

DIRECTRICES SOBRE MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES Y ORIENTACIÓN PROVISIONAL SOBRE MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES

**conforme al Artículo 5 y Anexo C del
Convenio de Estocolmo sobre
Contaminantes Orgánicos Persistentes**

Hornos de cemento que
incineran desechos peligrosos



Esta publicación puede ser reproducida toda o parcialmente, sin autorización especial, para fines educativos no lucrativos, siempre que se acredite la fuente. La Secretaría del Convenio de Estocolmo agradecerán se les haga llegar un ejemplar de cualquier publicación que tenga como fuente esta publicación. No se autoriza el uso de esta publicación para reventa o cualquier otro fin comercial sin permiso previo por escrito del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

Publicado por la Secretaría del Convenio de Estocolmo sobre los contaminantes orgánicos persistentes en octubre de 2008. Para mayor información sírvase escribir a:

Secretaría del Convenio de Estocolmo sobre los contaminantes orgánicos persistentes
Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
Maison internationale de l'environnement
11-13 chemin des Anémones
CH-1219, Châtelaine, Ginebra, Suiza
ssc@pops.int - www.pops.int

Esta publicación ha sido diseñada e impresa por: SRO-Kundig - Ginebra

**DIRECTRICES SOBRE MEJORES TÉCNICAS
DISPONIBLES Y ORIENTACIÓN PROVISIONAL
SOBRE MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES**

**conforme al Artículo 5 y Anexo C del
Convenio de Estocolmo sobre
Contaminantes Orgánicos Persistentes**

Í N D I C E

SECCIÓN I: INTRODUCCIÓN

- I.A** OBJETIVO
- I.B** ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO Y FORMA DE UTILIZAR LAS DIRECTRICES Y LA ORIENTACIÓN
- I.C** SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C: DEFINICIÓN, RIESGOS, TOXICIDAD
- I.D** ARTÍCULO 5 Y ANEXO C DEL CONVENIO DE ESTOCOLMO
- I.E** RELACIÓN CON EL CONVENIO DE BASILEA
- I.F** RELACIÓN CON OTRAS PREOCUPACIONES AMBIENTALES

SECCIÓN II: CONSIDERACIÓN DE ALTERNATIVAS EN LA APLICACIÓN DE MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES

- II.A** CONSIDERACIÓN DE ALTERNATIVAS EN EL CONVENIO DE ESTOCOLMO
- II.B** EL CONVENIO DE ESTOCOLMO Y LAS NUEVAS FUENTES
- II.C** UNA FORMA DE CONSIDERAR ALTERNATIVAS
- II.D** OTRAS CONSIDERACIONES DEL CONVENIO DE ESTOCOLMO

SECCIÓN III: MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES Y MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES: ORIENTACIÓN, PRINCIPIOS Y CONSIDERACIONES TRANSECTORIALES

- III.A** ORIENTACIÓN
- III.B** PRINCIPIOS Y PLANTEAMIENTOS GENERALES
- III.C** CONSIDERACIONES TRANSECTORIALES:
 - (i) SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C: MECANISMOS DE FORMACIÓN
 - (ii) CONSIDERACIONES SOBRE LA GESTIÓN DE DESECHOS
 - (iii) CO-BENEFICIOS DE LA APLICACIÓN DE MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES A LAS SUSTANCIAS DEL ANEXO C
 - (iv) GESTIÓN DE GASES DE COMBUSTIÓN Y OTROS RESIDUOS
 - (v) CAPACITACIÓN DE LOS RESPONSABLES DE LA TOMA DE DECISIONES Y EL PERSONAL TÉCNICO
 - (vi) PRUEBAS DE LABORATORIO, MONITOREO Y REGISTRO

SECCIÓN IV: RESÚMENES DE LAS CATEGORÍAS DE FUENTES QUE FIGURAN EN LAS SECCIONES V Y VI

RESÚMENES DE LA SECCIÓN V: CATEGORÍAS DE FUENTES INCLUIDAS EN LA PARTE II DEL ANEXO C

RESÚMENES DE LA SECCIÓN VI: CATEGORÍAS DE FUENTES INCLUIDAS EN LA PARTE III DEL ANEXO C

SECCIÓN V: ORIENTACIÓN/DIRECTRICES POR CATEGORÍAS DE FUENTES: CATEGORÍAS DE FUENTES DE LA PARTE II DEL ANEXO C

- V.A** INCINERADORAS DE DESECHOS
 - (i) DESECHOS SÓLIDOS URBANOS, DESECHOS PELIGROSOS Y LODOS DE ALCANTARILLADO
 - (ii) DESECHOS MÉDICOS
- V.B** HORNOS DE CEMENTO QUE INCINERAN DESECHOS PELIGROSOS
- V.C** PRODUCCIÓN DE PASTA DE PAPEL UTILIZANDO CLORO ELEMENTAL O PRODUCTOS QUÍMICOS QUE PRODUCEN CLORO ELEMENTAL
- V.D** PROCESOS TÉRMICOS EN LA INDUSTRIA METALÚRGICA
 - (i) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE COBRE
 - (ii) PLANTAS DE SINTERIZACIÓN EN LA INDUSTRIA DEL HIERRO Y EL ACERO
 - (iii) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ALUMINIO
 - (iv) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ZINC

SECCIÓN VI: ORIENTACIÓN/DIRECTRICES POR CATEGORÍAS DE FUENTES: CATEGORÍAS DE FUENTES DE LA PARTE III DEL ANEXO C

- VI.A** QUEMA A CIELO ABIERTO DE DESECHOS, INCLUIDA LA QUEMA EN VERTEDEROS
- VI.B** PROCESOS TÉRMICOS DE LA INDUSTRIA METALÚRGICA NO MENCIONADOS EN EL ANEXO C, PARTE II
 - (i) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE PLOMO
 - (ii) PRODUCCIÓN PRIMARIA DE ALUMINIO
 - (iii) PRODUCCIÓN DE MAGNESIO
 - (iv) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ACERO
 - (v) FUNDICIÓN PRIMARIA DE METALES COMUNES

VI.C	FUENTES DE COMBUSTIÓN DOMÉSTICA
VI.D	COMBUSTIÓN DE COMBUSTIBLES FÓSILES EN CENTRALES TERMOELÉCTRICAS Y CALDERAS INDUSTRIALES
VI.E	INSTALACIONES DE COMBUSTIÓN DE MADERA U OTROS COMBUSTIBLES DE BIOMASA
VI.F	PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE PRODUCTOS QUÍMICOS DETERMINADOS QUE LIBERAN SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C
VI.G	CREMATORIOS
VI.H	VEHÍCULOS DE MOTOR, EN PARTICULAR LOS QUE UTILIZAN GASOLINA CON PLOMO COMO COMBUSTIBLE
VI.I	DESTRUCCIÓN DE CARCASAS DE ANIMALES
VI.J	TEÑIDO (CON CLORANIL) Y TERMINADO (CON EXTRACCIÓN ALCALINA) DE TEXTILES Y CUEROS
VI.K	PLANTAS DE FRAGMENTACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE VEHÍCULOS FUERA DE USO
VI.L	RECUPERACIÓN DEL COBRE DE CABLES POR COMBUSTIÓN LENTA
VI.M	REFINERÍAS DE ACEITES DE DESECHO

V.B. Hornos de cemento que incineran desechos peligrosos	9
Preámbulo	9
1. Introducción	10
1.1 Panorama de la industria del cemento	10
1.2 Combustión de desechos en hornos de cemento	11
2. Vínculos a información pertinente	12
2.1 Consideraciones generales sobre la gestión de desechos (sección III.C (ii))	13
2.2 Otras opciones para el tratamiento de desechos	13
2.3 Directrices Técnicas de Basilea	13
3. Procesos de producción de cemento	13
3.1 Principios generales	13
3.2 Preparación de materias primas	14
3.3 Los procesos del horno rotatorio	15
3.4 El proceso de molienda de cemento	18
3.5 Control de emisiones	18
4. Combustión	18
4.1 Funcionamiento con combustibles convencionales	18
4.2 Combustión de desechos o desechos peligrosos	19
5. Productos entrantes y salientes del proceso	26
5.1 Productos salientes generales	26
5.2 Uso de energía	27
5.3 Emisiones de PCDD/PCDF	28
5.4 Liberaciones de PCB y HCB	34
6. Mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales	34
6.1 Medidas generales de gestión	34
6.2 Medidas específicas	36
7. Niveles de desempeño basados en mejores técnicas disponibles	42
8. Monitoreo de emisiones contaminantes y parámetros de operación	42
Referencias	44
Otras fuentes	45

Tablas

Tabla 1.	Resumen de los datos de las mediciones de PCDD/PCDF	30
Tabla 2.	Alimentación de desechos al precalentador/precalcinador e influencia en las emisiones de PCDD/PCDF	33

Ilustraciones

Figura 1.	Descripción del proceso y límites del sistema de producción de cemento	15
Figura 2.	Horno rotatorio con precalentador y calcinador de suspensión	17
Figura 3.	Perfil de la temperatura y etapas de tiempos de residencia de un horno de clinker con precalentador y precalcinador de ciclón	29

■ Resumen

La finalidad principal de los hornos de cemento es la producción de clinker. Con la combustión de desechos en hornos de cemento se busca recuperar energía y sustituir combustibles fósiles o minerales. En algunos casos, se eliminan desechos peligrosos en estas plantas.

El proceso de fabricación comprende la descomposición de carbonato de calcio (CaCO_3) a 900°C aproximadamente para obtener óxido de calcio (CaO , cal) (calcinación) seguida de un proceso de clinkerización a unos 1450°C en horno rotatorio. A continuación, se muele el clinker junto con yeso y otros aditivos para producir cemento. Según las condiciones físicas y químicas, los principales procesos de fabricación de cemento se conocen como proceso seco, húmedo, semiseco y semihúmedo.

El proceso de combustión en el horno tiene el potencial de producir y luego liberar sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo. Además, se pueden producir liberaciones en los lugares de almacenamiento.

Un buen diseño de las condiciones del proceso, así como la aplicación de medidas primordiales adecuadas, debería permitir que los hornos de cemento que incineran desechos peligrosos funcionen de manera tal que la formación y liberación de sustancias del Anexo C ser lo bastante reducidas para lograr concentraciones de PCDD y PCDF en gases de combustión de $<0.1 \text{ ng EQT-I/Nm}^3$ (10% de contenido de oxígeno), dependiendo de factores como el uso de combustibles limpios, alimentación de desechos, temperatura y eliminación de polvo. Cuando sea necesario, deberían aplicarse medidas secundarias adicionales para reducir las emisiones.

Se cuenta con muchos datos sobre las emisiones atmosféricas de PCDD/PCDF.

Se han registrado liberaciones de PCDD/PCDF provenientes del polvo de hornos de cemento y, posiblemente, del clinker, que se siguen investigando. Los datos sobre liberaciones de PCB y HCB todavía son escasos.

Los niveles de desempeño que se asocian a mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales para el control de PCDD/PCDF en gases de combustión son $<0.1 \text{ ng EQT-I/Nm}^3$ en condiciones de referencia de 273 K, 101.3 kPa, 10% de O_2 y gas seco.

Preámbulo

El siguiente proyecto de directrices proporciona orientación sobre las mejores técnicas disponibles y las mejores prácticas ambientales para hornos de cemento que incineran desechos peligrosos relativos al artículo 5 y al Anexo C, Parte II, del Convenio. Se pueden co-procesar desechos en hornos de cemento para usarlos como combustible alternativo o con la finalidad de destruirlos. Por consiguiente, en esta sección también se consideran los requisitos del artículo 6 del Convenio para la destrucción de desechos que contienen contaminantes orgánicos persistentes.

Asimismo, en esta sección se abordarán las *Directrices técnicas generales para el manejo ambientalmente racional de desechos consistentes en contaminantes orgánicos persistentes (COP)*, que los contengan o estén contaminados con ellos, redactadas por las Partes en el Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación (Basel Convention Secretariat 2005). Estas directrices sirven de orientación sobre mejores técnicas disponibles para la destrucción o transformación irreversible de contaminantes orgánicos persistentes, y señalan que la co-incineración en hornos de cemento es un proceso que puede usarse para esta destrucción y transformación irreversible de contaminantes orgánicos persistentes en desechos.

La destrucción y co-incineración de desechos y desechos peligrosos en hornos de cemento también entran en el ámbito de esta sección. Al leer estas directrices se debería tener presente que actualmente no existe una definición estricta de los términos “desecho” y “desecho peligroso”. En el contexto de estas directrices se utiliza el término “desecho” independientemente de su poder calorífico o de su potencial para sustituir recursos minerales.

En la presente sección se plantean las problemáticas derivadas de las categorías de fuentes en el Anexo C, Parte II b: hornos de cemento que incineran desechos peligrosos; y el caso de la co-incineración de desechos urbanos o lodos de alcantarillado en hornos de cemento, categoría de fuentes, Parte II a.

1. Introducción

1.1 Panorama de la industria del cemento

La producción mundial de cemento ha crecido constantemente en los últimos años, y se prevé que esta tendencia continuará. Según investigaciones de la propia industria, la producción mundial de cemento en 2003 fue de 1,940 millones de toneladas, mientras que en 2001 fue de 1,690 millones de toneladas, y de 1,660 millones de toneladas en 2002. Una parte considerable de la producción se realiza en procesos secos (de Bas 2002; DFIU/IFARE 2002).

En los últimos años ha habido un incremento anual constante de aproximadamente 3.6% por la fuerte demanda de países en desarrollo y países con economías en transición. Actualmente, del total de la producción mundial, Europa aporta 14.4%, los Estados Unidos de América, 4.7%, el resto de América, 6.6%, Asia, 67.5% (China, 41.9%), África, 4.1% y el resto del mundo, 2.7%. Se estima que el consumo promedio mundial de cemento per capita fue de 260 kg en 2004 (Cembureau 2004).

La producción de cemento en Europa asciende a unos 190 millones de toneladas por año. Más del 75% de esta producción corresponde a procesos secos, debido al aumento en la aplicación de estos procesos de mayor rendimiento energético en instalaciones nuevas o que se han ampliado en los últimos años; el 16% corresponde a procesos semisecos o semihúmedos y el 6% a procesos húmedos. La capacidad normal de los nuevos hornos europeos es de 3,000 toneladas de clinker al día (Wulf-Schnabel and Lohse 1999).

La industria de cemento de China produjo 1,038 millones de toneladas de cemento en 2005 (808 kg per capita, 45.4% de la producción mundial)¹. Aproximadamente 60% de esa producción proviene de 4,000 hornos de eje vertical (Karstensen 2006a).

En los Estados Unidos, un horno promedio produce 468,000 toneladas por año (cifras de 2002). Actualmente, cerca de 81% de la producción de cemento en los Estados Unidos se realiza con tecnología de proceso seco (Sitio de internet de la *Portland Cement Association*).

Tradicionalmente, el combustible primordial para hornos de cemento es el carbón. Sin embargo, se han usado y siguen usando diversos combustibles, como el petróleo, coque, gas natural y aceite (European Commission 2001). En Europa, el consumo energético específico de la industria del cemento ha disminuido cerca de 30% (porcentaje que equivale a aproximadamente 11 millones de toneladas de carbón por año) durante los últimos 20 años (Cembureau 2004). No deja de ser frecuente que los hornos sean del tipo multcombustible, y que se pase de uno a otro combustible en función de los costos corrientes.

1.2 Combustión de desechos en hornos de cemento

Además de los combustibles convencionales mencionados en la sección 1.1, la industria del cemento utiliza varios tipos de desechos como combustible. En la industria del cemento europea el consumo de desechos como combustible asciende a 6 millones de toneladas, lo que corresponde a una tasa de sustitución térmica de 18% (Cembureau 2004).

Además, los hornos de cemento pueden contribuir a la destrucción de desechos, incluso desechos peligrosos, aunque el contenido de energía o mineral útil en algunos de ellos sea bajo o nulo. Este proceso puede realizarse a petición de los gobiernos nacionales o como respuesta a la demanda local. En una instalación bien controlada puede lograrse una destrucción de gran eficiencia de los compuestos orgánicos presentes en estos desechos.

Como se explica más adelante, el coprocesamiento de desechos peligrosos sólo puede efectuarse si se cumplen ciertos requisitos de control de los desechos que ingresan (por ejemplo, contenido de metales pesados, poder calorífico, contenido de cenizas, contenido de cloro), control del proceso y control de las emisiones.

No obstante, hay que reiterar que los hornos de cemento son, ante todo, sistemas de producción de clinker, y no todas las condiciones de funcionamiento en las que se pueden fabricar productos de clinker satisfactorios son ideales para la destrucción de desechos. Por ejemplo, los hornos de cemento tienden a operar a niveles de oxígeno de escape más bajos y niveles de monóxido de carbono más altos que un incinerador correctamente operado. La destrucción de desechos orgánicos no sólo requiere altas temperaturas y largos tiempos de residencia, sino que también requiere oxígeno suficiente y que estén lo suficientemente mezclados los componentes orgánicos destinados a la destrucción con el oxígeno. Pueden que los desechos no queden completamente destruidos si el desecho no es introducido adecuadamente en el horno o si los niveles de oxígeno disponible son demasiado bajos. Un diseño y funcionamiento óptimo son factores primordiales para usar hornos de cemento con esta finalidad.

Se debería destacar que esta actividad es distinta de la sustitución de combustible o de materia prima en el proceso. Los hornos de cemento se han usado de esta manera durante muchos años en países como Japón, Noruega y Suiza, donde hay poco espacio para rellenos sanitarios. Más recientemente, se han usado hornos modernos para destruir desechos en algunos países en desarrollo donde la falta de infraestructura de eliminación de desechos e incineración hace que los hornos sean la alternativa más económica y accesible. El objetivo de esta sección es servir de guía para los problemas ambientales que pueden surgir en estos casos. Aun habiendo una infraestructura apropiada para la eliminación de desechos, puede ser útil complementar la capacidad local mediante el uso de hornos de cemento.

La aplicación de métodos que implican la gestión de desechos, como el reciclaje o el reprocesamiento, es preferible al depósito en rellenos sanitarios o al vertido o destrucción de desechos en hornos de cemento. Cada caso debería ser objeto de evaluación en el marco de una estrategia integral para la gestión de desechos (véase sección III C (ii)).

Como excepción, los hornos de cemento pueden emplearse para la eliminación libre de riesgos de los desechos que poseen un bajo poder calorífico o valor mineral, y que no contribuyen al proceso de producción de clinker. Para este tipo de tratamiento, las autoridades reguladoras y los operadores de la planta de cemento deben llegar a acuerdos especiales, según el caso.

Cuando se usan hornos de cemento para destruir desechos, deben evaluarse cuidadosamente las rutas de eliminación alternativas. La destrucción de desechos en hornos de cemento debe cumplir estrictas normas ambientales, sanitarias y de seguridad, y no debe perjudicar la calidad del producto final. En países donde no existen requisitos estrictos para el producto final es más importante estipular la aplicación de mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales a las plantas que co-incineran desechos. El proceso debe controlarse con precisión cuando se destruyen estos desechos, y las emisiones deben medirse regularmente.

2. Vínculos a información pertinente

Pueden encontrarse antecedentes completos sobre la operación de hornos de cemento en general y sobre la combustión de desechos en hornos de cemento en los siguientes sitios:

European Commission.2001. *Reference Document on the Best Available Techniques in the Cement and Lime Manufacturing Industries*. BAT Reference Document (BREF). European IPPC Bureau, Seville, Spain². (<http://eippcb.jrc.es/pages/FActivities.htm>)

European Commission.2005. *Reference Document on the Best Available Techniques for the Waste Treatments Industries*. BAT Reference Document (BREF). European IPPC Bureau, Seville, Spain.(<http://eippcb.jrc.es/pages/FActivities.htm>)

Holcim. 2006. *Guidelines on Co-Processing Waste Materials in Cement Production*. The GTZ- Holcim public private partnership 2006. (http://www.holcim.com/gc/CORP/uploads/GuidelinesCOPROCEM_web.pdf)

CSI (Cement Sustainability Initiative). 2006. *Guidelines for the Selection and Use of Fuels and Raw Materials in the Cement Manufacturing Process: Fuels and Raw Materials*. World Business Council for Sustainable Development, Geneva, Switzerland. (http://www.wbcsdcement.org/pdf/tf2/tf2_guidelines.pdf)

2.1 Consideraciones generales sobre la gestión de desechos (sección III.C (ii))

La sociedad puede gestionar los desechos de diversas formas, según sea su naturaleza física y química, y el contexto económico, social y ambiental en que se generen. A continuación se enumerarán algunos de ellos. Las decisiones particulares siempre dependerán de circunstancias locales, como la disponibilidad de plantas para el tratamiento de desechos, los mercados alternativos para los materiales, y la infraestructura disponible para recolectar, gestionar y transportar los materiales de desechos en forma libre de riesgos (CSI 2005). En la sección III C (ii) de las presentes directrices se ilustra el orden jerárquico de la toma de decisiones para la gestión de desechos.

2.2 Otras opciones para el tratamiento de desechos

El uso de hornos de cemento para el tratamiento de desechos sólo debería considerarse como parte del marco general de las opciones para gestión de desechos en una jerarquía como la que se ha explicado. La incineración de desechos también es una alternativa para la eliminación de desechos y deberían considerarse las directrices para mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales de esta categoría de fuente cuando se usen hornos de cemento con esta finalidad.

2.3 Directrices Técnicas de Basilea

Las Directrices técnicas elaboradas por el Convenio de Basilea deben tomarse debidamente en cuenta ya que proporcionan orientación sobre mejores técnicas disponibles para la destrucción o transformación irreversible de contaminantes orgánicos persistentes contenidos en desechos.

3. Procesos de producción de cemento

En estas directrices la descripción del proceso de producción de cemento se limita a las distintas vías del proceso en hornos rotatorios. Se debe tener presente que en China la mayor parte del cemento se produce en hornos de eje vertical que muestran una baja eficiencia energética y un deficiente desempeño ambiental (H. Klee, *World Business Council for Sustainable Development*, comunicación personal, 2004). Por lo tanto, los hornos de eje vertical no deberían considerarse como una opción de mejor técnica disponible.

3.1 Principios generales

La química básica del proceso de fabricación de cemento comienza con la descomposición del carbonato de calcio (CaCO_3) a 900°C aproximadamente para dejar

óxido de calcio (CaO, cal) y liberar dióxido de carbono gaseoso (CO₂). Este proceso se conoce como calcinación, y viene seguido de un proceso de clinkerización en que el óxido de calcio reacciona a altas temperaturas (1400°C –1500°C habitualmente) con óxido de silicio, de aluminio y ferroso para formar los silicatos, aluminatos y ferritos de calcio que componen el clinker de Portland. Luego, este clinker es molido junto con yeso y otros aditivos para producir cemento. La Figura 1 ilustra los procesos principales y los límites del sistema de producción de cemento.

3.2 Preparación de materias primas

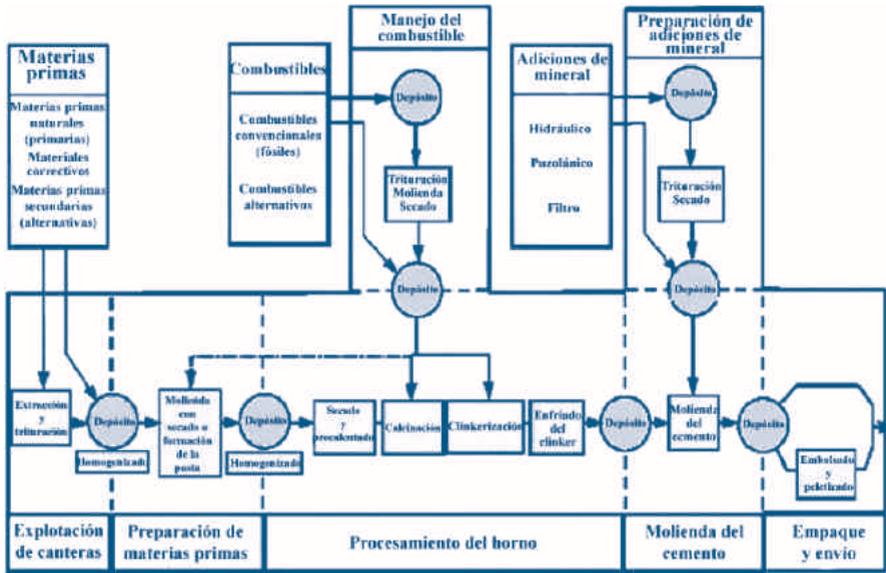
La preparación de materias primas es de gran importancia para el posterior sistema de combustión, tanto para obtener la composición química correcta de la materia prima introducida, como para asegurarse de que sea lo bastante fina. Medir y dosificar con precisión los componentes de alimentación del molino basándose en el peso es importante para lograr una composición química homogénea. Estos preparativos son esenciales para el funcionamiento estable del horno y para obtener un producto de alta calidad.

La preparación de los combustibles sólidos (trituración, molienda y secado) se realiza normalmente en el sitio.

Las materias primas, en proporciones controladas, se muelen y combinan para formar una mezcla homogénea con la composición química requerida. En los procesos seco y semisecho, los componentes de la materia prima se muelen y secan para obtener un polvo fino, aprovechando principalmente los gases de escape del horno y/o de aire de escape refrigerante. Para materias primas con un contenido de humedad relativamente alto, y en los procedimientos de encendido, puede necesitarse un horno auxiliar para proporcionar calor adicional.

La molienda húmeda sólo se emplea en combinación con un sistema húmedo o semihúmedo. Los componentes de la materia prima se muelen con agua para formar una lechada. Normalmente se prefiere el proceso húmedo cuando la materia prima tiene un contenido de humedad superior al 20% de su peso.

■ **Figura 1. Descripción del proceso y límites del sistema de producción de cemento**



Source: European Commission 2001

3.3 Los procesos del horno rotatorio

La materia prima de alimentación, conocida como crudo, mezcla cruda, harina, torta o pasta (con un proceso húmedo) de horno, se calienta en un horno, que es una cámara cilíndrica de acero giratoria, de gran tamaño e inclinada (horno rotatorio). Los hornos funcionan con una configuración de contracorriente. Los gases y sólidos fluyen en direcciones contrarias a través del horno, proporcionando una transferencia de calor más eficiente. El crudo es alimentado por el extremo superior o frío del horno rotatorio, y la inclinación y rotación hacen que se desplace hacia el extremo inferior o caliente. El horno se enciende en el extremo caliente, normalmente con carbón o coque de petróleo como combustible primario. A medida de que el crudo discurre a lo largo del horno y se calienta, se producen las reacciones de secado y de pioprocesamiento para formar el clinker, que consiste en gránulos de material fundido incombustible. Hay diversas maneras de introducir los combustibles (tanto fósiles como alternativos) en el horno, que se describen con más detalle en la subsección 4.1.

El clinker sale del extremo caliente del horno a una temperatura aproximada de 1000°C, cae dentro de un enfriador de clinker, habitualmente una parrilla deslizante por la que se insufla aire de enfriamiento.

Pueden seguirse diversas vías para la fabricación de cemento durante la fase de pioprocesamiento para obtener las transformaciones físicas y químicas necesarias. Estas

vías se distinguen entre sí por diseño de los equipos, el método de operación y el consumo de combustible.

3.3.1 El proceso seco

En el proceso seco, las materias primas se muelen y secan para obtener crudo en forma de polvo fluido. Se introduce el crudo seco en el horno con precalentador o precalcinador o, más raramente, en un horno largo de vía seca. La eficiencia energética del horno es mayor si se precalienta el crudo antes de introducirlo en el horno.

3.3.1.1 El proceso de precalentamiento seco

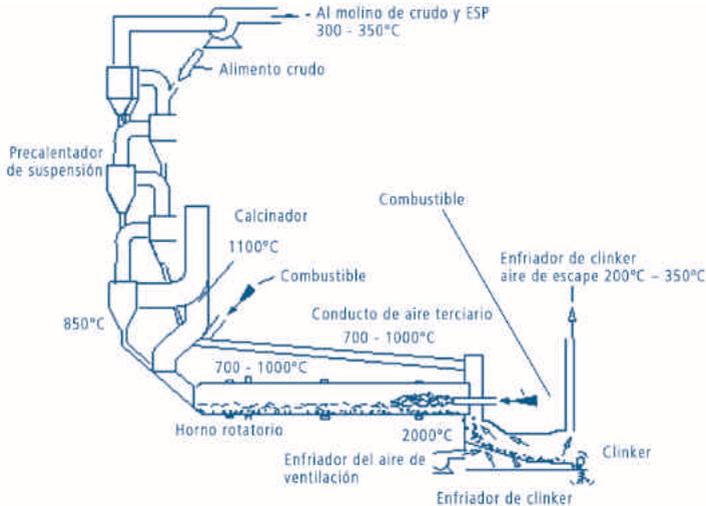
En este proceso se utilizan precalentadores para aumentar la eficiencia térmica. Un precalentador de crudo consiste en una torre vertical que contiene una serie de recipientes tipo ciclón. Se introduce el crudo en la parte superior de la torre. Los gases calientes de escape provenientes del horno atraviesan a contracorriente el crudo que va descendiendo para calentarlo antes que ingrese al horno. Se separa el crudo de los gases de combustión del horno en el ciclón, que luego cae a la siguiente etapa. Como el crudo entra en el horno a mayor temperatura que en los hornos largos convencionales de proceso seco, el horno con precalentador es más corto.

Con los sistemas de precalentamiento hay que eliminar a veces elementos no deseados, como ciertos componentes alcalinos, mediante un sistema de derivación (bypass) de álcalis ubicado entre el extremo de alimentación del horno rotatorio y la torre de precalentamiento. Si no se hace así, estos componentes alcalinos pueden acumularse en el horno, formando incrustaciones que se depositan en las paredes del recipiente y que pueden obligar a apagar el horno para poderlas retirar. Este problema puede reducirse retirando parte de los gases con alto contenido de álcalis. Si esta desviación de álcalis tiene un ducto de escape separado, cabe esperar que contenga y libere los mismos contaminantes que el escape del horno.

3.3.1.2 El proceso de precalentamiento/precalcinación en seco

Este proceso es similar al proceso de precalentamiento seco, pero se añade un sistema de combustión auxiliar para aumentar la temperatura de las materias primas antes de introducir las en el horno (Figura 2). Se agrega un recipiente de combustión de precalcinación en la parte inferior de la torre de precalentamiento. La ventaja fundamental de usar el precalcinador es que aumenta la capacidad de producción del horno, ya que en él sólo se realiza la combustión del clinker. El uso del precalcinador también aumenta la duración del refractario del horno por la disminución de la carga térmica en la zona de combustión. Esta configuración también puede requerir un sistema de desviación para el control de álcalis, tomando en cuenta que, de liberarse por una chimenea de escape independiente, pueden contener y liberar los mismos contaminantes que el escape del horno.

■ Figura 2. Horno rotatorio con precalentador y calcinador de suspensión



Nota: ESP = precipitador electrostático (instrumento para la recolección del polvo).

3.3.2 El proceso semiseco

En el proceso semiseco el crudo se granula con 12%–14% de agua y se introduce en un precalentador de parrilla antes de entrar al horno, o en un horno largo equipado con cadenas, donde los gránulos se secan y calcinan parcialmente al contacto con los gases de escape del horno caliente antes de introducirse en el horno rotatorio.

3.3.3 El proceso semihúmedo

En el proceso semihúmedo las materias primas (que suelen tener un alto contenido de humedad) se muelen en agua para formar una pasta bombeable, que luego se escurre en prensas de filtro. Las tortas de filtro se extruyen en forma de gránulos y se introducen en un precalentador de parrilla o directamente en el secador de tortas de filtros para la producción de crudo.

3.3.4 El proceso húmedo

En el proceso húmedo, las materias primas (que suelen tener un alto contenido de humedad) se muelen en agua para formar una pasta bombeable, que se introduce directamente en el horno o se pasa primero por un secador de pasta. El proceso húmedo es un proceso más antiguo que se usa en caso de molienda húmeda de materias primas. Necesita más energía en comparación con el proceso seco debido a la evaporación de agua derivada de la pasta.

3.4 El proceso de molienda de cemento

El clinker es molido con yeso y otros aditivos, normalmente en un molino de bolas, para generar el producto final: cemento. El cemento se transporta desde el molino de cemento acabado a silos de almacenamiento, verticales y de gran tamaño, en los sectores de embarque o transporte. El cemento se saca de los silos de almacenamiento mediante diversos aparatos de extracción y se traslada a estaciones para carga dentro de la planta o directamente a los vehículos de transporte.

3.5 Control de emisiones

En general, los hornos de cemento modernos están equipados con precipitadores electrostáticos, con filtros de tela, o con ambos, para controlar el material particulado. En algunos casos, los gases de combustión son enfriados antes de entrar en el dispositivo para control de contaminación de aire seco. No se han usado dispositivos para control de la contaminación de gases ácidos en hornos de cemento porque las materias primas son altamente alcalinas y proporcionan un grado importante de control de gases ácidos (Karstensen 2006b), sin embargo, hay hornos equipados con depuradores húmedos si el crudo tiene alto contenido de azufre.

Las técnicas para la reducción de NO_x corresponden principalmente a métodos integrados como enfriamiento de llama, diseño del quemador, combustión por etapas o reducción no catalítica selectiva mediante inyección de amoníaco.

4. Combustión

4.1 Funcionamiento con combustibles convencionales

Los combustibles convencionales empleados en plantas de cemento son combustibles fósiles como carbón, lignito, aceite combustible o gas natural. Estos combustibles pueden utilizarse solos o combinados, en cuyo caso debe asegurarse una calidad mínima (en términos de poder calorífico, contenido de metales pesados o azufre). Algunos combustibles fósiles (ej., el carbón) se trituran en molinos antes de su inyección.

Para que el horno funcione con regularidad y se obtenga una producción de clinker homogéneo y una combustión completa, se deben considerar algunas normas importantes para la preparación de los combustibles. La oxidación de los componentes del combustible es más rápida cuando se mezclan adecuadamente y la superficie específica es más amplia. En el caso de combustibles líquidos, la inyección debe ser lo más suave posible. Con combustibles sólidos, se requiere mezclarlos de manera minuciosa con los demás combustibles que se usen al mismo tiempo. Este procedimiento no absolutamente necesario si la materia prima es homogénea y muy uniforme.

Una planta de cemento consume de 3,000 a 6,500 MJ (sin incluir la electricidad y el transporte) por tonelada de clinker producida, según las materias primas y el proceso utilizado. La mayoría de los hornos de cemento emplean carbón y coque de petróleo como combustibles primarios, y en menor medida, gas natural y aceite combustible.

Además de proporcionar energía, la quema de algunos de estos combustibles dejan cenizas del combustible con compuestos de sílice y alúmina (y otros elementos traza), que se combinan con las materias primas en el horno, contribuyendo a la estructura del clinker y forman parte del producto final. El consumo de energía habitualmente equivale del 30% al 40% de los costos de producción. Los distintos tipos de combustibles, del más al menos importante, son lo siguientes:

- Carbón y coque de petróleo pulverizado (petcoque)
- Aceite combustible (pesado)
- Gas natural

Los puntos potenciales de alimentación para introducir el combustible en el sistema del horno son:

- El quemador principal en la salida del horno rotatorio
- Resbaladera de alimentación en la cámara de transición en la entrada del horno rotatorio (para combustible en trozos)
- Quemadores secundarios para el ducto ascendente
- Quemadores precalcinadores para el precalcinador
- Una abertura de alimentación para el precalcinador/precalentador (para combustible en trozos)
- Una válvula en la mitad del horno en el caso de hornos largos húmedos y secos (para combustible en trozos)

Según sean las condiciones de funcionamiento, concretamente en el caso de operación defectuosa de las instalaciones, pueden generarse importantes emisiones de dibenzoparadioxinas policloradas (PCDD) y dibenzofuranos policlorados (PCDF). Con un funcionamiento adecuado, la liberación de PCDD/PCDF debería estar muy por debajo de 0.1 ng EQT/m³.

4.2 Combustión de desechos o desechos peligrosos

La selección de desechos y materiales está determinada por otras consideraciones diversas que están relacionadas entre sí, en particular:

- El efecto en las emisiones de CO₂ y el consumo de combustible
- El efecto en el costo del combustible
- El efecto en otras emisiones como las de NO_x, SO₂, partículas, otros contaminantes orgánicos persistentes, metales pesados, CO, sustancias orgánicas
- El efecto en la actividad minera y extractora
- La estabilidad del funcionamiento del horno (afectada por parámetros como el poder calorífico y el contenido de agua)

- El efecto en la calidad del producto (ej., límite de contenido de cloro en el cemento: <0.1%)

Las exigencias para la calidad del producto, en particular el límite de 0.1% para el contenido de cloro en el cemento, reduce las opciones de combustión, y debe vigilarse la cantidad de cloro entrante.

4.2.1 Ejemplo de desechos y combustibles alternativos

La sustitución de combustibles fósiles por alternativos es una práctica muy establecida en diversos países. Algunos países vienen utilizando desechos como combustible alternativo desde hace casi 30 años, y algunos gobiernos promueven activamente este método, siempre que se cumplan estrictos requisitos relacionados con el control del ingreso, proceso y emisiones. No obstante, algunos interesados y otras jurisdicciones han considerado la práctica con los mismos criterios de la incineración. En los países donde esta práctica está muy arraigada, se ha dado importancia a los tipos de materias primas más convenientes para usar en hornos de cemento (CSI 2005), entre ellas:

- Neumáticos usados
- Carne, harina de huesos y grasa animal
- Plásticos
- Aserrín impregnado
- Desechos de madera, papel, cartón, embalajes
- Lodos (fibra de papel, aguas residuales)
- Desechos orgánicos y de la agricultura
- Esquisto, esquisto bituminoso
- Lodos de carbón
- Residuos de destilación
- Fracciones pequeñas de carbón o coque /ánodos/coques químicos
- Aceites residuales, agua aceitosa
- Solventes usados

Es importante controlar los parámetros de los desechos (ej., poder calorífico, contenido de agua, de cenizas, de cloro, de metales pesados).

4.2.2 Lista de desechos no recomendados

El co-procesamiento sólo debería practicarse si se cumplen todas y cada una de las condiciones tangibles previas y requisitos de la normativa ambiental, sanitaria, de seguridad, socioeconómica y operacional. Por lo tanto, no todos los materiales de desechos son adecuados para el co-procesamiento. He aquí la lista de los desechos no recomendados para el co-procesamiento en plantas de cemento:

- Desechos nucleares
- Desechos electrónicos
- Explosivos
- Ácidos minerales
- Desechos con asbesto
- Desechos con una alta concentración de cianuro
- Desechos médicos infecciosos
- Armas químicas o biológicas destinadas a su destrucción
- Baterías completas
- Basura domiciliaria sin clasificar y otros desechos de composición desconocida

Los desechos electrónicos se componen de computadoras y accesorios, equipos electrónicos de entretenimiento, de comunicación, juguetes y productos de línea blanca como aparatos de cocina o artefactos médicos. La composición promedio muestra que los desechos electrónicos contienen, por una parte, sustancias peligrosas para la salud y el ambiente como Cl, Br, P, Cd, Ni, Hg, PCB e pirorretardantes bromados en altas concentraciones; por otra parte, los desechos electrónicos poseen un contenido tan alto de metales preciosos escasos que conviene hacer todo lo necesario para su reciclaje. El co-procesamiento de las partes de plástico de los desechos electrónicos sería una alternativa interesante, pero requiere desensamblar y separar con anterioridad (según Holcim, 2006).

Este listado no es exhaustivo. En general, los desechos con un bajo poder calorífico y un alto contenido de metales pesados no son adecuados para horno de cemento. Los desechos sólidos urbanos no deberían co-incinerarse en hornos de cemento debido a su composición impredecible y a sus características. Además, cada planta puede excluir otros materiales, según las circunstancias locales.

4.2.3 Consideraciones para la selección de desechos

La selección de desechos es un proceso complejo, influido por muchos factores, como el funcionamiento del horno, la naturaleza de los mismos desechos, el efecto general en el medio ambiente, la calidad deseada del clinker y la probabilidad de formación y liberación al medio ambiente de las sustancias del Anexo C del Convenio de Estocolmo y de otras emisiones. El operador debería establecer un procedimiento de evaluación y admisión para los combustibles y, basándose en este procedimiento, realizar una evaluación del efecto del combustible en las emisiones de la planta y de la necesidad potencial de equipos o procedimientos nuevos para garantizar que no produzcan efectos negativos en el medio ambiente.

A continuación se analizarán algunas variables que deberían considerarse al seleccionar combustibles y materias primas (CSI 2005).

4.2.3.1 Funcionamiento del horno

- Contenido de cloro, azufre y álcali: Estos compuestos pueden acumularse en el sistema del horno, produciendo acumulaciones, obturaciones y un funcionamiento inestable. El exceso de cloro o álcali puede generar polvo de horno de cemento o polvo del dispositivo de extracción del gas (y puede requerir la instalación de un dispositivo extractor), que debe quitarse, reciclarse o eliminarse responsablemente
- Contenido de agua: Un alto contenido de agua puede reducir la productividad y eficiencia del sistema del horno.
- Poder calorífico (combustible): El poder calorífico es el parámetro clave para la energía proporcionada al proceso.
- Contenido de cenizas: El contenido de cenizas afecta la composición química del cemento y puede requerir ajustar la composición de la mezcla de materias primas.
- Otros factores también importantes, como la capacidad de tratamiento y el volumen de gases residuales.
- La estabilidad de la operación (picos de CO) y el estado (líquido, sólido), preparación (triturado, molienda) y homogeneidad de los desechos.

4.2.3.2 Calidad del clinker y del cemento

- Contenido de fósforo: Infiere en el tiempo de endurecimiento.
- Contenido de cloro, azufre y álcali: Afecta la calidad de todo el producto.
- Talio y cromo: en relación al polvo de horno de cemento y a la calidad del cemento, y probables reacciones alérgicas de usuarios susceptibles.

4.2.3.3 Emisiones contaminantes atmosféricas además de las sustancias que figuran en el Anexo C

- Altos contenidos de azufre en las materias primas y en combustibles y desechos introducidos en el horno: Pueden generar la liberación de SO₂.
- Control de emisiones: Cuando se instala un sistema de extracción de álcalis hay que realizar también un control de emisiones atmosféricas del escape del sistema de extracción similar al de la chimenea principal.
- Cloro en materias primas o combustibles: Pueden combinarse con álcalis que también se encuentran en el alimento para formar material particulado fino compuesto de cloruros de esos álcalis, que pueden ser difíciles de controlar. En algunos casos los cloruros se combinan con el amoníaco presente en la piedra caliza introducida para producir columnas separadas, muy visibles, de partículas finas compuestas principalmente de cloruro de amonio.
- Metales en el combustible o en las materias primas: Las materias primas y los combustibles siempre contendrán metales en diversas concentraciones. El

comportamiento de estos metales en el proceso de combustión depende de su volatilidad. Los compuestos metálicos no volátiles permanecen en el proceso y salen del horno como parte de la composición del clinker. Los compuestos metálicos semivolátiles son parcialmente absorbidos en la fase gaseosa a temperaturas de sinterización y se condensan en la materia prima en secciones más frías del sistema del horno. Este proceso genera un efecto cíclico dentro del sistema del horno (ciclos internos) que se va acumulando hasta el punto en que se establece y mantiene un equilibrio entre entrada y salida por el clinker de cemento. Los compuestos metálicos volátiles se condensan en las partículas de las materias primas a temperaturas más bajas y pueden formar ciclos internos o externos, si no salen con los gases de combustión del horno. El talio, mercurio y sus compuestos son especialmente fáciles de volatilizar, y también, aunque en menor medida, el cadmio, plomo, selenio y sus compuestos. (European Commission 2001).

- La concentración de metales en el polvo del horno de cemento depende de la materia prima y de la recirculación en el sistema del horno. En particular, el uso de carbón y combustibles de desecho puede aumentar el ingreso de metales en el proceso. Los aparatos para control de polvo sólo pueden capturar la fracción de metales pesados unida a las partículas. La tasa de retención para la fracción gaseosa de los metales volátiles como el mercurio es baja. Por lo tanto, debe limitarse el ingreso de ese tipo de material en el sistema del horno, lo que debe tomarse en consideración al co-incinerar desechos que contienen metales pesados volátiles como mercurio, plomo o cadmio. La madera tratada con cobre, cromo, arsénico, etc. también requiere consideración especial en cuanto a la eficacia del sistema para depuración de gases de combustión.
- La elección de los combustibles también puede afectar las emisiones de gases de invernadero. Por ejemplo, sustituir combustibles fósiles por biomasa genera una disminución en las emisiones netas de CO₂.
- Los desechos pueden afectar las emisiones de NO_x, según su composición y contenido de agua.

4.2.4 Análisis de los flujos de entrada

Los operadores del horno deberían establecer criterios para la admisión de materias primas que contienen desechos, y deberían realizar procedimientos de evaluación constantes, que abarcaran los siguientes aspectos:

- Nombre y dirección del distribuidor/proveedor, origen de los desechos, volumen, contenido de agua y cenizas, poder calorífico, concentración de cloruros, fluoruros, azufre y metales pesados.
- Todo proveedor de material debería proporcionar, la primera vez, y luego en forma periódica, muestras representativas del combustible para ser evaluadas antes de entregar el combustible a la planta.
- Todo proveedor debería asimismo adjuntar una hoja de datos que contenga en detalle las propiedades químicas y físicas del combustible entregado, e

información sobre consideraciones ambientales, de salud y de seguridad pertinentes durante el transporte, manejo y uso.

- Las características físicas y químicas de la muestra deberían analizarse y verificarse a la vista de las especificaciones.

Debe establecerse un sistema claro para la gestión de garantía y control de calidad, en particular el muestreo y análisis periódicos de los materiales entregados efectivamente a la planta y la verificación de que los niveles de contaminantes importantes no rebasen las especificaciones establecidas.

4.2.5 Pretratamiento y almacenamiento de desechos usados como combustible alternativo

Los requisitos de almacenamiento para los desechos dependen del tipo de material. En general, se debe procurar disminuir las emisiones de contaminantes, y atender las consideraciones técnicas y de higiene.

En cuanto al almacenamiento inicial, los materiales fuertemente contaminados (ej., con un contenido biológico considerable) y con un alto nivel de humedad (hasta un 40%) deben almacenarse en depósitos construidos especialmente tomando en cuenta las consideraciones de higiene. Las harinas cárnicas deben acondicionarse en sistemas herméticos. Se suministran en contenedores, y el material se transporta por vía neumática o mediante equipos mecánicos al lugar de almacenamiento. Los desechos líquidos (aceites residuales, solventes) deben almacenarse en tanques especiales diseñados en previsión de filtraciones y explosiones. Deben fijarse y aplicarse precauciones de seguridad especiales (tomando en consideración, por ejemplo, el riesgo de explosión).

El almacenamiento intermedio en la planta de acondicionamiento sirve para verificar la calidad de los combustibles derivados de desechos después del proceso de preparación. En estas instalaciones normalmente se utilizan contenedores.

El almacenamiento inicial y la preparación de distintos tipos de desechos para usarlos como combustible suele estar a cargo del proveedor o de alguna empresa especializada en el tratamiento de desechos, y se realizan fuera de la planta de cemento. Estas soluciones centralizadas pueden ser ventajosas para los operadores de hornos, cuya responsabilidad consiste en elaborar clinker para la producción de cemento. No obstante, el principio de debida diligencia exige que estos combustibles deberían someterse a medidas de garantía de calidad de la planta que los recibe, lo que significa que sólo las fracciones de desechos separadas y pretratadas deben almacenarse en la planta de cemento y al horno de cemento. En vista de que el suministro de desechos que puedan usarse como combustible tiende a ser variable, y los mercados de material de desecho crecen rápidamente, es aconsejable configurar para fines múltiples las instalaciones de almacenamiento y preparación (Karstensen 2006b). En la Unión Europea se han empezado a tomar medidas (2003) para normalizar los combustibles sólidos reciclados, derivados de desechos no peligrosos.

No puede considerarse como práctica aceptable una mezcla de desechos cuya finalidad sea cumplir ciertos requisitos, pero que, al diluir las concentraciones, tenga como resultado ocultar el impacto ambiental.

4.2.6 Eficiencia de la destrucción

El coprocesamiento de desechos peligrosos sólo puede realizarse si se cumplen ciertos requisitos de control en el ingreso, control en el proceso y control en las emisiones. Uno de estos parámetros en el proceso es el contenido de oxígeno de los gases de escape. La destrucción de desechos orgánicos no sólo exige altas temperaturas y largos tiempos de residencia, sino que también requiere que haya oxígeno suficiente, una correcta introducción en el horno de los compuestos orgánicos destinados a la destrucción, y un mezclado suficiente de los compuestos y el oxígeno. Un buen diseño y funcionamiento son cruciales para usar los hornos de cemento con esta finalidad.

Muchos hornos de cementos co-procesan desechos como actividad comercial (ej., reciben desechos de generadores *ex situ*), en la mayoría de los casos para usarlos como combustible sustituto en la producción de clinker de cemento Portland. Habitualmente, los desechos líquidos se inyectan en el extremo caliente del horno. Los desechos sólidos pueden introducirse en el área de calcinación en algunas instalaciones. Para hornos largos, significa que los desechos sólidos ingresan por la mitad del horno, y para los hornos con precalentamiento/precalcinación se introducen por la tolva de alimentación en la sección de alta temperatura.

En el caso de los desechos peligrosos, debe garantizarse la destrucción completa de los compuestos combustibles tóxicos, como las sustancias orgánicas halogenadas. Los desechos introducidos por el quemador principal serán destruidos en el área de combustión primaria a una temperatura de llama de $>1800^{\circ}\text{C}$. Los desechos introducidos por un quemador, precalentador o precalcinador secundario serán expuestos a temperaturas inferiores, aunque las temperaturas típicas esperadas en el área de combustión del precalcinador son $>1000^{\circ}\text{C}$.

Los compuestos volátiles del material introducido al final del horno rotatorio o como combustible en trozo pueden evaporarse o evolucionar por pirólisis y ser liberados por la chimenea sin combustión, ya que el funcionamiento del horno es contracorriente. Los desechos inyectados por lotes en las zonas medias o finales del horno no experimentan las mismas temperaturas excepcionalmente altas que los desechos líquidos introducidos en el extremo caliente. En algunos casos, los compuestos orgánicos volátiles pueden liberarse de la carga tan rápidamente que no llegan a mezclarse con oxígeno y se encienden antes de enfriarse por debajo de un nivel de temperatura crítico, formando productos de combustión incompleta. Los sensores de CO instalados para controlar el proceso pueden detectar la combustión incompleta y permitir así tomar las medidas correctivas.

Los desechos peligrosos utilizados como combustible por la industria del cemento consisten principalmente en material orgánico, pero también pueden contener cantidades variables de componentes metálicos. Para determinar si un horno de cemento puede o no quemar combustible de desechos peligrosos en forma eficaz, se debe determinar el destino de los componentes orgánicos.

Desde la década de 1970, cuando se consideró por primera vez la posibilidad de quemar desechos en hornos de cemento, se vienen evaluando las emisiones de hornos de cemento para detectar la presencia de sustancias químicas orgánicas durante la combustión de materiales peligrosos. La eficiencia de la destrucción y eliminación de sustancias como cloruro de metileno, tetracloruro de carbono, triclorobenceno, tricloroetano y bifenilo policlorado (PCB) ha sido calculada en un 99.995% y aún más (Karstensen 2006b).

El uso potencial de hornos de cemento para incinerar desechos que contienen PCB ha sido investigado en muchos países. Las eficiencias en la destrucción y eliminación, determinadas a partir de varias incineraciones de prueba, indican que los hornos de cemento bien diseñados y operados son efectivos en la destrucción de PCB. Se exige una eficiencia de destrucción y eliminación de 99.9999% en varias jurisdicciones (ej., la *Toxic Substances Control Act* de los Estados Unidos, las *Federal Mobile PCB Treatment and Destruction Regulations* de Canadá) para la incineración de estos compuestos, porcentaje que puede usarse como criterio indicativo de mejores técnicas disponibles.

5. Productos entrantes y salientes del proceso

5.1 Productos salientes generales

Los principales problemas ambientales asociados con la producción del cemento son las emisiones atmosféricas, el uso de energía, y la contaminación del suelo y aguas subterráneas producida por la manipulación y almacenamiento del polvo de desecho de las operaciones del horno. Las descargas de aguas residuales normalmente se limitan a escurrimientos superficiales y al agua de refrigeración, y por lo general no contribuyen substancialmente a la contaminación del agua.

Los resultados primarios del proceso de producción de cemento son los siguientes:

- Producto: Clinker, que es molido y mezclado con otros ingredientes para producir cemento.
- Gases de combustión: Los volúmenes típicos de los gases de combustión son de 1,700 a 2,500 m³/Mg de clinker (metros cúbicos por tonelada métrica de clinker, condiciones de referencia de 101.3 kPa, 273 K, gas seco) para todos los tipos de horno. Los sistemas de horno de suspensión con precalentamiento y precalcación normalmente generan gases de combustión de 2,000 m³/Mg de clinker (gas seco, 101.3 kPa, 273 K), aproximadamente.
- Polvo de horno de cemento (recolectado por los sistemas de control de contaminación del aire): en los Estados Unidos, aproximadamente el 64% del polvo de hornos de cemento se vuelve a reciclar dentro del horno y el resto, generado en volúmenes aproximados de 40 kg/ton de clinker, se entierra generalmente en rellenos sanitarios (WISE 2002; EPA 2000). Holcim, uno de los mayores productores de cemento a nivel mundial, vendió o envió a rellenos sanitarios 29 kg de polvo de horno de cemento por tonelada en 2001 (Sitio Web de Holcim).

- Reciclar el polvo de hornos de cemento en el horno generalmente provoca un aumento gradual en el contenido de álcalis del polvo generado, lo que puede dañar el revestimiento del horno, producir cemento de menor calidad, aumentar las emisiones de partículas en la chimenea (EPA 1998b), la cantidad de polvo de horno de cemento que debe eliminarse y, por consiguiente, las emisiones atmosféricas producto de su manejo y eliminación (EPA 1998a). En Europa, el polvo de horno de cemento normalmente se devuelve al material de alimentación del horno o se agrega directamente al cemento producido (Lohse and Wulf-Schnabel 1996). La acumulación de álcalis en el sistema del horno puede evitarse eliminando el polvo de horno recolectado o usando un sistema de desvío de álcalis. Para hornos con precalentamiento y precalcación, se realiza a veces mediante un sistema de derivación de álcalis (*bypass*) en la torre de precalentamiento que elimina los álcalis del sistema del horno.
- Gases de escape del *bypass* de álcalis: En instalaciones equipadas con derivación de álcalis, los gases del *bypass* de álcalis pueden liberarse por una chimenea de escape separada o por la chimenea principal del horno. Según la Environmental Protection Agency, de los Estados Unidos, los contaminantes de este flujo de gas son similares a los gases de combustión principales del horno y se precisan equipos similares de reducción y vigilancia de contaminación (EPA 1999). Usualmente se precisa un porcentaje de derivación de álcalis de más de 10% para la eliminación de álcalis (Sutou, Harada and Ueno 2001). Sin embargo, también se ha registrado una tasa de derivación de 30% (Holsiepe, Shenk and Keefe 2001).

5.2 Uso de energía

La industria cementera consume gran cantidad de energía. Este consumo representa habitualmente de 30% a 40% de los costos operativos (ej., sin contar los costos de capital). Una planta de cemento consume de 3,000 a 6,500 MJ de combustible por tonelada de clinker producido. En este amplio rango de demanda de energía se encuentran todos los tipos de hornos de cemento.

El uso teórico de energía para el proceso de combustión (que implica reacciones químicas) es de 1,700 a 1,800 MJ, aproximadamente, por tonelada de clinker. El uso real de energía de combustible para los diferentes sistemas de hornos se encuentra en los siguientes rangos (en MJ por tonelada de clinker)³:

- 3,000–3,800 para procesos secos, hornos con precalentador y precalcador de ciclón multietapas
- 3,100–4,200 para hornos rotatorios de proceso seco equipados con precalentadores de ciclón
- 3,300–4,500 para procesos semisecos/semihúmedos (horno Lepol)
- Hasta 5,000 para hornos largos de proceso seco
- 5,000–6,000 para hornos largos de proceso húmedo
- 3,100 a >6,500 para hornos verticales y cementos especiales

El consumo de electricidad es de aproximadamente 90–130 kWh por tonelada de cemento (European Commission 2001).

Para optimizar el aporte de energía en los sistemas de hornos existentes se puede cambiar su configuración de modo que funcionen como horno corto de proceso seco con precalentamiento y precalcación en varias etapas, lo que normalmente sólo es factible como parte de una modernización de gran envergadura asociada a un aumento de la producción.

Puede disminuirse el uso de energía eléctrica instalando sistemas de gestión energética y usando equipos de bajo consumo de energía, como rodillos de molienda de alta presión para la conminución del clinker y transmisores de velocidad variable para los ventiladores.

Por lo general, la mayoría de sistemas de reducción de emisiones que operan en fin de proceso reducen la eficiencia energética ya que su funcionamiento suele exigir un aumento del uso de energía eléctrica. Algunas de las técnicas de reducción que se describen a continuación tendrán un efecto positivo en el uso energético, optimizando, por ejemplo, el control del proceso.

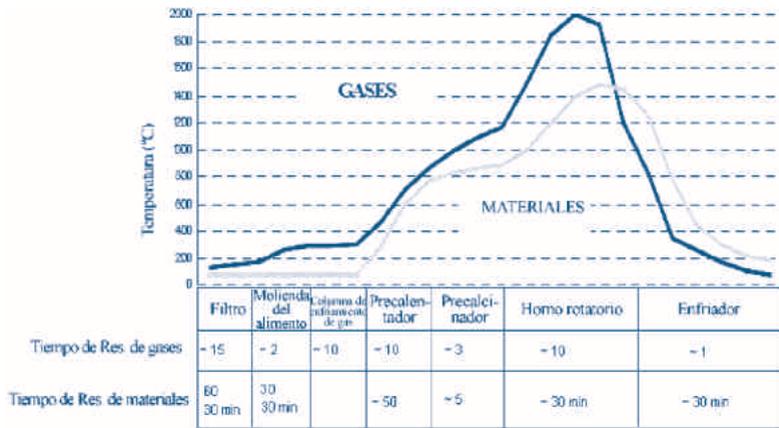
Las estimaciones actuales sugieren que la industria del cemento puede aumentar su eficiencia energética en un porcentaje de 0.5% a 2% al año reemplazando equipos antiguos u obsoletos. Si se reemplazan las viejas unidades de proceso húmedo por plantas nuevas de proceso seco se pueden obtener mejoras significativas en cuanto a eficiencia energética (CSI 2005).

5.3 Emisiones de PCDD/PCDF

5.3.1 Formación de PCDD/PCDF

Cualquier ingreso de cloro en presencia de material orgánico puede generar potencialmente la formación de PCDD y PCDF en procesos térmicos (combustión). Los PCDD/PCDF pueden formarse por el mecanismo de síntesis *de novo* dentro del precalentador o después de él, y dentro del dispositivo de control de contaminación del aire si hay precursores de cloro e hidrocarburo en cantidades suficientes a temperaturas entre los 200°C y los 450°C. En la Figura 3 se presenta un gráfico del perfil de las temperaturas para gases y materiales y sus tiempos de residencia habituales en cada etapa de un horno de clinker con precalentador de ciclón (Fabrellas *et al.* 2004).

■ **Figura 3. Perfil de la temperatura y etapas de tiempos de residencia de un horno de clinker con precalentador y precalcinador de ciclón**



Fuente: Fabrellas et al. 2004

5.3.2 Estudios sobre emisiones atmosféricas de PCDD/PCDF

Se presenta un estudio exhaustivo sobre emisiones de PCDD/PCDF generadas por hornos de cemento en países desarrollados y en vías de desarrollo (Karstensen 2006). Los datos representan más de 2200 mediciones en hornos con y sin combustión de una gran variedad de materiales de desechos, y cubren desde principios de los años noventa hasta la actualidad. La Tabla 1 resume los resultados de las mediciones de PCDD/PCDF. Luego se analizarán algunos ejemplos en más detalle.

■ **Tabla 1. Resumen de los datos de las mediciones de PCDD/PCDF**

País o empresa	¿Uso de combustible y materia prima alternativos?	Concentración de PCDD/PCDF^a en ng EQT-l/m³	Número de mediciones	Factor de emisión µg EQT-l /ton de cemento^a
Australia	Sí	0.001–0.07	55	0.0032–0.216
Alemania 1989–1996	Sí	0.02	>150	
Alemania 2001	Sí	<0.065	106	
Bélgica	Sí	<0.1	23	
Canadá	Sí	0.0054–0.057	30	
Cemex España	Sí	0.0013–0.016	5	
Chile	Sí	0.0030–0.0194	5	
Cimpor España	Sí	0.00039–0.039	8	
Colombia	Sí	0.00023–0.0031	3	
Dinamarca	Sí	<0.0006–0.0027	?	
Egipto	Sí	<0.001	3	
España	Sí	0.00695	89	0.014464
Estados Unidos ^b	Sí	0.004– ~ 50	~ 750	<0.216–16.7
Europa	Sí	<0.001–0.163	230	<0.001–5
Filipinas	Sí	0.0059–0.013	5	
Heidelberg	Sí	0.0003–0.44	>170	
Holcim 2001	Sí	0.0001–0.2395	71	0.104 (clinker)
Holcim 2002	Sí	0.0001–0.292	82	0.073 (clinker)
Holcim 2003	Sí	0.0003–0.169	91	0.058 (clinker)
Japón	Sí	0–0.126	164	
Lafarge	Sí	0.003–0.231	64	
México	Sí	0.0005–0.024	3	
Noruega	Sí	0.02–0.13	>20	0.04–0.40
Polonia	Sí	0.009–0.0819	7	
Portugal		0.0006–0.0009	4	
Reino Unido	Sí	0.012–0.423	14	<0.025–1.2
RMC	Sí	0.0014–0.0688	13	
Siam Cement Co.	Sí	0.0006–0.022	4	
Sudáfrica	(Sí)	0.00053–0.001	2	
Taiheiyo	Sí	0.011	67	
Tailandia	Sí	0.0001–0.018	12	0.00024–0.0045
Uniland		0.002–0.006	2	0.005–0.011
Venezuela	Sí	0.0001–0.007	5	
Vietnam		0.0095–0.014	3	

a. Las cifras corresponden a una escala o al valor medio, y se refieren al 10% u 11% de O₂, según la reglamentación nacional.

b. Las altas cifras de los Estados Unidos corresponden a mediciones obtenidas en los años 1990; el número de mediciones es aproximado.

Fuente: Karstensen 2006b.

En un investigación reciente realizada por Cembureau se presentaron las mediciones de PCDD y PCDF de 110 hornos de cemento en 10 países. El estudio cubría los siguientes países: Alemania, Dinamarca, España, Francia, Hungría, Italia, Noruega, los Países Bajos, el Reino Unido y la República Checa. La concentración promedio, tomando en consideración toda la información de este conjunto de datos, fue de 0.016 ng EQT-/m³. La escala de concentraciones, de la más baja a la más alta fue de <0.001 hasta 0.163 ng EQT-/m³ (Karstensen 2006b). Todas las mediciones se expresaron corregidas en función de condiciones estándar (gas seco, 273 K, 101.3 kPa y 10% de O₂).

La Holcim Cement Company opera hornos de cemento en todo el mundo. Un informe reciente de Holcim arroja valores de PCDD/PCDF promedio para 2001 y 2002 de 0.041 ng EQT/Nm³ (en 71 hornos) y de 0.030 ng EQT/Nm³ (en 82 hornos), respectivamente. De estas mediciones, se realizaron 120 en países pertenecientes a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), y dieron un valor promedio de 0.0307 ng EQT/Nm³; el valor mínimo y el máximo obtenidos fueron de 0.0001 y 0.292 ng EQT/Nm³ respectivamente, con nueve hornos largos de proceso húmedo por encima de 0.1 ng EQT/Nm³. En el caso de las 29 mediciones en países que no pertenecen a la OCDE, el valor promedio fue de 0.0146 ng EQT/Nm³; el valor mínimo y el máximo obtenidos fueron de 0.0002 y 0.074 ng EQT/Nm³ respectivamente, con ninguna medición por encima de 0.1 ng EQT/Nm³ (Karstensen 2006b). En la Tabla 1 se resumen los resultados de las mediciones de PCDD/PCDF.

La experiencia ha demostrado que, con temperaturas relativamente altas en el precipitador electrostático y usando una materia prima con alto contenido orgánico, hay posibilidad de altos niveles de emisiones de sustancias del Anexo C.

En 2004, las emisiones de PCDD/PCDF de un horno largo de proceso seco en el Reino Unido alcanzaron 136 ng EQT/m³, el promedio anual fue de más de 50 ng EQT/m³, y las emisiones totales por encima de 40 g EQT. El horno, actualmente cerrado, funcionaba con temperaturas relativamente altas en el precipitador electrostático y usaba materias primas con un alto contenido orgánico junto con cenizas pulverizadas de combustible de desecho⁴.

Los datos provenientes de varios hornos en los Estados Unidos muestran emisiones de PCDD/PCDF de 1.76 ng EQT-/m³ cuando operan dispositivos para el control de la contaminación del aire en el rango de 200°C - 230°C⁵. Los resultados de pruebas en los Estados Unidos también indicaron mayores emisiones en algunos hornos donde se quemaban desechos peligrosos.

En estudios hechos en los Estados Unidos y Alemania, se estableció una correlación positiva entre la concentración de emisiones de PCDD y la temperatura del precipitador electrostático/chimenea. En las pruebas realizadas en los Estados Unidos, en una planta la temperatura del precipitador electrostático estaba entre 255°C y 400°C. Las emisiones

más altas de PCDD se producían a 400°C, y disminuían a la mitad a 255°C. En general, este comportamiento se observó en todo el conjunto de instalaciones analizadas. Con temperaturas menores a 250°C en el precipitador electrostático/ entrada de la chimenea no había correlación entre temperatura y emisiones de PCDD, lo que concuerda con los mecanismos de formación de PCDD conocidos dentro de sistemas incineradores de desechos urbanos (Karstensen 2006b).

Algunos estudios más detallados han sugerido que, siempre que haya una buena combustión, el principal factor controlador del nivel de sustancias del Anexo C en los gases de chimenea es la temperatura de funcionamiento del dispositivo de recolección de polvo en el sistema de depuración de gases. Las plantas equipadas con precipitadores electrostáticos que operan a temperaturas inferiores (200°C o menos) parecen tener concentraciones de emisiones más bajas, usen o no desechos (UNEP 2003).

El efecto posible de alimentar con distintos desechos el precalentador/precalcinador, que funciona con temperaturas más bajas, fue investigado por Lafarge, y los resultados se presentan en la Tabla 2. Los desechos inyectados a mitad o al final del horno no sufren las altas temperaturas ni los largos tiempos de residencia que experimentan los desechos introducidos en el extremo caliente. El nivel de concentración de PCDD/PCDF observado fue bajo en todas las mediciones (Karstensen 2006b).

■ Tabla 2. Alimentación de desechos al precalentador/precalcinador e influencia en las emisiones de PCDD/PCDF

Planta	Año	Tipo de combustible alternativo	Emisiones de PCDD/PCDF en ng EQT-I/Nm ³
1	2002	Harinas cárnicas, plásticos y textiles	0.0025
2	2002	Harinas cárnicas y aserrín impregnado	0.0033
3	2002	Carbón, plásticos y neumáticos	0.0021 & 0.0041
4	2002	Neumáticos	0.002 & 0.006
5	2002	Coque de petróleo, plástico y aceite residual	0.001
6	2002	Coque de petróleo, cáscara de semilla de girasol y aceite residual	0.012
7	2002	Restos de neumáticos	0.004 & 0.021
8	2002	Solventes	0.07
9	2002	Aserrín impregnado y solventes	0.00003 & 0.00145
10	2002	Solventes	0.00029 & 0.00057
11	2002	Lodos	<0.011
12	2002	Desechos y lodos de automóvil	0.0036 & 0.07 & 0.0032

Los datos registrados indican que los hornos de cemento pueden cumplir con un nivel de emisiones de 0.1 ng EQT-I/Nm³, que corresponde al valor límite establecido en las legislaciones de varios países de Europa occidental para plantas de incineración de desechos peligrosos.

5.3.3 Estudio sobre las liberaciones de PCDD/PCDF a partir de sólidos

Ya que los datos sobre emisiones de chimeneas de hornos de cemento indican que cuando las instalaciones están bien construidas y operadas se pueden lograr concentraciones muy bajas de PCDD/PCDF en gases de combustión, también cabe esperar que estas instalaciones tengan niveles bajos en los polvos de horno de cemento recuperado del sistema de control de contaminación del aire. Los mismos factores que contribuyen a que las emisiones en el escape hacia la atmósfera tengan niveles bajos inciden en las bajas concentraciones en el material sólido recolectado. Los dos materiales sólidos más importantes que genera la producción de cemento son el clinker de

cemento del enfriador y el material pulverulento captado por los dispositivos de control de la contaminación del aire.

Se han reunido nuevos análisis de materiales sólidos de las compañías de cemento que participan en la Iniciativa para la Sostenibilidad del Cemento (CSI) (Karstensen 2006b). En 2005, ocho empresas de la CSI registraron concentraciones de PCDD/PCDF en polvo de clinker de cemento. Noventa muestras arrojaron un valor promedio de 6.7 ng EQT-I/kg, dato aparentemente muy sesgado por unas cuantas muestras cuyos valores eran altos. La mayor concentración registrada fue de 96 ng EQT-I/kg.

En 2005, ocho empresas de la CSI registraron la concentración de PCDD/PCDF en 57 muestras de clinker. El valor promedio de todas las muestras fue de 1.24 ng EQT-I/kg. Las muestras de clinker venían de hornos de proceso húmedo y seco con precalentador de suspensión. La mayor concentración registrada fue de 13 ng EQT-I/kg.

En 2005, dos empresas de la CSI registraron la concentración de PCDD/PCDF en 11 muestras de combustible para horno, consistente en crudo, gránulos, pasta y componentes de materias primas. El valor promedio de estas muestras fue de 1.4 ng EQT-I/kg. Las muestras de alimento para horno provenían de hornos de proceso húmedo y seco con precalentador. La mayor concentración registrada fue de 7.1 ng EQT-I/kg.

5.4 Liberaciones de PCB y HCB

Hasta la fecha, el hexaclorobenceno (HCB) y los PCB no han sido materia de vigilancia regulatoria en plantas de cemento. La mayor parte de las mediciones que se han realizado no han detectado emisiones de HCB. En cuanto a las emisiones de PCB₆, 40 mediciones efectuadas en 13 hornos de Alemania en 2001 arrojaron una concentración máxima de 0.4 µg PCB /Nm³; en nueve de las 40 mediciones no se detectaron PCB. La co-incineración de plaguicidas en Vietnam ha dado emisiones de PCB similares a las dioxinas de 0.001 ng EQT/m³ y emisiones de HCB menores al límite de detección de 31 ng/m³ (Karstensen 2006b).

6. Mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales

En los siguientes párrafos se resumen las mejores técnicas disponibles y las mejores prácticas ambientales para hornos de cemento que incineran desechos peligrosos.

6.1 Medidas generales de gestión

6.1.1 Aspectos jurídicos

Debe existir un marco legislativo y regulador apropiado que asegure la aplicación efectiva y que garantice un alto nivel de protección ambiental.

Además, debería establecerse un régimen de gestión de desechos que refuerce la jerarquía de gestión de desechos que figura en la sección III C (ii) previa o paralelamente a la designación formal de los hornos de cemento como receptores autorizados de

desechos peligrosos, sea como combustibles derivados de desechos o como desechos que se vayan a eliminar. Todas las autoridades correspondientes deben participar en el proceso de expedición de autorizaciones y, a este respecto, entre otras medidas, los operadores de plantas cementeras deberían:

- Establecer y mantener su credibilidad mediante la comunicación abierta, consecuente, receptiva y regular con las autoridades y la ciudadanía
- Proporcionar toda la información necesaria para que las autoridades puedan evaluar la seguridad y los efectos ambientales del procesamiento de desechos peligrosos
- Establecer consejos asesores comunitarios desde el principio del proceso de planificación
- Las directrices de Holcim y de la CSI representan una buena orientación sobre MPA en esta materia.

6.1.2 Aspectos ambientales

La co-incineración de desechos peligrosos sólo debería realizarse si el horno de cemento opera de acuerdo a las mejores técnicas disponibles descritas en estas directrices. Si se cumplen ciertas condiciones en cuanto a calidad y alimentación de los desechos, el co-procesamiento de desechos no cambiará significativamente las emisiones provenientes de la chimenea de un horno de cemento. No obstante, algunos combustibles pueden contener metales con una alta volatilidad, como el mercurio, cuyo coeficiente de captura es bajo. Para controlar las emisiones de mercurio, por lo tanto, puede que sea necesario limitar la entrada de mercurio al sistema del horno. Los combustibles alternativos deben someterse a un riguroso procedimiento de admisión e inspección antes de ser usados.

El monitoreo constante de las emisiones es obligatorio a fin de verificar la conformidad con las leyes, reglamentaciones y acuerdos existentes.

6.1.3 Aspectos operativos

Los operadores deben asegurarse de que sólo se aceptarán desechos peligrosos generados por entidades dignas de confianza, y deben aquilatar la integridad de todos los participantes en la cadena de abastecimiento. Debe garantizarse la trazabilidad de los desechos antes de su recepción en la planta, y si son inadmisibles, serán rechazados.

El transporte, manipulación y almacenamiento de materias primas debe vigilarse de forma efectiva, y debe garantizarse la observancia plena de todos los requisitos reglamentarios, lo que implica el análisis y registro de parámetros como el poder calorífico, contenido de agua, contenido de metales pesados, de cenizas, azufre y cloro. Asimismo, las muestras retenidas deberían conservarse durante cierto tiempo.

6.1.4 Aspectos de salud y seguridad

Debe evaluarse la idoneidad del lugar de producción para evitar riesgos asociados a la ubicación (proximidad de lugares habitados, efecto potencial de las emisiones, logística, transporte) e infraestructura (posibles emisiones de vapores y olores o eventuales

filtraciones de desechos peligrosos u otras sustancias perjudiciales en el entorno que requieran control mediante la aplicación de soluciones técnicas).

Es obligatorio contar con la documentación y la información pertinente acerca de cómo deben manejarse los combustibles derivados de desechos en condiciones de seguridad, y sobre medidas de emergencia y contingencia. La gerencia de la planta debe procurar que los empleados estén debidamente informados, abiertamente y con transparencia, sobre las medidas y normas de salud y seguridad. Es esencial que los empleados, las autoridades reguladoras y los servicios locales de emergencia (ej., bomberos) tengan esta información con mucha anticipación, antes de que comiencen las operaciones de combustión de desechos, incluidos los desechos peligrosos, en una planta cementera.

6.1.5 Comunicación y responsabilidad social

Por razones de transparencia y claridad, el operador de un horno de cemento que prevea el manejo y la co-incineración de desechos, incluidos los desechos peligrosos o combustibles derivados de desechos, debe proporcionar toda la información necesaria para que los interesados comprendan la finalidad del uso de desechos peligrosos en el horno de cemento, y para darles a conocer las medidas que se aplicarán para evitar efectos adversos en la población y el medio ambiente, las funciones de las partes implicadas y los procedimientos de toma de decisiones. En resumen, deberían tomarse en consideración los siguientes aspectos generales de gestión:

- Infraestructura general, pavimentación, ventilación
- Buena gestión interna del sitio y las instalaciones
- Control y monitoreo general de los parámetros básicos de desempeño
- Control y reducción de las emisiones atmosféricas (NO_x , SO_2 , partículas, metales)
- Establecer una vigilancia ambiental continua (crear protocolos de monitoreo normalizados)
- Establecer sistemas de auditoría y registro
- Aplicación de sistemas de autorización y auditoría específicos para uso de desechos y combustibles alternativos
- Demostración, mediante la vigilancia de emisiones, de que la planta puede atenerse a un límite de emisiones determinado
- Precauciones de salud y seguridad laborales: Los hornos de cemento que incineran desechos y combustibles alternativos deben contar con prácticas apropiadas para proteger a los trabajadores que manipulan esos materiales durante el proceso de alimentación de los hornos
- Profesionalización y capacitación suficiente del personal

6.2 Medidas específicas

Para plantas nuevas y en caso de modernizaciones importantes, se consideran mejores técnicas disponibles para la producción de clinker de cemento los hornos de proceso

seco con precalentador y precalcinador de varias etapas. Para instalaciones existentes, pueden requerirse diversos grados de reconstrucción.⁶

6.2.1 Medidas principales y optimización del proceso

6.2.1.1 Optimización del proceso

- Asegurarse de que la temperatura de los gases de combustión baje rápidamente a menos de 200°C.
- Caracterizar los parámetros que correspondan a un funcionamiento adecuado y usarlos como base para mejorar otros aspectos del desempeño operativo. Una vez caracterizados los parámetros adecuados para el funcionamiento del horno, establecer datos de referencia agregando dosis controladas de desechos, evaluar los cambios, y determinar los controles y prácticas necesarias para controlar las emisiones.
- Gestionar el proceso de cocción para alcanzar y mantener condiciones estables de operación, es decir, controlar el proceso de la mejor manera (incluso mediante sistemas informatizados de control automático), usando sistemas de alimentación de combustibles sólidos modernos gravimétricos.
- Disminuir el gasto energético mediante el uso de precalentadores y precalcinadores en la medida de lo posible, según la configuración del sistema de horno existente, y mediante el uso de enfriadores de clinker modernos, con lo que se puede lograr un máximo de recuperación energética de los gases de combustión.

Control de las sustancias del Anexo C: Las medidas indirectas para controlar las sustancias del Anexo C son un elemento importante en una estrategia integral para el control de emisiones. Por lo general, estas medidas son aplicables y relativamente fáciles de aplicar en términos técnicos.

6.2.1.2 Preparación de desechos peligrosos

El pretratamiento de desechos, incluidos los desechos peligrosos, con la finalidad de obtener un crudo más homogéneo y, por lo tanto, condiciones de combustión más estables, puede, según la naturaleza del combustible derivado de desechos, implicar el secado, trituración, mezcla o molienda (véase también la sección 3.4). Es importante vigilar cuidadosamente los siguientes aspectos:

- Mantenimiento, gestión interna, y procedimientos adecuados para la recepción, manipulación y almacenamiento sin riesgos de los desechos a medida que ingresan al sitio. Instalaciones transitorias de almacenamiento bien diseñadas, tomando en consideración los peligros y características de cada tipo de desecho.
- Mantenimiento, gestión interna y procedimientos operativos adecuados. Instalaciones de almacenamiento bien diseñadas para los combustibles alternativos.

Estas medidas no son necesariamente exclusivas del control de las sustancias que deben eliminarse y reducirse según el Anexo C, pero son elementos esenciales de una estrategia integral para el control de emisiones.

6.2.1.3 Controles de entrada

- Es preciso un suministro regular y a largo plazo de un determinado tipo de desecho o combustible alternativo (ej., un suministro de un mes o más) para mantener condiciones estables durante el funcionamiento.
- Las sustancias que ingresan al horno deberían seleccionarse y controlarse cuidadosamente, deberían establecerse las especificaciones teniendo presente los factores producto/proceso o las emisiones, y deberían ser monitoreadas.
- Suministro continuo de combustibles alternativos con especificaciones de metales pesados, cloro y azufre.
- Nunca debería usarse combustible derivado de desechos durante el encendido y apagado.
- Debería evitarse la introducción de mezcla cruda que contenga desechos con compuestos orgánicos que pudieran actuar como precursores.
- Los desechos halogenados deberían alimentarse por el quemador principal.
- En general, los desechos debería alimentarse por el quemador principal o el quemador secundario en el caso de hornos con precalentador/precalcinador. En el caso del quemador secundario debería asegurarse que se mantenga una temperatura del área de combustión de $>850^{\circ}\text{C}$ durante un tiempo de residencia suficiente (2 s).
- No deberían alimentarse como parte de la mezcla cruda los desechos que contengan compuestos orgánicos que pudieran actuar como precursores.

Control de las sustancias del Anexo C: Las medidas indirectas para controlar estas sustancias son un elemento importante para una estrategia de control integral de emisiones. Estas medidas son generalmente aplicables y no suelen implicar dificultades técnicas.

6.2.1.4 Estabilización de los parámetros del proceso

Es importante para la estabilidad de la combustión y el proceso asegurarse de los siguientes aspectos:

- Uniformidad en las características del combustible (tanto alternativo como fósil).
- Uniformidad en el suministro de combustible o frecuencia de la introducción de materiales cargados por lotes.
- Suministro del exceso de oxígeno necesario para lograr una buena combustión.

- Vigilancia constante de las concentraciones de CO en los gases de combustión, es especial que no rebasen los niveles preestablecidos que son indicativos de malas condiciones de combustión.

Control de las sustancias del Anexo C: Las medidas indirectas para controlar estas sustancias son un elemento importante para una estrategia integral de control de emisiones. Estas medidas son generalmente aplicables y ayudan a garantizar condiciones de funcionamiento estables.

6.2.1.5 Modificación del proceso

El polvo de gas emitido (también conocido como polvo de horno de cemento) deber ser manipulado cuidadosamente. En muchos casos puede volver a introducirse en el horno siempre que resulte viable y para evitar emisiones excesivas de metales volátiles y sales de álcalis. Cuando este flujo reciclado pueda aprovecharse al máximo reducirá la problemática de la eliminación del polvo. El polvo que no pueda reciclarse debe ser manipulado en condiciones de seguridad verificadas. Según el nivel de contaminantes peligrosos (ej., metales pesados, contaminantes orgánicos persistentes), este material puede, en algunos casos, considerarse desecho peligroso, en cuyo caso deberá someterse a las correspondientes precauciones especiales de manipulación y eliminación.

Control de las sustancias del Anexo C: Las medidas indirectas para controlar estas sustancias son un elemento importante de una estrategia integral de control de emisiones.

6.2.1.6 Resumen de medidas principales

En general, las medidas principales que se mencionaron anteriormente son suficientes para lograr un nivel de emisiones por debajo de 0.1 ng EQT-I/Nm³ en gases de combustión para plantas nuevas y existentes. Cuando con todas estas opciones no se logra llegar a 0.1 ng EQT-I/Nm³, se pueden prever medidas secundarias, que se describen a continuación.

6.2.2 Medidas secundarias

Las medidas secundarias que se explican a continuación normalmente se emplean para controlar contaminantes, fuera de los contaminantes orgánicos persistentes que se forman involuntariamente, pero también pueden ayudar a la reducción simultánea de las sustancias del Anexo C.

6.2.2.1 Otras mejoras para la reducción y recirculación de polvo

Con estas medidas no se reducirán de los niveles de las sustancias del Anexo C que se encuentren en la fase gaseosa en el escape. Por lo tanto, la efectividad de esta estrategia disminuirá generalmente con el aumento de la temperatura del sistema de recolección de partículas. Pasar de un sistema de no reintroducción del polvo de horno a un sistema de recirculación completa cambiará su composición química con el tiempo, aumentando el contenido de álcali y generando dificultades de operación; una cierta fracción del polvo recolectado debe eliminarse y cuando existen altas tasas de recirculación es

probable que el polvo se enriquezca con metales pesados semivolátiles y volátiles, lo que exigirá procedimientos de manejo cuidadosos y la eliminación libre de riesgos en instalaciones designadas para tratar o contener desechos peligrosos. Aplicabilidad general: requisitos moderados de construcción técnica, buena captación de las fracciones de sustancias del Anexo C ligadas a partículas.

Los hornos rotatorios están por lo general equipados con precipitadores electrostáticos, debido a las temperaturas relativamente altas de los gases de combustión. También se usan filtros de tela, en particular en hornos con precalentador, donde las temperaturas de los gases de combustión son menores.

Los hornos verticales normalmente vienen equipados con filtros de tela. A veces se utilizan depuradores húmedos. Las plantas de molienda de cal utilizan filtros de tela para recolectar el producto y despolvar el aire de transporte. Las plantas de hidratación, con gases de combustión saturados de agua a 90°C aproximadamente, están equipadas por lo general con depuradores húmedos, aunque los filtros de tela se usan cada vez más cuando la cal de la alimentación tiene una alta reactividad.

Según información de la Unión Europea (European Commission 2001), el material particulado de fuentes puntuales puede eliminarse efectivamente con la aplicación de estos métodos:

- Precipitadores electrostáticos con equipos de medición y control rápidos para disminuir la cantidad de picos de CO
- Filtros de tela con compartimentos múltiples y detectores de roturas

El nivel de emisiones asociado con estas mejores técnicas disponibles es de 20–30 mg polvo/m³ en un día promedio. Este nivel de emisiones puede lograrse con precipitadores electrostáticos o filtros de tela en los distintos tipos de plantas de la industria cementera.

6.2.2.2 Inyección de carbón activado

Cuando se utilizan filtros de tela para controlar las partículas, se puede inyectar carbón activado en polvo antes del filtro de tela y lograr una eliminación muy satisfactoria los metales y compuestos orgánicos. Los contaminantes se recolectan por adsorción en la superficie de carbón a medida que se dispersa en el flujo de escape y a medida que el escape pasa a través de la torta de filtro que se forma dentro de las bolsas de los filtros. Es esencial una temperatura de operación baja para la aplicación satisfactoria de esta técnica, ya que a temperaturas del rango de síntesis *de novo* (250°C – 400°C) el carbón activado podría servir como fuente de carbono para la formación de PCDD/PCDF. Además, el carbón activado funciona mejor en metales adsorbentes y PCDD/PCDF a temperaturas por debajo de 200°C. Al mismo tiempo, la temperatura debe mantenerse por encima del punto de rocío para los gases de combustión a fin de evitar la condensación y la obstrucción de las bolsas. Por lo general se utiliza una temperatura de operación de 160°C aproximadamente, aunque con un monitoreo a cuidadoso pueden lograrse valores algo menores. Por lo general, el control de temperatura se realiza por enfriamiento evaporativo, y habitualmente el carbón se inyecta en el enfriador evaporativo o inmediatamente después. Hay que señalar que si se va a reciclar el polvo en el horno, esta técnica puede no tener una gran eficacia para el control de

emisiones de mercurio, ya que el mercurio captado será liberado en el horno, y puede que la corriente de purga de polvo del horno de cemento para eliminación tenga que ser una fracción grande del total para que se pueda lograr un control efectivo.

Esta técnica tiene una aplicabilidad general para el control de las sustancias del Anexo C, con una perspectiva de captura muy buena (>90%) cuando las temperaturas de operación están debidamente optimizadas. Los requisitos de construcción técnica son de bajos a moderados, y es más adecuada para casos de modernización que las dos opciones siguientes.

6.2.2.3 Filtro de carbón activado

Esta medida es de gran eficiencia para la eliminación de ciertos contaminantes (>90% en general; >99% para algunos compuestos). Contaminantes como el dióxido de azufre (SO₂), compuestos orgánicos, metales, amoníaco (NH₃), compuestos de amonio (NH₄⁺), cloruro de hidrógeno (HCl), fluoruro de hidrógeno (HF) y polvo residual (después de un precipitador electrostático o filtro de tela) pueden eliminarse de los gases de escape que han sido tratados en un lecho de carbón activado. El único filtro de carbón activado en una fábrica de cemento europea se encuentra en Siggenthal, Suiza. El horno de Siggenthal es un horno de ciclón con precalentador de cuatro etapas con una capacidad de 2,000 toneladas de clinker al día. Las mediciones arrojan altas eficiencias en la eliminación de SO₂, metales y PCDD/PCDF (European Commission 2001).

Control de las sustancias del Anexo C: Aplicabilidad general; construcción técnica compleja.

6.2.2.4 Reducción catalítica selectiva

En general, se utilizan instalaciones de reducción catalítica selectiva para el control de NO_x. El proceso reduce el NO y NO₂ a N₂ utilizando NH₃ como agente reductor en presencia de un catalizador apropiado a una temperatura del orden de 300°C a 400°C, lo que requeriría calentar los gases de escape de un horno de cemento habitual. Sólo una parte de los catalizadores capaces de reducir los óxidos de nitrógeno sirve también para la destrucción de los contaminantes del Anexo C como los PCDD/PCDF. Hasta la fecha, la reducción catalítica selectiva para el control de NO_x sólo se ha probado en sistemas de horno con precalentador y procesos semisecos (Lepol), pero puede ser aplicable también a otros sistemas de hornos (European Commission 2001). Sus costos de capital relativamente altos, además de los fuertes costos de energía por el recalentamiento de los gases de escape necesario para su uso, hacen de ésta una solución probablemente poco rentable para aplicación general. La primera planta a gran escala (Solnhofer Zementwerke) ha estado funcionando desde fines de 1999 (IPTS 2004).

Control de las sustancias del Anexo C: construcción técnica compleja y costos de capital/operación elevados; se espera un excelente control de las sustancias del Anexo C gracias a catalizadores seleccionados apropiadamente.

6.2.2.5 La inyección de carbón activado, una tecnología incipiente

Se puede inyectar carbón activado en polvo antes del filtro recolector, con lo que se puede lograr la eliminación eficiente de metales y compuestos orgánicos. No obstante, cabe hacer las siguientes observaciones:

- Una temperatura de funcionamiento de menos de 160°C es esencial para la aplicación satisfactoria de esta técnica.
- Al mismo tiempo, la temperatura debe mantenerse por encima del punto de rocío ácido para evitar condensación o corrosión.
- Si se va a reciclar el polvo del horno de cemento en el horno, como suele suceder, esta técnica no será efectiva para el control de emisiones de mercurio, ya que el mercurio recolectado volverá a liberarse dentro del horno.
- No se ha demostrado que esta tecnología de inyección de carbón sirva para el control de emisiones de PCDD/PCDF de hornos de cemento y sólo se ha aplicado en incineradores de desechos urbanos.

7. Niveles de desempeño basados en mejores técnicas disponibles

Los niveles de desempeño basados en mejores técnicas disponibles para el control de PCDD/PCDF en gases de combustión deberían ser de <0.1 ng EQT-I/Nm³ en condiciones de referencia de 273 K, 101.3 kPa, 11% de O₂ y gas seco.

8. Monitoreo de emisiones contaminantes y parámetros de operación

Para controlar el proceso del horno, se recomienda realizar mediciones de los siguientes parámetros en forma continua (European Commission 2001):

- Presión
- Temperatura
- Contenido de O₂
- NO_x
- CO, y posiblemente cuando la concentración de SO_x sea alta
- SO₂ (se está preparando una técnica para optimizar el CO con NO_x y SO₂)

Además de estos parámetros debería asegurarse el control del mercurio (si el contenido de mercurio en los desechos es alto).

Para cuantificar con exactitud las emisiones, las mediciones continuas constituyen una mejor técnica disponible para los siguientes parámetros (que deberían volver a medirse si sus niveles son susceptibles a cambiar después del momento en que se midieron con fines de control):

- Volumen de emanaciones (se puede calcular pero el proceso es considerado complicado por algunos)
- Humedad
- Temperatura en la entrada del dispositivo de control para material particulado
- Polvo/material particulado
- O₂
- NO_x
- Polvo
- SO₂
- CO

La vigilancia periódica regular constituye una mejor técnica disponible para las siguientes sustancias:

- Metales y sus compuestos
- Carbono orgánico total/compuestos orgánicos
- HCl, HF
- NH₃
- PCDD/PCDF

Ocasionalmente, y en determinadas condiciones de funcionamiento, pueden requerirse estas mediciones:

- Eficiencia de la destrucción y eliminación, en el caso de la destrucción de contaminantes orgánicos persistentes en hornos de cemento
- Benceno, tolueno, xileno
- Hidrocarburos aromáticos policíclicos
- Otros contaminantes orgánicos (compuestos orgánicos peligrosos principales, ej., clorobenzenos, PCB, incluidos los congéneres coplanares, cloronaftalenos)

Es de especial importancia realizar mediciones de metales cuando se usen desechos con un alto contenido de metal como materias primas o combustibles.

Referencias

- Basel Convention Secretariat. 2005. *General Technical Guidelines for the Environmentally Sound Management of Wastes Consisting of, Containing or Contaminated with Persistent Organic Pollutants (POPs)*. Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and Their Disposal, UNEP, Geneva.
- Cembureau. 2004. *Guidelines on Co-Processing of Waste Materials in Cement Production*. Cembureau, Brussels, Belgium.
- CEN (European Committee for Standardization). 1996a. "EN 1948-1: Sampling." Part 1 of *Stationary Source Emissions: Determination of the Mass Concentration of PCDDs/PCDFs*. CEN, Brussels, Belgium.
- CEN (European Committee for Standardization). 1996b. "EN 1948-2: Extraction and Clean-up." Part 2 of *Stationary Source Emissions: Determination of the Mass Concentration of PCDDs/PCDFs*. CEN, Brussels, Belgium.
- CEN (European Committee for Standardization). 1996c. "EN 1948-3: Identification and Quantification." Part 3 of *Stationary Source Emissions: Determination of the Mass Concentration of PCDDs/PCDFs*. CEN, Brussels, Belgium.
- CSI (Cement Sustainability Initiative). 2005. *Guidelines for the Selection and Use of Fuels and Raw Materials in the Cement Manufacturing Process: Fuels and Raw Materials*. World Business Council for Sustainable Development, Geneva, Switzerland.
- de Bas P. 2002. *The Economics of Measurement of Emissions into the Air*. European Measurement Project. Pembroke College, Oxford, UK.
- DFIU/IFARE (French-German Institute for Environmental Research). 2002. *Cement/Lime Industry*. Draft Background Document in preparation for 5th EGTEI Panel Meeting, 29 November 2002. www.citepa.org/forums/egtei/cement_lime_draft.pdf.
- EPA (United States Environmental Protection Agency). 1998a. *Technical Background Document on Control of Fugitive Dust at Cement Manufacturing Facilities*. Draft. EPA, Office of Solid Waste, Washington, D.C.
- EPA (United States Environmental Protection Agency). 1998b. *Technical Background Document on Ground Water Controls at CKD Landfills*. Draft. EPA, Office of Solid Waste, Washington, D.C.
- EPA (United States Environmental Protection Agency). 1999. *National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants for Source Categories: Portland Cement Manufacturing Industry: Final Rule*. 40 CFR part 63, 14 June 1999. EPA, Washington, D.C.
- EPA (United States Environmental Protection Agency). 2000. "Combustion Sources of CDD/CDF: Other High Temperature Sources." Chapter 5, *Exposure and Human Health Reassessment of 2,3,7,8-Tetrachlorodibenzo-p-dioxin (TCDD) and Related Compounds, Part I: Estimating Exposure to Dioxin-Like Compounds*. EPA/600/P-00/001Bb. EPA, Washington, D.C., September 2000.
- European Commission. 2001. *Reference Document on the Best Available Techniques in the Cement and Lime Manufacturing Industries*. BAT Reference Document (BREF). European IPPC Bureau, Seville, Spain.
- Fabrellas B., Larrazabal D., Martínez M.A., Sanz P., Ruizl M.L., Abad E. and Rivera J. 2004. "Global Assessment of PCDD/PCDF Emissions from the Spanish Cement Sector: Effect of Conventional/Alternative Fuels." *Organohalogen Compd.* 66:905-911.
- Holcim. *Sustainable Development: Environmental Performance*. www.holcim.com.

Holsiepe D., Shenk R. and Keefe B. 2001. *Partners in Progress: A Case Study on Upgrading for the New Millennium, Part 1*. Cement Americas.
cementtour.cementamericas.com/ar/cement_partners_progress_case_2/.

IPTS (Institute for Prospective Technological Studies). 2004. *Promoting Environmental Technologies: Sectoral Analyses, Barriers and Measures*. Draft Report EUR 21002 EN, European Communities.

Karstensen K.H. 2006a. *Cement Production in Vertical Shaft Kilns in China: Status and Opportunities for Improvement*. Report to the United Nations Industrial Development Organization, 31 January 2006.

Karstensen K.H. 2006b. *Formation and Release of POPs in the Cement Industry*. Second edition, January 2006. World Business Council for Sustainable Development/SINTEF.

Lohse J. and Wulf-Schnabel J. 1996. *Expertise on the Environmental Risks Associated with the Co-Incineration of Wastes in the Cement Kiln "Four E" of CBR Usine de Lixhe, Belgium*. Okopol, Hamburg, Germany. www.oekopol.de/Archiv/Anlagen/CBRBelgien.htm.

Portland Cement Association. *Industry Overview*. www.cement.org/basics/cementindustry.asp.

Sutou K., Harada H. and Ueno N. 2001. *Chlorine Bypass System for Stable Kiln Operation and Recycling of Waste*. Technical Conference on Cement Process Engineering, 21st Plenary Session of the VDZ Process Engineering Committee, Düsseldorf, Germany, 22 February 2001.

UNEP (United Nations Environment Programme). 2003. *Standardized Toolkit for Identification and Quantification of Dioxin and Furan Releases*. UNEP, Geneva.
www.pops.int/documents/guidance/Toolkit_2003.pdf.

WISE (Waste Indicator System for the Environment). 2002. *Volume of Cement Kiln Dust Produced and Reused*. Indicators: Environmental Issue 1, Waste Generation.
www.pepps.fsu.edu/WISE/.

Wulf-Schnabel J. and Lohse J. 1999. *Economic Evaluation of Dust Abatement in the European Cement Industry*. Report prepared for the European Commission DG XI, Contract No. B4-3040/98/000725/MAR/E1. www.oekopol.de/en/Archiv/archiv.htm.

Otras fuentes

Environment Canada. 1999. *Level of Quantification Determination: PCDD/PCDF and Hexachlorobenzene*. Environment Canada, Environmental Technology Centre, Analysis and Air Quality Division. www.ec.gc.ca/envhome.html.

Holcim. 2004. *Guidelines on Co-Processing of Waste Material in Cement Production*. Version 6. Cooperation of Holcim and GTZ, December 2004.

Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen. 1997. *Identification of Relevant Industrial Sources of Dioxins and Furans in Europe*. Commissioned by EC DG XI, LUA-Materialien No. 43. European Dioxin Inventory.

Marlowe I. and Mansfield D. 2002. *Toward a Sustainable Cement Industry*. Substudy 10: Environment, Health and Safety Performance Improvement. AEA Technology.
www.wbcscement.org/.

Stieglitz L., Jay K., Hell K., Wilhelm J., Polzer J. and Buekens A. 2003. *Investigation of the Formation of Polychlorodibenzodioxins/Furans and of Other Organochlorine Compounds in Thermal Industrial Processes*. Scientific Report FZKA 6867. Forschungszentrum Karlsruhe.

- ¹ Comunicación de CEMBUREAU (2006).
- ² Este Documento de referencia se encuentra actualmente (2006) en revisión.
- ³ Comunicación del CEMBUREAU a *Cement & Lime BREF Revision Energy Efficiency*, 15 de mayo de 2006
- ⁴ Comunicación de IPEN
- ⁵ 1 ng (nanogramo) = 1×10^{-12} kilogramo (1×10^{-9} gramo); Nm³ = metro cúbico normal, volumen de gas seco medido a 0°C y 101.3 kPa. Para información sobre las mediciones de toxicidad véase la sección I.C, subsección 3, de las presentes directrices.
- ⁶ El proceso seco sólo es apropiado si se usa piedra caliza como materia prima de alimentación. Se puede utilizar la tecnología de precalentador/precalcinador para procesar el yeso, secando la lechada de yeso en una secadora instantánea en el extremo frontal del proceso.

