

6. Proceso de fabricación del hormigón

El ciclo de vida del hormigón empieza con la extracción de materiales para la fabricación del cemento, el componente clave de la mezcla.

La fabricación del cemento es una actividad industrial de procesamiento de minerales que se divide en tres etapas básicas:

- Obtención y preparación de materias primas
- Molienda y cocción de materias primas
- Molienda de cemento

6.1. Obtención y preparación de materias primas

El proceso de fabricación del cemento comienza con la obtención de las materias primas necesarias para conseguir la composición deseada de óxidos metálicos para la producción de clínker.

El clínker se compone de los siguientes óxidos (datos en %) [Instituto del cemento y sus aplicaciones (IECA); 2006]

	Porcentaje %
- Óxido de calcio "cal" (CaO)	60-69
- Óxido de Silicio "sílice"	18-24
- Óxido de Aluminio "alúmina" (Al ₂ O ₃)	4-8
- Óxido de Hierro (Fe ₂ O ₃)	1-8

La obtención de la proporción adecuada de los distintos óxidos se realiza mediante la dosificación de los minerales de partida:

- Caliza y marga para el aporte de CaO.
- Arcilla y pizarras para el aporte del resto de óxidos

Las materias primas son transportadas a la fábrica de cemento donde se descargan para su almacenamiento.

6.2. Molienda y cocción de materias primas

La finalidad de la molienda es reducir el tamaño de las partículas de materia prima para que las reacciones químicas de cocción en el horno puedan realizarse de forma adecuada.

La molienda de materias primas (molienda de crudo) se realiza en equipos mecánicos rotatorios, en los que la mezcla dosificada de materias primas es sometida a impactos de cuerpos metálicos o a fuerzas de compresión elevadas.

El material obtenido debe ser homogeneizado para garantizar la calidad del clínker y la correcta operación del horno.

Existen diferentes procesos de fabricación del clínker:

- Vía Seca
- Vía húmeda
- Vía semi-seca
- Vía semi-húmeda

En la actualidad, en torno al 78 % de la producción de cemento de Europa se realiza en hornos de vía semi-seca o semi-húmeda; y un 6 % de la producción europea se realiza mediante vía húmeda [IECA; 2006]

En todos los casos, el material procesado en el horno rotatorio alcanza una temperatura entorno a los 1450°. Este material es enfriado bruscamente al abandonar el horno en enfriadores planetarios o de parrillas obteniéndose de esta forma el clínker. Estas temperaturas permiten las reacciones de los componentes cálcicos y silíceos. El carbonato cálcico (piedra caliza) reacciona para formar óxido de calcio y dióxido de carbono (esto ocurre a unos 900°C) y el óxido de calcio y los silicatos reaccionan para formar di- y tri- silicatos de calcio (a temperaturas entre 900 y 1500°C). Las reacciones que producen aluminato tricálcico y aluminoferrita tetracálcica ocurren en un grado inferior. La variación en las proporciones de estos cuatro componentes (disilicato cálcico, trisilicato cálcico, aluminato tricálcico y aluminoferrita tetracálcica) determinan las propiedades del cemento resultante.

6.2.1. Proceso de vía seca

La materia prima es introducida en el horno en forma seca y pulverulenta. El sistema del horno comprende una torre de ciclones para intercambio de calor en la que se precalienta el material en contacto con los gases provenientes del horno.

El proceso de descarbonatación de la caliza (calcinación) puede estar casi completado antes de la entrada del material en el horno si se instala una cámara de combustión a la que se añade parte del combustible (precalcinador).

Este proceso de vía seca está probado como el más eficiente energéticamente, requiriendo hasta un 50% menos de energía que el proceso de vía húmeda [Wilson A.; 1993] [Lyons A.R.; 1997].

6.2.2. Proceso de vía húmeda

Este proceso es utilizado normalmente para materias primas de alto contenido en humedad. El material de alimentación se prepara mediante molienda conjunta del mismo con agua, resultando una pasta con contenido de agua de un 30-40 % que es alimentada en el extremo más elevado del horno de clínker.

6.2.3. Procesos de vía semi-seca y semi-húmeda

El material de alimentación se consigue añadiendo o eliminando agua respectivamente, al material obtenido en la molienda de crudo.

Se obtienen "pellets" o gránulos con un 15-20 % de humedad que son depositados en parrillas móviles a través de las cuales se hacen circular gases calientes provenientes del

horno. Cuando el material alcanza la entrada del horno, el agua se ha evaporado y la cocción ha comenzado.

6.3. Molienda de cemento

El proceso de fabricación de cemento termina con la molienda conjunta de clínker, yeso y otros materiales denominados "adiciones" con el fin de conferir al hormigón diferentes propiedades.

Los materiales que están normalizados como adiciones, son entre otros:

- Escorias de alto horno
- Humo de sílice
- Puzolanas naturales
- Cenizas volantes
- Caliza

La composición final del cemento dependerá de la resistencia y características adicionales que se quieran conferir al hormigón.

La molienda de cemento se realiza en equipos mecánicos en los que la mezcla de materiales es sometida a impactos de cuerpos metálicos o a fuerzas de compresión elevadas.

Estos equipos mecánicos pueden ser de diferentes tipos:

- Prensa de rodillos
- Molinos verticales de rodillos
- Molinos de bolas
- Molinos horizontales de rodillos

Una vez obtenido el cemento se almacena en silos para ser ensacado o cargado a granel. Esta primera parte de la producción de hormigón (la producción del cemento) genera por cada tonelada de cemento una cantidad semejante de dióxido de carbono, según alguna bibliografía 1,25 toneladas [Wilson, A.; 1993] y según otra 1 tonelada [Gjorv, O.E.; 2003]. Esto implica que una variación en el porcentaje de cemento usado en el hormigón posiblemente alterará el impacto medioambiental generado.

6.4. Fabricación del hormigón

Cada planta produce diferentes tipos de hormigón los cuales pueden tener un mayor o menor efecto en la cantidad de energía consumida, el tipo de materias primas utilizadas, las emisiones líquidas y gaseosas producidas y los residuos generados. Los principales materiales requeridos para la fabricación del hormigón incluyen los áridos (habitualmente en forma de arena, constituyendo aproximadamente un 34% de la composición del hormigón), grava (en aproximadamente un 48 % del hormigón), cemento (en un 12% de la composición del hormigón), agua (en proceso seco alrededor de un 6%), y cenizas volantes. Mientras los dos tipos de agregados consumen la mayor

proporción de la mezcla de hormigón, el cemento es el ingrediente clave ya que hace posible la unión de los otros componentes. [Wilson, A.; 1993].

El hormigón puede ser enviado al lugar de la construcción como prefabricado o realizado in-situ. Si no hay notable diferencia energética entre ambos tipos, el hormigón prefabricado implica menos consumo. Por otro lado, la medida de los bloques de hormigón es limitado debido a los impedimentos del transporte.

6.5. Flujos de materia del proceso de fabricación del hormigón

Apenas existe bibliografía que desglose y cuantifique las emisiones del hormigón de forma científica. Existen inventarios de ciclo de vida para muchos productos industriales ampliamente utilizados, pero de estos muy pocos corresponden a productos relacionados con la construcción, incluyendo el cemento. Los análisis de inventario comparativos no son factibles a menudo debido a la falta de homogeneidad en el formato y tratamiento de los datos, en la indefinición de los límites del sistema o la falta de claridad sobre los métodos analíticos usados o la validez geográfica [Josa, A.; et al.; 2004].

Hasta la fecha, sólo países avanzados en el campo de los análisis de ciclo de vida han proporcionado inventarios del cemento. Esto obliga a tener que confiar en inventarios elaborados por otros países. La disponibilidad de los datos es pues escasa, bastante limitada por políticas de bases de datos de acceso restringido ejercidas con frecuencia por empresas privadas.

En esta situación, ha sido necesaria la adaptación de los datos más formales disponibles. Así pues, la tabla 6.1 elaborada a partir de [Häkkinen, T.; Vares, S.; 1998] muestra el perfil medioambiental de un hormigón cuya clasificación desconocemos y establece una guía sobre la proporción entre las cantidades involucradas de un material y de otro.

Tabla 6.1. Perfil medioambiental del hormigón

Energía		
Fuel fósil	0,93	MJ/kg producto
Electricidad	0,20	MJ/kg producto
Materias primas		
Caliza	170	g/kg producto
Otros productos minerales	850	g/kg producto
Agua	80	g/kg producto
Emisiones		
Dióxido de carbono (CO ₂)	120	g/kg producto
Óxido de nitrógeno (NO _x)	0,55	g/kg producto
Óxido de sulfúrico (SO ₂)	0,14	g/kg producto
Metano (CH ₄)	0,13	g/kg producto
Componentes orgánicos volátiles (COV _{tot})	0,18	g/kg producto
Polvo	0,023	g/kg producto
Metales pesados (Cr,As,Cd,Hg,Tl,Pb)	20	µg/kg producto

A continuación, la tabla 6.2 elaborada a partir de [Häkkinen, T.; Vares, S.; 1998] indica los porcentajes de energía y emisiones más relevantes (CO₂, NO_x y metales pesados) que introduce cada etapa del ciclo de vida del hormigón. Los datos porcentuales referentes al cemento contemplan la obtención de materias primas, su transporte y la producción del cemento.

Tabla 6.2. Emisiones y energía en el ciclo de vida del hormigón:

	Fuel fósil y electricidad	Emisiones de CO ₂	Emisiones de NO _x	Emisiones de metales pesados
Cemento	69%	83%	71%	88%
Áridos	3%	1%	1%	1%
Transporte de materias primas	5%	3%	8%	<1%
Producción de hormigón	16%	8%	5%	10%
Transporte del producto	7%	5%	15%	<1%
Total	100%	100%	100%	100%

En la tabla anterior se aprecia claramente que el cemento es el principal contaminante. Éste representa más del 70% de las emisiones y energía usada en la fabricación del hormigón debido a las altas temperaturas necesarias para su producción y para la descomposición del carbonato cálcico. Así pues, la cantidad total de efectos ambientales producidos por el hormigón depende en gran parte de su contenido de cemento. Dicho contenido se encuentra habitualmente en porcentajes del 10 al 15% en peso.

El contenido mínimo de cemento de un hormigón viene determinado por el ambiente de exposición al que se verá sometida la estructura a lo largo de su vida útil. Así pues, y tal como dicta la normativa Española de Hormigón Estructural (EHE-99) en su tabla 37.3.2^a, el mínimo contenido de cemento para un ambiente de, por ejemplo, clase I será de 250Kg/m³ mientras que para un ambiente de clase IV será de 325Kg/m³ [Ministerio de Fomento, 1999].

Los datos sobre la cantidad de emisiones de CO₂ por volumen de hormigón varían de unas fuentes a otras. El rango se encuentra entre 1 y 1.25 toneladas de CO₂ por tonelada de cemento [Gjorv, O.E.; 2003; Wilson, A.; 1993].

Considerando de forma conservadora emisiones de una tonelada de CO₂ por tonelada de cemento y una densidad del hormigón de 2350Kg/m³ se obtienen las siguientes emisiones de CO₂ por tonelada de hormigón debidas al cemento:

$$\boxed{\text{Clase I}} \frac{250\text{Kg cemento}}{\text{m}^3 \text{hormigón}} \cdot \frac{1\text{Kg CO}_2}{1\text{Kg cemento}} \cdot \frac{1\text{m}^3 \text{hormigón}}{2350\text{Kg hormigón}} = 106\text{g CO}_2 / \text{Kg hormigón}$$

El cemento representa el 83% de las emisiones de CO₂ por lo que el total de emisiones de CO₂ será de **128gCO₂/Kg hormigón**.

$$\boxed{\text{Clase IV}} \frac{325\text{Kg cemento}}{\text{m}^3 \text{hormigón}} \cdot \frac{1\text{Kg CO}_2}{1\text{Kg cemento}} \cdot \frac{1\text{m}^3 \text{hormigón}}{2350\text{Kg hormigón}} = 138\text{g CO}_2 / \text{Kg hormigón}$$

En este segundo caso, el total de emisiones de CO₂ será de **166g CO₂/Kg hormigón**.

Modificando la tabla 6.1 a partir de los porcentajes vistos en la tabla 6.2 y de las emisiones debidas al cemento calculadas anteriormente para cada clase de exposición, obtenemos los resultados sobre el perfil medioambiental que muestra la tabla 6.3 a continuación.

Tabla 6.3. Perfil medioambiental por Kg. de hormigón para ambiente clase I y clase IV

Elemento		Cantidad/Kg.hormigón	
		Clase I	Clase IV
Energía	Fuel fósil y electricidad	1,16 MJ	1,36 MJ
Materias primas	Caliza	≈ 170 g	
	Otros productos minerales	≈ 850 g	
	Agua	≈ 80 g	
Emisiones	Dióxido de carbono (CO ₂)	128 g	166 g
	Óxido de nitrógeno (NO _x)	0,58g	0,70g
	Óxido de sulfúrico (SO ₂)	≈ 0,14g	
	Metano (CH ₄)	≈ 0,13g	
	Componentes orgánicos volátiles (COV _{tot})	≈ 0,18g	
	Polvo	≈ 0,023g	
	Metales pesados (Cr,As,Cd,Hg,Tl,Pb)	21µg	26µg

6.6. Opciones de reciclado del hormigón

España genera anualmente 38,5 millones de toneladas de residuos de la construcción [Cemex, 2006]. Se estima que la contribución del hormigón a los residuos de construcción y demolición es del 53% en volumen y del 67% en peso [Wilson, A.; 1993]. Esta enorme contribución los residuos sólidos subraya la necesidad de diseñar estrategias de gestión de residuos y de reciclado.

El hormigón es uno de los materiales más utilizados; sin embargo, existen pocos estudios sobre su reciclaje. Algunos expertos explican que el material pétreo, piedras y arena, que se utiliza para su elaboración es de gran abundancia en los ríos del país; por lo tanto, la necesidad de utilizar los desechos del material no se vislumbra a simple vista. Aún así, las consecuencias de su uso indiscriminado son claras. Si bien hay gran abundancia de áridos, este recurso no es renovable a corto o medio plazo. Por otro lado, su extracción produce impactos ambientales como cambio en el paisaje y en la forma del caudal del río.

La composición o textura del hormigón permite que este sea re-molido con relativa facilidad y preparado para su aplicación en áreas similares. El compuesto es generalmente machucado en áridos para nuevo hormigón o usado como material de relleno en terraplenados.

Reutilizar los derribos de la construcción que actualmente se arrojan a vertederos le supondría a España un ahorro anual de 7,7 millones de toneladas de piedras, mitigaría el impacto ambiental que supone extraerlas de canteras y no tendría ningún efecto en la resistencia de los edificios- El gran puente del Fòrum, construido en el 2004 en

Barcelona, fue la primera gran estructura construida con materiales parcialmente reutilizados.

Hoy en día en España sólo se permite el empleo de hormigón reciclado como relleno en sustratos de carreteras. En la actualidad el Ministerio de Fomento está trabajando en la elaboración de normas específicas que regulen la utilización de estos derribos de la construcción tanto en el campo de la vialidad como en la fabricación de hormigones. Esta normativa sólo permitirá utilizar hasta un máximo de 20% de árido reciclado. El equipo de Enric Vázquez, catedrático de la UPC, ha comprobado que ese porcentaje de material reciclado, e incluso el 30%, no merma ni la dureza ni la resistencia del hormigón (material formado normalmente por una base de áridos a la que se añade grava, cemento y agua).

Para fabricar este hormigón reciclado se utilizarán escombros procedentes de hormigón estructural, triturado y procesado en una planta de reciclaje, y convertidos en un nuevo producto granulado reciclado.

En España en el año 2003 se recicló un 10% del total de los residuos procedentes de la construcción y demolición, que se reutilizaron como material para relleno y sub-base de carreteras. De los 451 millones de toneladas de árido que se extraen anualmente en el territorio español, el 65% se destina a la fabricación hormigón y asfalto [Cemex; 2006]. El objetivo es llegar al nivel de Alemania u Holanda, donde ya se reutiliza el 90% del hormigón.