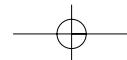




# Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España de fabricación de cemento

Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España de fabricación de cemento



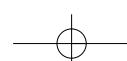


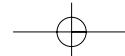
Serie Monografías

Guía  
de Mejores Técnicas Disponibles en España  
de fabricación de cemento



2004





## EQUIPO DE TRABAJO Y REDACCIÓN

Directora del equipo: Carmen Canales Canales Mº de Medio Ambiente

Coordinador técnico: Óscar Giménez Pérez Instituto Cerdá

Colaboradores: Albert Avellaneda Bargués Dirección General de Calidad Ambiental.  
Generalitat Catalunya.

Esther Monfá Obach CEMA. Generalitat de Catalunya.  
Sonia Silva Segovia TRAGSA  
Pedro Mora Peris OFICEMEN  
Marina Romay Díaz OFICEMEN  
Miguel Angel Serra Biarnés Asesor, Ingeniero Industrial.

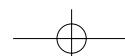
### Reimpresión

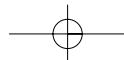
Edita: Centro de Publicaciones  
Secretaría General Técnica  
Ministerio de Medio Ambiente ©

I.S.B.N.: 84-8320-264-6  
NIPO: 310-04-019-3  
Depósito legal: 6.505-2004

Imprime: Closas-Orcoyen, S. L.

Impreso en papel reciclado





# PRESENTACIÓN

La aplicación de la Ley 16/2002 de Prevención y Control Integrados de la Contaminación exige un enfoque integrado de la industria en su entorno y el conocimiento, por parte de todos los implicados, de las Mejores Técnicas Disponibles con el fin de reflejar todos estos aspectos en la Autorización Ambiental Integrada.

Este necesario intercambio de información entre los distintos agentes, iniciado como un foro meramente técnico para la definición y consideración de las Mejores Técnicas Disponibles (MTD), se ha transformado en una dinámica mucha más rica que ha permitido un nuevo y fructífero entendimiento entre las administraciones con responsabilidades ambientales y los sectores industriales. Este mejor conocimiento se está manifestando en una responsabilidad compartida y en la adopción de compromisos de mejora del medio ambiente adquiriendo una mayor concienciación con los problemas planteados y el equilibrio necesario para alcanzar el desarrollo sostenible.

Fruto de esta dinámica, es esta **Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España de Fabricación de Cemento** que ahora se presenta.

Está guía constituye, pues, la primera de la serie, que el Ministerio de Medio Ambiente está realizando, de acuerdo con lo establecido en la Ley 16/2002 de 1 de julio, y en colaboración con los representantes de las CC.AA. y de los sectores industriales.

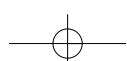
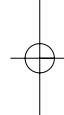
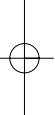
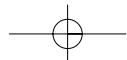
El objetivo de esta guía no es sólo dar cumplimiento a un requisito legal, sino disponer de documentos sobre las Mejores Técnicas Disponibles que sean de utilidad tanto para la administración ambiental competente como para el sector cementero, teniendo en cuenta las particularidades de la industria del cemento en España y para el público en general que pueda conocer las particularidades de los procesos de producción y su afección medioambiental.

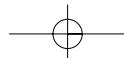
Supone un documento de referencia esencial para las administraciones que tengan que conceder la Autorización Ambiental Integrada y especificar los límites de emisión de las distintas sustancias y a todos los medios, ya que éstos límites deben basarse en las Mejores Técnicas Disponibles, en el estado del medio ambiente y en las condiciones geográficas en la ubicación de cada industria.

Constituye además, un vehículo idóneo de información para el sector cementero, de manera que éste incluya desde el primer momento, en su estrategia empresarial, metodologías de mejora medioambiental continua permitiéndoles, si cabe, estar siempre en condiciones favorables de cumplimiento legislativo siendo competitivos.

Por último, hay que resaltar que este primer documento sobre las MTD a nivel nacional, no es el final del camino, sino el primer paso de una nueva forma de compromiso de mejora del medio ambiente enmarcado dentro de la estrategia general de desarrollo sostenible, ya que la necesaria actualización de los contenidos de la guía en función de los avances técnicos y tecnológicos, garantiza el trabajo en común entre la administración y la propia industria para la revisión continua del documento y dar así respuesta adecuada a los nuevos retos medioambientales.

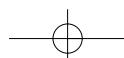
**Germán Glaría Galcerán**  
*Director General de Calidad y Evaluación Ambiental*  
*Ministerio de Medio Ambiente*

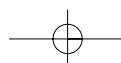




# ÍNDICE

	<i>Págs.</i>
<b>PRÓLOGO .....</b>	7
<b>RESUMEN .....</b>	13
<b>1. INFORMACIÓN GENERAL SOBRE LA INDUSTRIA DEL CEMENTO .....</b>	17
<b>2. PROCESOS Y TÉCNICAS APLICADAS .....</b>	23
2.1. Obtención de materias primas .....	24
2.2. Almacenamiento y preparación de materias primas .....	25
2.2.1. Almacenamiento de materias primas .....	25
2.2.2. Molienda de materias primas .....	26
2.3. Almacenamiento y preparación de los combustibles .....	27
2.3.1. Almacenamiento de combustibles .....	27
2.3.2. Preparación de los combustibles .....	28
2.3.3. Empleo de residuos como combustible .....	29
2.4. Cocción del clínker .....	38
2.4.1. Hornos rotativos largos .....	39
2.4.2. Hornos rotativos equipados con precalentadores .....	40
2.4.3. Hornos rotativos con precalentador y precalcinador .....	42
2.4.4. Gases de salida del horno .....	43
2.4.5. Enfriadores de clínker .....	44
2.5. Molienda y almacenamiento de cemento .....	47
2.5.1. Almacenamiento del clínker .....	47
2.5.2. Molienda de cemento .....	47
2.5.3. Almacenamiento del cemento .....	49
2.6. Ensacado y expediciones .....	50
<b>3. NIVELES ACTUALES DE EMISIONES Y CONSUMO DE ENERGÍA Y MATERIAS PRIMAS .....</b>	51
3.1. Consumo de materias primas .....	51
3.2. Consumo de energía .....	52
3.3. Emisiones .....	53
3.3.1. Óxidos de nitrógeno .....	56
3.3.2. Dióxido de azufre .....	57
3.3.3. Partículas .....	58
3.3.4. Óxidos de carbono (CO <sub>2</sub> , CO) .....	59
3.3.5. Compuestos orgánicos volátiles .....	60
3.3.6. Dibenzodioxinas policloradas (PCDDs) y dibenzofuranos (PCDFs) .....	60
3.3.7. Metales y sus compuestos .....	61
3.4. Residuos .....	62
3.5. Ruidos .....	62
3.6. Olores .....	63
<b>4. LAS MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES EN LA INDUSTRIA DEL CEMENTO</b>	<b>65</b>
4.1. Consideraciones previas .....	65
4.2. MTD de carácter general .....	67
4.2.1. Optimización del control de proceso .....	68
4.3. MTDs para el control de los óxidos de nitrógeno .....	69
4.3.1. MTDs y valores de emisión asociados .....	69

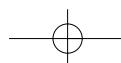


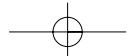


## Índice

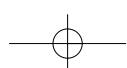
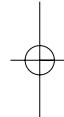
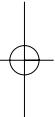
---

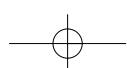
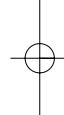
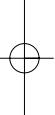
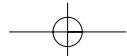
4.3.2. Información sobre el quemador de bajo NOx .....	71
4.3.3. Información sobre la combustión por etapas .....	71
4.3.4. Información sobre la reducción no catalítica selectiva. ....	72
4.4. MTDs para el control de los óxidos de azufre .....	74
4.4.1 MTDs y valores de emisión asociados .....	74
4.4.2. Información sobre la adición de absorbente .....	74
4.5. MTDs para el control de las partículas .....	75
4.5.1. MTDs y valores de emisión asociados .....	75
4.5.2. Información sobre el control de las emisiones de fuentes dispersas .....	75
4.5.3. Información sobre el control de las emisiones de fuentes puntuales .....	76
<b>5. MEDICIÓN Y CONTROL DE EMISIONES A LA ATMÓSFERA .....</b>	<b>81</b>
5.1. Introducción .....	81
5.2. Legislación .....	83
5.2.1. Legislación básica .....	83
5.2.2. Registro Europeo de Emisiones Contaminantes (EPER) ..	85
5.3. Aspectos básicos de la medición y control de las emisiones a la atmósfera de la industria del cemento .....	86
5.3.1. Identificación de los parámetros críticos .....	86
5.3.2. Tipología de los sistemas de medición .....	88
5.3.3. Métodos de cálculo y estimación .....	88
5.4. Tipología de los sistemas de medición y control de las emisiones a la atmósfera de la industria del cemento .....	89
5.4.1. Control general de parámetros .....	92
5.4.2. Medición y control de emisiones de partículas sólidas .....	92
5.4.3. Medición y control de emisiones de gases .....	94
5.4.4. Medición y control de emisiones de dioxinas y furanos ..	98
5.4.5. Medición y control de emisiones de metales pesados .....	99
5.4.6. Medición y control de otras emisiones de contaminantes ..	101
5.5 Condiciones para determinar valores de emisión a partir de equipos de medición en continuo en fábricas de cemento .....	101
5.5.1. Ámbito de aplicación .....	101
5.5.2. Calibración .....	102
5.5.3. Homologación .....	102
5.5.4. Cumplimiento .....	102
<b>6. TÉCNICAS EMERGENTES Y EN DESUSO EN LA INDUSTRIA DEL CEMENTO</b> 105	
6.1. Técnicas emergentes .....	105
6.1.1. Tecnología de fabricación de clínker en lecho fluido .....	105
6.1.2. Reducción catalítica selectiva (SCR) .....	106
6.1.3. Combustión por etapas combinada con reducción no-catalítica selectiva (SNCR) .....	107
6.2. Técnicas en desuso .....	107
<b>ANEXO .....</b>	<b>109</b>
1. Acuerdo Voluntario Nacional para la Prevención y el Control de la Contaminación de la Industria del Cemento .....	111

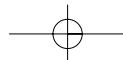




# PRÓLOGO







## PRÓLOGO

### 1. La ley IPPC y las Mejores Técnicas Disponibles

Con el fin de facilitar la comprensión del presente documento, se describen a continuación los principios básicos de la Ley 16/2002 relativa a la Prevención y Control Integrados de la Contaminación (en adelante Ley IPPC), y la definición que ésta da sobre el concepto de Mejores Técnicas Disponibles (en adelante MTD o BAT).

El propósito de la ley es conseguir la prevención y el control integrados de la contaminación proveniente de las actividades relacionadas en su Anejo I, con el fin de alcanzar un alto grado de protección del medio ambiente, en línea con la filosofía de ‘desarrollo sostenible’ establecida a nivel de la Unión Europea, conjugando el desarrollo económico y social, con la protección de los recursos naturales y el medio ambiente.

En concreto, la ley establece la concesión de autorizaciones ambientales que tengan en consideración los efectos ambientales de la actividad industrial de forma integrada, para lo cual deben incorporarse al análisis cuestiones tales como emisiones a la atmósfera, generación de residuos, vertidos a los cauces, consumo de recursos naturales, etc.

El objetivo final de este enfoque integrado es que la operación y control de las instalaciones industriales se realice de tal forma que garantice una elevada protección del medio ambiente en su conjunto, para lo que la directiva establece que las exigencias ambientales de los permisos deben basarse en las Mejores Técnicas Disponibles, concepto que la directiva define como:

“la fase más eficaz y avanzada de desarrollo de las actividades y de sus modalidades de explotación, que demuestren la capacidad práctica de determinadas técnicas para constituir, en principio, la base de los valores límite de emisión ...”

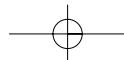
Tratando de aclarar este importante concepto considera:

“**técnicas**: la tecnología utilizada junto con la forma en que la instalación esté diseñada, construida, mantenida, explotada y paralizada;”

“**disponibles**: las técnicas desarrolladas a una escala que permita su aplicación en el contexto del sector industrial correspondiente, en condiciones económica y técnicamente viables, ...”

“**mejores**: las técnicas más eficaces para alcanzar un alto nivel general de protección del medio ambiente en su conjunto.”

De los tres conceptos descritos anteriormente, ha sido el de “disponibles” el que más dificultades de interpretación presenta, tanto en lo referente a la viabilidad técnica de las tecnologías consideradas, como en lo que se refiere a la relación coste/beneficio y el impacto que la aplicación de dichas técnicas puede tener sobre la competitividad de los sectores industriales afectados por la Directiva IPPC.



## Prólogo

---

### 2. Elaboración de este documento

El artículo 16.2 de la Directiva IPPC establece la obligación de realizar intercambio de información a nivel de la Unión Europea sobre 'Mejores Técnicas Disponibles' en los sectores de actividad a los que afecta la directiva.

La Comisión Europea, responsable de coordinar los trabajos de intercambio, estableció una oficina de intercambio (IPPC Bureau), con sede en Sevilla, encargada de organizar el intercambio de información. La orientación y supervisión de los trabajos realizados por dicha oficina corresponde al Foro de Intercambio de Información de la IPPC, Grupo de Expertos de ámbito comunitario en el que están representadas las autoridades ambientales de los países de la Unión Europea, industria y ONGs.

Los trabajos concretos sobre sectores industriales se realizan mediante Grupos de Trabajo Técnicos (TWG, su abreviatura en inglés), en los que participan expertos del sector industrial y de las administraciones ambientales.

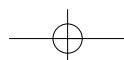
El Grupo de Trabajo correspondiente a las industrias del cemento y de la cal comenzó sus trabajos en junio de 1997, y el documento final sobre ambos sectores se hizo público en enero de 2002: *Reference Document on Best Available Techniques in the Cement and Lime Manufacturing Industries* (en adelante BREF). Está disponible, exclusivamente en versión inglesa, en la web de la oficina de intercambio (eippcb.jrc.es).

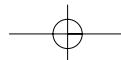
El presente documento toma como base de partida el documento BREF, teniendo en cuenta la realidad de la industria cementera española, tanto desde el punto de vista tecnológico como medioambiental. Para ello se ha incorporado la información disponible sobre la industria cementera en nuestro país, y se ha hecho especial hincapié en los aspectos ambientales asociados a la fabricación de cemento que más preocupan e interesan.

En la elaboración del presente documento han participado especialistas medioambientales de las administraciones públicas, y personas expertas de las empresas cementeras españolas, coordinadas en el Grupo de Trabajo 'Medio Ambiente' de la Agrupación de Fabricantes de Cemento de España – Oficemen y el Institut Cerdá.

### 3. Objetivo de este Documento

Con este documento, se pretende dar un paso más en la adecuación progresiva de la industria cementera española a los principios de la Ley IPPC, cuya aplicación efectiva debe conducir a una mejora del comportamiento ambiental de las fábricas de cemento que las haga plenamente respetuosas con el medio ambiente.





---

## Prólogo

Este documento encuentra un apoyo concreto en el “Acuerdo Voluntario para la Prevención y Control de la Contaminación de la Industria Española del Cemento”, firmado el 28 de noviembre de 2001, entre el Ministerio de Medio Ambiente y la Agrupación de Fabricantes de Cemento de España, cuya cláusula cuarta recoge explícitamente la realización de estudios sobre Mejores Técnicas Disponibles.

No se trata en ningún caso de un documento cerrado, sino que, muy al contrario, de su lectura y debate deben obtenerse, además de un mejor conocimiento de la industria cementera y su interacción con el medio ambiente, nuevas aportaciones que permitan un enriquecimiento del mismo, confiriéndole el dinamismo que la propia Directiva IPPC requiere.

### 4. Contenido del documento

Los capítulos 1 y 2 proporcionan información sobre la industria del cemento y sobre los procesos de fabricación.

El capítulo 3 proporciona información concerniente a niveles de consumo (energía y materias primas) y emisiones, reflejando la situación en las instalaciones existentes en el momento de su elaboración.

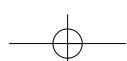
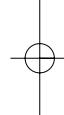
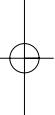
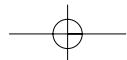
El capítulo 4 presenta las técnicas consideradas como MTD, y los niveles de consumo y emisión que se consideran asociados a las mismas. Las técnicas y los niveles indicados en el capítulo 4 no son necesariamente apropiados para todas las instalaciones. En el caso de instalaciones existentes, deberá tenerse en consideración la viabilidad técnica y económica de modificarlas.

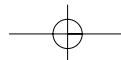
Los niveles de emisión asociados no son en modo alguno valores límite de emisión. La determinación de los límites de emisión en las condiciones del permiso, o en la elaboración de obligaciones legales sectoriales, deberán decidirse en su momento tomando en consideración, además de las MTD, los factores específicos medioambientales tales como las características técnicas de las instalaciones, la ubicación geográfica de las mismas y las condiciones ambientales locales.

El capítulo 5 trata sobre los sistemas de medida y control de emisiones aplicables a la industria del cemento. En él se identifican, por un lado, los parámetros legales y de operación que caracterizan los procedimientos de medición y control, y por otro, los principales métodos de medición que pueden ser utilizados. Además de los requisitos legales, se disponen los objetivos del Acuerdo Voluntario de Prevención y Control Integrados de la Contaminación en la industria del cemento.

Asimismo, se resumen las características de los métodos más usuales y se describe, en cada caso, la metodología de toma de muestras y análisis, con mención especial del procedimiento de comparación de los datos obtenidos con la legislación.

En el capítulo 6 se presentan las técnicas emergentes que podrían en un futuro considerarse en la determinación de MTD, si superan el estadio actual de desarrollo para convertirse en opciones industriales aplicables técnica y económicamente, y las técnicas que pueden considerarse en desuso para nuevas instalaciones en Europa.





## RESUMEN

### La Industria del Cemento

El cemento es un material básico para la edificación y la ingeniería civil. Su principal propiedad es la de formar masas pétreas resistentes y duraderas cuando se mezcla con áridos y agua. El endurecimiento (fraguado) de la mezcla ocurre transcurrido un cierto tiempo desde el momento en que se realiza la mezcla, lo que permite dar forma (moldear) la piedra artificial resultante. Estas tres cualidades (moldeable, resistente, duradero) hacen que los productos derivados del cemento tengan una gran aplicación en la construcción de infraestructuras y otros elementos constructivos.

El consumo y la producción de cemento están ligados directamente a la actividad constructiva (pública y privada) en cada momento, y por lo tanto sigue una evolución muy pareja a la situación económica general. La producción de cemento en la Unión Europea alcanzó en el año 2000 los 194,3 millones de toneladas, aproximadamente el 11,4 % de la producción mundial. En España las cifras de producción y consumo de cemento se situaron en 38,2 y 38,4 millones de toneladas respectivamente en el año 2000, los valores más altos de la Unión Europea junto con Italia. De la producción del cemento en ese año 1,1 millones fueron de cemento blanco.

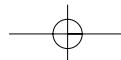
En el proceso de fabricación de cemento, pueden diferenciarse tres etapas básicas:

- a) Obtención y preparación de materias primas (caliza, marga, arcilla) que son finamente molidas para obtener **crudo**.
- b) Cocción del crudo en un horno rotatorio hasta temperaturas de 1.450 °C (2.000 °C de temperatura de llama) para la obtención de un producto semielaborado denominado **clínker** de cemento.
- c) Molienda conjunta del clínker con otros componentes (cenizas volantes, escoria, puzolana, yeso) para obtener el **cemento**.

La fabricación de cemento es una actividad industrial intensiva en energía, térmica para la cocción de las materias primas; y eléctrica para las operaciones de molienda, manipulación de materiales e impulsión de gases. Los costes energéticos se sitúan alrededor del 30% de los costes de producción.

En la Unión Europea hay unas 300 instalaciones de fabricación de cemento, en las que están en funcionamiento más de 400 hornos de clínker. En España, están en operación 42 fábricas de cemento, en las que operan cerca de 60 hornos y más de 100 molinos de cemento.

En lo que al sistema de horno se refiere, se acepta que, salvo condiciones especiales de la materia prima, la Mejor Técnica Disponible consiste en un horno rotatorio dotado de precalentador de ciclones multietapas y precalcinador. El consumo energético para un horno nuevo de estas características se estima entre 2.900 y 3.200 MJ/t de clínker.



## Resumen

---

### Aspectos ambientales de la fabricación de cemento

Los aspectos ambientales más importantes de la fabricación de cemento son el consumo energético y la emisión a la atmósfera de las siguientes sustancias:

- Partículas (polvo), proveniente de las operaciones de almacenamiento, transporte y manipulación de los materiales pulverulentos presentes en la fábrica (fuentes dispersas o difusas), y de los filtros de desempolvamiento (fuentes localizadas o puntuales).
- Gases de combustión: óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) y óxidos de azufre ( $\text{SO}_2$ ).

Las emisiones del horno de clínker están ligadas a las propiedades de las materias primas (humedad, contenido en compuestos sulfurosos volátiles, dificultad de cocción, resistividad, etc) y a la tipología de sistema de horno empleada (vías húmeda, semihúmeda, semiseca y seca).

La medición de las emisiones en fuentes localizadas es necesaria por diversos motivos, especialmente para controlar el cumplimiento de los límites de emisión.

La elección de un método de medición u otro depende principalmente del tipo de sustancia y de diversos factores que pueden afectar a la exactitud y a la precisión de los resultados.

### Mejores Técnicas Disponibles

La mayor parte de las fábricas de cemento españolas y europeas han adoptado las MTD consideradas como técnicas primarias generales:

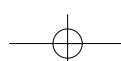
- optimización del control del proceso,
- sistemas gravimétricos de alimentación de combustibles sólidos, en los enfriadores y
- sistemas de gestión de energía.

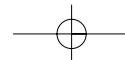
Estas medidas redundan en mejoras de calidad, reducción de costes y reducción de los consumos energéticos y de las emisiones a la atmósfera.

Las MTD para la reducción de las emisiones de  $\text{NO}_x$  son una combinación de las técnicas primarias mencionadas y:

- quemadores de bajo  $\text{NO}_x$ ,
- combustión por etapas (o escalonada), y
- reducción selectiva no catalítica (SNCR).

El nivel de emisión asociado a estas MTD se sitúa entre 500 y 1.200 mg  $\text{NO}_x/\text{Nm}^3$  (como  $\text{NO}_2$ ), 500-800 mg  $\text{NO}_x/\text{Nm}^3$  para instalaciones nuevas, 800 – 1.200 mg  $\text{NO}_x/\text{Nm}^3$  para instalaciones existentes en vía seca.





## Resumen

Las MTD para reducir las emisiones de SO<sub>2</sub> son una combinación de las técnicas primarias mencionadas y la adición de absorbente. El nivel de emisión asociado a estas técnicas sería de 200-400 mg SO<sub>2</sub>/Nm<sup>3</sup> para hornos vía seca.

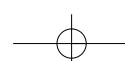
Las MTD para la reducción de las emisiones de partículas provenientes de fuentes dispersas son:

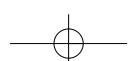
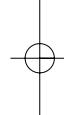
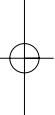
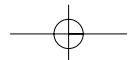
- protección de los sistemas de transporte (pavimentación y acondicionamiento de viales, cerramiento de cintas, etc)
- cerramiento total o parcial de los almacenamientos (silos de clínker, naves cerradas, pantallas de protección contra el viento, etc)
- desempolvamiento de los puntos de carga y descarga, y de transferencia en sistemas de transporte

Las MTD para la reducción de las emisiones por fuentes localizadas son, además de las técnicas primarias:

- filtros electrostáticos
- filtros de mangas

El nivel de emisión asociado a estas MTD se sitúa en 10 - 50 mg/Nm<sup>3</sup>, 30 - 50 mg/Nm<sup>3</sup> para hornos y enfriadores, 10 - 30 mg/Nm<sup>3</sup> para otras instalaciones de desempolvamiento.





## 1. INFORMACIÓN GENERAL SOBRE LA INDUSTRIA DEL CEMENTO

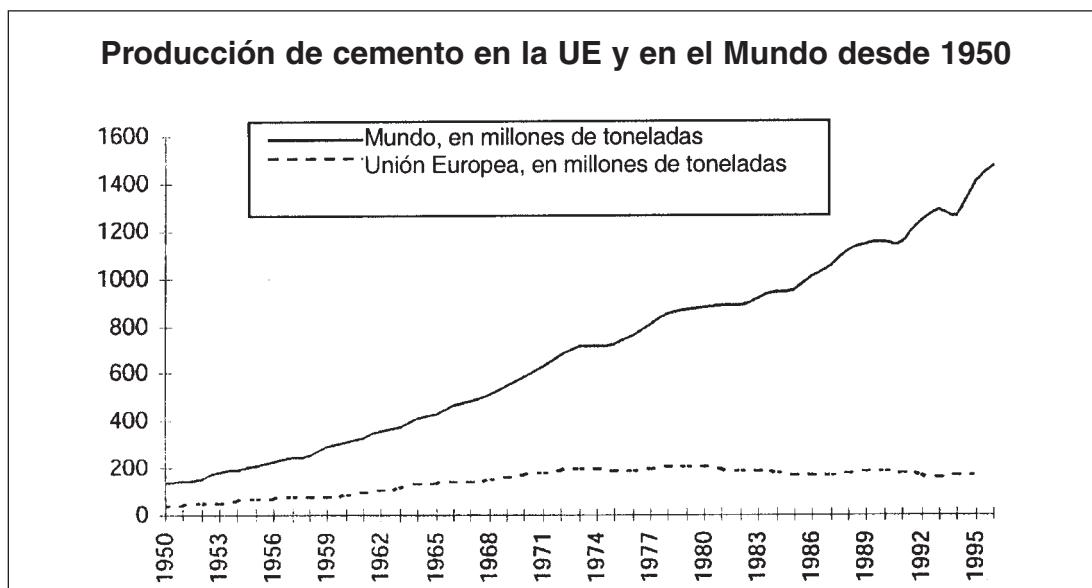
El cemento es un material inorgánico, no metálico, finamente molido que cuando se mezcla con agua y áridos forma una pasta que fragua y endurece (morteros y hormigones). Este endurecimiento hidráulico se debe principalmente a la formación de silicatos cálcicos hidratados como resultado de una reacción entre el agua y los constituyentes del cemento. Esta propiedad de conglomerante hidráulico le ha convertido en un material básico de construcción, imprescindible para la edificación y la realización de infraestructuras.

En Europa, el empleo de cementos naturales (en algunos casos sometidos a tratamientos térmicos primarios) en construcción se remonta a la antigüedad (p.e. mortero romano).

El cemento Portland fue patentado en 1824, y es el cemento más ampliamente empleado en la actualidad en la construcción con hormigón.

El consumo y producción de cemento están directamente relacionados con la marcha del sector de la construcción y, por tanto, con la coyuntura económica general.

En la figura 1.1 se aprecia que la producción mundial de cemento ha crecido progresivamente desde comienzos de los años 50, con una fabricación creciente en los países en desarrollo, particularmente en Asia, que cuenta con la mayor parte del crecimiento en la producción mundial de cemento en los años 90.



**Figura 1.1: Producción mundial de cemento desde 1950.**

[Fuente: Informe Cembureau, 1997].

En 2000 la producción mundial de cemento alcanzó los 1.670 M.t. La Tabla 1.1 muestra la distribución de la producción de cemento por regiones geográficas.

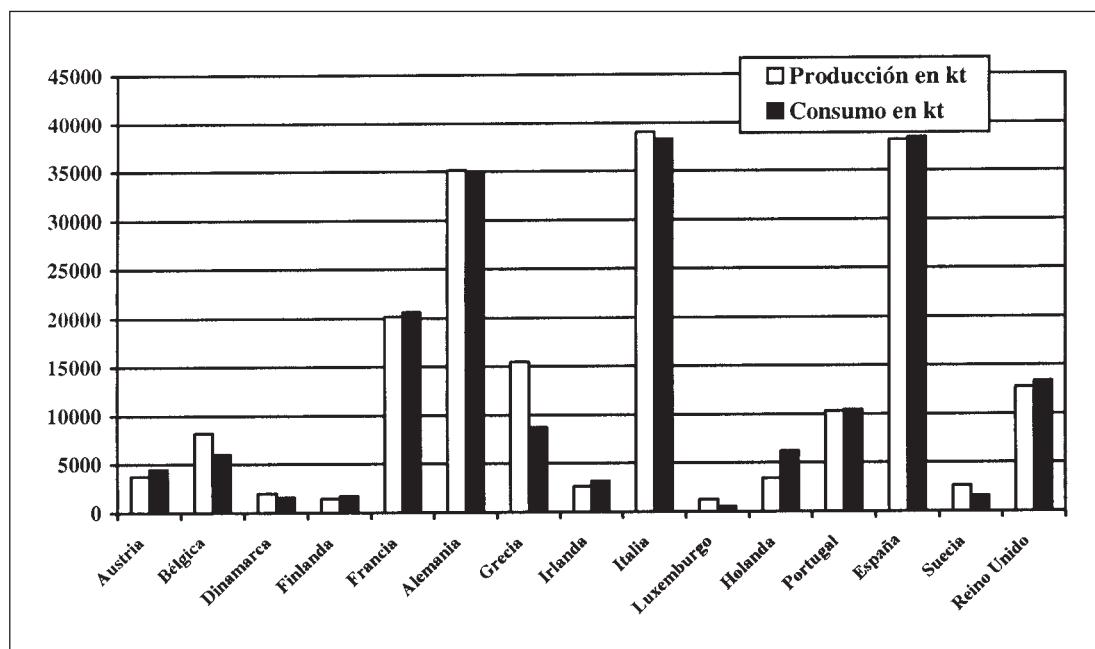
**Tabla 1.1: Producción mundial de cemento por regiones geográficas en 2000**

2000		2000	
China	36 %	Estados Unidos	5,3 %
Japón	5 %	Resto de América	8,3 %
Resto de Asia	21,2 %	Africa	4,3 %
Unión Europea	11,4 %	CEI	2,5 %
Resto de Europa	5,4 %	Oceanía	0,5 %

[Fuente: Cembureau].

En 2000, la producción de cemento en la Unión Europea totalizó 194,3 M.t y el consumo de cemento alcanzó 190,7 M.t. Se importaron 24 millones de toneladas de cemento y se exportaron 22,7 M.t, (incluido el comercio entre países de la Unión Europea.)

En la Figura 1.2 se muestran las cifras de consumo y de producción de cemento de la Unión Europea.



**Figura 1.2: Producción de cemento, incluido el clínker para exportación, y consumo de cemento en la Unión Europea en 2000.**

[Fuente: Cembureau]

El comercio mundial de cemento supone tan sólo el 6%-7% de la producción, en su mayoría transportado por mar. Hay generalmente poca importación y exportación de cemento, principalmente como resultado del alto costo del transporte por carrete-

ra. (los suministros de cemento por carretera suelen ser por lo general a distancias no mayores de 150 km). Aunque estos costes han hecho que históricamente los mercados del cemento hayan sido predominantemente locales, la progresiva globalización de la economía y la consiguiente desaparición de las trabas al comercio internacional suponen un reto para la fabricación de cemento en la Unión Europea, que sufre la presión de importaciones a bajo precio desde países de la cuenca mediterránea y de Europa del este, e incluso desde países asiáticos.

Las cifras de producción en España en los últimos 25 años han evolucionado como indica la figura 1.3, donde se observa la influencia sobre las mismas de la coyuntura económica del país (crisis de principios de los 70, mediados de los 80, inicio de los 90) .

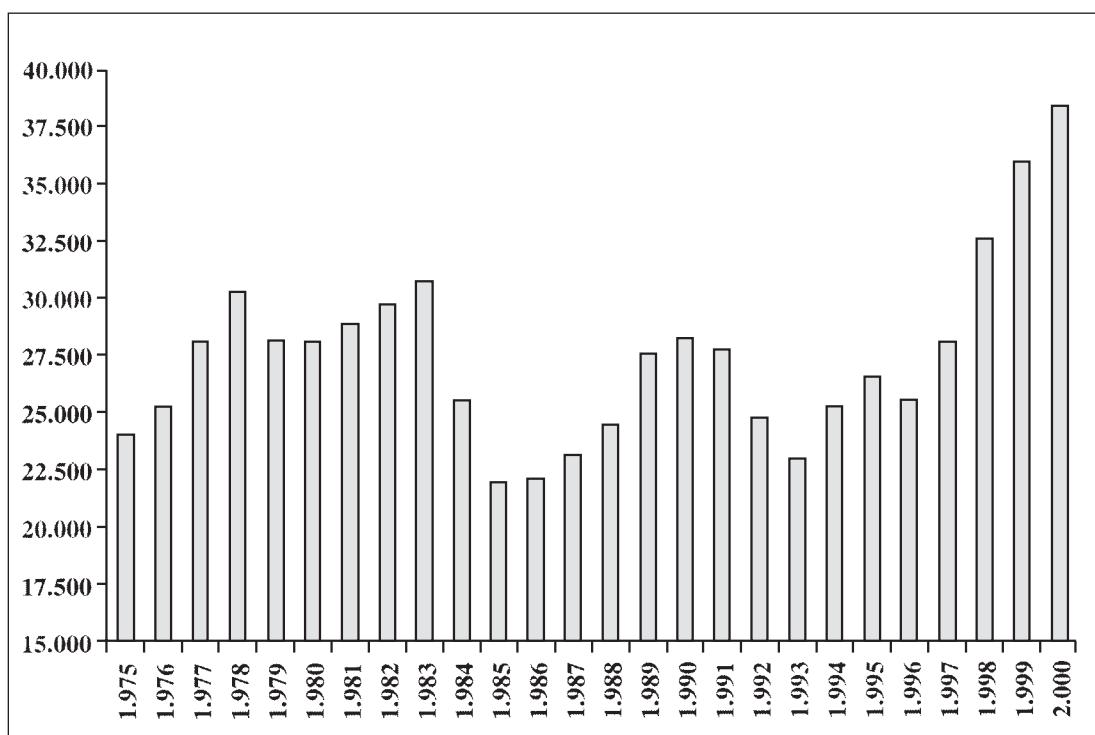


Figura 1.3. Producción de cemento en España 1975-2000 (miles de toneladas).

[Fuente: Oficemen].

España, por su condición de país costero presenta mayores niveles de comercio internacional de cemento, a través de las instalaciones portuarias, por lo que la industria cementera española compite en un mercado global totalmente liberalizado.

Hay cerca de 300 plantas de fabricación de cemento existentes en la Unión Europea. Las instalaciones de fabricación suelen ser integrales (plantas con hornos de clínker y molinos de cemento), aunque en algunos casos cuentan únicamente con instalaciones de molienda de cemento (sin horno de clínker).

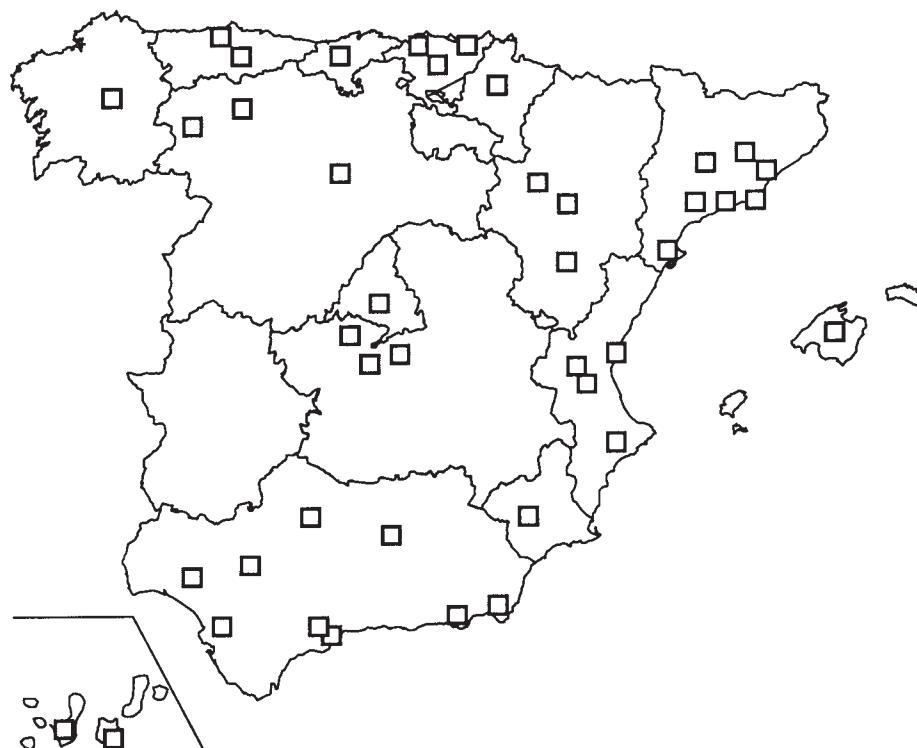
Hay más de 400 hornos en los países de la UE, aunque no todos están en funcionamiento de forma simultánea. La tendencia observada en el sector en los últimos

años ha sido incrementar la capacidad de producción de las fábricas, a la vez que se cerraban las instalaciones más antiguas y de menor capacidad. La capacidad de producción típica en las fábricas de la UE es de aproximadamente 3.000 t/día, equivalente a algo más de 1.000.000 de t al año de producción.

En España el sector de la fabricación del cemento está constituido por 17 empresas pertenecientes a 14 grupos.

La producción se realiza en 42 fábricas, de las cuales 6 son solamente de molienda.

Sus capacidades se sitúan entre las 200 a 10.000 t de cemento diarias. La distribución geográfica de estas fábricas se puede apreciar en la figura 1.4. existen 58 hornos de clínker, distribuidos entre las 36 fábricas integrales existentes.



**Fig 1.4 Distribución geográfica de las fábricas de cemento en España en 2001.**  
*[Fuente: Oficemen].*

Los fabricantes de cemento de la UE han incrementado la producción de cemento por hombre/año desde 1.700 t en 1970 a 3.500 t en 1991. Este incremento en la productividad es el resultado de la incorporación progresiva de equipos de producción de gran tamaño y muy automatizados. Estas instalaciones requieren menos personal, pero más altamente cualificado. El número de personas empleadas en la industria del cemento en la Unión Europea se cifra en cerca de 60.000, y en la española en cerca de 6.900.

La norma europea EN 197-1 de cementos comunes define las especificaciones de 27 tipos de cemento Portland, divididos en cinco grupos. Además de los anteriores, se fabrican cementos especiales para aplicaciones particulares.

El cemento se emplea fundamentalmente en construcción de edificios e infraestructuras. La tabla 1.2 indica el consumo realizado en España en las cuatro áreas básicas.

**Tabla 1.2. Consumo de cemento en España por aplicación en 2000 (%)**

AÑO	%
EDIFICACION RESIDENCIAL	32,5
EDIFICACION NO RESIDENCIAL	17,7
OBRA CIVIL	43
RENOVACION Y CONSERVACION EDIFICACION	6,8
<b>CONSUMO ESTIMADO DE CEMENTO</b>	<b>100</b>

[Fuente: Oficemen].

Además de la producción de cemento, las empresas cementeras se han diversificado también en diversos subsectores de materiales de construcción tales como extracción de áridos, plantas de hormigón, prefabricados, etc.

La industria del cemento es una industria intensiva en capital. La inversión necesaria para la construcción de una fábrica de cemento equivale aproximadamente a la facturación de tres años, lo que la convierte en una de las actividades industriales más intensivas en capital.

Los costes de fabricación más importantes son los relacionados con el consumo de energía (combustibles y electricidad), que se sitúan alrededor del 30% de los costes de producción, y los de personal.



## 2. PROCESOS Y TÉCNICAS APLICADAS

La química básica del proceso de la fabricación del cemento empieza con la descomposición del carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ) a unos  $900\text{ }^\circ\text{C}$  dando óxido cálcico ( $\text{CaO}$ , cal) y liberando dióxido de carbono gaseoso ( $\text{CO}_2$ ); este proceso se conoce como calcinación o descarbonatación. Sigue luego el proceso de clinkerización en el que el óxido de calcio reacciona a alta temperatura (normalmente  $1.400 - 1.500\text{ }^\circ\text{C}$ ) con sílice, alúmina y óxido de hierro para formar los silicatos, aluminatos y ferritos de calcio que componen el clínker. El clínker se muele conjuntamente con yeso y otras adiciones para producir el cemento.

Hay cuatro procesos para la fabricación del cemento; procesos seco, semiseco, semihúmedo y húmedo:

- En el **proceso seco**, las materias primas son trituradas y secadas para formar el crudo o harina, que tiene la forma de un polvo fluido. El crudo se alimenta a un horno con precalentador o con precalcinador, o más raramente, a un horno largo de vía seca. La Figura 2.1 muestra un diagrama de flujo de un proceso de vía seca con horno con precalcinador.

- En el **proceso semiseco**, la harina cruda seca se peletiza (granula) con agua y alimenta un precalentador de parrilla delante del horno o a un horno largo equipado con cadenas.

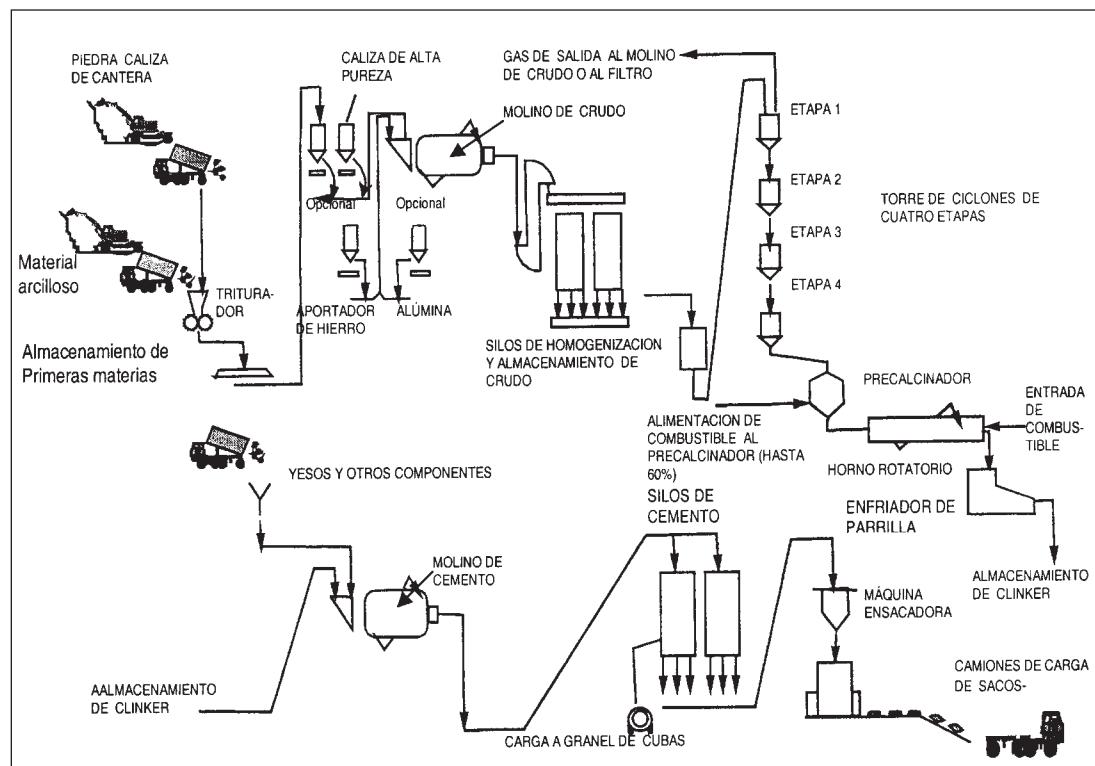


Figura 2.1: Típico proceso de vía seca con precalcinador basado sobre una instalación en funcionamiento.  
[Fuente: UK Nota IPC, 1996].

- En el **proceso semihúmedo**, la pasta de crudo y agua, es escurrida en filtros prensa. Las tortas del filtro son extruidas en forma de gránulos que alimentan bien a un precalentador de parrilla, o bien directamente a un secador de tortas de filtrado para la producción de crudo.

- En el **proceso húmedo**, las materias primas (a menudo con alto contenido de humedad) se muelen con agua para formar una pasta bombeable. La pasta es alimentada directamente al horno, o previamente se pasa por un secador de pasta.

La elección del proceso tiene una gran importancia y viene determinada por el estado de las materias primas (secas o húmedas).

En Europa, más del 75% de la producción se basa en procesos de vía seca, gracias a la disponibilidad de materias primas secas. En España este porcentaje es superior (93%): de los 58 hornos existentes 47 son de vía seca. Los procesos húmedos consumen más energía y por lo tanto tienen un mayor coste de producción. Las plantas que emplean procesos húmedos o semihúmedos lo suelen hacer porque normalmente sólo tienen acceso a materias primas húmedas. En España, este proceso sólo se da en 5 hornos de plantas del norte en que las materias primas tienen un alto contenido de humedad, y representa el 3% de la capacidad de producción. En España existen 5 hornos de vía semiseca, que representan el 3% de la capacidad de producción. Los hornos de fabricación de clínker blanco son de vía seca y semiseca, representando un 4 % de la capacidad.

Todos los procesos tienen en común los siguientes subprocesos:

- \* Obtención de materias primas
- \* Almacenamiento y preparación de materias primas
- \* Almacenamiento y preparación de combustibles
- \* Cocción de las materias primas para la obtención de clínker
- \* Molienda del clínker para obtener cemento
- \* Almacenamiento, ensacado y expedición de cemento

## 2.1. Obtención de materias primas

En la Naturaleza, existen depósitos calcáreos tales como caliza, marga o creta, que proporcionan la fuente del carbonato cálcico. La sílice, el óxido de hierro y la alúmina se encuentran en diversas menas y minerales, tales como arena, pizarra, arcilla y mena de hierro. También se pueden emplear subproductos y residuos como sustitutivos parciales de las materias primas naturales tal y como se muestra en la Tabla 2.1.

**Tabla 2.1: Tipos de residuos mas frecuentemente empleados como materias primas en la industria del cemento europea**

Cenizas volantes	Escoria de alto horno	Humo de sílice
Escoria de acería	Lodos de papeleras	Cenizas de piritas
Fosfoyesos (de la desulfuración de gases y producción de ácido fosfórico)		

[Fuente: Cembureau].

En España, los más utilizados como sustitutos de materias primas en el crudo son: escorias (de hierro y fundición), cascarillas de hierro, arenas de fundición y lodos de papeleras. También se emplean en gran cantidad las cenizas volantes de central térmica como adición para la fabricación de cemento.

La extracción de casi todas las materias primas naturales implica operaciones en canteras y minas. Los materiales se obtienen normalmente en canteras a cielo abierto. Las operaciones de extracción incluyen perforación de rocas, voladuras, excavaciones, acarreo y trituración.

Las principales materias primas, como la caliza, marga arcillosa y arcilla, se extraen de las canteras. En la mayoría de los casos la cantera está próxima a la planta. Después de la trituración primaria, las materias primas se transportan a la planta de cemento para su almacenamiento y posterior preparación. Otras materias primas, tales como minerales de hierro, escorias de alto horno o arenas de fundición, se suministran a través de fuentes externas.

## 2.2. Almacenamiento y preparación de materias primas

El tratamiento previo de las materias primas es fundamental para el subsiguiente proceso del horno. Hay que prestar especial atención a la composición química del crudo y a la adecuada finura del mismo. En el caso de la fabricación de cemento blanco hay que prestar especial cuidado a las materias primas para evitar elementos que puedan alterar el color del producto final.

### 2.2.1. Almacenamiento de materias primas

La necesidad de emplear almacenes cubiertos depende de las condiciones climáticas y del porcentaje de finos en las materias primas al salir de la planta de trituración. En el caso de una planta de 3.000 t/día de producción de clínker, el almacenamiento promedio se estima entre 20.000 y 40.000 t de material.

La alimentación de materias primas a un horno necesita ser lo más homogénea posible desde el punto de vista de su composición química. Esto se logra controlando la alimentación en la planta de molienda de crudo. Cuando el material de la cantera varía en su calidad, se puede lograr una prehomogenización inicial por apilamiento del material en capas longitudinales (o circulares) según el tipo de parque, y extrayéndolo, tomando secciones transversales de toda la pila. Cuando el material de la cantera es homogéneo, pueden emplearse sistemas de apilamiento y extracción más simples.

Las materias primas usadas en pequeñas cantidades, por ejemplo las adiciones minerales, se pueden almacenar en silos o tolvas. Las materias primas especiales, tales como cenizas volantes y fosfoyesos, deben ser almacenadas y preparadas de acuerdo a requerimientos específicos.

### **2.2.2. Molienda de materias primas**

Para lograr un crudo de composición química homogénea, es de gran importancia, que las materias primas que alimentan el molino se pesen y dosifiquen con la mayor exactitud posible. Esto es esencial para conseguir un buen funcionamiento del horno y para obtener un clínker de alta calidad. La medición y dosificación es también un factor importante de cara a la eficiencia energética del sistema de molienda. El equipo más común de pesaje y dosificación usado en la alimentación de materias primas a los molinos consta de tolvas intermedias por producto, llenadas desde el parque de materias primas o por alimentación exterior, extracción de las tolvas con básculas dosificadoras y un alimentador de banda para introducir el material al molino.

#### **Molienda de materias primas en los sistemas de vía seca y semiseca**

Las materias primas, en proporciones controladas, se muelen y se mezclan juntas para formar una mezcla homogénea con la composición química requerida. Para los sistemas de horno seco y semiseco, los componentes de las materias primas se muelen y se secan hasta lograr un polvo fino, haciendo uso principalmente de los gases calientes de salida del horno y/o del aire de salida del enfriador de clínker. Para las materias primas con alto contenido de humedad, y en los procesos de arranque, puede necesitarse un hogar auxiliar para proporcionar calor adicional.

Los sistemas más usuales de molienda en seco son:

- molino de bolas con descarga central
- molino de bolas, barrido por aire
- molino vertical de rodillos
- molino horizontal de rodillos (sólo hay unas pocas instalaciones hasta ahora).

Otros sistemas de molienda, menos frecuentemente empleados son:

- molino de bolas con descarga final en circuito cerrado
- molino en circuito abierto
- prensa de rodillos, con o sin secador triturador.

La finura y la distribución granulométrica de las partículas de crudo que salen del sistema de molienda son de la mayor importancia para el subsiguiente proceso de calcinación. El patrón fijado para estos parámetros se alcanza mediante el ajuste del separador empleado para la clasificación del producto que sale del molino. En la molienda de vía seca, se emplean separadores de aire.

#### **Molienda de materias primas, en los sistemas de vía húmeda o semihúmeda**

Los hornos de vía húmeda o semihúmeda emplean la molienda húmeda. Los componentes de las materias primas se muelen junto con agua añadida para formar

una pasta. Para lograr la finura requerida de la pasta, que cumpla con las demandas de calidad, suelen utilizarse los sistemas de molienda en circuito cerrado.

La pasta que sale del proceso de molienda, requiere posteriormente una mezcla y homogeneización para lograr la óptima composición del crudo, antes de ser enviada al horno. La pasta se almacena en balsas, tanques o bien en silos.

### 2.3. Almacenamiento y preparación de los combustibles

Se pueden emplear diversos combustibles para proporcionar la energía térmica requerida por el proceso. Hoy en día, se emplean principalmente tres diferentes tipos de combustibles en el calentamiento del horno de cemento; en orden decreciente de importancia en Europa son:

- coque de petróleo y/o carbón pulverizado
- residuos orgánicos
- fuelóleo pesado
- gas natural.

Los principales combustibles empleados en la industria cementera española son coque de petróleo y carbón (carbones bituminosos y lignitos). El elevado coste impide normalmente el empleo de gas natural o fuelóleo, pero la elección del combustible depende de la situación local (un ejemplo es la aplicación de carbones nacionales donde se puedan obtener).

Los principales constituyentes de las cenizas de estos combustibles son compuestos de sílice y alúmina. Estos se combinan con las materias primas formando parte del clínker. El contenido y composición de las cenizas influye en el cálculo de la composición del crudo, por lo que es deseable emplear un combustible con un contenido bajo en cenizas.

Las altas temperaturas y los largos tiempos de permanencia de los gases en el horno, implican un considerable potencial para la destrucción de los compuestos orgánicos. Esto permite emplear como combustibles de sustitución, residuos de otros procesos.

En el caso de fabricación del cemento blanco la selección de combustibles debe hacerse con especial cuidado para evitar elementos que puedan alterar el color del producto final por lo que no es posible en general el uso de los combustibles alternativos anteriormente mencionados.

#### 2.3.1. Almacenamiento de combustibles

El carbón y el coque de petróleo se almacenan de forma similar a las materias primas, en muchos casos, en almacenes cubiertos. La formación de montones grandes y compactos exteriores a cielo abierto se emplea para los almacenamientos de larga duración. Estos montones deben ser tratados para prevenir la erosión por lluvia y del viento (riego asfáltico, riego con agua y materiales tensoactivos, cubrir con hierba, etc.). Si hay suelos de hormigón bajo los montones apilados, se puede recoger y depurar el agua de los drenajes. Cuando se almacena carbón de relativamente alto contenido en materias volátiles, se necesita observar una buena práctica en términos de

compactación y altura de las pilas, para evitar el riesgo de ignición espontánea, cuando se almacena por períodos largos.

El carbón y el coque de petróleo pulverizados se almacenan exclusivamente en silos. Por razones de seguridad (como el riesgo de autoignición o explosiones causadas por electricidad estática), estos silos deben estar equipados con medios de seguridad. En la mayoría de los casos disponen de válvulas antiexplosión y sistemas de inerteización con CO<sub>2</sub> o nitrógeno.

El fuelóleo se almacena en tanques de acero. Para poder bombear el fuelóleo se precisa calentarla con objeto de aumentar su fluidez. Esto se logra mediante sistemas de calentamiento con vapor o con aceite térmico y el calorifugado de las conducciones.

El gas natural no se almacena en la planta de cemento. Normalmente se suministra directamente desde las redes de distribución de gas.

### **2.3.2. Preparación de los combustibles**

La preparación del combustible sólido (trituración, molienda y secado) se suele llevar a cabo normalmente in situ. El carbón y el coque de petróleo son pulverizados casi a la finura de la harina cruda en plantas de molienda que emplean equipos similares a las plantas de molienda de materias primas.

La mayor parte del combustible que se alimenta al horno (65-85%) tiene que estar finamente molida, mientras que el resto (15-35%) puede ser alimentado sin pulverizar (p.e. neumáticos enteros o troceados), siendo introducido por puntos alternativos al quemador. Ver punto 2.3.3. “Empleo de residuos como combustible”.

La finura del combustible pulverizado es muy importante. Si es demasiado fino, las temperaturas de la llama pueden ser demasiado elevadas. Si es demasiado grueso, puede ocurrir una mala combustión. El combustible sólido de bajo contenido en volátiles necesitará una trituración más fina. Si no se dispone de suficiente aire caliente para el secado, proveniente del horno o del enfriador, tiene que instalarse un hogar auxiliar. Es fundamental la instalación de dispositivos especiales para proteger el equipo contra fuegos y explosiones.

Se emplean tres sistemas principalmente de trituración y molienda de combustible:

- molino de bolas, barrido por aire
- molino vertical
- molino de impactos.

El combustible sólido molido puede llevarse directamente al quemador del horno, pero en las instalaciones modernas se almacena generalmente en silos desde los que se alimentan los sistemas de dosificación a los quemadores primarios y secundarios del horno. La molienda del combustible sólido, su almacenamiento y los sistemas de calentamiento tienen que ser diseñados y operados de tal forma que se evite el riesgo de explosión o de fuego.

Se debe controlar adecuadamente la temperatura del aire y evitar la acumulación de material fino en puntos muertos expuestos al calor.

En el caso de utilizar fuelóleo, para facilitar su manipulación y combustión, el fuelóleo se calienta a 120-140 °C, lo que reduce su viscosidad a 10-20 cSt. Adicionalmente, se eleva la presión a 20-40 bar.

Preparación de gas natural: Antes de la combustión tiene que reducirse la presión de la tubería de 30-80 bar a la presión de la red de la planta de 3-10 bar y luego reducir de nuevo a la presión de suministro al quemador, alrededor de 1 bar (sobrepresión). La primera etapa de reducción de presión se realiza en la estación de transferencia del gas, donde también tiene lugar la medida de consumo. Para evitar la congelación del equipo como resultado del efecto Joule-Thompson se precalienta el gas natural antes de pasar a través de la válvula de reducción de presión.

### 2.3.3. Empleo de residuos como combustible

El empleo de combustibles alternativos es una práctica asentada en la mayoría de los países desarrollados desde hace más de veinte años, entre los que destacan por el nivel de substitución con residuos: Japón, Suiza, Estados Unidos, Bélgica, Alemania y Francia.

En el año 2000, más del 13 % de los combustibles utilizados en la industria cementera de la Unión Europea fueron alternativos. Aproximadamente un tercio de los hornos de cemento instalados (unos 150 de los casi 450 existentes) emplean combustibles alternativos, con un consumo total equivalente a más de 3 millones de toneladas de carbón. El nivel de sustitución mantiene una tendencia creciente, y en algunas regiones se ha superado la cifra del 50 %.

En la tabla 2.2 podemos ver las cantidades empleadas de algunos residuos y los países en los que más se utilizan.

**Tabla 2.2 Ejemplos de residuos utilizados en la Unión Europea en 1997**

RESIDUO	PAÍSES CON MAYOR UTILIZACIÓN	TOTAL (t)
Combustibles líquidos (aceites, disolventes, pinturas)	Austria, Bélgica, Francia, Alemania, Italia, Reino Unido	600.000.-
Neumáticos usados	Austria, Francia, Alemania, Italia, Suecia, Reino Unido	450.000.-
Residuos de Papel	Austria, Bélgica, Francia	200.000.-
Residuos de Plástico	Austria, Bélgica, Francia, Alemania, Italia, Suecia	250.000.-
Harinas Animales *Estimación Cembureau 2001	Austria, Alemania, República Checa, Eslovaquia, España, Francia, Suecia, Suiza, Dinamarca, Italia.	505.000.-

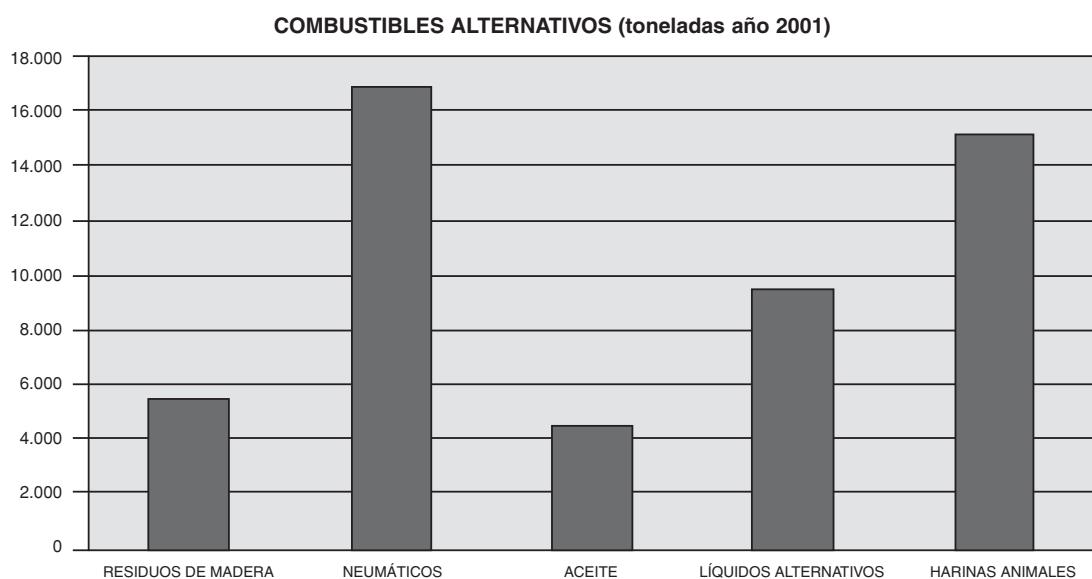
[Fuente: Cembureau, British Cement Association, Oficemen].

Además de los residuos relacionados en la tabla 2.2, las fábricas de cemento de la Unión Europea emplean como combustibles alternativos residuos agrícolas y ganaderos (como harinas o grasas animales, biomasa, etc.), de la industria del caucho, lodos industriales, lodos de depuración de aguas residuales y otros que cumplen con los requisitos necesarios.

El sector cementero español utilizó en el año 2001 unas 52.000 t de residuos como combustibles alternativos, que supusieron poco más del 1% del consumo térmico de los hornos de clínker. Estos residuos fueron principalmente:

- Neumáticos
- Harinas animales
- Líquidos (disolventes, barnices, ...)
- Residuos de madera
- Aceites usados

**Gráfico 2.1 Residuos utilizados por el sector cementero español como combustibles alternativos**



### 2.3.3.1. Condiciones termoquímicas de los hornos de clínker

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

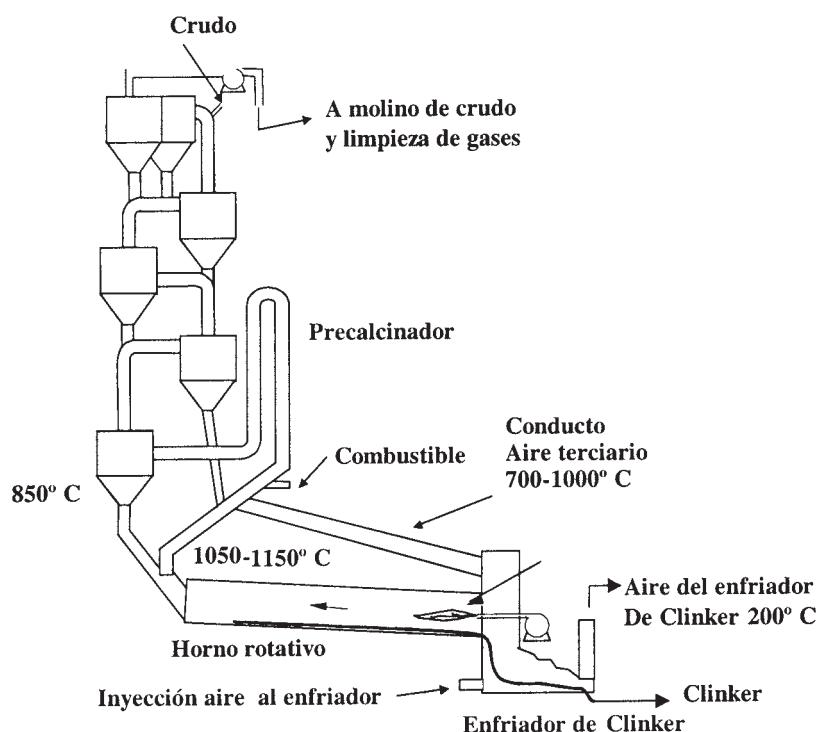
a) En el mechero principal, presente en todos los hornos, situado en la parte más baja del horno rotatorio. La llama alcanza una temperatura cercana a los 2.000 °C. Los gases de combustión se mantienen a más de 1.200 °C durante un tiempo superior a 5 segundos, en atmósfera oxidante.

b) En la zona del horno en que se produce la descarbonatación de la caliza (calcincación), en la que la combustión se realiza a temperaturas cercanas a los 1.200 °C,

manteniéndose los gases a una temperatura superior a 850 °C durante unos 3 segundos.

La ubicación concreta de la 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 (figura 2.2). 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 vía seca que no disponen de precalcinador o en hornos vía semiseca o semihúmeda, la combustión puede realizarse en la primera zona del horno rotatorio. Este sistema está especialmente indicado para combustibles densos y alimentados en tamaños relativamente grandes (pe.: neumáticos enteros o troceados, figura 2.3).
- ⇒ En hornos vía húmeda o en hornos largos, la alimentación de combustibles alternativos puede realizarse en una zona adecuada del horno rotatorio (sistema patentado 'Mid Kiln', figura 2.4). La apertura realizada en el horno rotatorio y el sistema de compuertas permite que se pueda alimentar combustible en cada rotación del horno.



**Figura 2.2. Esquema de horno con intercambiador de ciclones y precalcinador**

[Fuente: Informe "Empleo de residuos como combustibles alternativos en la industria del cemento". Energie. Comisión Europea].

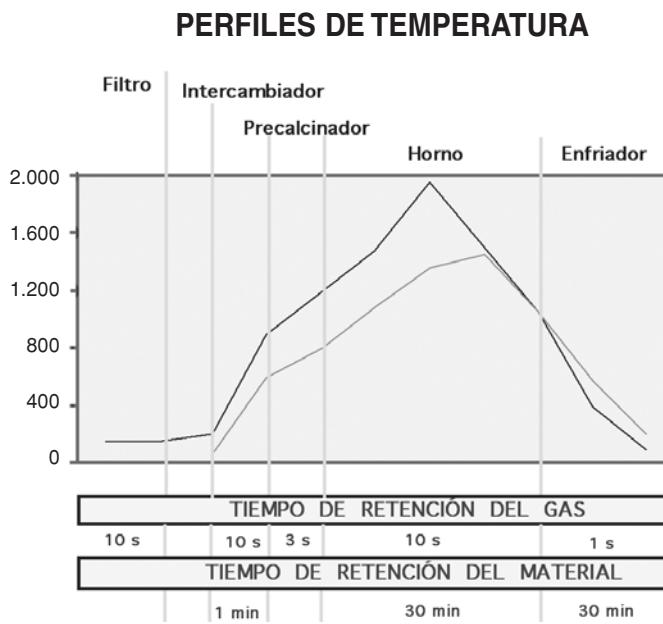


Figura 2.2 (continuación).

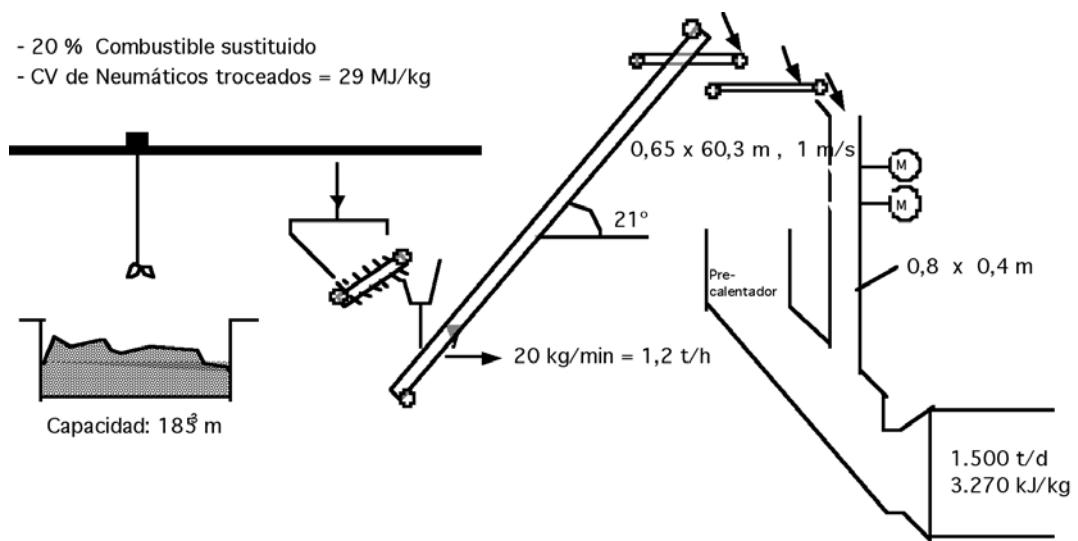
[Fuente: Informe “Empleo de residuos como combustibles alternativos en la industria del cemento”. Energie. Comisión Europea].

En las condiciones de combustión descritas, los compuestos orgánicos contenidos en los residuos son destruidos, dando como resultado la formación de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ . La energía liberada en la combustión se aprovecha en el proceso de fabricación de clínker.

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. Estos gases son neutralizados y absorbidos en su práctica totalidad por la materia prima, de naturaleza alcalina. Las sales inorgánicas formadas se incorporan al clínker.

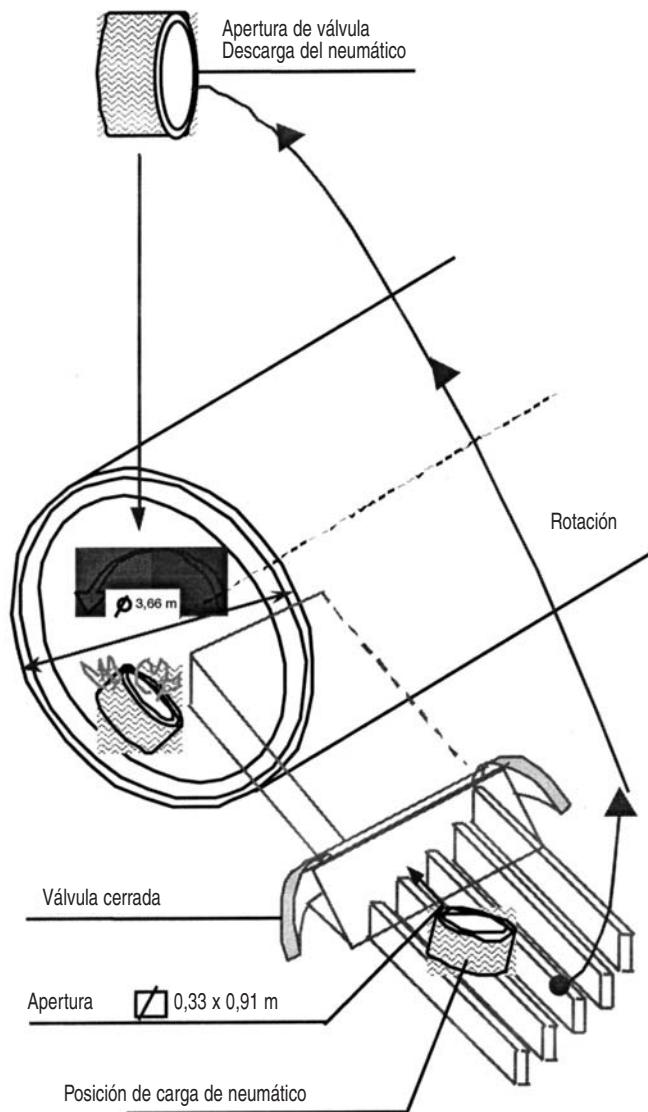
En caso de que los residuos contengan metales, su presencia será controlada en las emisiones. Los numerosos estudios realizados sobre el comportamiento de los metales han demostrado que éstos son retenidos mayoritariamente en el clínker, con cifras de retención muy próximas al 100%, salvo para metales relativamente volátiles como el mercurio y el talio, que deberán ser controlados y limitados en los residuos que entran en el horno.

Por otra parte, los combustibles alternativos pueden aportar minerales que contribuyan a formar los compuestos del clínker. Los neumáticos usados, por ejemplo, además de energía aportan hierro para la composición del clínker. En este caso, además de la valorización energética, la materia prima contenida en el residuo se recicla en el clínker.



**Figura 2.3. Alimentación de neumáticos troceados al horno. Ejemplo.**

[Fuente: Informe “Empleo de residuos como combustibles alternativos en la industria del cemento. Energie. Comisión Europea].



**Figura 2.4. Esquema de funcionamiento del sistema “MID-KILN”.**

[Fuente: Informe “Empleo de residuos como combustibles alternativos en la industria del cemento. Comisión Europea].

### 2.3.3.2. Limitaciones a la sustitución con combustibles alternativos

La utilización de residuos y subproductos como combustibles alternativos no debe perjudicar el comportamiento ambiental de la instalación ni dificultar la operación de la fábrica o afectar a la calidad del cemento.

Las limitaciones en cuanto a los tipos de residuos derivan de los considerandos anteriores.

La presencia de cloro en el horno puede dar lugar a problemas de pegaduras y atascos durante el proceso de fabricación. Además, el contenido en cloro en el cemen-

to está limitado al 0,1 % en peso, por lo que debe garantizarse que el empleo de combustibles alternativos no introduzca cantidades significativas de cloro en el proceso.

Por otra parte, ya se ha comentado que los metales más volátiles (Hg, Tl) no son retenidos al 100% por la acción del horno, por lo que se emplean residuos con contenidos lo suficientemente bajos de estos elementos.

Tampoco pueden tratarse residuos radioactivos.

En cuanto a los residuos orgánicos de origen sanitario u hospitalario, las empresas cementeras son reacias a utilizarlos, aunque no hay limitaciones tecnológicas que lo justifiquen.

Las autoridades ambientales competentes establecen en los permisos las limitaciones en cuanto a composición y cantidad de residuos, de forma que se garantice la compatibilidad ambiental de la actividad. También establecen los límites de emisión que debe respetar la instalación durante la combustión de los residuos, los cuales son normalmente más estrictos que los límites habituales, intentando que el ahorro de costes energéticos obtenido por el operador revierta de alguna forma en inversiones y mejoras ambientales añadidas.

### **2.3.3.3. Preparación de combustibles alternativos**

Aunque existen ejemplos de utilización de gases residuales como combustibles en fábricas de cemento, la práctica totalidad de los combustibles alternativos empleados en las fábricas de cemento son sólidos o líquidos.

Los combustibles sólidos (neumáticos, papel, plástico) 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.

Los combustibles líquidos (lubricantes, disolventes, etc.) pueden en su mayoría alimentarse al horno en su composición original, aunque normalmente se les somete a procesos de mezcla y homogeneización en plantas específicamente diseñadas (plantas de preparación de residuos), 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.

Las plantas de preparación de residuos 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.

### **2.3.3.4. Manipulación de residuos y alimentación al horno**

Una vez autorizada por parte de la autoridad ambiental la utilización de residuos como combustibles alternativos en el horno de cemento, la gestión de los mismos en la fábrica se estructura en cuatro etapas (tabla 2.3):

**1º Recepción:** Cada cargamento entrante en la fábrica es sometido a un control e inspección, que incluye desde el pesaje y observación visual, hasta la analítica completa para determinados residuos peligrosos.

En esta fase se toman las precauciones necesarias para asegurar que el residuo es efectivamente uno de los autorizados para ser utilizados en la fábrica, y que no ha sido manipulado o contaminado con residuos no autorizados.

**2º Almacenamiento:** el residuo es descargado en fábrica para su almacenamiento temporal, con una capacidad que supone normalmente varios días de utilización y cuyo fin es regular adecuadamente el flujo de residuos al horno.

El tipo de almacenamiento y los sistemas de carga y descarga se diseñan de forma que se garantice la seguridad, incluyendo sistemas de protección contra incendios y medios de protección contra vertidos al suelo y agua de los residuos.

Los residuos líquidos se almacenan en depósitos estancos, dotados de sus correspondientes cubetos de protección contra posibles pérdidas o derrames.

Los residuos sólidos se almacenan en acopios, en naves o en tolvas.

**3º Alimentación al horno:** Desde el almacenamiento, los residuos son transportados hasta el punto de entrada al horno: el quemador principal o la zona de calcinación descrita en el punto 2.3.3.1.

Los residuos líquidos pueden alimentarse a uno u otro, y son inyectados mediante bombas hidráulicas en tuberías a presión.

Los quemadores se diseñan específicamente para que la combustión se realice en las condiciones de temperatura, turbulencia y exceso de oxígeno más favorables.

Los residuos sólidos suelen alimentarse por medios mecánicos o neumáticos, en función fundamentalmente de su granulometría:

- ⇒ Cuando se trata de materiales gruesos (neumáticos enteros o troceados, balas de plástico y papel, 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 (recordemos que el horno está en depresión por acción del ventilador ubicado aguas abajo de la corriente de gases).
- ⇒ En el caso de residuos sólidos de pequeña granulometría (caucho triturado, plástico troceado, etc.) la alimentación puede realizarse a través de tuberías en las que el residuo es arrastrado por aire.

**4º Control de proceso:** La alimentación al horno se debe realizar únicamente cuando las condiciones de combustión y el funcionamiento de los filtros garantizan la

destrucción de los compuestos orgánicos presentes en el residuo y el cumplimiento de los límites de emisión a la atmósfera.

Se deben controlar de forma continua con equipos automáticos tanto las condiciones de la llama (temperatura y contenido en oxígeno), como las emisiones a la atmósfera de los contaminantes establecidos legalmente, y que incluyen las partículas, los óxidos de azufre y los óxidos de nitrógeno. En algunos casos se requiere el control en continuo de los gases ácidos (HCl, HF) y los compuestos orgánicos. Además, se deben realizar mediciones periódicas de las emisiones de metales pesados y de dioxinas y furanos.

Los hornos de cemento deben disponer de sistemas de corte de la alimentación de residuos cuando cualquiera de los parámetros de control del proceso incumplen las exigencias establecidas en los permisos de operación. Se garantiza de esta forma que los residuos son tratados de forma segura y eficaz.

**Tabla 2.3. Esquema de gestión de combustibles alternativos en una fábrica.**

RESIDUO	RECEPCIÓN	ALMACENAMIENTO	ALIMENTACIÓN	CONTROL
Residuos Líquidos	Inspección Toma de Muestras Análisis (si procede)	Tanques Depósitos	Transporte Hidráulico Inyección al Horno	Caudal de residuo
Residuos Sólidos Gruesos	Inspección Tomas de Muestras (si procede) Análisis (si procede)	Acopios Naves	Transporte Mecánico Alimentación gravimétrica	Condiciones de combustión: -Temperatura -Oxígeno Emisiones: -Partículas -SO <sub>2</sub> -NO <sub>x</sub> -HCl, HF -Metales pesados -Comp. Orgánicos
Residuos Sólidos Finos	Inspección Toma de Muestras Análisis (si procede)	Naves Silos Tolvas	Transporte mecánico y/o neumático Alimentación gravimétrica o inyección por aire	

[Fuente: Oficemen].

El conjunto de instalaciones para la gestión de los combustibles alternativos suponen una inversión en equipos cuya cuantía varía en función de las dificultades de manipulación del residuo y de las precauciones que deban tomarse.

En los casos más favorables, tales como los residuos líquidos no peligrosos, la inversión podría ser inferior al millón de euros. Cuando los equipos deben diseñarse para tratar residuos voluminosos y/o peligrosos, las cifras de inversión pueden acercarse a los cinco millones de euros. Estas cifras incluyen los sistemas de control y análisis, los almacenamientos y sus sistemas de protección y los equipos de alimentación al horno. No se incluyen los costes de operación, que dependerán del tipo de residuo y de los controles externos exigidos por las autoridades. Además, si fuera necesario, habría que sumar las inversiones en equipos de depuración para adecuar el comportamiento de la fábrica a las mayores exigencias medioambientales.

## 2.4. Cocción del clínker

Esta parte del proceso es la más importante en términos de emisiones potenciales, de calidad del producto y del coste. Para la fabricación de clínker, el crudo (o harina), o la pasta en la vía húmeda se lleva al sistema de horno donde se seca, se precalienta, se calcina y se sinteriza para producir clínker de cemento. El clínker se enfriá con aire y luego se almacena.

En el proceso de formación del clínker (también llamado clinkerización o sinterización) es esencial mantener las temperaturas del material en el horno entre 1.400 - 1.500 °C, que se corresponden con unas temperaturas de llama de cerca de 2.000 °C.

La reacción de clinkerización se realiza bajo condiciones oxidantes. Por lo tanto se requiere un exceso de aire en la zona de clinkerización del horno.

La fabricación de clínker blanco presenta excepciones a las dos características anteriormente mencionadas. Por una parte las materias primas no contienen fundentes, ya que éstos podrían aportar coloración al producto final. Esto hace que las temperaturas de clinkerización estén entorno a los 1.600 °C, lo cual exige temperaturas de llama mayores a los 2.000 °C. Por otra parte en algunos casos es necesario trabajar en condiciones reductoras, lo que incrementa el consumo energético.

Desde que se introdujo el horno rotatorio, allá por el año 1895, ha llegado a ser la parte central de todas las instalaciones modernas de producción de clínker. El horno vertical se emplea todavía para la producción de cal, pero sólo en muy pocos países está en uso para la producción de clínker de cemento, y en estos casos en plantas de pequeña escala.

El horno rotativo consta de un tubo de acero con una relación de longitud a diámetro de entre 10:1 y 38:1. El tubo es soportado por dos a siete (o más) estaciones de apoyo, tiene una inclinación de 2,5 a 4,5% y una velocidad de rotación de 0,5 a 4,5 revoluciones por minuto. La combinación de la inclinación del tubo y la rotación causa que el material discurre lentamente a lo largo de él. Para proteger la chapa de las altas temperaturas, el horno rotativo se forra completamente con ladrillos refractarios resistentes al calor. Los hornos largos de vía húmeda están equipados con aditamentos internos como las cadenas, para mejorar la transferencia térmica.

Pueden ocurrir obstrucciones transitorias de material alrededor de la superficie interior del horno, dependiendo del proceso y de las materias primas. Estas obstrucciones se conocen como anillos y pueden ocurrir en la zona de entrada del material al horno, cerca de la zona de clinkerización, o en la zona de salida del clínker. Los últimos dos tipos pueden romperse de repente y causar una avalancha de material mal cocido, que normalmente puede ser reprocesado. Los ciclones de las torres de precalentamiento y las parrillas de los hornos con precalentador pueden estar sujetos también a obstrucciones de material que pueden dar lugar a taponamientos.

## Calentamiento del horno

El combustible introducido a través del quemador principal produce la llama principal con unas temperaturas de llama alrededor de 2.000 °C. Por razones de optimización del proceso, la llama tiene que ser ajustada dentro de ciertos límites. En los quemadores modernos, el tamaño de la llama se ajusta mediante la regulación de los aires primario (10-15% del total del aire de combustión) y secundario.

Los puntos potenciales de alimentación de combustible al horno son:

- a través del quemador principal, situado en el extremo de salida del horno rotativo
- a través de los quemadores secundarios en el conducto de entrada al horno
- a través de los quemadores del precalcinador en hornos con precalcinador
- a través de la tolva de alimentación al precalcinador (para combustible no pulverizado)
- a través de una válvula de alimentación situada en la mitad del horno en el caso de hornos largos (para combustibles no pulverizados).

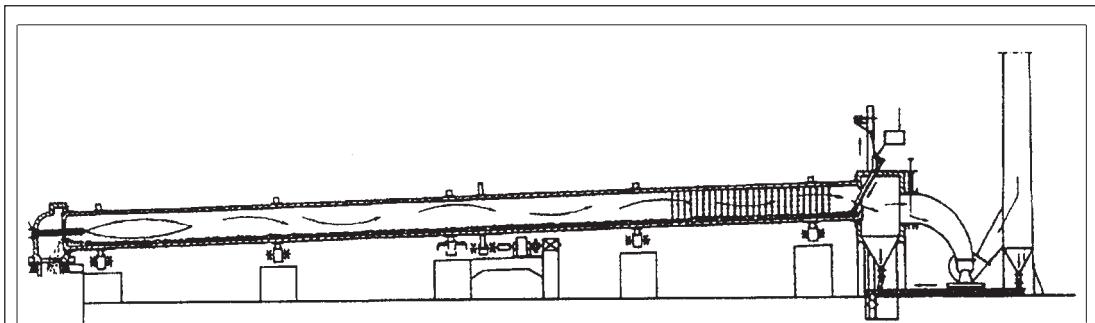
En el caso de utilizar carbón/coque de petróleo como combustible, se puede alimentar directa o indirectamente. En el caso de inyección directa no se requiere almacenamiento de carbón molido. El combustible pulverizado se inyecta directamente dentro del horno con el aire de barrido del molino actuando como agente de transporte y como aire primario. Las plantas de alimentación directa tienen un gran número de desventajas. Entre otras, las pérdidas de calor del horno están alrededor de 200-250 MJ/tonelada de clínker (6 a 8% más alto que los modernos sistemas de horno). Por consiguiente la inyección directa no se utiliza normalmente hoy día, siendo nulo su uso en las instalaciones españolas.

El fuelóleo, a viscosidad y presión adecuadas, se inyecta a través de una boquilla de atomización en el horno. La configuración de la llama se regula mediante el aire primario, que se introduce por multicanales situados alrededor de la boquilla inyectora de fuelóleo, que ocupa una posición central.

Los quemadores del horno para gas natural, se diseñan de acuerdo al principio de los multicanales, con lo cual el gas reemplaza no sólo al carbón o fuelóleo, sino también al aire primario.

### 2.4.1. Hornos rotativos largos

Los hornos rotativos largos (Figura 2.5) se pueden alimentar con pasta, tortas de filtrado molidas, nódulos o crudo seco y por ello, son aptos para todos los tipos de proceso. Los hornos largos más grandes tienen una relación longitud a diámetro de 38:1 y pueden tener más de 200 metros de longitud. Estas enormes unidades producen alrededor de 3.600 toneladas/día empleando el proceso húmedo (Bélgica, USA, antigua Unión Soviética). Los hornos rotativos largos están diseñados para secar, precalentar, calcinar y clinkerizar, de tal manera que sólo se completan con el sistema de alimentación y el enfriador. La parte primera de los hornos largos va equipada con pantallas de cadenas para mejorar la transferencia térmica.



**Figura 2.5: Horno rotativo largo de vía húmeda con cadenas para intercambio térmico.**  
 [Fuente: Cembureau, 1997].

Los hornos de proceso húmedo, empleados desde 1895, son los tipos más antiguos de hornos rotativos empleados en la producción de clínker de cemento. Este tipo de hornos se empleó inicialmente con materias primas húmedas, más fáciles de homogeneizar en dilución con agua. La alimentación típica del horno húmedo contiene de 32 a 40% de agua, necesaria para mantener su fluidez. Este agua tiene que ser evaporada en la zona de secado diseñada especialmente en la sección de entrada del horno, en donde se consume una porción significativa de calor consumido en el horno. Esta tecnología tiene un consumo específico de calor superior a la vía seca, lo que conlleva a una mayor emisión de gases de combustión y de vapor de agua.

#### 2.4.2. Hornos rotativos equipados con precalentadores

Los hornos rotativos equipados con precalentadores tienen una relación típica de longitud a diámetro de entre 10:1 y 17:1. Hay dos tipos de precalentadores: precalentadores de parrilla y de suspensión.

##### Tecnología del precalentador de parrilla

La tecnología del precalentador de parrilla, mejor conocido como horno Lepol, se inventó en 1928. Representa la primera instalación en que parte del proceso de cocción (la calcinación) tiene lugar en una instalación estacionaria fuera del horno. Permite que el horno rotativo sea más corto y reducir así la pérdida de calor e incrementar la eficiencia energética del total de la instalación.

En el precalentador de parrilla (ver Figura 2.6a) los gránulos hechos con harina cruda y agua en un plato granulador (proceso semiseco) o las tortas filtradas de lechada húmeda en un extrusor (proceso semihúmedo) se alimentan a una parrilla horizontal móvil que se desplaza a través de un túnel cerrado. Las placas de la parrilla permiten el paso de aire a través de las mismas. El túnel se divide en una cámara de gas caliente y una cámara de secado separadas por un tabique atravesado por la parrilla. El gas de salida del horno rotativo, aspirado por un ventilador, pasa primeramente a través de las capas de gránulos en la cámara de gas caliente y luego a través de los ciclones del colector intermedio de polvo. En estos ciclones se eliminan las partículas grandes de polvo, que causarían desgastes en el ventilador. Un segundo ventilador dirige el gas a la parte superior de la cámara de secado, atravesando las capas húme-

das de gránulos, y finalmente lo lleva al colector de polvo. Para conseguir una óptima eficacia térmica, los precalentadores de parrilla semihúmedos pueden equiparse con sistemas de triple paso de gas. El tamaño máximo de sistema de horno semihúmedo construido es de 3.300 toneladas/día.

El gas de salida del horno rotativo entra en el precalentador con una temperatura de 1.000 - 1.100 °C. Mientras que fluye a través de las capas de material en la cámara de gas caliente, el gas de salida se enfriá a 250 - 300 °C, y sale de la cámara de secado a 90 - 150 °C. El material a calentarse alcanza una temperatura de alrededor de 150 °C en la cámara de secado y de 700 - 800 °C en la cámara de calentamiento.

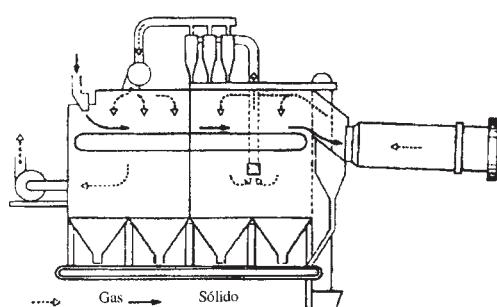


Figura 2.6a: Prekalentador de parrilla

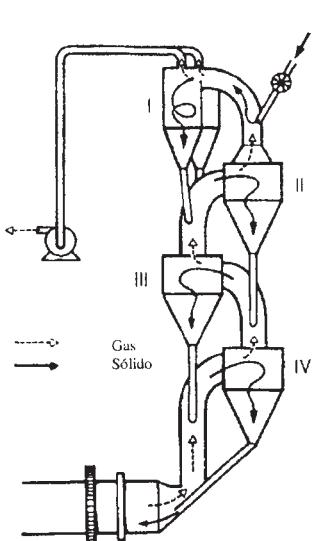


Figura 2.6 b: Prekalentador de suspensión

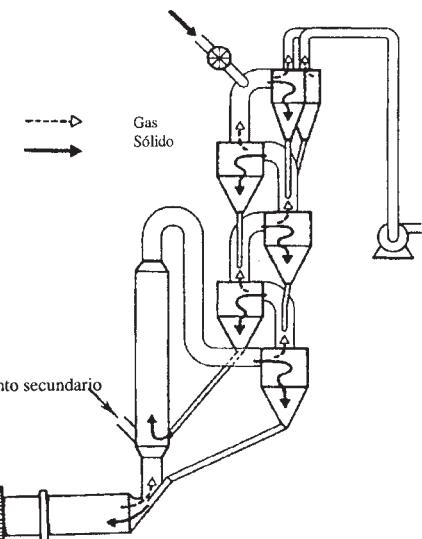


Figura 2.6c: Prekalentador de suspensión con precalcinador

Figura 2.6: Diagramas esquemáticos de diferentes prekalentadores.  
[Fuente: Ullmann's, 1986].

### Tecnología del prekalentador de suspensión

La invención del prekalentador de suspensión o intercambiador de calor de ciclones en los comienzos de los años 30 fue una gran innovación en el proceso cementero. El prekalentamiento e incluso la calcinación parcial del crudo seco (procesos seco y semihúmedo) tiene lugar por el mantenimiento de la harina cruda en suspensión con los gases calientes de salida del horno rotativo.

Se pueden aplicar diversos sistemas de precalentador en suspensión. Generalmente tienen entre cuatro y seis etapas de ciclones, los cuales se colocan uno sobre otro en una torre de 50-120 metros de altura. La etapa mas alta puede llevar dos ciclones paralelos para separar mejor el polvo. Los gases de salida del horno rotativo fluyen a través de las etapas de ciclones desde la parte inferior a la superior. La mezcla de materias primas pulverulentas secas se añade al gas de salida antes de la última etapa superior de ciclones. Se separa del gas en los ciclones y se alimenta antes de la siguiente etapa de ciclones. Este procedimiento se repite en todas las etapas hasta que finalmente el material se descarga desde la última etapa en el horno rotativo. Esta alternancia de mezclado, separación y nuevo mezclado cada vez a temperaturas más altas permite la óptima transferencia térmica entre el calor de los gases de salida y la harina cruda.

Existen problemas con los precalentadores de suspensión en los casos en que las materias primas y/o el combustible, contengan cantidades elevadas de materiales como cloruros, sulfatos y álcalis. Los ciclos altamente enriquecidos de estos elementos conducen a pegaduras en las paredes de los ciclones y conductos, que frecuentemente causan taponamientos con las consiguientes paradas del horno durante bastantes días. El desvío del gas del horno, es decir la extracción de parte de la corriente de gas que sale del horno, purgando con ello las corrientes circulantes de esos materiales, es la solución empleada mas frecuentemente para resolver el problema. Este gas desviado se enfriá para condensar los álcalis y luego se trata en un colector de polvo antes de emitirlo a la atmósfera.

### **Precalentador de cuatro etapas de ciclones**

El sistema de horno de precalentador de cuatro etapas de ciclones (ver Figura 2.6b) fue la tecnología estándar en los años 70, época en que se construyeron gran número de plantas con un rango de 1.000 a 3.000 toneladas/día (en España existen muchas líneas que datan de esa época).

El gas de salida después de la torre de ciclones, que tiene una temperatura de alrededor de 330 °C, se emplea generalmente para el secado de las materias primas y del combustible.

Cuando el crudo entra al horno rotativo, ya se ha completado alrededor del 30% de la calcinación.

Casi todos los precalentadores de suspensión de cuatro etapas trabajan adosados a hornos rotativos con tres apoyos. Este ha sido el diseño estándar desde 1970. Los hornos, con diámetros de 3,5 a 6 metros, tienen relaciones de longitud a diámetro del rango de 13:1 a 16:1. Estos hornos, mecánicamente más sencillos que los hornos largos secos y húmedos, son los tipos de horno más ampliamente empleados hoy día.

#### **2.4.3. Hornos rotativos con precalentador y precalcinador**

La técnica de la precalcinación ha sido empleada en la industria del cemento desde 1970. En este procedimiento la quema del combustible se realiza en dos puntos. La combustión primaria ocurre en la zona de salida del horno. La combustión secun-

daria tiene lugar en una cámara especial de combustión situada entre el horno rotativo y el precalentador. En esta cámara denominada calcinador o precalcinador se puede quemar hasta el 60% del combustible total del horno. Esta energía se emplea básicamente para calentar la harina cruda, la cual está casi completamente calcinada cuando entra al horno. El aire caliente (opcional) para la combustión en el calcinador procede del enfriador. El material sale del calcinador a unos 870 °C.

La Figura 2.6c muestra este procedimiento aplicado a un horno con precalentador de suspensión. El principio de la precalcincación se puede aplicar en cierta medida a hornos con precalentador de parrilla, pero no se puede colocar un precalcinador en este tipo de hornos. Para un tamaño determinado de horno rotativo la precalcincación incrementa la capacidad de producción de clínker.

Los primeros hornos con esta tecnología, tenían sólo cuatro etapas de ciclones, lo que originaba temperaturas más altas del gas de salida y mayor consumo de combustible. Cuando la humedad de las materias primas es baja, se pueden instalar torres de ciclones de seis etapas.

Los sistemas de horno de ciclones y precalcinador se consideran la tecnología estándar actual para las nuevas plantas de proceso seco. El número de etapas del intercambiador de ciclones dependerá de la humedad de las materias primas.

En las plantas nuevas europeas en las que se montan estos tipos de horno con precalentador de suspensión y precalcinador suelen tener capacidades de entre 3.000 y 5.000 t/día, aunque excepcionalmente puede haber unidades de mayor capacidad (existe algún ejemplo en Polonia de 8.500 t/día y en Asia de 10.000 t/día).

#### 2.4.4. Gases de salida del horno

Los gases de salida de los hornos se pasan a través de un dispositivo de depuración (precipitador electrostático o filtro de mangas) para la separación del polvo antes de que se emitan a la atmósfera por la chimenea principal.

En los procesos secos los gases de salida están a temperatura relativamente alta y proporcionan calor al molino de crudo y eventualmente al molino de carbón, para el secado del crudo y el combustible durante la molienda de los mismos (marcha combinada o mixta). Si el molino de crudo no está en servicio (marcha directa), los gases se enfrián con agua pulverizada en una torre de acondicionamiento antes de conducirlos al colector de polvo, tanto para reducir su volumen como para aumentar sus características de precipitación (mejora de la conductividad para la captación electrostática).

El control de los niveles de CO es crítico en los hornos de cemento cuando se emplean EPs (precipitadores electrostáticos) como equipos depuradores de partículas. Es necesario asegurar que las concentraciones se mantengan muy por debajo del límite de explosión. Si el nivel de CO en los EPs se eleva (típicamente a 0,5% en volumen) entonces se desconecta automáticamente la alimentación de corriente eléctrica al electrofiltro para eliminar el riesgo de explosión. Los incrementos anormales de los niveles de CO, pueden ser causados por un mal funcionamiento del sistema de combustión. Esto ocurre algunas veces cuando se queman combustibles sólidos, por lo que

los sistemas de alimentación de combustibles sólidos tienen que diseñarse para mantener una alimentación homogénea de combustible al quemador, eliminando avalanchas o cortes de combustible. El contenido de humedad de los combustibles sólidos es un factor particularmente crítico a este respecto y tiene que ser cuidadosamente controlado para prevenir atascos o blocajes en los sistemas de preparación y alimentación del combustible.

#### **2.4.5. Enfriadores de clínker**

El enfriador de clínker es una parte integral del sistema del horno y tiene una decisiva influencia en el desarrollo y economía del rendimiento energético de la planta. El enfriador tiene dos tareas: recuperar el calor del clínker caliente tanto como sea posible (el clínker sale del horno alrededor de los 1.450 °C) para devolverlo al proceso; y reducir la temperatura del clínker a un nivel apto para su manipulación posterior.

El calor es recuperado por el precalentamiento del aire empleado para la combustión en el quemador principal, tan cerca como sea posible del límite termodinámico. Sin embargo, esta recuperación se obstaculiza por circunstancias tales como las altas temperaturas, la extrema abrasividad del clínker y su amplio rango granulométrico. Los enfriamientos rápidos son beneficiosos para el clínker, mejorando su moliturabilidad y optimizando la reactividad del cemento.

Los problemas típicos de los enfriadores de clínker son: La expansión térmica, desgaste, flujos incorrectos de aire y el bajo rendimiento.

Hay dos tipos principales de enfriadores: rotativos y de parrilla, que son los que se van a describir. Existen otros enfriadores, como en el caso del clínker blanco, que difieren de los habituales por la necesidad de mantener las condiciones reductoras hasta los 600° para mantener el color del producto final.

#### **Enfriadores rotativos**

##### *Enfriador tubular*

El enfriador tubular emplea el mismo principio que el horno rotatorio, pero con un intercambio de calor inverso. Se dispone a la salida del horno, a menudo en configuración invertida, es decir, debajo del horno se instala un segundo tubo rotativo con su propio accionamiento. A la salida del horno, el clínker pasa a una tolva de transición antes de entrar en el enfriador, que va equipado con placas volteadoras para dispersar el clínker en el flujo de aire.

El caudal del flujo de aire de enfriamiento se determina en función del aire requerido para la combustión del combustible. En el rendimiento del enfriador intervienen, la velocidad de paso y el diseño interno del mismo. El diseño de los volteadores debe tener en cuenta el intercambio de calor y controlar el ciclo de retorno del polvo hacia el horno.

### *El enfriador planetario (o de satélites)*

El enfriador planetario (o de satélites) es un tipo especial de enfriador rotativo. Consta de varios tubos, típicamente de 9 a 11, fijados al horno rotativo en el extremo de descarga. Los enfriadores van unidos al tubo del horno a lo largo de una circunferencia perimetral, y el material pasa a ellos a través de aberturas situadas en el horno. La cantidad de aire de enfriamiento se determina por el aire requerido para la combustión del combustible. El aire entra en cada uno de los tubos desde el extremo de la descarga, permitiendo el intercambio de calor en contracorriente. Igual que en el enfriador tubular, los dispositivos internos para el volteo y dispersión del clínker son esenciales. Este tipo de enfriador no presenta ningún parámetro operativo variable. El alto desgaste y el choque térmico, en conjunción con los ciclos de polvo dentro de los tubos, origina que el clínker salga con altas temperaturas por lo que el ratio de recuperación de calor es bajo. La temperatura de salida del clínker sólo puede reducirse adicionalmente por inyección de agua dentro de los tubos del enfriador o sobre la carcasa de los mismos.

Dado que es prácticamente imposible extraer aire terciario, el enfriador planetario no es apto para implantar una precalcincación. Sin embargo, es posible instalar un quemador auxiliar en la parte de entrada al horno, en la parte baja de la torre de precalentamiento. En este quemador secundario se puede llegar a quemar hasta un 25% del combustible (lo más normal es alrededor del 10%).

### **Enfriadores de parrilla**

El intercambio en los enfriadores de parrilla se realiza por el paso una corriente de aire ascendente a través de una capa de clínker (lecho de clínker) depositado sobre una parrilla permeable al aire. Los enfriadores se clasifican en función de la forma del transporte del clínker a lo largo de los mismos en: parrilla de movimiento deslizante y parrilla de vaivén.

El aire que no se utiliza en la combustión, se utiliza para propósitos de secado de por ejemplo: materias primas, aditivos de cemento o carbón. Si no se emplea para el secado, este aire tiene que ser desempolvado antes de emitirse a la atmósfera.

#### *Enfriadores de parrilla deslizante*

En este tipo de enfriadores el clínker se transporta a lo largo de una parrilla en movimiento. Esta parrilla tiene las mismas características de diseño que la parrilla del precalentador (Lepol). El aire de enfriamiento se insufla en compartimentos debajo de la parrilla, por medio de ventiladores. Las ventajas de este diseño son: Una capa homogénea de clínker (sin escalones) y la posibilidad de cambiar placas sin parar el horno. Debido a su complejidad mecánica y pobre recuperación resultado del limitado espesor del lecho (causado por la dificultad de lograr un cierre efectivo entre la parrilla y las paredes), este diseño se dejó de emplear en las nuevas instalaciones a partir de 1980.

#### *Enfriadores de vaivén, convencionales*

El transporte del clínker en el enfriador de parrilla de vaivén se efectúa por el empuje progresivo sobre el lecho del clínker de los bordes de ataque de las filas alter-

nadas de placas. El movimiento relativo de los bordes de ataque se genera mediante accionamientos hidráulicos o mecánicos (cigüeñal) conectados a cada segunda fila. El clínker se desplaza desde el final de alimentación al final de descarga, pero la parrilla es fija.

Las placas de la parrilla se fabrican en acero moldeado resistente al calor y son básicamente de 300 mm de ancho y van taladradas para permitir el paso del aire a través de ellas.

El aire de enfriamiento se insufla a través de compartimentos situados debajo de la parrilla por medio de ventiladores de 300 - 1.000 mm de presión de columna de agua. Estos compartimentos están separados unos de otros por tabiques para mantener el perfil de presión. Se pueden distinguir dos zonas de enfriamiento:

- La zona de recuperación. El aire de enfriamiento caliente producido en esa zona se emplea para la combustión en el quemador principal (aire secundario) y en el precalcinador (aire terciario);

- La zona de enfriamiento posterior, donde el aire de enfriamiento adicional enfría el clínker a temperaturas más bajas.

Las unidades más grandes en funcionamiento tienen una superficie activa de unos 280 m<sup>2</sup> y capacidad de enfriamiento de 10.000 t/día de clínker. Los problemas característicos de estos enfriadores son la segregación y distribución desigual del clínker, conduciendo al desequilibrio aire-clínker, fluidificación del clínker fino (río rojo) y también pegaduras (muñecos de nieve) y una baja duración de las placas.

#### *Enfriadores de parrilla de vaivén, modernos*

La introducción y desarrollo de la tecnología moderna de los enfriadores de parrilla de vaivén empezó alrededor de 1983. El diseño proponía eliminar los problemas de los enfriadores convencionales obteniendo un intercambio térmico más cercano al óptimo y también enfriadores más compactos empleando menos aire de enfriamiento y sistemas de desempolvado más pequeños.

Las características clave de la tecnología del enfriador moderno son (dependiendo del suministrador):

- nuevos diseños de placas, fijas o móviles, con menor pérdida de carga, permeables al aire pero no al clínker
- aireación forzada de las placas
- zonas de aireación regulables individualmente
- entrada fija
- menor nº de parrillas y más anchas
- machacadora de rodillos
- pantallas térmicas.

## Enfriadores verticales

Se ha desarrollado un enfriador llamado enfriador de Gravedad o enfriador G para instalarlo después de un enfriador planetario o de un enfriador/recuperador de parrilla corta. El aire de enfriamiento nunca entra en contacto con el clínker puesto que el intercambio térmico se efectúa entre el clínker que desciende sobre tubos de acero transversales en lecho de clínker, que a su vez se enfrían por el aire soplado a través de los mismos.

## 2.5. Molienda y almacenamiento de cemento

### 2.5.1. Almacenamiento del clínker

El clínker y otros componentes del cemento se almacenan en silos o en naves cerradas.

Los sistemas de almacenamiento de clínker más comunes son:

- depósito longitudinal con descarga por gravedad
- depósito circular con descarga por gravedad
- silo de almacenamiento de clínker
- silos esféricos tipo domo.

### 2.5.2. Molienda de cemento

El cemento Portland se produce moliendo juntos clínker y sulfatos tales como yeso y anhidrita. En los cementos de adición (cementos compuestos) hay otros constituyentes, tales como escoria granulada de alto horno, puzolanas artificiales o naturales, o filler calizo. Las adiciones se pueden moler junto con el clínker o pueden necesitar secarse y molerse por separado. (Las plantas de molienda pueden estar en ubicaciones separadas de las plantas de producción de clínker).

El tipo de molienda del cemento y el diseño de la instalación, dependen del tipo de cemento que se vaya a producir. Tienen gran importancia la moliurabilidad, la humedad y la abrasión de los componentes del cemento producido.

La mayoría de los molinos trabajan en circuito cerrado, es decir, pueden separar el cemento de la finura requerida y devolver el material grueso al molino.

### Pesaje y dosificación de la alimentación del molino

La exactitud y fiabilidad en el pesaje y dosificación de los componentes alimentados en el molino, es de gran importancia para conseguir y mantener una alta eficiencia energética de la molienda. El equipo de pesaje y dosificación mas utilizado son las básculas pesadoras de banda.

## Molienda de cemento

Debido a la variedad de tipos de cemento requeridos por el mercado, predominan los sistemas de molienda de última generación equipados con separador dinámico de aire.

Los sistemas de molienda más empleados son:

- molino de bolas en circuito cerrado (el porcentaje de adiciones es bastante limitado, si no son secas o presecadas)
- molino vertical de rodillos (mejor adaptado para porcentajes de adición altos, debido a su capacidad de secado, mejor adaptado para la molienda separada de las adiciones)
- prensa de rodillos (el porcentaje de adiciones es bastante limitado, si no son secas o presecadas)

Otros sistemas de molienda son:

- molino de bolas en circuito abierto
- molino de bolas en circuito cerrado con separador mecánico de aire o separador de aire de ciclones de antiguas generaciones
- molino horizontal de rodillos

El principio de trabajo de los molinos *verticales de rodillos* se basa en la acción de 2 a 4 rodillos moledores, soportados en brazos articulados y montados sobre una mesa horizontal de molienda o pista de rodadura. Está especialmente indicado para el molido y secado simultáneo de materias primas para cemento o escoria, debido a que los molinos verticales de rodillos pueden manejar contenidos relativamente altos de humedad en la alimentación del molino. El tiempo de permanencia del material en el molino es bastante corto para prevenir la prehidratación del clínker, por ejemplo en el caso de molienda de cemento con escorias.

La *presa de rodillos* de alta presión requiere comparativamente, un alto grado de mantenimiento. Las prensas horizontales de rodillos se emplean muy a menudo en serie con los molinos de bolas.

Un desarrollo más reciente de la molienda de cemento es el *molino de rodillo horizontal*. Este consta de una carcasa anular de gran diámetro y corta longitud soportado sobre rodamientos hidrostáticos o hidrodinámicos. El anillo cilíndrico gira, accionado por medio de un engranaje circunferencial. Dentro del anillo hay un rodillo horizontal que gira libremente y puede ser presionado hidráulicamente contra el cuerpo cilíndrico. El material a moler se alimenta por uno o dos puntos sobre el rodillo, y se muele entre el rodillo y el cuerpo cilíndrico. El material triturado que sale del molino se lleva a un separador y la fracción gruesa se retorna al molino.

## Molienda de adiciones

Las adiciones, compuestos minerales de carácter natural o industrial, se muelen generalmente junto con el clínker y el yeso. La decisión de molerlas separadamente depende básicamente de los siguientes factores:

- el porcentaje de adiciones en el producto final y en el total de la producción de cemento

- si se dispone de una molienda de repuesto
- si hay una considerable diferencia entre la molaridad del clínker y las adiciones
- el contenido de humedad de las adiciones.

Si se requiere el presecado de las adiciones, se pueden emplear sistemas de secoado usando tanto los gases de salida del horno y/o el aire de salida del enfriador, como un generador independiente de aire caliente.

#### *Sistemas de molienda combinada*

Cualquiera de los sistemas de molienda mencionados para la molienda seca/semisecca de materias primas puede emplearse para moler adiciones junto con el clínker y el yeso. Sin embargo, la mayoría de los sistemas están limitados por el contenido de humedad de la mezcla alimentada- máximo 2%, o 4% si se emplea un aporte de gases calientes. Para contenidos de humedad mayores los sistemas requieren el presecado de las adiciones en un secador. Una excepción son los molinos verticales, que son capaces de manipular contenidos de humedad de hasta un 20%, pero también requieren un aporte de gases calientes para el secoado.

#### *Molienda separada*

Para moler por separado las adiciones, se pueden emplear los sistemas para la molienda seca/semisecca de las materias primas. De todas formas, si hay un alto contenido de humedad en la mezcla, será necesario un pre-secado.

#### **Separación por distribución granulométrica de las partículas**

La distribución granulométrica de las partículas del producto que sale de la molienda de cemento es de gran importancia para la calidad del cemento. La regulación de estos parámetros se logra por el ajuste del separador. La última generación de separadores de rotor en jaula de ardilla tiene muchas ventajas sobre los diseños previos, tales como:

- bajo consumo específico de energía (menor sobremolido)
- incremento de la capacidad (eficiencia)
- posibilidad de enfriar el producto
- mayor flexibilidad para los ajustes en la finura del producto
- mejor control de la distribución del tamaño de las partículas y por ello mejor uniformidad del producto.

#### **2.5.3. Almacenamiento del cemento**

Para transportar el cemento a los silos de almacenamiento, se pueden emplear sistemas mecánicos y neumáticos. Los sistemas mecánicos normalmente tienen un costo de inversión más alto pero mucho menor costo de operación que el transporte neumático. El sistema utilizado más habitualmente es una combinación de transportadores fluidificados o de rosca, y elevadores de cangilones.

Generalmente se requieren varios silos para el almacenamiento de los distintos cementos. Sin embargo, los nuevos diseños de silos permiten el almacenamiento de más de un tipo de cemento en el mismo silo. Las configuraciones más corrientes de los silos de cemento son:

- silo de celda única con tolva de descarga
- silo de celda única con cono central
- silo multicelular
- silo domo con cono central

Se emplea aire comprimido para iniciar y mantener el proceso de descarga del cemento de los silos, inyectándolo en el silo a través de unidades de aireación situadas en el fondo de los mismos.

## **2.6. Ensacado y expediciones**

La expedición del cemento se realiza directamente a granel mediante cisternas por carretera o ferrocarril (o barco), o bien ensacado. Las operaciones de ensacado y paletizado se realizan en una línea ensacadora.

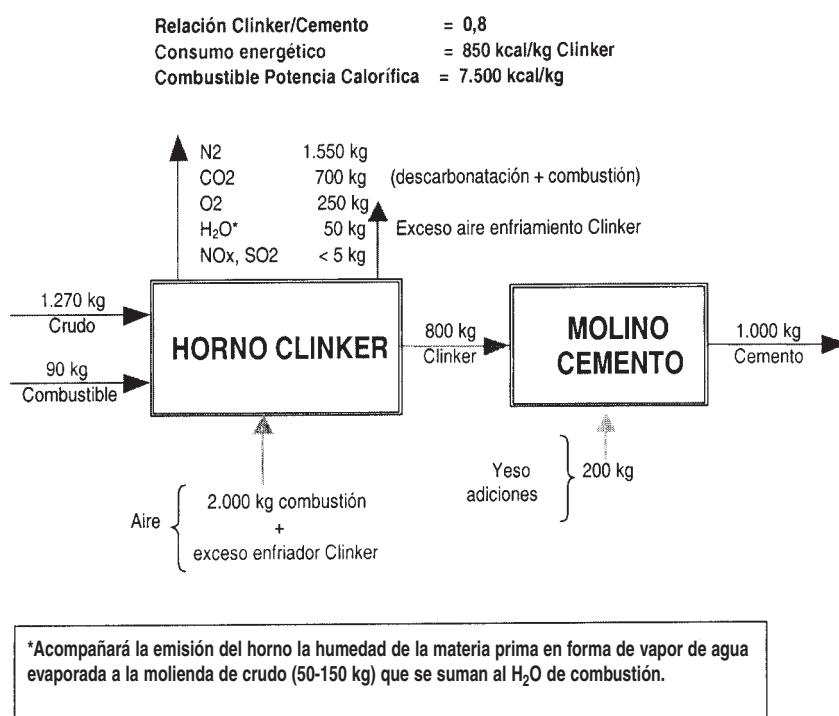
### 3. NIVELES ACTUALES DE EMISIONES Y CONSUMO DE ENERGÍA Y MATERIAS PRIMAS

Los principales aspectos ambientales asociados a la producción de cemento son las emisiones a la atmósfera y el consumo de energía.

Los vertidos de agua se limitan a las escorrentías de lluvia, la refrigeración de equipos (normalmente en circuito cerrado) y al agua sanitaria, y no son un impacto ambiental significativo.

El almacenamiento y la manipulación de combustibles son una fuente potencial de contaminación del suelo y de las aguas freáticas, por lo que las fábricas deben dotarse de medios adecuados que garanticen la protección del suelo.

La Figura 3.1 muestra un balance de masas típico de la producción de 1t de cemento gris con el proceso vía seca, para una fábrica que utilice fuelóleo como combustible.



**Figura 3.1.: Balance de masas para la producción de 1 t de cemento.**  
 [Fuente: Oficemen].

#### 3.1. Consumo de materias primas

La fabricación del cemento es un proceso industrial que se realiza en instalaciones de gran escala. En la tabla 3.1 se indican los datos de consumo de materias primas correspondientes a una planta tipo de la Unión Europea:

- ✓ capacidad de producción de clínker de 3000 t de clínker/día,
- ✓ fabrica cerca de 1 M.t de clínker/año y
- ✓ 1,23 M.t de cemento al año (relación cemento/clínker 1,23 media en la UE).

**Tabla 3.1: Consumo de materias primas en la producción de cemento**

Materias primas (base seca)	por tonelada de clínker	por tonelada de cemento	al año (por Mt de clínker)
Caliza, arcilla, pizarra, marga, otros	1,57 t	1,27 t	1.568.000 t
Yeso, anhidrita	-	0,05 t	0,05 t
Adiciones	-	0,14 t	172.000 t

[Fuente: Cembureau Report 1997].

### 3.2. Consumo de energía

La mayor parte del consumo energético para la fabricación de cemento se concentra en la descarbonatación y la clinkerización de las materias primas en el horno, operación que consume cerca del 90 % de la energía total consumida en la fábrica.

La energía eléctrica se consume en su mayor parte en las operaciones de molienda, tanto de materias primas como de cemento, que representan aproximadamente el 75 % de la energía eléctrica total consumida. La impulsión de gases y la manipulación y transporte de materiales suman prácticamente el 25 % restante.

Los costes energéticos - combustibles y electricidad – suponen en torno al 30 % de los costes de fabricación, repartidos a medias entre los dos componentes térmico y eléctrico.

El proceso de cocción de las materias primas requiere de un aporte energético teórico (reacciones químicas endotérmicas) de 1.700 a 1.800 MJ/t de clínker. La energía térmica consumida por los diferentes tipos de hornos está en torno a los siguientes rangos (MJ/t de clinker):

- 2.900-3.200 para líneas nuevas vía seca, con precalentador de ciclones y precalcínador
- 3.100-4.200 para vías secas, con precalentador de ciclones
- 3.300-4.500 para hornos vía semiseca o semihúmeda
- hasta 5.000 para hornos largos vía seca
- 5.000-6.000 para hornos vía húmeda

Además de la vía de fabricación empleada, el consumo energético en la fabricación de clínker está relacionado con la humedad de las materias primas y con la dificultad en completar las reacciones químicas para la formación del clínker.

Esta dificultad depende de la cristalografía /mineralogía de los compuestos que lo conforman y de la presencia de minerales fundentes (hierro, aluminio). Esta difi-

cultad tiene lugar, por ejemplo, en la fabricación de clínker blanco, en la que las materias primas son muy pobres en fundentes (para que no oscurezcan el clínker) y requieren temperaturas más altas de clinkerización (en torno a 150 °C más), lo que implica necesariamente un mayor consumo energético que puede estar entre los 5.500 y 6.500 MJ/t de clínker.

El consumo de electricidad varía entre 90 y 130 kWh/t de cemento, cifra que depende de los tres factores siguientes:

- La facilidad de moliuración de los materiales, relacionado básicamente con su estructura mineralógica. En el caso del cemento blanco por tratarse de estructuras normalmente de mayor dureza, podría llevar a valores por encima del rango mencionado
- La eficiencia energética de los equipos de molienda
- La finura del material molido, especialmente en la fabricación de cementos de diferentes categorías resistentes

### 3.3. Emisiones

La directiva IPPC incluye una relación indicativa general de los contaminantes atmosféricos que deben ser tomados en consideración, y para las que deben fijarse límites de emisión cuando los niveles de emisión y la potencial peligrosidad del contaminante así lo hagan necesario.

El foco más importante de emisión a la atmósfera por chimenea es el horno de clínker. Estas emisiones provienen de las reacciones físicas y químicas de las materias primas procesadas y de los combustibles empleados para la cocción. Las emisiones relevantes asociadas son:

- óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ )
- dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ )
- partículas (polvo)

La legislación medioambiental y la operación de las fábricas suele centrarse en estos tres contaminantes.

Los principales constituyentes de los gases de salida de un horno de cemento son nitrógeno del aire de combustión;  $\text{CO}_2$  de la descarbonatación del  $\text{CaCO}_3$  y de la oxidación del combustible; vapor de agua del proceso de combustión y de las materias primas; y exceso de oxígeno (ver tabla 3.2).

**Tabla 3.2.: Composición de los gases emitidos por el horno**

Compuesto	% en volumen
Nitrógeno ( $\text{N}_2$ )	45 - 75
Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ )	11 - 29
Agua ( $\text{H}_2\text{O}$ )	10 - 39
Oxígeno ( $\text{O}_2$ )	4 - 12
Resto (incluidos contaminantes)	< 1

*[Fuente: Oficemen].*

Además de las tres emisiones relevantes mencionadas anteriormente, otras emisiones asociadas a la operación del horno son:

- monóxido de carbono (CO)
- compuestos orgánicos volátiles (COV)

El contenido de estos dos compuestos en los gases emitidos se ve afectado, además de por las condiciones de la combustión, por el contenido en materia orgánica de las materias primas, que se ven parcialmente oxidadas en contacto con los gases del horno, lo que afecta al nivel de monóxido de carbono y de compuestos orgánicos volátiles en los gases.

Cuando los hornos de clínker utilizan residuos orgánicos como combustibles alternativos (neumáticos, disolventes, aceites, ...) se realiza un control exhaustivo de la emisión que incluye, además de los contaminantes mencionados en los párrafos anteriores, los siguientes:

- metales y sus compuestos
- HF
- HCl
- Dioxinas y furanos (PCDDs y PCDFs)

La emisión de estos cuatro contaminantes es normalmente muy baja (ver tabla 3.3), pero su control permite garantizar una correcta operación del horno en actividades de tratamiento de residuos.

Otros aspectos ambientales, con efectos normalmente leves y/o locales, son la generación de residuos, el ruido y el olor.

En todos los hornos el material se mueve a contracorriente de los gases calientes de la combustión. Este flujo en contracorriente influye en la emisión de contaminantes, disminuyéndola, puesto que actúa como un lecho fluido circulante: muchos compuestos resultantes de la combustión o de la transformación de las materias primas en clínker permanecen en la corriente de gases hasta que son absorbidos, condensados o retenidos por el flujo en contracorriente de materias primas.

La capacidad de absorción del material varía con su estado físico y químico. Este, a su vez, depende de la zona del horno en la que se encuentre. Por ejemplo, el material que sale de la etapa de calcinación (descarbonatación) de un horno tiene un alto contenido de óxido de calcio y tiene, por consiguiente, una alta capacidad de absorción (neutralización) de ácidos, tales como HCl, HF y SO<sub>2</sub>.

Los datos de emisiones de los hornos en servicio en la Unión Europea se muestran en la tabla 3.3. La amplitud de los rangos de emisión de los hornos se explica por los siguientes factores:

- los rangos reflejan los valores más bajos y más altos hallados en hornos europeos
- el efecto de las materias primas, de origen local, y, en menor medida, de los combustibles
- la edad y del diseño de la planta, las técnicas empleadas

**Tabla 3.3 Rango de Emisiones de los Hornos de Cemento Europeos**

<b>Rango de Emisiones de los Hornos de Cemento Europeos</b>			
	<u>mg/Nm<sup>3</sup></u>	<u>kg/tonel.clinker</u>	<u>toneladas/año</u>
NOx (como NO <sub>2</sub> )	<200 - 3.000	<0,4 - 6	400 - 6.000
SO <sub>2</sub>	<10 - 3.500	<0,02 -7	<20 - 7.000
Partículas (polvo)	5 - 200	0,01 - 0,4	10 - 400
CO	500 - 2.000	1- 4	1.000 - 4.000
CO <sub>2</sub>	400 - 520g/Nm <sup>3</sup>	800 -1.040	0,8 -1,04 millones
TOC	5 - 500	0,01-1	10 -1.000
HF	<0,4 - 5	<0,8 -10 g/t	<0,8 -10
HCl	<1 - 25	<2 -50 g/t	<2 - 50
PCDD/F	<0,1 ng/Nm <sup>3</sup>	<200 -1.000ng/t	<0,2 -1 g/año
<u>Metales:</u>			
(Hg, Cd, Tl)	0,01 - 0,3(princ. Hg)	20 - 600 mg/t	20 - 600 kg/año
(As, Co, Ni, Se,	0,001 - 0,1	2 - 200 mg/t	2 - 200 kg/año
Te)	0,005 - 0,3	10 - 600 mg/t	10 - 600 kg/año
(Sb, Pb, Cr,			
Cu, Mn,			
V, Sn, Zn)			
Nota: los factores de emisión están basados en la emisión de 2.000 m <sup>3</sup> /t de clinker y la producción de 1 millón de t de clinker/año. Los rangos de emisión son medias anuales y son valores indicativos basados en diversas técnicas de medición. El contenido de O <sub>2</sub> es normalmente de alrededor de un 10%.			

[Fuente: BREF].

Los volúmenes habituales de gases emitidos por el horno de clínker gris varían normalmente entre 1.700 y 2.500 m<sup>3</sup> por t de clínker (gas seco, 101,3 kPa, 273 K). Los sistemas de horno con precalentador y precalcinador normalmente tienen volúmenes de gas de alrededor de 2.000 m<sup>3</sup>/t de clínker (gas seco, 101,3 kPa, 273 K).

Las operaciones de molienda de materias primas, combustibles sólidos y cemento, son también fuentes de emisión de partículas.

Un aspecto medioambiental relevante, especialmente en países secos como España, es la emisión de partículas provenientes de las operaciones de almacenamiento y manipulación de materias primas, combustibles sólidos y, en menor medida, de cemento:

- el transporte a fábrica
- las operaciones de carga y descarga
- la acción del viento sobre los almacenamientos
- los puntos de transferencia
- el transporte interno

pueden generar la dispersión y el arrastre de partículas, con un efecto que puede ser en algunos casos significativo a nivel local cuando no se dispone de los sistemas adecuados (ver 4.5.3).

### 3.3.1. Óxidos de nitrógeno

El monóxido de nitrógeno (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) son los óxidos de nitrógeno predominantes en los gases emitidos por el horno de cemento (NO>90% de los óxidos de nitrógeno).

Hay dos fuentes principales para la producción de NO<sub>x</sub>:

- NO<sub>x</sub> térmico: parte del nitrógeno en el aire de combustión reacciona con oxígeno para formar óxidos de nitrógeno.
- NO<sub>x</sub> de combustible: los compuestos de nitrógeno presentes en el combustible reaccionan con el oxígeno para formar óxidos de nitrógeno.

La formación de NO<sub>x</sub> térmico se potencia en gran medida cuando la temperatura de combustión es superior a los 1.200 °C, reaccionando las moléculas de nitrógeno y oxígeno en el aire de combustión.

El NO<sub>x</sub> térmico se produce principalmente en la zona de clinkerización del horno, en la que se alcanzan temperaturas cercanas a los 2000 °C. La cantidad de NO<sub>x</sub> térmico generado en esta zona está relacionado tanto con la temperatura como con el contenido de oxígeno (factor de exceso de aire). Cuanto mayor sea el exceso de oxígeno, mayor será la formación de NO<sub>x</sub> térmico.

Cuando las materias primas son de difícil cocción la temperatura de la zona de clinkerización debe ser mayor, lo que implica necesariamente la generación de más NO<sub>x</sub> térmico. La cocibilidad del crudo depende de la cristalografía /mineralogía de los compuestos que lo conforman y de la presencia de minerales fundentes (hierro, aluminio). Este es el caso de la fabricación de clínker blanco, en el que las materias primas son muy pobres en fundentes (para que no oscurezcan el clínker) y requieren temperaturas más altas de clinkerización (en torno a 150 °C).

El NO<sub>x</sub> de combustible se genera por oxidación del nitrógeno (N) presente en el combustible, el cual se combina con otros átomos de nitrógeno para formar N<sub>2</sub> gas o reacciona con el O<sub>2</sub> para formar NO<sub>x</sub> combustible.

En un precalcinador la temperatura suele estar en el rango de 900 - 1.150 °C, baja para la formación de NO<sub>x</sub> térmico, por lo que la mayor parte del NO<sub>x</sub> formado en esta zona del horno será NO<sub>x</sub> combustible. Lo mismo ocurre cuando parte del combustible se alimenta en la zona de entrada al horno, donde se genera una zona de combustión secundaria a una temperatura similar a la correspondiente a un precalcinador.

En los hornos dotados de precalcinadores, donde hasta el 60% del combustible puede quemarse en el precalcinador, la formación de NO<sub>x</sub> térmico es más baja que en los hornos en los que todo el combustible se quema en la zona de sinterización.

Además de la temperatura y el contenido de oxígeno (factor del exceso de aire), la formación de  $\text{NO}_x$  puede estar influenciada por la forma de la llama y su temperatura, la geometría de la cámara de combustión, la reactividad y el contenido de nitrógeno del combustible, la presencia de humedad, el tiempo de reacción y el diseño del quemador.

Las emisiones de  $\text{NO}_x$  dependen fundamentalmente del tipo de horno que se emplee y de las características de cocción de las materias primas.

El rango de las emisiones de óxidos de nitrógeno en los hornos europeos es de entre 200 y 3.000 mg/  $\text{NO}_x/\text{m}^3$  (como  $\text{NO}_2$ , gas seco, 273 k, 101,3 kPa, 10%  $\text{O}_2$ ). Como término medio, los hornos europeos de cemento emiten unos 1.300 mg  $\text{NO}_x/\text{m}^3$  (como  $\text{NO}_2$ , gas seco, 273 k, 101,3 kPa, 10%  $\text{O}_2$ ) (Informe Ökopol, 1998).

El rango de las emisiones de óxidos de nitrógeno en los hornos españoles está entre 400 y 2.800 mg/  $\text{NO}_x/\text{m}^3$  (como  $\text{NO}_2$ , gas seco, 273 k, 101,3 kPa, 10%  $\text{O}_2$ ), estando normalmente en la parte superior del rango las emisiones de los hornos de clínker blanco por las especificidades comentadas.

En la tabla siguiente se muestran los resultados de las mediciones llevadas a cabo en hornos de clínker gris en la República Federal Alemana por el Instituto de Investigación de la Industria del Cemento en los años 80. [Karlsruhe I, 1996].

**Tabla 3.4. Resultados de las mediciones de  $\text{NO}_x$  en Alemania durante los años 80**

Tipo de proceso	Factor de emisión $\text{NO}_x$ (g $\text{NO}_2$ /tonelada clínker)	Concentración $\text{NO}_x^{(1)}$ (mg $\text{NO}_2/\text{Nm}^3$ )
Precalentador de ciclones con recuperación de calor	600 - 3.100	300 - 1.400
Precalentador de ciclones sin recuperación de calor	800 - 3.500	500 - 2.000
Precalentador de parrilla	800 - 4.100	400 - 2.100

<sup>(1)</sup> Referido a gas seco, 0 °C (273 k), 101,3 kPa, 10 %  $\text{O}_2$ .

[Fuente: Karlsruhe I, 1996].

### 3.3.2. Dióxido de azufre

Las emisiones de  $\text{SO}_2$  de las fábricas de cemento están directamente relacionadas con el contenido en compuestos volátiles de azufre en las materias primas. Los hornos que emplean materias primas con contenidos bajos de compuestos volátiles de azufre tienen emisiones muy bajas de  $\text{SO}_2$ , en algunos caso por debajo de los límites de detección.

Cuando se emplean materias primas que contienen compuestos orgánicos de azufre o piritas (FeS), las emisiones de  $\text{SO}_2$  pueden ser altas. El dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) es el principal compuesto de azufre emitido (99%), aunque también se generan

pequeñas cantidades de  $\text{SO}_3$  y, en condiciones reductoras, puede generarse sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ).

Los sulfuros y el azufre orgánico presentes en las materias primas se evaporarán en cuanto la temperatura del crudo comience a elevarse, y el 30% o más puede emitirse desde la primera etapa del intercambiador de ciclones. Los gases de esta etapa se emiten a la atmósfera o se llevan al molino de crudo cuando éste está en funcionamiento. En el molino de crudo, entre el 20 y el 70% del  $\text{SO}_2$  será capturado por las materias primas finamente molidas. Por ello es importante que, cuando hay compuestos volátiles de azufre en las materias primas, la molienda de crudo se optimice para que actúe como sistema de captación de  $\text{SO}_2$ .

El azufre presente en los combustibles que alimentan los hornos con precalentador no genera emisiones significativas de  $\text{SO}_2$ , debido a la naturaleza fuertemente alcalina en la zona de sinterización, en la zona de calcinación y en la etapa más baja del precalentador. Este azufre quedará atrapado en el clínker. El exceso de oxígeno (del 1 al 3% de  $\text{O}_2$  mantenido en el horno para conseguir una buena calidad del cemento) oxidará los compuestos sulfurosos liberados, convirtiéndolos en  $\text{SO}_2$ .

En el caso de la fabricación de cementos especiales, como el cemento blanco, se dan los siguientes condicionantes:

- Mayor dificultad para la cocción por la cristalográfica y mineralogía del crudo.
- Ausencia de fundentes en las materias primas para preservar el color.
- Ausencia de álcalis debido a la pureza de las materias primas.
- Condiciones de funcionamiento del horno (en ocasiones reductoras).

La conjunción de estas condiciones puede producir emisiones más elevadas de  $\text{SO}_2$  al no darse el mismo porcentaje de fijación de los óxidos de azufre en el mismo grado que en la fabricación de clínker gris.

Las emisiones en los hornos europeos, al igual que en los hornos españoles, están en el rango desde valores inferiores a los límites de detección hasta valores de 3.500 mg/Nm<sup>3</sup> (como  $\text{SO}_2$ , gas seco, 273 k, 101,3 kPa, 10%  $\text{O}_2$ ).

### 3.3.3. Partículas

Históricamente la emisión de partículas (polvo), en particular por las chimeneas de los hornos, ha sido la principal preocupación medioambiental en relación con la fabricación de cemento.

Las principales fuentes de partículas por chimenea (fuentes localizadas, o puntuales) son los hornos, los molinos de crudo, los enfriadores de clínker y los molinos de cemento. En todos estos procesos circulan grandes volúmenes de gases cargados de partículas, que deben ser desempolvados. El diseño y la fiabilidad de los precipitadores electrostáticos modernos y de los filtros de mangas aseguran que las partículas emitidas se puedan reducir a niveles no significativos; incluso se han podido lograr en algunas instalaciones niveles de emisión por debajo de 10 mg/m<sup>3</sup>.

El rango de emisiones de los hornos de cemento europeos está entre 5 y 200 mg/m<sup>3</sup>.

El rango de emisiones de los hornos de cemento españoles está entre 15 y 150 mg/m<sup>3</sup>.

Las operaciones de transporte, manipulación (carga y descarga, envasado) y almacenamiento de materias primas y combustibles sólidos son una fuente potencial de emisión de partículas (emisiones dispersas o difusas).

Las emisiones dispersas de partículas pueden provocar un incremento de la concentración de partículas en los alrededores de la fábrica, mientras que las emisiones procedentes de fuentes localizadas pueden tener efecto sobre áreas más amplias.

### 3.3.4. Óxidos de carbono (CO<sub>2</sub>, CO)

La emisión de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es de 900 a 1.000 kg/t de clínker gris, en relación a un consumo específico de aproximadamente 3.500 a 5.000 MJ/tonelada de clínker, pero dependiendo así mismo del tipo de combustible. El ratio es menor si se refiere a las toneladas de cemento, puesto que en la molienda de cemento se adicionan otros minerales y yeso. En el caso del clínker blanco el ratio es superior debido a su mayor consumo energético.

En la fabricación de cemento gris por vía seca aproximadamente un 60% del CO<sub>2</sub> generado se origina en el proceso de disociación del carbonato cálcico de la caliza en óxido de calcio y CO<sub>2</sub> (denominado descarbonatación o calcinación de la caliza) y el 40% restante se produce en la combustión del combustible. Las emisiones resultantes de la combustión son directamente proporcionales al consumo específico, y a la relación entre el contenido de carbono (C) y el poder calorífico del combustible.

Las emisiones del CO<sub>2</sub> de la combustión se han reducido progresivamente, alrededor del 30% en los últimos 25 años principalmente por la instalación de hornos más eficientes.

La emisión de CO está relacionada con el contenido de materias orgánicas en las materias primas y con las condiciones del proceso de fabricación, pero también puede producirse por una combustión incompleta cuando el control de la alimentación de los combustibles sólidos no es óptima. Dependiendo de las características de las canteras, se aportan al proceso entre 1,5 y 6 g de carbono orgánico por kg de clínker proveniente de las materias primas. Los ensayos realizados con materias primas de varios orígenes han demostrado que entre el 85 y el 95 % de los compuestos orgánicos presentes en las materias primas se oxidan completamente a CO<sub>2</sub> en presencia de un 3% de oxígeno en exceso; mientras entre el 5 y el 15 % se oxidan parcialmente a CO (Cembureau).

La concentración de CO puede superar en algunos casos, con algunas materias primas, los 2.000 mg/Nm<sup>3</sup> (Informe Cembureau, 1997). Para asegurar que la velocidad de alimentación del combustible sólido es uniforme debe disponerse de un buen diseño de las tolvas, cintas transportadoras y alimentadores. De no ser así, se podría producir una combustión subestequiométrica que puede llevar a picos de corta duración mayores del 0,5% de CO. Estos picos de CO provocan la desconexión automática de los filtros electrostáticos para evitar el riesgo de explosión, lo que provoca un incremento en la emisión de partículas.

### 3.3.5. Compuestos orgánicos volátiles

En general, la emisión de compuestos orgánicos volátiles (COV) y de monóxido de carbono en los procesos de combustión va a menudo asociada a combustiones incompletas. En los hornos de cemento, la emisión es baja en condiciones normales de operación, debido al largo tiempo de residencia de los gases en el horno, la elevada temperatura y las condiciones de exceso de oxígeno. Las concentraciones pueden aumentar durante las operaciones de arranque o en casos de perturbaciones de la marcha normal del horno. La frecuencia con la que ocurren situaciones de operación anómala del horno es muy variable, desde una o dos veces a la semana hasta una vez cada dos o tres meses.

Cuando la materia prima utilizada tiene materia orgánica, esta última se volatiliza en las primeras etapas del proceso (precalentador, precalcinador), a medida que el crudo se calienta, dando lugar a emisiones de COV. La materia orgánica se libera a temperaturas entre 400 y 600 °C. El contenido en COV de los gases del horno de cemento está normalmente entre 10 y 100 mg/Nm<sup>3</sup>. En algunos casos se alcanzan emisiones de COV de hasta 500 mg/Nm<sup>3</sup> debido a las características de las materias primas. [Informe Cembureau, 1997].

### 3.3.6. Dibenzodioxinas policloradas (PCDDs) y dibenzofuranos (PCDFs)

En los procesos de combustión, la presencia de cloro y de compuestos orgánicos puede dar lugar a la formación de dioxinas y furanos (PCDDs y PCDFs) si se dan a su vez las condiciones de tiempo de residencia y temperatura.

La formación de dioxinas y furanos ocurre por síntesis (conocida como síntesis de novo) en el rango de temperaturas entre 200 y 450 °C por reacción de hidrocarburos (precursores) con el cloro. Por lo tanto, es importante que los gases del sistema del horno sean enfriados rápidamente a través de este rango. En la práctica esto es lo que ocurre en los sistemas con precalentador puesto que las materias primas entrantes se calientan con los gases del horno. Por otra parte la presencia de cloro en los gases de combustión del horno está limitada por condiciones de proceso y de calidad del cemento.

Los estudios realizados en Europa, entre los cuales destaca el Inventario Europeo de Dioxinas realizado por la Comisión Europea (año 2000), han demostrado que la producción de cemento no es una fuente significativa de emisiones de dioxinas y furanos. Ello es debido al largo tiempo de permanencia de los gases de combustión en el horno a elevadas temperaturas, y al resto de condiciones descritas en el párrafo anterior, independientemente de que se utilicen combustibles convencionales (carbón, coque de petróleo, fuelóleo) o alternativos (neumáticos usados, aceites, disolventes, etc.)

Las mediciones realizadas indican que los hornos de cemento emiten menos de 0,1 ng TEQ/Nm<sup>3</sup>, que es el valor límite en la legislación europea para plantas de incineración y co-incineración de residuos (directiva del Consejo 94/67/CE y directiva del Consejo y del Parlamento 2000/76/CE).

Las mediciones realizadas en 16 hornos de clínker en Alemania (hornos de precalentador de ciclones y de parrillas) durante los últimos 10 años indican que la media de concentración asciende a cerca de 0,02 ng TEQ/Nm<sup>3</sup>. [Schneider, 1996].

En España, las empresas cementeras participan desde el año 2000 en la elaboración del Inventario Nacional de Dioxinas y Furanos, del Ministerio de Medio Ambiente. A finales de 2001 se disponía de 40 mediciones en 29 hornos de clínker, con todos los valores por debajo del valor de referencia 0,1 ng TEQ/Nm<sup>3</sup>.

### 3.3.7. Metales y sus compuestos

Los dos flujos entrantes en el horno de cemento, materias primas y combustibles, contienen metales en concentraciones variables en función de su origen.

En particular, el uso de residuos como combustibles puede variar la entrada de metales en el proceso por lo que en consecuencia es conveniente conocer los niveles de metales pesados de los flujos de materias primas y combustibles.

El principal foco emisor de metales es el sistema de horno, incluyendo los gases de combustión y el aire de los enfriadores de clínker. Las partículas emitidas en estos flujos contienen muy pequeñas cantidades de compuestos metálicos tales como zinc (Zn), cadmio (Cd), mercurio (Hg), plomo (Pb), talio (Tl) y arsénico (As). La concentración de las emisiones de metales varía ampliamente en función de las materias primas, los combustibles y de los ciclos en el sistema de horno.

Los compuestos metálicos pueden clasificarse en tres categorías, dependiendo de la volatilidad de los metales y de sus sales:

1. Metales que son o tienen compuestos no volátiles: Ba, Be, Cr, As, Ni, V, Al, Ti, Mn, Cu, y Ag
2. Metales que son o tienen compuestos semivolátiles: Sb, Cd, Pb, Se, Zn, K y Na
3. Metales que son o tienen compuestos volátiles: Hg y Tl

El comportamiento de estos metales en el sistema del horno depende de su volatilidad:

- Los compuestos de metales no volátiles permanecen dentro del proceso y salen del horno como parte de la composición del clínker.
- Los compuestos de metales semivolátiles se vaporizan parcialmente en la zona de sinterización y se condensan sobre las materias primas en zonas menos calientes del sistema del horno (precalentador). Esto lleva a un efecto cíclico dentro del sistema de horno (ciclos internos) hasta que se establece un equilibrio entre los metales entrantes al horno y los que salen con el clínker de cemento.
- Los compuestos de metales volátiles condensan sobre las materias primas a bajas temperaturas y pueden formar ciclos internos o externos. El talio y mercurio y sus compuestos se volatilizan con facilidad y en menor extensión el cadmio, plomo, selenio y sus compuestos. Se forman ciclos internos de compuestos metálicos que reaccionan con el crudo o condensan en las zonas menos calientes del sistema (precalcinador, precalentador o en la molienda de crudo)

y vuelven en forma sólida hacia la zona de sinterización, donde se volatilizan de nuevo. Se forman ciclos externos cuando el polvo junto con los compuestos metálicos condensados se separan en los equipos de desempolvamiento y son recirculados al proceso con el crudo [Karlsruhe II, 1996].

Las investigaciones sobre el equilibrio de los ciclos demuestran que los metales de baja y media volatilidad tienen un muy alto grado de retención en el clínker, mientras que los de alta volatilidad (Hg, Tl) tienen menor retención en el clínker.

### 3.4. Residuos

Los residuos generados durante la fabricación de clínker consisten básicamente en:

- materiales fuera de especificaciones, que son desechados de las materias primas durante la preparación del crudo, y
- partículas provenientes del by-pass o del filtro, que no puedan ser recirculadas al proceso (en España esto prácticamente no sucede).

Además de los residuos propiamente asociados al proceso de fabricación de clínker y cemento, se generan pequeñas cantidades de residuos provenientes de la operación y mantenimiento de equipos mecánicos y eléctricos:

- aceites usados y grasas de lubricación.
- líquidos dieléctricos de transformadores eléctricos.
- otros líquidos.

Los residuos peligrosos (RP's) deben ser convenientemente recogidos, almacenados, etiquetados, y entregados a los denominados gestores autorizados de residuos peligrosos.

Las líneas básicas para una gestión adecuada de los residuos generados en las fábricas de cemento debe comprender las siguientes prácticas:

- caracterización de los residuos para determinar su peligrosidad.
- estudio del origen de los residuos y de las posibilidades de evitar o reducir su generación.
- realizar una selección y segregación en origen de los residuos.
- fomentar el reciclado y la reutilización de los residuos no peligrosos en la propia fábrica o entregarlos a gestores que realicen estas prácticas.
- proteger los sistemas de almacenamiento y manipulación de residuos peligrosos, de forma que se minimice el riesgo de contaminación accidental de suelos y aguas.

### 3.5. Ruidos

El ruido generado por las actividades industriales tiene su origen en el funcionamiento de la maquinaria. Los equipos mecánicos (molinos, transportadores de cadenas, enfriadores de satélites, etc) generan ruido como consecuencia de la fricción y choque entre materiales sólidos. Los ventiladores, compresores y conducciones de

gases generan ruido por fricción de los gases con las paredes de las tuberías, los álabes y por fricción con gases a distinta velocidad (soplantes y exhaustores, transportes neumáticos, etc).

Técnicamente, las posibles soluciones o medidas a tomar para la reducción de las emisiones de ruido de los equipos industriales y su eficacia dependen fundamentalmente de los siguientes factores:

- tipo de fuente emisora de ruido.
- intensidad del ruido.
- frecuencia del sonido: graves/agudos.
- ubicación del equipo y disponibilidad de espacio.

Tres son las formas de combatir las emisiones de ruidos:

- ✓ actuaciones sobre el foco,
- ✓ actuaciones sobre el medio transmisor, y
- ✓ actuaciones sobre el receptor.

Las medidas que habitualmente se adoptan a nivel industrial son los cerramientos, las barreras acústicas, la colocación de material absorbente y los silenciadores.

La medida más habitual para combatir el ruido generado por los molinos y compresores es la instalación de cerramientos insonorizados con material aislante y/o absorbente, que reduce la transmisión al exterior de los elevados niveles de intensidad sonora producidos en este tipo de instalaciones. En los ventiladores se actúa con la instalación de silenciadores.

Estas actuaciones se vienen realizando desde hace años con motivo de la aplicación de las normas de Seguridad e Higiene en el Trabajo, materia de la que existe una normativa legal específica. En cuanto a los niveles de ruido ambiental en el exterior de las instalaciones industriales, existe gran diversidad de normas de inmisión sonora emanadas en general de Ordenanzas Municipales, y en algunos casos de legislación autonómica, las cuales suelen presentar grados muy dispares de exigencia y control.

### 3.6. Olores

Las emisiones de olor causan muy raramente problemas en una planta de buen funcionamiento.

Cuando el contenido en azufre de los gases de emisión del horno es anormalmente alto, por captación reducida del azufre del combustible o presencia de sulfuros volátiles en las materias primas, y el contenido en humedad de los mismos es a su vez elevado, pueden formarse sulfuros de hidrógeno que, en condiciones meteorológicas desfavorables, podrían generar olores en los alrededores de la fábrica.



## 4. LAS MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES EN LA INDUSTRIA DEL CEMENTO

### 4.1. Consideraciones previas

El comportamiento ambiental de una fábrica de cemento está ligado a los siguientes factores:

- Las características y composición de las materias primas empleadas
- la vía de fabricación empleada para la producción de clínker
- el diseño, equipamiento y operación de las instalaciones

La decisión sobre qué técnicas deben aplicarse en cada instalación industrial para alcanzar un elevado grado de protección ambiental, tal y como está previsto en la Directiva IPPC, está muy condicionada por aspectos locales propios de cada fábrica, por lo que la información suministrada en este capítulo no puede ser considerada aplicable a todas y cada una de las instalaciones de fabricación, ni en lo que se refiere a la posibilidad práctica de aplicar las técnicas, ni en los niveles de emisión asociados.

El presente capítulo es una síntesis de la información disponible sobre las Mejores Técnicas Disponibles en el sector español de fabricación de cemento. Para su determinación el esquema seguido ha sido realizar un análisis de las diferentes técnicas que pueden tener un efecto de reducción de las emisiones que se producen durante la fabricación del cemento, en concreto, de los niveles de reducción esperados con la aplicación de la técnica, la aplicabilidad real de la misma y los costes de inversión y operación, así como los inconvenientes encontrados durante el funcionamiento a escala industrial.

La aplicación de técnicas, el consumo de energía, y los niveles de emisión presentados en este capítulo han sido evaluados a través de un proceso iterativo que implica los siguientes pasos:

- identificación de los aspectos medioambientales significativos en el sector del cemento, que son las emisiones a la atmósfera de:
  - ✓ Óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ )
  - ✓ Dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ )
  - ✓ Partículas (polvo).
- examen de las técnicas para actuar sobre estos temas clave, incluyendo costes, consumos de energía e impactos sobre el medio ambiente asociados
- identificación de los mejores niveles de funcionamiento medioambientales, sobre la base de la información disponible en la Unión Europea y en todo el mundo, y estudio de las condiciones bajo las cuales se lograron estos niveles de funcionamiento
- selección de las mejores técnicas disponibles (MTD) y el empleo de la energía asociada y niveles de emisión para este sector en un sentido general completamente de acuerdo con el Anexo IV de la Directiva IPPC

En este capítulo se presentan las técnicas que se pueden considerar como apropiadas para el sector en su conjunto. En muchos casos son de aplicación corriente en instalaciones dentro del sector, en otros tienen relativamente pocos ejemplos de aplicación industrial.

Los niveles de emisión "asociados con las mejores técnicas disponibles" deben entenderse como niveles de emisión esperables y apropiados en la industria cementera en su conjunto, con las limitaciones expresadas en párrafos anteriores, y en el horizonte temporal de la Directiva IPPC. No son en ningún caso valores límite de emisión y no pueden asimilarse a tales. La decisión sobre qué límites de emisión se aplican a cada instalación es responsabilidad de la autoridad medioambiental competente que, además de las técnicas consideradas como MTDs, tendrá en cuenta aspectos tales como:

- ✓ Tipología de la instalación (posibilidad de aplicar las técnicas, vida útil, etc)
- ✓ Condiciones medioambientales locales y regionales (disponibilidad de recursos hídricos, presencia de fenómenos de acidificación y eutrofización, etc)
- ✓ Condiciones de cumplimiento de los valores límite de emisión (elaboración de medias, criterios estadísticos de cumplimiento de límites, etc)

En la aplicación práctica de las técnicas, algunas instalaciones pueden estar incluso por debajo de los valores de referencia asociados a las técnicas, fruto de una condiciones especialmente favorables; mientras que otras instalaciones pueden emitir más de los valores asociados, sin por ello provocar perjuicio a la calidad del medio ambiente.

Las instalaciones nuevas podrán en la mayoría de los casos tener niveles de emisión del orden de los menores descritos en el presente capítulo; mientras que algunas instalaciones existentes nunca podrán alcanzarlos.

Se debe tener en cuenta que el coste de aplicación de una técnica depende fuertemente de la situación concreta de cada instalación, variabilidad que no es posible tener en cuenta en este documento. Cuando no se disponen de datos de costes, las conclusiones sobre la viabilidad económica de las técnicas se deducen de las observaciones de las instalaciones existentes.

Los documentos BREF son fruto del intercambio de información previsto en la IPPC, pero no tienen en ningún caso valor legal. No obstante, son una herramienta aplicable como guía para la industria y la administración ambiental competente en la planificación industrial y medioambiental.

Los niveles de emisión que se indican en los siguientes apartados se expresan como valores medios diarios, en condiciones normales (273 K, 101,3 kPa), gas seco, y 10% de oxígeno en gases provenientes de procesos de combustión.

## 4.2. MTD de carácter general

### Proceso de fabricación de clínker

El proceso empleado para la fabricación de clínker tiene un efecto considerable sobre el comportamiento ambiental de la instalación. La vía de fabricación (seca, semiseca, semihúmeda, y húmeda) que se utiliza en los hornos existentes es función del desarrollo tecnológico en el momento de su instalación, y de las características de la materia prima disponible.

- Para hornos nuevos, y salvo condiciones de la materia prima desfavorables por su alta humedad, se considera que la fabricación de clínker debe realizarse en vía seca, con intercambiador de calor multi-etapas de ciclones y precalcincación. El consumo energético de un horno de estas características se sitúa entre 2900 y 3200 MJ/tonelada de clínker.

### Medidas primarias generales

Las mejores técnicas disponibles para la fabricación de cemento incluyen las medidas primarias generales siguientes:

- Un proceso estable y uniforme, con funcionamiento próximo a los puntos de consigna de los parámetros del proceso, es beneficioso para todas las emisiones del horno así como para el consumo energético. Esto se puede obtener aplicando:
  - ✓ Optimización del control de proceso, incluyendo sistemas de control automático (sistemas expertos, etc)
  - ✓ El empleo de sistemas gravimétricos de alimentación de combustibles sólidos
- Reducción del consumo de combustibles mediante:
  - ✓ Intercambiadores de calor y precalcincación, en la medida de lo posible en función de la configuración del sistema de horno
  - ✓ Enfriadores de clínker de mayor eficiencia para una máxima recuperación energética
  - ✓ Aprovechamiento del calor residual de los gases, en operaciones de secado de materiales u otros usos (p.e., calefacción en instalaciones ubicadas en zonas frías)
- Reducción del consumo de energía eléctrica mediante:
  - ✓ Sistemas de gestión de la energía
  - ✓ Equipos de molienda y otros equipos de accionamiento eléctrico de alta eficiencia energética

- Control de las sustancias que entran en el proceso y que, en función de dónde entran y cómo se procesen, pueden tener un efecto directo o indirecto sobre las emisiones del horno (azufre y compuestos orgánicos volátiles en la materia prima, metales pesados, compuestos de cloro).
- Reducción del consumo de recursos. El máximo aprovechamiento de los materiales que se emplean en la fabricación del cemento reduce el consumo total de materias primas. Por ejemplo, el polvo captado en el filtro del horno de clínker puede ser reintroducido al proceso. El empleo de residuos aptos para sustituir a las materias primas reduce el consumo de recursos naturales, pero es conveniente hacerlo siempre con un control adecuado de las sustancias que se introducen en el horno.
- Reducción del ratio clínker cemento. Una técnica para reducir el consumo de energía y las emisiones de la industria del cemento, expresada por unidad de cemento producido, es la reducción del contenido de clínker. Todo lo que suponga reducir la proporción de clínker, para cuya elaboración es preciso sinterizar materiales a temperaturas en torno a los 1.450 °C en un horno rotativo, constituye una reducción de las emisiones totales por unidad de cemento elaborado.

#### 4.2.1. Optimización del control de proceso

La optimización del proceso de clinkerización mediante la estabilización de los parámetros del proceso se hace normalmente para reducir el consumo específico de combustible, para aumentar la calidad del clínker y para incrementar el tiempo de vida de los equipos (el revestimiento refractario, por ejemplo).

La reducción de emisiones tales como partículas,  $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_2$ , son un efecto secundario consecuencia de esta optimización. Es beneficioso para la marcha del horno, y por tanto para las emisiones, el funcionamiento suave y estable del horno, con los parámetros del proceso próximos a los valores de diseño. La optimización incluye medidas como la homogeneización de las materias primas, la seguridad de la dosificación uniforme de carbón y la optimización del funcionamiento del enfriador. Para asegurar que la velocidad de alimentación del combustible sólido es uniforme, con mínimas puntas, es esencial tener buenos diseños de tolvas, cintas transportadoras y alimentadores, así como un sistema moderno de alimentación gravimétrica de combustible sólido.

La reducción en la formación del  $\text{NO}_x$  tiene lugar por la reducción de temperatura de llama y por la disminución en el consumo de combustible, así como por la formación de zonas de atmósfera reductora en el horno. El control del contenido de oxígeno es crítico para el control del  $\text{NO}_x$ . Generalmente cuanto menor contenido de oxígeno en el extremo final de un horno, menos  $\text{NO}_x$  se produce. Sin embargo, éste tiene que ser equilibrado contra los aumentos de  $\text{CO}$  y  $\text{SO}_2$  que se producen cuando los porcentajes de oxígeno bajan. [Nota IPC Reino Unido, 1996]. Aplicando técnicas de optimización del control del proceso se han documentado reducciones de  $\text{NO}_x$  de hasta un 30% [Cembureau en 1997]. No obstante, la experiencia de aplicación de sistemas de optimización de proceso indica que la reducción de las emisiones de  $\text{NO}_x$  tiene valores más modestos y no resulta cuantificable a priori, por depender de las emisiones de partida y otros muchos factores.

La reducción de las emisiones de  $\text{SO}_2$  es originada por la disminución de su volatilidad a menores temperaturas de llama y de combustión, y por la atmósfera oxidante en el horno, junto con un funcionamiento estable del mismo. El efecto positivo del control del proceso sobre las emisiones de  $\text{SO}_2$  es marginal para hornos con precalentadores aunque es considerable para hornos largos (vía seca y húmeda), en los que se han documentado reducciones en las emisiones de  $\text{SO}_2$  de hasta un 50% [Cembureau report, 1997].

En hornos con precipitadores electrostáticos, la anulación de los desajustes del horno y los disparos por CO reducen las emisiones de partículas. Los modernos sistemas, con equipos de control y mediciones más rápidas, permiten criterios de desconexión más elevados que los normalmente aplicados de 0,5% de CO en volumen, y con eso se reduce el número de disparos por CO.

La optimización del funcionamiento del horno se puede aplicar a todos los tipos de hornos e incluye muchos factores, desde la formación de los operadores del horno hasta la instalación de nuevos equipos, como sistemas de dosificación, silos de homogeneización, lechos de premezcla o modificaciones del enfriador de clínker. El coste de estas medidas, por tanto, es muy variable, oscilando entre 0 y 5 millones de euros. [Cembureau, 1997]. La efectividad de estas medidas es también muy variable en función de cada instalación, de los niveles de partida de las emisiones, y de otros muchos factores.

Varios suministradores de equipos para la industria del cemento han desarrollado sistemas expertos de control basados generalmente en el control de la combustión tomando como referencia los niveles de  $\text{NO}_x$  (Nota IPC Reino Unido, 1996). La inversión requerida para un sistema computerizado del control de alto nivel es de 300.000 € aproximadamente, pudiendo ser necesaria una inversión adicional para instalar los sistemas requeridos de dosificación y medición en la planta [Cembureau, 1997].

### 4.3. MTDs para el control de los óxidos de nitrógeno

#### 4.3.1. MTDs y valores de emisión asociados

Las mejores técnicas disponibles para la reducción de las emisiones de  $\text{NO}_x$  son la combinación de las medidas primarias generales anteriormente expuestas y las siguientes técnicas, que se describen una a una más adelante:

- Quemador de bajo  $\text{NO}_x$ .
- Combustión por etapas.
- Reducción no-catalítica selectiva (SNCR).

El uso conjunto de la combustión por etapas y la reducción no-catalítica selectiva está en fase de desarrollo (ver apartado 6.1.3).

Algunos hornos modernos vía seca con intercambiador de ciclones y precalcinción han alcanzado niveles de emisión por debajo de 500 mg/Nm<sup>3</sup> (expresados como  $\text{NO}_2$ ); en algunos casos utilizando únicamente medidas primarias, y en otros casos utilizando además la combustión por etapas. Las características de la materia prima (dificultad de cocción) y el diseño del horno pueden hacer inviable alcanzar dichos valores.

La mayor parte de los hornos que utilizan SNCR mantienen sus emisiones entre 500 y 800 mg/Nm<sup>3</sup>. Algunas instalaciones han alcanzado valores de emisión por debajo de los 200 mg/Nm<sup>3</sup>, aunque la experiencia acumulada en estos casos es todavía insuficiente. En concreto, se dispone únicamente de datos correspondientes a dos fábricas, con períodos de utilización industrial relativamente cortos. Una de las cuestiones que más preocupan en la aplicación de SNCR es la posible fuga de amoníaco, tanto en las operaciones de transporte y almacenamiento como en forma de emisiones durante su empleo como reductor.

Para aplicar la técnica SNCR en un horno de clínker, debe tenerse acceso a una ventana de temperaturas de en torno a los 900 °C. Esto es relativamente fácil en hornos vía seca con cuatro o más etapas de intercambiadores, mientras que resulta imposible en hornos vía semi o vía húmeda.

La aplicación de la técnica de combustión por etapas requiere que el horno disponga de un precalcinador con un diseño que permita largos tiempos de residencia.

En cuanto a la instalación de quemadores de bajo NO<sub>x</sub>, los resultados suelen ser satisfactorios, aunque en algunos casos no se ha observado reducción alguna en las emisiones de NO<sub>x</sub>.

En relación con los niveles asociados a las técnicas mencionadas, pueden realizarse las siguientes consideraciones:

- ✓ Los hornos de nueva construcción en vía seca y con precalcinador con sistema de combustión por etapas podrían alcanzar valores de emisión de NO<sub>x</sub> inferiores a los 500 mg/Nm<sup>3</sup>.
- ✓ Los hornos de vía seca con precalcinador que no dispongan de sistemas de combustión por etapas se situarán normalmente en el rango 500-800 mg/Nm<sup>3</sup>
- ✓ Los hornos de vía seca sin precalcinador que apliquen las medidas primarias descritas anteriormente deberían normalmente obtener valores de emisión por debajo de 1.200 mg/Nm<sup>3</sup>. Para reducir la emisión de NO<sub>x</sub> en hornos de vía seca con intercambiador de 4 etapas se ha aplicado la inyección de amoniaco en 20 hornos europeos (15 en Alemania, 2 en Suecia y 1 en Suiza), obteniéndose de esta manera valores inferiores a 800 mg/Nm<sup>3</sup>, valores que requieren como contrapartida el transporte y manipulación de compuestos amoniacales, además de la emisión a la atmósfera de la parte de amoniaco que no haya reaccionado con el NO<sub>x</sub>.
- ✓ Para hornos vía seca de menos de cuatro etapas, vía semi y vía húmeda no existen medidas secundarias que se hayan mostrado efectivas; los valores alcanzables por éstos son los resultantes de la combinación de técnicas primarias.

Como ya se ha mencionado en anteriores ocasiones, los rangos descritos son de tipo general, y habrá casos en los que las emisiones de una instalación se sitúen incluso por debajo del rango esperable para su tecnología, y otros en los que las características de las materias primas o del proceso darán lugar a valores de emisión superiores a los rangos descritos (p.e. hornos de clínker blanco-ver capítulo 3.3.1). En este sentido, es conveniente destacar que los rangos de emisión habituales en instalaciones nuevas de clínker gris (entre 500 y 800 mg/Nm<sup>3</sup>) son, en general, menores que los de las instalaciones existentes (entre 800 y 1.200 mg/Nm<sup>3</sup>).

### 4.3.2. Información sobre el quemador de bajo NO<sub>x</sub>

Los quemadores de bajo NO<sub>x</sub> varían en detalle, pero esencialmente el combustible y el aire se inyectan en el interior del horno por medio de tubos concéntricos. La proporción de aire primario se reduce a un 6- 10% de lo que se requiere para la combustión estequiométrica, normalmente en torno a un 13% en quemadores de combustión indirecta (World Cement, abril 1990) o un 20-25% en los tradicionales de combustión directa. El aire axial se inyecta con un elevado momento en el canal exterior. El carbón se puede insuflar a través de la tubería central o el canal medio. Se emplea un tercer canal para el aire en torbellino, que se inyecta por álabes a la salida de la tobera.

El efecto neto del diseño de este quemador es producir una ignición muy rápida, especialmente de los compuestos volátiles del combustible, en una atmósfera en defecto de oxígeno, lo que tenderá a reducir la formación de NO<sub>x</sub>.

Aunque su instalación no siempre trae ligada una reducción de las emisiones de NO<sub>x</sub>, se han conseguido reducciones de hasta un 30% de estas emisiones (Int. Cem. Rev., Octubre 1997) en los hornos en los que más éxito han tenido este tipo de quemadores, si bien no es usual que se supere el 10% de reducción.

Estos quemadores de bajo NO<sub>x</sub> se pueden aplicar a todos los hornos rotativos, habiéndose conseguido niveles de emisión de 600 - 1.000 mg/Nm<sup>3</sup> (Informe Dutch, 1997).

El coste de inversión para un quemador de bajo NO<sub>x</sub> es aproximadamente de 150.000 a 350.000 € para una capacidad de horno de 3.000 toneladas de clínker/día. (Informe Cembureau, 1997) (Informe Dutch, 1997). Si los sistemas de combustión existentes son directos se debe cambiar a un sistema indirecto de combustión para permitir que ésta se efectúe con un bajo flujo de aire primario, lo que significará un coste de inversión de cerca de 600.000 a 800.000 € para una capacidad de horno de 3.000 toneladas de clínker/día [Informe Cembureau, 1997]. En España la totalidad de hornos existentes utilizan sistemas indirectos de alimentación de combustible.

### 4.3.3. Información sobre la combustión por etapas

Esta técnica consiste básicamente en escalaronar la combustión en varias fases, introduciendo el combustible por varios puntos, realizándose principalmente en pre-calcinadores especialmente diseñados. La primera etapa de combustión tiene lugar en el quemador principal del horno. La segunda etapa de combustión consiste en un quemador en la entrada del horno, que produce una atmósfera reductora que descompone una parte de los óxidos de nitrógeno generados en la zona de sinterización.

La elevada temperatura en esta zona es particularmente favorable para la reacción que reconvierte los NO<sub>x</sub> en nitrógeno elemental. En la tercera etapa de la combustión el combustible se alimenta dentro del calcinador con una cantidad de aire terciario, produciendo allí una atmósfera reductora, también. Este sistema reduce la generación de NO<sub>x</sub> del combustible, y también disminuye los NO<sub>x</sub> que salen del horno. En la cuarta y etapa

final de la combustión, el aire terciario sobrante se alimenta dentro del sistema como "aire de remate" para la completar la combustión. [Informe Dutch, 1997].

El principio de esta técnica, descrito anteriormente, es el mismo en el que se basa la reducción de  $\text{NO}_x$  observada en los hornos que introducen combustibles no pulverizados, por ejemplo neumáticos troceados, en la zona de la entrada del horno.

Los calcinadores actualmente en uso difieren unos de otros esencialmente en la ubicación de la entrada del combustible, la manera en la que se distribuye el combustible, la alimentación del horno y el aire terciario, y en su configuración geométrica. [Informe Dutch, 1997].

La tecnología de la combustión por etapas puede emplearse sólo en hornos equipados con precalcinador. Se precisan modificaciones sustanciales en las plantas con sistemas de precalentadores ciclónicos sin precalcinadores.

Algunas plantas modernas con buena optimización logran niveles de emisión por debajo de 500 mg  $\text{NO}_x/\text{Nm}^3$  con combustión por etapas.

Si el proceso de combustión no se completa en el precalcinador, pueden incrementarse las emisiones de CO y  $\text{SO}_2$  [Informe Cembureau, 1997] habiéndose detectado problemas con el CO y los atascos cuando se pretenden elevadas eficacias [Cembureau]. A pesar de que se garantizan reducciones en las emisiones de  $\text{NO}_x$  de hasta un 50%, es muy difícil llegar a esos valores manteniendo los niveles de emisión del CO. [ZKG 10/1996]

El coste de inversión para instalar una combustión por etapas en un horno con precalcinador es de 0,1-2 millones de euros, dependiendo del diseño del calcinador existente (Cembureau). El coste de inversión para un precalcinador y el conducto terciario para 3.000 toneladas/día de un horno con precalentador con enfriador de parrilla en un horno con precalcinador es alrededor de 1 a 4 millones de euros. [Informe Cembureau, 1997]

El coste de inversión para transformar un horno de 3000 t/día con precalentador y enfriador de satélites en un horno con precalcinador y con enfriador de parrilla es de unos 15-20 M. €.

#### 4.3.4. Información sobre la reducción no catalítica selectiva

La SNCR consiste en la inyección de compuestos  $\text{NH}_{2-x}$  (comúnmente agua amoniacal con un 25%  $\text{NH}_3$ , también amoníaco gas, soluciones de urea, nitrocal, cianamidas, biosólidos u otras sustancias similares) en el gas de salida para reducir el  $\text{NO}_x$  a  $\text{N}_2$ . La reacción tiene un punto óptimo en una ventana de temperaturas de 800 a 1.000 °C, debiéndose proporcionar un tiempo suficiente de retención para que los agentes inyectados reaccionen con el  $\text{NO}_x$ . El acceso a la ventana de temperatura correcta es fácil de conseguir en hornos con precalentador y hornos con precalcinador. Sin embargo, no ocurre lo mismo en los hornos Lepol, y de hecho no existe ninguna instalación a escala industrial de SNCR en este tipo de hornos. En hornos largos de vías seca y húmeda es imposible acceder a la temperatura correcta con el necesario tiempo de retención, por lo que esta técnica no es de aplicación en los mismos.

Es importante mantener el rango de temperaturas mencionado anteriormente. Si la temperatura cae por debajo de este nivel se emite amoníaco sin reaccionar, y a temperaturas significativamente elevadas el amoníaco se oxida a  $\text{NO}_x$ , con lo que las emisiones del gas que se pretende eliminar en lugar de reducirse, se incrementan. También puede ocurrir que se produzcan escapes de  $\text{NH}_3$  a elevadas relaciones molares de  $\text{NH}_3/\text{NO}_2$ . Estas emisiones de  $\text{NH}_3$  sin reaccionar han tenido lugar en otros sectores industriales, en forma de aerosoles de cloruros y sulfatos amónicos, los cuales no son captados en los filtros, llegando a ser visibles como una columna blanca sobre la chimenea.

Es preciso señalar que esta técnica trata de limitar las emisiones de unos contaminantes, los  $\text{NO}_x$ , utilizando un agente reductor, el amoniaco, sensiblemente más peligroso en caso de emisiones a la atmósfera que los contaminantes que trata de eliminar. La aplicación de esta técnica también puede originar emisiones de monóxido de carbono y óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) [World Cement, marzo 1992].

El amoníaco que no ha reaccionado se puede oxidar y transformarse en  $\text{NO}_x$  en la atmósfera. Los escapes de  $\text{NH}_3$  pueden enriquecer en amoniaco el polvo que posteriormente se capta en el electrofiltro, inhabilitándolo para ser recirculado al molino de cemento, con lo que se genera un residuo que precisa un tratamiento específico [Cembureau]. Se requiere calor adicional para evaporar el agua de la solución amoniacal, lo que causa un pequeño incremento de las emisiones de dióxido de carbono.

Es un peligro potencial para el medio ambiente el transporte, almacenado y manipulación de amoníaco, por lo que se requieren medidas adicionales de seguridad. [Cembureau, 1997].

Hay 18 instalaciones SNCR a escala real en funcionamiento en países de EU y EFTA. En la mayoría de ellas se diseñaron y funcionan con valores de reducción de  $\text{NO}_x$  del 10 al 50% (con relaciones molares  $\text{NH}_3/\text{NO}_2$  de 0,5-0,9) y niveles de emisión de 500-800 mg  $\text{NO}_x/\text{Nm}^3$ , que es suficiente para cumplir con la legislación vigente en algunos países. De estas 18 instalaciones hay tan solo dos que alcanzan niveles de reducción en las emisiones de  $\text{NO}_x$  del 80%.

La eficacia de la reducción de  $\text{NO}_x$  aumenta con la relación molar  $\text{NH}_3/\text{NO}_2$ . Sin embargo, el valor de la reducción de  $\text{NO}_x$  no se puede aumentar simplemente a voluntad, puesto que una dosificación más alta tiene más probabilidades de causar escapes de  $\text{NH}_3$ .

Para un horno con precalentador de 3.000 toneladas/día con una emisión inicial de  $\text{NO}_x$  de hasta 2.000 mg/ $\text{Nm}^3$  y con reducción de  $\text{NO}_x$  hasta del 65% (es decir, 700 mg  $\text{NO}_x/\text{Nm}^3$ ) el coste de inversión para SNCR empleando agua amoniacal como agente reductor es de 0,5-1,5 M. €. El coste está muy influenciado por las regulaciones de seguridad sobre el almacenamiento de agua amoniacal. El coste operativo para el mismo horno es 0,3-0,5 €/t de clínker, estando principalmente determinado por el coste del amoníaco inyectado. [Informe Cembureau, 1997].

## 4.4. MTDs para el control de los óxidos de azufre

### 4.4.1. MTDs y valores de emisión asociados

Las mejores técnicas disponibles para la reducción de las emisiones de  $\text{SO}_x$  son la combinación de las medidas primarias generales anteriormente descritas, y la adición de absorbente en hornos vía seca.

El nivel de emisión MTD asociado con el empleo de estas técnicas está en el rango 200-400 mg/Nm<sup>3</sup>; expresado como dióxido de azufre, para hornos vía seca gris.

### 4.4.2. Información sobre la adición de absorbente

En los casos en los que las medidas primarias descritas anteriormente no sean suficientes, pueden adoptarse medidas adicionales al final del proceso en el caso que la especial situación del entorno de la fábrica justifique las grandes inversiones que hay que realizar para la instalación y mantenimiento de estos dispositivos.

La adición de absorbentes tales como cal apagada ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), cal viva ( $\text{CaO}$ ) o cenizas volantes activadas con alto contenido de  $\text{CaO}$  al gas de salida del horno es una técnica para absorber parte del  $\text{SO}_2$ . La inyección del absorbente se puede aplicar en vías secas o húmedas. [Dutch, 1997]. Para hornos con precalentador se ha encontrado que la inyección directa de cal apagada en el gas de salida es menos eficiente que la adición de cal apagada al crudo entrante en el precalentador. El  $\text{SO}_2$  reaccionará con la cal para dar  $\text{CaSO}_3$  y  $\text{CaSO}_4$ , que entran al horno junto con las materias primas y se incorporan al clínker [Dutch, 1997] [Cembureau, 1997].

Esta técnica es capaz de limpiar las corrientes de gas con concentraciones moderadas de dióxido de azufre y se puede aplicar a temperaturas de más de 400 °C. Los valores de reducción más altos se pueden lograr a temperaturas que excedan los 600 °C. Es recomendable emplear un absorbente basado en cal apagada con una superficie específica alta y elevada porosidad. [Dutch, 1997]. La cal apagada no tiene reactividad alta, por consiguiente tiene que aplicarse elevadas relaciones molares  $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{SO}_2$ , entre 3 y 6. [Cembureau, 1997]. Las corrientes de gas con concentraciones altas de dióxido de azufre requieren de 6 a 7 veces las cantidades estequiométricas de absorbente, implicando altos costes de explotación. [Dutch, 1997]

Se pueden lograr reducciones de dióxido de azufre de 60 a 80% por inyección de absorbente en hornos con precalentador en suspensión.

Lo normal en hornos de clínker gris es que los niveles iniciales no superen los 1200 mg/m<sup>3</sup>. Para éstos, la adición de absorbente reduciría las emisiones a niveles de alrededor de los 400 mg/m<sup>3</sup>. Si por el contrario los niveles iniciales son superiores a los 1200 mg/m<sup>3</sup> la adición en los hornos de absorbentes, como por ejemplo cal apagada, no resulta económicamente viable. [Dutch report, 1997]

La adición de absorbente es en principio aplicable a todos los hornos [Dutch, 1997], aunque es empleada mayormente en los de vía seca con precalentadores de suspensión. Tan solo hay un horno largo de vía húmeda que inyecta bicarbonato sódico seco al gas de salida antes del EP para reducir las emisiones punta de dióxido de azufre

[Marchal]. La adición de cal en la alimentación del horno reduce la calidad de los gránulos/nódulos y causa problemas de flujo en los hornos Lepol.

La adición de absorbente se emplea en algunas plantas para asegurar que no se exceden los límites normales en situaciones punta. Significa esto que en general no es de funcionamiento continuo, sino sólo cuando lo requieran las circunstancias específicas [Dutch, 1997]. Con una concentración inicial de dióxido de azufre de hasta 3.000 mg/Nm<sup>3</sup>, una reducción de hasta el 65% y un coste de cal apagada de 85 €/t, el coste de inversión de un horno con precalentador de 3.000 t clínker/día es de alrededor de 0,2-0,3 M. € y los costes de explotación sobre 0,1-0,4 €/t clínker. [Cembureau, 1997]

## 4.5. MTDs para el control de las partículas

### 4.5.1. MTDs y valores de emisión asociados

Las mejores técnicas aplicables para la reducción de las emisiones de partículas son la combinación de las medidas primarias generales descritas anteriormente y:

- Reducción de las emisiones dispersas mediante la aplicación de las técnicas descritas en el punto 4.5.2.
- Reducción de las emisiones de partículas por chimeneas mediante la instalación de:
  - ✓ Filtros electrostáticos, con sistemas de medición de CO que minimicen el número de disparos.
  - ✓ Filtros de mangas multicámara y sistemas de detección de rotura de las mangas.

El nivel de emisión MTD asociado con los filtros es:

- ✓ 30-50 mg/Nm<sup>3</sup> para hornos y enfriadores,
- ✓ 10-30 mg/Nm<sup>3</sup> para otras instalaciones de desempolvamiento.

### 4.5.2. Información sobre el control de las emisiones de fuentes dispersas

Las principales fuentes dispersas de emisión se generan en el almacenamiento y la manipulación de las materias primas, los combustibles y el clínker, y por el tráfico de vehículos por la fábrica. Con una disposición simple y lineal de la planta se minimizan las posibles fuentes de emisiones. Un mantenimiento completo y apropiado de la instalación tiene siempre el resultado indirecto de la reducción de las emisiones dispersas por la reducción de las fugas de aire y puntos de derrame. El empleo de dispositivos y sistemas de control automáticos también ayudan a la reducción de las emisiones dispersas. [Cembureau, 1997].

Algunas técnicas para la disminución de las emisiones dispersas son:

- Protección contra el viento en las pilas a la intemperie. Cuando existen almacenamientos de materiales a la intemperie es posible reducir las emisiones dispersas empleando barreras contra el viento diseñadas para ese fin.

- Pulverizado de agua y supresores químicos de polvo. Cuando el punto de origen del polvo está bien localizado se puede instalar un sistema de inyección de agua pulverizada. La humidificación de las partículas de polvo ayuda a la aglomeración de éste y se produce un asentamiento del mismo. Se utilizan también una amplia variedad de agentes químicos para proporcionar una eficacia total al pulverizado de agua.
- Pavimentación, limpieza y regado de viales. Las áreas utilizadas por los camiones deben pavimentarse y mantenerse limpias en la medida en que sea posible. El regado de las carreteras reduce las emisiones de polvo, especialmente durante el tiempo seco. La adopción de buenas prácticas de orden y limpieza también reduce las emisiones de polvo.
- Aspiración fija y móvil. Durante las operaciones de mantenimiento o en caso de problemas con los sistemas de transporte, pueden tener lugar derrames de materiales. Para prevenir la formación de emisiones de polvo durante las operaciones de limpieza se pueden emplear sistemas de aspiración. Los nuevos edificios se pueden equipar fácilmente con sistemas de limpieza por aspiración fijos, mientras que los edificios existentes se equipan mejor con sistemas de limpieza móviles dotados de conexiones flexibles.
- Ventilación y recogida en los filtros de mangas. Siempre que sea posible, los materiales que precisen manipulación deben ser transportados a través de sistemas cerrados mantenidos en depresión. El aire de aspiración de este sistema tiene que ser posteriormente depurado en un filtro de mangas antes de ser emitido a la atmósfera.
- Almacenamiento cerrado con sistema de manipulación automática. Los silos de clínker y los almacenamientos cerrados con manipulación automática se consideran la solución más efectiva para el problema de las emisiones de polvo generadas por los acopios de gran volumen. Estos almacenamientos están equipados con filtros de mangas para prevenir la formación de polvo durante las operaciones de carga y descarga.

#### 4.5.3. Información sobre el control de las emisiones de fuentes puntuales

Hay tres principales fuentes puntuales de emisiones de polvo en las plantas de cemento. Estas son los hornos, los enfriadores de clínker y los molinos de cemento. Las emisiones en estos tres tipos de focos se combaten con la instalación de precipitadores electrostáticos (EPs) o filtros de mangas.

En cuanto a las fuentes dispersas, en una fábrica de cemento pueden producirse dondequiera que tenga lugar un proceso de manipulación y trasiego de material a granel. El machaqueo y molienda de materias primas y combustibles son también operaciones a considerar.

La tabla 4.3 muestra una vista general de los datos disponibles. La tabla es un resumen y debería leerse conjuntamente con los correspondientes puntos que siguen.

**Tabla 4.3: Vista general de las técnicas para el control del polvo**

Técnica	Aplicabilidad	Emisiones	Coste <sup>2</sup>		Efectos adicionales <sup>3</sup>
		mg/Nm <sup>3</sup> <sup>1</sup>	Inversión	Operativo	
Precipitador electrostático	Todos los hornos	<50	2,1-4,6	0,1-0,2	↓ Metales
	Enfriadores clínker	<50	0,8-1,2	0,09-0,18	
	Molinos cemento	<50	0,8-1,2	0,09-0,18	
Filtros de mangas	Todos los hornos	<50	2,1-4,3	0,15-0,35	↓ Metales
	Enfriadores clínker	<50	1,0-1,4	0,1-0,15	
	Molinos cemento	<50	0,3-0,5	0,03-0,04	

<sup>1)</sup> para hornos referido a medias diarias, gas seco, 273 K, 101,3kPa y 10% de oxígeno.

<sup>2)</sup> coste de inversión en Meuro y coste de explotación en euros por tonelada de clínker para reducir las emisiones hasta <50 mg/Nm<sup>3</sup>, referido normalmente a una capacidad de horno de 3.000 toneladas de clínker por día y emisión inicial de hasta 500 g de polvo /Nm<sup>3</sup>.

<sup>3)</sup> Efectos adicionales sobre otras emisiones.

Los EPs y los filtros de mangas tienen sus ventajas y sus desventajas. Ambos tipos tienen una muy alta eficacia de desempolvado durante el funcionamiento normal. Algunos filtros nuevos adecuadamente dimensionados y mantenidos, y en condiciones de funcionamiento óptimas han alcanzado valores de emisión de entre 5 y 20 mg/Nm<sup>3</sup>. En condiciones especiales tales como una concentración alta de CO, el arranque del horno, la entrada en funcionamiento del molino de crudo, o su parada, la eficacia de los EPs puede estar reducida significativamente mientras que no se afecta la eficacia de los filtros de mangas. Por consiguiente los filtros de mangas tienen una mayor eficacia total si están bien mantenidos y las mangas filtrantes se sustituyen periódicamente. Una desventaja de los filtros de mangas es que las mangas filtrantes usadas son residuos y tienen que adaptarse a las regulaciones nacionales. [Cembureau, 1997]

En los últimos años se han desarrollado los denominados filtros híbridos, consistentes en la combinación de ambos sistemas. Los gases pasan primero por una cámara electrostática, donde se realiza un desempolvamiento parcial, para pasar posteriormente a la cámara de mangas. Este sistema pretende aunar las ventajas de ambos sistemas y compensar sus desventajas.

#### 4.5.3.1. Precipitadores electrostáticos

Estos precipitadores generan un campo electrostático a lo largo del camino de las partículas en la corriente de aire. Las partículas se cargan negativamente y emigran hacia las placas colectoras cargadas positivamente. Las placas colectoras se someten a golpeteo o vibración periódica para su limpieza, descargando el material que cae en tolvas colectoras situadas por debajo. Es importante que los ciclos de limpieza del EP sean optimizados para minimizar las macropartículas reentrantes y así limitar al máximo la visibilidad del penacho emitido. Los EPs se caracterizan por su facultad para funcionar bajo condiciones de altas temperaturas (hasta aproximadamente 400 °C) y elevada humedad.

Los factores que afectan a la eficacia de este tipo de precipitadores son la velocidad del gas, la intensidad del campo eléctrico, la velocidad de carga de las micropartículas, la concentración del dióxido de azufre, el contenido de humedad y la forma y área de los electrodos.

El funcionamiento puede verse perjudicado por las acumulaciones del material que puede formar una capa aislante sobre las placas colectoras, reduciendo así la intensidad del campo eléctrico [Dutch, 1997]. Esto se puede originar si hay entradas altas de cloruros y azufre en el horno, formando cloruros y sulfatos metálicos alcalinos. Los cloruros de metales alcalinos forman un polvo muy fino (0,1-1  $\mu\text{m}$ ) y tienen una resistividad específica alta (entre  $10^{12}$  - $10^{13}$   $\Omega\text{cm}$ ) formando capas aislantes sobre los electrodos y dificultando la eliminación del polvo. Se ha observado y estudiado esto particularmente en la industria del hierro y del acero. Se pueden resolver los problemas de resistencias elevadas en el polvo con inyección de agua en las torres de acondicionamiento [Karlsruhe II, 1996].

Para el funcionamiento eficaz de los precipitadores electrostáticos, es importante evitar los disparos de CO. Ver la sección 4.2.1 Optimización del control del proceso.

El coste de inversión para un nuevo EP para un horno con una capacidad de 3.000 t clínker/día, con una carga inicial de partículas de hasta 500 g/m<sup>3</sup> y un contenido de polvo en el gas limpio <50 mg/Nm<sup>3</sup> es de alrededor de 1,5-3,8 millones de euros, y un extra de 0,6-0,8 millones de euros para la torre de acondicionamiento y el ventilador del filtro si se requiriese. El coste de explotación asociado es alrededor de 0,1-0,2 €/t clínker.

Para un enfriador de clínker de una capacidad de horno de 3.000 t clínker/día, carga inicial de partículas de hasta 20 g/m<sup>3</sup> y contenido de polvo del gas limpio <50 mg/Nm<sup>3</sup> y molino de bolas para cemento con una capacidad de 160 t cemento/hora, con un nivel inicial de hasta 300 g/m<sup>3</sup> y contenido de polvo en el gas limpio <50 mg/Nm<sup>3</sup>, el coste de inversión es de cerca de 0,8-1,2 millones de euros y el coste de explotación de 0,09-0,18 €/t clínker [Cembureau, 1997].

#### 4.5.3.2. Filtros de mangas

El principio básico de los filtros de mangas es emplear una membrana de tejido que es permeable al gas pero que retendrá el polvo. El gas a tratar fluye normalmente desde el exterior de la manga hacia el interior. Puesto que la torta de polvo aumenta de espesor, la resistencia al flujo de gas se incrementa. Por consiguiente, es necesario realizar períodos de limpieza del medio filtrante para controlar la caída de presión de gas a lo largo del filtro. Los métodos más comunes de limpieza incluyen el flujo de gas inverso, agitación mecánica, vibración e impulsión con aire comprimido.

El filtro de mangas puede tener múltiples compartimentos que se aíslan individualmente en caso de la rotura de alguna manga. El dimensionamiento del filtro debe ser suficiente para permitir el funcionamiento correcto del filtro en caso de que un compartimento quede fuera de servicio. La instalación de "detectores de mangas rotas" en cada compartimento permite conocer las necesidades de mantenimiento.

El empleo de filtros de mangas con gases a temperaturas altas exige el montaje de tejidos más resistentes que los normalmente suministrados, y por tanto con un coste superior.

La inversión que se requiere para instalar un filtro de mangas nuevo en un horno de una capacidad de 3.000 t clínker/día, con un nivel de emisión inicial de hasta 500 g/m<sup>3</sup> y contenido de polvo en el gas limpio <50 mg/Nm<sup>3</sup> es de cerca de 1,5-3,5 M. €, y un extra de 0,6-0,8 millones más de euros para la torre de acondicionamiento y el ventilador del filtro. Las torres de acondicionamiento son necesarias sólo para aplicaciones a bajas temperaturas con mangas, por ejemplo, de poliacrilnitrilo. El coste de explotación para el mismo filtro de mangas del horno es de alrededor de 0,15-0,35 €/t de clínker.

La inversión que se requiere para instalar un filtro de mangas con sistema de limpieza por impulsos de aire en un enfriador de parrilla de clínker para una capacidad de horno de 3.000 t/día, con un nivel inicial de emisión de hasta 20 g/m<sup>3</sup> y contenido de polvo en el gas limpio <50 mg/Nm<sup>3</sup> es de alrededor de 1,0-1,4 M. € (incluidos el intercambiador de calor por aire y el ventilador del filtro) y el coste de explotación es de cerca de 0,10-0,15 €/t clínker.

Para un molino de cemento de bolas con una capacidad de 160 toneladas de cemento/hora, con niveles iniciales de emisión de 300 g/m<sup>3</sup> y con contenidos en polvo en el gas limpio <50 mg/Nm<sup>3</sup>, el coste de inversión de un filtro de mangas con sistema de limpieza por impulsos de aire es de alrededor de 0,3-0,5 millones de euros incluyendo el ventilador del filtro, y el coste de explotación de 0,03-0,04 €/t clínker [Cembureau, 1997].



## 5. MEDICIÓN Y CONTROL DE EMISIONES A LA ATMÓSFERA

Los sistemas de medición de emisiones a la atmósfera están constituidos por el conjunto de métodos que tienen como objetivo analizar cuantitativamente los contaminantes presentes en el flujo de gases generado en instalaciones o procesos.

En instalaciones industriales, la medición de emisiones a la atmósfera se realiza tanto para verificar el cumplimiento de la normativa como para determinar, entre otros parámetros, las alteraciones que se puedan producir en los procesos de fabricación.

Existen diversos sistemas de medición y control de las emisiones. La elección de un método u otro depende principalmente del tipo de contaminante a analizar y de todos aquellos factores que pueden afectar a la exactitud y precisión de los resultados, como por ejemplo, las condiciones particulares de la instalación, el tipo de proceso que se realiza, las condiciones de emisión, etc.

Este capítulo identifica tanto los parámetros legales y de operación que caracterizan los procedimientos de medición y control de emisiones a la atmósfera, como los principales métodos de medición que se pueden utilizar en la industria del cemento. Asimismo, se resumen las características de los métodos más usuales, describiendo en cada caso la metodología de toma de muestras y análisis.

### 5.1. Introducción

La industria del cemento emite a la atmósfera una serie de contaminantes que pueden proceder de fuentes puntuales o dispersas (figura 5.1.).

Las emisiones desde fuentes puntuales se generan durante todo el proceso productivo (combustión, molienda y secado) y se caracterizan por estar canalizadas a través de conductos y chimeneas. Los principales compuestos contaminantes generados son:

- Partículas sólidas
- Óxidos de nitrógeno
- Dióxido de azufre

Además, existen otros compuestos que se emiten desde estas mismas fuentes, en función de las características del proceso:

- Dióxido de carbono
- Monóxido de carbono
- Compuestos orgánicos volátiles
- Ácido clorhídrico
- Ácido fluorhídrico
- Dioxinas y furanos
- Metales pesados

Las emisiones desde fuentes dispersas, por el contrario, no se encuentran canalizadas y no se asocian a procesos de combustión ni de molienda y secado sino simplemente a operaciones tales como la carga discontinua de camiones por palas excavadoras, los apilamientos de caliza, la circulación de vehículos por pistas no pavimentadas,

tadas o la acción erosiva del viento sobre los materiales que se encuentran a la intemperie. Estas operaciones emiten a la atmósfera, básicamente, partículas sólidas como único contaminante.

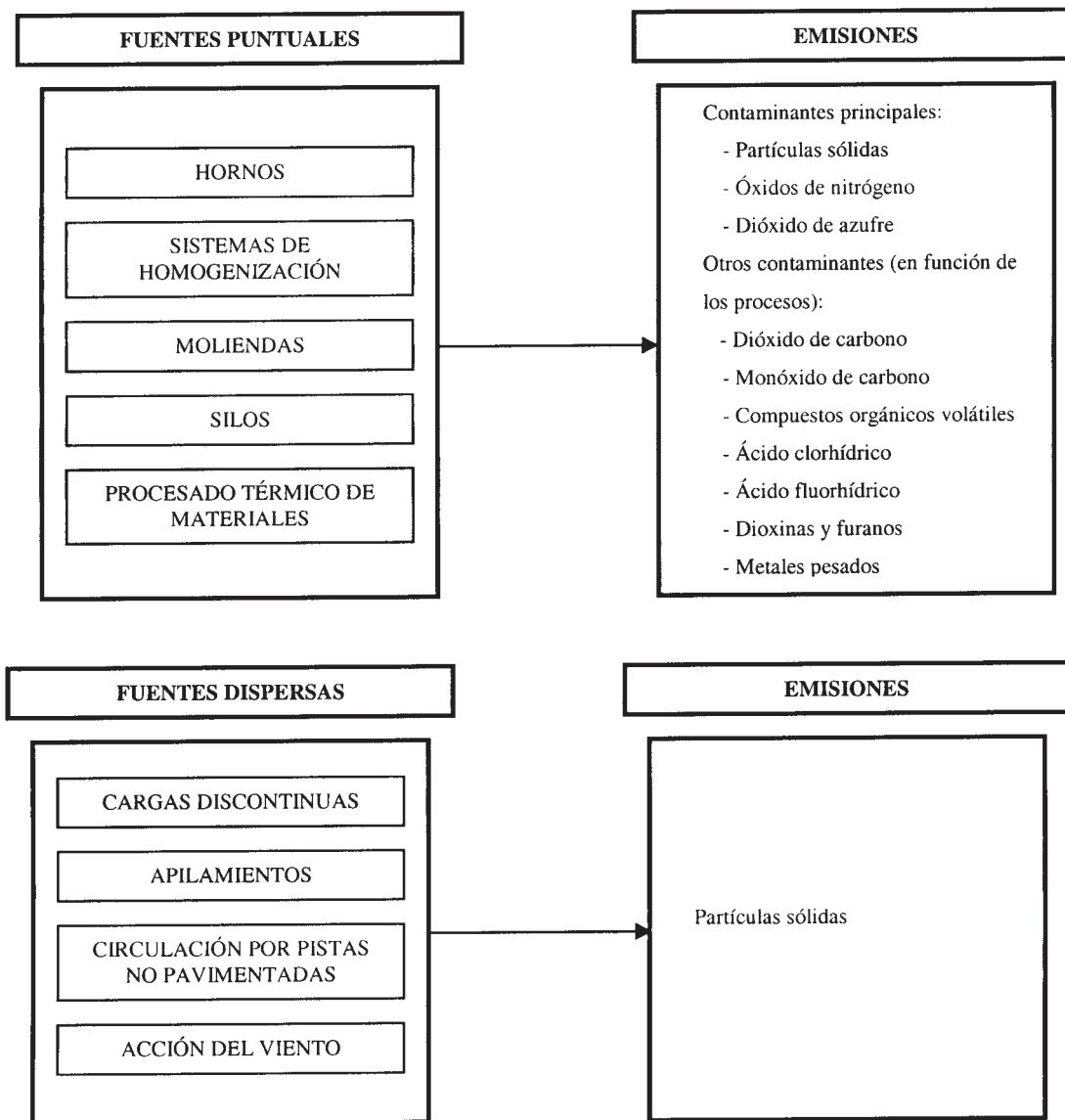


Figura 5.1. Contaminantes atmosféricos ligados a la industria del cemento.

Por este motivo, el presente capítulo hace referencia a los aspectos básicos de la medición y el control de las emisiones a la atmósfera de la industria del cemento y describe los sistemas de medición más habituales para los contaminantes típicos del sector. Asimismo, también incluye referencias a contaminantes que, en función de los procesos, son emitidos en pequeñas cantidades y, además, referencias a otros compuestos incluidos en el Registro Europeo de Emisiones y Fuentes Contaminantes (EPER) para el sector del cemento.

## 5.2. Legislación

### 5.2.1. Legislación básica

En general, los límites de emisiones a la atmósfera para la industria del cemento se refieren a los tres contaminantes principales del sector:

- Partículas sólidas
- Óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) y
- Óxidos de azufre ( $\text{SO}_2$ )

Algunos países tienen, además, límites generales de metales pesados establecidos para instalaciones industriales que son también aplicables a las fábricas de cemento. No obstante, éste no es el caso de España donde sólo se aplican los límites para partículas sólidas que establece el Decreto 833/75, de 6 de febrero (BOE nº 96 de 22 de abril de 1975) en su anexo 4 para la industria del cemento.

Por otro lado, la Directiva 2000/76/CE, de 4 de diciembre (DOCE nº L332 de 28 de diciembre de 2000), establece límites y exigencias de control para los hornos de clínker que realizan actividades de coincineración de residuos. En este caso, además de los contaminantes mencionados, se contemplan también límites de emisión, aplicables para las instalaciones existentes a partir del 28 de diciembre de 2005, de los siguientes compuestos:

- Cloruro y fluoruro de hidrógeno ( $\text{HCl}$  y  $\text{HF}$ )
- Carbono Orgánico Total (COT)
- Dioxinas y furanos (PCDD/Fs)
- Metales pesados

En consecuencia, existen diferentes límites de emisión en función del tipo de combustible que utilice la instalación. La tabla 5.1. indica los límites de emisión aplicables a la industria del cemento en España, diferenciando aquéllos que son aplicables a la combustión de combustibles fósiles (Decreto 833/75 de 6 de febrero, publicado en el BOE nº 96 de 22 de abril de 1975) o a la combustión de residuos como combustibles alternativos (Directiva 2000/76/CE de 4 diciembre, publicado en el DOCE nº L332 de 28 de diciembre de 2000, aplicable a las instalaciones existentes a partir del 28 de diciembre de 2005).

Los límites de emisiones a la atmósfera para la industria del cemento están en general expresados como medias diarias y, normalmente calculadas a partir de valores semi-horarios, y son aplicables en condiciones estables de operación de las instalaciones.

Además, el Ministerio de Medio Ambiente y la Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (OFICEMEN) firmaron el 28 de noviembre de 2001 un Acuerdo Voluntario con el objetivo de prevenir, reducir y controlar la contaminación proveniente de las fábricas de cemento, mediante la aplicación progresiva de las Mejores Técnicas Disponibles. Aparte de los objetivos en mejora de las emisiones dispersas, se han fijado los compromisos de emisión para fuentes puntuales que se incluyen en la tabla 5.1. (Anexo I)

**Tabla 5.1. Resumen de los límites de emisión a la atmósfera existentes para la industria del cemento en España**

NORMATIVA	EMISIÓN			LÍMITES ESTABLECIDOS (mg/Nm <sup>3</sup> )	
<b>Decreto 833/75 de 6 de febrero</b>	Partículas sólidas	Instalaciones existentes	Hornos de cemento	400 <sup>(1)</sup>	
			Enfriadores de clíker	170	
			Machacadoras, molinos, transportadores y ensacadoras	300	
	Instalaciones nuevas		Hornos de cemento	250 <sup>(1)</sup>	
			Enfriadores de clíker	100	
			Machacadoras, molinos, transportadores y ensacadoras	250	
	Previsión 1980		Hornos de cemento	150 <sup>(1)</sup>	
			Enfriadores de clíker	50	
			Machacadoras, molinos, transportadores y ensacadoras	150	
<b>Directiva 2000/76/CE de 4 diciembre aplicable a los hornos de cemento existentes que coincineran residuos a partir del 28 de diciembre de 2005<sup>(4)</sup></b>	Partículas sólidas			30 (50) <sup>(5)</sup>	
	NO <sub>X</sub>			800 (500) <sup>(6)</sup> (1.200) <sup>(5)</sup>	
	SO <sub>2</sub>			50 <sup>(2)</sup>	
	COT			10 <sup>(3)</sup>	
	HCl			10	
	HF			1	
	PCDD/Fs			0,1 ng I-TEQ/Nm <sup>3</sup>	
	Metales pesados	Cd+Tl		0,05	
		Hg		0,05	
		Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V		0,5	

NORMATIVA	EMISIÓN			LÍMITES ESTABLECIDOS (mg/Nm <sup>3</sup> )
Acuerdo Voluntario para la Prevención y el Control de la contaminación de la Industria Española del Cemento  Objetivos ambientales año 2005	Partículas sólidas	Hornos de cemento y enfriadores	Líneas integrales de fabricación de clínker de nueva construcción	30
			Líneas existentes de fabricación de clínker que sustituyan totalmente los equipos de desempolvamiento	50
			Líneas existentes	75
	Otras fuentes localizadas	Plantas nuevas	Plantas nuevas	30
		Plantas existentes	Plantas existentes	50
	NO <sub>x</sub>	Plantas nuevas	Hornos de vía seca	500
		Plantas existentes	Otros hornos	800
		Plantas existentes	Hornos de vía seca	1.200
	SO <sub>2</sub>	Hornos de vía seca		600 <sup>(7)</sup>

<sup>(1)</sup> Se admite una tolerancia de 1.000 mg/Nm<sup>3</sup> durante 48 horas consecutivas. Las instalaciones de depuración no podrán funcionar incorrectamente más de 200 h/año.

<sup>(2)</sup> y <sup>(3)</sup> La autoridad competente podrá autorizar exenciones en los casos en que el COT y el SO<sub>2</sub> no procedan de la incineración de residuos.

<sup>(4)</sup> Referenciados al 10% de oxígeno en gases procedentes de la combustión del horno de cemento.

<sup>(5)</sup> Aplicable hasta el 1 de enero de 2008 a las instalaciones que quemen menos de 3 toneladas/hora de residuos.

<sup>(6)</sup> Hornos de cemento de nueva construcción.

<sup>(7)</sup> En los casos en que el contenido de compuestos sulfurosos volátiles en la materia prima imposibilite la consecución del objetivo, esta imposibilidad deberá ser justificada técnicamente ante la Comisión de Seguimiento.

## 5.2.2. Registro Europeo de Emisiones y Fuentes Contaminantes (EPER)

De acuerdo con el artículo 1 de la Decisión 2000/479/CE de la Comisión Europea relativa al Registro Europeo de Emisiones y Fuentes Contaminantes (EPER), los estados miembros deben notificar a la Comisión las emisiones producidas en las actividades que figuran en el anexo I de la Directiva 96/61/CE relativa a la prevención y al control integrados de la contaminación (IPPC).

En la notificación de emisiones, los datos ofrecidos deben incluir un código que indique el método de determinación utilizado.

Existen tres clases de códigos definidos por la Comisión Europea a través del Documento Guía para la realización del EPER:

- **Clase M:** código que indica que los datos se basan en mediciones realizadas utilizando métodos normalizados o aceptados, aunque sea necesario realizar cál-

culos para convertir o transformar los resultados de las mediciones en datos de emisiones anuales.

- **Clase C:** código que indica que los datos se basan en cálculos realizados utilizando métodos de estimación y factores de emisión aceptados en el ámbito nacional o internacional y representativos de los sectores industriales.
- **Clase E:** código que indica que los datos se basan en estimaciones no normalizadas, fundamentadas en hipótesis óptimas o en las previsiones efectuadas por expertos.

Asimismo, el Documento Guía indica, aunque sin entrar en detalle y sin dar recomendaciones específicas, las posibles metodologías estandarizadas a utilizar para la determinación de emisiones a la atmósfera.

En el anexo A.1 de la Decisión Relativa al EPER se enumeran los contaminantes seleccionados como objeto de notificación. Se han tomado en consideración los contaminantes que se contemplan en los inventarios ya existentes como el CLRTAP/EMEP (contaminación atmosférica transfronteriza a larga distancia), CORINAIR (Programa Europeo de emisiones atmosféricas gestionado por la AEMA), la Directiva Marco sobre el agua y las listas de sustancias peligrosas de OSPARCOM y HELCOM.

En la guía de orientación para realización del EPER (publicada por la Comisión Europea) se incluyen sublistas sectoriales específicas para todos los sectores que contienen los contaminantes que previsiblemente pueden emitir los complejos que actúan en estos sectores. Estas listas solo tienen carácter orientativo y deben considerarse listas de control para la notificación. En el caso de la industria cementera las sustancias identificadas son: PM10, fluor, cloro, PAH, benceno, D/F, Zn, Pb, Ni, Hg, Cu, Cr, Cd, As, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NMVOC, CO<sub>2</sub> y CO. No obstante, debe considerarse que las cantidades de algunos de estos contaminantes (en general PAH, benceno, D/F y algunos metales) emitidas por la industria del cemento son muy pequeñas, por lo que, en consecuencia, estos valores estarán normalmente por debajo de los umbrales de notificación e información al público definidos en la Decisión 2000/479/CE.

### **5.3. Aspectos básicos de la medición y control de las emisiones a la atmósfera de la industria del cemento**

#### **5.3.1. Identificación de los parámetros críticos**

El control de emisiones a la atmósfera debe observar diferentes parámetros que pueden influir sobre la medición de contaminantes y sus resultados.

En la siguiente tabla se describen algunos de los parámetros críticos más importantes que deben contemplarse para asegurar una determinación correcta de emisiones a la atmósfera en las fábricas de cemento.

**Tabla 5.2. Parámetros críticos en el control de emisiones a la atmósfera en las fábricas de cemento**

PARÁMETRO	
<b>Representatividad de la muestra</b>	<p>Los compuestos emitidos por chimenea, no son evacuados de manera homogénea, ya que sus condiciones de emisión dependen de diversos factores, como el tiro de la chimenea, el rozamiento con las paredes, etc.</p> <p>De esta manera, es importante que la toma de muestras se realice en un punto que reúna unas condiciones estables y uniformes.</p>
<b>Acondicionamiento de la chimenea</b>	<p>Para observar la condición descrita en el apartado anterior el lugar de toma de muestras debe cumplir las siguientes características:</p> <p>a) <b>Situación del lugar de toma de muestras.</b> Las distancias mínimas de los orificios de toma de muestra respecto a las perturbaciones del flujo de gases deben cumplir:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- situación óptima: 8D, 2D,</li> <li>- situación mínima: 3D, 2D, siendo D el diámetro de la chimenea</li> </ul> <p>b) <b>Orificios de toma de muestra.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Número:</b> El número de orificios debe variar en función de la forma de la chimenea y de su diámetro.</li> <li>Para chimeneas circulares de diámetro menor a 35 cm se debe disponer 1 orificio, para un diámetro comprendido entre 35 cm y 2 m se deben disponer 2 orificios (situados perpendicularmente) y para chimeneas con diámetro mayor o igual a 2 m se deben disponer 4 orificios (opuestos diametralmente).</li> <li>En el caso de chimeneas rectangulares y horizontales el número de orificios debe ser el establecido por la norma UNE 777223.</li> <li>- <b>Dimensiones:</b> La dimensión mínima de los orificios para la toma de muestras debe ser de 100 mm de diámetro.</li> </ul> <p>c) <b>Plataforma.</b> Se debe disponer en el punto de toma de muestras una plataforma de fácil acceso, que permita trabajar con facilidad y seguridad (con barandas), y que disponga de toma de corriente eléctrica y de iluminación suficiente.</p>
<b>Humedad</b>	Las condiciones de humedad pueden determinar el tipo de metodología a utilizar en el proceso de toma de muestras. No obstante, en el caso de las fábricas de cemento españolas, este parámetro no es crítico debido a que utilizan mayoritariamente procesos de fabricación por vía seca.
<b>Contaminantes emitidos en fase gaseosa y sólida</b>	Algunos contaminantes pueden ser emitidos en forma gaseosa o sólida (e.g. metales pesados y dioxinas y furanos). En estos casos, el muestreo debe realizarse con sistemas combinados que permitan la toma de muestras simultánea de gases y partículas sólidas.
<b>Tiempo de muestreo</b>	Debe ser variable en función del parámetro medido y del método utilizado. Puede estar comprendido entre los 30 minutos y las 6-8 horas.
<b>Condiciones de referencia</b>	Normalmente, el resultado de mediciones de emisiones a la atmósfera debe estar referenciado a 0º C y 101,3 kPa y gas seco. En el caso de gases de combustión procedentes del horno de clínker, las medidas se tienen que referenciar, además, al 10% de oxígeno.

### **5.3.2. Tipología de los sistemas de medición**

Se distinguen dos tipos de medición de emisiones a la atmósfera: medición en continuo y medición en discontinuo.

#### **Medición en continuo**

Consiste en la determinación de las emisiones a tiempo real. No se requiere de análisis posterior en laboratorio.

Este tipo de mediciones puede realizarse mediante métodos extractivos o no extractivos. En los métodos extractivos, es preciso aspirar de la chimenea una muestra de gas que posteriormente es acondicionada para determinar la concentración del contaminante analizado. En los métodos no extractivos, por su parte, la determinación se efectúa directamente en la chimenea sin necesidad de extraer una muestra y eliminar componentes que puedan interferir en las mediciones.

Además, este tipo de mediciones pueden desarrollarse mediante equipos fijos (medición “in situ”) o equipos móviles. Las dos tipologías de equipos requieren de un cuidadoso mantenimiento y calibración periódica, que permita transformar con precisión la respuesta eléctrica que genera la presencia del contaminante analizado en medidas de concentración.

#### **Medición en discontinuo o puntual**

Consiste en la determinación puntual de las emisiones a la atmósfera en un periodo de tiempo limitado.

Su realización se basa en la separación de una muestra del contaminante analizado mediante el uso de equipos o técnicas extractivas y la utilización de sistemas de filtración o adsorción, y su posterior análisis en laboratorio. Este tipo de métodos requiere efectuar más de una medición para obtener un resultado fiable y representativo. No obstante, el número de mediciones necesarias depende del tipo de compuesto y del tiempo de extracción.

Normalmente, constituyen los sistemas de medición que se utilizan como referencia para la calibración de los equipos de medición en continuo.

### **5.3.3. Métodos de cálculo y estimación**

En el cálculo de emisiones se pueden utilizar dos tipos de métodos: métodos de estimación y métodos de balances de masas o materiales. La elección de un método u otro depende de diversos factores tales como el tipo de contaminante, el impacto ambiental asociado a las emisiones, etc.

## Métodos de estimación

Son métodos estadísticos de modelización que, para el cálculo de emisiones, se basan en el uso de factores de emisión que provienen de fuentes representativas de la industria del cemento.

Estos factores de emisión se obtienen a partir de datos reales, hipótesis posibles o experiencias representativas y se expresan como masa de contaminante emitido por unidad de actividad (e.g. cantidad de combustible, tasa de producción, etc.).

Existen casos en que estos métodos requieren un gran volumen de datos o cálculos complejos, por lo que es necesario utilizar para su realización modelos específicos de cálculo por ordenador.

La exactitud de la estimación que resulta de la utilización de estos métodos depende de la calidad de los datos disponibles. Por este motivo, antes de decidir usarlos es importante comparar las necesidades del método con las características de los datos que se van a utilizar.

## Métodos de balances de masas o materiales

Son métodos que se basan en el cálculo de balances de masas del proceso productivo. Se pueden utilizar en los casos en los que no se dispone de datos de muestreo, factores de emisión u otros valores.

Los datos se obtienen a partir de la determinación de los flujos de entrada y salida de los componentes químicos. En los hornos de cemento estos métodos pueden ser válidos para la evaluación de las emisiones de CO<sub>2</sub> siendo, no obstante, necesario conocer con detalle los procesos que tienen lugar en el horno para obtener buenos resultados (e.g. balance de carbono).

### 5.4. Tipología de los sistemas de medición y control de las emisiones a la atmósfera de la industria del cemento

Actualmente, la normativa aplicable no establece métodos de referencia para la determinación de emisiones a la atmósfera y la verificación del cumplimiento de los límites aplicables.

No obstante, la selección de los métodos a utilizar para la determinación de los compuestos emitidos, puede basarse en los criterios establecidos por diferentes estándares que son aplicables a nivel español y europeo (tabla 5.3.).

**Tabla 5.3. Estándares españoles y europeos que definen métodos de referencia de medición de emisiones a la atmósfera**

EMISIÓN	Tipo muestreo	MÉTODO	
		Norma EN	Norma UNE
Partículas sólidas	Continuo	--	UNE 77209:1989: <i>Características de los monitores en continuo para la medida de la opacidad.</i> UNE 77219:1998: <i>Medición automática de la concentración mísica de partículas. Características de funcionamiento, métodos de ensayo y especificaciones.</i>
	Discontinuo	EN 13284-1: 2001 <i>Determination of low range mass concentration of dust-Part 1: Manual gravimetric method</i>	UNE 77223:1997: <i>Determinación de la concentración y caudal mísico de material particulado en conductos de gases. Método gravimétrico manual.</i>
Gases	Óxidos de nitrógeno (NOx)	Continuo	--
		Discontinuo	--
	Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	Continuo	--
		Discontinuo	UNE 77224: <i>Determinación de las concentraciones mísicas de óxidos de nitrógeno. Características de funcionamiento de los sistemas automáticos de medida.</i> UNE 77228: 2002: <i>Determinación de la concentración mísica de óxidos de nitrógeno. Método fotométrico de la naftilendiamina (NEDA)</i>
	Gases	Continuo	--
		Discontinuo	UNE 77222:1997: <i>Determinación de la concentración mísica de dióxido de azufre. Características de funcionamiento de los métodos automáticos de medida.</i> UNE 77216:1985: <i>Determinación de la concentración mísica de dióxido de azufre. Método del peróxido de hidrógeno/perclorato de bario/torina.</i> UNE 77226 :1999: <i>Determinación de la concentración mísica de dióxido de azufre. Método de cromatografía iónica.</i>
		Continuo	--
		Discontinuo	--
Gases	Compuestos orgánicos volátiles (COV)	Continuo	EN 13526: 2001 <i>Determination of the mass concentration of total gaseous organic carbon in flue gases from solvent using processes- Continuous flame ionisation detector method</i>
		Discontinuo	EN 13649: 2001 <i>Determination of the mass concentration of individual gaseous organic compounds-Activated carbon and solvent desorption method</i>
	Ácido clorhídrico (HCl)	Continuo	--
		Discontinuo	UNE-EN 1911.1: 1998 <i>Método manual de determinación de HCl. Parte 1: Muestreo de gases</i> UNE-EN 1911.2: 1998 <i>Método manual de determinación de HCl. Parte 2: Absorción de compuestos gaseosos</i> UNE-EN 1911.3: 1998 <i>Método manual de determinación de HCl. Parte 3: Análisis de las soluciones de absorción y cálculos</i>
	Ácido fluorhídrico (HF)	Continuo	--
		Discontinuo	--
Dioxinas y furanos (PCDD/Fs)	Continuo	--	--
	Discontinuo	UNE-EN 1948.1: 1997 <i>Determinación de la concentración mísica de PCDD/PCDF. Parte 1: Muestreo</i> UNE-EN 1948.2: 1997 <i>Determinación de la concentración mísica de PCDD/PCDF. Parte 2: Extracción y purificación.</i> UNE-EN 1948.3: 1997 <i>Determinación de la concentración mísica de PCDD/PCDF. Parte 3: Identificación y cuantificación.</i>	--
Metales pesados	Continuo		--
	Discontinuo	UNE-EN 13211: 2001 <i>Método manual de determinación de la concentración de mercurio total.</i>	--

[Fuente:AENOR].

Además de los estándares presentados en la tabla 5.3., existen otros de ámbito internacional, cuyos procedimientos pueden también, ser utilizados como referencia (tabla 5.4.).

**Tabla 5.4. Estándares internacionales que definen métodos de referencia de medición de emisiones a la atmósfera**

EMISIÓN	Tipo muestreo	MÉTODO	
		Norma	
Partículas sólidas	Continuo		- -
	Discontinuo	Método nº 5 de la EPA "Determination of Particulate Matter Emissions from Stationary Sources"	Norma francesa NFX 44-052 "Mesures manuelles de la concentration en poussières dans les conduits de rejet à l'atmosphère des installations classées pour la protection de l'environnement"
Óxidos de nitrógeno (NOx)	Continuo	Método CTM-030 "Determination of Nitrogen Oxides, Carbon Monoxide, and Oxygen Emissions from Natural Gas-Fired Engines, Boilers and Process Heaters Using Portable Analyzers"	ISO 10849: 1996 (E) "Stationary source emissions. Determination of the mass concentration of nitrogen oxides. Performance characteristics of automated measuring systems"
	Discontinuo	Método nº 7 de la EPA "Determination of Nitrogen Oxide Emissions from Stationary Sources"	
	Continuo		- -
	Discontinuo	Método nº 6 de la EPA "Determination of Sulfur Dioxide Emissions from Stationary Sources"	
Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	Continuo		- -
	Discontinuo	Método CTM-030 "Determination of Nitrogen Oxides, Carbon Monoxide, and Oxygen Emissions from Natural Gas-Fired Engines, Boilers and Process Heaters Using Portable Analyzers"	
Monóxido de carbono	Continuo	Método nº 25 A de la EPA "Determination of Total Gaseous Organic Concentration using a Flame Ionization Analyzer"	Norma Internacional VDI 3481: 1995 "Determination of Volatile Organic Compounds, specially Solvents – FID"
	Discontinuo	Método nº 18 de la EPA "Measurement of Gaseous Organic Compound Emissions by Gas Chromatography"	
Gases	Continuo		- -
	Discontinuo	Método nº 26 A de la EPA "Determination of Hydrogen Halide and Halogen Emissions from Stationary Sources Isokinetic Method"	
Ácido clorhídrico (HCl)	Continuo		- -
	Discontinuo	Método nº 13 A de la EPA "Determination of Total Fluoride Emissions from Stationary Sources (SPADNS zirconium lake method)"	Método nº 26 A de la EPA "Determination of Hydrogen Halide and Halogen Emissions from Stationary Sources Isokinetic Method"
Ácido fluorhídrico (HF)	Continuo		- -
	Discontinuo	Método nº 23 de la EPA "Determination of Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins and Polychlorinated Dibenzofurans from Municipal Waste Combustors"	
Dioxinas y furanos (PCDD/F's)	Continuo		- -
	Discontinuo	Método nº 29 de la EPA "Determination of Metals Emissions in Exhaust Gases from Hazardous Waste Incineration and Similar Combustion Processes"	Norma Internacional VDI 3868:1992 "Determination of Total Emission of Metals, Metalloids and their Compounds. Manual Measurement in Flowing, Emitted Gases. Sampling System for particulate and filter-passing hatter"
Metales pesados	Continuo		- -
	Discontinuo	Norma francesa NFX 43-308 "Qualité de l'air. Emissions de sources fixes. Determination de la concentration en mercure (Hg). Methode manuelle (345F)"	

En los siguientes apartados se presentan los métodos más utilizados de medición y control de las emisiones a la atmósfera en la industria española del cemento.

#### **5.4.1. Control general de parámetros**

La operación estable del horno requiere el control en continuo de las siguientes magnitudes:

- Presión de los gases
- Temperatura
- Contenido en oxígeno

Además, es necesario medir otros parámetros de emisión (caudal, humedad, temperatura y contenido en oxígeno) para cuantificar con exactitud las emisiones producidas.

Los hornos de las fábricas españolas disponen de varios medidores de estos parámetros.

Por otro lado, todas las fábricas que operan con electrofiltros presentan, como principal parámetro de seguridad, sistemas que impiden el funcionamiento de estas medidas correctoras con niveles elevados de emisión de CO, ya que esta situación puede generar riesgos de explosión. Por ello, como medida de seguridad fundamental, todas las fábricas españolas que disponen de electrofiltros están dotadas de sistemas de corte de tensión automáticos que desconectan estas medidas correctoras en caso de sobrepasarse determinados niveles de emisión de CO.

#### **5.4.2. Medición y control de emisiones de partículas sólidas**

De entre todos los contaminantes emitidos por la industria del cemento, las partículas sólidas son las que tienen mayor importancia desde el punto de vista cuantitativo.

##### **Métodos de medición en continuo**

El método de medición en continuo más importante es el método opacimétrico mediante el cual se cuantifica la absorción de luz llevada a cabo por las partículas sólidas presentes en chimenea. Es un método de tipo no extractivo y, por tanto, no requiere la obtención de muestras.

La opacidad es la capacidad que tiene una sustancia para impedir la transmisión de la luz, y se expresa como porcentaje de luz absorbida. Es un parámetro proporcional a la concentración de partículas sólidas. No obstante, la capacidad de absorber la luz de las mismas es función también, de su naturaleza química. En consecuencia, un mismo nivel de concentración de dos tipologías distintas de partículas puede corresponder a dos niveles distintos de opacidad. Así, la medida de este parámetro requiere la calibración previa “in situ” de los analizadores, por lo que es necesario realizar varios muestreos según los métodos discontinuos de medición de partículas.

El método opacimétrico se basa en el principio de transiometría, de manera que es necesario que el equipo de medición conste de dos elementos esenciales: una lámpara como foco emisor y un detector de luz como foco receptor.

En el proceso, la lámpara proyecta un haz de luz con unas características especiales determinadas. Esta luz, con mayor o menor atenuación debido a la concentración de partículas sólidas presentes en el gas, llega al detector que transforma de manera inmediata el porcentaje de luz visible captada, en concentración de partículas sólidas totales.

## Métodos de medición en discontinuo

El método de medición en discontinuo más utilizado es el método gravimétrico.

### *Toma de muestras*

La toma de muestras se basa en la obtención de una muestra compuesta, es decir aquella muestra que resulta de la extracción de gas, en condiciones isocinéticas (a la misma velocidad que los gases de emisión), en diferentes puntos de muestreo durante un mismo intervalo de tiempo.

El tren de muestreo para la extracción manual de muestras está constituido por los siguientes elementos:

- Sonda de muestreo que puede ser de acero inoxidable o vidrio.
- Separadores de partículas constituidos por filtros de fibra de vidrio que pueden ser circulares o tubulares y pueden ser instalados “en cabeza” o “en cola” de la sonda de muestreo. La elección de una forma u otra del filtro depende de la concentración de partículas que se espera encontrar, siendo los filtros tubulares los escogidos cuando se espera encontrar concentraciones elevadas. La elección de una posición determinada del filtro depende de factores como la humedad y la temperatura del foco emisor.
- Sistema medidor de caudal de gas que es un tubo estático de Pitot que se dispone en paralelo a la sonda.
- Sistema de aspiración.

La norma UNE 77223 indica algunas características de este método de muestreo. Entre éstas, destaca que es aplicable para concentraciones comprendidas entre los 5 mg/Nm<sup>3</sup> y los 10 g/Nm<sup>3</sup>, y que para concentraciones inferiores a los 5 mg/Nm<sup>3</sup> la inexactitud supera el 10% de error.

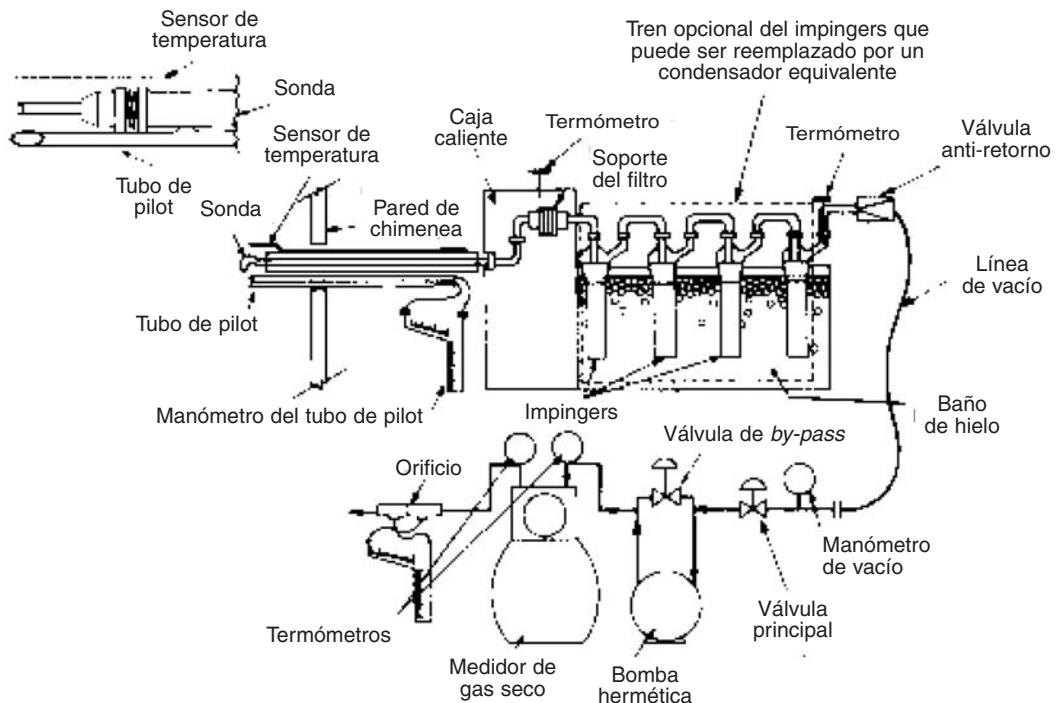


Figura 5.2. Tren de muestreo para la determinación de emisiones a la atmósfera de partículas sólidas.

## Análisis

Una vez obtenidas las muestras, la determinación de la concentración de partículas sólidas se basa en la diferencia entre el peso inicial de los filtros – tarados después de un proceso de secado a una temperatura determinada - y el peso final de los mismos, una vez han sido desecados a la misma temperatura y durante el mismo tiempo que durante el proceso de tara.

Si bien con esta actuación se estima la concentración de partículas sólidas, el método recomienda añadir a la masa recogida por los filtros, la masa del conjunto de material particulado que hubiera quedado en la superficie del resto de elementos del tren de muestreo (portafiltros, boquillas y sonda).

### 5.4.3. Medición y control de emisiones de gases

En los procesos de combustión, el mayor número de compuestos que se emiten en las chimeneas de los hornos lo hacen en forma gaseosa.

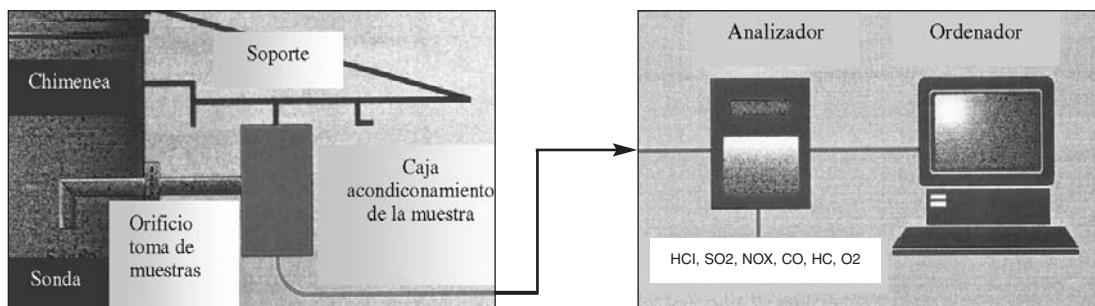
#### Métodos de medición en continuo

Los métodos de medición en continuo son, en general, de tipo extractivo.

#### Toma de muestras

En el proceso de toma de muestras (figura 5.3.) los gases son aspirados de la chimenea del horno a través de una sonda de muestreo y son conducidos a una caja de

acondicionamiento en la que se reduce su temperatura y humedad a unas condiciones óptimas para su posterior medición en un analizador en continuo.



**Figura 5.3. Proceso de muestreo en continuo y análisis de emisiones a la atmósfera de gases.**  
 [Fuente: Departamento de Medio Ambiente, Generalitat de Catalunya].

### Análisis

Los métodos de análisis en continuo de gases se clasifican en cuatro grandes grupos:

- **Sistemas de extinción de la luz.** La determinación de los gases se realiza mediante métodos espectrométricos de absorción de luz ultravioleta o infrarroja. En estos métodos un receptor captura la luz que, en su camino desde la fuente, sufre absorción molecular. La señal recibida por el receptor es transmitida a un espectrómetro que determina la concentración del gas.
- **Sistemas potenciométricos.** Se basan en la medición de la diferencia de potencial que los gases generan en diferentes células electroquímicas. Los equipos necesarios para el análisis disponen de un electrodo de referencia, un electrodo indicador y un dispositivo para la medición del potencial.
- **FID (Detector de ionización de llama).** Sistema utilizado principalmente en la determinación de los compuestos orgánicos volátiles. Se basa en la ionización de los componentes mediante llama y su posterior medida con un detector de corriente eléctrica.
- **Quimioluminiscencia.** Método en el que el contaminante a determinar se transforma químicamente en una especie electrónicamente excitada que, al volver a su estado fundamental, emite una radiación con una longitud de onda específica.

La tabla siguiente especifica los métodos de análisis en continuo más utilizados para distintos compuestos gaseosos que se pueden emitir en una fábrica de cemento:

**Tabla 5.5. Principales métodos de análisis en continuo de gases de emisión**

EMISIÓN		MÉTODO DE ANÁLISIS
Contaminantes principales	NO <sub>x</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Quimioluminiscencia</li> <li>- Espectroscopia de luz infrarroja no dispersiva</li> <li>- Espectroscopia de luz ultravioleta</li> </ul>
	SO <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Espectroscopia de luz ultravioleta</li> </ul>
Otros contaminantes (en función de los procesos)	CO	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Potenciometría</li> <li>- Espectroscopia de luz infrarroja no dispersiva</li> </ul>
	COV	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Detector de ionización de llama</li> </ul>
	HCl/HF	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Espectroscopia de luz infrarroja no dispersiva</li> </ul>

## Métodos de medición en discontinuo

### *Toma de muestras*

Los métodos de medición en discontinuo de gases se basan en procesos de adsorción de los distintos compuestos sobre un medio específico y su posterior análisis en laboratorio. El procedimiento de toma de muestra sigue el mismo esquema para todos los gases y sólo varía en determinados elementos o parámetros del proceso, según el compuesto objeto de análisis (e.g. tiempo de muestreo, caudal de aspiración, etc.).

El tren de muestreo está compuesto por:

- Sonda de muestreo calefactada en función de la temperatura y la humedad de los gases de emisión. Dispone de filtro de partículas.
- Sistema de retención de gases consistente en una solución captadora o un sólido adsorbente.
- Sistema de aspiración cuyos elementos más importantes son una bomba de aspiración (habitualmente funciona con un caudal de 1 a 4 l/min) y un medidor de volumen.

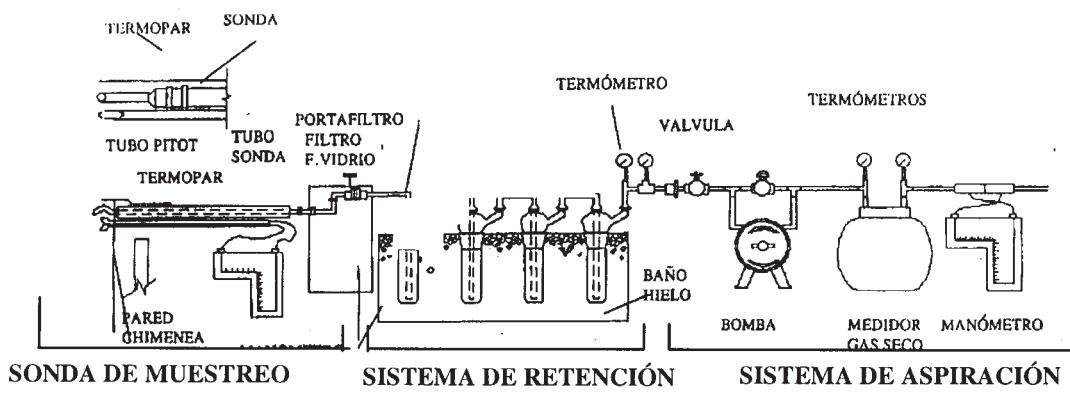


Figura 5.4. Tren de muestreo para la determinación de gases de emisión.

La principal diferencia existente entre los distintos métodos de toma de muestras de gases de emisión reside en la utilización de diferentes sistemas de retención (soluciones captadoras o sólidos adsorbentes), en función del gas a determinar. La tabla 5.6. muestra los sistemas de retención más utilizados en las tomas de muestras de los distintos compuestos gaseosos que se pueden emitir en una fábrica de cemento:

**Tabla 5.6. Principales sistemas de retención para la toma de muestra de gases de emisión**

EMISIÓN		MÉTODO DE ANÁLISIS
Contaminantes principales	NO <sub>x</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Solución formada por un 4% permanganato con un 2% de sosa y agua</li> <li>- Solución formada por ácido sulfúrico y agua oxigenada</li> </ul>
	SO <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Agua oxigenada 3%</li> </ul>
Otros contaminantes (en función de los procesos)	CO	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Carbón activo</li> <li>- Resinas (e.g. XAD-2)</li> <li>- Silica gel</li> </ul>
	COV	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Agua desionizada</li> </ul>

[Fuente:Departamento de Medio Ambiente, Generalitat de Catalunya].

### Análisis

El método de análisis también varía en función del tipo de gas a determinar. Los métodos de análisis en laboratorio más comunes para la medición de los gases que se pueden emitir en una fábrica de cemento son:

**Tabla 5.7. Métodos de análisis discontinuos más utilizados según el tipo de gas de emisión**

EMISIÓN		MÉTODO DE ANÁLISIS
Contaminantes principales	NO <sub>x</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Espectroscopía de absorción molecular</li> <li>- Quimioluminiscencia</li> </ul>
	SO <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Método de Bario-Thorina</li> <li>- Cromatografía iónica</li> <li>- Valoración volumétrica</li> </ul>
Otros contaminantes (en función de los procesos)	CO	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fotometría por infrarrojos</li> </ul>
	COV	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cromatografía de gases</li> <li>- Espectrometría de masas</li> </ul>
	HCl	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cromatografía iónica</li> </ul>
	HF	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Espectroscopía de absorción molecular</li> <li>- Potenciometría</li> </ul>

#### 5.4.4. Medición y control de emisiones de dioxinas y furanos

Las dioxinas y furanos son contaminantes que se producen en los procesos de combustión en los que hay presencia de compuestos orgánicos y cloro. Pueden ser emitidos tanto en fase gaseosa, como sólida en forma de partículas.

De acuerdo con el inventario español de dioxinas y furanos<sup>1</sup>, la emisión a la atmósfera de este tipo de compuestos en la industria del cemento es muy baja. En concreto, el nivel medio de emisión encontrado es de 0,00695 ng I-TEQ/Nm<sup>3</sup>.

En la determinación de estos contaminantes únicamente se utilizan métodos de medición en discontinuo.

#### Métodos de medición en discontinuo

##### *Toma de muestras*

Debido a que este contaminante se emite en forma gaseosa y sólida los métodos para la toma de muestras se basan en la disposición de dos elementos básicos:

- Filtro de partículas para la captación de dioxinas en fase sólida,
- Condensador para la captación de dioxinas en fase gaseosa.

Según la norma europea, EN 1948: 1996, se puede elegir entre tres métodos distintos de muestreo (figura 5.5.):

1. Método de filtro/condensador, en el que el filtro se instala entre la sonda y el condensador.

<sup>1</sup> B. Fabuellos, M. L. Ruiz, E. Abad, J. Rivera, P. Sanz “First evaluation of PCDD/F’s releases to the atmosphere from the manufacture of cement in Spain”.

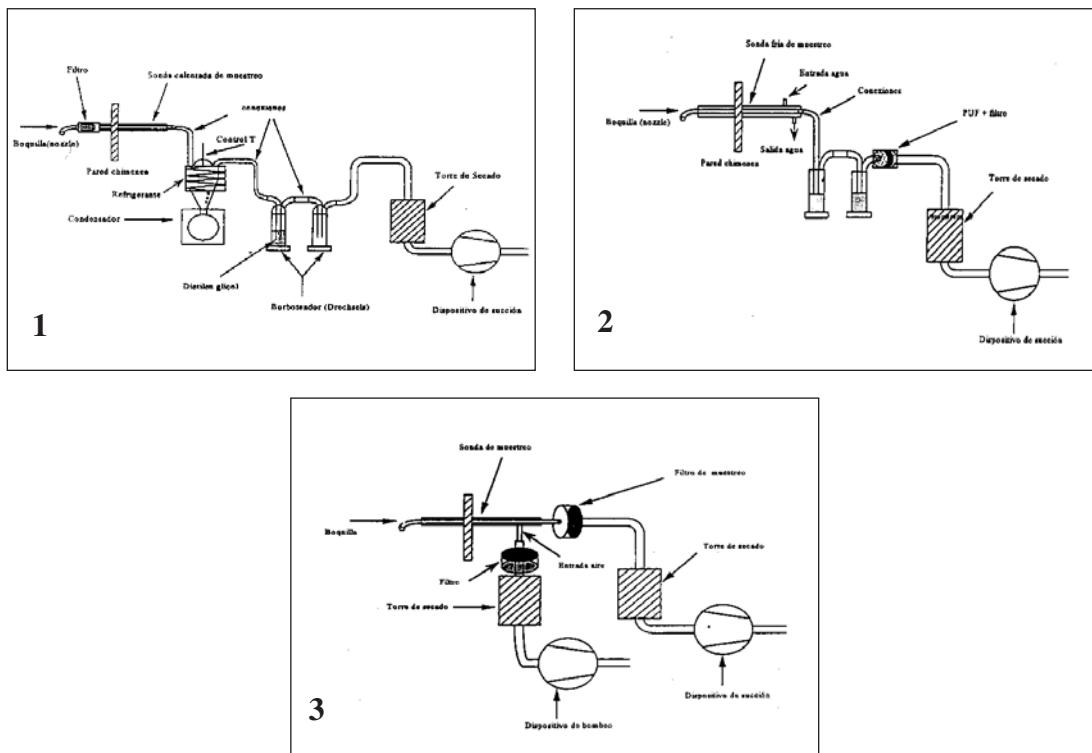


Figura 5.5. Sistemas de muestreo de dioxinas: sistema del filtro/condensador (1), sistema de la sonda fría (2) y sistema de dilución (3).

2. Método de sonda enfriada en el que la sonda es refrigerada por agua y, en consecuencia, no se dispone de condensador.
3. Método de dilución en el que se introduce aire para el enfriamiento de los gases en un punto situado entre la sonda y el filtro, y en consecuencia, no se dispone de condensador.

### Análisis

El procedimiento de análisis se basa en el uso combinado de dos métodos analíticos: cromatografía de gases y espectrometría de masas.

En este sentido, las dioxinas y furanos concentrados en la muestra de emisión se extraen con una dilución isotópica y se separan mediante cromatografía de gases para ser posteriormente identificados cuantitativamente mediante espectrometría de masas.

#### 5.4.5. Medición y control de emisiones de metales pesados

Las emisiones de metales pesados pueden producirse en estado sólido (absorbidos a la superficie de las partículas sólidas) o gaseoso (cuando las temperaturas de emisión son elevadas o cuando los metales son volátiles), por lo que también es necesario el uso de técnicas de toma de muestras y análisis capaces de extraer y analizar los dos tipos de fases.

Los principales metales pesados que se determinan son: antimonio, arsénico, plomo, cadmio, cromo, cobalto, cobre, manganeso, níquel, mercurio, talio, vanadio, cinc y estaño.

Para su medición únicamente se utilizan métodos de medición en discontinuo.

### Métodos de medición en discontinuo

#### *Toma de muestras*

No existe ningún método español de muestreo. De esta manera, se toman como referencia, los métodos utilizados en Estados Unidos (método nº 29 de la EPA), Francia (norma NF X 43-308:1992) o Alemania (norma VDI 3868).

Todos estos métodos tienen equipos de muestreo equivalentes que constan básicamente de:

- Sonda de muestreo que se encuentra calefactada para evitar condensaciones. Ésta debe de ser de vidrio o de cuarzo para evitar la contaminación de los metales.
- Sistema de retención (filtro de fibra de cuarzo o vidrio) para los metales que se encuentran en forma particulada.
- Sistema de retención de la fase gaseosa que consta de borboteadores con diferentes soluciones captadoras en función del metal a obtener de la muestra.

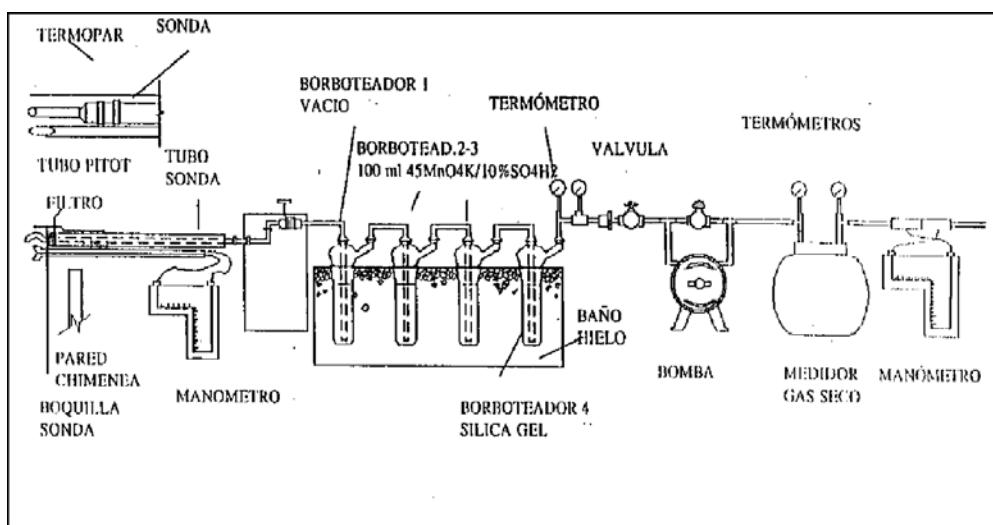


Figura 5.6. Tren de muestreo para la toma de muestras de mercurio según método nº 29 EPA.

### Análisis

La elección del método analítico depende de la precisión requerida en la determinación.

En general, el método más usado es la espectrometría atómica de absorción.

Este método se basa en la obtención de átomos libres de metales que son capaces de absorber la radiación que ha sido emitida por una fuente externa y que tiene una

longitud de onda que se corresponde a la longitud de la línea de resonancia del metal. La radiación llega a un fotodetector y la absorción se determina mediante la diferencia de potencia de la línea resonante en presencia y ausencia de átomos libres.

Existen diferentes técnicas de este método según el metal que se analice. De este modo se puede diferenciar:

- Espectrometría de absorción atómica de llama para la determinación de cadmio, cromo, cobre, níquel, plomo, cinc,
- Espectrometría de absorción atómica de vapor frío para la determinación de mercurio,
- Absorción atómica con cámara de grafito para el arsénico, cobre, cromo y plomo,
- Absorción atómica por emisión de plasma para la determinación de cualquier metal excepto el mercurio.

#### **5.4.6. Medición y control de otras emisiones de contaminantes**

Otros contaminantes que puede emitir la industria del cemento en pequeña cantidad y que son identificados por el Registro Europeo de Emisiones Contaminantes como “otros compuestos orgánicos” son el benceno y los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP).

No existen métodos específicos para determinar la emisión de estos contaminantes. Debido a que las cantidades emitidas por la industria del cemento son pequeñas, en alguna ocasión se han utilizado métodos de determinación de inmisiones adaptando la toma de muestras en chimenea.

Los métodos de medición de estos contaminantes son de tipo discontinuo. En la toma de muestras se utiliza como sistemas de retención la espuma de poliuretano BUF o la resina XAD-2 para los HAP, y el carbón activo para el benceno.

El método de análisis utilizado para la cuantificación de estos dos compuestos es la cromatografía de gases con espectrometría de masas. Con la cromatografía de gases se separan los componentes de la muestra a analizar y con la espectrometría de masas se evalúa cuantitativamente el compuesto a partir de la determinación de su masa molecular.

### **5.5. Condiciones para determinar valores de emisión a partir de equipos de medición en continuo en fábricas de cemento**

#### **5.5.1. Ámbito de aplicación**

Equipos de medición en continuo de emisión de partículas o gases que controlen focos puntuales de emisión en fábricas de cemento.

### **5.5.2. Calibración**

La calibración de los equipos de medición en continuo de partículas se hará calculando una función de calibración tal y como se describe en la Norma UNE-77219:1998.

El rango de medición de los equipos será del orden del doble del límite legal de emisión.

La calibración de los equipos de medición en continuo de gases se hará utilizando gases patrón (gas cero, alternando con otros de concentración aproximada al 20, 40, 60 y 80% del fondo de escala). También son aceptables instrumentos que puedan efectuar diluciones a partir de un patrón de concentración igual al fondo de escala siempre que este método no introduzca un error global superior al 1%.

Durante la calibración se determinará el intervalo de confianza del 95% de las mediciones, determinado para la concentración límite de emisión de cada contaminante. El intervalo no podrá superar los siguientes porcentajes de dichos valores límite:

Partículas sólidas	30%
Dióxido de azufre	20%
Óxidos de nitrógeno	30%
Monóxido de carbono	10%

Las calibraciones de los equipos se realizarán al menos cada dos años y anualmente se realizará una prueba de estanquidad de los equipos de medición de gases.

### **5.5.3. Homologación**

Los equipos dispondrán cuando sea posible de un certificado oficial de homologación para la medición de concentración de cada contaminante que analicen, otorgado por alguno de los organismos oficialmente reconocidos en los Estados Miembros de la Unión Europea, en los países firmantes del Acuerdo sobre el Espacio Económico Europeo, o, cuando haya reciprocidad, en terceros países.

### **5.5.4. Cumplimiento**

#### **5.5.4.1 Condiciones de medición**

Los límites de emisión de cada contaminante por focos puntuales de combustión se expresan en mg/m<sup>3</sup> de gas seco en condiciones normales, y con un 10% de O<sub>2</sub>.

Los límites de emisión para el resto de focos se expresan en mg/m<sup>3</sup> de gas seco en condiciones normales.

#### **5.5.4.2 Elaboración de promedios**

Los equipos harán lecturas de concentración de las emisiones cada 2 minutos como máximo. Las lecturas se validarán restándoles el intervalo de confianza definido en el punto 2, obteniendo así los valores validados.

Con estos valores se obtendrán los promedios semihorarios.

La media diaria se obtendrá a partir de los promedios semihorarios.

En el caso de partículas, si alguno de los valores validados supera el 200% del valor límite de emisión no se tendrá en cuenta en el cálculo del promedio semihorario, por considerarse de funcionamiento anómalo.

Para que un promedio semihorario se considere válido, deberá haber valores puntuales correspondientes a un 50% del período como mínimo. Si no se alcanza el 50%, el período semihorario no contabilizará para la obtención de la media diaria y los períodos en que se supere el 200% del valor límite, se contabilizarán como tiempo de funcionamiento anómalo.

#### **5.5.4.3 Funcionamiento anómalo para las emisiones de partículas**

Se entenderá por funcionamiento anómalo cualquier fallo o interrupción en los equipos de desempolvamiento, o cualquier estado especial del proceso productivo (excluyendo los períodos de arranques y paradas del horno) que dé lugar a valores de la concentración de partículas emitidas mayores del 200% del límite de emisión establecido.

Los valores de concentración de partículas correspondientes a períodos de funcionamiento anómalo no se integrarán en los promedios semihorarios, por estar fuera del rango de calibrado del equipo, pero se contabilizarán como tiempo de funcionamiento anómalo.

Los períodos de funcionamiento anómalo no podrán sumar más de 200 horas al año, ni producirse más de 8 horas consecutivas.

#### **5.5.4.4 Cumplimiento de los límites de emisión**

Se considerará que se cumplen los límites de emisión en un determinado foco puntual si durante el período anual se cumple la condición siguiente:

El 97% de las medias diarias no superará el 110% del valor límite de emisión. No se considerarán los períodos contemplados en el punto anterior de funcionamiento anómalo, ni los períodos de arranque y parada del horno correspondientes a paros de producción superiores a 48 horas.

#### **5.5.5. Disponibilidad de los equipos de medición**

La disponibilidad de los equipos de medida, entendida como proporción de períodos de tiempo en que se obtienen registros válidos, deberá ser al menos del 90% del tiempo de funcionamiento anual, salvo autorización expresa de la autoridad competente. Se consideran como tiempo de registros no válidos los de mantenimiento, avería o funcionamiento incorrecto de los equipos de medición.



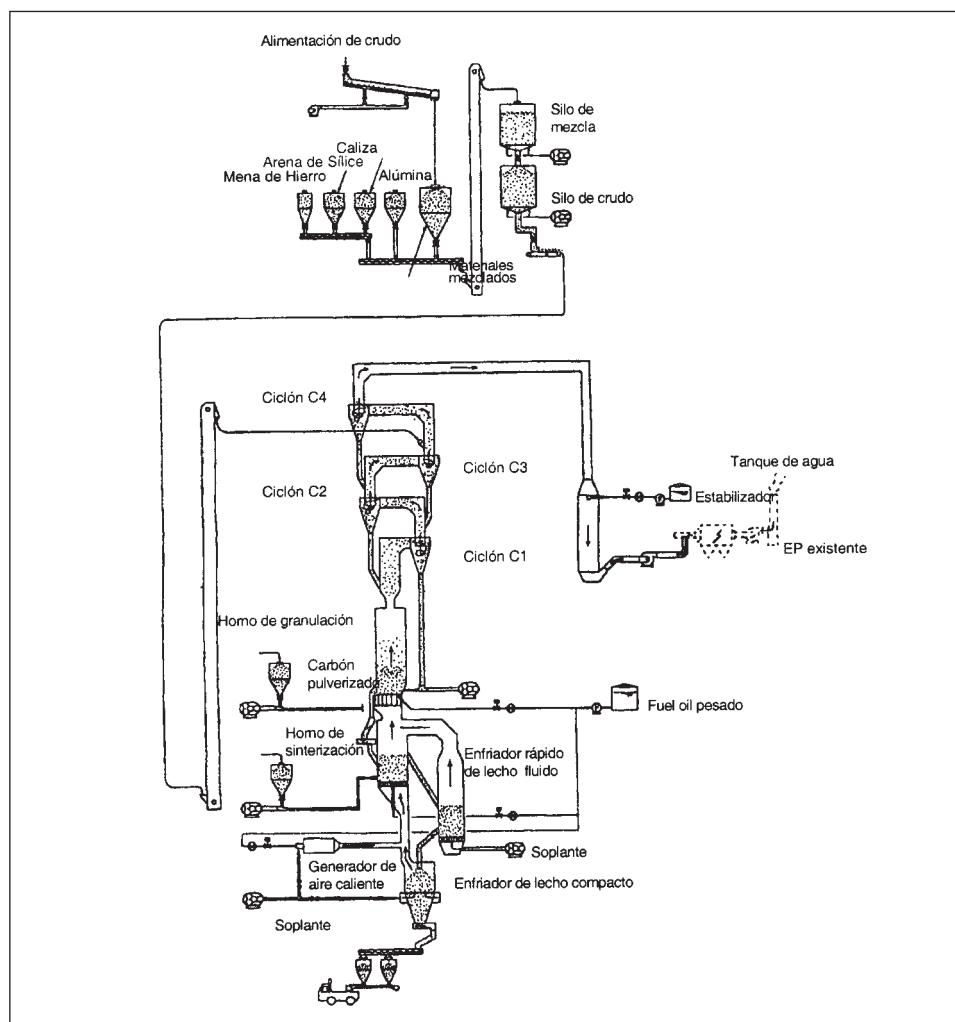
## 6. TÉCNICAS EMERGENTES Y EN DESUSO EN LA INDUSTRIA DEL CEMENTO

### 6.1. Técnicas emergentes

#### 6.1.1. Tecnología de fabricación de clíker en lecho fluido

La tecnología de cocción en horno de lecho fluido es un proyecto subvencionado por el Ministerio de Comercio Internacional e Industria del Japón desde 1986. Entre 1989 y 1995 estuvo en funcionamiento una planta piloto con una capacidad de 20 t clíker/día, en la fábrica de Toshigi de Sumitomo Osaka Cement Co. Ltd. A finales de 1995 se construyó una planta piloto de 200 t clíker/día.

La figura siguiente muestra la configuración del sistema de horno en lecho fluido de la planta piloto de 20 t clíker/día. El sistema consta de un precalentador de suspensión, un horno de granulación en lecho burbujeante, un horno de sinterización en lecho fluido, un enfriador de enfriamiento rápido en lecho fluido y un enfriador de lecho compacto.



**Figura 6.1: Horno de cemento por lecho fluido.**

[Fuente: Asociación de Cemento Japonesa, 1996].

El precalentador de suspensión es un precalentador convencional de cuatro etapas de ciclones que precalienta el crudo. El horno de granulación granula el crudo en gránulos de cerca de 1,5 - 2,5 mm de diámetro a una temperatura de 1.300 °C. En el horno de sinterización se completa la clinkerización de los gránulos a una temperatura de 1.400 °C. El enfriador rápido de lecho fluido enfriá rápidamente el clínker de cemento desde 1.400 °C a 1.000 °C. Y finalmente, el clínker de cemento se enfriá a aproximadamente 100 °C en el enfriador de lecho compacto.

El clínker de cemento producido en el horno de lecho fluido es de una calidad similar al clínker producido en horno rotatorio. La emisión de  $\text{NO}_x$  es 115-190 mg/Nm<sup>3</sup> cuando se emplea fuelóleo pesado y de 440-515 mg/Nm<sup>3</sup> cuando se emplea como combustible carbón pulverizado (emisiones referidas al 10% de  $\text{O}_2$ ). Los estudios de viabilidad de una planta de 3.000 t clínker/día consideran que el consumo energético podría ser un 10-12% menor que el correspondiente a un horno rotatorio con precalentador de ciclones y enfriador de parrilla.

### **6.1.2. Reducción catalítica selectiva (SCR)**

La reducción catalítica selectiva (SCR) reduce el NO y el  $\text{NO}_2$  a  $\text{N}_2$  con la ayuda de amoníaco y un catalizador a un rango de temperaturas de cerca de 300-400 °C. Esta tecnología se emplea en la reducción de óxidos de nitrógeno en otras instalaciones térmicas (centrales térmicas, incineradoras).

En la industria del cemento, no existe todavía ni una sola instalación SCR a escala industrial. Los estudios y pruebas piloto consideran dos opciones: tratamiento de gases previo a desempolvamiento (alta carga de partículas), o tratamiento posterior a desempolvamiento (baja carga de partículas). Este último precisa recalentar los gases después del filtro de desempolvamiento, lo que implica un gasto energético adicional.

Se han realizado experimentos en plantas piloto para tratamiento de fracciones relativamente pequeñas de gas (3%) en Austria, Alemania, Italia y Suecia. Los niveles de emisión de  $\text{NO}_x$  se situaron en el rango 100-200 mg/Nm<sup>3</sup>.

Una de las cuestiones críticas a resolver para garantizar la viabilidad técnica y económica del sistema es la abrasión del catalizador, que ha resultado ser severa en algunas de las pruebas realizadas.

Otras cuestiones que incorporan incertidumbre a la aplicación práctica del SCR son la eliminación del polvo del catalizador, el tiempo de vida de los catalizadores y los costes totales de inversión.

Los costes totales de esta técnica emergente se han evaluado entre 2 y 4 €/t clínker, con un coste de inversión de entre 5 y 10 M.€.

### 6.1.3. Combustión por etapas combinada con reducción no-catalítica selectiva (SNCR)

Esta técnica consiste en la combinación en serie de un precalcinador con combustión por etapas y la adición de compuestos amoniacales para reducir los óxidos de nitrógeno.

Las pruebas realizadas en los últimos años parecen indicar que la inyección de amoniaco debe realizarse relativamente alejada de la cámara de combustión para que la eficiencia de la reducción no se vea mermada por la competencia que se establece entre las reacciones de combustión y de reducción de  $\text{NO}_x$ .

Otros efectos observados son el incremento de las emisiones de CO, el incremento del consumo energético y la merma en la capacidad de producción por la incorporación de volúmenes de gases que deben circular por la torre de ciclones.

La eficacia de reducción de  $\text{NO}_x$  ha alcanzado valores entre el 30 y el 80 %, mayor cuanto más alta sea la relación molar. También se ha observado que cuando se utilizan relaciones molares superiores a la unidad se produce un incremento significativo en las emisiones de amoniaco a la atmósfera.

## 6.2. Técnicas en desuso

Las fábricas de cemento de nueva instalación en Europa van prescindiendo de las siguientes técnicas:

- Hornos verticales Su uso en Europa ha quedado reducido a unos pocos hornos. Los hornos de este tipo constan de un cilindro vertical de 2 a 3 metros de diámetro y de 8 a 10 metros de altura, forrado de refractario. Se alimentan por la parte superior con gránulos formados por crudo y carbón o coque finamente molido. El material durante la cocción, atraviesa primeramente una zona corta de sinterización en la parte superior del horno, zona que está ligeramente ensanchara. Se enfriá luego por el aire de combustión inyectado desde la parte inferior y cae por la parte más baja del final del horno sobre una parrilla, ya en la forma de clínker. Los hornos verticales producen menos de 300 t clínker/día de clínker. Sólo son económicos para las pequeñas fábricas, y por esa razón ha disminuido su número. No se utilizan en España.
- Hornos largos vía seca. Si la humedad de las materias primas permite el proceso vía seca, las nueva instalaciones recurren a hornos más cortos con varias etapas de intercambio de calor, por ser más eficientes energéticamente.
- Dispositivos de filtración como filtros de grava o ciclones, no se utilizan como solución fin de línea para el control de partículas, aunque sí como dispositivo intermedio.



## ANEXO

### 1. Acuerdos voluntarios

El principal objetivo de estos acuerdos voluntarios para el Ministerio de Medio Ambiente, y las Consejerías y Departamentos responsables en materia de Medio Ambiente de las Comunidades Autónomas, dentro del marco del Desarrollo Sostenible, y teniendo en cuenta la Ley 16/2002 de “Prevención y al Control Integrado de la Contaminación”, es hacer compatible el progreso económico y social con el respeto al Medio Ambiente y a los recursos para conseguir una mejora de la calidad de vida, tanto para la generación actual como para las futuras.

Los Acuerdos Voluntarios concretos con sectores industriales se han plasmado en objetivos cuantificables a conseguir antes de la necesidad de funcionamiento de las instalaciones industriales existentes con la Autorización Ambiental Integrada.

El ACUERDO VOLUNTARIO MEDIOAMBIENTAL entre el Ministerio de Medio Ambiente y la Agrupación de Fabricantes de Cemento (OFICEMEN), contempla las medidas de prevención, reducción y control de la contaminación proveniente de las fábricas de cemento

Dicho Acuerdo aparece en este Anexo y ha sido adoptado formalmente mediante firma, por algunas CC.AA y empresas cementeras presentes en su territorio. Entre dichas CC.AA se encuentran:

- Cataluña: firmado el día 1 de marzo de 2002 entre la Consejería de Medio Ambiente de la Generalitat de Cataluña y la Agrupación de Fabricantes de Cemento de Cataluña.
- Cantabria: firmado el 28 de mayo de 2002 entre la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio del Gobierno de Cantabria y la empresa de cementos Alfa S.A.
- Asturias: firmado el 26 de julio de 2002 entre la Consejería de Medio Ambiente del Principado de Asturias y la empresa de cementos Tudela Veguin S.A.
- Castilla-La Mancha: firmado el día 21 de febrero de 2003 entre la Consejería de Agricultura y Medio Ambiente de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha y las empresas de cementos Hispania S.A, Cemex S.A y Lafarge Asland S.A.
- Valencia: firmado el día 8 de mayo de 2003 entre la Consejería de y Medio Ambiente de la Generalitat Valenciana y las empresas de cementos Cemex S.A y Lafarge Asland S.A.
- Madrid: firmado el día 16 de mayo de 2003 entre la Consejería de y Medio Ambiente y la empresa de cementos Portland.
- País Vasco: firmado el día 11 de junio de 2003 entre el Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente y las empresas de cementos Lemona y Financiera y Minera (Cementos rezola).

Otras CC.AA han desarrollado acuerdos propios con la industria cementera presente en su territorio. Entre dichas CC.AA se encuentran:

- Baleares: firmado el 13 de junio de 2002 entre la Consejería de Medio Ambiente del Gobierno de las Islas Baleares y la Compañía Valenciana de Cementos Portland S.A.

## **2. Otros documentos de interés**

Además de esta Guía de MTDs en España de Fabricación de Cemento, la Consejería de Medio Ambiente de la Generalitat de Cataluña ha desarrollado un Documento de Referencia sobre las MTDs aplicables a la industria del Cemento disponible en la página web: [www.gencat.net](http://www.gencat.net)

**ACUERDO VOLUNTARIO  
PARA LA  
*PREVENCIÓN Y EL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN*  
DE LA  
INDUSTRIA ESPAÑOLA DEL CEMENTO**

ENTRE

- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE
- AGRUPACIÓN DE FABRICANTES DE CEMENTO DE ESPAÑA  
(OFICEMEN)

En Madrid, a 28 de Noviembre de 2001

**REUNIDOS**

El Excmo. Sr. D. JAUME MATAS I PALOU, Ministro de Medio Ambiente, cargo para el que fue nombrado por Real Decreto de fecha 27 de abril de 2000.

D. Manuel de Melgar y Oliver, Presidente de la Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (Oficemen), quien actúa en representación de las empresas fabricantes de cemento asociadas a Oficemen (Anejo 1), de acuerdo con el cargo que ostenta para el que fue nombrado en la Junta Directiva de Oficemen celebrada en fecha 20 de septiembre de 2001.

**EXPONEN**

1. El Ministerio de Medio Ambiente, y las Consejerías y Departamentos responsables en materia de Medio Ambiente de las Comunidades Autónomas, teniendo en cuenta la Directiva 1996/61/CE del Consejo, de 24 de septiembre de 1996, relativa a la prevención y al control integrados de la contaminación, consideran prioritario hacer compatible el progreso económico y social con el respeto al medio ambiente y a los recursos naturales para una mejora de la calidad de vida, tanto para las generaciones presentes como para las futuras.
2. La Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (Oficemen), en representación de las empresas españolas fabricantes de cemento asociadas, que operan un total de 39 fábricas de cemento con una capacidad instalada de producción de 30 millones de toneladas por año de clínker y de más de 35 millones de toneladas por año de cemento, suscribe el interés manifestado por la Administración.
3. Las empresas cementeras son conscientes de su responsabilidad en la gestión racional de los recursos, y de la necesidad de hacer compatibles la fabricación de cemento con la protección del medio ambiente y la mejora de la calidad de vida de las personas, por lo que están dispuestas a dedicar recursos económicos, técnicos y humanos a la prevención y control de la contaminación proveniente de las instalaciones industriales que operan.
4. La Agrupación de Fabricantes de Cemento tiene entre sus fines promover la mejora continua del comportamiento ambiental de las instalaciones de fabricación de cemento, en particular mediante su adaptación progresiva, en los plazos previstos, a la Directiva 1996/61/CE relativa a la prevención y al control integrados de la contaminación, la aplicación de las Mejores Técnicas Disponibles en los procesos de fabricación y de reducción de la contaminación, y la promoción del intercambio de información entre los Estados miembros y la industria del cemento, de acuerdo con el artículo 16.2 y con el punto 12 del Anexo IV de dicha Directiva.
5. La industria cementera española aporta un gran potencial de utilización de residuos como materias primas y combustibles alternativos, siempre con absoluto respeto de la legislación ambiental aplicable y con garantías de que no se perjudica en modo alguno el comportamiento ambiental de las fábricas ni la calidad de los productos derivados del cemento.
6. La Directiva 2000/76/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 4 de diciembre de 2000, relativa a la incineración de residuos, contempla en su ámbito de aplicación la valorización energética de residuos en hornos de cemento, que se utilizan como combustibles alternativos en sustitución de los combustibles fósiles convencionales en la cocción de materias primas.

7. España es parte signataria del Convenio de Ginebra sobre contaminación atmosférica transfronteriza, adoptado el 13 de noviembre de 1979, para cuya aplicación se aprobó un Protocolo por el que se establecen unos techos de emisión para los óxidos de nitrógeno y de azufre, el amoniaco y los compuestos orgánicos volátiles, que fue ratificado por España en septiembre de 1999.
8. Los Acuerdos Voluntarios son un instrumento adecuado para la consecución de objetivos medioambientales basados en la colaboración entre la Administración y las empresas, en línea con la política medioambiental de la Unión Europea.
9. El apartado 4 del artículo 35 de la Ley 43/1995, de 27 de diciembre, del Impuesto sobre Sociedades, tras su modificación por el artículo 4 de la Ley 55/1999, de 29 de diciembre, de Medidas fiscales, administrativas y del orden social, y el Título I bis del Reglamento del Impuesto sobre Sociedades, añadido por el Real Decreto 283/2001, de 16 de marzo, establecen y regulan la deducción por inversiones destinadas a la protección del medio ambiente, y es de interés para las partes establecer qué actuaciones realizadas en las fábricas de cemento tienen el carácter de protectoras del medio ambiente, con el fin de facilitar la aplicación de las deducciones correspondientes.
10. El artículo 149/1/23 de la Constitución y los respectivos Estatutos de Autonomía de las Comunidades Autónomas establecen el reparto de competencias en materia medioambiental, correspondiendo a éstas últimas el desarrollo legislativo, ejecución y gestión de la legislación básica del Estado en la materia. Ello exige que este Acuerdo Voluntario, para su total efectividad, sea suscrito por la Autoridad Ambiental del ámbito territorial autónomo respectivo.

## **ACUERDAN**

Establecer un **ACUERDO VOLUNTARIO MEDIOAMBIENTAL** que contemple las medidas de prevención, reducción y control de la contaminación proveniente de las fábricas de cemento, con arreglo a las siguientes

## **CLÁUSULAS**

### **PRIMERA. ÁMBITO APLICACIÓN**

En función de lo expuesto, el presente Acuerdo Voluntario tendrá efectividad plena en las Comunidades Autónomas en las que sea adoptado formalmente mediante firma de la Autoridad Ambiental de esa Comunidad Autónoma y de las empresas cementeras presentes en su territorio.

## **SEGUNDA. ACTUACIONES DESTINADAS A LA PROTECCIÓN DEL MEDIO AMBIENTE**

A efectos del presente Acuerdo Voluntario, se consideran actuaciones destinadas a la protección del medio ambiente las relacionadas en el anexo 2.

## **TERCERA. OBJETIVOS DE MEJORA DEL COMPORTAMIENTO AMBIENTAL DE LAS FÁBRICAS DE CEMENTO**

En el ámbito temporal del presente Acuerdo y en el marco del cumplimiento estricto de la legalidad vigente en su Comunidad Autónoma, las empresas firmantes se comprometen a alcanzar los objetivos de prevención, reducción y control de la contaminación establecidos en el anexo 3.

## **CUARTA. ESTUDIOS TÉCNICO-AMBIENTALES SOBRE LA INDUSTRIA ESPAÑOLA DEL CEMENTO**

Las partes se comprometen a prestar su mayor colaboración en la realización de estudios técnicos y económicos sobre la interrelación entre la industria del cemento y el medio ambiente.

En concreto, se consideran prioritarios los proyectos y estudios que aborden alguno de los siguientes temas:

- a) Mejores Técnicas Disponibles para la fabricación de cemento.
- b) Reciclado y valorización de residuos.
- c) Reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>.
- d) Técnicas de medición y control de emisiones.
- e) Implantación de Sistemas de Gestión Medioambiental.

## **QUINTA. DEDUCCIÓN POR INVERSIONES MEDIOAMBIENTALES**

En los supuestos previstos en el artículo 35.4 de la Ley 43/1995, de 27 de diciembre, y en su desarrollo reglamentario, la Administración competente certificará, de acuerdo con los procedimientos por ella establecidos, la convalidación de las inversiones en bienes de activo material destinadas a la protección del medio ambiente a que den lugar las actuaciones realizadas por las empresas cementeras de entre las relacionadas en el anexo 2 del presente Acuerdo, a excepción de su punto 9, indicando a estos efectos que concurren las siguientes circunstancias:

- a) Que las inversiones se han realizado en ejecución de un acuerdo (este Acuerdo Voluntario o los desarrollos del mismo) celebrado con la Administración competente en materia ambiental, señalando la normativa a la que se refiere el artículo 45, letra b) del Reglamento del Impuesto sobre

Sociedades, añadido por el Real Decreto 283/2001, de 16 de marzo, y expresando la idoneidad de las inversiones con la función protectora del medio ambiente que las mismas persigan.

- b) Que las inversiones realizadas permiten alcanzar los niveles de protección previstos en el acuerdo (este Acuerdo Voluntario o los desarrollos del mismo).

Las certificaciones de convalidación de las inversiones se limitan a declarar la concurrencia de estas dos circunstancias, sin perjuicio de las competencias de la Administración tributaria para determinar si se cumplen los requisitos que permiten aplicar la deducción por inversiones destinadas a la protección del medio ambiente.

Sin perjuicio de lo establecido en la legislación vigente, para obtener las certificaciones de convalidación, las empresas fabricantes de cemento procederán de acuerdo con lo establecido en el anexo 4.

En las Comunidades Autónomas cuyo régimen fiscal difiera de lo expuesto en esta cláusula se aplicarán los procedimientos por ellas establecidos.

## SEXTA. COMISIÓN DE SEGUIMIENTO

Se constituirá una Comisión de Seguimiento del presente Acuerdo Voluntario que se reunirá, al menos, una vez al año y, en su caso, cuando una de las partes lo solicite.

La Comisión estará formada por los siguientes miembros:

- Presidente: el Director General de Calidad y Evaluación Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente y, en su ausencia, la persona que designe.

- Secretario: el Director General de la Agrupación de Fabricantes de Cemento de España y, en su ausencia, la persona que designe.

- Vocales:

- Un representante de la Autoridad Ambiental de cada Comunidad Autónoma en la que se adopte el Acuerdo Voluntario.
- Un representante por cada una de las empresas y entidades que sean parte de las adopciones formales del Acuerdo Voluntario en las Comunidades Autónomas
- Un representante del Instituto Español del cemento y sus aplicaciones (IECA)

- Suplentes: podrán nominarse suplentes de los miembros de la Comisión.

Podrán actuar en calidad de técnicos las personas que la Comisión estime conveniente.

La Comisión tendrá las siguientes funciones:

- a) Seguir el desarrollo del Acuerdo, en particular a través de los informes agregados preparados por el IECA siguiendo lo dispuesto en el anexo 4.
- b) Evaluar el cumplimiento de los objetivos establecidos en el anexo 3 a partir de los informes preparados por el IECA a tal efecto y de los datos de que dispongan las Administraciones competentes en la materia.
- c) Conocer, valorar y, en su caso, proponer los trabajos a realizar en aplicación de la cláusula cuarta del Acuerdo.
- d) Estudiar y proponer modificaciones del Acuerdo, especialmente la inclusión de nuevas actuaciones destinadas a la protección del medio ambiente en el anexo 2 y de nuevos objetivos ambientales, o la modificación de los ya incluidos, en el anexo 3, siempre teniendo en consideración la evolución de la coyuntura económica nacional y de la generación de recursos por parte de las empresas cementeras.

## **SEPTIMA. VIGENCIA DEL ACUERDO**

El presente Acuerdo entrará en vigor el día siguiente al de su formalización, extendiéndose su vigencia hasta el día 31 de diciembre de 2005. La vigencia del Acuerdo podrá prorrogarse previo acuerdo de las partes.

## **OCTAVA. CAUSAS DE EXTINCIÓN**

El presente Acuerdo Voluntario se extinguirá, además de lo previsto en la cláusula anterior, por cualquiera de las siguientes causas:

- a) Mutuo acuerdo de todas las partes firmantes.
- b) Si a lo largo del período de vigencia se produjesen circunstancias que hicieran imposible o innecesaria la aplicación del Acuerdo. El reconocimiento de la existencia de tales circunstancias deberá ser previamente acreditado por la Comisión de Seguimiento.

Y, en prueba de conformidad, firman el presente Acuerdo en el lugar y fecha señalados.



## **ANEJO 1.**

### **EMPRESAS MIEMBRO DE LA AGRUPACIÓN DE FABRICANTES DE CEMENTO DE ESPAÑA (OFICEMEN).**

**CEMENTOS ALFA, S.A.**

**CEMENTOS ATLANTICO, S.A.**

**CEMENTOS COSMOS, S.A.**

**CEMENTOS ESPECIALES DE LAS ISLAS, S.A.**

**CEMENTOS HISPANIA, S.A.**

**CEMENTOS MOLINS INDUSTRIAL, S.A.**

**CEMENTOS PORTLAND, S.A.**

**COMPAÑÍA VALENCIANA DE CEMENTOS PORTLAND, S.A.**

**HOLCIM (ESPAÑA), S.A.**

**LAFARGE ASLAND, S.A.**

**LEMONA INDUSTRIAL, S.A.**

**S.A. TUDELA VEGUIN**

**SOCIEDAD FINANCIERA Y MINERA, S.A.**

**UNILAND CEMENTERA, S.A.**



## ANEJO 2.

### ACTUACIONES DE PREVENCIÓN, REDUCCIÓN Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN

#### 1. Prevención y reducción de las emisiones de partículas a la atmósfera provenientes de las operaciones de almacenamiento, manipulación y transporte de materiales.

- 1.a) Cerramiento total o parcial de las instalaciones de almacenamiento de materiales pulverulentos.
- 1.b) Instalación de pantallas u otros medios de protección contra el viento de las instalaciones de almacenamiento, manipulación y transporte de materiales.
- 1.c) Instalaciones fijas o móviles de acondicionamiento de acopios de material mediante la aplicación de agua o agentes tensoactivos.
- 1.d) Cerramiento de instalaciones de transporte y procesado de materiales.
- 1.e) Aspiración y desempolvamiento de instalaciones de almacenamiento, transporte, puntos de transferencia y de carga y descarga de materiales pulverulentos.
- 1.f) Acondicionamiento, pavimentación y limpieza de instalaciones, de las vías de circulación y de las áreas de estacionamiento de vehículos.

#### 2. Reducción de las emisiones de partículas a la atmósfera provenientes de fuentes localizadas (emisión por chimeneas).

- 2.a) Renovación o instalación de sistemas de desempolvamiento de corrientes de gases.

#### 3. Reducción de las emisiones de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) y de azufre ( $\text{SO}_2$ ).

- 3.a) Instalación de equipos y sistemas para la reducción de las emisiones de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ).
- 3.b) Instalación de equipos y sistemas para la reducción de las emisiones de óxidos de azufre ( $\text{SO}_2$ ).

#### 4. Reducción del ruido

- 4.a) Cerramiento de instalaciones emisoras de ruido.
- 4.b) Aislamiento de equipos e instalaciones emisores de ruido.

**5. Calidad de los vertidos de agua.**

- 5.a) Instalación de sistemas de refrigeración en circuito cerrado.
- 5.b) Instalaciones de mejora de la calidad y el control de los vertidos (balsas de decantación, separación de redes, reducción de puntos de vertido).

**6. Reducción, reciclaje y gestión de residuos generados en la fábrica de cemento.**

- 6.a) Sistemas de recogida selectiva y segregación de residuos.
- 6.b) Instalaciones de almacenamiento temporal de residuos.
- 6.c) Equipos de tratamiento de residuos que mejoren las condiciones de gestión de los mismos.

**7. Reciclado y valorización de residuos en la fabricación de cemento para su utilización como materias primas alternativas.**

- 7.a) Instalaciones para la utilización de residuos inorgánicos como materias primas alternativas para la preparación del crudo.
- 7.b) Instalaciones para la utilización de residuos inorgánicos como componentes del cemento.

**8. Valorización de residuos en la fabricación de cemento para su utilización como combustibles alternativos.**

- 8.a) Instalaciones para la utilización de residuos orgánicos como combustibles alternativos en el horno de cemento

**9. Impacto visual**

- 9.a) Reforma de instalaciones, restauración de canteras, adecuación de la fábrica y sus alrededores con el fin de mejorar la integración paisajística.

**10. Control de efectos ambientales**

- 10.a) Equipos fijos o portátiles de medida de las emisiones de partículas.
- 10.b) Equipos fijos o portátiles de medida de las emisiones de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ).
- 10.c) Equipos fijos o portátiles de medida de las emisiones de óxidos de azufre ( $\text{SO}_2$ ).
- 10.d) Equipos fijos o portátiles de control de la calidad del aire.

- 10.e) Equipos fijos o portátiles de medida de ruido.
- 10.f) Equipos fijos o portátiles de control de la calidad de los vertidos de agua.
- 10.g) Equipos de control de las características y composición residuos inorgánicos.
- 10.h) Equipos de control de las características y composición residuos orgánicos.
- 10.i) Equipos fijos o portátiles para la determinación de las emisiones a la atmósfera de los siguientes compuestos: metales pesados, cloruro y fluoruro de hidrógeno, compuestos orgánicos, monóxido y dióxido de carbono.
- 10.j) Equipos fijos o portátiles para la determinación de los siguientes parámetros de proceso: presión, temperatura, contenido en oxígeno, humedad, caudal.
- 10.k) Estaciones meteorológicas.



## ANEJO 3.

### OBJETIVOS AMBIENTALES

Los objetivos que se establecen en el presente anejo están basados en las referencias citadas en los puntos 4, 6 y 7 de la Exposición de motivos y responden a las necesidades actuales de mejora del comportamiento ambiental de la industria cementera.

#### 1. Emisión de partículas por fuentes dispersas.

La reducción de las emisiones de partículas provenientes de la manipulación (transporte, carga y descarga) y almacenamiento de materias primas pulverulentas, denominadas fuentes dispersas, es uno de los principales objetivos de las empresas de cemento españolas, con el ánimo de prevenir las molestias provocadas por dichas emisiones.

Se establecen los siguientes objetivos concretos:

- 1.a) Instalaciones de almacenamiento de clínker cerradas en todas las fábricas de cemento.
- 1.b) Aspiración y desempolvamiento de todas las instalaciones de carga de cemento y clínker a granel de las fábricas.
- 1.c) Cerramiento y despulverización de todos los sistemas de transporte de clínker en las fábricas.

#### 2. Autocontrol en continuo de las emisiones del horno de cemento.

Uno de los aspectos básicos para encarar la adaptación de las fábricas de cemento a la Directiva 1996/61/CE relativa a la prevención y al control integrados de la contaminación es el adecuado conocimiento del comportamiento ambiental de las instalaciones de fabricación, tanto en lo que se refiere a las emisiones globales de los contaminantes principales como a la evolución de dichas emisiones a lo largo del tiempo.

El horno de cemento es la fuente más relevante de emisión de gases y partículas por chimenea de la fábrica de cemento. Con el fin de conocer la evolución de las emisiones del horno de cemento se establecen como objetivos de autocontrol en continuo de contaminantes emitidos por el horno de cemento, con conocimiento directo para la empresa y la administración competente, los siguientes:

- 2.a) Instalación de sistemas de medición de partículas en todos los hornos antes del 31 de diciembre del año 2003.
- 2.b) Instalación de sistemas de medición de  $\text{NO}_x$  en los hornos:
  - Antes del 31 de diciembre del año 2003: hornos que emitan más de 150 kg/hora de  $\text{NO}_x$  (expresados como  $\text{NO}_2$ )<sup>(1)</sup>.
  - Antes del 31 de diciembre del año 2005: hornos que emitan entre 75 y 150 kg/hora de  $\text{NO}_x$  (expresados como  $\text{NO}_2$ )<sup>(1)</sup>.
- 2.c) Instalación de sistemas de medición de  $\text{SO}_2$  en los hornos:

- Antes del 31 de diciembre del año 2003: hornos que emitan más de 150 kg/hora de SO<sub>2</sub><sup>(1)</sup>.
- Antes del 31 de diciembre del año 2005: hornos que emitan entre 75 y 150 kg/hora de SO<sub>2</sub><sup>(1)</sup>.

### **3. Valores de emisión de partículas por fuentes localizadas (chimeneas)<sup>(1)</sup>**

Se establecen los siguientes objetivos para todas las fábricas de cemento, que se revisarán en el año 2003 y podrán ser modificados, de acuerdo a la experiencia y conocimiento adquiridos en el desarrollo del Acuerdo y a las necesidades de protección del medio ambiente.

#### **3.a) Hornos de cemento y enfriadores:**

- Líneas integrales de fabricación de clínker de nueva construcción: menos de 30mg/m<sup>3</sup>N<sup>(2)</sup>.
- Líneas existentes de fabricación de clínker que sustituyan totalmente los equipos de desempolvamiento: menos de 50 mg/m<sup>3</sup>N<sup>(2)</sup>.
- Líneas existentes: menos de 75 mg/m<sup>3</sup>N<sup>(2)</sup>.

#### **3.b) Otras fuentes localizadas:**

- Plantas nuevas: menos de 30 mg/m<sup>3</sup>N<sup>(2)</sup>.
- Plantas existentes: menos de 50 mg/m<sup>3</sup>N<sup>(2)</sup>.

### **4. Valores de emisión a la atmósfera de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y de azufre (SO<sub>2</sub>)**

Se establecen los siguientes objetivos para todas las fábricas de cemento, que se revisarán en el año 2003 y podrán ser modificados, de acuerdo a la experiencia y conocimiento adquiridos en el desarrollo del Acuerdo y a las necesidades de protección del medio ambiente.

#### **4.a) Emisiones de NO<sub>x</sub>:**

- Plantas nuevas:
  - Hornos de vía seca: menos de 500 mg/m<sup>3</sup>N<sup>(2)</sup>.
  - Otros hornos: menos de 800 mg/m<sup>3</sup>N<sup>(2)</sup>.
- Plantas existentes:
  - Hornos de vía seca: menos de 1.200 mg/m<sup>3</sup>N<sup>(2)</sup>.
  - Otros hornos: en función de los datos obtenidos, se analizará si procede fijar este valor en 2003.

#### **4.b) Emisiones de SO<sub>2</sub>:**

- Hornos de vía seca: menos de 600 mg/m<sup>3</sup>N<sup>(2)(3)</sup>.
- Otros hornos: en función de los datos obtenidos, se analizará si procede fijar este valor en 2003.

<sup>(1)</sup> Mediciones realizadas en condiciones de operación normal de las instalaciones.

<sup>(2)</sup> Concentración en condiciones normales de presión y temperatura (101.3 kPa, 273 °K) en base seca. Para gases de combustión normalizados al 10% de O<sub>2</sub>.

<sup>(3)</sup> En los casos en que el contenido de compuestos sulfurosos volátiles en la materia prima imposibilite la consecución del objetivo, esta imposibilidad deberá ser justificada técnicamente ante la Comisión de seguimiento.

## ANEJO 4.

### DEDUCCIÓN POR INVERSIONES DESTINADAS A LA PROTECCIÓN DEL MEDIO AMBIENTE

Para la obtención de los certificados de convalidación de la inversión medioambiental, se actuará de la siguiente forma:

**1.** En el primer trimestre de cada año, la empresa cementera hará llegar a la Administración competente en materia de certificación de convalidación de las inversiones medioambientales de acuerdo con el Título I bis del Reglamento del Impuesto sobre Sociedades, añadido por el Real Decreto 283/2001, de 16 de marzo, o la legislación aplicable en cada Comunidad Autónoma, el Plan Ambiental de Inversiones de cada una de sus fábricas para el año en curso.

Se remitirá copia del Plan Ambiental de Inversiones al Ayuntamiento de la localidad en la que se ubica la fábrica.

**2.** El Plan contendrá una descripción de las actuaciones que está previsto que se ejecuten en el año en curso, con expresión de las inversiones desagregadas de acuerdo con los capítulos del anexo 2 del presente Acuerdo. Igualmente, incluirá una previsión, cuantificada siempre que las incertidumbres técnicas no lo impidan, de las reducciones de contaminantes previstas, partiendo de la situación actual y una vez realizadas las inversiones. Cuando se estime necesario llevarla a cabo, la valoración de la imposibilidad técnica para cuantificar las reducciones de contaminantes corresponderá a la Comisión de Seguimiento.

**3.** Una vez transcurrido el año, las empresas elaborarán un informe con las actuaciones realmente ejecutadas y las inversiones realizadas, igualmente desagregadas de acuerdo con los capítulos del anexo 2 del presente acuerdo. El informe será entregado a la Administración competente en el primer trimestre del año siguiente al que se refiere el Plan Ambiental de Inversiones, junto con la solicitud de certificación de reconocimiento de dichas inversiones.

Se remitirá copia del informe al Ayuntamiento de la localidad en la que se ubica la fábrica y al Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA).

**4.** Las Autoridades competentes emitirán los certificados de reconocimiento de inversiones ambientales antes del 30 de junio de cada año, de acuerdo con los procedimientos por ellas establecidos.

**5.** El IECA preparará un informe agregado para el conjunto de la industria cementera española en el que figure el grado de consecución de los objetivos del anexo 3, que será remitido a las partes firmantes del presente acuerdo a través de la Comisión de Seguimiento establecida en la cláusula SEXTA. El informe agregado preparado por IECA estará a disposición del público.

