



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Tesis de Máster:

**VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUOS COMO
COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS EN PLANTAS
CEMENTERAS**

Máster en Seguridad Industrial y Medio Ambiente, Curso 2011-2012
Director: Antonio Eduardo Palomares Gimeno
Dpto. Ingeniería Química y Nuclear, UPV

Autora: Diana Carolina Cedano de León

INDICE DE CONTENIDOS

| | |
|---|----|
| AGRADECIMIENTOS..... | 5 |
| INTRODUCCION..... | 6 |
| OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN | 8 |
| PLANTEAMIENTO GENERAL..... | 9 |
| CAPITULO I LA INDUSTRIA CEMENTERA | |
| 1.1. Introducción..... | 10 |
| 1.2. Proceso de fabricación de cemento | 11 |
| 1.2.1. Preparación y molienda de crudo | 12 |
| 1.2.2. Cocción de materiales..... | 13 |
| 1.2.3. Molienda del clinker..... | 18 |
| 1.2.4. Consumo energético en la fabricación del cemento | 19 |
| 1.3. Combustibles | 22 |
| 1.4. Producción, consumo y comercio mundial del cemento | 25 |
| CAPITULO II GESTION DE RESIDUOS Y MARCO LEGAL | |
| 2.1. Introducción..... | 29 |
| 2.2. Concepto y clasificacioón de los residuos | 30 |
| 2.3. Situación de los residuos en europa y españa..... | 31 |
| 2.4. La política de gestión de residuos..... | 35 |
| 2.5. Gestión de residuos en la fábricas de cemento | 37 |
| 2.5.1. Responsabilidades y obligaciones del productor u otro poseedor inicial | 40 |
| 2.5.2. Responsabilidades y obligaciones de los gestores de residuos..... | 42 |
| CAPITULO III VALORIZACION ENERGETICA DE RESIDUOS EN LA INDUSTRIA CEMENTERA | |
| 3.1. Introducción..... | 45 |
| 3.2. Valorización energética en la industria del cemento | 45 |
| 3.3. Situación actual de la valorización energética en plantas cementeras en europa y en españa | 51 |
| 3.4. Residuos y subproductos utilizados en la valorización energética..... | 54 |
| 3.4.1. Tipos de residuos | 54 |

| | |
|---|-----------|
| 3.4.2. Plataformas de acondicionamiento de residuos como combustibles..... | 57 |
| 3.5. La gestión de residuos para su valorización en la planta cementera | 61 |
| 3.6. Marco legal asociados al proceso de valorización de residuos | 64 |
| 3.7. Estudios científicos sobre seguridad y salud relacionados con el uso de residuos como combustibles | 68 |
| CAPITULO IV EJEMPLO PRÁCTICO DE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFU) | |
| 4.1. Introducción..... | 71 |
| 4.2. Origen y composición del neumático | 72 |
| 4.3. La valorización de neumáticos en plantas cementeras | 76 |
| 4.4. Diseño del proceso de valorización energética de neumáticos fuera de uso en planta cementera..... | 77 |
| 4.4.1 Desarrollo del proceso..... | 78 |
| 4.4.2. Elementos de la maquinaria a introducir | 80 |
| 4.4.3. Aspecto medioambientales y efectos sobre el cemento producido | 80 |
| CONCLUSIONES..... | 82 |
| BIBLIOGRAFIA | 83 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Principales constituyentes del clínker..... | 17 |
| Tabla 2. Condiciones de combustión en los diferentes sistemas..... | 21 |
| Tabla 3. Combustibles utilizados en plantas de cemento 2010..... | 22 |
| Tabla 4. Evolución del consumo per cápita del cemento en el mundo (kg/hab.)..... | 26 |
| Tabla 5. Principales magnitudes del sector cementero español..... | 28 |
| Tabla 6. Residuos urbanos generados por habitantes 1999-2009 (kg/hab)..... | 31 |
| Tabla 7. Diferencias de funcionamiento Horno de Cemento vs Planta Incineradora..... | 48 |
| Tabla 8. Condiciones típicas en un horno de cemento y en una planta incineradora..... | 48 |
| Tabla 9. Plan de análisis de residuos en las plantas de preparación de combustibles de sustitución..... | 60 |
| Tabla 10. Neumáticos de pasajeros (automóviles y camionetas)..... | 73 |
| Tabla 11. Neumáticos MCT (camiones y microbuses)..... | 74 |
| Tabla 12. Análisis químico del neumático (% en peso)..... | 74 |
| Tabla 13. Análisis mineral de la cenizas del neumático (% en peso)..... | 75 |
| Tabla 14. Características del combustible derivado de neumático y carbon..... | 77 |
| Tabla 15. Emisiones medidas de la combustión de prueba de neumáticos en un horno de cemento..... | 81 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Producción mundial de cemento (2010)..... | 11 |
| Figura 2. Proceso de fabricación de cemento vía seca..... | 14 |
| Figura 3. Horno con precalentador de ciclones y precalcinador..... | 15 |
| Figura 4. Producción mundial de cemento evolución 2000-2010..... | 25 |
| Figura 5. Consumo per cápita 2009(kg /hab)..... | 27 |
| Figura 6. Evolución del tratamiento de residuos urbanos EU-27..... | 32 |
| Figura 7. Tratamiento de residuos urbanos, 2009 (% del total residuos municipales tratados)..... | 33 |
| Figura 8. Producción de energía por incineración de residuos urbanos (KToe)..... | 34 |
| Figura 9. Aporte calorífico por tipos de combustibles en 2008 (kilotermias)..... | 51 |
| Figura 10. Consumo porcentual de combustibles alternativos en la industria cementera de varios países europeos..... | 52 |
| Figura 11. Evolución del uso de combustibles alternativos en España..... | 53 |
| Figura 12. Diagrama de flujo del funcionamiento de una plataforma de líquido..... | 58 |
| Figura 13. Fases en la utilización de combustibles alternativos..... | 61 |
| Figura 14. Planta de preparación de combustibles líquidos Blending..... | 62 |
| Figura 15. Jerarquía de gestión de los residuos..... | 65 |
| Figura 16. Quema directa de neumáticos fuera de uso..... | 72 |

AGRADECIMIENTOS

Agradecerle a Dios por haberme creado y dado la fortaleza de seguir adelante, también a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado en la realización del presente trabajo, en especial al Dr. Antonio Eduardo Palomares, director de esta investigación, por la orientación, el seguimiento y la supervisión continua de la misma, agradecer a Cemex España por brindarme la oportunidad de trabajar con ellos y enseñarme una forma diferente de hacer las cosas, pero sobre todo a la UPV por haberme dado el apoyo y abierto las puertas para culminar el sueño de realizar mi maestría.

Me gustaría que estas líneas expresen mi más profundo y sincero agradecimiento que merece mi padre, Juan Miguel Cedano quien me enseñó a luchar hasta el último momento para cumplir mis metas, no sólo académicas, sino de realización personal. Por ser él, mi motivación en todo momento y sobre todo de demostrarme que cuando se quiere se puede. A ti, debo dar infinitamente las gracias por ser todo lo que soy.

Quiero expresar también mi más sincero agradecimiento a mi madre, Mercedes de León por tu dedicación y preocupación hacia mí. Con tu cariño me has llenado de fuerzas para seguir cada día más luchando por mis sueños. Gracias por confiar en mí. Quiero extender un agradecimiento a Massiel Cedano, siempre ha sido mi ejemplo a seguir, pilar, cómplice y aún en la distancia estuvo hay siempre. Este logro también es tuyo gracias por ser la mejor hermana de este mundo.

Xavier Giraldez, sin tu apoyo, colaboración, amor, paciencia e inspiración habría sido imposible llevar a cabo este sueño. Gracias por darme calor en los días de frío, por una llamada motivadora, por un gesto de amor a pesar de estar lejos y sobre todo por ser luz en los días de oscuridad. Gracias amor de mi vida, este logro es nuestro.

Especial reconocimiento merece el interés mostrado y las sugerencias recibidas de mis compañeros: Esmirna Zorrilla, Ariel Mota y Rubén Ramos, con los que me encuentro agradecida por el ánimo infundido y la confianza depositada.

INTRODUCCION

Lo que en las sociedades más tradicionales era considerado simplemente como basura se conceptualiza en las sociedades modernas como residuos. Esto se debe simplemente al reconocimiento de las posibilidades de esos productos de volver a ser utilizados. En el desarrollo de esta investigación se utilizará el concepto de residuos para referirse a los productos que son desechados de los hogares, industrias y comercios pero que aún tienen la posibilidad de continuar su ciclo de vida sirviendo para otros usos.

El incremento de residuos generados por el hombre se está convirtiendo en un grave problema para la sociedad. Gran parte de esta cantidad de residuos son reciclados o destinados a su depósito en un vertedero controlado. Pero existe una alternativa a estos dos procesos que cada año aumenta su presencia e implantación. Se trata de la valorización con recuperación energética de estos residuos.

La valorización energética consiste en la sustitución parcial de los combustibles fósiles tradicionales del sector (fundamentalmente coque de petróleo) por combustibles derivados de residuos. La valorización energética aprovecha los recursos contenidos en los residuos sin poner en peligro la salud humana y sin utilizar métodos que puedan causar perjuicios al medio ambiente.

Así, la valorización energética de residuos en el horno de cemento es una operación que se inició hace más de 25 años en los países más avanzados de Europa en cuanto a protección ambiental y desde entonces, se viene realizando con éxito en la práctica totalidad de los países de la U.E., Estados Unidos y Japón.

La valorización energética es una de las líneas de trabajo para la sostenibilidad del sector cementero español. En el sector cementero, el proceso de fabricación del clinker a altas temperatura requiere una gran cantidad de combustibles, pero sería posible valorizar ciertos residuos orgánicos utilizándolos como sustitutos de los combustibles fósiles tradicionales (coque de petróleo, carbón o fuel oil), de tal manera que la energía consumida para estos procesos industriales puede obtenerse a partir de combustibles derivados de residuos.

De esta manera, los residuos en la industria cementera podrían ser usados como combustibles alternativos y materia prima. Estas actuaciones presentarían una serie de importantes beneficios ambientales:

- ✚ Menor explotación de los recursos naturales ya que se produce un ahorro en el consumo de materias primas y combustibles fósiles.
- ✚ Reducción de las emisiones a la atmosfera.
- ✚ No se producirían residuos adicionales que requieran un tratamiento posterior.
- ✚ Menor vertido de residuos generados por otras instalaciones industriales y menor impacto asociado a su depósito en vertederos.
- ✚ Se garantizaría el tratamiento ambiental adecuado de los residuos, sin generar impactos añadidos sobre el entorno.

OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN

OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de esta tesis es estudiar las ventajas de valorizar energéticamente ciertos residuos, sustituyendo parcialmente los combustibles fósiles empleados en los hornos de las cementeras y detallar un ejemplo práctico de valorización energética de neumáticos fuera de uso (NFU), en una planta cementera.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

Para el cumplimiento del objetivo general se han formulado una serie de objetivos específicos:

- ✚ Estudiar el proceso de elaboración del cemento.

- ✚ Estudiar las opciones de gestión de residuos y su marco legal.

- ✚ Mostrar las ventajas de la valorización energética de residuos en la industria del cemento.

- ✚ Hacer un ejemplo práctico de valorización energética de neumáticos fuera de uso (NFU), en una planta cementera.

PLANTEAMIENTO GENERAL

El planteamiento general de este trabajo de fin de máster se basa en estudiar las ventajas de valorizar energéticamente ciertos residuos en los hornos de una cementera. De este modo, sería posible aprovechar el poder calorífico de aquellos residuos que no se hayan podido reciclar o reutilizar y cuyo fin último es el vertedero, dando cumplimiento a la jerarquía de gestión de residuos. Asimismo, la utilización de combustibles alternativos en los hornos de clínker permitiría un ahorro de combustibles fósiles no renovables.

Se hará un análisis exhaustivo de la situación actual y de las opciones reales de valorizar distintos tipos de residuos como combustibles alternativos, poniendo como ejemplo la valorización energética de neumáticos fuera de uso (NFU).

En base a este estudio se determinarán las ventajas y desventajas de esta opción de trabajo, se establecerán las posibilidades reales de sustitución y aprovechamiento de estos combustibles alternativos.

CAPITULO I

LA INDUSTRIA CEMENTERA

1.1. INTRODUCCION

El cemento es un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico finamente molido que amasado con agua, forma una pasta que fragua y endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación que, una vez endurecido conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua.

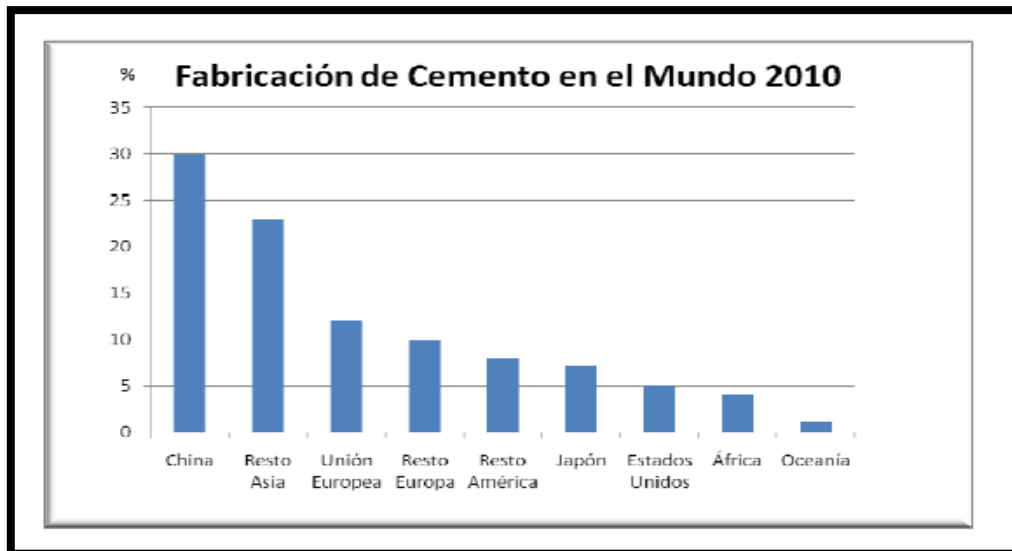
Los cementos están compuestos de diferentes materiales (componentes) que adecuadamente dosificadas mediante un proceso de producción controlado, le dan al cemento las cualidades físicas, químicas y resistencias adecuadas al uso deseado.

Dosificado y mezclado apropiadamente con agua y áridos produce hormigón o mortero que conserva su trabajabilidad durante un tiempo suficiente, alcanza unos niveles de resistencias preestablecidos y presenta una estabilidad de volumen a largo plazo.

El endurecimiento hidráulico del cemento se debe principalmente a la hidratación de los silicatos de calcio, aunque también pueden participar en el proceso de endurecimiento otros compuestos químicos, como por ejemplo, los aluminatos.

La producción mundial de cemento se sitúa en una cifra aproximada de 3,033 millones de toneladas al año. Asia es el mayor productor (China solamente produce una tercera parte del total mundial), seguido por Europa (ver figura 1). En la Unión Europea, el cemento se fabrica en más de 300 plantas, con una producción en torno a los 270 millones de toneladas al año siendo Italia, Alemania y España los mayores productores.

Figura 1. Producción mundial de cemento (2010).



1.2. PROCESO DE FABRICACION DE CEMENTO

La fabricación del cemento se puede considerar una actividad industrial de procesamiento de minerales, que se puede dividir en tres etapas básicas:

- ✚ Obtención, preparación y molienda de las materias primas (caliza, margas, arcilla, pizarra, etc.), las cuales son generalmente extraídas de canchales y que aportan los siguientes compuestos minerales: carbonato cálcico (CaCO_3), óxido de silicio (SiO_2), óxido de aluminio (Al_2O_3) y óxido de hierro (Fe_2O_3). En esta primera etapa se obtiene una mezcla pulverulenta de los minerales que se denomina crudo o harina.
- ✚ Cocción o sinterización del crudo en hornos rotatorios hasta alcanzar la temperatura adecuada ($1.450\text{ }^\circ\text{C}$), para ser enfriado bruscamente y obtener de esta manera un producto intermedio llamado clínker.
- ✚ Molienda del clínker con otros componentes: yeso (regulador de fraguado) y adiciones (escoria de alto horno, cenizas volantes, caliza, puzolanas), para dar lugar a los distintos tipos de cemento.

Estas etapas se explican más detalladamente a continuación.

1.2.1 PREPARACION Y MOLIENDA DE CRUDO

En la primera etapa, se establece la formulación de óxidos necesarios para la fabricación del clínker, esto se consigue con una mezcla de materiales, por un lado los minerales básicos, que son los componentes mayoritarios y por otro lado los correctores de composición, en proporción menor.

Minerales básicos:

- ✚ Caliza, constituye aproximadamente el 75 – 80 % del material y aporta el carbonato cálcico (CaCO_3), que, tras la calcinación, dará lugar al óxido de cal (CaO), desprendiendo dióxido de carbono (CO_2).
- ✚ Arcillas, constituyen en torno al 20 % del material, son las responsables del aporte de los óxidos de silicio y aluminio y, en menor medida, de hierro.
- ✚ Margas, que tienen una riqueza variable en carbonatos, en óxidos y se adicionan en un porcentaje variable.

Correctores de composición:

Dependiendo de las características propias de las canteras de las que se extraen las materias primas, puede ser necesario ajustar los contenidos de las mismas mediante unos materiales llamados correctores, normalmente en porcentajes muy inferiores a los materiales mayoritarios.

- ✚ Para corregir el contenido en cal se utiliza material calizo de alta pureza.
- ✚ El contenido en sílice normalmente se ajusta con arena u otros materiales silíceos.

- ✚ El contenido en hierro se ajusta con la adición de ceniza de pirita u otros materiales ricos en hierro.

La mezcla de materiales, normalmente se transporta mediante cintas a la zona de molienda de todas estas materias primas, para obtener la harina o crudo. La molienda se consigue con molinos de golpeo o compresión.

Una vez molido, el material se clasifica en separadores en función del tamaño de sus partículas, con objeto de devolver la fracción gruesa al molino, mientras que la fracción de tamaño adecuado para el proceso se envía a los silos de almacenamiento.

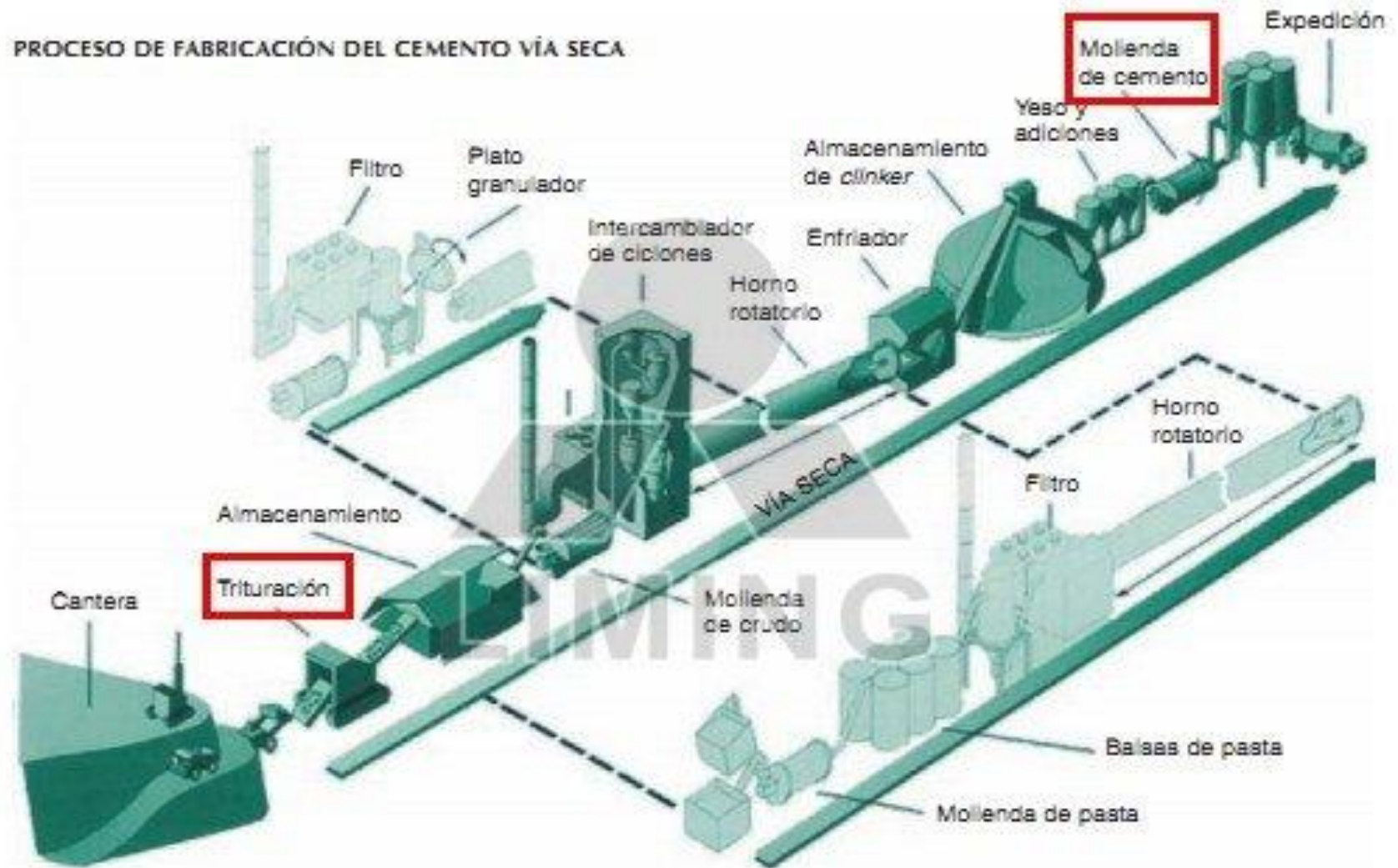
Los gases calientes de salida del horno se hacen pasar a través de los equipos de molienda y clasificación para conseguir secar las materias primas, aprovechando el calor sensible de los gases antes de que vayan a desempolvado y a la chimenea para su emisión a la atmósfera.

1.2.2 COCCIÓN DE MATERIALES

El clínker se obtiene al someter el crudo molido a un proceso termoquímico que necesita altas temperaturas, las cuales se consiguen en hornos rotatorios, entre 3 y 5 metros de diámetro y una longitud que varía en función de los tipos de hornos, pero que puede llegar a ser superior a los 150 metros.

En función de cómo se procesa el crudo y se alimenta al horno de clínker, se distinguen cuatro tipos de proceso de fabricación: vía seca, vía semi-seca, vía semihúmeda y vía húmeda.

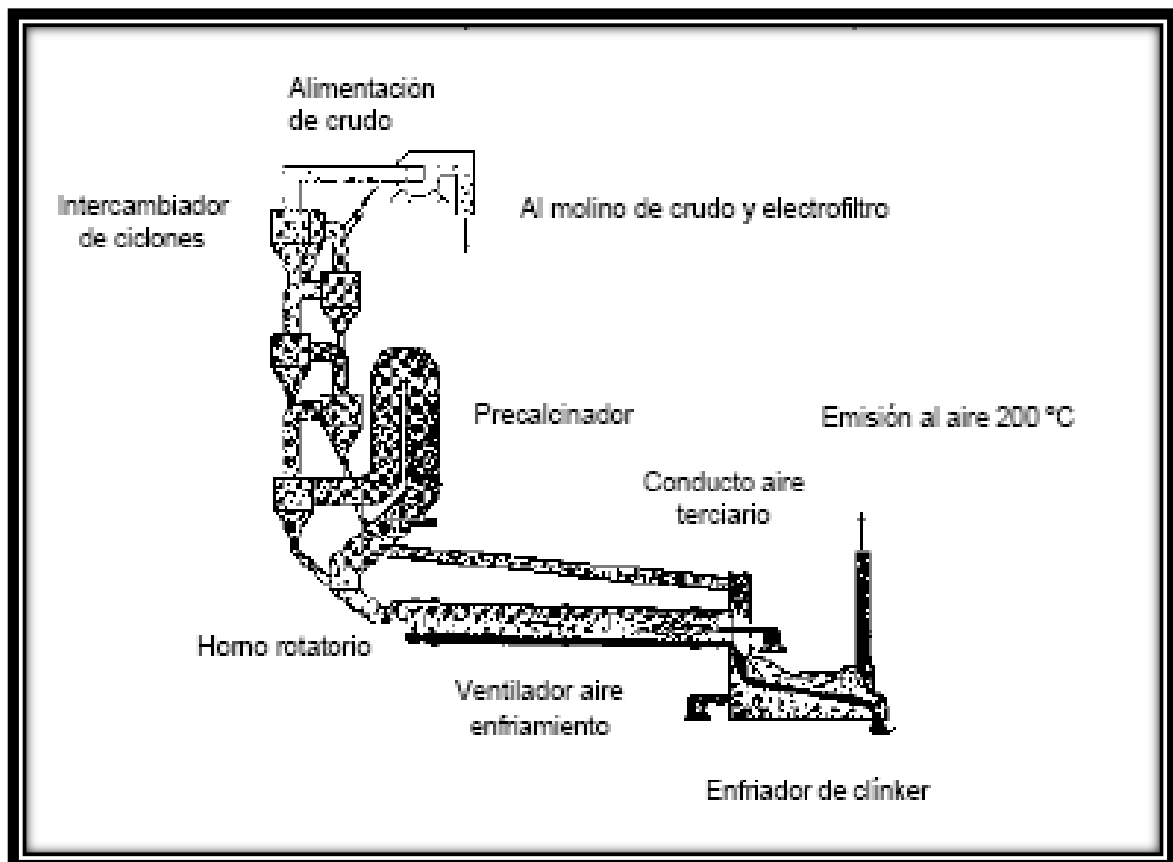
Figura 2. Proceso de fabricación de cemento vía seca.



El proceso más utilizado es el de vía seca que aparece esquematizado, se caracteriza porque la materia se introduce seca y en forma pulverulenta. La alimentación del crudo al horno se realiza mediante una torre de ciclones de varias etapas (generalmente de 4 a 6), en la que se precalienta el crudo en contacto con los gases provenientes del horno rotatorio.

A veces se instala una cámara previa de combustión donde se quema parte del combustible (puede llegar a ser el 60 % del total), llamada precalcinador, de manera que se consigue que el proceso de descarbonatación de la caliza (calcinación) quede casi esta completado antes de entrar en el horno (ver figura 3).

Figura 3. Horno con precalentador de ciclones y precalcinador (Fuente: Cement Data Book).



El proceso de vía húmeda se utiliza normalmente cuando las materias primas tienen un alto contenido en humedad, en él se prepara el material de alimentación mediante una molienda húmeda, de forma que la pasta resultante tiene un 30 – 40 % de contenido de agua y es alimentada en el extremo más elevado del horno inclinado. En la zona de secado del horno se suelen colocar cadenas para mejorar el intercambio de calor entre los gases y la pasta.

En los últimos años la industria cementera ha realizado una profunda renovación de sus equipos, sustituyendo los más antiguos de vía húmeda por los más eficientes energéticamente de vía seca. En la actualidad, en torno al 78 % de la producción de cemento en Europa se realiza en hornos de vía seca, otro 16 % se realiza en hornos de vía semi-seca o semi-húmeda y un 6 % en los de vía húmeda.

En España de los 60 hornos de fabricación de cemento existentes aproximadamente, 6 son de vía húmeda, 4 de vía semi-seca y el resto de vía seca.

En todos los casos, los gases circulan en sentido contrario al avance de los materiales (contracorriente) y el flujo de los mismos está forzado por la aspiración de un ventilador o exhaustor situado aguas abajo del horno.

En el proceso de formación de clínker se pueden distinguir cuatro etapas:

- ✚ **Deshidratación y precalentado** (20 – 900 °C): En esta etapa se seca y se precalientan los materiales que componen el crudo.

- ✚ **Calcinación / descarbonatación** (600 – 900 °C): En esta etapa se inician las reacciones, se forman los minerales y fases intermedias, que posteriormente acabarán dando lugar al clínker. Se descompone la caliza, se forma silicato dicálcico por la reacción endotérmica entre la sílice y el óxido de calcio formado en la descomposición de la caliza.

- ✚ **Sinterización o clinkerización** (1.250 – 1.450 °C): En esta etapa se forma el silicato tricálcico por la reacción exotérmica entre el silicato dicálcido y el óxido de calcio.

- ✚ **Enfriamiento interno en el horno** (1.350 – 1.200 °C): En esta etapa se produce la cristalización y formación definitiva del aluminato cálcico y del ferrito cálcico.

Los constituyentes principales del clínker son silicatos, aluminatos y ferritos de calcio, tal como se indica en la tabla 1:

Tabla 1. Principales constituyentes del clínker

| Constituyente | Fórmula | Fór. Simp. | Denominación |
|------------------------------|---|-----------------------|--------------|
| Silicato tricálcico | $\text{SiO}_2 \cdot 3\text{CaO}$ | C_3S | Alita |
| Silicato dicálcico | $\text{SiO}_2 \cdot 2\text{CaO}$ | C_2S | Belita |
| Aluminato tricálcico | $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaO}$ | C_3A | Celita |
| Alumino-ferrito tetracálcico | $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ | C_4AF | Ferrita |

1.2.3. MOLIENDA DEL CLINKER

Una vez obtenido el clinker, se producen los distintos tipos de cemento mediante la molienda conjunta de clinker (en una proporción aproximada del 80 %), con yeso y con otros materiales denominados adiciones (hasta completar el 20 % restante).

Normalmente se utilizan como adiciones los siguientes materiales:

- ✚ Escoria siderúrgica.
- ✚ Cenizas volantes de centrales térmicas.
- ✚ Material calizo de alta pureza.
- ✚ Puzolanas naturales o industriales.

El yeso se utiliza como retardador del fraguado del cemento, con objeto de que los hormigones o productos con él fabricados mantengan un estado fluido durante el tiempo necesario para su aplicación.

La mezcla del clinker con los aditivos se realiza en distintos tipos de molinos, entre los que se pueden destacar:

- ✚ Molinos de tubo.
- ✚ Molinos de rodillo verticales.
- ✚ Molinos de rodillos horizontales.
- ✚ Prensas de rodillos.

Las distintas proporciones de materiales y el grado de finura al que se muelen, da lugar a los distintos tipos de cemento, clasificados por su composición, por su resistencia y por otras consideraciones, como el tiempo de fraguado, la resistencia inicial, etc.

El cemento se almacena en silos, de donde se alimentan los equipos de expedición, ya sea a granel o en sacos de papel.

1.2.4. CONSUMO ENERGETICO EN LA FABRICACION DEL CEMENTO

El proceso de fabricación de cemento es un proceso con un consumo intensivo de energía, debido fundamentalmente a las altas temperaturas que es necesario alcanzar para el correcto desarrollo del mismo y en las operaciones de molienda, la energía que se utiliza es a partir de combustibles fósiles y de eléctrica.

El consumo energético va a depender de las materias primas empleadas, sobre todo de la tecnología y del sistema de alimentación empleados, ya que los sistemas de alimentación por vía húmeda necesitarán evaporar el agua introducida con las materias primas. En estas circunstancias el consumo de combustibles en el horno de clínker se sitúa entre 700 y 1.300 kcal/kg. de clínker (3.000 – 5.500 MJ/t), lo que equivale a 100 y 185 kg. de carbón o de coque por tonelada de cemento. Tradicionalmente esta energía se ha suministrado mediante distintos combustibles fósiles, como carbón, coque de petróleo, fueloil y gas natural.

Por otro lado el consumo de energía eléctrica se produce principalmente en las operaciones de molienda, tanto de las materias primas antes de su cocción, como del clínker y las adiciones para obtener el cemento. Ambas operaciones suponen aproximadamente el 75 % de la electricidad consumida en la fábrica. El otro 25 % se emplea en el transporte de materiales, impulsión de gases y desempolvado de los mismos (electrofiltros). El consumo total se sitúa aproximadamente entre 90 - 120 kWh/t de cemento, dependiendo de la tecnología utilizada y el tipo de cemento fabricado.

Los costes energéticos de combustible y energía eléctrica representan entre 30 y un 40 % de los costes de fabricación, por lo que la reducción del consumo de energía y la diversificación de las fuentes energéticas se convierte en un asunto de máxima importancia para la competitividad de las empresas cementeras.

Los esfuerzos para reducir el consumo de combustible se han centrado principalmente en dos líneas: la modernización de las instalaciones utilizando hornos de mayor tamaño y eficiencia y la modificación del combustible.

Así, en los últimos 100 años se ha realizado un continuo progreso en la modernización de la industria cementera, mejorando la eficiencia energética de los hornos y desarrollando nuevos tipos. En las últimas dos décadas se ha reducido el consumo de energía para fabricar una tonelada de cemento aproximadamente en un 30 %, sin embargo esta reducción se encuentra en una fase asintótica, es decir, que en el futuro ya no habrá apenas margen de maniobra para seguir mejorando. Por esta razón hay que buscar nuevas alternativas que reduzcan los costes asociados al consumo de combustibles.

La combustión es una reacción química de oxidación, en la cual generalmente se desprende una gran cantidad de energía, en forma de calor y luz, manifestándose visualmente como fuego. En toda combustión existe un elemento que se oxida (combustible) y otro que produce la combustión (comburente). Dando como resultado la formación de CO_2 y H_2O . La energía liberada en la combustión se aprovecha en el proceso de fabricación de clínker.

La combustión en el horno de clínker tiene lugar en una o dos zonas, en función de la tecnología empleada:

- a) En el mechero principal, presente en todos los hornos, y situado en la parte más baja del horno rotatorio. En él, la llama alcanza una temperatura cercana a los 2000°C y los gases de combustión se mantienen a más de 1200°C durante un tiempo superior a 5 segundos (ver tabla 2), en atmósfera oxidante.
- b) En la zona del horno en que se produce la descarbonatación de la caliza (calcinación), en esta la combustión se realiza a temperatura cercana a 1200°C , manteniéndose una temperatura superior a 850°C durante unos 3 segundos.

La ubicación concreta de esta segunda zona de combustión varía para distintas tipologías de hornos:

- Los hornos más modernos disponen de cámaras de combustión en la parte baja de la torre de ciclones (precalcinador), donde se realiza la combustión con aporte de aire caliente proveniente del enfriador de clínker. Algunos hornos disponen de precalcinador sin aporte de aire terciario, por lo que la combustión se realiza con el exceso de oxígeno proveniente del mechero principal.
- En hornos de vía seca, semi-seca y semi-húmedas que no disponen de precalcinador, esta combustión puede realizarse en la primera zona del horno rotatorio. Este sistema está especialmente indicado para combustibles densos y alimentados en tamaños relativamente grandes.
- En hornos vía húmeda o en hornos largos, la alimentación de combustibles alternativos puede realizarse en una zona adecuada del horno rotatorio.

Tabla 2. Condiciones de combustión en los diferentes sistemas.

| Sistema | Tiempo retención a >1.200 °C (seg.) | Temperatura llama (°C) |
|---------------------|-------------------------------------|------------------------|
| Húmedo | > 11 | 1.950 - 2.300 |
| Seco | > 5,4 | 2.150 |
| Semihúmedo/semiseco | > 6,7 | 1.930 - 2.000 |

1.3. COMBUSTIBLES

Como se ha visto en el apartado anterior es necesario usar combustibles en la fabricación del cemento. Existe una gran variedad de combustibles que pueden ser utilizados y aunque históricamente ha sido el carbón el más empleado para la alimentación de los hornos de clínker, hay todavía un elevado consumo del coque de petróleo, en la tabla 3 se cuantifican los combustibles utilizados en la fabricación del cemento en el periodo 2006-2010 en España. Los combustibles tradicionales pueden ser de dos tipos:

Combustibles sólidos.

El combustible sólido más usado es el coque de petróleo, seguido por la hulla que es un tipo de carbón mineral que contiene entre un 45% y un 85% de carbono.

Combustibles líquidos.

El más usado actualmente es el fuel-óleo pesado, aunque este se utiliza únicamente durante los períodos de calentamiento de los hornos. Los combustibles más empleados en España aparecen detallados en la tabla 3.

Tabla 3. Combustibles utilizados en plantas de cemento 2010

| | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | Tasas de variación 2010/2009 | |
|---------------------------|--|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------------------|---------|
| TRADICIONAL | Tradicional | | | | | | |
| | Coque de petróleo | 3.156.500 | 3.001.614 | 2.564.955 | 2.002.098 | 1.913.796 | -4,41% |
| | Fuel oil | 49.894 | 60.716 | 33.822 | 22.397 | 17.980 | -19,72% |
| | Gas natural | 7.948 | 5.539 | 5.035 | 2.567 | 2.334 | -9,09% |
| | Gasóleo | | | 559 | 480 | 316 | -34,06% |
| | Hulla | 219.504 | 386.990 | 322.834 | 32.356 | 35.064 | 8,37% |
| | Otros combustibles Tradicionales sólidos | | 25.670 | 12.558 | 21.125 | 32.345 | 53,11% |
| ALTERNATIVOS | Alternativo biomasa | | | | | | |
| | Harinas y grasas animales | 88.908 | 97.053 | 82.973 | 58.606 | 55.655 | -5,04% |
| | Lodos de depuradora urbana | 9.670 | 7.130 | 19.933 | 29.831 | 47.967 | 60,80% |
| | Madera | 23.517 | 23.536 | 26.106 | 77.486 | 85.605 | 10,48% |
| | Papel, cartón y celulosa | 4.016 | 5.942 | 750 | 575 | 990 | 72,17% |
| | Otros líquidos alternativos biomasa | | | | 216 | 34 | -84,15% |
| | Alternativo parcialmente biomasa | | | | | | |
| | CDR - RSU | | | 7.285 | 79.718 | 111.794 | 40,24% |
| | Neumáticos | 42.006 | 56.048 | 51.431 | 82.385 | 116.394 | 41,28% |
| | Serrín impregnado | 35.644 | 44.427 | 47.510 | 60.003 | 68.342 | 13,90% |
| | Textil | | | | 285 | 534 | 87,37% |
| | Alternativo fósil | | | | | | |
| | Aceites usados | 26.019 | 26.812 | 13.128 | 7.474 | 10.947 | 46,47% |
| | Disolventes y barnices | 32.676 | 39.057 | 57.812 | 44.376 | 39.055 | -11,99% |
| | Otros no biomasa | 6.240 | 16.600 | 9.509 | 25.349 | 45.903 | 81,08% |
| Plásticos | 5.141 | 3.026 | 923 | 7.570 | 18.007 | 137,87% | |
| Residuos de hidrocarburos | 10.259 | 6.493 | 31.290 | 2.451 | 6.384 | 160,47% | |
| Total general | 3.709.994 | 3.801.114 | 3.283.378 | 2.554.781 | 2.607.111 | 2,05% | |

A partir de los combustibles tradicionales y tal como se muestra en la tabla 3 también se pueden utilizar combustibles alternativos o de sustitución, que pueden ser líquidos o sólidos. Los combustibles alternativos disminuyen la dependencia energética de los combustibles fósiles o tradicionales y, al mismo tiempo, reduce las emisiones. Por otra parte, su uso como materias primas alternativas tiene un gran número de beneficios, entre los que podemos destacar la menor necesidad de explotación de las canteras y una mejora en la huella medioambiental. Estos combustibles alternativos son:

Líquidos

Se suelen usar como combustibles alternativos, distintos tipos de residuos que presenten baja o media toxicidad, tales como:

- ✚ Aceite usado.
- ✚ Lodos aceitosos.
- ✚ Residuos de refinería / fondos de destilación.
- ✚ Subproductos de alquitrán.
- ✚ Alquitraneos ácidos.
- ✚ Lodos ácidos.
- ✚ Residuos de la fabricación de pinturas (disolventes, etc.) / lodos de pinturas.
- ✚ Residuos de la industria química.
- ✚ Residuos de hidrocarburos / hidrocarburos con lodos.
- ✚ Lejías negras y aguas residuales industriales.
- ✚ Parafinas.

También se pueden utilizar algunos otros residuos de alta toxicidad, pero más puntual y controladamente, siempre que se cuente con una autorización para utilizar este residuo como combustible.

Sólidos

Los combustibles sólidos alternativos pueden ser:

De fácil molienda, tales como:

- ✚ Rechazos de minas de carbón.
- ✚ Lignitos de baja calidad.
- ✚ Residuos de carbón.
- ✚ Residuos de carbón vegetal.
- ✚ Cenizas de alto contenido en carbono.
- ✚ Grafitos.
- ✚ Harinas cárnicas y de hueso.

De mediana o difícil molienda, tales como:

Gran tamaño

- ✚ Neumáticos.
- ✚ Revestimiento de baterías
- ✚ Rechazos domésticos.
- ✚ Residuos de automóvil.
- ✚ Corteza.
- ✚ Astillas de madera.
- ✚ Piñas.
- ✚ Residuos del aceite de palmera.
- ✚ Caparazones de coco.
- ✚ Aceitunas prensadas.
- ✚ Turba.

Pequeño tamaño

- ✚ Cáscara de arroz.
- ✚ Paja.
- ✚ Serrín.
- ✚ Tierras de batán (Fuller).
- ✚ Restos finos de CDR.
- ✚ Polvo de grafito.
- ✚ Goma y caucho molido.
- ✚ Resinas de intercambio iónico.

La utilización de estos u otros residuos como sustitutos de los combustibles tradicionalmente empleados en la industria cementera se encuentra sujeta a condiciones administrativas y de proceso. Sin olvidar que el objetivo primordial es la fabricación de un producto de calidad, a un coste razonable y sin poner en peligro la salud de las personas o la integridad del medio ambiente.

1.4. PRODUCCIÓN, CONSUMO Y COMERCIO MUNDIAL DEL CEMENTO

La producción del cemento es un importante indicador económico, relacionado estrechamente con la evolución industrial de la construcción de un país.

La producción mundial de cemento se ha incrementado ligeramente desde mediados del año 2000 hasta el 2010 (figura 4), siendo su mayor productor Asia, con un crecimiento constante, por contra la UE-27 desde mediados del 2008 ha tenido un descenso en sus producciones. Si consideramos, la evolución del consumo del cemento per cápita en el mundo (kg/hab.), este aparece desglosado (tabla 4 y figura 5), tal como se observa en la tabla 4 ha tenido un aumento considerable a nivel mundial desde el 2005 al 2009 siendo de nuevo Asia el principal consumidor per cápita, por encima de la media mundial (figura 5).

En España la actividad del sector cementero mantuvo en el periodo 2000-2006 una fuerte línea de crecimiento, que ha llevado a España a situarse a la cabeza de los países europeos tanto en materia de producción como del consumo de cemento (ver tabla 4 y tabla 5). No obstante a partir del año 2007 la producción ha descendido notablemente debido a la crisis urbanística y financiera.

Figura 4. Producción mundial de cemento evolución 2000-2010.

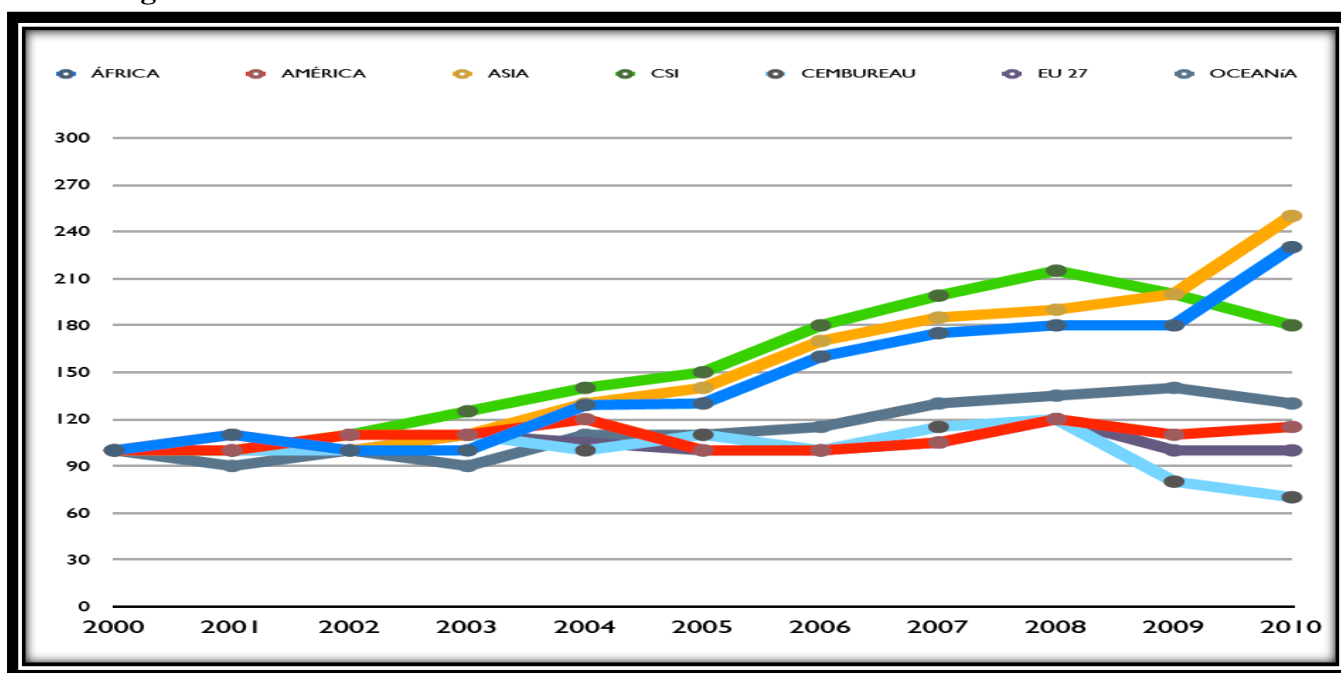


Tabla 4. Evolución del consumo per cápita del cemento en el mundo (kg/hab.)

| PAÍSES | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 |
|-----------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Américas | | | | | | | |
| Estados Unidos | 391 | 414 | 434 | 427 | 381 | 318 | 230 |
| Canadá | 281 | 292 | 297 | 325 | 307 | 334 | 266 |
| México | 285 | 295 | 314 | 342 | 347 | 329 | 321 |
| Brasil | 195 | 197 | 205 | 221 | 240 | 272 | 271 |
| Argentina | 134 | 163 | 194 | 228 | 245 | 247 | 231 |
| Chile | 246 | 252 | 274 | 262 | 282 | 288 | 243 |
| Venezuela | 106 | 138 | 177 | 222 | 257 | 280 | nd |
| Américas Media | 270 | 281 | 297 | 308 | 301 | 288 | 253 |
| Europa | | | | | | | |
| Alemania | 363 | 353 | 328 | 351 | 333 | 337 | 310 |
| España | 1100 | 1126 | 1192 | 1278 | 1266 | 936 | 630 |
| Francia | 346 | 366 | 373 | 397 | 399 | 386 | 325 |
| Grecia | 1012 | 963 | 912 | 1049 | 994 | 913 | 697 |
| Italia | 747 | 795 | 789 | 813 | 784 | 699 | 599 |
| Portugal | 883 | 874 | 826 | 739 | 737 | 689 | 580 |
| Turquía | 396 | 432 | 487 | 571 | 601 | 568 | 567 |
| Rusia/Russia | 273 | 306 | 326 | 369 | 425 | 425 | 310 |
| Europa Media | 458 | 478 | 494 | 534 | 546 | 506 | 422 |
| Asia | | | | | | | |
| China | 666 | 742 | 812 | 929 | 1021 | 1033 | 1218 |
| Japon | 471 | 454 | 462 | 459 | 445 | 402 | 347 |
| Corea del Sur | 1218 | 1144 | 962 | 1002 | 1048 | 1042 | 994 |
| India | 110 | 115 | 121 | 147 | 141 | 158 | 160 |
| Tailandia | 371 | 394 | 340 | 377 | 377 | 360 | 349 |
| Asia Media | 366 | 395 | 420 | 504 | 504 | 515 | 579 |
| África | | | | | | | |
| Argelia | 398 | 374 | 408 | 456 | 479 | 504 | 522 |
| Egipto | 390 | 388 | 452 | 477 | 500 | 527 | 624 |
| Marruecos | 308 | 321 | 340 | 374 | 417 | 453 | 463 |
| Túnez | 634 | 576 | 554 | 552 | 543 | 571 | 616 |
| África del Sur | 197 | 229 | 252 | 283 | 293 | 277 | 239 |
| África Media | 116 | 118 | 129 | 135 | 146 | 151 | 167 |
| Oceanía | | | | | | | |
| Australia | 421 | 455 | 457 | 458 | 473 | 486 | 416 |
| Nueva Zelanda | 247 | 324 | 302 | 266 | 366 | 363 | 266 |
| Oceanía Media | 311 | 347 | 334 | 330 | 351 | 358 | 313 |
| Mundial Media | 321 | 343 | 363 | 398 | 423 | 424 | 447 |

Figura 5. Consumo per cápita 2009(kg /hab)

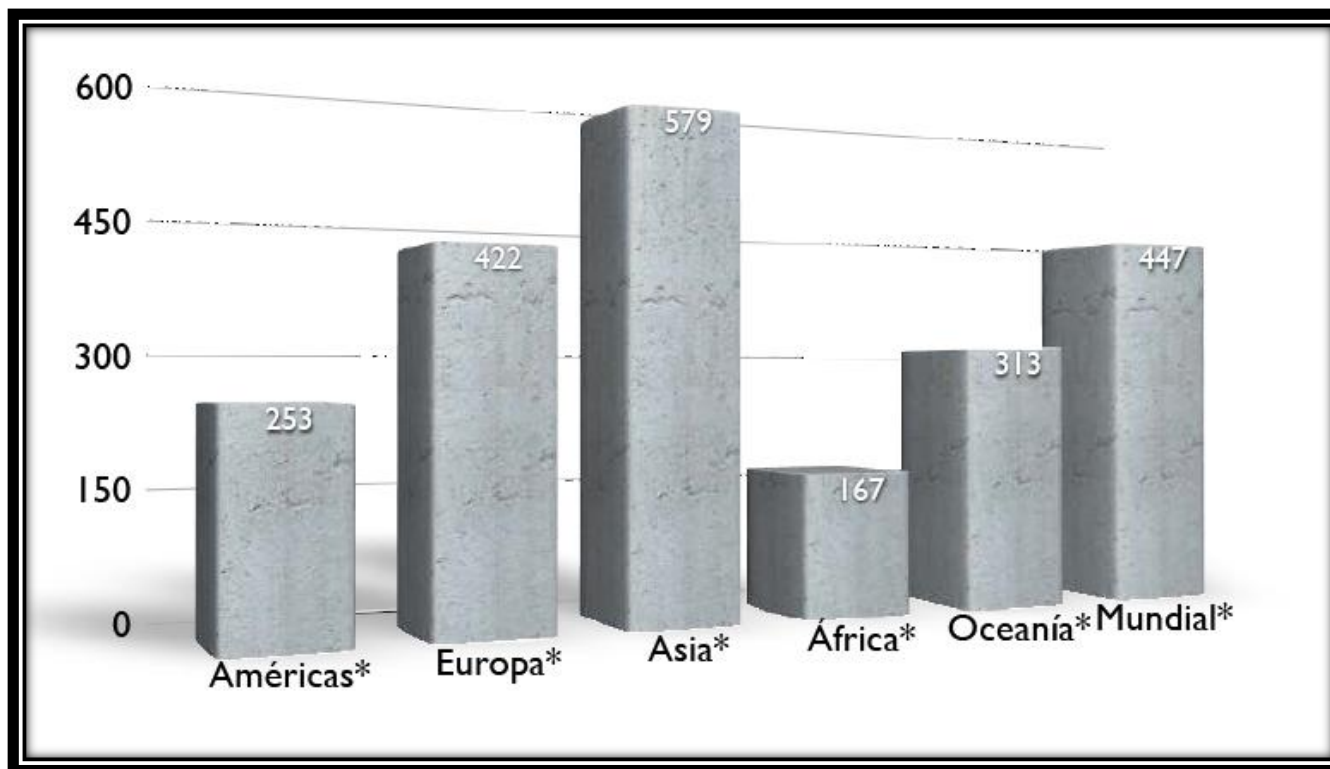


Tabla 5. Principales magnitudes del sector cementero español.

| Año | Producción de clínker | Producción de cemento | Exportaciones de cemento | Exportaciones de clínker | Importaciones de cemento ⁽¹⁾ | Importaciones de clínker ⁽¹⁾ | Consumo Aparente de cemento | Consumo per capita (kg/habitante) | Consumo agregado per capita (kg/habitante) |
|------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|---|---|-----------------------------|-----------------------------------|--|
| Hasta 1972 | | | | | | | | | 7.727 |
| 1973 | 20.436.513 | 22.246.880 | 875.501 | 392.612 | 179.151 | 196.237 | 21.521.523 | 619 | 8.346 |
| 1974 | 21.967.301 | 23.660.146 | 1.511.305 | 300.042 | 36.492 | 125.996 | 22.152.157 | 629 | 8.975 |
| 1975 | 23.075.617 | 23.969.860 | 3.140.022 | 434.617 | 11.068 | 82.891 | 20.817.084 | 585 | 9.560 |
| 1976 | 23.233.963 | 25.202.024 | 4.109.644 | 758.792 | 12.774 | 70.715 | 21.292.816 | 592 | 10.152 |
| 1977 | 25.896.584 | 27.995.045 | 6.493.391 | 1.426.108 | 7.201 | 70.125 | 21.755.248 | 597 | 10.749 |
| 1978 | 27.302.736 | 30.229.972 | 8.020.659 | 1.828.613 | 8.967 | 88.334 | 22.028.419 | 590 | 11.339 |
| 1979 | 27.038.305 | 28.051.453 | 7.350.581 | 1.601.276 | 10.273 | 216.887 | 20.770.015 | 559 | 11.898 |
| 1980 | 24.662.633 | 28.009.864 | 8.317.684 | 1.620.508 | 25.519 | 166.289 | 19.726.106 | 528 | 12.426 |
| 1981 | 26.156.190 | 28.751.053 | 10.283.491 | 1.742.395 | 21.441 | 30.890 | 18.488.179 | 490 | 12.915 |
| 1982 | 26.762.534 | 29.604.449 | 11.211.168 | 623.963 | 13.740 | 248.612 | 18.541.357 | 488 | 13.404 |
| 1983 | 26.193.776 | 30.616.191 | 12.638.149 | 612.582 | 12.963 | 53.600 | 17.924.921 | 470 | 13.873 |
| 1984 | 23.715.268 | 25.435.272 | 9.231.033 | 1.208.123 | 6.651 | 48.100 | 16.179.363 | 422 | 14.295 |
| 1985 | 19.509.552 | 21.880.009 | 5.486.703 | 2.316.723 | 5.981 | | 16.545.465 | 430 | 14.725 |
| 1986 | 20.372.819 | 22.007.284 | 3.730.015 | 2.041.153 | 68.113 | 800 | 18.236.942 | 472 | 15.198 |
| 1987 | 20.885.534 | 23.012.282 | 3.172.266 | 1.575.918 | 282.955 | 174.486 | 20.235.362 | 523 | 15.721 |
| 1988 | 20.904.687 | 24.371.881 | 2.566.454 | 1.403.962 | 954.202 | 62.292 | 22.670.322 | 584 | 16.305 |
| 1989 | 22.941.040 | 27.374.794 | 2.532.353 | 842.490 | 1.155.722 | 173.354 | 26.025.596 | 669 | 16.974 |
| 1990 | 23.211.727 | 28.091.679 | 2.289.938 | 569.860 | 2.766.066 | 32.576 | 28.571.611 | 733 | 17.707 |
| 1991 | 22.118.675 | 27.581.556 | 2.146.926 | 426.366 | 3.277.918 | 127.959 | 28.797.252 | 740 | 18.447 |
| 1992 | 19.398.564 | 24.616.107 | 1.743.245 | 438.655 | 3.245.275 | 180.782 | 26.051.142 | 668 | 19.115 |
| 1993 | 19.007.474 | 22.838.228 | 2.645.784 | 1.090.152 | 2.555.289 | | 22.741.027 | 582 | 19.697 |
| 1994 | 21.738.540 | 25.130.751 | 3.439.480 | 1.530.439 | 2.249.822 | | 24.037.777 | 614 | 20.311 |
| 1995 | 23.464.943 | 26.421.841 | 3.482.824 | 2.068.844 | 2.796.371 | 234.140 | 25.458.317 | 650 | 20.961 |
| 1996 | 22.898.277 | 25.406.170 | 3.879.160 | 2.384.537 | 3.167.339 | 477.095 | 24.726.943 | 630 | 21.590 |
| 1997 | 24.104.979 | 27.933.154 | 3.812.155 | 1.759.588 | 2.558.820 | 485.191 | 26.794.598 | 682 | 22.273 |
| 1998 | 25.942.596 | 32.449.065 | 3.471.236 | 632.385 | 1.867.680 | 1.218.872 | 30.990.099 | 778 | 23.050 |
| 1999 | 27.280.915 | 35.781.978 | 3.062.109 | 48.110 | 1.994.311 | 2.336.027 | 34.626.973 | 861 | 23.912 |
| 2000 | 27.840.499 | 38.115.621 | 2.120.998 | 38.783 | 2.372.476 | 2.735.028 | 38.438.638 | 949 | 24.861 |
| 2001 | 28.382.550 | 40.510.437 | 1.436.696 | 8.488 | 3.133.942 | 3.975.629 | 42.150.572 | 1.027 | 25.888 |
| 2002 | 29.357.596 | 42.387.660 | 1.417.564 | 33.971 | 3.173.833 | 4.649.365 | 44.119.801 | 1.068 | 26.956 |
| 2003 | 30.316.646 | 44.746.757 | 1.241.557 | 10.916 | 2.661.026 | 5.897.219 | 46.223.224 | 1.100 | 28.056 |
| 2004 | 30.798.002 | 46.593.482 | 1.517.609 | 6.910 | 2.570.612 | 6.266.470 | 48.005.531 | 1.124 | 29.181 |
| 2005 | 31.742.502 | 50.347.073 | 1.447.079 | | 2.887.491 | 7.804.380 | 50.529.535 | 1.164 | 30.345 |
| 2006 | 32.078.063 | 54.048.270 | 1.126.854 | | 3.164.435 | 9.587.594 | 55.896.387 | 1.268 | 31.614 |
| 2007 | 32.146.220 | 54.720.445 | 1.091.284 | | 2.853.620 | 11.015.835 | 55.997.071 | 1.248 | 32.862 |
| 2008 | 27.304.551 | 42.083.407 | 1.349.799 | 985.396 | 1.743.867 | 5.440.339 | 42.695.536 | 936 | 33.798 |
| 2009 | 21.594.604 | 29.504.574 | 1.481.717 | 1.355.760 | 728.716 | 2.119.666 | 28.913.148 | 630 | 34.428 |
| 2010 | 21.234.637 | 26.217.200 | 2.528.346 | 1.323.264 | 654.311 | 1.087.184 | 24.507.451 | 532 | 34.959 |

CAPITULO II

GESTION DE RESIDUOS Y MARCO LEGAL

2.1. INTRODUCCION

El imparable crecimiento demográfico, la concentración de la población en núcleos urbanos y la intensiva producción han generado una producción de residuos de tal volumen que es imposible asimilarlos mediante procesos de eliminación natural o por reutilización en otros procesos productivos.

La creciente generación de residuos constituye uno de los problemas más acuciantes de las sociedades modernas, tanto por sus necesidades de gestión como por su impacto en la contaminación del suelo, del agua, los riesgos para la salud pública y las emisiones de gases de efecto invernadero.

Es necesario un enfoque preventivo en la gestión de residuos y hacia él se ha dirigido la legislación. La actual normativa en materia de residuos, apuesta por una gestión que favorezca la minimización y valorización frente a la eliminación, asegurando que esta última se realice de forma segura. Esto se recoge en la Ley 22/2011 del 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, que deroga a la Ley 10/1998 (21/04/98) de residuos. En dicha ley se describen los residuos como cualquier sustancia u objeto que su poseedor deseche o tenga la intención o la obligación de desechar.

La gestión de residuos supone una serie de obligaciones y responsabilidades para aquellos que estén implicados en la misma, como es el caso del sector cementero. En este capítulo se presentará una visión general sobre el concepto legal del residuo y la clasificación derivada de la normativa; además de presentar una descripción detallada de las responsabilidades que la industria cementera posee, derivada de su papel como productor y gestor de residuos.

2.2. CONCEPTO Y CLASIFICACION DE LOS RESIDUOS

Como se ha descrito anteriormente, residuo es todo material inútil o no deseado, originado por la actividad humana, en cualquier estado (sólido, líquido, gaseoso, y sus respectivas mezclas).

Los residuos se pueden clasificar atendiendo distintos a factores:

- ✚ **Características físico-químicas:** Sólidos, líquidos, lodos/fangos, pastosos, radiactivos, etc.

- ✚ **Origen:** Sólidos urbanos (municipales), comerciales, industriales, agropecuarios, construcción y demolición, sanitarios (hospitalarios), mineros, etc.

- ✚ **Peligrosidad:** Peligrosos, inertes, biocontaminados, no peligrosos, radiactivos, infecciosos, etc.

- ✚ **Posibles tratamientos:** Fermentables, reciclables, valorizables, inertizables, etc.

- ✚ **Flujos temáticos:** Aparatos eléctricos y electrónicos, vehículo al final de su vida útil, neumáticos, envases y embalajes, construcción y demolición, PVC, etc.

Sin embargo, desde un punto de vista legal los residuos se pueden clasificar como:

- ✚ **Residuos peligrosos.**
- ✚ **Residuos no peligrosos.**

Esto se hará de conformidad con la lista establecida en la Decisión 2000/532/CE de la comisión, de 3 de mayo de 2000.

2.3. SITUACION DE LOS RESIDUOS EN EUROPA Y ESPAÑA

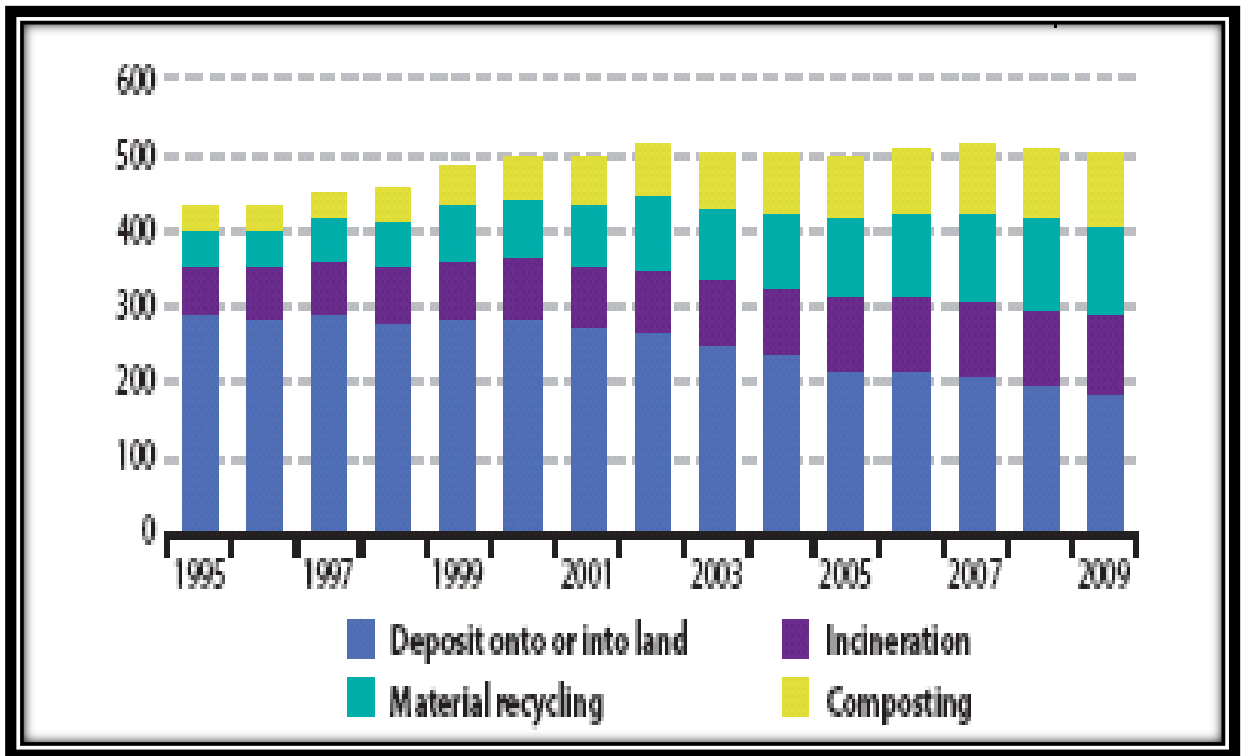
Cada año se produce casi dos mil millones de toneladas de residuos en los estados miembros de la UE, incluidos residuos que son especialmente peligrosos, y esta cifra no deja de aumentar. La mejor solución consistiría en prevenir la producción de residuos y en reintroducirlos en el ciclo de producción mediante el reciclado de sus componentes cuando existan soluciones sostenibles desde los puntos de vista ecológico y económico.

En la tabla 6 se muestra los kg de RU/hab producidos en los distintos países de Europa desde el año 1999 hasta el 2009, tal como se observa España ha tenido un descenso constate entre el 2000 hasta el 2009.

Tabla 6. Residuos urbanos generados por habitantes 1999-2009 (kg/hab.), Fuente Eurostat.

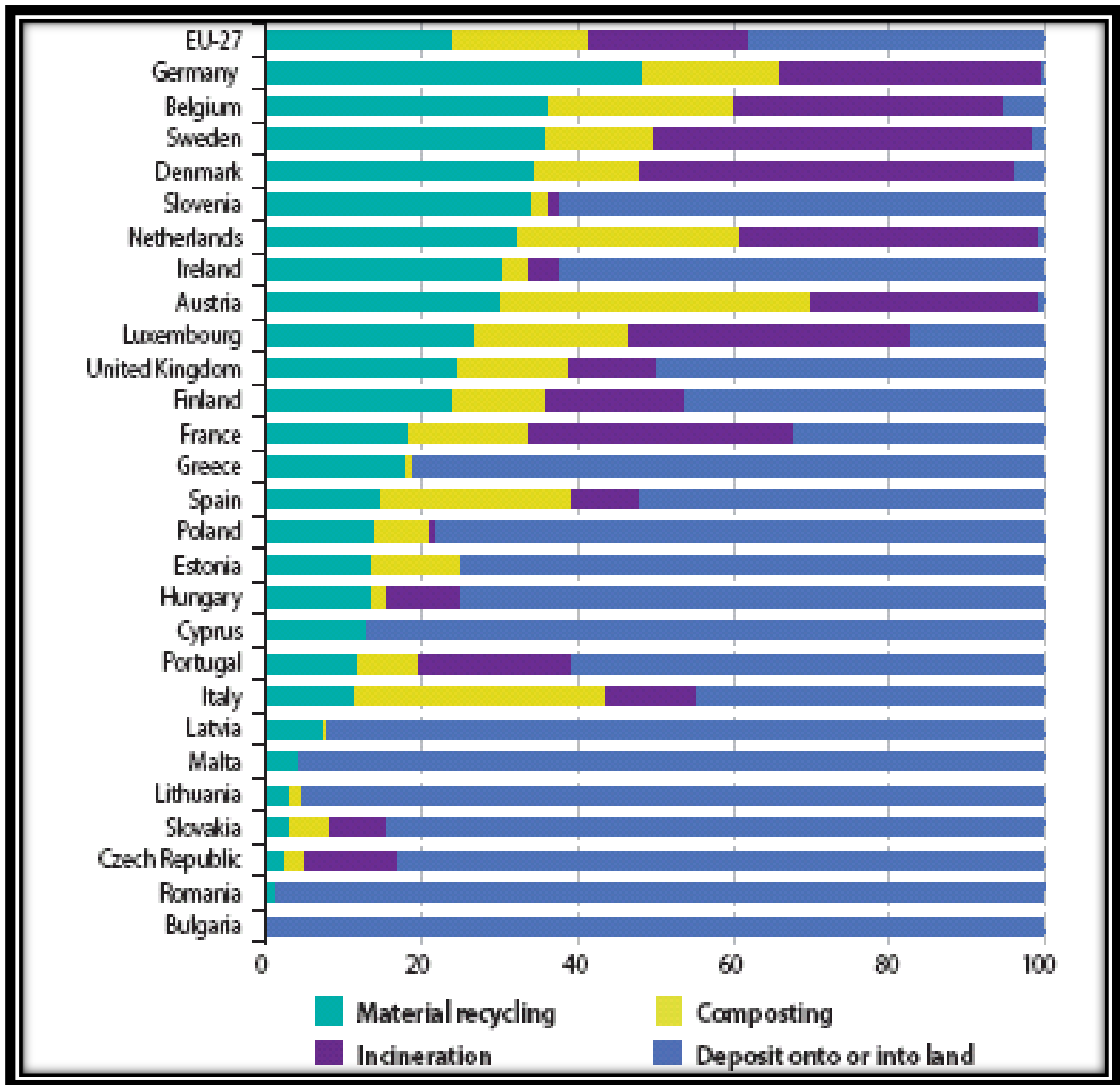
| | 1999 | 2000 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | Change 1999-2009 (%) |
|------------------|------|------|------|------|------|------|----------------------|
| EU-27 | 510 | 523 | 522 | 523 | 520 | 512 | 0.4 |
| Belgium | 463 | 475 | 483 | 495 | 489 | 489 | 5.6 |
| Bulgaria | 504 | 517 | 461 | 433 | 474 | 470 | - 6.7 |
| Czech Republic | 327 | 334 | 296 | 293 | 305 | 316 | - 3.4 |
| Denmark | 626 | 664 | 740 | 790 | 830 | 831 | 32.7 |
| Germany | 638 | 642 | 564 | 582 | 589 | 587 | - 8.0 |
| Estonia | 414 | 462 | 399 | 449 | 391 | 346 | - 16.4 |
| Ireland | 577 | 599 | 794 | 780 | 729 | 662 | 14.7 |
| Greece | 392 | 407 | 442 | 447 | 452 | 457 | 16.6 |
| Spain | 613 | 658 | 594 | 583 | 556 | 547 | - 10.8 |
| France | 507 | 514 | 536 | 543 | 542 | 535 | 5.5 |
| Italy | 498 | 509 | 552 | 548 | 543 | 540 | 8.4 |
| Cyprus | 666 | 677 | 739 | 748 | 767 | 775 | 16.4 |
| Latvia | 256 | 271 | 412 | 378 | 332 | 334 | 30.5 |
| Lithuania | 351 | 365 | 391 | 401 | 408 | 361 | 2.8 |
| Luxembourg | 646 | 654 | 683 | 695 | 697 | 701 | 8.5 |
| Hungary (1) | 483 | 446 | 468 | 457 | 454 | 430 | - 11.0 |
| Malta | 476 | 546 | 622 | 650 | 670 | 648 | 36.1 |
| Netherlands (2) | 597 | 613 | 622 | 629 | 624 | 611 | 2.3 |
| Austria | 563 | 580 | 653 | 596 | 599 | 591 | 5.0 |
| Poland | 319 | 318 | 327 | 322 | 320 | 316 | - 0.9 |
| Portugal | 441 | 471 | 463 | 468 | 515 | 517 | 17.2 |
| Romania | 314 | 355 | 389 | 379 | 392 | 396 | 26.1 |
| Slovenia | 550 | 573 | 431 | 439 | 457 | 448 | - 18.5 |
| Slovakia | 261 | 254 | 301 | 309 | 328 | 322 | 23.4 |
| Finland | 484 | 502 | 494 | 506 | 521 | 480 | - 0.8 |
| Sweden | 428 | 428 | 496 | 516 | 513 | 482 | 12.6 |
| United Kingdom | 569 | 577 | 586 | 570 | 544 | 526 | - 7.6 |
| Iceland | 454 | 462 | 563 | 558 | 551 | 556 | 22.5 |
| Liechtenstein | : | : | : | : | : | : | : |
| Norway | 594 | 613 | 459 | 491 | 487 | 470 | - 20.9 |
| Switzerland | 635 | 655 | 709 | 720 | 735 | 702 | 10.6 |
| Montenegro | : | : | : | : | : | : | : |
| Croatia (3) | : | : | 553 | : | 416 | : | - 24.8 |
| FYR of Macedonia | : | : | : | : | 349 | : | : |
| Turkey | 459 | 454 | 412 | 433 | 400 | 389 | - 15.3 |

Figura 6. Evolución del tratamiento de residuos urbanos EU-27.



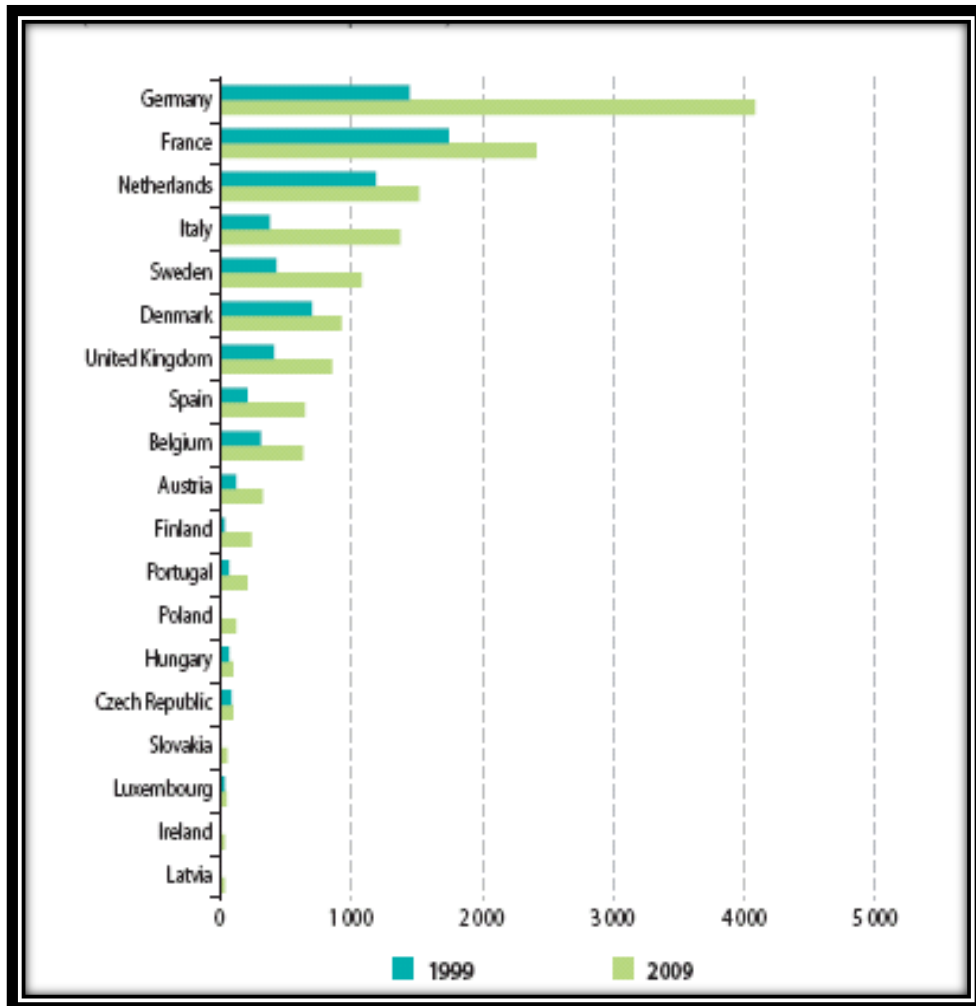
En la figura 6 se puede observar cómo ha evolucionado la gestión de los residuos urbanos en la UE. Tal como se observa entre el 1995 y 2009, los vertederos son la opción de tratamiento más común para los residuos urbanos. Aunque los residuos urbanos destinados a los vertederos se redujeron del 68 % en 1995 al 38 % en el 2009 siendo las opciones de tratamiento alternativos como reciclaje, incineración y compostaje cada vez mas importante.

Figura 7. Tratamiento de residuos urbanos, 2009 (% del total residuos municipales tratados).



En la figura 7 se desglosan las distintas opciones de tratamiento por países en el año 2009. Tal como se observa en España el porcentaje de residuos destinados a vertedero es mucho mayor que la media europea, mientras que el porcentaje de residuos destinados a incineración es mucho menor.

Figura 8. Producción de energía por incineración de residuos urbanos (KToe).



Los datos anteriores muestran claramente que la incineración es una de las opciones menos utilizada por la gestión de residuos. De hecho, si se cuantifica la evolución en la producción de energía por incineración de residuos urbanos en la UE-27, entre el 1999 y 2009 (figura 8) se observa que en los últimos diez años la producción de energía por incineración se ha duplicado, pero esto es insignificante frente a la producción de energía por fuentes convencionales. Por países se observa que en el año 2009, Alemania es el país que más energía genera por incineración de RU, representando el 28% de la producción total de la UE-27, seguido por Francia (16%), Países Bajos (10%) e Italia (9%). Entre el 1999 y el 2009, todos los estados miembros de la UE-27 han registrado importantes aumentos en su producción de energía a partir de residuos urbanos por incineración, siendo Finlandia el que presentó el mayor incremento (alrededor de dieciséis veces).

2.4. LA POLITICA DE GESTION DE RESIDUOS

España se encuentra, comparada con otros países de nuestro entorno, en los inicios de la gestión de residuos. La ley básica de residuos define las líneas básicas de actuación en el campo de los residuos, permitiendo un desarrollo reglamentario en el que se establezcan responsabilidades en la gestión, tratamiento y correcta eliminación de los mismos.

Por otro lado, la normativa europea sobre residuos ha sido actualizada mediante la Directiva 2008/98. Esta directiva recoge la siguiente jerarquía de gestión de residuos que ha de servir de orden de prioridades en la legislación, la política sobre la prevención y la gestión de residuos:

1º- Prevención: Es el conjunto de medidas adoptadas en la fase de concepción y diseño, de producción, de distribución y de consumo de una sustancia, material o producto, para reducir:

- a) La cantidad de residuo, incluso mediante la reutilización de los productos o el alargamiento de la vida útil de los productos.
- b) Los impactos adversos sobre el medio ambiente y la salud humana de los residuos generados, incluyendo el ahorro en el uso de materiales o energía.
- c) El contenido de sustancias nocivas en materiales y productos.

2º- Preparación para la reutilización: Son el conjunto de operaciones consistentes en la comprobación, limpieza o reparación, mediante la cual productos o componentes de productos que se hayan convertido en residuos se preparan para que puedan reutilizarse sin ninguna otra transformación previa.

3º- Reciclado: Es toda operación mediante el cual los materiales de residuos son transformados de nuevo en productos, materiales o sustancias, tanto si es con la finalidad original como con cualquier otra finalidad. Incluye la transformación del

material orgánico, pero no la valorización energética ni la transformación en materiales que se vayan a usar como combustibles o para operaciones de relleno.

4°- Otro tipo de valorización, por ejemplo, la valorización energética: Cualquier operación cuyo resultado principal sea que el residuo sirva a una finalidad útil al sustituir a otros materiales, que de otro modo se habrían utilizado para cumplir una función particular, o que el residuo sea preparado para cumplir esa función en la instalación o en la economía en general.

5°- Eliminación: Cualquier operación que no sea la valorización, incluso cuando la operación tenga como consecuencia secundaria el aprovechamiento de sustancias o energía.

Si se compara esta jerarquía con los datos mostrados en el apartado anterior se comprueba claramente que esta política no se está cumpliendo en Europa, que la mayor parte de los residuos generados terminan en un vertedero, lo que debería ser la última opción en la gestión de los residuos (la eliminación). Por tanto se debe hacer un esfuerzo adicional por buscar alternativas a la actual gestión de residuos y la presente tesis pretende contribuir a ello.

2.5. GESTION DE RESIDUOS EN LA FÁBRICAS DE CEMENTO

Como se ha visto el creciente consumo de recursos naturales y la producción de residuos son dos de los problemas ambientales que más preocupan a la sociedad actual, esto exige a las empresas una mayor responsabilidad por los efectos que provocan sus acciones en la sociedad y el entorno.

Las fábricas de cemento también tienen esta responsabilidad y deben aprovechar las características de su proceso productivo para reciclar y valorizar energéticamente varios tipos de residuos. Con la presentación de este servicio, la actividad industrial cementera puede realizar una contribución ambiental y social. En este apartado se describen distintas alternativas para reciclar y valorizar residuos en una planta de cemento.

1- El reciclado de residuos: La fabricación del cemento permite la incorporación de ciertos tipos de residuos y subproductos en dos momentos del proceso:

- ✚ Como componente del crudo (antes del clinker). Así las fábricas de cemento pueden aprovechar parte de los residuos minerales generados por otros procesos industriales, por tener composición similar a la de sus materias primas.
- ✚ Como componente del cemento. En la molienda del cemento se añaden ciertas materias primas, que pueden ser sustituidas por residuos de composición semejante.

Existen normas españolas y europeas que regulan que materiales se pueden utilizar como componentes del cemento y estos residuos son:

- a) Escorias de hornos.
- b) Humo de sílice (proveniente del procesado de minerales silíceos y ferroaleaciones).
- c) Cenizas volantes de sílice o calcio (de la combustión del carbón en instalaciones de generación de energía eléctrica).
- d) Arcillas o esquistos calcinados.
- e) Puzolanas industriales.

Las adiciones pueden ser utilizadas para mejorar la trabajabilidad, la durabilidad y la resistencia de cemento. Las adiciones mas empleadas en España son las escorias de altos hornos y la ceniza volantes.

Para asegurarse de que los residuos que se incorporarán al proceso cumplen todos los requisitos necesarios, es preciso realizar una serie de controles en los componentes del residuo que incluyen:

- ✚ Materia Orgánica.

- ✚ Metales Pesados.

- ✚ Compuestos de Cloro y Flúor.

No obstante, a pesar de las ventajas ambientales que tiene la incorporación de un residuo como adiciones durante la molienda, no es posible incorporar una cantidad ilimitada ya que el porcentaje de adiciones influye en las características del cemento. Por tanto, es preciso ajustar la cantidad introducida en función del uso final que se le quiera dar al cemento.

2- La valorización energética de residuos: Ciertos residuos también pueden ser utilizados como combustibles en el horno clinker y estos se denominan combustibles alternativos. Se trata de una co-incineración del residuo en la que se recupera el calor de combustión. Se aprovecha, por tanto, la energía calorífica contenida en los residuos.

La cuestión que se plantea ante la utilización de determinados residuos como sustitutos de los combustibles tradicionales y de las materias primas, es como se verá afectado el entorno, las condiciones medioambientales en las inmediaciones de las fábricas y la utilización de residuos como materias primas de sustitución o como combustibles alternativos, no debe producir efectos apreciables sobre el proceso ni sobre el medio ambiente, pero lo cual se deben respetar unas adecuadas especificaciones.


Así las materias primas no deben estar contaminadas con sustancias indeseables como materia orgánica y los combustibles han de tener limitado el contenido en determinados elementos como cloro, metales pesados para garantizar la estabilidad del proceso y limitar los posibles efectos ambientales.


Hay que tener en cuenta que en el proceso cementero no se producen residuos líquidos ni sólidos, pues incluso los sistemas de alimentación por vía húmeda evaporan toda el agua que se introduce con el crudo.

Las emisiones a la atmósfera más importantes en la fábrica de cemento provienen del horno de clínker, y se originan en las reacciones químicas y físicas provocadas por la cocción de las materias primas y por los procesos de combustión, por lo que lo más adecuado es realizar también un control riguroso de todos los materiales que se introducen en el proceso, garantizando de esta forma que no se perjudicará al propio proceso, ni a la calidad del producto final, ni al medio ambiente.

En cualquier caso, las condiciones termoquímicas de los hornos de clínker, presentadas en el capítulo 1 permiten garantizar una destrucción completa de los compuestos orgánicos presentes dentro del horno y el ambiente alcalino, la neutralización de los gases ácidos que se hayan podido formar.

En cualquier caso, la producción y gestión residuos en las fábricas de cemento bien para su reciclaje o valorización energética tiene que seguir una serie de responsabilidades y obligaciones definidas en la Ley 22/2011 del 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. En esta ley se define tres tipos de roles en la gestión de residuos. Estos son:

-  **Productor:** Cualquier persona física o jurídica cuya actividad produzca residuos (productor inicial de residuos) o que efectúe operaciones de tratamiento previo de mezcla, o de otro tipo que ocasionen un cambio de naturaleza o de composición de estos residuos.

-  **Poseedor:** El productor de residuos u otra persona física o jurídica que esté en posesión de residuos.

- ✚ **Gestor:** La persona o entidad, pública o privada, registrada mediante autorización o comunicación que realice cualquiera de las operaciones que componen la gestión de los residuos, sea o no el productor de los mismos.

La industria cementera participa en la gestión de residuos como productor (y por tanto poseedor) y como gestor. Cada uno de estos papeles supone una serie de responsabilidades y obligaciones que se describirán con detalle a continuación.

2.5.1. RESPONSABILIDADES Y OBLIGACIONES DEL PRODUCTOR U OTRO POSEEDOR INICIAL

Existen una serie de obligaciones del productor u otro poseedor inicial de residuos, entre la que se pueden destacar las siguientes:

1. El productor u otro poseedor inicial de residuos, para asegurar el tratamiento adecuado de sus residuos, estará obligado a optar por una de estas opciones:
 - a) Realizar el tratamiento de los residuos por sí mismo.
 - b) Encargar el tratamiento de sus residuos a un negociante, o a una entidad o empresa, todos ellos registrados conforme a lo establecido en la Ley 22/2011 del 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.
 - c) Entregar los residuos a una entidad pública o privada de recogida de residuos, incluidas las entidades de economía social, para su tratamiento.

Dichas operaciones deberán acreditarse documentalmente.

2. La entrega de los residuos domésticos para su tratamiento se realizará en los términos que establezcan las ordenanzas locales.
3. El productor u otro poseedor inicial de residuos comerciales no peligrosos deberá acreditar documentalmente la correcta gestión de sus residuos ante la entidad local o podrá acogerse al sistema público de gestión de los mismos, cuando exista, en los términos que establezcan las ordenanzas de las Entidades Locales.

En caso de incumplimiento de las obligaciones de gestión de residuos comerciales no peligrosos por su productor u otro poseedor, la entidad local asumirá subsidiariamente la gestión y podrá repercutir al obligado a realizarla, el coste real de la misma. Todo ello sin perjuicio de las responsabilidades en que el obligado hubiera podido incurrir.

4. El productor u otro poseedor inicial de residuos, para facilitar la gestión de sus residuos, estará obligado a:

a) Suministrar a las empresas autorizadas para llevar a cabo la gestión de residuos la información necesaria para su adecuado tratamiento y eliminación.

b) Proporcionar a las Entidades Locales información sobre los residuos que les entreguen cuando presenten características especiales, que puedan producir trastornos en el transporte, recogida, valorización o eliminación.

c) Informar inmediatamente a la administración ambiental competente en caso de desaparición, pérdida o escape de residuos peligrosos o de aquellos que por su naturaleza o cantidad puedan dañar el medio ambiente.

5. Las normas de cada flujo de residuos podrán establecer la obligación del productor u otro poseedor de residuos de separarlos por tipos de materiales, en los términos y condiciones que reglamentariamente se determinen, y siempre que esta obligación sea técnica, económica y medioambientalmente factible y adecuada, para cumplir los criterios de calidad necesarios para los sectores de reciclado correspondientes.

6. Además de las obligaciones previstas en este artículo, el productor u otro poseedor de residuos peligrosos cumplirá los requisitos recogidos en el procedimiento reglamentariamente establecido relativo a los residuos peligrosos. Los productores de residuos peligrosos estarán obligados a elaborar y remitir a la Comunidad Autónoma un estudio de minimización comprometiéndose a reducir la producción de sus residuos. Quedan exentos de esta obligación los pequeños productores de residuos peligrosos cuya producción no supere la cantidad reglamentariamente establecida.

7. El productor de residuos peligrosos podrá ser obligado a suscribir una garantía financiera que cubra las responsabilidades a que puedan dar lugar sus actividades atendiendo a sus características, peligrosidad y potencial de riesgo.

Quedan exentos de esta obligación los pequeños productores de residuos peligrosos definidos reglamentariamente.

8. La responsabilidad de los productores u otros poseedores iniciales de residuos domésticos y comerciales, concluye, cuando los hayan entregado en los términos previstos en las ordenanzas locales y en el resto de la normativa aplicable. La responsabilidad de los demás productores u otros poseedores iniciales de residuos, cuando no realicen el tratamiento por sí mismos, concluye cuando los entreguen a un negociante para su tratamiento, o a una empresa o entidad de tratamiento autorizado siempre que la entrega se acredite documentalmente y se realice cumpliendo los requisitos legalmente establecidos.

2.5.2. RESPONSABILIDADES Y OBLIGACIONES DE LOS GESTORES DE RESIDUOS.

El papel de gestor de residuos en plantas de fabricación de cemento se centra fundamentalmente en la utilización de éstos como combustible alternativo en los hornos de clínker, pues, desde el punto de vista económico, su empleo es una opción adecuada para reducir los costes de fabricación.

Los gestores tienen una serie de obligaciones legales que deben de cumplir, lo más importantes son:

1. Las entidades o empresas que realicen una actividad de tratamiento de residuos deberán:

a) Llevar a cabo el tratamiento de los residuos entregados conforme a lo previsto en su autorización y acreditarlo documentalmente.

b) Gestionar adecuadamente los residuos que produzcan como consecuencia de su actividad.

2. Las entidades o empresas que recogen o transportan residuos con carácter profesional deberán:

a) Recoger los residuos y transportarlos cumpliendo las prescripciones de las normas de transportes, las restantes normas aplicables y las previsiones contractuales.

b) Mantener durante su recogida y transporte, los residuos peligrosos envasados y etiquetados con arreglo a las normas internacionales y comunitarias vigentes.

c) Entregar los residuos para su tratamiento a entidades o empresas autorizadas, y disponer de una acreditación documental de esta entrega.

3. Los negociantes y agentes deberán cumplir con lo declarado en su comunicación de actividades y con las cláusulas y condiciones asumidas contractualmente. Los negociantes estarán obligados a asegurar que se lleve a cabo una operación completa de tratamiento de los residuos que adquieran y a acreditarlo documentalmente al productor u a otro poseedor inicial de dichos residuos.

4. Con carácter general los gestores de residuos están obligados a:

a) Mantener los residuos almacenados en las condiciones que fije su autorización.

La duración del almacenamiento de los residuos no peligrosos será inferior a dos años cuando se destinen a valorización y a un año cuando se destinen a eliminación. En el caso de los residuos peligrosos, en ambos supuestos, la duración máxima será de seis meses; en supuestos excepcionales, el órgano competente de las Comunidades Autónomas donde se lleve a cabo dicho almacenamiento, por causas debidamente justificadas y siempre que se garantice la protección de la salud humana y el medio ambiente, podrá modificar este plazo.

b) Constituir una fianza en el caso de residuos peligrosos y cuando así lo exijan las normas que regulan la gestión de residuos específicos o las que regulan operaciones de gestión.

c) Suscribir un seguro o constituir una garantía financiera equivalente en el caso de entidades o empresas que realicen operaciones de tratamiento de residuos peligrosos y cuando así lo exijan las normas que regulan la gestión de residuos específicos o las que regulan operaciones de gestión, para cubrir las responsabilidades que deriven de estas operaciones. Dicha garantía deberá cubrir, en todo caso:

- 1. °** Las indemnizaciones debidas por muerte, lesiones o enfermedad de las personas.
- 2. °** Las indemnizaciones debidas por daños en las cosas.
- 3. °** Los costes de reparación y recuperación del medio ambiente alterado. Esta cuantía se determinará con arreglo a las previsiones de la legislación sobre responsabilidad medioambiental.

d) No mezclar residuos peligrosos con otras categorías de residuos peligrosos ni con otros residuos, sustancias o materiales. La mezcla incluye la dilución de sustancias peligrosas.

El órgano competente podrá permitir mezclas sólo cuando:

- 1. °** la operación de mezclado sea efectuada por una empresa autorizada;
- 2. °** no aumenten los impactos adversos de la gestión de residuos sobre la salud humana y el medio ambiente;
- 3. °** la operación se haga conforme a las mejores técnicas disponibles.

CAPITULO III

VALORIZACION ENERGETICA DE RESIDUOS EN LA INDUSTRIA CEMENTERA

3.1. INTRODUCCIÓN

La Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados describe la valorización como cualquier operación cuyo resultado principal sea que el residuo sirva a una finalidad útil al sustituir a otros materiales, que de otro modo se habrían utilizado para cumplir una función particular, o que el residuo sea preparado para cumplir esa función en la instalación o en la economía en general.

En este capítulo, se pretende dar una visión completa sobre la valorización energética, sus ventajas y limitaciones, se analizarán las características diferenciadoras de las fábricas de cemento frente a otras instalaciones en la valorización de residuos y la situación actual de la valorización en Europa y España.

3.2. VALORIZACIÓN ENERGÉTICA EN LA INDUSTRIA DEL CEMENTO

La valorización energética de residuos en cementeras consiste en el aprovechamiento de los residuos como fuente de energía para el proceso productivo sin poner en peligro la salud humana y sin utilizar métodos que puedan causar perjuicios al medio ambiente.

La valorización energética es una de las líneas de trabajo para la sostenibilidad del sector cementero español. En el sector cementero, el proceso de sinterización del clinker a altas temperaturas requiere una gran cantidad de combustibles y aporta la posibilidad de valorizar ciertos residuos orgánicos utilizándolos como sustitutos de los combustibles fósiles tradicionales (coque de petróleo, carbón o fuel oil). Es decir, parte de la energía consumida para estos procesos industriales puede obtenerse a partir de combustibles derivados de residuos.

De esta manera se utiliza la energía calorífica contenida en el residuo y que de otra forma se desaprovecharía, a la vez que se evita el consumo de recursos no renovables y los impactos en el medio natural que conlleva su explotación.

La valorización energética de residuos en el horno de cemento es una operación que se inició hace varias décadas y que se viene desarrollando con éxito en la mayoría de los países de la Unión Europea.

En las fábricas de cemento es posible valorizar varios tipos de residuos (harinas, grasas animales, neumáticos, aceites y disolventes, lodos depuradoras entre otros) con unas condiciones técnicas y ambientales óptimas.

Valorizar los residuos en la industria cementera se consigue:

1. Reducir las emisiones globales de gases de efecto invernadero. El sector cementero español utilizó en el año 2008 unas 309.000 toneladas de combustibles recuperados que, en términos energéticos, supusieron el 6,9% del consumo térmico de los hornos de clinker. El ahorro energético alcanzado fue de unas 172.000 toneladas equivalentes de petróleo (tep), que representa el consumo energético anual de 240.000 hogares. A esto habría que añadir:
 - ✚ Las emisiones evitadas que se hubieran producido al tratar los residuos fuera de las cementeras (incineración) o al fermentar en vertederos.
 - ✚ Las emisiones que se hubieran generado por el transporte marítimo de los combustibles fósiles.
2. Ahorrar materias primas necesarias para la fabricación de clinker.
3. Disminuir el consumo de combustibles fósiles.
4. Mejorar la competitividad de la industria cementera, reducir los costes de fabricación al existir un ahorro en la obtención de materias primas y de combustibles.

5. Garantizar un tratamiento adecuado de los residuos, ya que la combustión se realiza en condiciones de alta temperatura y altos tiempos de residencia, lo que asegura la destrucción efectiva de los compuestos orgánicos existentes en el residuo, incluidos los más complejos.
6. Evitar la generación de residuos al final del proceso de valorización que requiera un tratamiento posterior, ni siquiera escorias y ceniza, ya que éstas se incorporan al clinker de forma permanente e irreversible, manteniendo las garantías ambientales del producto.
7. Evitar el depósito de residuos en vertedero y sus consecuencias adversas asociadas.
8. Facilitar a la sociedad una herramienta complementaria para la gestión de sus residuos, y reducir las inversiones necesarias al aprovechar instalaciones ya existentes (plantas cementeras).

La valorización energética de residuos o subproductos en las fábricas cementeras se realiza bajo unas condiciones y con unas características que las sitúan como la opción más idónea frente a otras instalaciones como incineradoras, centrales térmicas o de biomasa, etc.

El funcionamiento de un horno de cemento difiere por completo del de una planta incineradora. Así tal como se puede observar en la tabla 7, mientras que en una incineradora el 100% del material de entrada son residuos, generándose escorias y ceniza volantes durante su combustión; en el horno de clinker la mayor parte del material presente es cal con un gran poder de limpieza y filtración.

Una planta cementera no genera escorias ni ceniza, siendo el único producto obtenido el clinker.

Tabla 7. Diferencias de funcionamiento Horno de Cemento vs Planta Incineradora. (Fuente: Fundación Cema).

| INSTALACIÓN | ENTRADAS | SALIDAS |
|---------------------|--|----------------------------------|
| HORNO DE CEMENTO | 92% materias primas 6,4% combustible fósil 1,6% residuos | 100% clinker |
| PLANTA INCINERADORA | 100% residuos | Cenizas volantes 30% escorias |

Tabla 8. Condiciones típicas en un horno de cemento y en una planta incineradora. (Fuente: Fundación Cema).

| PARÁMETRO | HORNO DE CEMENTO | INCINERADOR |
|------------------------------------|--------------------|----------------|
| Temperatura máxima del gas | > 2.200 °C | ≤ 1.480 °C |
| Temperatura máxima del sólido | 1.420 - 1.480 °C | ≤ 750 °C |
| Tiempo residencia gas a > 1.100 °C | 6 - 10 segundos | 0 - 3 segundos |
| Tipo de flujo | En contracorriente | En paralelo |

Por otra parte también hay otras diferentes en el funcionamiento de un horno de cemento y un incinerador. Estas se ven reflejadas en la tabla 8 y son:

- ✚ **Altas temperaturas:** 2.000 °C en el quemador principal y 1.100 °C en el quemador secundario (precalcinador), estas temperaturas son mucho mayor que las obtenidas en una incineradora asegurando una mejor combustión.
- ✚ **Largo tiempo de residencia:** Los gases permanecen a muy alta temperatura, entre 6 y 10 segundos, el tiempo es mayor que el de una incineradora por lo que se una produce mejor combustión.

- ✚ **Atmósfera oxidante:** La combustión se realiza siempre con exceso de aire, asegurando una combustión completa.

Estas condiciones de combustión dan una gran capacidad de destrucción de estos compuestos (los coeficientes de destrucción llegan al 99,99%) lo que anula la peligrosidad del residuo.

No obstante, durante la combustión de los residuos se producen gases que son arrastrados por la corriente hacia los intercambiadores de calor en los que se produce un contacto directo con la materia prima (crudo).

El tipo de gas que se desprende durante la combustión del residuo dependerá de la composición del mismo. En el caso de que el residuo contenga cloro o azufre, la combustión generará gases ácidos, como el cloruro de hidrógeno y el óxido de azufre, pero estos gases son neutralizados y absorbidos por la materia prima de naturaleza alcalina (cal + Na + K) utilizada en la fabricación del clinker y las sales inorgánicas formadas se incorporan al mismo.

Así pues el propio proceso de formación del clinker actúa como un mecanismo de depuración de gases debido a que:

- ✚ Las características alcalinas de la materia prima permiten la captación de los compuestos halógenados (cloro y flúor) y sulfurosos, formando sales y sulfatos alcalinos inocuos que se incorporan al clinker.
- ✚ Los metales pesados que pudieran estar presentes en el residuo y que no se han volatilizado en la llama, condensan en las partes frías del sistema del horno, incorporándose al clinker.
- ✚ La ceniza se funden con el resto de materias primas y pasan a formar parte del propio clinker, contribuyendo a la formación del mismo, parte como constituyentes de los compuestos activos del clinker y parte atrapadas en la estructura mineralógica del mismo.

Estas características específicas de los hornos clinker evitan que se produzcan ciertos impactos que preocupan en otras instalaciones, como son las emisiones de compuestos orgánicos o metales pesados, o la generación de ceniza, escorias o aguas residuales.

Además esto no afecta a las características del cemento y las cualidades del cemento no se ven alteradas por la utilización de residuos orgánicos como combustibles alternativos en el horno de clinker.

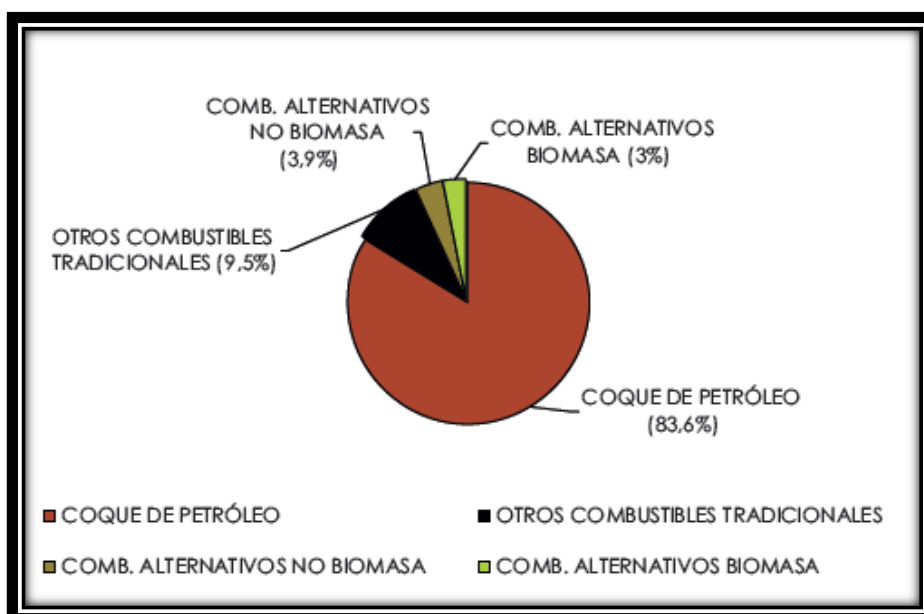
3.3. SITUACIÓN ACTUAL DE LA VALORIZACIÓN ENERGÉTICA EN PLANTAS CEMENTERAS EN EUROPA Y EN ESPAÑA

Según el estudio «Reciclado y Valorización de Residuos en la Industria Cementera en España» para la Fundación Laboral del Cemento y el Medio Ambiente (FUNDACIÓN CEMA), de las 38 fábricas integrales de cemento existentes en nuestro país, 28 están autorizadas a valorizar residuos energéticamente.

En España, la sustitución de combustibles fósiles por residuos en planta cementeras, aunque va aumentando cada año, resulta todavía escasa en comparación con otros países de nuestro entorno donde los sistemas de gestión de los residuos llevan décadas orientadas a prevenir el vertido y aprovechar la capacidad de tratamiento de las fábricas de cemento.

En la Figura 9 se puede observar el porcentaje (%) de aporte calorífico de los distintos tipos de combustibles utilizados en las cementeras de España. Tal como se observa el 83.6 % es coque de petróleo, el 9.5 % son otros combustibles tradicionales, el 3.9 % son combustibles alternativos no biomasa y solamente el 3% procede de combustible de biomasa.

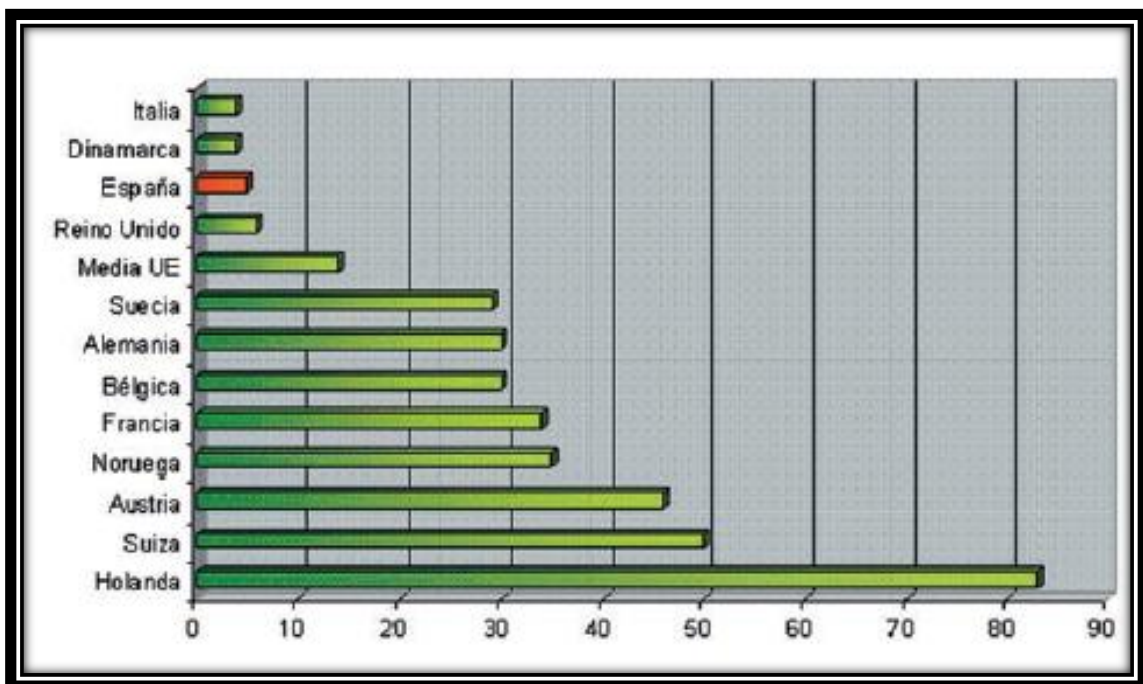
Figura 9. Aporte calorífico por tipos de combustibles en 2008 (kilotermias). (Fuente: Oficemen).



La media de sustitución de combustibles en la U.E. se sitúa en un 30%, mientras que en España se sitúa en el 6,9% muy lejos de otros países europeos (Fig. 10) se observa los países de Europa que han potenciado esta manera de recuperación de energía, son precisamente aquellos países con los mayores estándares de protección ambiental y con las sociedades más concienciadas en materia medioambiental como Holanda, Suiza y Austria.

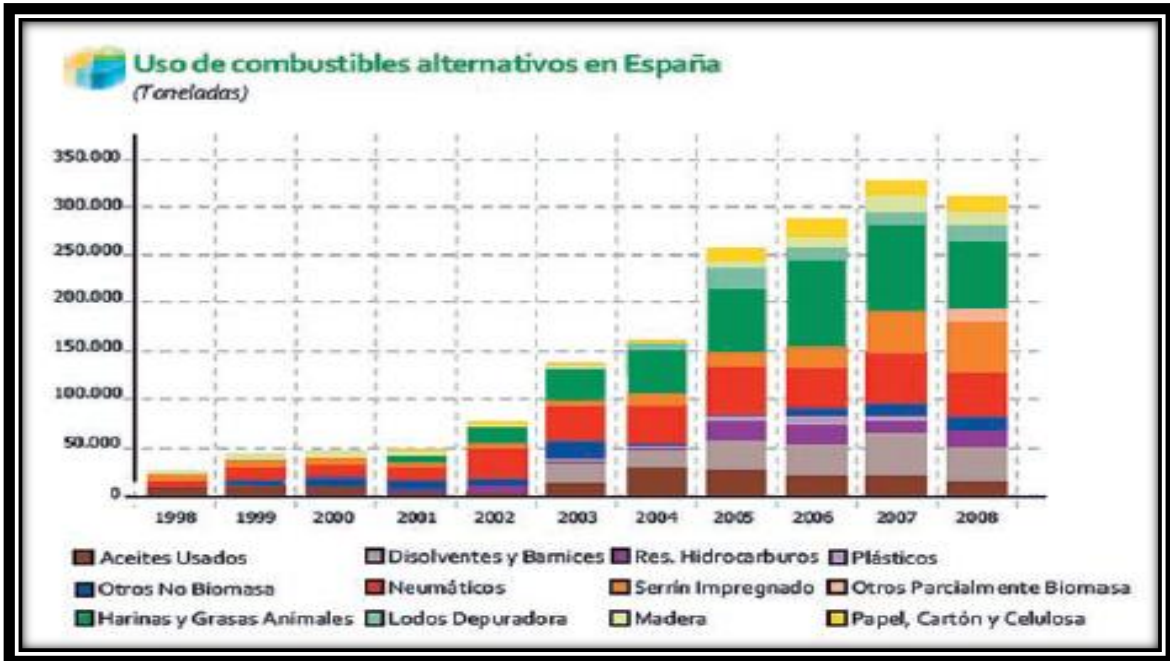
Figura 10. Consumo porcentual de combustibles alternativos en la industria cementera de varios países europeos. (Fuente: Fundación Cema).

Nota: Reino Unido tiene una política nacional de envío de residuos hacia plantas incineradoras y Dinamarca desvía parte de sus residuos a hornos de clinker en Alemania.



Respecto a la evolución del uso de residuos como combustibles alternativos en España durante los últimos diez años aparece reflejada en la Figura 11 en la que se puede observar un continuo aumento desde 1998 hasta 2007, siendo evidente el importante aumento observado en el periodo 2002-2005.

Figura 11. Evolución del uso de combustibles alternativos en España. (Fuente Anuario 2008 de (OFICEMEN)).



A pesar del elevado crecimiento experimentado en los últimos años, los volúmenes absolutos utilizados aún son pequeños en comparación con otros países europeos. Sin embargo, en los últimos años la valorización de residuos en hornos de cemento se ha visto impulsada en España por los siguientes motivos:

1. La colaboración estrecha con los trabajadores del sector, materializada en el «Acuerdo para la Valorización Energética en la Industria Española del Cemento». Este Acuerdo, firmado en el año 2004 entre la patronal cementera, OFICEMEN y los dos sindicatos mayoritarios del sector (MCA-UGT y FECOMA-CCOO), tiene como objetivo avanzar de manera conjunta en el desarrollo sostenible en el sector cementero español.
2. La finalización en el año 2008 del proceso de concesión de las Autorizaciones Ambientales Integradas a todas las fábricas de cemento del país, con el apoyo general de las distintas administraciones a la valorización energética de diferentes tipos de residuos.

3. El apoyo recibido de los Ministerios de Medio Ambiente e Industria al reconocer el uso de residuos de biomasa y combustibles alternativos como la herramienta principal y necesaria de reducción de emisiones de efecto invernadero (CO₂) por parte del sector.

4. La existencia de una mayor información ciudadana en los municipios donde se lleva a cabo esta actividad, gracias a una política de transparencia y comunicación de las empresas y a las jornadas de difusión de la Fundación CEMA.

3.4. RESIDUOS Y SUBPRODUCTOS UTILIZADOS EN LA VALORIZACIÓN ENERGÉTICA


Los residuos susceptibles de ser valorizados energéticamente son aquellos que tienen en su composición materia orgánica (compuesta básicamente por carbono e hidrógeno) que, cuando se oxida con el oxígeno de la atmósfera, aporta el calor de combustión. Según el estudio citado anteriormente «Reciclado y Valorización de Residuos en la Industria Cementera en España», existen hoy en día 76 tipos de residuos de la Lista Europea de Residuos (LER) autorizados a ser valorizados energéticamente.

3.4.1. TIPOS DE RESIDUOS

Los residuos autorizados para utilizarse como combustibles alternativos se pueden agrupar en varias categorías, en función de que su composición sea totalmente biomasa, parcialmente biomasa o tenga un origen fósil (hay que tener en cuenta que la utilización de combustibles con biomasa se considera neutra en cuando a sus emisiones de CO₂).

De esta manera tenemos:

Residuos de biomasa:

-  Biomasa forestal y restos vegetales procesados por la industria alimentaria.

- ✚ Residuos de industrias cárnicas que incluyen harinas cárnicas y grasas animales.
- ✚ Lodos de depuradora de aguas residuales urbanas.
- ✚ Otros residuos de biomasa que incluyen residuos de envases y residuos de las industrias del cuero, de la piel y textil.

Residuos con contenido parcial de biomasa:

- ✚ Lodos de papelera que proceden del procesado de la pasta de papel y contienen celulosa y plástico.
- ✚ Combustible preparado a partir del rechazo de plantas de tratamiento de residuos municipales (CDR).
- ✚ Neumáticos fuera de uso.
- ✚ Residuos de fragmentación de vehículos fuera de uso.

Residuos de origen fósil:

- ✚ Residuos de hidrocarburos.
- ✚ Aceites minerales usados.
- ✚ Plásticos.
- ✚ Disolventes, pinturas, barnices y otros residuos líquidos.
- ✚ Otros.

Tal como se observa en la figura 11 actualmente, son los lodos de depuradora, las harinas cárnicas y los neumáticos fuera de uso los combustibles derivados de residuos más comúnmente empleados en las fábricas de cemento de nuestro país.

No obstante, y de cara al futuro, según un estudio llevado a cabo por el Instituto para la Sostenibilidad de los Recursos (ISR) que lleva por título «Sustitución de combustibles fósiles en el sector cementero.

Oportunidad para reducir el vertido de residuos», se estima que la potencial generación de combustibles derivados de residuos a partir de residuos urbanos (fundamentalmente de los rechazos de las plantas actuales de tratamiento que hoy se destinan a vertedero) es del orden de 1.213.000 toneladas anuales. Sin embargo la utilización de residuos como combustible no debe suponer un perjuicio en el comportamiento ambiental de la instalación, no debe dificultar la operación de fabricación ni tampoco debe afectar a la calidad del cemento.

Por ello, aunque existe una amplia variedad de residuos que pueden aprovecharse en los hornos del clinker, no todos son utilizables y antes de cada prueba o proyecto se debe realizar una cuidadosa selección. Las limitaciones en cuanto a los tipos de residuos derivan de garantizar los tres condicionantes mencionados anteriormente y dependen de cada instalación concreta.

Algunas limitaciones serían las siguientes:

- ✚ El contenido en cloro en el cemento está limitado al 0,1% en peso, por lo que debe limitarse su presencia en los combustibles. Además, el cloro puede formar sales que causan pegaduras y atascos en los ciclones.
- ✚ La posible fijación de ciertas sales en el clinker puede ser objeto también de limitación en el caso de residuos con contenido en fósforo.
- ✚ Se limita de manera estricta el contenido de los metales más volátiles (Hg, Tl) en la composición de los combustibles derivados de residuos.
- ✚ Aunque no hay limitaciones tecnológicas que lo justifiquen, las empresas cementeras no utilizan residuos orgánicos de origen sanitario u hospitalario.

- ✚ Tampoco pueden tratarse residuos radiactivos.

3.4.2. PLATAFORMAS DE ACONDICIONAMIENTO DE RESIDUOS COMO COMBUSTIBLES

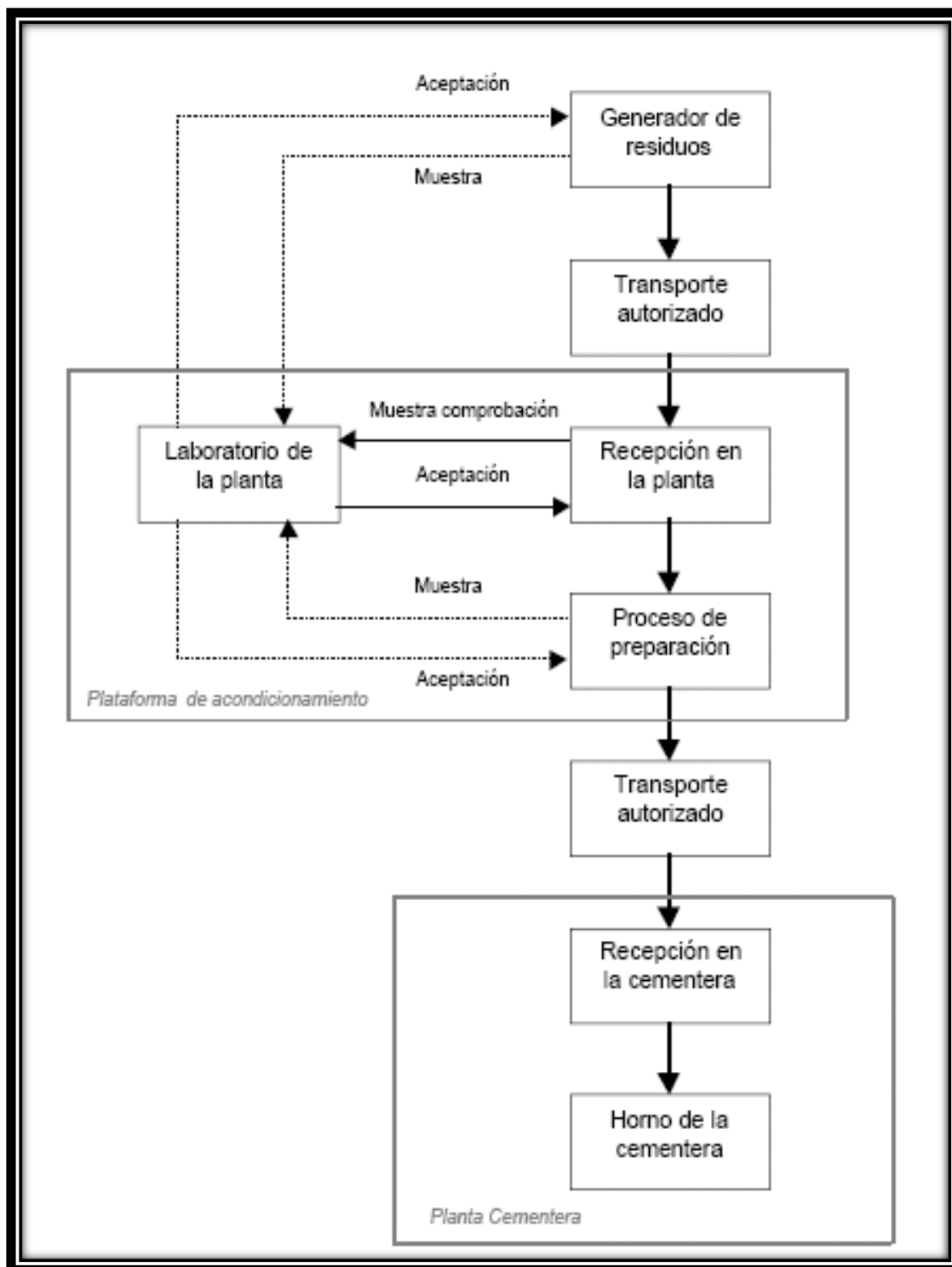
Como el objetivo principal de las plantas cementeras es el de fabricar cemento con la mayor calidad posible y al menor coste, y no el de ser gestor de residuos, parece recomendable que se dejen las tareas de captación, recogida, identificación, clasificación y preparación de los residuos con destino a los hornos de clínker a los expertos en gestión de residuos, con lo cual surge una figura intermedia que es la de las plantas de acondicionamiento de residuos que tienen por objetivos:

- ✚ Gestionar adecuadamente una serie de residuos.
- ✚ Recolectar, identificar y almacenar los residuos aptos para ser tratados en las cementeras.
- ✚ Elaborar una mezcla de residuos susceptible de utilizarse como combustible alternativo, con un poder calorífico suficiente para ser utilizado como sustituto de combustibles tradicionales, de características uniformes y constantes a lo largo del tiempo.
- ✚ Elaborar partidas personalizadas para cada horno, de acuerdo con sus características concretas, la depuración de gases disponible y la autorización con que cuente la cementera.

De esta forma se garantiza que los flujos de residuos acondicionados que llegan a la cementera sean más uniformes y con las especificaciones de aceptación adecuadas, con lo que se facilita y simplifica el manejo y la valorización del residuo en la planta.

Hay que hacer notar que los combustibles de sustitución preparados en este tipo de instalaciones no son combustibles normalizados genéricamente, sino que se trata de productos especialmente preparados para ser valorizados en una instalación de gestión de residuos debidamente autorizada, que en este caso es una cementera. Es decir, que estas plataformas funcionan como acondicionadores de residuos que van a ser valorizados en las instalaciones de la cementera. Un diagrama de flujo de cómo es el proceso descrito para este modelo de plataforma se puede ver en la figura 12.

Figura 12. Diagrama de flujo del funcionamiento de una plataforma de líquidos



Las plataformas de acondicionamiento de residuos son las responsables de las relaciones con los productores de residuos, de su admisión, control y acondicionamiento, siendo necesario realizar una serie de análisis y controles en varios niveles.

En el primer nivel se debe caracterizar el residuo antes de su recepción, con el objetivo de poder determinar si es un residuo admisible para los fines a que se destinan. En el segundo nivel, se realizan unos análisis de comprobación de que el residuo que llega a la plataforma de acondicionamiento de residuos como combustible de sustitución es el mismo que previamente se había aceptado.

El tercer nivel es el que se utiliza para comprobar que la mezcla preparada para una determinada instalación se corresponde con la especificación del combustible de sustitución de dicha cementera. El plan de análisis de los residuos, en esos tres niveles, es el indicado en la tabla 9.

No obstante, el uso de una plataforma de residuos no evita que la cementera tenga que solicitar todas las autorizaciones de gestor de residuos y realizar los controles de aceptación y emisiones inherentes a la coincineración de residuos.

Cuando una planta de fabricación de cemento pone en marcha un programa de sustitución de combustibles tradicionales por combustibles alternativos procedentes de residuos, por un lado pretende maximizar el uso de residuos combustibles y al mismo tiempo minimizar cualquier impacto sobre el proceso y el medio ambiente.

Sin embargo esto no significa que se puedan quemar tranquilamente residuos combustibles en el horno en cualquier proporción, y es necesario realizar un detallado balance de materiales y un examen minucioso de la instalación para poder determinar el porcentaje de suministro y las especificaciones del combustible.

Estos estudios los pueden realizar los técnicos de la planta ayudados por los de las plataformas de acondicionamiento de residuos como combustibles, de forma que se establezca la especificación de combustible de sustitución a suministrar a la planta y por lo tanto poder proceder a su preparación.

Algunos factores que limitan la cantidad y tipo de residuos combustibles pueden ser:

- ✚ El sistema de alimentación del crudo (húmedo, semi-seco, seco, con precalentador y precalcinador, etc.).
- ✚ Composición del crudo.
- ✚ Porcentaje de polvo del horno que se recicla.
- ✚ Sistema de depuración de gases.
- ✚ Tipos de productos finales fabricados.

Tabla 9. Plan de análisis de residuos en las plantas de preparación de combustibles de sustitución.

| Parámetro | Nivel I | Nivel II | Nivel III |
|---------------------------------------|---------------------|------------------------------------|-----------------------|
| | Solicitud generador | Recepción residuo | Combustible preparado |
| Poder calorífico | X | X | X |
| Cenizas | X | X | X |
| Azufre | X | | X |
| Flúor | X | X | X |
| Cloro | X | X | X |
| Bromo | X | X | X |
| Punto de congelación | X | | X |
| pH | X | | X |
| Viscosidad | X | | X |
| Metales: | | | |
| Plomo | X | (Depende del análisis del nivel I) | X |
| Cinc | X | | X |
| Hierro | X | | X |
| Titanio | X | | X |
| Otros metales volátiles | X | | X |
| PCB's | X | X | X |
| Orgánicos volátiles y semivolátiles * | X | | X |
| Huella dactilar** | | X | |
| Radiactividad | X | X | X |

De todas formas, el responsable último del combustible de sustitución que se utiliza en una cementera autorizada es el propio cementero, por lo que éste puede preparar su propio plan de control del combustible que le envía la plataforma de acondicionamiento. Pero, dado que éste le llega certificado para su instalación, suele limitarse a realizar análisis de determinadas partidas o solamente de determinados parámetros, con lo que abarata el coste de esta partida.

3.5. LA GESTIÓN DE RESIDUOS PARA SU VALORIZACIÓN EN LA PLANTA CEMENTERA

La manipulación y procesado de los residuos que se van a utilizar como combustibles alternativos en la industria cementera se puede dividir en cuatro fases (ver Fig.13).

Figura 13. Fases en la utilización de combustibles alternativos. (Fuente: Fundación Cema).



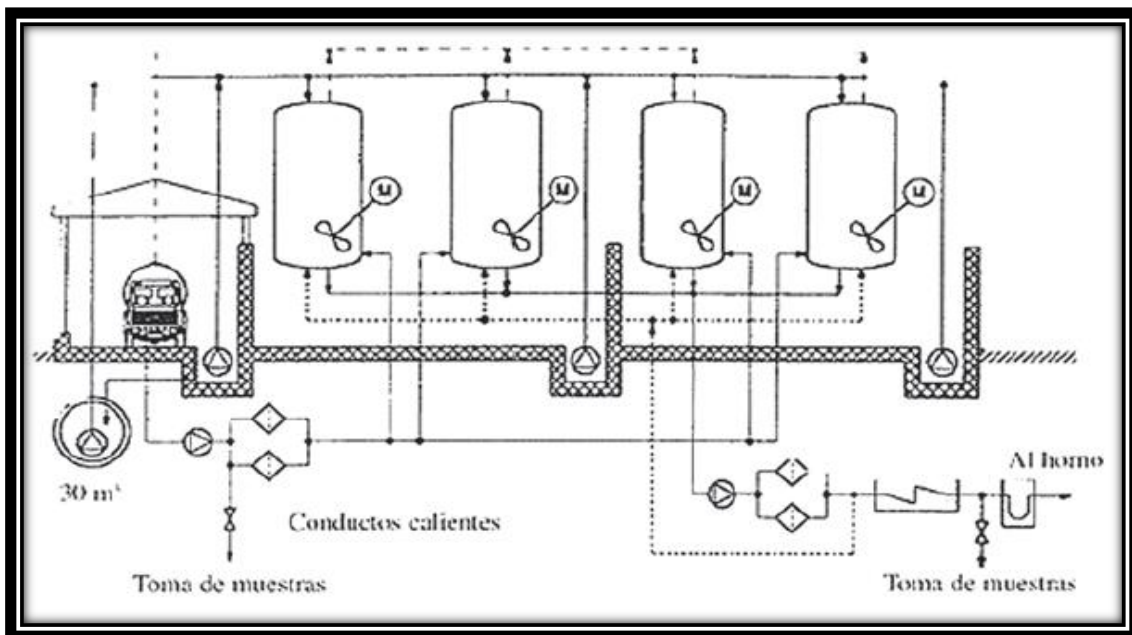
En primer lugar los residuos deben acondicionarse para su utilización. Tal como se describe en el apartado 3.4.2, esto suele realizarse en plantas específicas que, en algunos casos, están situadas en el entorno inmediato de la fábrica. Aunque algunas veces esto puede verificarse en la propia planta o algunas veces puede utilizarse directamente.

La preparación será distinta dependiendo en qué estado (sólido, líquido o gaseoso) se encuentre el residuo. Aunque existen ejemplos de utilización de gases residuales como combustible, la práctica totalidad de los combustibles alternativos empleados son sólidos o líquidos.

1. Combustibles sólidos: Los combustibles sólidos, como neumáticos, madera, plásticos, etc., se someten a tratamientos que incluyen la adecuación del tamaño mediante trituración o corte para adaptar el residuo a las instalaciones de almacenamiento, manipulación y combustión de la fábrica de cemento.

2. Combustibles líquidos: Los combustibles líquidos, como lubricantes y disolventes, pueden, en su mayoría, alimentar al horno en su composición original, aunque normalmente se les somete a procesos de mezcla y homogeneización en plantas específicamente diseñadas (plantas de blending) con el fin de optimizar la combustión en el horno, tanto desde un punto de vista de operación del mismo como de su comportamiento ambiental. En la figura 14 se puede ver el esquema de una de estas plantas.

Figura 14. Planta de preparación de combustibles líquidos Blending. (fuente Fundación Cema).



Las plantas de Blending son normalmente operadas por empresas especializadas en gestión de residuos que envían a la fábrica de cemento el residuo líquido preparado con las especificaciones concretas correspondientes a cada horno.

En segundo lugar, estaría la recepción de los combustibles alternativos, cada cargamento que entra en la fábrica se somete a un control e inspección que incluye desde el pesaje y observación visual, hasta la analítica completa para determinados residuos peligrosos. Se toman las precauciones necesarias para asegurar que el residuo es uno de los autorizados y que no ha sido contaminado con residuos no autorizados. Para ello, se realizan las comprobaciones oportunas.

La tercera parte, es el almacenamiento de los combustibles. El residuo se descarga en la fábrica para su almacenamiento temporal, con una capacidad suficiente para asegurar varios días de utilización, regulando así el flujo de residuos al horno. El tipo de almacenamiento, los sistemas de carga y descarga se diseñan de forma que garanticen la seguridad.

Así, los residuos líquidos se almacenan en depósitos estando dotados de protección contra posibles pérdidas o derrames. Adicionalmente, y dependiendo de la naturaleza del residuo, se pueden requerir otras medidas de seguridad exigidas por la normativa vigente (por ejemplo, seguridad contra incendios en instalaciones industriales).

Los residuos sólidos se almacenan en acopios, naves o tolvas con sistema de protección contra el viento y otro de protección del suelo y de las aguas.

La cuarta etapa consiste en la alimentación en el horno. Desde la zona de almacenamiento los residuos se transportan hasta el punto de entrada al horno (quemador principal o zona de calcinación). Las cámaras de combustión se diseñan específicamente para que la combustión se realice en las condiciones de temperatura, turbulencia y exceso de oxígeno más favorables.

Los residuos líquidos pueden alimentarse en varios puntos de entrada y se inyectan mediante bombas hidráulicas en tuberías a presión. Si el residuo es muy estable, se recomienda su alimentación al quemador principal. Los residuos sólidos suelen alimentarse por medios mecánicos o neumáticos. Dependiendo de su granulometría entran al horno de diferentes maneras:

1. Cuando se trata de materiales gruesos, como neumáticos, balas de plástico, etc., la entrada al horno se realiza por gravedad a través de un sistema de compuertas o clapetas que reduce la entrada de aire falso.
2. En el caso de residuos sólidos de pequeña granulometría, como el caucho triturado, plástico troceado, etc., la alimentación puede realizarse a través de tuberías en las que el residuo es arrastrado por aire.

3.6. MARCO LEGAL ASOCIADOS AL PROCESO DE VALORIZACIÓN DE RESIDUOS

La utilización de residuos como combustible alternativo se debe siempre realizar de acuerdo a las siguientes premisas:

- ✚ Respeto escrupuloso a la legislación medioambiental vigente.
- ✚ Teniendo la seguridad de los trabajadores y de las personas en el entorno de la fábrica.
- ✚ Manteniendo la calidad exigida al cemento y permitiendo trabajo en condición de operación de la instalación.

Por ellos, las operaciones de valorización de residuos se realizan bajo un riguroso control, cumpliendo siempre la legislación vigente.

En este sentido, conviene recordar que en muchos aspectos la legislación de la Unión Europea es la más restrictiva del mundo, y que una fábrica de cemento es una instalación sometida a exhaustivos controles ambientales por parte de las distintas autoridades ambientales competentes.

La legislación comunitaria concreta que puede afectar a la valorización de residuos en instalaciones de producción de cemento, se puede agrupar en dos tipos de normativas:

La legislación de residuos:

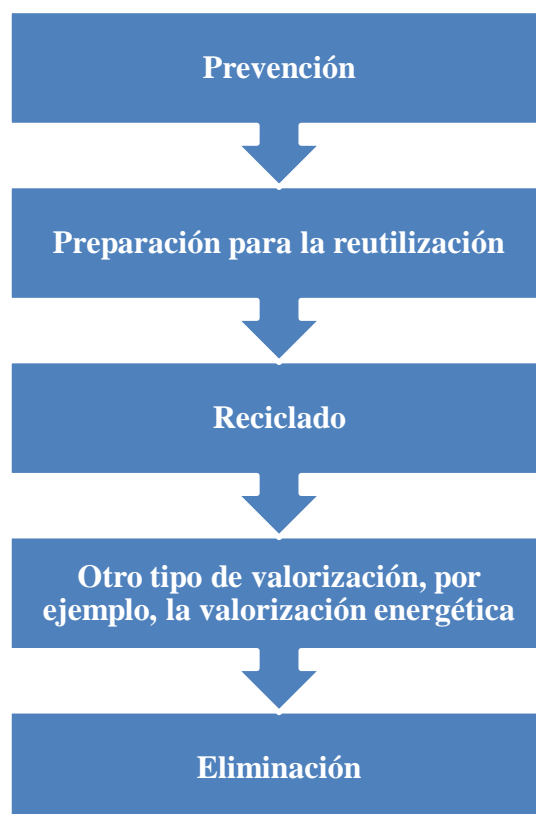
- ✚ Directiva 2008/98/CE sobre residuos.
- ✚ La diferente legislación relativa a la regulación de actividades industriales:
- ✚ Directiva 1996/61/CE sobre prevención y control integrados de la contaminación.
- ✚ Directiva 2000/76/CE sobre incineración de residuos.

De todas estas, la más importante es la directiva sobre incineración de residuos, que determinaría si es factible o no la valorización de residuos, por ello esta directiva se analizará con más detalle.

Directiva 2000/76/CE sobre incineración de residuos.

La legislación sobre residuos señala la jerarquía que se debe seguir en la gestión de los residuos, donde la valorización energética se sitúa por detrás de la reutilización y el reciclado, y siempre por delante de la opción de la eliminación de residuos en vertedero (ver Fig. 15).

Figura 15. Jerarquía de gestión de los residuos. (fuente: Artículo 4 Directiva 2008/98/CE de residuos).



Por otra parte, y según lo establecido en el Real Decreto 653/2003 sobre incineración de residuos, que traspone la Directiva 2000/76, la actividad de valorización energética de residuos en los hornos de cemento es una operación de co-incineración. El Real Decreto que desarrolla la directiva define una instalación de co-incineración como:

- ✚ Toda instalación fija o móvil cuya finalidad principal sea la generación de energía o la fabricación de productos materiales y que o bien utilice residuos como combustible habitual o complementario, o bien los residuos reciban tratamiento para su eliminación.

El horno de clinker es una instalación de co-incineración, ya que tiene como finalidad la fabricación de productos materiales (clinker) y utiliza residuos como combustible en sustitución de los convencionales.

En este Real Decreto se establecen:

- ✚ Las condiciones de entrega y recepción de los residuos.
- ✚ Las condiciones de diseño, equipamiento y explotación de la instalación.
- ✚ Las operaciones de control y seguimiento que debe realizar las instalaciones sobre las emisiones atmosféricas que generan, así como su registro, tratamiento y presentación de acuerdo con los procedimientos que establezcan al efecto las autoridades competentes.
- ✚ Los valores límite de emisión de contaminantes a la atmósfera para las instalaciones en las que se co-incineren residuos.

El Real Decreto 653/2003 establece que las instalaciones, previamente a la realización de actividades de incineración o co-incineración de residuos, deben contar con el permiso de la autoridad ambiental que, en el caso de las instalaciones cementeras, estará incluido en la autorización ambiental integrada (Ley 16/2002 de prevención y control integrados de la contaminación).

La Autorización ambiental concedida para la actividad de co-incineración incluye:

- ✚ Los tipos de residuos que pueden tratarse y la cantidad autorizada.
- ✚ La capacidad total de tratamiento de residuos en la instalación.
- ✚ Los procedimientos de muestreo y medición para mediciones periódicas de contaminantes a la atmósfera y las aguas.
- ✚ Los flujos mínimos y máximos de masa de los residuos, sus valores caloríficos mínimos y máximos y su contenido máximo de sustancias contaminantes (PCB, PCP, cloro, flúor, azufre y metales pesados) cuando se trata de residuos peligrosos.

La autorización ambiental también especifica las condiciones para la destrucción térmica de los residuos orgánicos, principalmente:

- ✚ Temperatura y tiempo de residencia.
- ✚ Condiciones de alimentación al horno.

Cuando las condiciones de temperatura y tiempo de residencia exigida por la normativa no se cumplan, los residuos no podrán alimentar al horno, por lo que los hornos de clinker deberán contar con sistemas automáticos que impidan la alimentación de los residuos en los siguientes casos:

- ✚ En la puesta en marcha del horno hasta alcanzar las condiciones de tiempo y residencia descritas.
- ✚ Cuando no se mantengan las temperaturas y tiempos citados por inestabilidad del proceso.

3.7. ESTUDIOS CIENTÍFICOS SOBRE SEGURIDAD Y SALUD RELACIONADOS CON EL USO DE RESIDUOS COMO COMBUSTIBLES

A continuación se detallan algunos estudios en los que diversas instituciones de la comunidad científica nacional e internacional muestran que el uso de combustibles derivados de residuos no supone modificación de las emisiones de las fábricas de cemento ni suponen ningún riesgo adicional para la seguridad y salud de las personas:

- 1.** El documento de referencia europeo sobre Prevención y Control Integrados de la Contaminación (BREF, Mejores Técnicas Disponibles en la Industria del Cemento) publicados en su segunda revisión, en el que se describen las garantías presentadas por los hornos de cemento para la combustión de residuos, y se incluye el uso de residuos entre las técnicas para disminuir el consumo de recursos naturales.
- 2.** Los documentos y estudios realizados en el marco del Convenio de Naciones Unidas sobre contaminantes orgánicos persistentes concluyen que el uso de residuos como combustibles alternativos en unas condiciones determinadas (y recogidas por la normativa europea) no suponen un incremento en las emisiones de contaminantes orgánicos persistentes, en concreto, de dioxinas y furanos.
- 3.** La declaración del Comité Consultivo sobre Efectos Médicos de Contaminantes para la Salud (COMEAP) del Reino Unido sobre el uso de residuos como combustibles alternativos en fábricas de cemento sometidas a ciertos condicionantes (básicamente los establecidos por la normativa europea) concluye que «no presentan probabilidad de causar un incremento de riesgo para la salud».
- 4.** El estudio sobre emisiones de dioxinas durante la combustión de neumáticos en la industria cementera de EE.UU., que puede consultarse en la página web de la Agencia de Protección Ambiental Americana-EPA, constata que no se produce un incremento de las emisiones de dioxinas en los hornos que emplean neumáticos, junto con el Estudio realizado por el CSIC sobre emisiones de dioxinas y furanos en tres hornos en España durante el uso de neumáticos usados y harinas animales, que concluye que «Los resultados no suponen impacto añadido en el entorno».

5. La Agencia Francesa de Medio Ambiente realizó una comprobación de más de 60 mediciones previamente a decidir que en Francia las harinas animales se destinarían prioritariamente a los hornos de cemento como parte de la solución a la crisis de las vacas locas (se realizaron 40 mediciones en hornos que usaban harinas animales, comparándolas con las mediciones de 22 hornos que sólo usaban combustible fósil). Del análisis de estas 60 mediciones no se observó un incremento en el nivel de emisión.

6. Estudio del Instituto Canadiense de Toxicología CANTOX, publicado en septiembre de 2006, concluyó que «Las emisiones disponibles, las concentraciones a nivel del suelo y los datos de evaluación de salud no predicen impactos adversos para la salud del uso de combustibles alternativos en hornos de cemento»... «Sin embargo es aconsejable llevar a cabo una evaluación específica de cada instalación antes de usar combustibles alternativos porque los impactos de los hornos de cemento son diferentes según la instalación concreta».

7. Estudio de la Universidad de Alicante sobre valorización energética de lodos de depuradora y neumáticos fuera de uso en Valencia. En dicho estudio se evaluaron las emisiones de gases ácidos, metales pesados y compuestos orgánicos, incluyendo hidrocarburos aromáticos policíclicos (dioxinas), en pruebas industriales con lodos de depuradora y neumáticos fuera de uso. Los investigadores no hallaron una relación entre las emisiones y el tipo de combustible, y los valores cumplían la legislación española (Conesa, J.A., Mateos, F., Gálvez, A., Martín-Gullón, I., Font, R., 2006. Emissions from cement kilns stack feeding alternative fuels proceedings of DIOXIN 2006, Oslo).

8. El Instituto Noruego de Investigación SINTEF ha llevado a cabo una recopilación y análisis de estudios de emisiones de hornos de cemento que abarcan más de 2.000 medidas de dioxinas y furanos y otros compuestos orgánicos persistentes en hornos de cemento de los cinco continentes operados en condiciones tanto normales como extremas, y usando combustibles tradicionales y alternativos, incluyendo peligrosos. Se presenta un conjunto de estudios de emisión y se muestra que la combustión de residuos peligrosos en hornos de cemento no tiene un efecto significativo en la formación y emisión de dioxinas y furanos. Como conclusión más amplia establece que el uso de residuos como combustibles o como materias primas alternativas alimentados al quemador principal, precalcinador o al precalentador no influyen en los niveles de

emisión de contaminantes orgánicos persistentes (POPs) («Formation and release of POPs in the cement industry» SINTEF. Enero 2006. Karstensen, K. «Formation, release and control of dioxins in cement kilns» Chemosphere 2007).

9. “Cost-benefit analysis of using sewage sludge as alternative fuel in a cement plant” (M. Shuhmacher, M Nadal, J. L. Domingo. Mayo 2009). Este estudio, elaborado por la Universidad Rovira i Virgili de Tarragona y publicado por la revista *Environmental Science and Pollution Research*, ha evaluado el riesgo derivado del uso de lodos de depuradora como combustible alternativo en una fábrica concreta, analizando las posibles variaciones de las emisiones del horno en comparación con el uso de los combustibles fósiles habituales, concluyendo que no existe un incremento de riesgo (las emisiones medidas incluso eran ligeramente menores) y que el ahorro de emisiones de CO₂ es equivalente a 144.000 Tm/año.

10. Finalmente, la evaluación de las emisiones de dioxinas del sector cementero español, un trabajo realizado en el marco de un Convenio con el Ministerio de Medio Ambiente y el CIEMAT, en el que se concluye que:

- ✚ Los valores de emisión de dioxinas y furanos se encuentran muy por debajo de los límites de emisión exigidos por la legislación.

- ✚ Las emisiones de dioxinas y furanos no se ven afectadas por las sustituciones de combustibles fósiles por residuos, presentando rangos de emisión dentro de los márgenes en que se encuentran las emisiones de un horno convencional.

Tal como se ve todos los estudios concluyen que la valorización energética de residuos es una alternativa factible para la gestión de los mismos.

CAPITULO IV

EJEMPLO PRÁCTICO DE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFU)

4.1. INTRODUCCION

La masiva elaboración de neumáticos y las dificultades para hacerlos desaparecer una vez usados, constituye uno de los más graves problemas medioambientales de los últimos años en todo el mundo. Aunque se trata de un residuo no peligroso, presenta una alta capacidad calorífica, que dificulta su extinción en caso de incendio y no es degradable. Los neumáticos han sido diseñados para resistir condiciones mecánicas y meteorológicas duras. Son resistentes al ozono, la luz y las bacterias, lo que les hace prácticamente indestructibles por el paso del tiempo. Su almacenamiento en el vertedero no permite recuperar energía ni materia.

Para eliminar los neumáticos fuera de uso, se usa con frecuencia la quema directa (ver figura 16) lo que provoca graves problemas medioambientales, ya que produce emisiones de gases que contienen partículas nocivas para el entorno. También es problemático su almacenamiento, ya que debido a la pérdida de estabilidad por su parcial degradación química se producen problemas de seguridad en el vertedero. Además las montañas de neumáticos forman un entorno donde la proliferación de roedores, insectos y otros animales dañinos constituye un problema añadido.

Por ellos, una opción adecuada sería la valorización energética de los neumáticos fuera de uso, en el proceso cementero. Esto ofrece ventajas significativas sobre otros métodos de utilización o eliminación. Tanto el contenido energético como el material, puede ser totalmente aprovechados en el proceso de fabricación del clínker. No obstante, es necesario tener en cuenta que los neumáticos troceados nunca se utilizarán como combustible primario del horno, sino que estos se adicionarán al combustible principal y el porcentaje de sustitución no superará el 20% del combustible principal.

En el presente apartado se realiza un estudio de los procesos, elementos y equipos necesarios para utilizar los neumáticos troceados como combustible de sustitución.

Figura 16. Quema directa de neumáticos fuera de uso.



4.2. ORIGEN Y COMPOSICIÓN DEL NEUMÁTICO

Un neumático es básicamente un elemento que permite a un vehículo desplazarse en forma suave a través de superficies lisas. Consiste en una cubierta principalmente de caucho que contiene aire el cual soporta al vehículo y su carga. Su invención se debe al norteamericano Charles Good Year quién descubrió, accidentalmente en 1880, el proceso de vulcanización.

En el proceso de vulcanizado, en la fabricación del neumático, el caucho es mezclado con otros productos (cauchos sintéticos, azufre y óxidos) y llevado a temperaturas que provocan cambios en su estructura química interna y en sus propiedades físicas. Estos cambios son, en la práctica, irreversibles. Este proceso es el que se da al caucho la resistencia y solidez necesaria para fabricarlo.

El neumático está compuesto principalmente de tres productos:

- ✚ Caucho (natural y sintético).
- ✚ Un encordado de acero.
- ✚ Fibra textil.

A su vez, el caucho usado en la fabricación de neumáticos está compuesto por un grupo de polímeros (compuestos químicos de elevado peso molecular) entre los que se cuentan el polisopreno sintético, el polibutadieno y el más común que es el estierobutadieno, todos basados en hidrocarburos.

Se agregan además, otros materiales al caucho para mejorar sus propiedades, tales como: suavizantes que aumentan la trabajabilidad del caucho, antes de la vulcanización; óxido de zinc y de magnesio, comúnmente denominados activadores, pues son mezclados para reducir el tiempo de vulcanización de varias a horas a pocos minutos; antioxidantes, para dar mayor vida al caucho sin que se degrade por la acción del oxígeno y el ozono; finalmente negro de humo, especie de humo negro obtenido por combustión incompleta de gases naturales, que proporcionan mayor resistencia a la abrasión y a la tensión.

La composición de distintos tipos de neumáticos aparece detallada en las tablas 10 y 11.

Tabla 10. Neumáticos de Pasajeros (automóviles y camionetas).

| | |
|--|---------------------|
| Caucho natural | 14 % |
| Caucho sintético | 27 % |
| Negro de humo | 28 % |
| Acero | 14-15 % |
| Fibra textil, suavizantes, óxidos, antioxidantes, etc. | 16-17 % |
| Peso promedio | 8,6 Kg |
| Volumen | 0.06 m ³ |

Tabla 11. Neumáticos MCT (camiones y microbuses).

| | |
|--|---------|
| Caucho natural | 27 % |
| Caucho sintético | 14 % |
| Carbón negro | 28 % |
| Acero | 14-15 % |
| Fibra textil, suavizantes, óxidos, antioxidantes, etc. | 16-17 % |
| Peso promedio | 45,4 Kg |
| Volumen | 0.36 m3 |

Aunque puede variar según el tipo de neumático y el país de fabricación, los diferentes elementos químicos que componen un neumático se muestran en la (tabla 12) junto a sus respectivos porcentajes.

Tabla 12. Análisis químico del neumático.

| Elemento | |
|--|-------------|
| Carbono (C) | 70 % |
| Hidrogeno (H) | 7 % |
| Azufre (S) | 1-3 % |
| Cloro (Cl) | 0,2-0,6 % |
| Hiero (Fe) | 15 % |
| Oxido de Zinc (ZnO) | 2 % |
| Dióxido de Silicio (SiO ₂) | 2 % |
| Cromo (Cr) | 97 ppm |
| Niquel (Ni) | 77 ppm |
| Plomo (Pb) | 60-760 ppm |
| Cadmio | 5-10 ppm |
| Talio | 0,2-0,3 ppm |

Tal como se observa en su composición hay un alto contenido en C, lo que indica que el material tendría un alto poder calorífico y por tanto sería fácil valorizarlos energéticamente. En su combustión, los neumáticos generan calor, agua y ceniza. La composición química de la ceniza se puede observar en la tabla 13. Esta, al contener algunos de los componentes necesarios para la fabricación de cemento, son absorbidas y capturadas en la estructura cristalina del cemento, durante el proceso de fabricación del mismo, en el interior del horno rotatorio, lo cual permite, ahorrar materias primas y combustible.

Tabla 13. Análisis mineral de la ceniza de neumático (% en peso).

| Compuesto | % |
|---|----------|
| Dióxido de Silicio (SiO ₂) | 22.00 |
| Dióxido de Aluminio (AL ₂ O ₃) | 9.09 |
| Oxido de Hierro (Fe ₂ O ³) | 1.45 |
| Oxido de Calcio (CaO) | 10.61 |
| Dióxido de Titanio (tiO2) | 2.57 |
| Oxido de Magnesio (MgO) | 1.35 |
| Oxido de Sodio (Na ₂ O) | 1.10 |
| Oxido de Potasio (K ₂ O) | 0.92 |
| Azufre en (SO ₃) | 15.68 |
| Fosforo en (P ₂ O ₅) | 1.03 |
| Oxido de Azufre (ZnO) | 34.50 |

4.3. LA VALORIZACIÓN DE NEUMÁTICOS EN PLANTAS CEMENTERAS

La valorización energética de los neumáticos desechados en los hornos de cemento al utilizarlos como combustibles alternativos, tendrían las siguientes ventajas:

- ✚ Se preservan recursos energéticos fósiles, no renovables, a la vez que se recupera el valor energético (y material) de los residuos o subproductos.
- ✚ Se reducen los impactos sobre el aire, el agua y el suelo.
- ✚ Se evita la producción de nuevos residuos como ceniza o escorias que requieran ser depositados o vertidos, estas son absorbidas en el proceso y capturadas por las materias primas. Todos los elementos que ingresan al horno están presentes en el producto.
- ✚ Disminuye los costos menores de gestión (pues se usan instalaciones existentes, evitándose inversiones en nuevas; y los costos de operación son menores).
- ✚ Se reducen las emisiones de CO₂ disminuyendo las emisiones de efecto invernadero.

El valor calórico neto de los neumáticos usados es el mismo que el del carbón (Tabla 14) y una tonelada de neumáticos equivale a 1 tonelada de carbón de buena calidad o a 0.7 toneladas de fuelóleo.

Las variaciones del valor calórico y del contenido de ceniza están asociadas normalmente con el porcentaje de acero en los neumáticos y la humedad puede variar también dependiendo de las condiciones de almacenamiento.

Tabla 14. Características del combustible derivado de neumáticos y del carbón.

| Parámetros | Neumático usado | Carbón |
|-----------------------------|------------------------|---------------|
| Contenido energético (MJ/t) | 25-30 | 25-30 |
| Humedad (%) | 3-5 | 5-20 |
| Ceniza (%) | 15-20 | 10-15 |
| Carbono (%) | 60-70 | 80-90 |
| Azufre (%) | 1-2 | 0.3-2 |
| Nitrógeno (%) | 0.3-0.5 | |
| Cloro (%) | 0.2 | |

4.4. DISEÑO DEL PROCESO DE VALORIZACION ENERGETICA DE NEUMATICOS FUERA DE USO EN PLANTA CEMENTERA

Usar combustibles alternativos en una fábrica de cemento requiere de grandes inversiones, ya que son necesarios equipos de recepción, almacenamiento de material, instalaciones para el transporte, dosificación, mejoras o sustituciones del quemador del horno, e incrementar los sistemas contra incendios y controles ambientales. Además, en algunos casos, se precisa una preparación del material para conseguir unas características físico-químicas, más o menos uniformes.

En este apartado se va describir las características que deben tener las instalaciones para valorizar energéticamente los neumáticos fuera de uso en una planta de cemento. Con las siguientes características:

- ✚ Horno de vía seca de dimensiones 4.6 m. de diámetro por 74 m. de longitud.
- ✚ Torre de intercambio de ciclones de 6 etapas.
- ✚ Enfriador de 10 satélites.
- ✚ Electrofiltro Redecam, con torre de acondicionamiento previa de gases.
- ✚ Producción anual de clinker es de 782.000 Tm.
- ✚ Consumo específico de calor del horno es de 843 Kcal. /Kg. Clinker.
- ✚ Temperatura de salida de gases del intercambiador es de 280 °C.
- ✚ Volumen de gases de escape es de 1.87 m³ N/Kg. Clinker.
- ✚ Temperatura de entrada al exhaustor es de 270 °C.

- ✚ Depresión a la entrada del exhaustor es de 93.1 mbar.
- ✚ Potencia instalada 48 Kw

4.4.1 DESARROLLO DEL PROCESO

Los neumáticos tendrán las dimensiones aproximadas de 250 * 100 * 10 mm y llegarán normalmente a la fábrica de cemento preparados para su alimentación al horno, puesto que la selección y el troceado se realizarán en instalaciones de gestión de neumáticos.

Los neumáticos se descargarán en acopios preparados para este tipo de residuos, con capacidad equivalente a varios días de funcionamiento de la instalación. Los acopios de neumáticos dispondrán de sistemas de protección contra incendios y de prevención de la contaminación de las aguas. Desde el acopio se alimentarán las tolvas intermedias mediante puentes grúa o palas mecánicas. Los neumáticos se extraerán de la tolva para alimentar las cintas que los transportarán hasta el punto de entrada al horno.

El transporte mecánico de los neumáticos incluirá transportadores de rodillos, cintas de goma e incorporarán en la cadena de transporte la instalación de pesaje que permitirá la adecuada dosificación de los neumáticos.

El horno a utilizar es de vía seca con precalentador y la introducción del neumático troceado por la entrada al horno se hará a través de una válvula de doble clapeta. Este sistema tiene las ventajas de poder utilizar neumáticos troceados en tamaños grandes y la instalación requerida para el manejo del combustible es sencilla y segura. Sin embargo, la cantidad de combustible a introducir por este punto viene limitada por las temperaturas, tiempos de retención de los gases combustibles, características de mezcla oxígeno/combustible y efectos en el comportamiento del proceso del horno.

La alimentación al horno se realizará únicamente cuando las condiciones de combustión y el funcionamiento de los filtros garanticen la destrucción de los compuestos orgánicos presentes en los neumáticos y en el cumplimiento de los límites de emisión a la atmósfera.

Se controlarán de forma continua con equipos automáticos tanto las condiciones de la llama (temperatura y contenido en oxígeno), como las emisiones a la atmósfera.

A la hora de diseñar el proceso, hay que tener en cuenta que existen unas condiciones limitantes que son:

- ✚ La sustitución del combustible siempre es parcial y oscila entre el 10 y el 20%.
- ✚ La necesidad de incrementar el exceso de aire para evitar la formación de CO lo que repercute en una disminución del rendimiento calorífico.
- ✚ Mayor cantidad de gases e incremento de su temperatura de salida (40- 50 °C).

Si se supone una sustitución del 20% y se considera que el consumo calorífico promedio del horno de 843 Kcal/Kg. de clinker producido con una producción promedio del horno de 782.000 Tm.de clinker/año.

El consumo anual posible de neumáticos sería:

$$\text{Consumo anual} = 782.000 \text{ Tm} \frac{\text{clinker}}{\text{ano}} * 843 \frac{\text{kcal}}{\text{kg clinker}} * \frac{0.2}{6500 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg de neumaticos}}} =$$

20283.87 Tm neumáticos/año.

Esto supondría que con esta tecnología se podrían eliminar 20283.87 Tm de neumáticos fuera del uso al año y así evitar su acumulación en los vertederos.

4.4.2. ELEMENTOS DE LA MAQUINARIA A INTRODUCIR

La implementación del proceso de valorización energética a la planta de cemento, implica la necesidad de nuevas instalaciones, que por el ejemplo propuesto debe incluir los siguientes elementos:

- ✚ Tolva de recepción para camiones de 95 m³ de capacidad con protecciones para evitar el vuelco de camiones en la descarga.
- ✚ Tolva de almacenamiento de 250 m³ de capacidad cubierta.
- ✚ Sistema de extracción y alimentación a horno automático, compuesto por una cuchara de garras múltiples desplazable sobre la tolva de almacenamiento y la de descarga de camiones. Su rendimiento máximo de alimentación sería de 1,7 T/hora.
- ✚ Tolvín dosificador con cinta de pesaje en la extracción.
- ✚ Compuerta de alimentación a horno de doble clapeta con una capacidad nominal de 30 m³/h y un peso de 710 kg.
- ✚ Sistema mecánico.
- ✚ Sistema eléctrico.

4.4.3. ASPECTO MEDIOAMBIENTALES Y EFECTOS SOBRE EL CEMENTO PRODUCIDO

La experiencia demuestra que los neumáticos usados pueden sustituir combustibles fósiles, como carbón o petróleo, sin un incremento significativo en las emisiones (Tabla 15), y que las buenas prácticas en la combustión y el uso adecuado de sistemas de control de emisiones son esenciales para mantener las emisiones en la chimenea en el mismo nivel que el nivel de las emisiones procedentes del uso de combustibles fósiles.

La combustión de los neumáticos fuera de uso se realizará siempre en condiciones que aseguren la calidad del cemento y que ésta permanezca inalterada.

No se ha descrito ningún efecto adverso sobre la calidad del cemento por el uso de neumáticos como combustible alternativo, y no se presentan complicaciones operacionales adicionales.

Algo que eventualmente podría suceder, es que el clínker presente una tonalidad un poco más oscura de lo habitual, producto de la impregnación de componentes no combustionados presentes en los neumáticos (acero reforzado). Otro aspecto importante a considerar es la compatibilidad ambiental del cemento fabricado con neumáticos fuera de uso como combustible alternativos.

Tabla 15. Emisiones medidas de la combustión de prueba de neumáticos en un horno de cemento en España.

| Contaminante | Combustibles fósiles (carbón y coque) | Combustibles fósiles y 15% de neumáticos |
|--|--|---|
| Partículas mg / m ³ | 60 | 60 |
| mg / m ³ de NO _x | 1180 | 800 |
| mg / m ³ de SO _x | 500 | 500 |
| mg / m ³ de CO _x | 985 | 948 |
| mg / m ³ de cloro y flúor | 1,13 | 1,0 |
| mg / m ³ de VOC | 129 | 68 |
| ng / m ³ de dioxinas | 0,12 | 0,03 |

Tal como se observa el uso de neumáticos fuera de uso como combustible en hornos de cemento reduce la producción de óxidos de nitrógeno, óxidos de carbono y compuestos orgánicos volátiles, mientras que en la producción dióxido de azufre se mantiene constante.

Esto demuestra que el uso de neumáticos fuera de uso como combustible en hornos de cemento disminuye significativamente las emisiones aportando una solución a los problemas medioambientales.

CONCLUSIONES

En el presente estudio, se ha analizado en profundidad la valorización energética de residuos como combustibles alternativos en plantas cementeras. Las fábricas de cemento suministran a la sociedad una herramienta complementaria para la gestión de sus residuos, aprovechando las instalaciones ya existentes. De este modo, aprovechan el poder calorífico de los residuos que no se hayan podido reciclar ni reutilizar.

Se ha presentado un ejemplo concreto de valorización energética de neumáticos fuera de uso, comprobando que podrá eliminar 20283.87 Tm de NFU al año y así evitar su acumulación en los vertederos, evitando posibles incendio de neumáticos y evitando que sirvan como criadero para roedores e insectos.

Se ha determinado que el impacto ambiental derivado del uso de los NFU como combustible alternativo es mínimo, pues la fracción metálica y la ceniza se incorporan al clínker, el azufre a la cal, y los gases de combustión producen similares emisiones.

Como conclusión general se ha visto que la valorización energética de residuos en planta cementera es un ejemplo claro de soluciones sociales y medioambientales, pues:

- ✚ Reduce el consumo de fuentes energéticas no renovables.
- ✚ Reduce las emisiones de CO₂ y otros contaminantes.
- ✚ Reduce la cantidad de residuos depositados en vertederos.
- ✚ Es un tratamiento eficaz con todas las garantías de seguridad y salud.
- ✚ Mejora la competitividad de la industria cementera, reduciendo el coste energético directo (casi un 40 % de los costes de fabricación).

BIBLIOGRAFIA

1. “Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España de Fabricación de Cemento”.
Ministerio de Medio Ambiente.
2. Directiva 2000/76/CE sobre incineración de residuos. DOCE 28/12/2000.
3. La Ley de residuos y suelos contaminados. 22/2011 del 28 de julio.
4. Atyca. Informe de resultados del proyecto: Valorización energética de residuos de fragmentación y neumáticos provenientes de vehículos fuera de uso. 2000.
5. “Empleo de Residuos Industriales como Combustibles Alternativos en la Industria del Cemento”. Comisión Europea. Programa Energie. Año 2000.
6. La Valorización Energética de Residuos en la Industria Española del Cemento. Oficemen.2004.
7. Uso de Combustibles Alternativos en las Fábricas de Cemento. Instituto Cerdá. Abril 2007
8. Alejandro Martín “Valorización de residuos en la industria del cemento” 2005.
9. “Lixiviación de metales y otros compuestos en productos fabricados con cemento.” Revista Cemento Hormigón. 2008.
10. José Antonio Mendoza Roca; Antonio Eduardo Palomares Gimeno; María Teresa Montañés San Juan: “Ciencia y tecnología del medio ambiente”. Universidad Politécnica de Valencia D.L. 1998, 2009.
11. Xavier Elías Castells: “Tratamiento y valorización energética de residuos”. Díaz de Santos. 2005.
12. Conesa, J. A., Mateos, F., Gálvez, A., Martín-Gullón, I., Font, R., 2006. Emissions from cement kilns stack feeding alternative fuels proceedings of DIOXIN 2006, Oslo.
13. Formation and release of POPs in the cement industry SINTEF. Enero 2006. Karstensen, K. «Formation, release and control of dioxins in cement kilns» Chemosphere 2007.
14. Cost-benefit analysis of using sewage sludge as alternative fuel in a cement plant (M. Shuhmacher, M Nadal, J. L. Domingo. Mayo 2009).