las plantas tienen una fuente de agua municipal que proporciona potable sin pruebas de calidad. En zonas rurales o en plantas portátiles in situ —instaladas y desinstaladas en el propio lugar del proyecto—, habrá que utilizar fuentes de agua no potable como ríos o masas de agua.

Otra fuente de agua es la reciclada de la limpieza —agua de lavado— de la mezcladora y otros elementos de la planta. También se podrá aprovechar el agua de precipitaciones atmosféricas que pueda recolectarse en las instalaciones de la planta.



El agua de procesado no sólo se genera de la fabricación del hormigón, sino también del lavado del hormigón reciclado. Los sistemas de recolección procesan el agua con el cemento y los áridos en forma de lechada que puede ser también utilizada como agua para la mezcla de hormigón.

Las normativas medioambientales suelen requerir que las plantas de fabricación traten y procesen tanto el agua de lluvia como el de procesado —agua de operaciones— para que adquiera ciertos niveles de pH y contenidos sólidos antes de que abandonen las instalaciones [Eur06].

### **Cualificación del agua no potable**

El agua es el recurso más importante para el ser humano. En algunas zonas el suministro de agua potable es muy escaso. El uso de fuentes de agua no potables para la producción de hormigón mantiene una producción sostenible de hormigón conservando los recursos de agua potable. La gestión del agua procedente de la producción de hormigón conforme con las normativas medioambientales representa un coste adicional para el fabricante, por lo que el uso de agua no potable representa un ahorro considerable en la producción de hormigón. Cuando se utilizan fuentes de agua no potable es importante verificar y documentar que las impurezas que contiene no merman las características del hormigón, ya que las fuentes pueden contener aceites, grasas, sales disueltas y otros elementos no controlados. Por esta razón, el fabricante debería tener en cuenta que su uso implica un coste adicional que evaluar y controlar.

#### **2.2.4 Aditivos**

Se podrán utilizar adiciones o aditivos siempre que produzcan el efecto deseado (acelerante, retardante,...) y no afecte a las características esperadas del hormigón.

### **2.3 Reciclado**

Cuando las construcciones de cemento se demuelen, el cemento es normalmente reutilizables [Sju05]. El cemento se transporta a una estación de reciclaje donde es triturado

hasta un tamaño adecuado con la nueva utilización que se le va a dar. Puede ser empleado como material de relleno para el pavimento de nuevas carreteras o como árido en la producción de más cemento. La reutilización del cemento conlleva una disminución del uso de recursos naturales tales como la piedra o la grava.

HABLAR DEL CASO CONCRETO DE ADOQUINES Y SU RECICLADO (95% se vuelven a usar para pavimentar. 30 años.)

## Capítulo 3

# El Análisis de Ciclo de Vida

### 3.1 Introducción

La importancia de la protección medioambiental ha ido en creciente aumento en los últimos años [ISO06a]. El interés en los procesos de fabricación de los productos tanto manufacturados como consumidos y sus posibles impactos asociados han generado un nuevo campo de desarrollo de técnicas de análisis, entre las que se encuentra el Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

Lo que distingue al ACV del resto de técnicas es que realiza un estudio a lo largo de todas las etapas de la vida de un producto, desde la obtención de la materia prima, pasando por la producción, uso, tratamiento final, reciclado, hasta su disposición final, de la “cuna a la tumba”, abarcando tanto los aspectos ambientales como los impactos potenciales.

El Análisis de Ciclo de Vida sigue los siguientes protocolos estándar:

- UNE-EN-ISO 14040:2006, Gestión Ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia.
- UNE-EN-ISO 14440:2006, Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Requisitos y Directrices.
- UNE-EN-ISO 150041EX:1998, Análisis de ciclo de vida simplificado.

El ACV utilizado como herramienta de gestión ambiental ayuda a identificar los recursos utilizados y los residuos emitidos a los vectores ambientales —emisiones atmosféricas, aguas residuales y suelo— a lo largo de todo el ciclo de vida, ya sea de un producto o un servicio [ISO06b].

## 3.2 Relación entre la construcción y el medioambiente

El sector de la construcción es uno de los más productivos e importantes tanto social como económicamente. Las infraestructuras construidas aportan calidad de vida al ser humano. Como toda actividad humana, el desarrollo de esta actividad provoca impactos significativos en el medio tanto a la hora de producir, usar y eliminar sus productos.

La concienciación de protección del medio ha obligado al sector a mejorar sus actuaciones en esta materia sin disminuir su capacidad productiva para seguir siendo competitivos. Debe crearse un nuevo paradigma de trabajo en el que el usuario esté satisfecho, el consumo de materia y energía sea mínimo, así como el impacto medioambiental, pero a su vez mejorando la calidad y disminuyendo el tiempo y el coste [dCF01].

AUGENBROE, 1998. ITeC, 2000. SYMONDS, 1999.

El impacto medioambiental de un producto cambia según la etapa del ciclo de vida, produciendo diferentes efectos contaminantes sobre el entorno y sobre las personas. Sirva de ejemplos los siguientes datos [dCF01]:

- el sector de la construcción moviliza un 10% de la economía mundial y consume un 40% de la energía mundial producida cada año.
- según estudios realizados en varios países europeos entre los que se encuentra España, el consumo energético asociado al sector se distribuye en:
  - 19% para la construcción y mantenimiento de edificios.
  - 48% para el consumo directo debido a su uso (electricidad, gas, etc.).
  - 33% para el transporte.
- los residuos de la construcción y demolición (RCD) generados en la Unión Europea superan los 180 millones de toneladas cada año, es decir, 480 kg. por persona

y año. De esos residuos, sólo el 28% son reutilizados.

### **3.3 Descripción del ciclo de vida de un producto de la construcción**

Una buena práctica para poder comprender mejor el ciclo de vida de un producto es la estructuración del sistema en procesos, de forma que queden representados todos los subsistemas constituyentes y se pueda identificar claramente un inicio y un final de cada uno.

Un diagrama que represente los flujos de entrada (materiales, energía, productos inacabados) y salida (productos finales, productos inacabados, co-productos, residuos) aporta una visión más clara de las fases del ciclo completo. Con los elementos bien identificados es más fácil atribuirle causas y consecuencias tanto a su subsistema como al sistema completo (ver figura 3.1).

El adoquín se ajusta perfectamente a este esquema. BLA BLA BLA. BLA.

### **3.4 Impactos potenciales del adoquín al medio ambiente**

A la hora de analizar los aspectos medioambientales de un sistema es necesario establecer diferentes niveles de análisis para poder establecer una estrategia de estudio, ya que a lo largo de la vida de un producto se pueden encontrar diferentes contextos.

Al ser el adoquín un elemento de pavimentación se encontraría en el denominado nivel 2 (ver figura 3.2 ). Los impactos medioambientales del nivel 2 se clasifican según el momento de su vida en:

- Producción
  - Consumo de energía y recursos naturales en los procesos de producción y transporte.
  - Producción de ruidos y vibraciones.
  - Producción de residuos por excedentes de procesos y embalajes.

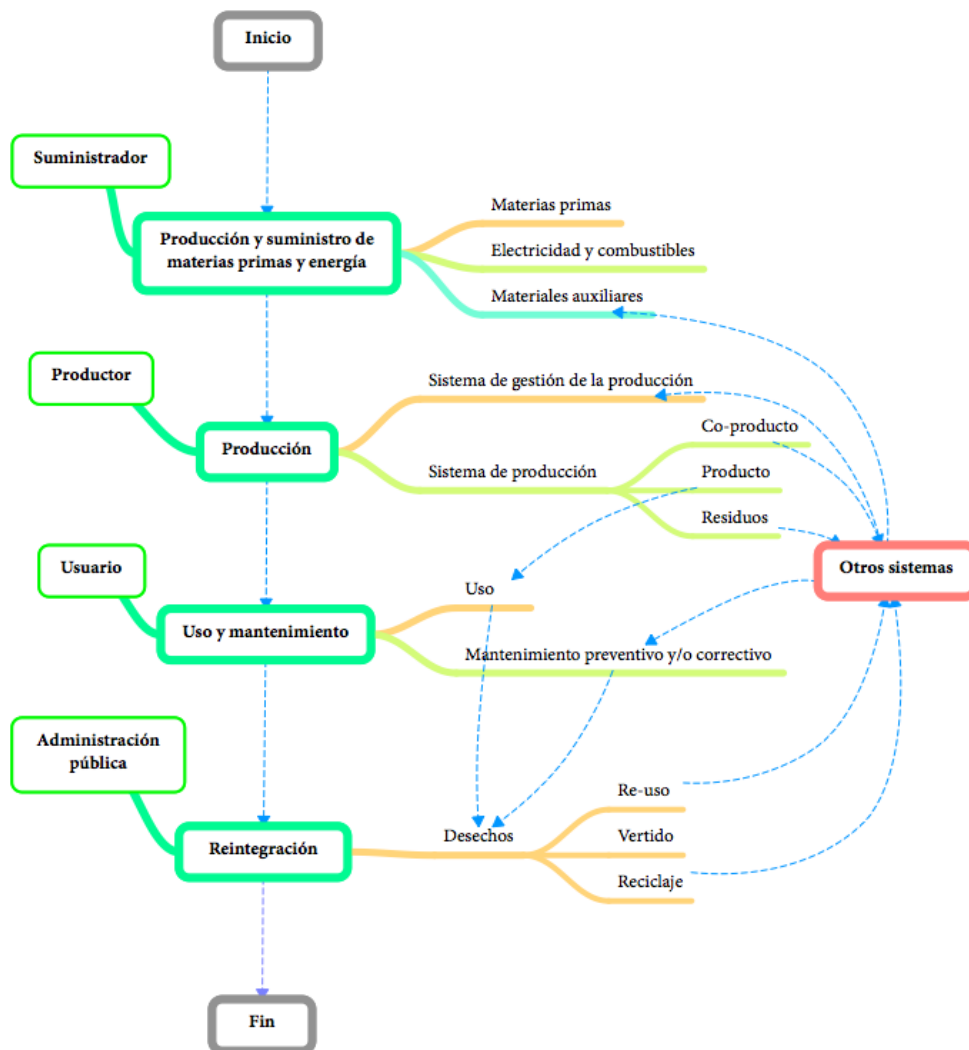


Figura 3.1: Flujo genérico del ciclo de vida de un producto

- Emisiones de partículas al aire (p. ej.: polvo).
- Uso y mantenimiento
  - Consumo de energía y recursos en los procesos de mantenimiento.



Figura 3.2: Niveles de estudio del ciclo de vida.

- Producción de residuos o sustancias tóxicas en función de los procesos de mantenimiento, su naturaleza y vida útil.
- Reintegración
  - Impactos potenciales traspuestos al producto final que lo utiliza.





- Diseño de productos.
- Desarrollo de indicadores clave.
- Cálculo de la huella de carbono de muchos tipos de productos y sistemas.
- Determinar el impacto medioambiental de productos o servicios con precisión estadística mediante el método de análisis Monte Carlo.
- Incluye Declaraciones Medioambientales de Productos e Informes Medioambientales GRI (Global Reporting Initiative).
- Utilización de bases de datos con inventarios.
- Asignación de múltiples procesos de salida.
- Análisis de Punto Débil, que permite identificar los puntos sensibles en el ciclo de vida utilizando un árbol de procesos.
- Análisis de tratamientos de residuos y escenarios de reciclado.

Esta herramienta cuenta con una interfaz de usuario intuitiva con un explorador de guía a través del Análisis de Ciclo de Vida del producto o servicio siguiendo los principios de las normas ISO 14040 y 14044. Además incorpora un modelado utilizando un asistente paso a paso.

La mayor ventaja de esta herramienta es la utilización de bases de datos con los inventarios de miles de procesos y métodos más importante de análisis de impacto.

### 3.6.1 Bases de datos en SimaPro

SimaPro incluye varias bases de datos de inventarios con miles de procesos, además de los métodos de análisis de impacto más importantes. De esta forma, no es necesario recolectar datos de procesos individuales y poder centrarse en los asuntos más importantes del estudio.

La calidad de los datos que aparecen en el Inventario de Ciclo de Vida (ICV) implica que el estudio sea relevante o no. *ecoinvent* implementa en una única base de datos miles

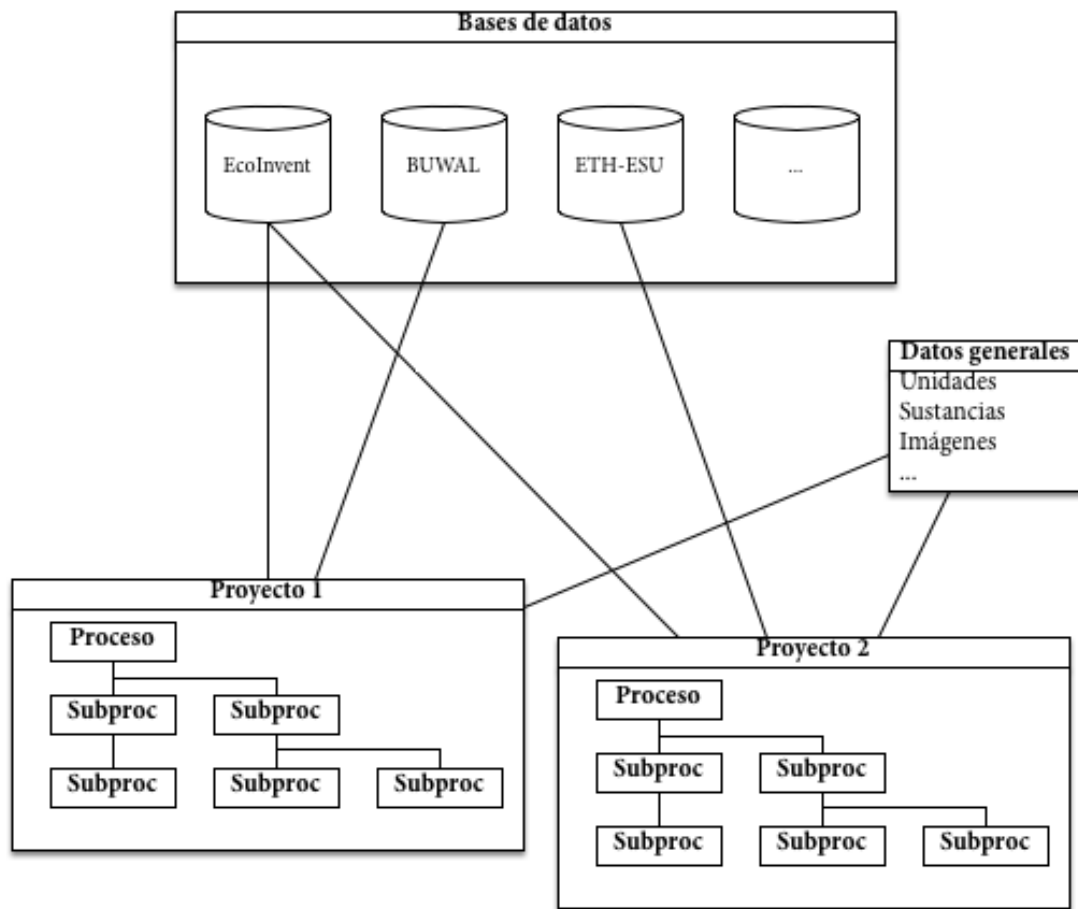


Figura 3.4: Estructura de una base de datos de SimaPro.

de conjuntos de datos de ICVs —agricultura, energía, transporte, combustibles, biomateriales, químicos, materiales de construcción, materiales de empaquetamiento, metales elementales y preciosos, procesamiento de metales, informática y electrónica, tratamiento de residuos— basados en información industrial recopilada por grupos de investigación y consultores reconocidos internacionalmente [eco13].

De esta forma, la metodología de uso de SimaPro consiste en utilizar *ecoinvent* como soporte para aquellos materiales y procesos de nuestro sistema que sean similares con los de la base de datos. En caso de que no se adapten a la entrada de la base de datos será necesario modelar una nueva entrada equivalente, pudiendo usar otras entradas de

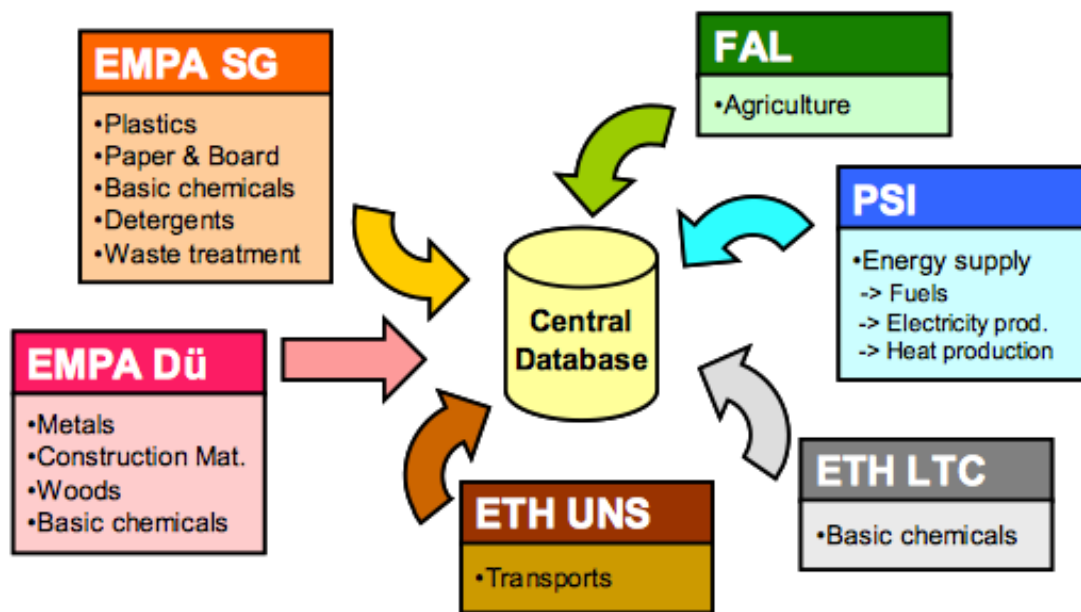


Figura 3.5: Estructura de la base de datos de *ecoinvent*. Fuente: [G<sup>+</sup>10a].

la base de *ecoinvent*.

La librería *ecoinvent*:

- Incorpora más de 4000 procesos:
  - Bienes de producción y calidades.
  - Para algunos procesos añade diferencias regionales (Suiza y Unión Europea).
  - Mix eléctrico y procesos agrícolas de Estados Unidos y Asia.
- Incertidumbre en los datos.
- Ilustraciones de la mayoría de los procesos.
- Documentación extensa y consistente de los procesos.
- Actualizaciones frecuentes y periódicas.
- Incluye versiones de los procesos como Unidad (Proceso 1/U) —más detallado— o como Sistema (Proceso 1/S) —sin información de incertidumbre—.

## Capítulo 4

# Análisis de Ciclo de Vida: fabricación

### 4.1 Cemento

El cemento es transportado a granel en tanques a presión hasta la fábrica. Allí se almacena en silos previstos de compresores que descargan el material desde el tanque hasta su interior. El compresor es alimentado por electricidad mediante una toma de corriente conectada a la red eléctrica. El llenado a presión de los silos suele funcionar en rangos de 800—1000 m<sup>3</sup>/min y presiones cercanas a 2 bar, con potencias de 30 kW. La descarga del silo, con una altura total de 20 m, es únicamente por gravedad con válvulas dosificadoras de control de caudal de hasta 35 t/h.

### 4.2 Arena y áridos

Las arenas y áridos se transportan hasta la planta de fabricación mediante camiones. Actualmente los áridos y la arena ya no son apilados a bajo unos techados en las explanadas adyacentes a las plantas, sino que el propio transporte rellena las tolvas de forma automática.

Los áridos utilizados para producir adoquines puede incluir arena, gravilla y piedra de machaqueo si se pretende obtener un producto de peso normal. Si se desea que el adoquín sea más ligero —entre un 20 y un 45 %— sin mermar sus propiedades estructurales se utilizan materiales como pizarra, arcilla, escoria de altos hornos y cenizas de carbón

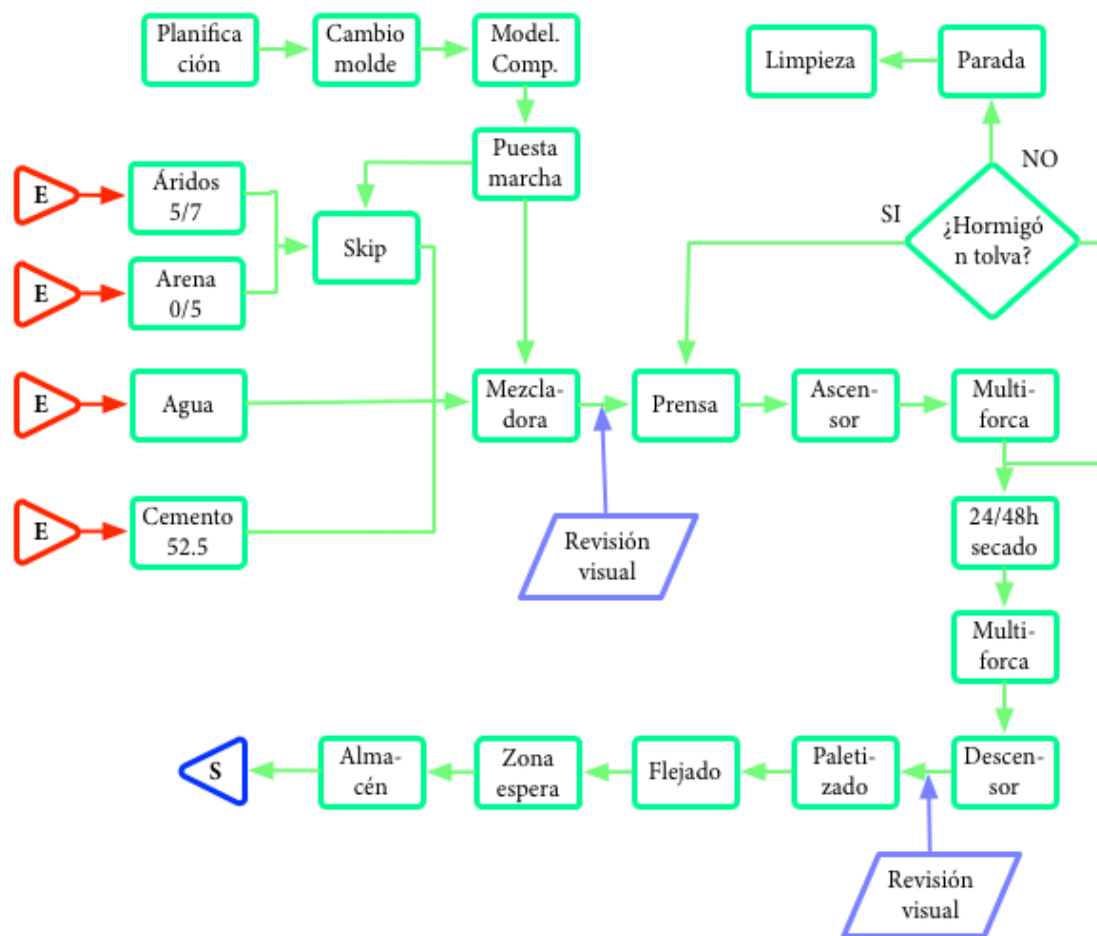


Figura 4.1: Diagrama de flujo de la fabricación de adoquines.

según su disponibilidad y coste.

### 4.3 Agua

La mayoría de las plantas tienen una fuente de agua municipal que proporciona potable perfectamente válida para el uso en la fabricación de hormigón.

## 4.4 Cintas transportadoras

Las tolvas tienen dosificadores que descargan la cantidad programada de materia prima sobre dos cintas transportadoras —una para áridos y arena, otra para cemento— con básculas de pesaje incorporadas que se comunican con el sistema de control y cortan el flujo de descarga.

La cinta de áridos descarga sobre un skip que eleva los materiales hasta una mezcladora. La cinta de cemento descarga directamente sobre la mezcladora. Previamente al añadido del agua se produce un ciclo de mezclado en seco. Para asegurar la consistencia del lote el agua es generalmente añadido mediante un sistema electrónico de control que dosifica el caudal. En el caso de que haya otros aditivos, tales como acelerantes o colorantes, es en este momento cuando se incorporan a la mezcla. Cuando se termina de añadir el agua se produce el mezclado creando hormigón fresco. El hormigón sale de la mezcladora mediante una cinta transportadora que contiene otra báscula de pesaje y se dirige hacia la tolva de hormigón que se encuentra en lo alto de la prensa, donde es dosificado en los moldes para adoquines. Los moldes tienen una longevidad muy alta —aproximadamente un millón de ciclos de prensado— y su durabilidad depende de las propiedades abrasivas de los áridos utilizados.

El molde se compone de dos partes: la parte donde se inyecta el hormigón (hembra) y la parte que se coloca encima para dar forma (macho). La prensa tiene incorporado un carro alimentador encargado de proporcionar la parte hembra. Se inyecta el hormigón en el molde hembra, el molde macho baja con la prensa y el hormigón es compactado y cimentado usando un sistema combinado de presión y vibración. Cada molde puede producir 25 adoquines de 200x100x60mm, lo que proporciona a una superficie adoquinada de 0.5m<sup>2</sup>. Los adoquines son moldeados de una sola pieza y extraídos del molde inmediatamente después de la vibro-compresión sobre una bandeja de madera.

La bandeja con las piezas frescas es trasladada sobre un transportador de rodillos hasta un ascensor. Este ascensor tiene diez alturas, de forma que cada vez que recibe una bandeja con adoquines frescos, la bandeja anterior sube una altura y monta la siguiente.

El ascensor se encarga de alimentar un carro multitorca de diez alturas. Cuando las diez alturas está ocupadas se cargan en un carro multitorca automatizado que transporta las piezas hasta un secadero.

Las piezas permanecen en el secadero curándose a temperatura ambiente entre 24 y 48 horas.

Una vez transcurrido el tiempo de curado, los adoquines están secos y listos para ser recogidos por otro carro multiforca automatizado que recoge las bandejas y las lleva a un descensor.

El descensor coloca las bandejas con los adoquines secos en un transportador de rodillos.

El transportador de rodillos lleva las bandejas hasta una paletizadora para hacer bloques de hasta cinco alturas.

La paletizadora impulsa el pallet hasta la flejadora que aplica varias lazadas de flejes para evitar que los adoquines se desprendan del conjunto.

La flejadora descansa los conjuntos paletizados sobre un transportador de rodillos para ser posteriormente llevados a almacén.

Finalmente, un torito transporta cada conjunto de adoquines a la zona de almacenaje.

## **4.5 Dosificación**

## **4.6 Amasado**

## **4.7 Vibrocompresión**

## **4.8 Curado**

## **4.9 Embalaje y almacenamiento**

## **4.10 Suministro**

## **4.11 Recepción**

# Capítulo 5

## Instalación del adoquín

### 5.1 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.

## 5.2 Determinación de la sección tipo

Se consideran los siguientes casos:

1. Viales y zonas de aparcamiento<sup>1</sup>.
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.

### 5.2.1 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 5.1).

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

Tabla 5.1: Índice CBR.

---

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

### 5.2.2 Categoría de tráfico

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

Tabla 5.2: 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 5.3: Categoría de tráfico en viales y zonas de aparcamiento.

#### Categorías de tráfico en zonas industriales

## 5.3 Secciones tipo

Las secciones tipo según la base y el uso previsto del área vistas en la sección 5.2 pueden resumirse en cinco tipos para cada tipo de base, granular (figura 5.1) u hormigón magro (figura 5.2).

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 5.4: 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 5.5: Categoría de tráfico en zonas industriales.

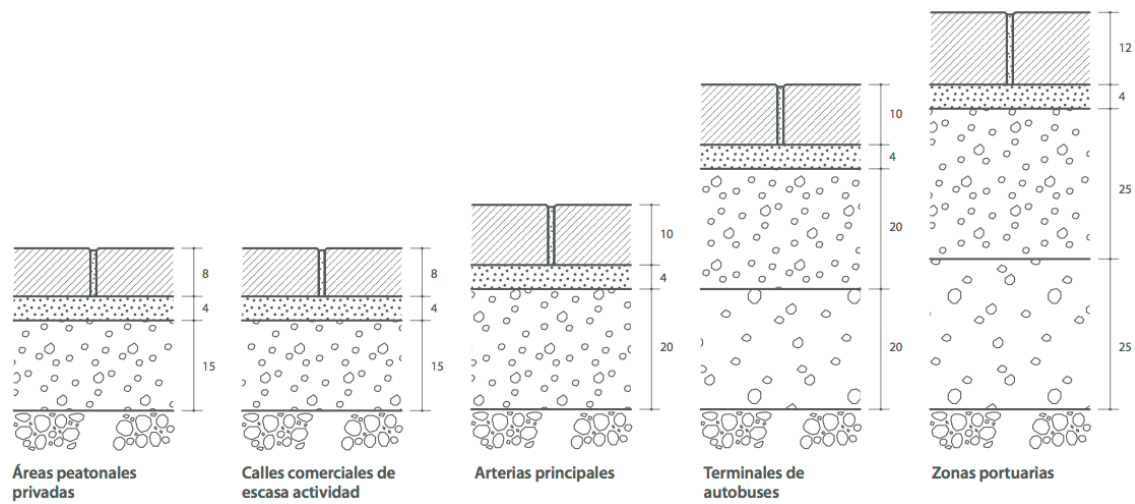


Figura 5.1: Secciones tipo para base granular. Unidades en cm.

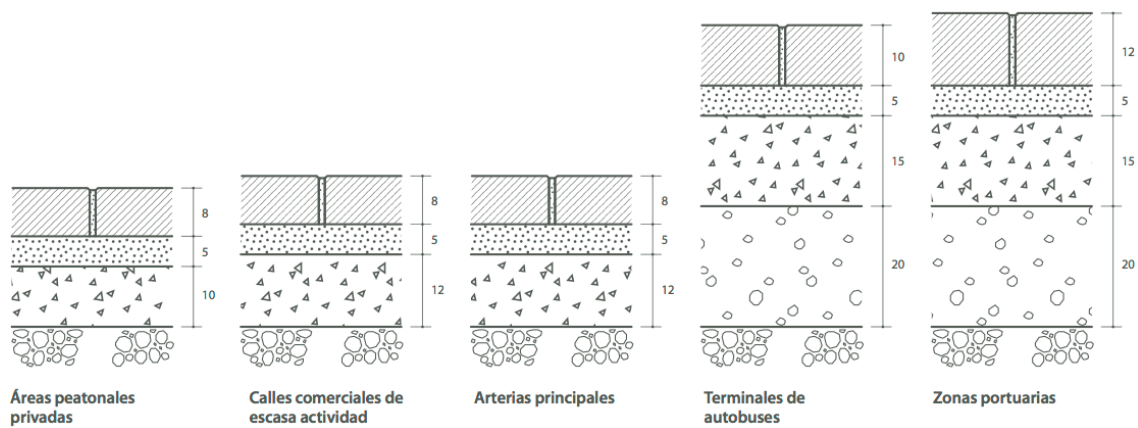


Figura 5.2: Secciones tipo para base de hormigon. Unidades en cm.

# **Capítulo 6**

## **Fin de vida**

Manual Euroadoquín2

### **6.1 Introducción**

### **6.2 Reciclaje**

### **6.3 Procesos**

## **Parte II**

### **Pliego de condiciones**

# Capítulo 7

## 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.

10 de octubre de 2013

Fdo. Francisco José Pinto Oliver



## **Parte III**

# **Presupuesto**

## Capítulo 8

### Coste de materiales

Se contabilizarán todos los costes —en euros— relacionados con recursos materiales tales como material de oficina, software y hardware informático.

Respecto al material de oficina, abarca desde el soporte en papel para la impresión de documentación, fotocopias, encuadernación de este proyecto, soporte óptico que acompaña a este proyecto, planos hasta los cartuchos de tinta para su impresión.

El apartado de equipo informático engloba una licencia de sistema operativo, un procesador de textos para la redacción del presente proyecto, software para la creación de diagramas de flujo y tratamiento de imágenes.

En cuanto al software informático, se ha incluido una licencia para un único usuario tipo analista válida indefinidamente. Esto incluye el precio de la base de datos *ecoinvent* versión 2 y la actualización a la versión 3. También incluye un año gratuito de soporte online y actualizaciones.

Coste de materiales			
Concepto	Cantidad	Importe (€)	Total (€)
Licencia SimaPro			
SimaPro single user, indefinite, Analyst	1	8800.00	8800.00
ecoinvent Database	1	0.00	0.00
Soporte y actualizaciones (1 año)	1	0.00	0.00
Equipo informático			
Ordenador portátil	1	1329.00	1329.00
Procesador de texto	1	0.00	0.00
Hoja de cálculo	1	8.99	8.99
Software diagramas	1	0.00	0.00
Material de oficina			
DIN-A4 (500 uds.)	1	5.50	5.50
Cartucho tinta negra	1	18.00	18.00
Cartucho tinta color	1	23.00	23.00
Encuadernación de tornillo	1	12.00	12.00
Disco óptico DVD-R	3	0.50	1.50
Subtotal materiales			10197.99

Tabla 8.1: Presupuesto de materiales.

## Capítulo 9

### Coste de desarrollo

El coste de desarrollo abarca los recursos humanos —en horas— necesarios para la realización del presente proyecto, documentación, recopilación de datos, redacción y correcciones del proyecto.

Coste de desarrollo			
Concepto	Cantidad (h)	Importe (€)	Total (€)
Documentación			
Documentación	130	19.00	8800.00
Entrevista con fabricante	17	19.00	0.00
Consultas varias	11	19.00	0.00
Redacción del proyecto			
Redacción	170	19.00	5.50
Introducción del modelado	60	19.00	18.00
Corrección de errores	35	19.00	23.00
Subtotal desarrollo			8037.00

Tabla 9.1: Presupuesto de desarrollo.

## Capítulo 10

### Presupuesto completo

Presupuesto completo			
Concepto	Cantidad (h)	Importe (€)	Total (€)
Subtotal materiales			10197.99
Subtotal desarrollo			8037.00
Total			18234.99

Tabla 10.1: Presupuesto completo.

# 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.

## **Apéndice B**

### **Resultados de SimaPro**

En este apéndice se incluyen los resultados de la aplicación de software SimaPro.

# Bibliografía

- [Aso04] Asociación Española para la Investigación y Desarrollo del Adoquín de Hormigón. *Manual Técnico del Euroadoquín*. Madrid, España, 2004.
- [dCF01] A.C. de Carvalho Filho. *Análisis del ciclo de vida de productos derivados del cemento. Aportaciones al análisis de inventarios del ciclo de vida del cemento*. Tesis doctoral, E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos - Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España., 2001.
- [eco13] ecoinvent Centre. The ecoinvent database, septiembre 2013.
- [Eur06] European Ready Mixed Concrete Organization. *Guidance on Concrete Wash Water in the European Ready Mixed Concrete Industry*. Rue Volta 8, Bruselas (Bélgica), 2006.
- [G<sup>+</sup>10a] M. Goedkoop et al. *Introduction to LCA with SimaPro*. Pré Consultants, Amersfoort, Holanda, 2010.
- [G<sup>+</sup>10b] M. Goedkoop et al. *SimaPro 7 Tutorial*. Pré Consultants, Amersfoort, Holanda, 2010.
- [ISO06a] ISO. *UNE-EN-ISO 14040:2006, Gestión Ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia*. International Organization for Standardization, Ginebra, Suiza, 2006.
- [ISO06b] ISO. *UNE-EN-ISO 14440:2006, Gestión Ambiental. Análisis de ciclo de vida. Requisitos y directrices*. International Organization for Standardization, Ginebra, Suiza, 2006.



- [Nat13] National Ready Mixed Concrete Association. *Mixing Water Quality for Concrete*. Silver Spring, Maryland, Estados Unidos, 2013.
- [Sju05] J. Sjunnesson. Life cycle assessment of concrete. Master thesis, Environmental and Energy Systems Studies - Lund University, Lund, Suecia, 2005.
- [UNE96] UNE. *UNE 80301:1996 Cementos. Cementos comunes. Composición, especificaciones y criterios de conformidad*. Una Norma Española, Madrid, España, 1996.
- [UNE11] UNE. *UNE-EN 197-1:2011 La norma europea de especificaciones de cementos comunes*. Una Norma Española, Madrid, España, 2011.