



CONVENIO DE BASILEA

Distr.: General  
11 de noviembre de 2011Español  
Original: Inglés

---

**Conferencia de las Partes en el Convenio de Basilea  
sobre el control de los movimientos transfronterizos  
de los desechos peligrosos y su eliminación  
Décima reunión**

Cartagena (Colombia), 17 a 21 de octubre de 2011  
Tema 3 b) i) del programa provisional\*

**Cuestiones relacionadas con la aplicación del Convenio:  
asuntos científicos y técnicos: directrices técnicas**

## **Directrices técnicas**

### **Nota de la Secretaría**

#### **Adición**

## **Directrices técnicas sobre el coprocesamiento ambientalmente racional de los desechos peligrosos en hornos de cemento**

En su décima reunión, la Conferencia de las Partes aprobó, en su forma enmendada, las directrices técnicas sobre el coprocesamiento de los desechos peligrosos en hornos de cemento sobre la base del proyecto que figuraba en el documento UNEP/CHW.10/6/Add.3, que fue preparado por el Gobierno de Chile. El texto de la versión definitiva de las directrices técnicas se reproduce en el anexo del presente documento.

---

\* UNEP/CHW.10/1.

**Anexo****Directrices técnicas sobre el coprocesamiento ambientalmente racional de los desechos peligrosos en hornos de cemento**

Versión definitiva revisada (31 de octubre de 2011)

## Índice

I.	Introducción .....	10
A.	Ámbito .....	10
B.	Aspectos generales de la fabricación de cemento .....	10
C.	Coprocesamiento de los desechos peligrosos en hornos de cemento .....	11
II.	Disposiciones pertinentes del Convenio de Basilea y vínculos internacionales .....	14
A.	Disposiciones generales del Convenio de Basilea .....	14
B.	Consideraciones generales sobre la gestión ambientalmente racional .....	14
1.	Convenio de Basilea .....	15
2.	Convenio de Estocolmo .....	16
3.	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos .....	16
III.	Directrices generales sobre el coprocesamiento ambientalmente racional en hornos de cemento .....	16
A.	Principios del coprocesamiento en la fabricación de cemento .....	16
B.	Consideraciones a tener en cuenta en la selección de desechos para su coprocesamiento .....	18
1.	Desechos peligrosos adecuados para su coprocesamiento en hornos de cemento .....	18
2.	Recuperación o eliminación de desechos distinta de la recuperación en hornos de cemento .....	21
3.	Eficiencia de la destrucción de sustancias orgánicas peligrosas .....	24
C.	Garantía de calidad / control de calidad .....	25
D.	Aspectos de salud y seguridad .....	26
1.	Análisis de riesgos .....	26
2.	Control de acceso y control de riesgo .....	26
3.	Equipo de protección personal .....	27
4.	Formación .....	27
5.	Vigilancia médica .....	27
6.	Respuesta de emergencia .....	27
E.	Comunicaciones e implicación de los interesados .....	28
IV.	Aceptación y preprocesamiento ambientalmente racional de los desechos .....	29
A.	Introducción .....	29
B.	Aceptación de los desechos .....	29
1.	Preaceptación .....	29
2.	Aceptación in situ .....	30
3.	Desechos no conformes .....	32
4.	Sistema de seguimiento en planta .....	33
C.	Almacenamiento y manejo de los desechos .....	34
1.	Consideraciones sobre el diseño .....	34
2.	Consideraciones sobre el funcionamiento .....	35
D.	Preprocesamiento de los desechos .....	36
1.	Consideraciones sobre el diseño .....	36
2.	Consideraciones sobre el funcionamiento .....	36
E.	Cierre o desmantelamiento de la planta de preprocesamiento .....	37
F.	Otros aspectos ambientales .....	37
1.	Compuestos orgánicos volátiles, olores y polvo .....	37
2.	Bidones y metales ferrosos .....	38
3.	Aguas residuales .....	38
G.	Supervisión y notificación de emisiones .....	38
V.	Coprocesamiento ambientalmente racional de desechos peligrosos en hornos de cemento .....	39
A.	Introducción .....	39
B.	Requisitos operativos .....	39
1.	Selección del punto de alimentación .....	39
2.	Control del funcionamiento del horno .....	41
C.	Aspectos ambientales .....	42
1.	Emisiones a la atmósfera .....	42
2.	Polvo de horno de cemento y polvo desviado .....	43
3.	Emisiones al agua .....	44

4.	Control del producto final.....	44
D.	Supervisión .....	46
1.	Supervisión del proceso.....	46
2.	Supervisión de las emisiones .....	46
3.	Supervisión ambiental .....	47
4.	Requisitos para la presentación de informes.....	47
VI.	Referencias.....	48
<b>Anexos</b>		
Anexo I: Recopilación de los resultados de verificaciones de rendimiento y ensayos de combustión en hornos de cemento (Dr. Kare Helge Karstensen, comunicación personal, 6 de noviembre de 2009) .....		
		53
Anexo II: Fuentes de emisiones a la atmósfera .....		
		57

## Glosario

**Agregados:** Partículas utilizadas en construcción como arena, grava, cantos triturados y abrasivo de escoria.

**Análisis de emisiones:** Recogida manual de muestras gaseosas de la chimenea, seguida del análisis químico para determinar concentraciones de sustancias contaminantes.

**Auditoría:** Evaluación sistemática e independiente de resultados comparándolos con los objetivos.

**Calcinación:** Eliminación o pérdida, inducida por calor, de compuestos volátiles diferentes del agua, unidos químicamente. En la fabricación de cemento se trata de la descomposición térmica de la calcita (carbonato de calcio) y otros minerales carbonatados, que genera un óxido metálico (principalmente CaO) y dióxido de carbono.

**Cemento:** Material inorgánico finamente triturado que, al mezclarse con agua, forma una pasta que fragua y se endurece mediante procesos y reacciones de hidratación y que, después de endurecerse, retiene su dureza y su estabilidad bajo el agua.

**Cemento hidráulico:** Tipo de cemento que fragua y se endurece por interacción química con el agua y que tiene la capacidad de hacerlo bajo el agua.

**Cemento Portland:** Cemento hidráulico producido por pulverización de clínker de cemento Portland y que normalmente contiene sulfato de calcio.

**Clínker de cemento Portland:** Material hidráulico cuya masa está formada, como mínimo, por dos terceras partes de silicatos de calcio ((CaO)<sub>3</sub>·SiO<sub>2</sub> y (CaO)<sub>2</sub>·SiO<sub>2</sub>) y el resto contiene óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), óxido de hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y otros óxidos.

**Clinkerización:** Formación termoquímica de minerales de clínker, especialmente aquellas reacciones que se producen por encima de 1.300°C; también, zona del horno donde ocurre este proceso. Se conoce también como sinterización o calcinación.

**Combustibles y materias primas alternativos:** Material para la producción de clínker derivado de corrientes de desechos que aportan energía o materias primas.

**Combustibles alternativos:** Desechos con valor en energía renovable que se utilizan en un horno de cemento y sustituyen una parte de los combustibles fósiles convencionales como el carbón. Otros términos utilizados son combustibles secundarios, de sustitución o derivados de desechos.

**Combustibles convencionales (fósiles):** Combustibles carbonados no renovables, incluyendo el carbón y el fuelóleo, utilizados tradicionalmente en la fabricación del cemento.

**Comparabilidad:** Término cualitativo que expresa el grado de confianza con que dos grupos de datos pueden compararse y combinarse entre sí para adoptar una o varias decisiones.

**Conducto de derivación de álcalis:** Conducto situado entre la tolva de alimentación del horno y la torre de precalentamiento. Una parte de los gases de escape del horno se hace circular por él y es enfriado rápidamente con aire o agua para evitar que se acumule un exceso de álcali, cloruro o azufre en la entrada de materias primas. También se denomina conducto de derivación de gases de escape.

**Control de calidad:** Sistema global de técnicas operativas y actividades que cumplen los requisitos de calidad.

**Desechos:** Sustancias u objetos eliminados, que se pretende eliminar o que se debe eliminar en virtud de lo estipulado en la legislación nacional.

**Desechos peligrosos:** Desechos que pertenecen a cualquier categoría contenida en el anexo I del Convenio de Basilea ("Categorías de desechos que hay que controlar"), a menos que no posean ninguna de las características recogidas en el anexo III del Convenio ("Listado de características peligrosas"): explosivos; líquidos inflamables; sólidos inflamables; sustancias o desechos susceptibles de combustión espontánea; sustancias o desechos que, en contacto con el agua, emiten gases inflamables; oxidantes; peróxidos orgánicos; venenos (agudos); sustancias infecciosas; corrosivos; liberación de gases tóxicos en contacto con el aire o el agua; sustancias tóxicas (con efectos retardados o crónicos); ecotóxicos; sustancias que pueden, por algún medio, después de su eliminación, dar origen a otra sustancia, por ejemplo, lixiviados, que posean alguna de las características anteriormente expuestas.

**Eficiencia de destrucción (ED):** Medida del porcentaje de un compuesto orgánico determinado que es destruido en el proceso de combustión. Matemáticamente, la eficiencia de destrucción se calcula como sigue:

$$ED = [(W_{in} - W_{out \text{ combustion chamber}}) / W_{in}] \times 100$$

donde  $W_{in}$  es la tasa de alimentación de masa de un constituyente orgánico peligroso principal en el flujo de desechos que alimenta el horno, y  $W_{out \text{ combustion chamber}}$  es la tasa de emisión de masa del mismo constituyente orgánico peligroso principal que sale del horno (antes de pasar por todo el equipo de control de contaminación del aire). La eficiencia de destrucción representa la fracción de compuestos orgánicos que entran en el horno que se destruye realmente; la EDE representa la fracción de compuestos orgánicos que entran en el horno y se liberan a la atmósfera desde la chimenea.

**Eficiencia de destrucción y eliminación (EDE):** Eficiencia en la destrucción y la eliminación de un compuesto orgánico determinado. Matemáticamente, la EDE se calcula como sigue:

$$EDE = [(W_{in} - W_{out \text{ stack}}) / W_{in}] \times 100$$

donde  $W_{in}$  es la tasa de alimentación de masa de un constituyente orgánico peligroso principal en el flujo de desechos que alimenta el horno, y  $W_{out \text{ chimenea}}$  es la tasa de emisión de masa del mismo constituyente orgánico peligroso principal en las emisiones de escape antes de su liberación a la atmósfera.

**Eliminación:** Cualquier operación especificada en el anexo IV del Convenio de Basilea ("operaciones de eliminación").

**Ensayo de combustión:** Análisis de emisiones realizado para demostrar el cumplimiento de las normas de valoración de la eficiencia de destrucción y eliminación y la eficiencia de destrucción, así como las normas sobre los límites de emisión; se utiliza como base para establecer límites de funcionamiento permitidos.

**Evaluación del ciclo de vida:** Proceso de evaluación objetiva de las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad mediante la identificación y la cuantificación de la energía y los materiales utilizados y los desechos liberados al ambiente. El impacto de dichos usos y liberaciones de energía y materiales al ambiente se evalúa para contrastar y aplicar las oportunidades de realizar mejoras ambientales. La evaluación abarca todo el ciclo de vida del producto, el proceso o la actividad, que incluye la extracción y el procesamiento de la materia prima; la fabricación, el transporte y la distribución; el uso, la reutilización y el mantenimiento; el reciclado y la eliminación final.

**Evaluación del impacto ambiental (EIA):** Examen, análisis y evaluación de actividades proyectadas con el objetivo de garantizar un desarrollo ambientalmente racional y sostenible. Los criterios para determinar la necesidad de una EIA deben estar definidos claramente en documentos legales o programáticos.

**Exactitud:** Concordancia general de una medición con un valor conocido, teniendo en cuenta el error aleatorio y el error sistemático (precisión y sesgo) de las operaciones de muestreo y análisis.

**Fabricación por vía seca:** Tecnología del proceso de fabricación de cemento. En la fabricación por vía seca, las materias primas entran al horno de cemento en estado seco después de haber sido molidas hasta obtener un polvo fino denominado harina cruda. La fabricación por vía seca consume menos energía que la fabricación por vía húmeda, en la que se añade agua a las materias primas durante la molienda para obtener la lechada.

**Garantía de calidad:** Sistema de actividades de gestión que incluyen el diseño, la aplicación, la evaluación y la elaboración de informes, para asegurar que el producto final, por ejemplo los datos ambientales, sea del tipo y la calidad que requiere el usuario.

**Gestión ambientalmente racional:** Adopción de todas las medidas posibles para asegurar que los desechos peligrosos y otros desechos sean gestionados de manera que se proteja la salud humana y ambiental de cualquier efecto adverso que pueda derivarse de tales desechos.

**Hormigón:** Material estructural producido mezclando material de cementación (como el cemento Portland) con agregados (como arena y grava) con suficiente agua y aditivos para que el cemento fragüe y una toda la masa.

**Horno:** Aparato calentador de una planta cementera para la fabricación de clínker. A menos que se especifique lo contrario, cabe suponer que se trata de un horno rotatorio.

**Horno de eje vertical:** Horno vertical, cilíndrico o en forma de chimenea, calentado desde la base y alimentado mediante dosificador o por carga continua formada por una mezcla específica de combustibles y materias primas. Está basado en un proceso de crudo negro que evita el uso de combustibles alternativos; generalmente se considera obsoleto para la fabricación de cemento.

**Horno rotatorio:** Horno que consiste en un tubo rotatorio de acero ligeramente inclinado y cubierto con ladrillos refractantes. El horno se alimenta con materias primas por el extremo superior y se calienta al fuego, principalmente por la parte inferior, que es también por donde sale el producto (clínker).

**Integridad:** Cantidad de datos válidos que se exigen de un sistema de medición.

**Jerarquía de (gestión de) desechos:** Listado de estrategias de gestión de desechos ordenadas por preferencia, y en la que la opción más deseable es la prevención de producción de desechos, y la menos deseable la eliminación. En algunas corrientes de desechos específicas puede ser necesario prescindir de la jerarquía por razones de viabilidad técnica o económica o de protección ambiental.

**Línea de horno:** Parte de la planta de cemento que fabrica clínker; incluye el horno propiamente dicho, los precalentadores y los precalcinadores y el enfriador de clínker.

**Manifiesto:** Documento que viaja con los desechos peligrosos cuando son transportados, desde el punto de origen hasta las instalaciones de eliminación definitiva; refleja la trayectoria seguida por los desechos peligrosos a lo largo de toda su vida.

**Materias primas alternativas:** Material de desecho que contiene minerales utilizables como calcio, sílice, aluminio y hierro, utilizable en el horno para sustituir materias primas como la arcilla, la pizarra y la piedra caliza. También se denominan materias primas secundarias o de sustitución.

**Mejores técnicas disponibles:** Los métodos más eficaces para reducir las emisiones y el impacto en el ambiente como un todo.

**Mezcla cruda / crudo / alimentación:** Materia prima de alimentación de la línea de horno, convenientemente triturada, molida, distribuida y homogeneizada cuidadosamente.

**Muestra representativa:** Muestra de un universo o un todo (por ejemplo, un vertedero) de la que se espera que muestre las propiedades medias del universo o el todo.

**Operador:** Cualquier persona natural o jurídica que opera o controla la instalación.

**Planta coqueadora:** Según la directiva 2000/76/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, toda planta estacionaria o (móvil) cuyo objetivo principal sea la generación de energía o la producción de productos materiales, y que utilice desechos como combustible habitual o adicional; o en la cual se trate térmicamente los desechos con el fin de eliminarlos. Si la coqueación tiene lugar de manera que el objetivo principal de la planta no sea la generación de energía ni la producción de productos materiales, sino el tratamiento térmico de los desechos, se la considerará una planta coqueadora.

**Poder calorífico:** Calor producido por unidad de masa en la combustión completa de una sustancia determinada. El poder calorífico se utiliza para expresar el poder energético de los combustibles, y normalmente se expresa en megajulios por kilogramo (MJ/kg).

**Poder calorífico inferior (PCI):** El poder calorífico superior menos el calor latente de vaporización del vapor de agua formado por la combustión del hidrógeno en el combustible. También recibe el nombre de poder calorífico neto.

**Poder calorífico superior (PCS):** Cantidad máxima de energía que se puede obtener por combustión de un combustible, incluida la energía liberada cuando se condensa el vapor producido durante la combustión.

**Polvo de horno de cemento:** Material fino y altamente alcalino que se elimina de los gases de escape de un horno de cemento mediante dispositivos de control de la contaminación del aire. La mayor parte del polvo de horno de cemento es materia prima que no ha reaccionado, incluyendo mezcla de materias primas en diversos estadios de combustión y partículas de clínker. El término puede utilizarse para denotar cualquier polvo de un horno de cemento, como el procedente de los sistemas de derivación.

**Polvo desviado:** Polvo desechado de los sistemas de derivación de los hornos de precalentamiento de la suspensión, de precalcación y de precalentamiento de parrilla; está formado por material de alimentación del horno completamente calcinado.

**Precalcinador:** Equipo de la línea de horno, normalmente combinado con un precalentador, en el que se consigue una calcinación de parcial a casi total de minerales carbonatados antes del propio horno, y que utiliza una fuente independiente de calor. El precalcinador reduce el consumo de combustible del horno y permite que éste sea más corto, ya que no tiene que realizar la función de calcinación completa.

**Precalentador:** Equipo para calentar la mezcla cruda antes de que alcance el horno seco. En los hornos secos modernos el precalentador suele estar combinado con un precalcinador. Los precalentadores utilizan los gases de escape calientes del horno como fuente de calor.

**Precisión:** Medida de la concordancia entre los valores obtenidos en las repeticiones de la medición de la misma propiedad en condiciones idénticas o sustancialmente similares; se calcula como un rango o como una desviación estándar. También se puede expresar como el porcentaje de la media de los valores, como el rango relativo o la desviación relativa estándar (coeficiente de variación).

**Preprocesamiento:** Los combustibles o las materias primas alternativos que no tengan características uniformes procedentes de diferentes corrientes de residuos deben prepararse antes de ser utilizados en una planta de cemento. El proceso de preparación, o preprocesamiento, es necesario para producir una corriente de desechos que satisfaga las especificaciones técnicas y administrativas de la producción de cemento y así garantizar que se cumplan las normas ambientales.

**Coprocesamiento:** Uso de materiales de desecho adecuados en los procesos de fabricación con el propósito de recuperar energía y recursos y reducir en consecuencia el uso de combustibles y materias primas convencionales mediante su sustitución.

**Recuperación:** Toda operación en la que los desechos resultan útiles para sustituir otros materiales que, de otro modo, serían necesarios para desempeñar una función determinada, o desechos que se preparan para desempeñar dicha función, en la planta o en la economía a mayor escala.

**Representatividad:** Término cualitativo que expresa el grado en que los datos representan de manera exacta y precisa una característica de la población, las variaciones de un parámetro en un punto de muestreo, una característica de un proceso o una condición ambiental.

**Sistema de piropcesado:** Incluye el horno, el refrigerador y el equipo de combustión de combustibles.



## Abreviaturas y siglas

ACGIH	American Conference of Governmental Industrial Hygienists ( <a href="http://www.acgih.org">http://www.acgih.org</a> )
ASTM	American Society for Testing and Materials ( <a href="http://www.astm.org/">http://www.astm.org/</a> )
BREF	documento de referencia para las mejores técnicas disponibles (publicado por EIPPCB, <a href="http://eippcb.jrc.es/">http://eippcb.jrc.es/</a> )
CCME	Canadian Council of Ministers of the Environment ( <a href="http://www.ccme.ca/">http://www.ccme.ca/</a> )
CEN	Comité Europeo de Normalización ( <a href="http://www.cen.eu/">http://www.cen.eu/</a> )
CLM BREF	documento de referencia sobre las mejores técnicas disponibles para la fabricación de cemento, cal y óxido de magnesio (publicado por EIPPCB, <a href="http://eippcb.jrc.es/">http://eippcb.jrc.es/</a> )
COP	contaminante orgánico persistente
EA	Environment Agency of England and Wales ( <a href="http://www.environment-agency.gov.uk/">http://www.environment-agency.gov.uk/</a> )
ED	eficiencia de destrucción
EDE	eficiencia de destrucción y eliminación
EIPPCB	Oficina Europea de Prevención y Control Integrados de la Contaminación ( <a href="http://eippcb.jrc.es/">http://eippcb.jrc.es/</a> )
eqt-i	equivalente tóxico internacional
GTZ	Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GmbH, renombrada como Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH ( <a href="http://www.giz.de/">http://www.giz.de/</a> )
IPCC	Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático
NEA-MTD	Nivel de emisiones asociado a las mejores técnicas disponibles
NIOSH	National Institute for Occupational Health and Safety of the United States ( <a href="http://www.cdc.gov/niosh/">http://www.cdc.gov/niosh/</a> )
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos ( <a href="http://www.oecd.org/">http://www.oecd.org/</a> )
OSHA	Occupational Safety and Health Administration of the United States ( <a href="http://www.osha.gov/">http://www.osha.gov/</a> )
PCB	bifenilo policlorado
PCDD	dibenzo- <i>p</i> -dioxina policlorada
PCDF	dibenzofurano policlorado
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente ( <a href="http://www.unep.org/">http://www.unep.org/</a> )
SCB	Secretaría del Convenio de Basilea ( <a href="http://www.basel.int/">http://www.basel.int/</a> )
UE	Unión Europea
U.S. EPA	Organismo de Protección Ambiental de los Estados Unidos ( <a href="http://www.epa.gov/">http://www.epa.gov/</a> )
WBCSD	Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible ( <a href="http://www.wbcsd.org/">http://www.wbcsd.org/</a> )

## I. Introducción

### A. Ámbito

1. Las actuales directrices técnicas para el coprocesamiento ambientalmente racional de los desechos peligrosos como combustibles y materias primas alternativos para su uso en los hornos de cemento se ajustan a las decisiones VIII/17, IX/17 y BC-10/8 de la Conferencia de las Partes en el Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación y a la decisión OEWG-VII/9 del Grupo de Trabajo de composición abierta del Convenio de Basilea.
2. El coprocesamiento de desechos en hornos de cemento adecuadamente regulados proporciona energía y permite la recuperación de materiales mientras se produce el cemento, de manera que supone una opción de recuperación ambientalmente racional de muchos desechos peligrosos. Los países se esfuerzan por conseguir una mayor autosuficiencia en la gestión de los desechos peligrosos, especialmente los países en desarrollo, que posiblemente cuenten con poca o ninguna infraestructura de gestión de desechos, de modo que el coprocesamiento adecuadamente regulado puede suponer una opción práctica, rentable y ambientalmente preferible a los vertederos y la incineración. En general, el coprocesamiento de los desechos en procesos intensivos en recursos naturales puede ser un elemento importante dentro de un sistema más sostenible de gestión de las materias primas y la energía.
3. El coprocesamiento es el uso de combustibles y materias primas alternativos con el objetivo de recuperar energía y recursos; es diferente de la coincineración, la producción de materiales mediante el uso de desechos como combustibles o las plantas en las que los desechos son tratados térmicamente para su eliminación.
4. Aunque estas directrices técnicas se refieren a los desechos peligrosos según la definición dada por el Convenio de Basilea, algunas directrices son aplicables también a desechos no peligrosos, puesto que la selección de desechos aptos para su coprocesamiento en los hornos de cemento está determinada por muchos otros factores además de las características peligrosas de dichos desechos. Estas directrices no cubren el uso de desechos como sustitutos del clínker en la producción de cemento.

### B. Aspectos generales de la fabricación de cemento

5. El cemento es un polvo fino, no metálico e inorgánico que fragua y se endurece al mezclarse con el agua; es el componente principal del hormigón. La producción de cemento consiste en el calentamiento, la calcinación y la sinterización de una mezcla cuidada de materiales calcáreos y arcillosos, normalmente piedra caliza y arcilla. Esto genera el clínker de cemento, el cual es, posteriormente, enfriado y molido con aditivos como el yeso (un retardante del fraguado) para obtener el cemento.
6. Lo normal es que el clínker contenga cerca de 67% de CaO, 22% de SiO<sub>2</sub>, 5% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y 3% de otros componentes (Taylor, 1997). Los yacimientos calcáreos que se encuentran en la naturaleza, como caliza, marga o creta, consisten en lo esencial en carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>), y son necesarios para obtener óxido de calcio (CaO). Normalmente, la arcilla o el esquistos proporcionan los componentes restantes. Las materias primas utilizadas en el proceso de producción de cemento contienen metales y halógenos en forma natural en cantidades que dependen de las formaciones geológicas de las que se extraen; algunas materias primas pueden contener también carbono orgánico, como querógenos. Por lo mismo, el carbón puede contener cantidades importantes de azufre, oligometales y halógenos cuyas concentraciones dependen de la zona de la que se ha extraído el carbón. Los valores medios y los rangos de las concentraciones de los oligoelementos en los combustibles primarios y las materias primas convencionales se pueden consultar en Mantus (1992), Achternbosch y otros (2003) y WBCSD (2005).
7. Con la excepción de los hornos de eje vertical que se siguen usando en determinadas zonas geográficas (principalmente en China y la India) (CPCB, 2007; Höhne y Ellermann, 2008), el clínker de cemento se quema predominantemente en hornos rotatorios, donde el calentamiento del crudo se puede llevar a cabo mediante cuatro tipos de procesos distintos: 'por vía seca', 'por vía semiseca', 'por vía semihúmeda' y 'por vía húmeda'. En Europa y los Estados Unidos, cerca del 90% y el 80% respectivamente de la producción de cemento se obtiene de hornos que fabrican por vía seca (EIPPCB, 2010; U.S. EPA, 2007). Por otra parte, la fabricación por vía húmeda sigue predominando en la Antigua Unión Soviética y Australia, Nueva Zelanda y no ha dejado de tener importancia en el Canadá, la India, América Latina y África (Watson y otros, 2005).

8. La fabricación del cemento es un proceso que consume muchos recursos naturales — normalmente es necesario extraer entre 1,5 y 1,7 toneladas de materia prima para producir una tonelada de clínker (Szabó et al, 2003). Además, la fabricación requiere una cantidad considerable de energía, con temperaturas cercanas a 2.000°C en los hornos de cemento. Cada tonelada de cemento producida requiere normalmente entre 60 y 130 kilogramos de combustible, o su equivalente, y cerca de 105 KWh de electricidad (Loréa, 2007). De media, los costes energéticos de combustible y electricidad representan el 40% de los costes de la fabricación del cemento (EIPPCB, 2010).
9. En U.S. EPA (1993), CEMBUREAU (1999a), (van Oss, 2005) y EIPPCB (2010), entre otros, se puede obtener información más pormenorizada acerca del proceso de fabricación del cemento.
10. En 2008, la producción mundial de cemento se estimó en 2,9 millones de toneladas, de las que China produjo la mitad (Da Hai y otros, 2010; Departamento de Geología de los Estados Unidos, 2009). Según las estimaciones, el consumo de cemento en el mundo alcanzará los 3,4 millones de toneladas en 2020, con los incrementos correspondientes en energía, materias primas necesarias y emisiones de contaminantes (Degré, 2009).
11. La combustión de clínker es la fase más importante del proceso de fabricación en términos de impacto ambiental asociado con la fabricación del cemento. Según los procesos de producción específicos, las cementeras generan emisiones al aire y emisiones de desechos a la tierra. Esto incluye el polvo de horno de cemento, en aquellos lugares en los que su reintroducción en el proceso de producción pueda estar restringida. También pueden producirse emisiones al agua en algunos casos poco habituales. El ruido y los olores también pueden tener efectos nocivos.
12. Los principales contaminantes que se liberan al aire son material particulado de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) (EIPPCB, 2010). Otras emisiones incluyen: óxidos de carbono (CO, CO<sub>2</sub>), dibenzo-*p*-dioxinas policloradas y dibenzofuranos (PCDD/PCDF), compuestos orgánicos volátiles, metales y sus compuestos, cloruro de hidrógeno (HCl) y fluoruro de hidrógeno (HF). Se piensa que, a nivel mundial, la fabricación de cemento supone cerca del 6% del total de la fuente de emisiones estacionarias de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (IPCC, 2005). El tipo y la cantidad de emisiones a la atmósfera dependen de parámetros variables, como las materias primas y los combustibles utilizados y el tipo de proceso empleado.
13. La fabricación de cemento también está asociada al impacto de la extracción de recursos (combustibles fósiles, piedra caliza y otros minerales) sobre la calidad del medio ambiente, la biodiversidad, la morfología del paisaje y el agotamiento de los recursos no renovables o lentamente renovables, como los combustibles fósiles o las aguas subterráneas (Battelle, 2002).

### C. Coprocesamiento de los desechos peligrosos en hornos de cemento

14. En las industrias que requieren gran cantidad de recursos, el coprocesamiento implica el uso de los desechos en los procesos de fabricación con el objetivo de recuperar energía y recursos al reducir el uso de combustibles convencionales y materias primas mediante su sustitución. En concreto, el coprocesamiento de los desechos peligrosos en los hornos de cemento permite la recuperación del valor energético y mineral de los desechos a la vez que se fabrica el cemento.
15. El coprocesamiento es un concepto de desarrollo sostenible basado en los principios de la ecología industrial que se centra en el papel potencial de la industria para reducir las cargas ambientales a lo largo de todo el ciclo vital del producto (Mutz y otros, 2007; Karstensen, 2009a). Uno de los objetivos principales de la ecología industrial es convertir los desechos de una industria en la materia prima de otra (OCDE, 2000). En el sector del cemento, el uso de desechos como combustibles y materias primas es un ejemplo positivo de visión de futuro.
16. El coprocesamiento de los desechos tiene el propósito útil de sustituir materiales que, de otro modo, tendrían que utilizarse en la fabricación del cemento, y ayuda, así, a la conservación de los recursos naturales. Según el Convenio de Basilea, esto constituye una operación “que puede llevar a la recuperación de recursos<sup>1</sup>, el reciclado, la regeneración, la reutilización directa u otros usos” en las categorías R1 (“utilización como combustible u otros medios de generar energía”) y R5 (“reciclado o recuperación de otras materias inorgánicas”) de la parte B del anexo IV del Convenio.
17. El Convenio de Basilea establece las obligaciones de los países que son Partes para asegurar la gestión ambientalmente racional de los desechos y los desechos peligrosos. En este aspecto, la

<sup>1</sup> De acuerdo con la sentencia del Tribunal Europeo de Justicia del 13 de febrero de 2003 dictada en el caso C-458/00.

norma principal a seguir para asegurar un sistema de gestión de desechos más sostenible es la jerarquía de prácticas de gestión de desechos, incluyendo la debida consideración a la protección del ambiente y la salud humana. En ella, la prevención o la evitación de la generación de desechos ocupa un lugar preferente. Cuando no es posible evitar la generación de desechos, la reutilización, el reciclado y la recuperación de desechos son alternativas preferibles a las operaciones en las que no hay recuperación. Por ejemplo, el coprocesamiento en los hornos de cemento proporciona una opción de recuperación de recursos ambientalmente racional, preferible a la acumulación en vertederos y la incineración.

18. Los combustibles fósiles y las materias primas han sido sustituidos satisfactoriamente por desechos de varias clases en los hornos de cemento de Australia, Canadá, Europa, el Japón y los Estados Unidos de América desde el principio de la década de 1970 (GTZ/Holcim, 2006). Se puede consultar la experiencia de diversas jurisdicciones con el uso de desechos peligrosos y no peligrosos como combustibles y materias primas en hornos de cemento en CCME (1996), EA (1999a), Twigger y otros (2001) y Karstensen (2007a), entre otros.

19. Aunque la práctica varía de unas fábricas a otras, la fabricación de cemento puede consumir cantidades significativas de desechos como combustibles y materias primas no combustibles. Este consumo refleja las características del proceso en los hornos de clínker, que aseguran la ruptura completa de las materias primas en los óxidos que las componen y la recombinación de dichos óxidos en los minerales del clínker. Las características esenciales del proceso para el uso de desechos y desechos peligrosos como alimentación del horno, a través de los puntos de alimentación adecuados, se pueden resumir en las siguientes (EIPPCB, 2010):

- a) Temperaturas máximas de aproximadamente 2.000°C (quemador principal, temperatura de llama) en hornos rotatorios;
- b) Tiempos de retención del gas de aproximadamente ocho segundos a temperaturas superiores a los 1.200°C en hornos rotatorios;
- c) Temperatura de los materiales de aproximadamente 1.450°C en la zona de sinterización de los hornos rotatorios;
- d) Atmósfera de gas oxidante en hornos rotatorios;
- e) Tiempo de retención del gas en los quemadores secundarios de más de dos segundos a temperaturas superiores a 850°C; en el precalcinador los tiempos de retención son convenientemente más largos y las temperaturas más elevadas;
- f) La temperatura de los sólidos es de 850°C en el quemador secundario y en el calcinador;
- g) Condiciones uniformes de combustión para fluctuaciones de carga debidas a las altas temperaturas a tiempos de retención suficientemente largos;
- h) Destrucción de contaminantes orgánicos a causa de las altas temperaturas a tiempos de retención suficientemente largos;
- i) Sorción de componentes gaseosos como el HF, el HCl y el SO<sub>2</sub> en reactivos alcalinos;
- j) Alta capacidad de retención para metales pesados unidos a partículas;
- k) Tiempos de retención cortos de gases de escape en el rango de temperatura en el que se da la formación de PCDD/PCDF;
- l) Reciclado de material y recuperación de energía simultáneamente mediante el uso completo de cenizas de combustible como componentes del clínker;
- m) Los desechos específicos de producto no se generan debido al uso completo del material en la matriz del clínker (si bien algunas plantas de cemento desechan polvo del horno o polvo desviado);
- n) Incorporación químico-mineralógica de metales pesados no volátiles a la matriz del clínker.

20. Los numerosos beneficios potenciales que ofrece el uso de desechos y desechos peligrosos en los procesos de fabricación de cemento mediante la recuperación de su contenido en energía y materia incluyen: la recuperación del contenido energético de los desechos, la conservación de combustibles fósiles no renovables y recursos naturales, la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>, la reducción de los costes de producción, y el uso de una tecnología existente para tratar desechos peligrosos (véanse, por ejemplo, Mantus, 1992; Battelle, 2002; WBCSD, 2005; Karstensen, 2007b).

21. El beneficio más directo es la energía contenida en los combustibles alternativos que se aprovecha en las plantas de cemento y sustituye la demanda de combustibles fósiles (Murray and Price, 2008). Se reduce así la dependencia de combustibles fósiles y se genera ahorro mediante la conservación de los recursos. La cantidad de demanda de combustibles fósiles que se elimina depende, entre otros factores, del poder calorífico y el contenido en agua del combustible alternativo.
22. Además, los combustibles de sustitución pueden tener menor contenido en carbono (en masa) que los combustibles fósiles, y las materias primas alternativas que no necesitan una cantidad significativamente mayor de calor (y combustible), pueden aportar parte del CaO necesario para producir clínker de una fuente diferente del CaCO<sub>3</sub> (Van Oss, 2005). Así pues, otro beneficio directo del coprocesamiento de los desechos en la fabricación del cemento es la reducción potencial de las emisiones de CO<sub>2</sub>. La integración del coprocesamiento en los hornos de cemento en una estrategia global de gestión de desechos ofrece una reducción potencial de las emisiones netas globales de CO<sub>2</sub> relativas a un escenario en que los desechos se queman en un incinerador sin recuperación de energía (EA, 1999b; CEMBUREAU, 2009).
23. El uso de materiales alternativos para sustituir las materias primas tradicionales reduce la explotación de los recursos naturales y la huella ambiental de dichas actividades (WBCSD, 2005; CEMBUREAU, 2009).
24. El ahorro en los costes que se deriva del uso de una infraestructura de hornos preexistente para llevar a cabo el coprocesamiento de los desechos que no se pueden reducir ni reciclar de otro modo, evita la necesidad de invertir en incineradoras especializadas o en vertederos (GTZ/Holcim, 2006; Murray and Price, 2008). A diferencia de lo que ocurre en las incineradoras de desechos especializadas, las cenizas de los desechos peligrosos que se procesan conjuntamente en los hornos de cemento son incorporadas al clínker, de manera que no se generan productos finales que requieran una gestión posterior.
25. Es de vital importancia que el coprocesamiento de los desechos peligrosos en los hornos de cemento se lleve a cabo siempre cumpliendo con las mejores técnicas disponibles<sup>2</sup> y se cumplan los requisitos establecidos de control de la alimentación, el proceso y la emisión. En este contexto, la prevención o reducción de la formación y consiguiente liberación de contaminantes orgánicos persistentes (COP) involuntarios es el objeto del artículo 5 del Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes. La Secretaría del Convenio ha publicado una guía de mejores técnicas disponibles y unas directrices provisionales sobre las mejores prácticas ambientales y éstas han sido adoptadas por la Conferencia de las Partes en el Convenio en su decisión SC-3/5. Otras fuentes de especial relevancia son los documentos de referencia sobre mejores técnicas disponibles de la Comisión Europea (BREF) que se han publicado sobre la fabricación de cemento, cal y óxido de magnesio (EIPPCB, 2010), sobre el sector del tratamiento de desechos (EIPPCB, 2006) y sobre los principios generales de supervisión (EIPPCB, 2003).
26. En los BREF se presentan los resultados del intercambio de información coordinado por la Comisión Europea y llevado a cabo bajo la Directiva del Consejo 2008/1/CE (directiva sobre prevención y control integrado de la contaminación), entre los Estados Miembros de la Unión Europea, las industrias implicadas y las organizaciones no gubernamentales para la preservación del medio ambiente. En ellos se ofrece a los Estados Miembros de la Unión Europea una guía sobre mejores técnicas disponibles y niveles de emisiones asociadas, además de otras informaciones útiles específicas del sector.
27. Un marco nacional legal y normativo adecuado en el que se puedan programar y llevar a cabo de manera segura las actividades de gestión de los desechos peligrosos debe asegurar que los desechos se manejan correctamente en todas las partes del proceso, desde el punto de generación hasta su eliminación. Las Partes de los Convenios de Basilea y Estocolmo también deben analizar los controles, las normas y los procedimientos nacionales para asegurarse de que cumplen con los convenios y con las obligaciones que de ellos se desprenden, incluyendo los relativos a la gestión ambientalmente racional de los desechos peligrosos.
28. El coprocesamiento de desechos peligrosos debe llevarse a cabo únicamente en hornos de cemento que cumplan completamente con todos los requisitos para su autorización y sigan las

---

2 Los hornos de eje vertical no se deben considerar como una opción de mejores técnicas disponibles (PNUMA, 2007). Muchas plantas que tienen hornos de eje vertical no cuentan con controles ambientales y la tecnología vigente impide el uso eficiente de controles modernos para el polvo (y otras emisiones) (Karstensen, 2006a).

normativas locales aplicables. Por ejemplo, para las instalaciones que realicen coprocesamiento de desechos y desechos peligrosos ubicadas en la Unión Europea, deben cumplirse los requisitos de la Directiva 2000/76/CE (Directiva sobre Incineración de Residuos; que será sustituida en enero de 2014 por la Directiva 2010/75/UE sobre emisiones industriales) y de la Directiva 2008/98/CE (Directiva Marco sobre Residuos).

## **II. Disposiciones pertinentes del Convenio de Basilea y vínculos internacionales**

### **A. Disposiciones generales del Convenio de Basilea**

29. El Convenio de Basilea, que entró en vigor el 5 de mayo de 1992, establece que toda exportación, importación o tránsito transfronterizo serán permitidos únicamente si tanto el movimiento como la eliminación de los desechos peligrosos son ambientalmente racionales.

30. En el párrafo 1 del artículo 2 ("Definiciones") del Convenio de Basilea se define los desechos como "sustancias u objetos a cuya eliminación se procede, se propone proceder o se está obligado a proceder en virtud de lo dispuesto en la legislación nacional". El párrafo 4 del artículo 2 define eliminación como "cualquiera de las operaciones especificadas en el anexo IV" del Convenio. En el párrafo 8 se define la gestión ambientalmente racional de los desechos peligrosos o de otros desechos "la adopción de todas las medidas posibles para garantizar que los desechos peligrosos y otros desechos se manejen de manera que queden protegidos el medio ambiente y la salud humana contra los efectos nocivos que pueden derivarse de tales desechos".

31. El párrafo 1 del artículo 4 ("Obligaciones generales") establece el procedimiento por el que las Partes que ejerzan su derecho a prohibir la importación de desechos peligrosos u otros desechos para su eliminación deberán informar a las otras Partes de su decisión. El párrafo 1 a) establece: Las Partes que ejerzan su derecho a prohibir la importación de desechos peligrosos y otros desechos para su eliminación, comunicarán a las demás Partes su decisión de conformidad con el artículo 13". El párrafo 1 b) establece: Las Partes prohibirán o no permitirán la exportación de desechos peligrosos u otros desechos a las Partes que hayan prohibido la importación de estos desechos, cuando dicha prohibición se les haya comunicado de conformidad con el apartado a) del presente artículo".

32. Los apartados a) a d) del párrafo 2 del artículo 4 contienen las disposiciones generales del Convenio relativas a la gestión ambientalmente racional, la reducción de desechos y las prácticas de eliminación para reducir los efectos adversos en la salud humana y en el medio ambiente:

"Cada Parte tomará las medidas apropiadas para:

- a) Asegurar que se reduce al mínimo la generación de desechos peligrosos y otros desechos en ella, teniendo en cuenta los aspectos sociales, tecnológicos y económicos;
- b) Asegurar la disponibilidad de instalaciones adecuadas de eliminación para el manejo ambientalmente racional de los desechos peligrosos y otros desechos, cualquiera que sea el lugar donde se efectúa su eliminación que, en la medida de lo posible, estará situado dentro de ella;
- c) Velar por que las personas que participan en el manejo de los desechos peligrosos y otros desechos dentro de ella adopten las medidas necesarias para impedir que ese manejo dé lugar a una contaminación y, en caso de que ésta se produzca, para reducir al mínimo sus consecuencias sobre la salud humana y el medio ambiente;
- d) Velar por que el movimiento transfronterizo de los desechos peligrosos y otros desechos se reduzca al mínimo compatible con un manejo ambientalmente racional y eficiente de esos desechos, y que se lleve a cabo de forma que se protejan la salud humana y el medio ambiente de los efectos nocivos que puedan derivarse de ese movimiento."

### **B. Consideraciones generales sobre la gestión ambientalmente racional**

33. Actualmente, la gestión ambientalmente racional es sólo un concepto político amplio sin una definición universal clara. No obstante, las disposiciones referentes a la gestión ambientalmente racional, en lo que se refiere a desechos peligrosos en los Convenios de Basilea y Estocolmo, y los elementos principales de actuación de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) (que se discuten en las tres subsecciones siguientes) definen una dirección internacional que respalda las iniciativas sobre gestión ambientalmente racional que se están implementando en diversos países y sectores industriales.

## 1. Convenio de Basilea

34. En el párrafo 8 del artículo 2 del Convenio de Basilea se define la gestión ambientalmente racional de desechos y desechos peligrosos como “la adopción de todas las medidas posibles para garantizar que los desechos y los desechos peligrosos se gestionan de manera que queden protegidos el medio ambiente y la salud humana frente a los efectos nocivos que puedan derivarse de tales desechos”.

35. En el párrafo 2 b) del artículo 4 se exige que cada Parte tome las medidas apropiadas para “asegurar la disponibilidad de instalaciones adecuadas de eliminación para la gestión ambientalmente racional de los desechos y los desechos peligrosos, cualquiera que sea el lugar donde se efectúa su eliminación que, en la medida de lo posible, estará situado dentro de ella”, mientras que el párrafo 2 c) exige a las Partes que “velen por que las personas que participan en el manejo de los desechos y los desechos peligrosos dentro de ella adopten las medidas necesarias para impedir que ese manejo dé lugar a una contaminación y, en caso de que se produzca ésta, para reducir al mínimo sus consecuencias sobre la salud humana y el medio ambiente”.

36. El párrafo 8 del artículo 4 del Convenio exige que “los desechos y los desechos peligrosos que se vayan a exportar sean gestionados de manera ambientalmente racional en el Estado de importación y en cualquier otro lugar. En su primera Reunión, las Partes adoptarán directrices técnicas para la gestión ambientalmente racional de los desechos sometidos a este Convenio”. Las presentes directrices pretenden dar una definición más precisa del concepto de gestión ambientalmente racional en el contexto del coprocesamiento de los desechos peligrosos en hornos de cemento, incluyendo el tratamiento y los métodos de eliminación apropiados de estas corrientes de desechos.

37. Algunos de los principios fundamentales fueron articulados ya en el documento marco de 1994 sobre la preparación de las directrices técnicas para la gestión ambientalmente racional de desechos sometidos al Convenio de Basilea. El documento marco recomienda que se cumpla una serie de condiciones legales, institucionales y técnicas (criterios de gestión ambientalmente racional) para lograr una gestión ambientalmente racional de los desechos:

- a) Una infraestructura normativa y coercitiva debe asegurar el cumplimiento de las normativas aplicables;
- b) Los emplazamientos o instalaciones contarán con una autorización y un grado adecuado de tecnología y control de la contaminación para manipular los desechos peligrosos en la forma prevista, en particular teniendo en cuenta el nivel tecnológico y de control de la contaminación en el país de exportación;
- c) Los operadores de los emplazamientos o las instalaciones donde se gestionen desechos peligrosos supervisarán adecuadamente los efectos de esas actividades;
- d) Se adoptarán medidas adecuadas en los casos en que la labor de supervisión indique que la gestión de desechos peligrosos ha provocado emisiones inaceptables;
- e) Las personas encargadas de la gestión de desechos peligrosos deben ser capaces y contar con la formación adecuada para desempeñar sus funciones.

38. La Declaración de Basilea sobre la gestión ambientalmente racional de 1999, adoptada en la quinta reunión de la Conferencia de las Partes en el Convenio de Basilea, llama a las Partes a mejorar y vigorizar sus esfuerzos y su colaboración para lograr una gestión ambientalmente racional mediante la prevención, la reducción al mínimo, el reciclado, la recuperación y la eliminación de los desechos peligrosos y otros desechos, teniendo en cuenta los aspectos sociales, tecnológicos y económicos; y mediante la disminución aún en mayor medida de los movimientos transfronterizos de desechos peligrosos y otros desechos sujetos al Convenio.

39. En la Declaración se enumeran algunas de las actividades que deben llevarse a cabo en este contexto, entre ellas:

- a) La identificación y la cuantificación de los tipos de desechos que se producen a escala nacional;
- b) El uso de las mejores prácticas, como utilizar métodos o enfoques de producción menos contaminantes, para evitar o reducir la generación de desechos peligrosos y disminuir su toxicidad,
- c) La asignación de emplazamientos o instalaciones autorizados como ambientalmente racionales para el manejo de desechos y, en particular, desechos peligrosos.

## 2. Convenio de Estocolmo

40. Aunque el término "gestión ambientalmente racional" no está definido en el Convenio de Estocolmo, los métodos ambientalmente racionales para la eliminación de desechos consistentes en contaminantes orgánicos persistentes (COP), que los contengan o estén contaminados con ellos deben ser determinados por la Conferencia de las Partes en cooperación con los órganos pertinentes del Convenio de Basilea.

## 3. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos

41. La OCDE ha adoptado una recomendación sobre gestión ambientalmente racional de desechos que incluye varias cuestiones, como los elementos principales de actuación de las directrices de la gestión ambientalmente racional aplicables a las instalaciones de recuperación de desechos, incluyendo elementos de actuación previos a la recogida, el transporte, el tratamiento y el almacenamiento, así como también elementos posteriores al almacenamiento, el transporte, el tratamiento y la eliminación de los residuos pertinentes. Los elementos principales de actuación establecen que las instalaciones deberán contar con lo siguiente:

- a) Un sistema de gestión ambiental aplicable in situ;
- b) Medidas in situ suficientes para salvaguardar la salud y la seguridad laborales y ambientales;
- c) Un programa adecuado de supervisión, registro y presentación de informes;
- d) Un programa apropiado y adecuado de formación para el personal;
- e) Un plan de emergencia adecuado;
- f) Un plan adecuado para el cierre y el mantenimiento posterior.

## III. Directrices generales sobre el coprocesamiento ambientalmente racional en hornos de cemento

### A. Principios del coprocesamiento en la fabricación de cemento

42. Se reconoce que el coprocesamiento de desechos y desechos peligrosos en la fabricación de cemento, si se lleva a cabo de manera segura y ambientalmente racional, tiene beneficios ambientales de gran alcance (CEMBUREAU, 1999a; 2009). Para evitar situaciones en las que una mala planificación pueda provocar un aumento de las emisiones contaminantes o la imposibilidad de acordar la prioridad de adoptar unas prácticas de gestión de desechos ambientalmente preferibles, las empresas Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH y Holcim Group Support Ltd. desarrollaron un conjunto de principios generales (GTZ/Holcim, 2006). Estos principios (tabla 1) ofrecen un resumen exhaustivo y conciso de las consideraciones fundamentales para los planificadores y los interesados en los proyectos de coprocesamiento.

43. El Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible (WBCSD, 2005) también ha elaborado unos principios similares. Karstensen (2008a, 2009a) establecieron los requisitos generales específicos para el procesamiento rutinario de desechos peligrosos en los hornos de cemento que fueron adoptados por el Departamento de Medio Ambiente y Turismo del Gobierno de Sudáfrica (2009) en el marco de la aplicación del coprocesamiento en la producción de cemento (tabla 2).

Tabla 1

#### Principios generales del coprocesamiento de desechos y desechos peligrosos en hornos de cemento

<i>Principio</i>	<i>Descripción</i>
Hay que respetar la jerarquía de gestión	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Los desechos deben ser coprocesados en hornos de cemento cuando no se disponga de ningún otro método de recuperación más sólido ecológica y económicamente</li> <li>- El coprocesamiento debe considerarse una parte integral de la gestión de desechos</li> <li>- El coprocesamiento debe estar de acuerdo con los Convenios de Basilea y Estocolmo, así como con otros acuerdos ambientales internacionales relevantes</li> </ul>
Hay que evitar las emisiones adicionales y el impacto negativo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Los efectos negativos de la contaminación sobre el ambiente y la salud humana deben evitarse o mantenerse al mínimo</li> <li>- Las emisiones a la atmósfera del coprocesamiento de desechos en los hornos de cemento no pueden ser estadísticamente más altas que las que no</li> </ul>



<i>Principio</i>	<i>Descripción</i>
sobre la salud humana	proceden del coprocesamiento de desechos
La calidad del cemento no debe modificarse	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El producto (clínker, cemento, hormigón) no debe ser utilizado como depósito para metales pesados</li> <li>- El producto no debe tener ningún impacto negativo sobre el ambiente (por ejemplo el que se puede determinar mediante ensayos de lixiviado)</li> <li>- La calidad del producto debe permitir la recuperación al final de su vida útil</li> </ul>
Las empresas que llevan a cabo el coprocesamiento deben estar calificadas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Asegurar el cumplimiento de todas las leyes y normativas</li> <li>- Poseer buenos registros de cumplimiento sobre medio ambiente y seguridad</li> <li>- Disponer de personal, procesos y sistemas in situ dedicados a proteger el ambiente, la salud y la seguridad</li> <li>- Ser capaces de controlar los aportes al proceso de producción</li> <li>- Mantener buenas relaciones con el público y las otras partes implicadas en los esquemas locales, nacionales e internacionales de gestión de desechos</li> </ul>
La aplicación del coprocesamiento debe tener en cuenta las circunstancias nacionales	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Las exigencias y las necesidades específicas de cada país deben quedar reflejadas en las normativas y los procedimientos</li> <li>- Su aplicación debe permitir el desarrollo de las capacidades necesarias y el establecimiento de acuerdos institucionales</li> <li>- La introducción del coprocesamiento debe ser consistente con otros procesos de cambio en la estructura de gestión de desechos de un país</li> </ul>

Fuente: GTZ/Holcim (2006)

Tabla 2

**Requisitos generales para el coprocesamiento de desechos y desechos peligrosos en hornos de cemento**

1)	Una evaluación de impacto ambiental aprobada y todas las licencias, permisos y autorizaciones nacionales o locales necesarios, debidamente documentados
2)	Cumplimiento de todas las normativas locales y nacionales relevantes
3)	Ubicación, infraestructura técnica, sistema de almacenamiento y de procesamiento adecuados
4)	Suministro de energía y de agua fiables y adecuados
5)	Aplicación de mejores técnicas disponibles para la prevención y el control de la contaminación de las emisiones a la atmósfera, junto con una supervisión continua de las emisiones para asegurar el cumplimiento de la normativa y los permisos (verificado mediante la supervisión regular de la línea de base)
6)	Acondicionamiento y enfriamiento de los gases de escape y bajas temperaturas (<200°C) en el dispositivo de control de la contaminación del aire para evitar la formación de dioxina
7)	Estructura de gestión y de organización clara, con responsabilidades, líneas de comunicación de resultados y mecanismos de intercambio de información inequívocos
8)	Un sistema de notificación de errores (para prevenir incidentes y llevar a cabo acciones correctivas) para los empleados
9)	Empleados cualificados y experimentados para gestionar los desechos y las cuestiones de salud, seguridad y medio ambiente
10)	Equipos y procedimientos de emergencia y de seguridad adecuados, y formación continuada
11)	Recogida, transporte y manejo autorizados y con licencia de desechos peligrosos
12)	Recepción, almacenamiento y alimentación de desechos peligrosos de manera segura y racional
13)	Instalaciones y equipamiento de laboratorio adecuados para la aceptación y el control de la alimentación de desechos peligrosos
14)	Mantenimiento adecuado del registro de desechos y emisiones
15)	Rutinas adecuadas de control de calidad de los productos
16)	Aplicación de un sistema de gestión ambiental que incluya un programa de mejora continua
17)	Auditorías independientes (autorizadas por el gobierno o similares), supervisión de las emisiones y producción de informes

- |     |   |
|-----|---|
| 18) | Diálogo de las partes interesadas con las comunidades y autoridades locales, y mecanismos para responder a los comentarios y las quejas |
| 19) | Divulgación abierta de los informes de verificación del rendimiento y el cumplimiento de manera regular                                 |

Fuente: Adaptado del Departamento de Medio Ambiente y Turismo del Gobierno de Sudáfrica (2009) y Karstensen (2009a)

## **B. Consideraciones a tener en cuenta en la selección de desechos para su coprocesamiento**

44. Los estrictos controles de calidad de los productos de cemento y la naturaleza del proceso de fabricación hacen que únicamente los desechos y los desechos peligrosos que hayan sido seleccionados minuciosamente serán adecuados para su coprocesamiento (WBCSD, 2005). En el BREF publicado por la Comisión Europea para este sector, la mejor técnica disponible es llevar a cabo una cuidadosa selección y un control de todas las sustancias que entran en el horno para evitar o reducir las emisiones (EIPPCB, 2010).

45. Para decidir acerca de la idoneidad de unos desechos peligrosos para el coprocesamiento hay que tener en cuenta la composición química del cemento y el riesgo de daño para el ambiente o la salud y la seguridad públicas. Se recomienda utilizar un enfoque basado en el ciclo de vida de la cadena completa de recuperación de los desechos peligrosos para evaluar las operaciones de recuperación disponibles.

46. Como norma básica, el uso de desechos peligrosos en la fabricación del cemento debería dar un valor añadido al proceso, por ejemplo el poder calorífico y el valor material de la composición mineral, así como cumplir las normativas aplicables y los requisitos de autorización. Aunque generalmente los desechos con alto contenido en metales no serán aptos para el coprocesamiento, puesto que las características de funcionamiento de las fábricas de cemento son variables la composición exacta de desechos aceptables dependerá de la capacidad de cada planta para manejar un flujo de desechos concreto.

47. Sólo se tomará en consideración el uso de hornos de cemento como método de eliminación sin recuperación (es decir, destrucción o transformación irreversible de constituyentes de desechos peligrosos) si existen beneficios ambientales: por ejemplo, la reducción de NO<sub>x</sub> por enfriamiento de llama o cuando no existe otra opción rentable y ambientalmente racional de eliminación a nivel local. Los requisitos para los permisos se establecerán como corresponde.

48. Cuando se utilizan hornos de cemento para la destrucción de constituyentes de desechos peligrosos hay que evaluar concienzudamente las rutas de eliminación alternativas, cumplir estrictamente las normas ambientales, de salud y de seguridad y asegurar que la calidad del producto final no se vea afectada. En los países en los que no existen requisitos rigurosos para el producto final, se considera todavía más importante la aplicación de las mejores técnicas disponibles y las mejores prácticas ambientales (PNUMA, 2007).

49. Como resultado de la naturaleza heterogénea de los desechos, puede ser necesario unir y mezclar corrientes de desechos y desechos peligrosos para garantizar una materia prima homogénea que cumpla con las especificaciones adecuadas para su utilización en un horno de cemento. No obstante, no se debe realizar la combinación de desechos peligrosos con el propósito de disminuir la concentración de constituyentes peligrosos para eludir los requisitos normativos. Como principio general, se debe evitar que la mezcla de desechos lleve a la aplicación de una operación de eliminación inadecuada (no ambientalmente racional) (EIPPCB, 2006)<sup>3</sup>.

### **1. Desechos peligrosos adecuados para su coprocesamiento en hornos de cemento**

50. Hay un amplio rango de desechos peligrosos adecuados para su coprocesamiento, pero como las emisiones de los hornos de cemento son específicas del emplazamiento, no existe una respuesta uniforme sobre el tipo de desechos que se pueden utilizar en una planta concreta. La selección de desechos depende de varios factores, incluyendo: la naturaleza de los desechos; sus características de peligro; las operaciones de gestión de desechos disponibles; el funcionamiento del horno; la composición de la materia prima y del combustible; los puntos de alimentación de desechos; el proceso de limpieza de los gases de escape; la calidad del clínker resultante; el impacto ambiental

<sup>3</sup> En la Unión Europea se aplican los requisitos sobre el mezclado de desechos peligrosos de la Directiva 2008/98/CE.

general; la probabilidad de formación y liberación de contaminantes orgánicos persistentes, consideraciones concretas de gestión de desechos; el cumplimiento de la normativa, y la aceptación del gobierno y de la población (Van Oss and Padovani, 2003; GTZ/Holcim, 2006; PNUMA, 2007; EIPPCB, 2010).

51. El operador deberá desarrollar un procedimiento de evaluación de los desechos para evaluar el impacto potencial en la salud y la seguridad de los trabajadores y del público, así como el funcionamiento y las emisiones de la instalación y la calidad del producto. Entre las variables que se deben tener en cuenta para seleccionar los desechos se incluyen (WBCSD, 2005; PNUMA, 2007):

- a) **Funcionamiento del horno:**
  - i) **Contenido en álcali (sodio, potasio, etc.), azufre y cloruro:** Una alimentación excesiva de estos compuestos puede provocar acumulaciones y bloqueos en el horno. Cuando éstos no pueden ser capturados en el clínker del cemento o en el polvo del horno, puede ser necesaria una derivación para eliminar los compuestos en exceso de los sistemas precalentador y precalciner del horno. El alto contenido en álcali también puede limitar el reciclado del polvo del horno en el propio horno;
  - ii) **Poder calorífico:** Es el parámetro fundamental de la energía que se suministra al proceso;
  - iii) **Contenido en agua:** El contenido total de humedad puede afectar a la productividad, la eficiencia y aumentar el consumo de energía. El contenido en agua de los desechos debe considerarse junto con el de los combustibles y las materias primas convencionales;
  - iv) **Contenido en cenizas:** El contenido en cenizas afecta a la composición química del cemento y hace que pueda ser necesario un ajuste de la composición de la mezcla de materias primas;
  - v) **Velocidad de flujo de los gases de escape y velocidad de alimentación de desechos:** Es necesario un tiempo de residencia suficientemente largo para permitir la destrucción de compuestos orgánicos y para evitar que se produzca una combustión incompleta a causa de la sobrecarga de desechos;
  - vi) **Estabilidad de funcionamiento (por ejemplo, duración y frecuencia de las desconexiones por exceso de CO) y estado (líquido, sólido), preparación (triturados, molidos) y homogeneidad de los desechos;**
- b) **Emisiones:**
  - i) **Contenido en compuestos orgánicos:** Los constituyentes orgánicos están asociados a emisiones de CO<sub>2</sub> y pueden generar emisiones de CO y otros productos de combustión incompleta, si los desechos se introducen en zonas inadecuadas o en condiciones de funcionamiento inestable;
  - ii) **Contenido en cloruro:** Los cloruros se pueden combinar con álcalis para formar partículas finas y difíciles de controlar. En algunos casos los cloruros se han combinado con amoníaco presente en la piedra caliza utilizada como materia prima. Esto provoca el desprendimiento de penachos muy visibles de partículas finas con un alto contenido en cloruro de amonio;
  - iii) **Contenido en metales:** El comportamiento no volátil de la mayoría de los metales pesados permite que la mayor parte de ellos pasen directamente a través del sistema de horno y se incorporen al clínker. Los metales volátiles introducidos se reciclarán parcialmente de forma interna por evaporación y condensación hasta que se alcance el equilibrio; el resto será emitido en los gases de escape. El talio, el mercurio y sus compuestos son altamente volátiles; lo son también, en menor medida, el cadmio, el plomo, el selenio y sus compuestos. Hay que tener en cuenta que los dispositivos de control del polvo sólo capturan la fracción de los metales pesados y sus compuestos que está unida a las partículas. La madera tratada con conservantes que contienen cobre, cromo y arsénico también requiere una consideración especial respecto de la eficiencia del sistema de limpieza de los gases de escape. El mercurio es un metal altamente volátil que, en función de la temperatura de los gases de

- escape, se encuentra presente tanto unido a partículas como en forma de vapor en los equipos de control de la contaminación del aire (EIPPCB, 2010);
- iv) En sistemas equipados con un sistema de derivación de álcalis apropiado se pueden liberar gases de escape derivados a través de una chimenea de escape independiente o de la chimenea principal del horno. De acuerdo con el Organismo de Protección del Medio Ambiente (EPA) de los Estados Unidos (1998), se encuentran los mismos contaminantes aéreos peligrosos en las chimeneas principales y en las de derivación por álcali. Al instalar un sistema de derivación por álcali es necesario dotar también la chimenea para los gases de la derivación con un sistema adecuado de control de los gases que se emiten a la atmósfera, similar al que es obligatorio para la chimenea principal (PNUMA, 2007);
  - v) Un alto contenido en azufre en las materias primas, el combustible y los desechos puede provocar la liberación de SO<sub>2</sub>;
- c) Calidad del clínker, el cemento y el producto final:
- i) Grandes cantidades de fosfatos pueden alargar el tiempo de fraguado;
  - ii) Grandes cantidades de flúor afectarán al tiempo de fraguado y al desarrollo de la dureza;
  - iii) Grandes cantidades de cloro, azufre y álcalis afectarán a la calidad global del producto;
  - iv) El contenido de talio y cromo puede afectar negativamente a la calidad del cemento y provocar reacciones alérgicas en usuarios sensibles. El lixiviado de cromo de escombros de hormigón puede ser más frecuente que el de otros metales (Van der Sloot y otros, 2008). La piedra caliza, la arena y la arcilla contienen cromo, lo que hace que su contenido en el cemento sea inevitable y altamente variable. El Instituto Nacional Noruego de Salud Laboral (Kjuus y otros, 2003) revisó varios estudios de alergia a cromatos, especialmente los relacionados con trabajadores de la construcción, y encontró que las fuentes principales de cromo en el cemento eran las materias primas, los ladrillos refractantes del horno y los molinos de acero cromado. La contribución relativa de estos factores puede variar en función del contenido de cromo de las materias primas y de las condiciones de fabricación. Otras fuentes menos importantes incluyen los combustibles tanto convencionales como alternativos (EIPPCB, 2010). El eccema causado por el cemento puede estar provocado por la exposición a cemento húmedo con un pH alto, lo que induce la aparición de una dermatitis de contacto irritante, y por una reacción inmunológica al cromo que provoca una dermatitis de contacto alérgica (Kjuus y otros, 2003). Si existen posibilidades de contacto con la piel, no debe utilizarse ni ponerse a la venta en la Unión Europea cemento que contenga, cuando está hidratado, un porcentaje de cromo (VI) soluble mayor del 0,0002% del peso seco total del cemento, ni tampoco preparaciones de dicho cemento<sup>4</sup>. Puesto que la principal fuente de cromatos es la materia prima utilizada, para disminuir la cantidad de cromo (VI) en el cemento es necesario añadir un agente reductor al producto acabado. Los principales agentes reductores utilizados en Europa son el sulfato ferroso y el sulfato de estaño (EIPPCB, 2010).
  - v) Lixiviado de oligoelementos: Los metales pesados están presentes en todas las materias primas, tanto las convencionales como las otras. No obstante, en ciertas condiciones de análisis, las concentraciones de otros metales además del cromo en el lixiviado de hormigón pueden aproximarse a los niveles existentes en el agua potable (GTZ/Holcim, 2006).

52. No todos los desechos son aptos para el coprocesamiento. Sólo los desechos de composición, capacidad energética y valor mineral conocidos son adecuados para el coprocesamiento en los hornos

<sup>4</sup> Directiva 2003/53/CE del Parlamento Europeo y del Consejo del 18 de junio de 2003, vigesimosexta modificación de la Directiva 76/769/CEE del Consejo relativa a la limitación de la comercialización y el uso de determinadas sustancias y preparados peligrosos (nonilfenol, etoxilatos de nonilfenol y cemento).

de cemento. De igual forma, hay que tratar las cuestiones de salud y seguridad específicas de cada planta y tener en cuenta la jerarquía de gestión de desechos. Sólo debe aplicarse el coprocesamiento si se cumplen todas las condiciones previas y los requisitos tangibles de los criterios ambientales, de salud y seguridad, sociales, económicos y operativos (PNUMA, 2007).

53. Los desechos peligrosos que, en principio, son idóneos para el coprocesamiento en hornos de cemento son: lodos acumulados en el fondo de los tanques, lodos de ácido alquilo, derrames de petróleo y alquitrán ácido procedente de la refinación de petróleo, la purificación del gas natural y el tratamiento pirolítico del carbón; residuos de aceite de maquinado; residuos de aceites hidráulicos y líquidos de frenos; aceites de sentina; lodos, sólidos o emulsiones de los separadores de agua y aceite; líquidos de limpieza y licores madre, residuos indestilables y residuos de reacción de la fabricación, formulación, distribución y utilización de productos químicos orgánicos de base, plásticos, caucho sintético, fibras artificiales, tintes orgánicos, pigmentos, plaguicidas orgánicos y productos farmacéuticos; residuos de tinta; residuos de la industria fotográfica; residuos de alquitrán y otros residuos que contienen carbón procedentes de la fabricación de ánodos (termometalurgia del aluminio); residuos del desengrasado de metales y el mantenimiento de maquinaria; residuos de la limpieza de textiles y el desengrasado de productos naturales; residuos de procesos de la industria electrónica (GTZ/Holcim, 2006).

54. En principio, no se deberán procesar conjuntamente en los hornos de cemento los desechos siguientes:

- a) Desechos radiactivos o nucleares;
- b) Desechos eléctricos y electrónicos (*e-waste*);
- c) Baterías enteras;
- d) Desechos corrosivos, incluidos los ácidos minerales;
- e) Explosivos;
- f) Desechos que contengan cianuro;
- g) Desechos que contengan amianto;
- h) Desechos médicos infecciosos<sup>5</sup>;
- i) Armas químicas o biológicas destinadas a su destrucción;
- j) Desechos que contengan mercurio o estén contaminados con él;
- k) Desechos de composición desconocida o impredecible, incluyendo los desechos municipales sin clasificar.

55. Cada instalación puede excluir también otros desechos dependiendo de las circunstancias locales.

56. En general, no se recomiendan estos desechos por cuestiones de salud y seguridad, por el impacto potencialmente negativo en el funcionamiento de los hornos, la calidad del clínker y las emisiones a la atmósfera, y cuando existe alguna opción alternativa preferible de gestión de desechos. En GTZ/Holcim (2006) se puede obtener más información sobre los desechos antes mencionados.

57. La alimentación del horno con desechos que contienen mercurio o están contaminados por él debe ser evitada y mantenida en valores mínimos. En todo caso, debería establecerse un valor límite para las emisiones de mercurio, ya que limitar la cantidad de mercurio en los desechos no asegura emisiones bajas de este metal procedentes del horno.

## 2. Recuperación o eliminación de desechos distinta de la recuperación en hornos de cemento

58. Cuando determinadas corrientes de desechos que cuentan con un valor energético recuperable reúnen las condiciones técnicas requeridas, se pueden utilizar como combustible alternativo en un horno de cemento en sustitución de una parte de los combustibles convencionales. Por lo mismo, las corrientes de desechos que contienen componentes útiles como calcio, sílice, alúmina y hierro, por

<sup>5</sup> Aunque la falta de un reglamento (o de su aplicación) que rija el manejo de los desechos procedentes de la atención de la salud, en particular la segregación en la fuente, probablemente sea la causa de que muchas instalaciones no acepten este tipo de desechos por problemas de salud y seguridad, las condiciones de incineración en hornos de cemento convendrían para eliminar residuos infecciosos. En países donde la legislación sobre seguridad e higiene del trabajo lo permiten, esos desechos pueden coincinerarse en hornos de cemento.

ejemplo neumáticos gastados, pueden ser utilizados como sustitutos de materias primas como arcilla, esquisto y piedra caliza. Los desechos que reúnen ambos grupos de requisitos posiblemente sirvan para recuperar energía y materia prima al mismo tiempo.

59. Por el contrario, la combustión de desechos en un horno de cemento sin sustitución alguna, con el único propósito de destruir o transformar irreversiblemente las sustancias peligrosas de dichos desechos no debería ser considerada como una operación de recuperación<sup>6</sup>.

60. Para distinguir entre las operaciones que conducen a la recuperación de recursos y las que no lo hacen tal vez sea necesario elaborar criterios específicos para evaluar la contribución de los desechos en el proceso de producción, como se detalla en la figura I. Se han propuesto algunos enfoques que consideran, por ejemplo, el poder calorífico superior o inferior de los desechos para evaluar su valor energético, y la composición química del material (cenizas, CaO o CaCO<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> o agua) para evaluar su valor mineral (Zeevalkink, 1997; Koppejan y Zeevalkink, 2002; GTZ/Holcim, 2006). En la figura II se ofrece un ejemplo.

61. Aunque para propósitos prácticos los desechos sin valor energético o mineral no deberían tenerse en cuenta para el coprocesamiento, las altas temperaturas, los largos tiempos de residencia y las condiciones oxidantes de los hornos de cemento lo hacen posible. Ante la petición de los gobiernos nacionales o locales, se pueden utilizar los hornos para destruir o transformar irreversiblemente sustancias peligrosas en corrientes de desechos particularmente problemáticos, como las reservas de plaguicidas obsoletos. No obstante, se trata de una actividad que escapa a los objetivos del coprocesamiento y tiene que ser evaluada caso por caso y acordada de forma conjunta por las autoridades normativas y los operadores. Puede ser necesario realizar ensayos de combustión para demostrar que se cumplen los criterios de actuación.

62. Cabe señalar que los hornos de cemento son, fundamentalmente, procesadores de producción para clínker y no todas las condiciones operativas son ideales para la destrucción de sustancias peligrosas. Por ejemplo, los hornos de cemento tienden a operar a niveles inferiores de salida de oxígeno y superiores de monóxido de carbono que los incineradores de funcionamiento óptimo. El tratamiento térmico de los desechos orgánicos requiere altas temperaturas, tiempos de residencia prolongados, disponibilidad de oxígeno suficiente y una mezcla adecuada entre éste y los compuestos orgánicos. Un buen diseño y un buen funcionamiento de los hornos de cemento son decisivos para utilizarlos con este fin, de lo contrario pueden darse situaciones en los hornos de cemento en que los residuos no reciban un tratamiento adecuado, si no se introducen correctamente o los niveles de oxígeno son demasiado bajos (PNUMA, 2007).

---

<sup>6</sup> Según el Convenio de Basilea, el término "eliminación" se utiliza para referirse a las operaciones incluidas en el anexo IV.A (operaciones que no pueden conducir a la recuperación de recursos, el reciclado, la regeneración, la reutilización directa u otros usos) y en el anexo IV.B (operaciones que pueden conducir a la recuperación de recursos). No obstante, en algunos países la eliminación se refiere sólo a las operaciones especificadas en el anexo IV A, es decir, a aquellas operaciones que no conducen a ninguna forma de recuperación. La destrucción de sustancias peligrosas puede estar cubierta por las operaciones R1 o D10 del anexo IV.

Figura I  
Proceso de decisión de la admisión de desechos

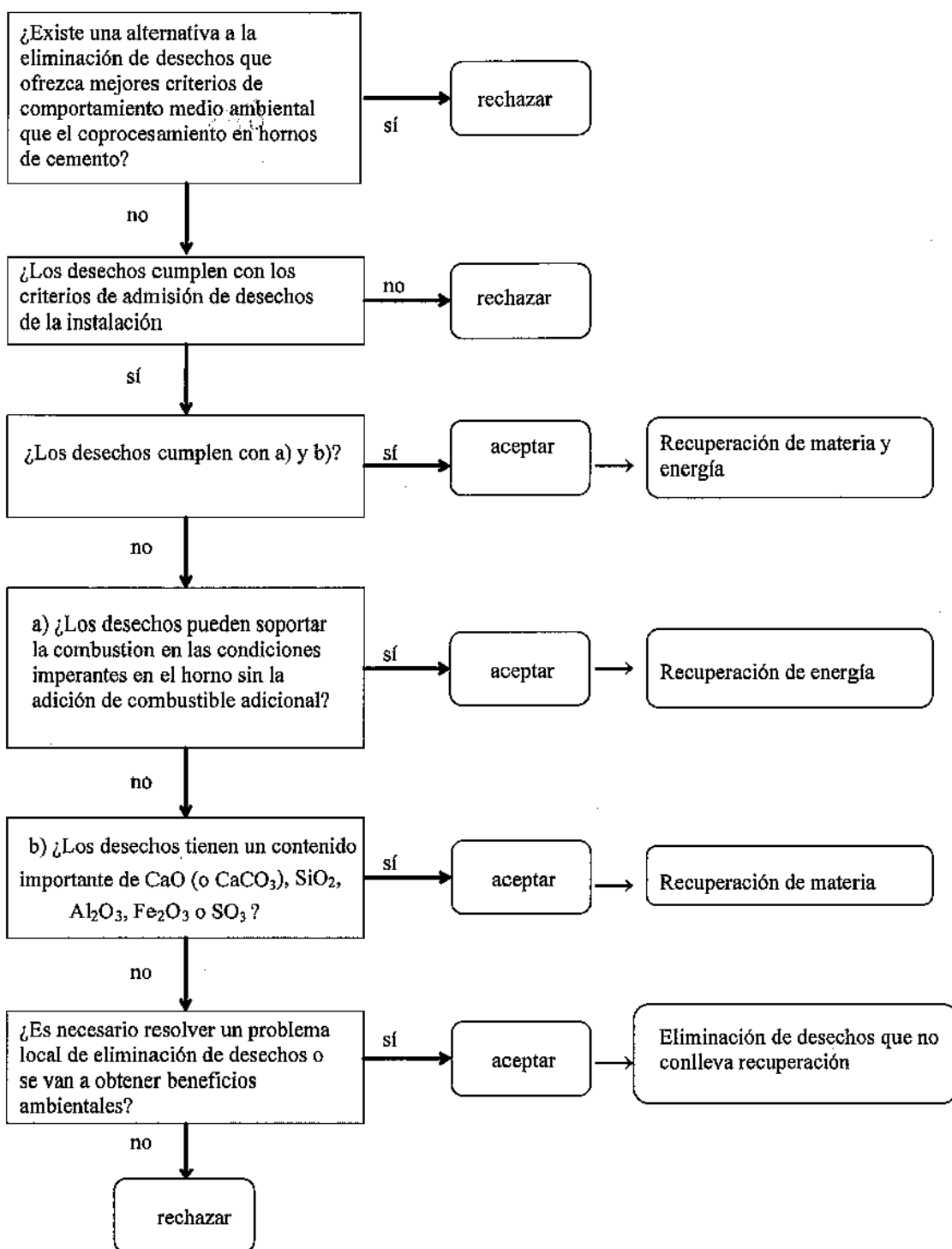
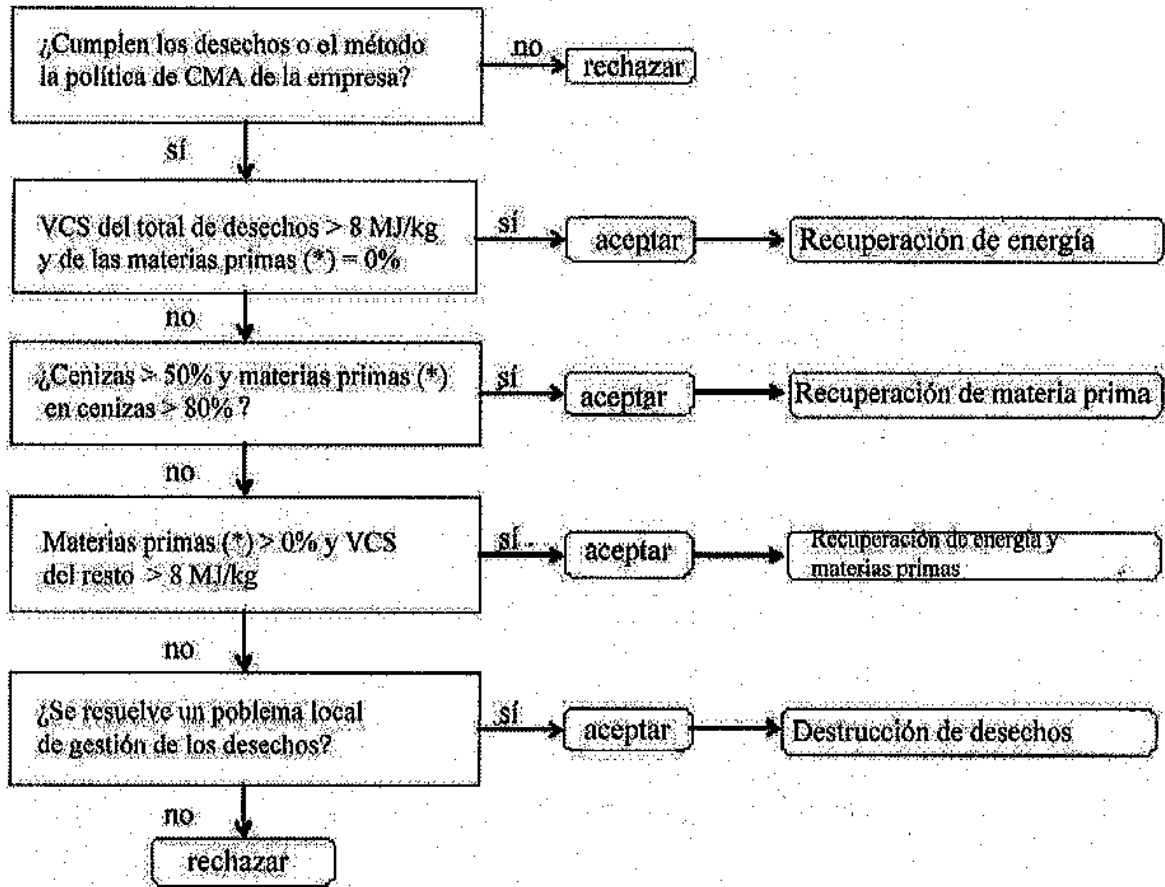


Figura II  
Ejemplo de proceso de decisión de la admisión de desechos



VCS: Valor calorífico superior  
CMA: Combustibles y materias primas alternativos  
(\*) CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SO<sub>3</sub>

Fuente: GTZ/Holcim (2006)

### 3. Eficiencia de la destrucción de sustancias orgánicas peligrosas

63. Para demostrar la destrucción de desechos COP debe realizarse ensayos de combustión verificados por entidades independientes y supervisados por profesionales (Karstensen, 2008a). Previamente, el operador deberá demostrar a las autoridades competentes que el funcionamiento de la línea de base está controlado correctamente con salvaguardias in situ frente a potenciales operaciones anómalas que dañen el medio ambiente. Hay que tener en cuenta rigurosamente los requisitos establecidos en la tabla 2.

64. Un ensayo de combustión se utiliza para determinar la eficiencia de destrucción y eliminación o la eficiencia de destrucción de la instalación, con el fin de verificar su capacidad para destruir de manera eficiente los contaminantes orgánicos persistentes de manera irreversible y ambientalmente racional. Ello conlleva la selección, el muestreo y el análisis de un constituyente orgánico peligroso principal en el flujo de desechos de alimentación para determinar sus tasas de entrada y de emisión. Un ensayo de combustión consiste generalmente en una serie de pruebas, una para cada grupo de condiciones operativas en la instalación. Normalmente se realizan tres ejecuciones por cada ensayo.

65. Durante el ensayo de combustión se establecen unos límites operativos para la máxima incorporación de desechos peligrosos y la máxima tasa de producción del horno; estos parámetros pueden afectar negativamente a la consecución de la EDE o de la eficiencia de destrucción demostradas durante las operaciones de rutina (Karstensen, 2009b). A partir del ensayo de combustión se establecen los límites autorizados para dichos parámetros.

66. El uso potencial de hornos de cemento para destruir térmicamente bifenilos policlorados (PCB) ha sido investigado en muchos países. La eficacia de destrucción y eliminación determinada a partir de varios ensayos de combustión indican que los hornos de cemento bien



diseñados y bien manejados son eficaces para destruir los bifenilos policlorados. Diversas jurisdicciones exigen una EDE del 99,9999% para los PCB (por ejemplo, según la ley estadounidense de control de sustancias tóxicas, TSCA), que podría ser utilizada como patrón indicativo para las mejores técnicas disponibles (PNUMA, 2007).

67. Una instalación debe demostrar su capacidad para destruir (mediante combustión) o para eliminar (colocando dispositivos de control de la contaminación de los conductos o del aire) al menos el 99,9999% de los compuestos orgánicos persistentes identificados. Además, en las condiciones del ensayo se debería cumplir un límite de emisión de PCDD/PCDF de 0,1 ng eqt/Nm<sup>3</sup><sup>7</sup>. También deberían cumplirse los límites de emisión existentes.

68. Un enfoque alternativo que ofrece la misma información cualitativa que los ensayos de combustión en las condiciones más desfavorables ha sido propuesto por Karstensen (2009b). En él se realiza un estudio de la línea de base de las emisiones sin alimentación de desechos peligrosos al horno. A continuación se lleva a cabo un solo ensayo para obtener datos del rendimiento de destrucción y de las emisiones contaminantes cuando se alimenta el horno con desechos peligrosos. Ambos ensayos se llevan a cabo en condiciones operativas normales, cumpliendo un límite de emisión para PCDD/PCDF de 0,1 ng eqt/Nm<sup>3</sup> y otros requisitos normativos. Se considera que este enfoque para verificar el rendimiento, junto con las disposiciones de seguridad, el control de la alimentación y los procedimientos operativos adecuados, asegura el mismo nivel de protección ambiental que la normativa actual de la Unión Europea (GTZ/Holcim, 2006). Este enfoque se utilizó para demostrar una EDE del 99,9999969% para el fenobucarb y del 99,9999832% para el fipronil en un horno de cemento en Viet Nam (Karstensen y otros, 2006).

69. En el anexo I de las presentes directrices figura una recopilación de resultados de verificaciones de rendimiento y ensayos de combustión.

### C. Garantía de calidad/control de calidad

70. Debe aplicarse un programa exhaustivo de garantía de calidad y control de calidad. El objetivo es asegurar que el producto cumple con las especificaciones estándar, que las operaciones de la planta no se ven afectadas negativamente por el uso de desechos peligrosos, garantizar la protección ambiental y reducir los riesgos para la salud y la seguridad. Es necesario contar con una garantía de calidad que asegure que todos los datos y las decisiones resultantes de dichos datos son técnicamente racionales, estadísticamente válidos y están correctamente documentados.

71. Se debe preparar un plan de garantía de calidad para asegurar que el seguimiento, el muestreo y los datos analíticos cumplen objetivos específicos de precisión, exactitud e integridad y proporcionar el marco para evaluar la calidad de los datos. El plan debe cubrir las corrientes de desechos y los materiales que se manejan en la instalación con instrucciones detalladas sobre lo siguiente:

- a) Organización y responsabilidades;
- b) Objetivos de garantía de calidad de precisión, exactitud, integridad, representatividad y comparabilidad para la medición de datos;
- c) Procedimientos de muestreo;
- d) Manejo y custodia de datos;
- e) Procedimientos analíticos;
- f) Verificaciones del control de calidad (blancos, marcadores, réplicas, etc.) y frecuencia;
- g) Control, inspección o mantenimiento de la instrumentación y los equipos;
- h) Procedimientos de calibrado de la instrumentación y los equipos y frecuencia;
- i) Revisión, verificación, validación y notificación de los datos.

72. Se debe ofrecer y mantener un diseño de laboratorio con la infraestructura, el equipamiento y el instrumental adecuados para asegurar que todos los análisis necesarios son terminados a tiempo. Se deben realizar controles periódicos del laboratorio para evaluar y mejorar su funcionamiento.

73. Hay que tener en cuenta las cuestiones de salud y seguridad para llevar a cabo el muestreo. Los empleados que vayan a realizar el muestreo deben recibir formación sobre los peligros asociados a

7 En seco, corregido al 11% de O<sub>2</sub>, 101,3 kPa y 273,15 K.

los desechos, los procedimientos de manejo, la ropa y el equipamiento de protección. El personal relacionado con las actividades de muestreo debe ser plenamente consciente de los procedimientos aplicables de garantía de calidad y control de calidad.

74. Las mejores técnicas disponibles para el control de calidad de los desechos en los procesos de fabricación de cemento se encuentran detalladas en EIPPCB (2010):

- a) Aplicar sistemas de garantía de calidad para garantizar las características de los desechos y analizar todo, para desecho que se vaya a utilizar como materia prima o combustible en un horno de cemento: mantenimiento de la calidad con el tiempo; criterios físicos, como formación de emisiones, granulosidad, reactividad, combustibilidad, poder calorífico; criterios químicos como contenido en cloro, azufre, álcali y fosfatos y contenido en metales relevantes;
- b) Controlar la cantidad de parámetros relevantes para cada desecho que se vaya a utilizar como materia prima o combustible en un horno de cemento, como el contenido en cloro, metales relevantes (por ejemplo cadmio, mercurio y talio), azufre y halógenos totales;
- c) Aplicar sistemas de garantía de calidad para cada carga de desechos.

75. Es necesario realizar auditorías internas con una frecuencia que asegure que se están utilizando procedimientos de garantía y control de calidad y que el personal los acata. Se deben llevar a cabo auditorías realizadas por terceras partes independientes al menos una vez al año o cuando sea necesario para determinar la eficacia del sistema de calidad aplicado. Los informes de las auditorías deben someterse a gestión con la obligación de corregir las deficiencias observadas.

#### **D. Aspectos de salud y seguridad**

76. La salud y la seguridad deben constituir una prioridad consciente e integrada en todos los aspectos operativos durante la gestión de desechos peligrosos. Hay que establecer de manera clara los requisitos generales y específicos del personal, la cadena de mando y las funciones y responsabilidades individuales.

77. Debe diseñarse un programa de salud y seguridad para identificar, evaluar y controlar los peligros para la salud y la seguridad, y contar con una respuesta de emergencia para las operaciones con desechos peligrosos. El contenido y el alcance de este programa deberá ser proporcionado a los tipos y grados de peligros y riesgos asociados a operaciones específicas.

78. Se debe tener a disposición la documentación e información adecuadas sobre el manejo de desechos peligrosos, los procedimientos operativos y las medidas de contingencia. La dirección de la instalación asegurará, con apertura y transparencia, que los trabajadores están completamente informados sobre las normas y las medidas de salud y seguridad. Es necesario dar con antelación instrucciones de seguridad y emergencia de fácil comprensión a los empleados y los contratistas.

79. En la UE, las mejores técnicas disponibles incluyen la aplicación de la gestión de la seguridad de los desechos peligrosos en el manejo, el almacenamiento y la alimentación de desechos peligrosos. Por ejemplo, el uso de un enfoque basado en el riesgo en función de la procedencia y el tipo de desechos para el etiquetado, el control, el muestreo y el análisis de los desechos que se van a manejar (EIPPCB, 2010).

##### **1. Análisis de riesgos**

80. Deben determinarse los riesgos y la exposición potencial a ellos y aplicarse los controles adecuados para mantener la salud y la seguridad de los empleados. Hay que identificar los riesgos que requieren el uso de equipos de protección personal. Se recomienda realizar evaluaciones como la evaluación de riesgos laborales, el análisis de la seguridad en el trabajo, estudios de seguridad, análisis de riesgos de los procesos y análisis de puestos, tareas y riesgos.

##### **2. Control de acceso y control de riesgo**

81. Para eliminar o controlar la exposición de los trabajadores a los riesgos hay que poner en funcionamiento, por orden de preferencia, lo siguiente:

- a) Técnicas de control para eliminar o aislar el peligro de manera que se evite la exposición de los trabajadores. Por ejemplo, mediante ventilación o uso de equipos de manejo del material por control remoto;
- b) Controles administrativos para gestionar el acceso de los trabajadores al peligro y establecer procedimientos de trabajo seguros. Por ejemplo, medidas de seguridad para evitar el acceso no autorizado o sin protección a los desechos peligrosos in situ;

c) Equipos de protección individual cuando los controles técnicos o administrativos no sean factibles o no eliminen completamente el peligro.

82. Estos controles están diseñados para reducir y mantener la exposición del empleado por debajo de los límites nacionales de exposición laboral. Si estos no están disponibles, hay que considerar los niveles de exposición reconocidos a nivel internacional.

83. Entre los ejemplos se incluye: el valor umbral de exposición de las directrices de exposición laboral de la American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH); la guía de bolsillo sobre peligros químicos del United States National Institute for Occupational Health and Safety (NIOSH); los límites de exposición permisibles de la Occupational Safety and Health Administration of the United States (OSHA); el valor límite indicativo de exposición profesional de los Estados miembros de la Unión Europea, y otras fuentes similares.

84. Para sustancias peligrosas y peligros para la salud para los que no existen límites de exposición permitidos o no son aplicables, los operadores pueden utilizar la bibliografía y las fichas de seguridad como orientación para determinar los niveles adecuados de protección.

### 3. Equipo de protección personal

85. Los empleados, contratistas y visitantes de una instalación deberán ir provistos de equipos de protección individual allí donde los controles técnicos no sean capaces de reducir la exposición a los límites de exposición permitidos. Los equipos de protección individual que se seleccionen deberán proteger frente a cualquier peligro presente o potencial y deberán ser apropiados para las condiciones y la duración específicas de la tarea a realizar.

86. Todo el personal implicado en operaciones con desechos peligrosos debe tener pleno conocimiento de: la selección y el uso del equipo, el mantenimiento y el almacenamiento, la descontaminación y la eliminación, la formación y la adecuación, los procedimientos de colocación y retirada, la inspección, la supervisión durante el uso, la evaluación del programa y las limitaciones del equipo.

### 4. Formación

87. Los empleados deben recibir una formación eficaz determinada por su tarea y su responsabilidad. La formación debe realizarse antes de que se les permita iniciar operaciones con desechos peligrosos que puedan exponerlos a sustancias peligrosas, o peligros para la salud y la seguridad. Las actividades de formación deben contar con un seguimiento adecuado y documentarse en términos de currículum, duración y participantes.

88. La formación debe cubrir los temas de seguridad, salud y otros peligros presentes en la instalación; uso de equipo de protección personal; prácticas laborales para reducir el riesgo de los peligros; uso seguro de los controles técnicos y el equipamiento disponible en el emplazamiento; vigilancia médica, incluyendo el reconocimiento de los síntomas y signos que pudieran indicar sobreexposición a los peligros. El personal implicado en respuestas de emergencia a peligros también deben recibir la formación adecuada.

### 5. Vigilancia médica

89. Debe ponerse en marcha un programa de seguimiento médica para evaluar y supervisar la salud de los empleados tanto antes como durante el tiempo que estén contratados. Un programa eficaz debe tener en cuenta, como mínimo, los componentes siguientes:

a) Selección previa a la contratación, para determinar la idoneidad para el puesto, incluyendo la capacidad para trabajar con el equipo de protección personal puesto, y ofrecer los datos basales para futuras exposiciones;

b) Exámenes de seguimiento médico periódico (el contenido y la frecuencia dependerán de la naturaleza del trabajo y de la exposición), para determinar las tendencias biológicas que pueden dar signos tempranos de efectos adversos para la salud crónicos;

c) Previsiones para tratamientos agudos de no emergencia y tratamientos de emergencia.

### 6. Respuesta de emergencia

90. Es necesario establecer planes y procedimientos de emergencia para la protección de los trabajadores y el público antes de empezar las operaciones con desechos peligrosos. Debe haber un plan de respuesta de emergencia preparado que asegure las medidas apropiadas para manejar posibles emergencias que se produzcan in situ y coordinar las respuestas desde el exterior. Este plan debe incluir, como mínimo:

- a) Planificación y coordinación de preemergencia con equipos de respuesta externos;
- b) Funciones del personal, líneas de autoridad, procedimientos de formación y comunicación;
- c) Procedimientos de detección y prevención de la emergencia;
- d) Distancias de seguridad y refugios;
- e) Procedimientos de seguridad y control del sitio;
- f) Rutas y procedimientos de evacuación;
- g) Mapeo del lugar destacando las áreas peligrosas, el terreno, la accesibilidad y las poblaciones exteriores o los ambientes en riesgo potencial;
- h) Procedimientos de descontaminación;
- i) Tratamiento médico de emergencia y procedimientos de primeros auxilios;
- j) Equipos de protección individual y de emergencia en la instalación;
- k) Procedimientos de alerta y respuesta de emergencia;
- l) Documentación y notificación a las autoridades locales;
- m) Procedimientos de crítica de la respuesta y de seguimiento.

91. El equipo de emergencia, como los extintores, los aparatos de respiración autónoma, sorbentes y kits para la prevención de derrames, y las duchas y las fuentes para el lavado de los ojos deben estar situados en las proximidades inmediatas de las zonas de almacenamiento y procesamiento de los desechos peligrosos.

92. Los procedimientos del plan de emergencia deben practicarse con regularidad mediante ensayos y simulacros, y revisarse periódicamente en respuesta a nuevas condiciones o informaciones.

93. Hay que establecer acuerdos para familiarizar a las autoridades locales y los equipos de respuesta de emergencia con el diseño de la instalación; las propiedades de los desechos peligrosos que se manejan en ella y los peligros asociados; los lugares en los que normalmente trabaja el personal; las entradas a la instalación y las posibles rutas de evacuación. Los acuerdos establecidos con las autoridades locales, los hospitales y los equipos de respuesta de emergencia deben estar descritos en el plan de respuesta de emergencia.

## **E. Comunicaciones e implicación de los interesados**

94. Los interesados son aquéllos que se ven a sí mismos como potencialmente afectados por el funcionamiento de una instalación. Pueden ser individuos o grupos a escala local, nacional o internacional, e incluyen vecindarios, organizaciones comunitarias, empleados, sindicatos, entes públicos, medios de comunicación, organizaciones no gubernamentales, contratistas, proveedores e inversores.

95. La comunicación pública consiste en aportar información a través de los medios de comunicación entre los que se incluyen folletos, páginas web, periódicos, radio y televisión. La implicación de los interesados está relacionada con los miembros de la comunidad y otros con algún interés en la instalación a través de reuniones públicas, presentaciones, comités asesores y enfoques personales. Ambos elementos deben formar parte de las operaciones normales de una planta.

96. Las instalaciones deben tener objetivos claros para trabajar con los interesados. Esto incluye una escala temporal realista para los compromisos, la asignación de los recursos necesarios y la voluntad de obtener resultados que sean beneficiosos para ambas partes. En U.S. EPA (1996), Hund y otros (2002), y The Environment Council (2007), entre otros, se puede encontrar información para el diseño y el desarrollo de un plan de comunicaciones e implicación de los interesados.

97. Los operadores y los organismos de regulación deben estar preparados para gestionar las preocupaciones públicas sobre posibles impactos del coprocesamiento y esforzarse por establecer métodos eficientes de comunicación para explicar las actividades que se realizan. Los operadores que planeen utilizar desechos peligrosos deberán proporcionar toda la información necesaria para que los interesados entiendan el uso de los desechos en los hornos de cemento y deberán también ilustrar las medidas que se tomarán para evitar efectos adversos.

## IV. Aceptación y preprocesamiento ambientalmente racional de los desechos

### A. Introducción

98. Debido a la heterogeneidad de los desechos, es necesario realizar un preprocesamiento con el fin de producir un flujo de desechos relativamente uniforme para su coprocesamiento en hornos de cemento. Este flujo de desechos debe cumplir con los requisitos técnicos y administrativos de la fabricación del cemento y garantizar que se cumplen las normas medioambientales<sup>8</sup>. En algunos casos, como los aceites o los neumáticos usados, los desechos se pueden utilizar tal y como se entregan, sin preprocesamiento.

99. Hay que poner atención en la selección de materiales de desecho adecuados si se recogen directamente de los generadores o a través de intermediarios. Los operadores deben asegurar que sólo se aceptan desechos peligrosos procedentes de Partes fiables, y que las entregas de desechos inadecuados son rechazadas.

100. Hay que asegurarse debidamente de la integridad de todos los participantes de la cadena de suministro. Por ejemplo, sólo se deben utilizar compañías de transporte autorizadas y con licencia con el fin de evitar accidentes e incidentes a causa de la incompatibilidad de desechos mal etiquetados o mal caracterizados para mezclarse o almacenarse conjuntamente.

101. Estas recomendaciones sólo ofrecen indicaciones generales. Los requisitos de manejo específicos deben determinarse en función de las características químicas y biológicas de las corrientes de desechos concretos, los efectos para la salud y el ambiente, la seguridad del personal y el cumplimiento con los requisitos de autorización y las normativas locales.

### B. Aceptación de los desechos

102. Para asegurar que los desechos cumplan los requisitos de los permisos de la instalación y que no afectarán negativamente al proceso es necesario un conocimiento previo de la naturaleza de dichos desechos. Por ejemplo, para evitar cualquier problema de funcionamiento del horno, es necesario realizar una evaluación cuidadosa del impacto de los desechos peligrosos en la cantidad total de elementos volátiles circulantes, como el cloro, el azufre o los álcalis, antes de su aceptación. Cada instalación deberá establecer sus criterios de aceptación específicos para estos componentes en función del tipo de proceso y las condiciones específicas del horno.

103. En la mayoría de las circunstancias, los generadores de desechos peligrosos deben conocer la composición, la naturaleza y los problemas asociados con sus desechos, y asegurar que se transmita toda la información pertinente a los que participan en su manejo posterior.

104. La aceptación de desechos y desechos peligrosos tiene dos etapas: preaceptación (o cribado) y aceptación in situ. La preaceptación implica la provisión de información y muestras representativas de los desechos para permitir a los operadores que determinen la idoneidad antes de establecer acuerdos para su aceptación. La segunda etapa implica procedimientos a realizar cuando los desechos llegan a la instalación para confirmar las características aprobadas previamente.

105. El hecho de no realizar un cribado adecuado de las muestras de los desechos antes de su aceptación y una confirmación de su composición a la llegada a la instalación puede provocar problemas posteriores. Se podría producir un almacenamiento inapropiado, un mezclado de sustancias incompatibles y una acumulación de desechos.

#### 1. Preaceptación

106. Un protocolo de preaceptación o de cribado previo al envío debe asegurar que sólo se aprueban las corrientes de desechos que hayan sido manejadas correctamente y de forma segura para su envío a la instalación. Este protocolo es necesario para:

- a) Asegurar el cumplimiento de la normativa eliminando desechos inadecuados;
- b) Confirmar los detalles relativos a su composición e identificar los parámetros de verificación que se pueden utilizar para analizar los desechos que lleguen a la instalación;

<sup>8</sup> El preprocesamiento debe llevarse a cabo porque es un requisito técnico para que el operador del horno de cemento garantice una alimentación homogénea y estable y no eluda los procedimientos de aceptación de desechos.

c) Identificar cualquier sustancia presente en los desechos que pueda afectar a su procesamiento o reaccionar con otros reactivos;

d) Definir de manera precisa el rango de peligros que presentan los desechos.

107. El operador deberá obtener información acerca de la naturaleza del proceso de producción de los desechos, incluyendo su variabilidad. Otras descripciones necesarias incluyen: composición (componentes químicos presentes y concentración de cada uno de ellos); requisitos de manejo y peligros asociados; cantidad y forma de los desechos (sólido, líquido, lodo, etc.); almacenamiento de las muestras y técnicas de conservación. En el mejor de los casos, la información debería ser ofrecida por los generadores de los desechos. Alternativamente, se deberá considerar un sistema de verificación de la información ofrecida por algún intermediario.

108. Se debe disponer de un sistema para la distribución y el análisis de muestras representativas de los desechos. Un técnico competente será el encargado de tomar las muestras de desechos, y los análisis se llevarán a cabo en un laboratorio, preferiblemente uno acreditado con métodos fiables de garantía y control de calidad y mantenimiento de los registros, y es conveniente contar con un procedimiento de cadena de custodia. El operador deberá llevar a cabo una caracterización exhaustiva (descripción del perfil) y un ensayo relacionado con el procesamiento programado para cada nuevo residuo. No deberá aceptarse ningún residuo que no haya sido sometido a muestreo y ensayo. La excepción son los productos no utilizados, caducados o que no respondan a las especificaciones y que no estén contaminados, que dispongan de ficha de datos de seguridad o de ficha técnica.

109. Deberá prepararse y mantenerse un plan de análisis de desechos con el fin de documentar los procedimientos utilizados para obtener una muestra representativa de los desechos y realizar en ella un análisis químico y físico detallado. Un plan de análisis de desechos deberá incluir las medidas utilizadas para identificar los desechos incompatibles y potencialmente reactivos<sup>9</sup>. Asimismo, deberá incluir el análisis de una muestra representativa para cualificar el residuo en la instalación (preaceptación) y verificar sus constituyentes (aceptación). Deberán realizarse análisis adicionales de muestras tomadas durante o después del preprocesamiento o el mezclado de los desechos para verificar la calidad del flujo resultante.

110. Los operadores deberán asegurar que la valoración técnica es llevada a cabo por personal cualificado y experimentado que entiende las posibilidades funcionales de la instalación.

111. Los registros de preaceptación se deben guardar en la instalación para realizar referencias cruzadas y verificaciones en la etapa de aceptación de los desechos. La información debe ser registrada y referenciada, estar disponible en cualquier momento, revisarse con regularidad y mantenerse actualizada con todos los cambios que sufra el flujo de desechos.

## 2. Aceptación in situ

112. La verificación y el análisis in situ deberían confirmar las características de los desechos descritas en la información de preaceptación. Los procedimientos de aceptación deben incluir:

a) La llegada de los desechos preaprobados al lugar, como un sistema de prereserva para asegurar que se dispone de la capacidad suficiente;

b) Control del tráfico;

c) Comprobación de los documentos que llegan con la carga;

d) Inspección de la carga, muestreo y ensayos;

e) Rechazo de desechos y procedimientos de notificación de las discrepancias;

f) Registro;

g) Revisión periódica de la información de preaceptación.

113. No se debe aceptar desechos sin información escrita detallada en la que se identifique la fuente, la composición y los niveles de peligro.

114. Si las instalaciones proporcionan un servicio de emergencia como la eliminación de vertidos o de desechos peligrosos en vertederos ilegales, pueden producirse situaciones en los que el operador sea

<sup>9</sup> El documento de la EPA "A Method of Determining the Compatibility of Hazardous Wastes" (EPA-600/2-80-076) contiene procedimientos para evaluar cualitativamente la compatibilidad de varias categorías de desechos.

incapaz de seguir los procedimientos establecidos de preaceptación o de aceptación. En esos casos, el operador deberá comunicar inmediatamente el hecho a las autoridades competentes.

a) **Llegada**

115. Si existe suficiente capacidad de almacenamiento y la instalación está gestionada adecuadamente, el personal bien cualificado y con la formación apropiada supervisará la recepción de los desechos peligrosos. Todos los desechos recibidos deberán ser tratados como desconocidos y peligrosos hasta que se haya verificado positivamente el cumplimiento de las especificaciones.

116. Los desechos peligrosos deberán ir acompañados de una descripción adecuada en la que se incluya: nombre y dirección del generador; nombre y dirección del transportista; clasificación y descripción de los desechos; volumen y peso; peligros de los desechos como inflamabilidad, reactividad, toxicidad o corrosividad.

117. La documentación que acompaña el envío deberá ser revisada y aprobada, incluyendo el manifiesto de desechos peligrosos, si procede. Cualquier discrepancia deberá resolverse antes de aceptar los desechos. Si no es posible resolver las discrepancias, los desechos deberán rechazarse y devolverse a su generador original o, si así lo solicita, a una instalación alternativa.

118. Cuando sea posible, las cargas de desechos deberán inspeccionarse visualmente. Todos los contenedores deberán ir claramente etiquetados según las normativas aplicables para el transporte de bienes peligrosos y se deberá contrastar la cantidad contenida con la documentación que los acompañan. Deberán estar equipados con tapas herméticas, recubrimientos y válvulas seguros y en su lugar, y revisados en busca de fugas, agujeros y corrosión. Todo contenedor o bidón dañado, corroído o sin etiquetar se clasificará como 'no conforme' y tratado en consecuencia.

119. Todas las cargas entrantes deberán pesarse, a menos que se disponga de sistemas volumétricos alternativos fiables asociados a datos del peso específico.

b) **Inspección**

120. Sólo se aceptarán los desechos en la instalación tras una exhaustiva inspección. No es aceptable confiar únicamente en la información escrita suministrada. Hay que llevar a cabo una verificación física y una confirmación analítica para asegurarse de que los desechos cumplen con las especificaciones de los permisos y los requisitos normativos. A todos los desechos, ya vayan a ser procesados o almacenados, se les deberá realizar un muestreo, una verificación y un ensayo según la frecuencia y el protocolo definido en el plan de análisis de desechos, excepto en el caso de los productos no utilizados, caducados, que no respondan a las especificaciones o no contaminados.

121. La verificación y el ensayo in situ deberán realizarse para confirmar:

- a) La identidad y descripción de los desechos;
- b) La fidelidad de la información de preaceptación;
- c) La conformidad con la autorización de la instalación.

122. Las técnicas de inspección van desde la simple evaluación visual hasta el análisis químico completo. El grado de los procedimientos adoptados dependerá de la composición y la variación químicas y físicas de los desechos; las dificultades conocidas con determinados tipos de desechos o de un determinado origen; la sensibilidad específica de la instalación en cuestión (por ejemplo, hay algunas sustancias de las que se sabe que causan dificultades operativas), y la existencia o la ausencia de una especificación de control de calidad para los desechos, entre otros (Karstensen, 2008a).

123. La instalación deberá contar con un área destinada al muestreo o la recepción en la que se descarguen los contenedores de desechos si existe un espacio adecuado y el almacenamiento temporal para su posterior muestreo y análisis. Los desechos deberán ser clasificados inmediatamente con el fin de eliminar posibles daños debidos a incompatibilidades. En condiciones ideales el muestreo debería tener lugar dentro de las 24 horas siguientes a la descarga. Durante este periodo los desechos peligrosos no deberán agruparse, combinarse o mezclarse de ninguna manera. Los desechos a granel deberán ser inspeccionados y aceptados para su procesamiento antes de ser descargados.

124. El muestreo deberá cumplir con la legislación nacional específica, si existe, o con las normas internacionales. El muestreo estará supervisado por el personal del laboratorio y, en aquellos países en los que no existe normativa, se designará a personal cualificado. El muestreo deberá incluir procedimientos bien establecidos como los desarrollados por la American Society for Testing and Materials (ASTM), el Comité Europeo de Normalización (CEN) y la Agencia de Protección del Medio

Ambiente de los Estados Unidos (EPA). Se debe mantener un registro del régimen de muestreo para cada carga y justificar la opción seleccionada.

125. Las muestras deberán ser analizadas por un laboratorio con un programa sólido de garantía y control de calidad que incluya, entre otras cosas, un registro adecuado y evaluaciones independientes. Los análisis deben realizarse en el tiempo requerido por los procedimientos de la instalación. En el caso de los desechos peligrosos esto implica, generalmente, que el laboratorio esté in situ.

126. Normalmente, los desechos serán muestreados y analizados en busca de unos pocos parámetros químicos y físicos fundamentales (análisis del perfil) para corroborar la composición que se ha detallado en el manifiesto que acompaña los desechos o en otros documentos. La selección de los parámetros fundamentales deberá estar basada en un conocimiento adecuado del perfil de los desechos y en los datos del ensayo para asegurar una representación precisa. Para seleccionar los parámetros del perfil se deberán tener en cuenta aquéllos que: identifican desechos no permitidos; determinan la idoneidad dentro de los límites de aceptación operativa de la instalación; identifican la reactividad potencial o la incompatibilidad; indican cualquier cambio en la composición que se haya producido durante el transporte o el almacenamiento. En caso de que los resultados del análisis del perfil de un flujo de desechos determinado cayeran fuera de los límites de tolerancia establecidos, dichos desechos podrán ser evaluados de nuevo para su posible aceptación con el fin de evitar movimientos innecesarios de ida y vuelta de los desechos entre el generador y la instalación. La reevaluación deberá tener en cuenta las condiciones de almacenamiento y procesamiento de la instalación; el análisis de los parámetros adicionales que el operador considere adecuado y estén establecidos en el plan de análisis de residuos, y los requisitos para la obtención de la autorización.

127. El esquema de la inspección puede incluir: la evaluación de los parámetros de combustión; los ensayos de combinación de desechos líquidos antes de su almacenamiento; el control del punto de inflamación, y el cribado de los desechos en el punto de alimentación en función de su composición elemental mediante técnicas apropiadas como la del plasma acoplado inductivamente, la fluorescencia de rayos X y otras, en función de los tipos y las características de los desechos y los criterios de aceptación de desechos de la instalación (Karstensen, 2008a).

128. Los desechos se trasladarán a la zona de almacenamiento sólo tras haber sido aceptados. En caso de que la inspección o el análisis indique el incumplimiento de los criterios de aceptación, incluyendo bidones dañados o sin etiquetar, dichas cargas deberán almacenarse en un área de cuarentena, asignada para el almacenamiento de los desechos no conformes, y tratadas convenientemente.

129. Todas las zonas en las que se manejen desechos deberán tener una superficie impermeable con un sistema estanco de drenaje. Es necesario asegurarse de que las sustancias incompatibles no entran en contacto como consecuencia de vertidos de las muestras, por ejemplo instalando un sumidero en el punto de muestreo. Deberá haber absorbentes a disposición.

130. De acuerdo con la legislación y las prácticas nacionales, hay que tomar las precauciones adecuadas para verificar que los desechos recibidos no son radiactivos, por ejemplo mediante el uso de detectores de centelleo plástico.

131. Tras su aceptación, los contenedores con los desechos peligrosos deben etiquetarse con la fecha de llegada y el tipo de peligro principal. Si los contenedores contienen desechos a granel, en el exterior deberán exhibir la fecha de llegada de los desechos más antiguos. Cada contenedor deberá tener un número de referencia único para su seguimiento en la planta.

### 3. Desechos no conformes

132. El operador deberá tener criterios claros e inequívocos para el rechazo de los desechos, incluyendo aquellos desechos que no cumplen con los criterios de aceptación y los bidones dañados, corroídos o sin etiquetar. Los procedimientos escritos para el seguimiento y el informe de dichas disconformidades deberán incluir la notificación al cliente o generador de los desechos y a las autoridades competentes.

133. El operador deberá seguir también una política clara e inequívoca para el almacenamiento consiguiente, en la que se incluya un volumen máximo de almacenamiento y la eliminación de los desechos rechazados. Esta política deberá estar destinada a conseguir los objetivos siguientes:

- a) Identificar los peligros que comportan los desechos rechazados;
- b) Etiquetar los desechos rechazados con toda la información necesaria para permitir que se apliquen las disposiciones adecuadas para su almacenamiento y separación;



c) Separar y almacenar de manera segura los desechos rechazados a la espera de su eliminación en no más de cinco días, si es posible.

134. Los desechos que no cumplan los criterios de aceptación de la planta deberán devolverse al generador, a menos que se alcance un acuerdo con él para enviar dichos desechos a un destino alternativo autorizado.

#### 4. Sistema de seguimiento en planta

135. Debe existir un sistema interno de seguimiento de los desechos y control de existencias desde la etapa de preaceptación, con el fin de garantizar la trazabilidad del procesamiento de los desechos y que permita al operador:

- a) Preparar la mezcla más adecuada de desechos;
- b) Evitar reacciones no deseadas o inesperadas;
- c) Asegurar que se evitan o se reducen las emisiones;
- d) Gestionar el rendimiento de los desechos.

136. El sistema de seguimiento, que puede ser en papel, electrónico o una combinación de ambos, deberá seguir el rastro de los desechos durante su aceptación, almacenamiento, procesamiento y eliminación fuera del emplazamiento. El operador deberá poder identificar en todo momento la ubicación de un residuo específico en la instalación y el tiempo que ha estado allí. Los registros se guardarán en una zona alejada de las actividades peligrosas para asegurar su accesibilidad durante una emergencia.

137. Una vez que los desechos hayan sido almacenados a granel o hayan entrado en un proceso de tratamiento, dejará de ser posible su seguimiento individual. No obstante, los registros se mantendrán con el fin de asegurar que se dispone de la información suficiente como para saber qué desechos han entrado en una instalación de almacenamiento concreta. Así, por ejemplo, para evitar incompatibilidades con nuevos desechos entrantes, es necesario mantener el rastro de los residuos que se acumulan en un recipiente entre operaciones de desentlodado.

138. Para los desechos líquidos, el control de existencias debe incluir el mantenimiento de un registro de la ruta recorrida durante el proceso. Los desechos en bidones deben ir etiquetados individualmente con el fin de registrar la ubicación y la duración del almacenamiento.

139. El sistema de seguimiento de los desechos en planta debe incluir un registro completo generado durante la preaceptación, la aceptación, el almacenamiento, el procesamiento y la eliminación fuera del emplazamiento. Los registros deben mantenerse actualizados para reflejar las entregas, los tratamientos in situ y los envíos. El sistema de seguimiento debe funcionar como inventario de desechos, sistema de control de existencias e incluir, como mínimo:

- a) Un número de referencia único;
- b) Detalles sobre el generador de desechos y los intermediarios;
- c) La fecha de llegada a la instalación;
- d) Los resultados de los análisis de preaceptación y aceptación;
- e) El tipo y tamaño del contenedor;
- f) La naturaleza y cantidad de los desechos, incluyendo la identificación de los peligros asociados;
- g) Detalles acerca del emplazamiento físico de los desechos;
- h) La identificación del personal que ha adoptado las decisiones sobre la aceptación o el rechazo de los desechos.

140. El sistema adoptado deberá estar estructurado para informar acerca de:

- a) La cantidad total de desechos presentes en la instalación en cada momento, en las unidades adecuadas;
- b) La reducción de la cantidad de desechos almacenados a la espera de su procesamiento in situ;
- c) La reducción de la cantidad de desechos in situ simplemente almacenados, esto es, a la espera de su transferencia;

- d) La reducción de la cantidad de desechos por clasificación de peligros;
- e) La ubicación de los desechos en un plano de la instalación;
- f) La comparación de la cantidad existente frente al total permitido;
- g) La comparación del tiempo que los desechos están en la instalación con el límite permitido.

### C. Almacenamiento y manejo de los desechos

141. Una vez decidida la idoneidad de los desechos, el operador deberá contar con sistemas y procedimientos en la instalación para transferirlos de manera segura al lugar de almacenamiento adecuado.

142. Las consideraciones para el almacenamiento en la instalación deben incluir:

- a) La ubicación de las zonas de almacenamiento;
- b) La infraestructura de la zona de almacenamiento;
- c) El estado de los depósitos, los bidones, los recipientes y el resto de contenedores;
- d) El control de las existencias;
- e) El almacenamiento separado;
- f) La seguridad de la planta;
- g) El riesgo de incendio.

143. También se puede encontrar información útil sobre el almacenamiento de desechos en el BREF para industrias de tratamiento de desechos (EIPPCB, 2006).

#### 1. Consideraciones sobre el diseño

144. Las zonas de transferencia y almacenamiento deben estar diseñadas para gestionar vertidos accidentales. Para ello puede ser necesario:

- a) Para evitar que los vertidos se esparzan o se filtren por el suelo, las zonas de almacenamiento deben tener límites adecuados y ser adecuadamente estancas, impermeables y resistentes a los materiales de desecho almacenados;
- b) Todos los vertidos deberán recogerse, colocarse en un contenedor adecuado y almacenarse para su eliminación en el horno;
- c) Si se produce un vertido, es necesario evitar que se mezclen desechos incompatibles;
- d) Todas las conexiones entre tanques tienen que poder cerrarse mediante válvulas. Las tuberías de desagüe deben estar dirigidas hacia un sistema de drenaje cerrado como una zona acotada u otro recipiente;
- e) Se debe instalar equipos y accesorios sin fugas lo antes posible;
- f) Se debe adoptar medidas para detectar fugas y emprender las acciones correctoras correspondientes;
- g) Hay que evitar que las escorrentías contaminadas entren en las alcantarillas pluviales y en los cursos de agua. Hay que recoger cualquier escorrentía y almacenarla para su eliminación en el horno;
- h) Hay que proporcionar las alarmas adecuadas para las condiciones anómalas.

145. El diseño del almacén deberá ser adecuado para mantener la calidad de los desechos durante todo el período de almacenamiento. Debe existir un sistema de almacenamiento separado para evitar incidentes causados por desechos incompatibles y con el fin de que, en caso de producirse un accidente, éste no se intensifique. Los requisitos de almacenamiento individual en una instalación concreta dependerán de una evaluación de riesgos completa.

146. En cada instalación, las características específicas de la zona de almacenamiento deben reflejar las propiedades de los desechos que suponen el mayor riesgo que se puede asumir. En general, los criterios de almacenamiento deben tener en cuenta la naturaleza y composición desconocidas de los desechos, ya que esto puede dar lugar a riesgos e incertezas adicionales. En muchos casos, esta incerteza significa la aplicación de sistemas de especificación más rigurosos para el almacenamiento de los desechos que para el de las materias primas bien caracterizadas.

147. Los desechos almacenados en contenedores deben guardarse a cubierto, protegidos del calor, la luz del sol directa y la lluvia, a menos que se sepa que no se ven afectados por estas condiciones ambientales.
148. Para los desechos almacenados en contenedores, se debe utilizar un diseño que evite la acumulación de desechos peligrosos más allá del tiempo permitido de almacenamiento. Para los desechos líquidos hay que considerar la posibilidad de mezclarlos o agitarlos para evitar la precipitación de sólidos. Puede ser necesario homogeneizar el contenido de los tanques con agitadores mecánicos o hidráulicos. Dependiendo de las características de los desechos, algunos tanques pueden tener que ser calentados y aislados.
149. La construcción, la selección de materiales y el diseño de los equipos como tanques, tuberías, válvulas y cierres deben ser adecuados para las características de los desechos. Todos ellos deberán estar hechos a prueba de corrosión y ofrecer la opción de limpieza y muestreo.
150. Debe proveerse una ventilación adecuada de acuerdo con las directrices aplicables de exposición laboral. En el caso de desechos de almacenamiento en abierto que puedan emitir compuestos orgánicos volátiles hay que realizar un seguimiento periódico.
151. La instalación debe disponer de un sistema de protección frente a incendios aprobado por las autoridades locales, por ejemplo el cuerpo de bomberos local. En las zonas de almacenamiento de desechos se deben utilizar sistemas automáticos de detección de incendios, así como para los filtros de tela y los precipitadores electrostáticos, las salas de control y otras zonas de riesgo determinadas. Las mediciones continuas y automáticas de la temperatura de la superficie de los desechos en las fosas de almacenamiento se pueden utilizar para activar una alarma acústica que indique variaciones de temperatura.
152. Los sistemas automáticos de supresión de fuego se utilizarán cuando se almacenen desechos líquidos inflamables y en otras áreas de riesgo. Los sistemas de control de espuma y dióxido de carbono resultan ventajosos en algunas circunstancias como el almacenamiento de líquidos inflamables. Los sistemas de agua con monitores, cañones de agua con opción de agua o espuma y los sistemas de polvo seco son de uso frecuente.

## 2. Consideraciones sobre el funcionamiento

153. La instalación debe disponer de instrucciones y procedimientos escritos para la descarga, el manejo y el almacenamiento de los desechos in situ. Se debe asegurar que los desechos químicamente incompatibles son separados. Se deben realizar auditorías sobre su cumplimiento de manera regular.
154. Con el fin de evitar la necesidad del manejo y la transferencia adicionales, los desechos peligrosos deben almacenarse en los mismos contenedores (bidones) en que fueron entregados.
155. Las rutas diseñadas para los vehículos que transportan desechos peligrosos específicos deben estar claramente identificadas en la planta. El transporte in situ debe minimizar los riesgos para la salud de los empleados, el público y el ambiente. El operador debe asegurar que los vehículos son adecuados a los objetivos en lo que respecta al cumplimiento de la normativa relevante.
156. Todas las cargas deben estar correctamente identificadas, separadas en función de su compatibilidad (de manera que cualquier vertido potencial no cree un peligro químico para la seguridad), y aseguradas para evitar movimientos o deslizamientos durante el transporte. El personal debe contar con una dirección y una formación adecuadas para utilizar el equipo solamente como se debe y no superar la capacidad estimada de contenedores, vehículos y otros elementos.
157. Los almacenes, las reservas de existencias y la ubicación de los tanques deben disponer de las indicaciones apropiadas que adviertan de la naturaleza de los desechos peligrosos.
158. Los contenedores deberán mantenerse en buenas condiciones, sin abolladuras, fugas ni protuberancias, y cerrados cuando no se estén utilizando. Las zonas de almacenamiento de contenedores deben someterse a inspecciones semanales como mínimo.
159. El trabajo de mantenimiento debe estar autorizado por la dirección de la planta, y se realizará una vez que el área haya sido inspeccionada por un supervisor y se hayan adoptado todas las precauciones necesarias. Deben aportarse procedimientos especiales, instrucciones y formación para operaciones rutinarias como:
- a) Trabajos verticales, incluyendo las prácticas de amarre y el uso de los arneses de seguridad;
  - b) Entrada en espacios confinados en los que puede existir mala calidad del aire, mezclas explosivas, polvo u otros peligros;

c) Bloqueo eléctrico para evitar la reactivación accidental del equipo en el que se están realizando tareas de mantenimiento;

d) Trabajos con calor (soldadura, corte, etc.) en áreas que pueden contener materiales inflamables.

160. Las medidas de seguridad que hay que considerar incluyen:

a) Hay que evitar colocar materiales combustibles incontrolados en zonas de almacenamiento;

b) En caso de existir un riesgo que no ha sido evitado ni controlado, es necesario colocar signos de seguridad y de información;

c) Las zonas de trabajo deben disponer de duchas de emergencia y fuentes para el lavado de los ojos para su uso inmediato en casos de emergencia tras la exposición a desechos peligrosos. Hay que tener en cuenta la posible necesidad de múltiples duchas de emergencia en función de la distancia al acceso y la posibilidad de que más de una persona se vea afectada al mismo tiempo;

d) Se debe disponer de alarmas para alertar al personal de las situaciones de emergencia;

e) Los equipos de comunicación in situ deben someterse a mantenimiento, de manera que en caso de incendio se pueda contactar inmediatamente con la sala de control y el cuerpo de bomberos;

f) El equipo eléctrico debe tener toma de tierra y dispositivos antiestáticos adecuados.

#### D. Preprocesamiento de los desechos

161. Con el fin de no menoscabar el funcionamiento normal del horno, la calidad del producto o el comportamiento medioambiental habitual de la instalación, los desechos utilizados en los hornos de cemento deberán ser homogéneos, tener un tamaño de partícula compatible, una composición química y un contenido de calor estables. Para que el funcionamiento del horno sea óptimo, las corrientes de desechos deben ser muy uniformes tanto cualitativa como cuantitativamente. Para determinados tipos de desechos, esto sólo se puede conseguir sometiéndolos a preprocesamiento.

162. El preprocesamiento incluye el secado, la trituración, la molienda o el mezclado dependiendo del tipo de desecho. Normalmente se lleva a cabo en una instalación específica, que puede estar situada fuera o dentro de la planta de cemento.

163. Los combustibles procedentes de los desechos líquidos se preparan normalmente mezclando productos diferentes con el poder calorífico y la química adecuados, como disolventes o aceites usados. Generalmente sólo es necesario un pretratamiento simple como la eliminación de los residuos, los sedimentos y el agua. En algunos casos como los aceites y las emulsiones de maquinaria son necesarios procesos químicos para eliminar contaminantes y aditivos químicos. El grado de procesamiento de los desechos sólidos, como la clasificación, la trituración o la granulación, depende de la aplicación específica.

##### 1. Consideraciones sobre el diseño

164. El diseño de la instalación debe realizarse concienzudamente para asegurar el acceso a las operaciones diarias, las rutas de escape de emergencia y la mantenibilidad de la planta y el equipamiento.

165. Se deben aplicar parámetros reconocidos al diseño de las instalaciones y el equipamiento. Cualquier modificación deberá estar documentada.

166. Deben realizarse evaluaciones de salud y seguridad en las operaciones para asegurar la seguridad del equipamiento y reducir los riesgos de poner en peligro a la gente y a las instalaciones o de dañar el ambiente. Se deben utilizar los procedimientos apropiados para evaluar los riesgos o los peligros de cada etapa del proceso de diseño. Únicamente personal competente y cualificado deberá realizar o revisar dichos estudios de riesgo y operatividad.

##### 2. Consideraciones sobre el funcionamiento

167. Si bien la mezcla y la homogeneización de los desechos pueden mejorar su comportamiento durante la alimentación y la combustión, pueden implicar riesgos y deben llevarse a cabo siguiendo una preparación establecida.

168. Las técnicas utilizadas para el preprocesamiento y el mezclado son variadas, y pueden incluir:

a) Mezclado y homogeneización de desechos líquidos para adecuarse a los requisitos de alimentación como la viscosidad, la composición o el poder calorífico;

b) Troceado, triturado y cizallamiento de los desechos empaquetados y los desechos combustibles a granel;

c) Mezcla de desechos en una fosa de almacenamiento o un recinto similar mediante un tractor con cuchara o alguna otra máquina.

169. Los operadores de las grúas deben ser capaces de identificar cargas potencialmente problemáticas, como fardos de desechos y artículos sueltos que no pueden mezclarse o que podrían causar problemas de carga y de alimentación. Estas cargas pueden ser eliminadas, trituradas o directamente mezcladas (del modo apropiado) con otros desechos.

170. Se debe aplicar orden y limpieza generales para mejorar el ambiente de trabajo y facilitar la identificación de problemas operativos con antelación. Los elementos principales son:

a) Sistemas de identificación, localización y almacenamiento de los desechos recibidos de acuerdo con sus riesgos;

b) Prevención de emisiones de polvo desde los equipos en funcionamiento;

c) Gestión eficaz de las aguas residuales;

d) Mantenimiento preventivo eficaz.

## **E. Cierre o desmantelamiento de la planta de preprocesamiento**

171. El cierre es el periodo inmediatamente posterior a la interrupción del funcionamiento normal de la instalación. Durante este periodo la instalación deja de aceptar desechos peligrosos, completa el almacenamiento y procesado de los desechos que quedan en la planta y se deshace de equipos, estructuras y suelos, o los descontamina, y devuelve el sitio lo antes posible a su estado original o al uso que se estipuló para la tierra. La planificación del desmantelamiento de la instalación debe realizarse durante las etapas iniciales del proyecto en su conjunto. Al integrar los requisitos de desmantelamiento en el diseño de la instalación al principio, el plan de desarrollo del sitio deberá ser compatible con los requisitos adecuados de cierre cuando la vida útil de la instalación haya concluido.

172. Los operadores deberán realizar debidamente el cierre de la instalación de manera que se reduzca la necesidad posterior de mantenimiento y se evite el escape de cualquier contaminante peligroso al ambiente. Para asegurarse de ello, debe prepararse un plan de cierre en el que se identifiquen los pasos necesarios para cerrar parcial o completamente la instalación, incluyendo:

a) Procedimientos para gestionar el material eliminado;

b) Procedimientos para la descontaminación y/o eliminación;

c) Procedimientos para confirmar la eficacia de la descontaminación, la demolición y la excavación, incluyendo procedimientos para la recogida y el análisis de muestras;

d) Plan de salud y seguridad que aborde todos los elementos de salud y seguridad pertinentes a las actividades de cierre;

e) Sistemas de seguridad para evitar el acceso no autorizado a las áreas afectadas por las actividades de cierre.

173. Para evitar que una instalación cese en sus operaciones y no pueda asumir los requisitos potencialmente costosos de un cierre, se exigirá a los operadores que demuestren que cuentan con los recursos financieros para llevar a cabo adecuadamente dicho cierre de manera que se proteja la salud humana y el ambiente.

174. Para reducir los problemas de desmantelamiento y el impacto ambiental asociado, se recomienda que las instalaciones existentes en las que se identifiquen problemas potenciales pongan en marcha un programa de mejoras de diseño (EIPPCB, 2006). Estas mejoras de diseño deben asegurar que se evitan los tanques y tuberías subterráneos. Si no es posible la sustitución, los operadores deberán proporcionar un elemento secundario de contención o desarrollar un programa de monitorización adecuado. También deberá existir, entre otros, un procedimiento para el drenaje y la limpieza de conductos y recipientes antes del desmantelamiento

## **F. Otros aspectos ambientales**

### **1. Compuestos orgánicos volátiles, olores y polvo**

175. Las emisiones a la atmósfera procedentes del preprocesamiento de los desechos dependerán de los tipos de desechos que se traten y de los procedimientos utilizados. La supervisión y la notificación

de las emisiones deben realizarse de acuerdo con las autorizaciones de explotación y la normativa aplicable.

176. Se deberá contar con técnicas de reducción según lo exigido y considerar la necesidad de contramedidas para el ruido y los olores. Normalmente, el polvo es reducido mediante filtros de mangas, mientras que la tecnología de control de emisión de compuestos orgánicos volátiles, si es necesaria, puede incluir la adsorción por carbón y tratamientos térmicos o biológicos, entre otros.

177. En la UE, las mejores técnicas disponibles se aplican a las técnicas siguientes para evitar o controlar las emisiones de polvo, olores y compuestos orgánicos volátiles en todo el sector del tratamiento de desechos: restringir el uso de depósitos, recipientes y fosos abiertos; utilizar un sistema cerrado con extracción a una planta de reducción adecuada; aplicar un sistema de extracción con el tamaño apropiado; manejar y mantener correctamente el equipo de reducción; contar con procedimientos de detección y reparación de fugas in situ, y reducir las emisiones a la atmósfera mediante una combinación adecuada de técnicas preventivas y de reducción (EIPPCB, 2006).

## 2. Bidones y metales ferrosos

178. Los bidones vacíos y los metales ferrosos obtenidos mediante separadores magnéticos se eliminarán de manera ambientalmente racional. La chatarra que no contenga contaminantes en un grado que la hagan peligrosa se puede reciclar para la fabricación de acero. Los bidones de desechos vacíos en buenas condiciones se pueden enviar a lavadores o recicladores de bidones autorizados.

## 3. Aguas residuales

179. Los vertidos de aguas residuales a las aguas superficiales no deberá provocar concentraciones de contaminantes en exceso respecto a los criterios locales de calidad del agua ambiente o, en su ausencia, otros criterios reconocidos de calidad del agua ambiente. El uso y la capacidad de asimilación del agua receptora, teniendo en cuenta otras fuentes de vertido hacia ella, también deberán influir en las cargas de contaminación aceptables y en la calidad del vertido.

180. Los vertidos a sistemas de tratamiento de aguas residuales, ya sean públicos o privados, deberán cumplir con los requisitos de pretratamiento y supervisión de dichos sistemas de tratamiento. Estos vertidos no deberán interferir, directa ni indirectamente, con el funcionamiento y mantenimiento de los sistemas de recogida y tratamiento, ni suponer un riesgo para la salud y la seguridad de los trabajadores, así como tampoco deberán causar un impacto negativo en las características de los residuos procedentes de las operaciones de tratamiento de las aguas residuales.

181. En la UE, las mejores técnicas disponibles se aplican a las técnicas siguientes para la gestión de aguas residuales en todo el sector del tratamiento de desechos: reducir el uso de agua y su contaminación; evitar que el efluente sortee los sistemas de las plantas de tratamiento; recoger los derrames, las aguas de lavado de los bidones, etc.; separar los sistemas de recogida de aguas; tener una base de hormigón en todas las áreas de tratamiento; aumentar la reutilización de las aguas residuales tratadas; realizar comprobaciones diarias en el sistema de gestión de efluentes; utilizar la técnica de tratamiento adecuada para cada tipo de agua residual; lograr valores de emisión de agua adecuados antes del vertido aplicando una combinación apropiada de técnicas (EIPPCB, 2006).

## G. Supervisión y notificación de emisiones

182. Los programas de supervisión de emisiones y calidad del aire aportan información que puede utilizarse para evaluar la eficacia de estrategias de gestión relevantes. Se recomienda un sistema de planificación sistemático para asegurar que los datos recogidos son adecuados para los objetivos planteados y evitar recoger datos innecesarios. Un programa de supervisión de la calidad del aire debe incluir el seguimiento de una línea de base para evaluar los niveles basales de los contaminantes fundamentales tanto en la instalación como en sus proximidades.

183. Cuando se vierten aguas residuales debe desarrollarse y aplicarse un programa de seguimiento con los recursos y la supervisión de la gestión adecuados para la calidad de las aguas y de las aguas residuales para cumplir con los objetivos de seguimiento establecidos.

184. Los parámetros de supervisión seleccionados deberán ser indicativos de los contaminantes importantes en el proceso, y deberán incluir parámetros regulados en los requisitos de obligado cumplimiento. Los programas de monitorización deberán aplicar métodos nacionales o internacionales para la recogida y el análisis de muestras, como los publicados por la Organización Internacional de Normalización (ISO), el CEN o la EPA. El muestreo debe ser realizado o supervisado por personas especializadas. Los análisis los realizará personal autorizado o certificado. Deberán aplicarse planes de garantía y control de calidad del muestreo y los análisis para asegurar que

la calidad de los datos es adecuada para el uso previsto. Los informes de seguimiento deberán incluir documentación sobre garantía y control de calidad.

185. Se puede encontrar más información útil sobre los principios de supervisión en el documento de referencia de la Comisión Europea sobre principios de supervisión, en el que se presentan los resultados de un intercambio de información mantenido bajo la Directiva del Consejo 2008/1/CE entre los Estados Miembros de la Unión y los sectores implicados (EIPPCB, 2003). Las buenas prácticas para la notificación de los resultados de la supervisión se describen en la sección 4.4.4 de estas directrices.

## **V. Coprocesamiento ambientalmente racional de desechos peligrosos en hornos de cemento**

### **A. Introducción**

186. Para obtener un funcionamiento óptimo (coprocesamiento sin emisiones adicionales) los combustibles alternativos y las materias primas deben introducirse en el horno de cemento a través de los puntos de alimentación adecuados, en las proporciones apropiadas y con los sistemas correspondientes de calidad de los desechos y control de las emisiones.

187. El coprocesamiento tiene las características siguientes durante el proceso de producción (GTZ/Holcim, 2006):

- a) Las condiciones alcalinas y el mezclado intensivo favorecen la absorción de componentes volátiles procedentes de la fase gaseosa; Esta limpieza interna del gas tiene como resultado bajas emisiones de componentes como SO<sub>2</sub>, HCl y la mayoría de los metales pesados, a excepción de mercurio, cadmio y talio;
- b) Las reacciones del clínker a 1.450°C permiten la unión química de metales y la incorporación de cenizas al clínker;
- c) La sustitución directa del combustible principal por material de desecho de gran poder calorífico provoca un aumento de la eficiencia de recuperación de energía respecto a otras tecnologías de 'desechos para energía'.

### **B. Requisitos operativos**

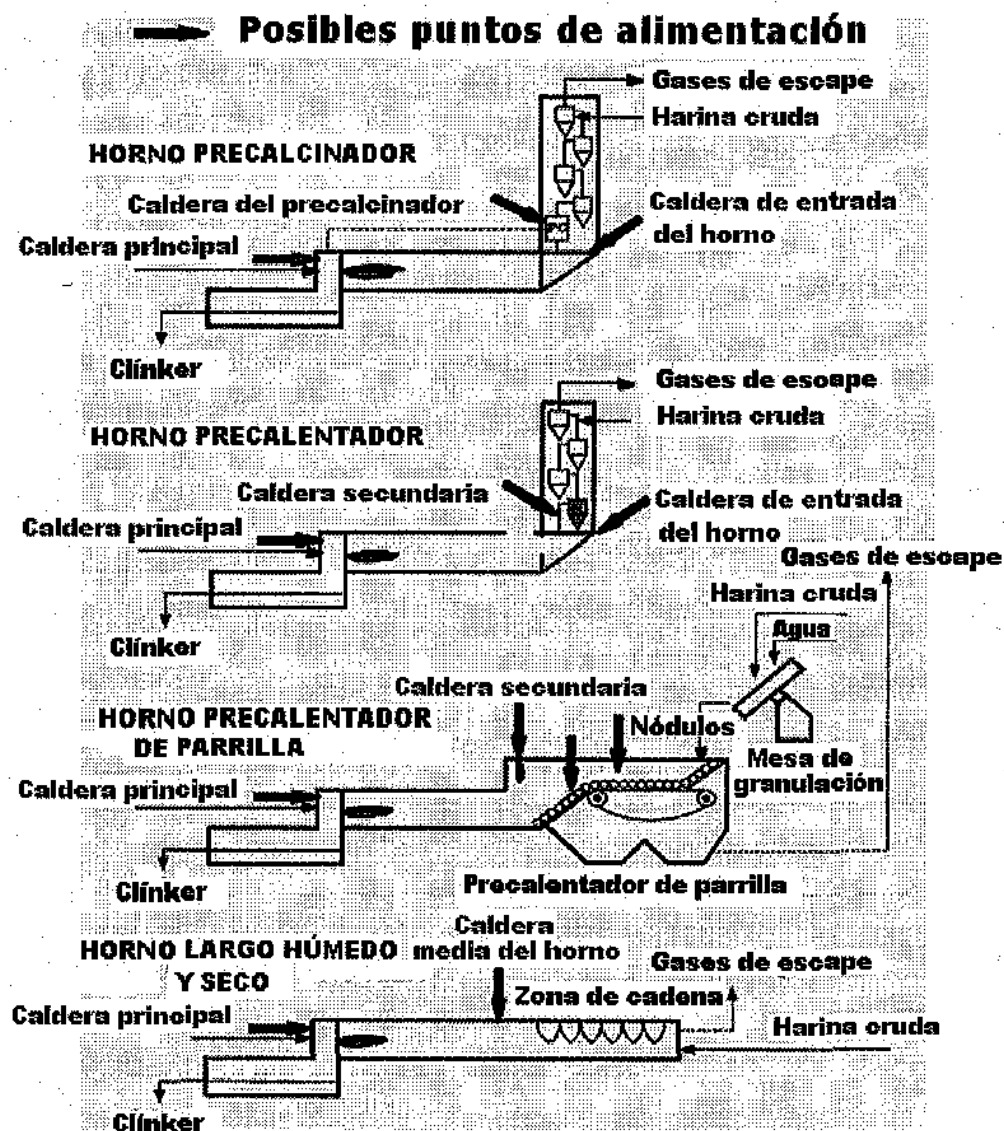
188. El coprocesamiento seguro y responsable requiere una cuidadosa selección de los puntos de alimentación en los sistemas de hornos, así como un control operativo global de las características y los volúmenes específicos del material de desecho.

#### **1. Selección del punto de alimentación**

189. Se deben seleccionar los puntos de alimentación adecuados de acuerdo con las características relevantes de los desechos, incluyendo las físicas, químicas y toxicológicas (véase la figura III). Se pueden utilizar varios puntos de alimentación; las vías más habituales de introducción de los desechos son:

- a) El quemador principal situado en el extremo de salida del horno rotatorio;
- b) Una tolva de alimentación en la cámara de transición en el extremo de entrada del horno rotatorio (para combustible a granel);
- c) Quemadores secundarios en el conducto ascendente;
- d) Quemadores de precalcificación en el precalcificador;
- e) Una tolva de alimentación en el precalcificador (para combustible a granel);
- f) Una válvula en la mitad del horno en el caso de hornos largos de fabricación por vía seca y húmeda (para combustible a granel).

Figura III  
Puntos típicos de alimentación de desechos



190. Los desechos líquidos se inyectan normalmente en el extremo caliente del horno. En algunas instalaciones, los desechos sólidos se pueden introducir en la zona de calcinación que está a mitad del horno en hornos largos, y en la bandeja de alimentación en la sección de alta temperatura de los hornos precalentadores/precalcinadores.

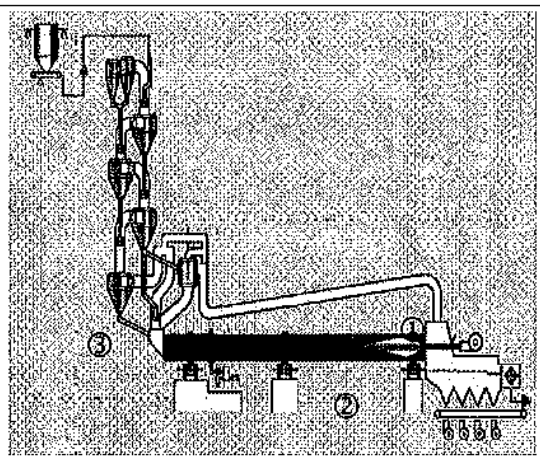
191. Los desechos sólidos que se utilizan como materias primas alternativas se introducen habitualmente en el sistema de horno a través del suministro normal de la harina cruda, igual que las materias primas convencionales. No obstante, los materiales que contienen componentes que se pueden volatilizar a bajas temperaturas (como los disolventes) deben introducirse en las zonas de altas temperaturas del sistema de horno. Los desechos que contienen componentes volátiles orgánicos e inorgánicos no deben introducirse a través del suministro normal de harina cruda a menos que ensayos controlados realizados en el horno o en laboratorios adecuados hayan demostrado que se pueden evitar emisiones no deseadas por la chimenea.

192. Los compuestos combustibles tóxicos que se encuentran en algunos desechos peligrosos, como las sustancias orgánicas halogenadas, deben ser destruidos completamente mediante la temperatura y el tiempo de residencia adecuados. En los hornos precalentadores/precalcinadores, los desechos peligrosos se introducen, generalmente, a través de los quemadores principales o secundarios. Los desechos peligrosos y otros desechos introducidos a través del quemador principal, en el que las condiciones siempre son favorables, se descomponen en condiciones oxidantes a temperaturas de



llama superiores a los 1.800°C (véase la figura IV). Los desechos introducidos en un quemador secundario, un precalentador o un precalcinator estarán expuestos a temperaturas más bajas, si bien las temperaturas esperadas en la zona de combustión del precalcinator son, normalmente, superiores a los 1.000°C (PNUMA, 2007). El horno deberá funcionar de manera que los gases resultantes del proceso se eleven a una temperatura de 850°C durante dos segundos tras la última inyección de aire de combustión, de un modo controlado y homogéneo e incluso en las condiciones más desfavorables (véase la Directiva 2007/76/CE). En el caso de desechos peligrosos con un contenido de más del 1% de sustancias orgánicas halogenadas (expresadas en forma de cloro), la temperatura deberá llegar a los 1.100°C durante al menos dos segundos. Según la TSCA estadounidense, para la eliminación de PCB es necesaria una temperatura de 1.200°C y dos segundos de tiempo de retención (con un exceso de oxígeno del 3% en el gas de la chimenea).

Figura IV  
Temperaturas y tiempos de residencia durante la fabricación del cemento

Característica	Temperatura y tiempo	
Temperatura en el quemador principal ① del horno rotatorio ②	>1.450°C (material) >1.800°C (temperatura de llama)	
Tiempo de residencia en el quemador principal	>12-15 segundos > 1.200°C >5-6 segundos > 1.800°C	
Temperatura en el precalcinator ③	>850°C (material) >1.000°C (temperatura de llama)	
Tiempo de residencia en el precalcinator	>2-6 segundos > 800°C	

193. Para la alimentación del horno con desechos peligrosos se debe seguir las indicaciones siguientes (EIPPCB, 2010):

- a) Utilizar los puntos de alimentación adecuados en términos de temperatura y tiempo de residencia en función del diseño y el funcionamiento del horno;
- b) Introducir materiales de desecho que contengan componentes orgánicos que se puedan volatilizar antes de la zona de calcinación en las áreas adecuadas de alta temperatura del sistema de horno;
- c) Trabajar de manera que los gases resultantes del proceso eleven su temperatura hasta los 850°C durante dos segundos de manera controlada y homogénea e incluso en las condiciones más desfavorables;
- d) Elevar la temperatura hasta los 1.100°C si se introducen en el horno desechos peligrosos con un contenido de más del 1% de sustancias orgánicas halogenadas, expresadas en forma de cloro;
- e) Introducir los desechos de manera continua y constante;
- f) Dejar de introducir desechos cuando no se mantengan o no puedan alcanzarse la temperatura y el tiempo de residencia adecuados (por ejemplo durante el encendido o las paradas) y cuando se exceda cualquier límite de emisiones.

## 2. Control del funcionamiento del horno

194. Los principios generales de un buen control del funcionamiento del sistema de hornos que utilizan combustibles y materias primas convencionales deberán aplicarse también al uso de los desechos. En concreto, hay que medir, registrar y evaluar continuamente todos los parámetros importantes del proceso. Los operadores del horno deben someterse a una formación adecuada para los requisitos relacionados con el uso de desechos peligrosos, incluyendo los aspectos de salud, seguridad y emisiones al medio ambiente.

195. Para las interrupciones operacionales del horno, los operadores del horno deben tener a su disposición y conocer las instrucciones de trabajo escritas sobre la estrategia para desconectar la alimentación de desechos peligrosos, con el fin de asegurar las condiciones mínimas de estabilidad operacional.

196. El contenido mineral de los desechos puede afectar a las características del clínker. La composición de la mezcla de materias primas debe ajustarse en consecuencia para cumplir con los valores de referencia dados para productos químicos. Deben definirse los límites de entrada para cloro, azufre y álcalis, y cumplirse estrictamente los valores operativos establecidos. Las instalaciones de derivación para evitar los ciclos de enriquecimiento de estos compuestos deberán considerarse únicamente si se han identificado soluciones adecuadas para la gestión del polvo desviado.

197. Para la estabilidad de la combustión y del proceso, con el fin de controlar las emisiones de compuestos orgánicos persistentes formados de manera accidental, es importante asegurar (PNUMA, 2007):

- a) La uniformidad de las características del combustible (tanto alternativo como fósil);
- b) La uniformidad en la velocidad de suministro del combustible o en la frecuencia de alimentación del material introducido de manera intermitente;
- c) Un suministro adecuado de oxígeno para conseguir una buena combustión;
- d) La supervisión de la concentración de CO en los gases de escape para no superar los niveles preestablecidos que reflejan las condiciones de una mala combustión.

## C. Aspectos ambientales

### 1. Emisiones a la atmósfera

198. Ya se utilicen o no los desechos en una planta de cemento, el polvo (material particulado), y las emisiones de NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub> son la causa de mayor preocupación y deben abordarse en consecuencia. Otras emisiones que hay que tener en cuenta son las de compuestos orgánicos volátiles, PCDD, PCDF, HCl, CO, CO<sub>2</sub>, HF, amoníaco (NH<sub>3</sub>), benceno, tolueno, etilbenceno, xileno, hidrocarburos aromáticos policíclicos, metales pesados y sus compuestos (EIPPCB, 2010). En algunas circunstancias, las emisiones pueden incluir también clorobencenos y PCB (SBC, 2007). Las fuentes de estas emisiones y las mejores técnicas disponibles para evitarlas o reducirlas (según se define en la UE) están indicadas en el anexo 4.

199. La coíncineración de desechos peligrosos en hornos de cemento deberá cumplir un límite de emisión para los PCDD/PCDF de 0,1 ng eqt-i /Nm<sup>3</sup><sup>10</sup>. En el caso de otros contaminantes, se aplicará la legislación nacional pertinente, por ejemplo:

- a) Chile: Decreto Supremo N°45, 5 de marzo de 2007<sup>11</sup>;
- b) Unión Europea: Directiva 2000/76/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 4 de diciembre de 2000<sup>12</sup>; que será sustituida por la Directiva 2010/75/UE en enero de 2014<sup>13</sup>;
- c) Sudáfrica: National policy on thermal treatment of general and hazardous waste, Government Gazette (Staatskoerant), 24 de julio de 2009<sup>14</sup>;
- d) Estados Unidos: Code of Federal Regulations, Título 40, Parte 63 Subparte EEE, "National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants from Hazardous Waste Combustors"<sup>15</sup> y

<sup>10</sup> Equivalente tóxico (eqt) al que se hace referencia en el párrafo 2 de la parte IV del anexo C del Convenio de Estocolmo. Concentración expresada en condiciones normalizadas de 11% de O<sub>2</sub>, 101,3 kPa, 273.15K, gas seco.

<sup>11</sup> Descargable en español en <http://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=265301>

<sup>12</sup> Descargable en <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32000L0076:EN:NOT>

<sup>13</sup> Descargable en <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:334:0017:0119:EN:PDF>

<sup>14</sup> Descargable en [http://us-cdn.creamermedia.co.za/assets/articles/attachments/22665\\_not\\_777.pdf](http://us-cdn.creamermedia.co.za/assets/articles/attachments/22665_not_777.pdf)

<sup>15</sup> Descargable en <http://ecfr.gpoaccess.gov/cgi/t/text/text-idx?c=ecfr&rgn=div6&view=text&node=40:11.0.1.1.1&idno=40>

Parte 60 Subparte F, "National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants From the Portland Cement Manufacturing Industry and Standards of Performance for Portland Cement Plants"<sup>16</sup>).

200. Las autoridades competentes deberán considerar la posibilidad de establecer un periodo máximo permisible de paradas, interrupciones o fallos inevitables de los dispositivos de purificación o de los de medición, durante los cuales las emisiones a la atmósfera puedan exceder los valores límite prescritos.

201. Las tecnologías de control se describen en Greer (2003) y Karstensen (2008b). Las mejores técnicas disponibles y los niveles de emisión asociados en la UE están disponibles en EIPPCB (2010). El documento de referencia de la Comisión Europea incluye información sobre las medidas y técnicas disponibles, como la descripción, la aplicabilidad, los efectos cruzados, la economía, etc. Ofrece información útil y los mejores datos de rendimiento de las técnicas que deben considerarse mejores técnicas disponibles.

202. La Secretaría del Convenio de Estocolmo (PNUMA, 2007) ha publicado una guía adicional sobre mejores técnicas disponibles y una guía provisional sobre mejores prácticas ambientales para la prevención o la reducción de la formación y consiguiente liberación de contaminantes orgánicos persistentes involuntarios procedentes de los hornos de cemento de coprocesamiento de desechos peligrosos. Las directrices describen las medidas principales que se consideran suficientes para conseguir un nivel de emisión de PCDD/PCDF por debajo de 0,1 ng eqt-i/Nm<sup>3</sup> en gases de combustión para instalaciones nuevas y existentes, y cuando estas opciones no obtengan un rendimiento inferior a 0,1 ng eqt-i/Nm<sup>3</sup> se citan medidas secundarias, que normalmente se aplican con el objeto de controlar los contaminantes diferentes de los COP formados involuntariamente pero que también pueden provocar una reducción simultánea de emisiones de los productos químicos listados en el anexo C del Convenio de Estocolmo (PNUMA, 2007).

## 2. Polvo de horno de cemento y polvo desviado

203. Todas las plantas de cemento generan un polvo fino procedente de la línea de horno, llamado colectivamente polvo de horno de cemento. La composición del polvo de horno de cemento varía, incluso en una misma línea de cemento con el tiempo, pero incluye partículas que representan la mezcla de materias primas en diversas etapas de la combustión, partículas de clínker e incluso partículas erosionadas de los ladrillos refractarios o del revestimiento monolítico de los tubos del horno y aparatos asociados (Van Oss, 2005). El polvo también es generado por los sistemas de derivación de álcalis, instalados para evitar la producción excesiva de álcalis, cloruros o azufre; no obstante, el polvo desviado, al contrario que el polvo de horno de cemento, está formado por material de alimentación completamente calcinado.

204. En la Unión Europea, la conclusión de las mejores técnicas disponibles para el procesamiento de los desechos, en el sector de la fabricación de cemento en general, es reutilizar la materia particulada recogida en el proceso, siempre que se pueda, o utilizar estos polvos en otros productos comerciales, cuando sea posible (EIPPCB, 2010).

205. Para evitar la eliminación, la mayor parte del polvo de horno de cemento y polvo desviado es reciclado directamente en el horno de cemento o en la trituradora de clínker de cemento. En la fabricación del clínker, el polvo de horno de cemento compensa parcialmente la necesidad de materias primas como la piedra caliza y los constituyentes de las rocas naturales, y evita así el uso de energía y las emisiones relacionados con la extracción y el procesamiento de dichos materiales. Periódicamente puede ser necesario eliminar algo de polvo del sistema debido a la creciente concentración de álcalis y compuestos de cloruro y de azufre que pueden poner en riesgo la calidad del clínker. El polvo que no puede reciclarse en el proceso es eliminado del sistema y, a menudo, recogido in situ en montones o monovertederos.

206. Cuando proceda, el polvo de horno de cemento que no regrese al proceso de producción podrá ser recuperado en varios tipos de aplicaciones comerciales, entre otras, la mejora del suelo agrícola, la estabilización de terraplenes, el tratamiento de aguas residuales, la regeneración de desechos, rellenos de baja concentración y cobertura de vertederos municipales (U.S. EPA, 2011). Estas aplicaciones dependen principalmente de las características químicas y físicas del polvo de horno de cemento.

16 Límites de NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub> para todos los hornos de cemento que han sido construidos, modificados o reconstruidos después del 16 de junio de 2008. Descargable en <http://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2010-09-09/pdf/2010-21102.pdf>

207. Los factores principales que determinan las características del polvo de horno de cemento son la materia prima de alimentación, el tipo de operación del horno, los sistemas de recogida de polvo y el tipo de combustible. Las características químicas y físicas del polvo de horno de cemento deben evaluarse planta por planta, ya que sus propiedades pueden verse afectadas significativamente por el diseño, el funcionamiento y los materiales utilizados en un horno de cemento (U.S. EPA, 2010). Hasta que se haya establecido el grado de variabilidad del polvo de horno de cemento, se recomienda la realización de ensayos frecuentes.

208. Según el nivel de contaminantes de interés (por ejemplo, metales pesados y COP), estos desechos pueden ser peligrosos en algunos casos, para los que se aplica un manejo y unas medidas de eliminación especiales (PNUMA, 2007). Un estudio de Karstensen (2006b) indica una concentración media de 6,7 ng eqt-i/kg para PCDD/PCDF en polvo de horno de cemento y una concentración máxima de 96 ng eqt-i/kg. El mismo estudio muestra que los desechos del sector del cemento tienen niveles de PCDD/PCDF de la misma magnitud que alimentos como el pescado, la mantequilla y la leche materna, e inferiores a la concentración máxima permitida de 100 ng eqt/kg para los lodos residuales aplicados a la tierra agrícola.

209. Para asegurar la protección de la salud pública y el medio ambiente y para evitar la contaminación de los acuíferos, se debe analizar los parámetros de calidad de los metales y compuestos orgánicos lixiviados en polvo desviado o polvo de horno de cemento desechados de instalaciones que utilicen residuos peligrosos como combustible o materias primas suplementarios, si van a ser depositados en el suelo. El análisis deberá llevarse a cabo durante ensayos controlados además de los ensayos en curso que puedan ser exigidos por las autoridades reguladoras locales. También se deben controlar las emisiones de polvo al aire.

### 3. Emisiones al agua

210. En general, las descargas de aguas residuales suelen limitarse solamente a la escorrentía superficial y al agua de enfriamiento y no aportan ninguna contribución sustancial a la contaminación del agua (EIPPCB, 2010). Sin embargo, en la Unión Europea el uso de depuradores húmedos es la mejor técnica disponible para reducir las emisiones de SO<sub>x</sub> procedentes de los gases de combustión del encendido de los hornos o de procesos de precalentamiento o precalcificación (EIPPCB, 2010). En este contexto, se aplican a los hornos de cemento que coíncineran residuos y desechos peligrosos en la Unión Europea los requisitos de la Directiva 2000/76/CE en lo relativo a la descarga de aguas de desecho procedentes de la limpieza de gases de exhaustación, a fin de limitar la transferencia de contaminantes del aire al agua.

### 4. Control del producto final

211. Los productos finales como el clínker y el cemento están sometidos a los procedimientos de control regulares exigidos por las especificaciones de calidad habituales, como se establece en las normas de calidad nacionales o internacionales aplicables.

212. Como principio general, el coprocesamiento no debe alterar la calidad del cemento que se produce. Esto significa que el clínker, cemento u hormigón producido no debe ser utilizado como depósito para metales pesados. No debe haber ningún impacto negativo para el ambiente, como deberá demostrarse mediante ensayos de lixiviado en hormigón o mortero, por ejemplo. La calidad del cemento deberá permitir también su recuperación al final de la vida útil.

213. Los contaminantes orgánicos de los materiales introducidos en la zona de alta temperatura del sistema de hornos son prácticamente destruidos, mientras que los componentes inorgánicos se dividen entre el clínker y el polvo de horno. En consecuencia, el uso de desechos en el proceso de combustión del clínker puede alterar la concentración de metales en los productos de cemento, y en función de la cantidad total introducida total mediante materias primas y combustibles, la concentración de cada uno de los elementos en el producto puede aumentar o disminuir como resultado del coprocesamiento de los desechos (EIPPCB, 2010). Sin embargo, largas investigaciones han demostrado que el efecto de los desechos en el contenido en metales pesados del clínker es estadísticamente marginal, a excepción del uso a gran escala de neumáticos, que puede incrementar los niveles de zinc (GTZ/Holcim, 2006).

214. Cuando el cemento se mezcla con agregados para formar hormigón o mortero, es el comportamiento de los metales en dichos materiales de construcción el que es importante para la evaluación del impacto ambiental relevante de los desechos utilizados en el proceso de producción. Los estudios han demostrado que las emisiones de metales de hormigón y mortero son bajas, y exhaustivos ensayos han confirmado que los metales se incorporan fuertemente a la matriz del ladrillo de cemento. Además, el hormigón seco compactado ofrece gran resistencia a la difusión, lo que impide aún más la liberación de metales. Los ensayos con hormigón y mortero han demostrado que las concentraciones de metales en los eluidos son notablemente inferiores a las prescritas, por ejemplo,

por la legislación nacional. Además, el almacenamiento en condiciones diferentes y parcialmente extremas no ha causado liberaciones ambientalmente relevantes, lo que se cumple también para muestras trituradas o pulverizadas antes de los ensayos de lixiviado (EIPPCB, 2010).

215. Respecto a esto, los principales resultados de los estudios de lixiviación realizados para evaluar el impacto ambiental de metales pesados incorporados al hormigón son los siguientes (GTZ/Holcim, 2006):

- a) Las cantidades lixiviadas de todos los oligoelementos del hormigón monolítico (vida útil y reciclado) están por debajo o cerca de los límites de detección de los métodos analíticos más sensibles;
- b) No se han observado diferencias significativas en el comportamiento de lixiviación de los oligoelementos entre diferentes tipos de cemento producidos con o sin combustibles y materias primas alternativos;
- c) El comportamiento de lixiviación del hormigón fabricado con diferentes tipos de cementos es similar;
- d) En determinadas condiciones de ensayo, las concentraciones lixiviadas de algunos oligoelementos como el cromo, el aluminio y el bario pueden acercarse a los límites dados en las normas para el agua potable; el cromo hexavalente en el cemento es soluble en agua y puede lixiviar del hormigón en cantidades mayores que otros metales, de modo que la alimentación de cromo al cemento y al hormigón debería ser lo más limitada posible;
- e) Los ensayos de laboratorio y los estudios de campo han demostrado que los valores límite aplicables, por ejemplo las especificaciones de los acuíferos o el agua potable, no se exceden mientras la estructura de hormigón permanece intacta. Por ejemplo, en aplicaciones principales o durante la vida útil;
- f) Algunos metales, como el arsénico, el cromo, el vanadio, el antimonio o el molibdeno pueden tener un comportamiento de lixiviación más móvil, especialmente cuando la estructura del mortero o del hormigón está triturada o pulverizada (por ejemplo en etapas de reciclado como cuando se utiliza como agregados en las placas de cimentación de las carreteras, o en escenarios del final de la vida útil, como los vertederos);
- g) Al no existir una relación simple y consistente entre las cantidades lixiviadas de oligoelementos y sus concentraciones totales en el hormigón o el cemento, el contenido de oligoelementos de los cementos no se puede utilizar como criterio medioambiental.

216. Las evaluaciones de la calidad ambiental del cemento y el hormigón están basadas, normalmente, en las características de lixiviación de metales pesados al agua y al suelo. Hay que considerar varios escenarios de exposición (GTZ/Holcim, 2006):

- a) Exposición de estructuras de hormigón en contacto directo con los acuíferos (aplicaciones 'principales');
- b) Exposición del mortero o el hormigón al agua potable de distribución (tuberías de hormigón) o a sistemas de almacenamiento (tanques de hormigón) (aplicaciones 'de la vida útil');
- c) Reutilización de restos de hormigón demolido y reciclado en nuevos agregados, construcción de carreteras, relleno de presas, etc. (aplicaciones 'secundarias' o 'de reciclaje');
- d) Descarga en vertederos de restos de hormigón demolido (aplicaciones de 'fin de vida útil').

217. Una cuidadosa selección y seguimiento de los desechos asegura que su uso no provoca emisiones metálicas de ninguna magnitud perjudicial para el ambiente (EIPPCB, 2010). Sin embargo, en casos en los que la concentración de metales pesados supera el rango normal encontrado en cementos fabricados sin combustibles ni materiales alternativos, deben realizarse ensayos de lixiviación en mortero y hormigón (GTZ/Holcim, 2006).

218. Para los escenarios de exposición de hormigón y mortero 'de la vida real', deben aplicarse diversos ensayos de lixiviación y procedimientos de evaluación. Aunque existen procedimientos estandarizados de ensayo para las normativas de gestión de desechos y las normas para el agua potable, sigue habiendo la necesidad de procedimientos de ensayos de conformidad estandarizados y armonizados basados en los escenarios de exposición arriba indicados. Se recomienda que dichos ensayos sean realizados al menos una vez al año por laboratorios independientes certificados.

## D. Supervisión

219. Debe realizarse un seguimiento de las emisiones para permitir que las autoridades comprueben el cumplimiento de las condiciones descritas en las autorizaciones y normativas de explotación, y para ayudar a los operadores a gestionar y controlar el proceso, y evitar así que se liberen emisiones a la atmósfera. Es responsabilidad de las autoridades competentes establecer los requisitos de calidad adecuados y considerar toda una gama de salvaguardias. Para la evaluación del cumplimiento, se considera una buena práctica el uso de lo siguiente (EIPPCB, 2003):

- a) Métodos estándar de medición;
- b) Instrumentos certificados;
- c) Certificación del personal;
- d) Laboratorios acreditados.

220. Para las actividades de autocontrol, puede resultar apropiado el uso de sistemas reconocidos de gestión de calidad y controles periódicos por parte de un laboratorio externo acreditado en lugar de la propia acreditación formal (EIPPCB, 2003).

221. Se puede encontrar más información útil relacionada con los principios de seguimiento en el documento de referencia de la Comisión Europea sobre principios generales de supervisión (EIPPCB, 2003).

### 1. Supervisión del proceso

222. Para controlar los procesos de los hornos se recomienda realizar mediciones continuas de los siguientes parámetros (PNUMA, 2007; EIPPCB, 2010):

- a) Presión;
- b) Temperatura;
- c) O<sub>2</sub>;
- d) NO<sub>x</sub>;
- e) CO;
- f) SO<sub>2</sub> cuando la concentración de SO<sub>x</sub> es alta (se trata de una técnica en desarrollo para optimizar el CO con NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub>).

223. En la Unión Europea, las conclusiones de las mejores técnicas disponibles para el sector de la fabricación de cemento en su conjunto es llevar a cabo seguimientos y mediciones de los parámetros y las emisiones del proceso de manera regular, como (EIPPCB, 2010):

- a) Mediciones continuas de los parámetros del proceso que demuestran su estabilidad, como la temperatura, el O<sub>2</sub>, la presión, la tasa de flujo de los gases de escape y las emisiones de NH<sub>3</sub> utilizando la reducción selectiva no catalítica;
- b) Supervisión y estabilización de parámetros de proceso críticos como la alimentación con mezcla homogénea de materias primas y combustible, la dosificación regular y el exceso de O<sub>2</sub>.

### 2. Supervisión de las emisiones

224. Para cuantificar con exactitud las emisiones, las mediciones continuas son la mejor técnica disponible para los parámetros siguientes (PNUMA, 2007):

- a) Velocidad de flujo de los gases de escape;
- b) Humedad;
- c) Temperatura;
- d) Polvo (material particulado);
- e) O<sub>2</sub>;
- f) NO<sub>x</sub>;
- g) SO<sub>2</sub>;
- h) CO.

225. También se recomienda la medición continua de carbono orgánico total. El operador debe asegurar el correcto calibrado, mantenimiento y funcionamiento de los sistemas de supervisión continua de emisiones. Debe establecerse un programa de garantía de calidad para evaluar y controlar el funcionamiento de esos sistemas de manera continua.

226. La supervisión continua al menos una vez al año es apropiada para las sustancias siguientes:

- a) Metales (Hg, Cd, Tl, As, Sb, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V) y sus compuestos;
- b) HCl;
- c) HF;
- d) NH<sub>3</sub>;
- e) PCDD/PCDF.

227. Las mejores técnicas disponibles de acuerdo con EIPPCB (2010) consisten en llevar a cabo el seguimiento y las mediciones de los parámetros y las emisiones del proceso de manera regular, como:

- a) Mediciones continuas de emisiones de polvo, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> y CO;
- b) Mediciones continuas de emisiones de PCDD/PCDF y metales;
- c) Mediciones continuas o periódicas de emisiones de HCl, HF y carbono orgánico total.

228. Además, para los hornos de cemento que realizan coprocesamiento de desechos y desechos peligrosos en la UE, se aplican los requisitos de la Directiva 2000/76/CE (que será sustituida por la Directiva 2010/75/UE con efectos desde el 7 de enero de 2014).

229. También es posible medir y supervisar de manera continua el NH<sub>3</sub> y el Hg, y muestrear PCDD/PCDF y PCB, también de manera continua, para su análisis de 1 a 30 días (EIPPCB, 2010).

230. Deben realizarse ensayos de rendimiento para demostrar el cumplimiento con los límites de emisión y las especificaciones de actuación de los sistemas de supervisión continua, cuando el horno opera en condiciones normales.

231. En condiciones especiales de funcionamiento pueden ser necesarias mediciones de los elementos siguientes (PNUMA, 2007; EIPPCB, 2010):

- a) Benceno, tolueno y xileno (BTX);
- b) Hidrocarburos aromáticos policíclicos;
- c) Otros contaminantes orgánicos (por ejemplo clorobenzenos, PCB y sus congéneres coplanares, cloronaftalenos, etc.).

232. En caso de eliminación de desechos peligrosos en hornos de cemento para la destrucción y transformación irreversible del contenido de contaminantes orgánicos persistentes en los desechos, se debe determinar la EDE (PNUMA, 2007) y referirla a las directrices técnicas generales actualizadas sobre la gestión ambientalmente correcta de residuos que contengan contaminantes orgánicos persistentes, los contengan o estén contaminados con ellos (SBC, 2007).

### 3. Supervisión ambiental

233. Las preocupaciones razonables sobre el impacto ambiental de la planta pueden hacer necesaria la aplicación de un programa de supervisión del aire ambiente. Dicho programa deberá evaluar los niveles de contaminantes clave identificados como una prioridad del control ambiental. Los planes deben comprender zonas control y zonas en la dirección del viento, incluyendo el área de máxima de máxima deposición a nivel del suelo procedente de las emisiones de la chimenea. Se debe facilitar una estación meteorológica para la duración de la toma de muestras del ambiente, en una ubicación en la que no existan interferencias significativas de edificios u otras estructuras.

### 4. Requisitos para la presentación de informes

234. La presentación de informes de los resultados del seguimiento implica el resumen y la presentación de los resultados, la información relacionada y las constataciones de cumplimiento de una manera eficaz. Las buenas prácticas están basadas en tener en cuenta: las exigencias y las audiencias de los informes, las responsabilidades de producir informes, las categorías de los informes, el objetivo de los informes, las buenas prácticas de información, los aspectos legales de los informes y las consideraciones de calidad (EIPPCB, 2003).

235. Los informes de seguimiento se pueden clasificar como sigue (EIPPCB, 2003):

- a) Informes básicos o locales, normalmente preparados por operadores (por ejemplo, como parte de su autoevaluación) y, donde corresponda, que cumplan con los requisitos para la obtención de una autorización. Estos informes pueden estar referidos, por ejemplo, a una instalación individual, una incidencia, que cubra un periodo de tiempo corto y tenga que ser notificado con prontitud, o a un público local;
- b) Informes nacionales o estratégicos, que generalmente serán preparados por las autoridades competentes; Normalmente son informes resumidos y están relacionados, habitualmente, con varias instalaciones, periodos más largos con el fin de mostrar tendencias, o un público nacional;
- c) Informes especializados, sobre técnicas nuevas o relativamente complejas utilizadas ocasionalmente para complementar los métodos de seguimiento más rutinarios (como la telemetría, las redes neuronales o las inspecciones de deposiciones).

236. Las buenas prácticas en la presentación de la información sobre la supervisión incluyen (EIPPCB, 2003):

- a) Recogida de datos, que supone la adquisición de mediciones e información básicas. La consideración de los siguientes elementos es una buena práctica en la recogida de datos: programas (en los que se establezca cómo, cuándo, por quién y para quién se recogen los datos y qué tipos de datos son aceptables); uso de formas estándar de recogida de datos; detalles de la cualificación de los datos (utilizados para registrar si los valores de los datos están basados en mediciones, cálculos o estimaciones); incertezas y límites de los datos (detalles de límites de detección, número de muestras disponibles); detalles operativos contextuales (detalles sobre los procesos preponderantes y/o las condiciones ambientales).
- b) Gestión de los datos, incluyendo la organización de los datos y su conversión a información. La consideración de los siguientes elementos es una buena práctica en la gestión de datos: transferencias y bases de datos; procesamiento de los datos; software y estadística, y archivo.
- c) Presentación de los resultados, que implica el envío de la información a los usuarios de forma clara y utilizable. La consideración de los siguientes elementos es una buena práctica en la presentación de los resultados del seguimiento, en función del tipo de informe: objetivo del informe (tipo de situación, requisitos temporales, ubicación); programa de presentaciones; tendencias y comparaciones; importancia estadística (detalles sobre rebasamientos o cambios significativos si se comparan con las incertezas en las mediciones y los parámetros del proceso); ejecución provisional (informes provisionales); resultados estratégicos (detalles sobre los niveles de cumplimiento de diversas políticas, actividades, tecnologías, etc.); resúmenes no técnicos (para el público), y distribución de los informes.

237. Para que los informes de seguimiento puedan ser utilizados en los procesos de adopción de decisiones, deberán estar disponibles rápidamente y ser precisos (dentro del margen de las incertezas establecidas). Las buenas prácticas en cuanto a accesibilidad y calidad de los informes se pueden conseguir teniendo en cuenta los elementos siguientes: objetivos de calidad y comprobaciones; competencia; procedimientos de urgencia; sistemas de aprobación; retención de datos, y falsificación de datos (EIPPCB, 2003).

238. Se puede encontrar más información útil relacionada con los principios de seguimiento en el documento de referencia de la Comisión Europea sobre principios generales de supervisión (EIPPCB, 2003).

## VI. Referencias

- Achternbosch, M., Brautigam, K.R., Hartlieb, N., Kupsch, C., Richers, U., Stemmermann, P. y Gleis, M. 2003. Heavy metals in cement and concrete resulting from the co-incineration of wastes in cement kilns with regard to the legitimacy of waste utilisation. Forschungszentrum Karlsruhe. <http://bibliothek.fzk.de/zb/berichte/FZKA6923.pdf>
- Baron, B., Reinaud, J., Genasci, M. y Philibert, C. 2007. Sectoral Approaches to Greenhouse Gas Mitigation: Exploring Issues for Heavy Industry. IEA Information Paper. International Energy Agency. [http://www.iea.org/Textbase/publications/free\\_new\\_Desc.asp?PUBS\\_ID=2000](http://www.iea.org/Textbase/publications/free_new_Desc.asp?PUBS_ID=2000)
- Battelle (Battelle Memorial Institute). 2002. Towards a Sustainable Cement Industry. Encargado por el Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible. Descargable en <http://www.wbcsd.org/web/publications/battelle-full.pdf> [Consultado el 24 de mayo de 2009]



British Geological Survey (BGS). 2005. Mineral Profile: Cement Raw Materials. British Geological Survey, Natural Environment Research Council  
[http://www.bgs.ac.uk/MineralsUK/downloads/comm\\_profile\\_cement.pdf](http://www.bgs.ac.uk/MineralsUK/downloads/comm_profile_cement.pdf)

CCME (Canadian Council of Ministers of the Environment). 1996. National Guidelines for the Use of Hazardous and Non-hazardous Wastes as Supplementary Fuels in Cement Kilns. Manitoba.

CEMBUREAU (The European Cement Association). 1999a. Environmental Benefits of Using Alternative Fuels in Cement Production: A Life-cycle Approach. Bruselas. Descargable en <http://www.cembureau.be/Publications-02.asp> [Consultado el 3 de marzo de 2009]

CEMBUREAU (The European Cement Association). 2009. Sustainable Cement Production: Co-processing of Alternative Fuels and Raw Materials in the European Cement Industry. Brussels. Descargable en <http://www.cembureau.be/Publications-02.asp> [Consultado el 3 de marzo de 2009]  
<http://www.cembureau.be/newsroom/sustainable-energy-focus-alternative-fuels-cement-industry>

CPCB (Central Pollution Control Board). 2007. Comprehensive Industry Document on Vertical Shaft Kiln Based Mini Cement Plants. Ministry of Environment & Forests, Government of India. Descargable en [http://www.cpcb.nic.in/oldwebsite/New%20Item/mini\\_cement\\_plant.html](http://www.cpcb.nic.in/oldwebsite/New%20Item/mini_cement_plant.html) [Consultado el 5 de marzo de 2009]

Da Hai Yan, Karstensen, K.H., Qi Wang, Qi-Fei Huang y Min-Lin Cai. 2010. Co-processing of Industrial and Hazardous Wastes in Cement Kilns: A Review of Current Status and Future Needs in China. *Environmental Engineering Science*. Enero 2010, 27(1): 37-45 doi: 10.1089/ees.2009.0144

Degré, J.P. 2009. Co-processing in Cement Kilns: The Holcim Approach and Experience. Presentado en el Taller *Coprocesamiento de Residuos Peligrosos en Hornos Cementeros*, Santiago, 9 de junio.

Departamento de Asuntos Ambientales y Turismo, República de Sudáfrica. 2009. National Policy on Thermal Treatment of General and Hazardous Waste. *Government Gazette (Staatskoerant)*, 24 de julio de 2009.

EA (Environment Agency of England and Wales). 1999a. International Use of Substitute Liquid Fuels (SLF) Used for Burning in Cement Kilns. Research and Development Technical Report P282. Bristol: Environment Agency.

EA (Environment Agency of England and Wales). 1999b. Substitute Liquid Fuels (SLF) Used in Cement Kilns – Life Cycle Analysis. Research and Development Technical Report P274. Bristol: Environment Agency.

EA (Environment Agency of England and Wales). 2005. Measuring Environmental Performance: Sector Report for the Cement Industry. Version 1. Bristol: Environment Agency.

Environment Council. 2007. Designing Engagement for the Waste Sector. London: The Environment Council. Descargable en [http://www.the-environment-council.org.uk/index.php?option=com\\_docman&task=cat\\_view&gid=78&Itemid=64](http://www.the-environment-council.org.uk/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=78&Itemid=64) [Consultado el 2 de noviembre de 2009]

EIPPCB (European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau). 2003. Integrated Pollution Prevention and Control, Reference Document on the General Principles of Monitoring (Julio de 2003). Comisión Europea, Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies. Sevilla. Descargable en [ftp://ftp.jrc.es/pub/eippcb/doc/mon\\_bref\\_0703.pdf](ftp://ftp.jrc.es/pub/eippcb/doc/mon_bref_0703.pdf) [Consultado el 19 de agosto de 2009]

EIPPCB (European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau). 2006. Reference Document on Best Available Techniques for the Waste Treatment Industries (agosto de 2006). Comisión Europea, Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies. Sevilla. Descargable de [ftp://ftp.jrc.es/pub/eippcb/doc/wt\\_bref\\_0806.pdf](ftp://ftp.jrc.es/pub/eippcb/doc/wt_bref_0806.pdf) [Consultado el 4 de noviembre de 2010]

EIPPCB (European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau). 2010. Reference Document on Best Available Techniques in the Cement, Lime and Magnesium Oxide Manufacturing Industries (mayo de 2010). Comisión Europea, Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies. Sevilla. Descargable en [ftp://ftp.jrc.es/pub/eippcb/doc/clm\\_bref\\_0510.pdf](ftp://ftp.jrc.es/pub/eippcb/doc/clm_bref_0510.pdf) [Consultado el 21 de octubre de 2010]

Greer, W.L. 2003. Interactions Among Gaseous Pollutants from Cement Manufacture and Their Control Technologies. R&D Serial No. 2728. Portland Cement Association, Skokie, Illinois.

GTZ/Holcim. 2006. Guidelines on Co-Processing Waste Materials in Cement Production. The GTZ- Holcim Public Private Partnership. Descargable en <http://www.coprocem.com/Guidelines> [Consultado el 9 de octubre de 2008]

Höhne, N. y Ellermann, C. 2008. A Sectoral Approach and Technology Transfer for the Cement Sector. Federal Office for the Environment (FOEN), Switzerland. Descargable en [http://www.bafu.admin.ch/klima/index.html?lang=en&download=NHZLpZeg7t,lnp6I0NTU042I2Z6ln1adIIzn4Z2qZpnO2YUq2Z6gpJCFeyR6fGym162epYbg2c\\_JjKbNoKSn6A--.pdf](http://www.bafu.admin.ch/klima/index.html?lang=en&download=NHZLpZeg7t,lnp6I0NTU042I2Z6ln1adIIzn4Z2qZpnO2YUq2Z6gpJCFeyR6fGym162epYbg2c_JjKbNoKSn6A--.pdf) [Consultado el 5 de marzo de 2009]

Hund, G., Engel-Cox, J., Fowler, K., Peterson, T., Selby, S. and Haddon, M. 2002. Communication and Stakeholder Involvement: Guidebook for Cement Facilities. Battelle Memorial Institute and Environmental Resources Management (ERM) Ltd. Encargado por el Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible. Descargable en [http://www.wbcscement.org/pdf/battelle/stakeholder\\_guide.pdf](http://www.wbcscement.org/pdf/battelle/stakeholder_guide.pdf) [Consultado el 24 de mayo de 2009]

IEA (International Energy Agency). 2007. Tracking Industrial Energy Efficiency and CO<sub>2</sub> Emissions, In Support of the G8 Plan of Action. International Energy Agency (IEA), Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE).

IPCC, 2005. Informe especial del IPCC. La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono. Preparado por el Grupo III de Trabajo del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Metz, B., Davidson, O., de Coninck, H., Loos, M. and Meyer, L. (eds.)]. Cambridge University Press. Disponible en [http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs\\_spm\\_ts\\_sp.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_spm_ts_sp.pdf) [Acceso el 20 de agosto de 2009]

Karstensen, K.H. 2006a. Cement Production in Vertical Shaft Kilns in China: Status and Opportunities for Improvement. Informe a la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial. Descargable en <http://coprocec.ecs.ch/documents/3cementproductioniinverticalshaftkilnschina.pdf> [Consultado el 5 de enero de 2009]

Karstensen, K.H. 2006b. Formation and Release of POPs in the Cement Industry. Segunda edición. Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible/SINTEF. Descargable en <http://www.wbcsc.org/plugins/DocSearch/details.asp?type=DocDet&ObjectId=MTgyNzM> [Consultado el 10 de noviembre de 2008]

Karstensen, K.H. 2007a. A Literature Review on Co-processing of Alternative Fuels and Raw Materials and Hazardous Wastes in Cement Kilns. Department for Environmental Affairs and Tourism, Republic of South Africa. Descargable en <http://www.environment.gov.za/hotissues/2008/cementproduction/cement.html> [Consultado el 2 de enero de 2009]

Karstensen, K.H. 2007b. National policy on High Temperature Thermal Waste Treatment and Cement Kiln Alternative Fuel Use: Cement Production Technology. Departamento de Asuntos Ambientales y Turismo de la República de Sudáfrica. Descargable en <http://www.deat.gov.za/PolLeg/GenPolicy/2008Sep25/cement.html> [Consultado el 2 de enero de 2009]

Karstensen, K.H. 2008a. National policy on High Temperature Thermal Waste Treatment and Cement Kiln Alternative Fuel Use: Guidelines for Co-processing of Alternative Fuels and Raw Materials and Treatment of Organic Hazardous Wastes in Cement Kilns. Department Environmental Affairs and Tourism of the Republic of South Africa. Descargable en <http://www.deat.gov.za/PolLeg/GenPolicy/2008Sep25/cement.html> [Consultado el 2 de enero de 2009]

Karstensen, K.H. 2008b. Formation, release and control of dioxins in cement kilns - A review. *Chemosphere*, 70 (2008) 543 a 560.

Karstensen, K.H. 2009a. Guidelines for co-processing. Actas de la Conferencia Internacional de China sobre la Utilización de Materias Secundarias y Combustible en la Industria de Materiales de Construcción. Instituto de Información Técnica para la Industria de Materiales de Construcción de China, No.1, Guanzhuang Dongli, Distrito de Chaoyang, Beijing (China). Centro Internacional de Exposiciones de Beijing. 29 de junio de 2009.

Karstensen, K.H. 2009b. Requirements for Co-Processing of Alternative Fuels and Raw Materials and Treatment of Organic Hazardous Wastes in Cement Kilns. Actas de la Conferencia Internacional de China sobre la Utilización de Materias Secundarias y Combustible en la Industria de

Materiales de Construcción. Instituto de Información Técnica para la Industria de Materiales de Construcción de China, No.1, Guanzhuang Dongli, Distrito de Chaoyang, Beijing (China). Centro Internacional de Exposiciones de Beijing. 29 de junio de 2009.

Karstensen, K.H., Nguyen, K.K., Le B.T., Pham, H.V., Nguyen, D.T., Doan, T.T., Nguyen, H.H., Tao, M.Q., Luong, D.H. and Doan, H.T. 2006. Environmentally sound destruction of obsolete pesticides in developing countries using cement kilns. *Environmental Science & Policy*, 9 (2006), 577 a 586.

Kjuus, H., Lenvik, K. Kjørheim, K. and Austad, J. 2003. Epidemiological Assessment of the Occurrence of Allergic Dermatitis in Workers in the Construction Industry Related to the Content of Cr (VI) in Cement. Instituto Nacional Noruego de Higiene del Trabajo. Descargable en [http://www.wbcsd.org/web/projects/cement/tf3/nioh-study\\_chromium\\_allergic\\_dermatitis.pdf](http://www.wbcsd.org/web/projects/cement/tf3/nioh-study_chromium_allergic_dermatitis.pdf) [Consultado el 4 de noviembre de 2010]

Koppejan, J. y Zeevalkink, J.A. 2002. The calorific value as a criterion for waste recovery in the cement industry. TNO-Report R 2002/325. TNO Netherlands Organisation for Applied Scientific Research. Apeldoorn: TNO. Descargable en <http://www.coprocem.com/documents/energy-rapport-2002-325lhv-cement.pdf> [Consultado el 2 de julio de 2009]

Loréa, C. 2007. The Co-processing of Waste in the Cement Industry. *Global Fuels Magazine*. Junio, págs.12 á 15. Descargable en [http://www.propubs.com/GF/Articles/eGF\\_Jun07\\_Cembureau.pdf](http://www.propubs.com/GF/Articles/eGF_Jun07_Cembureau.pdf) [Consultado el 1 de abril de 2009]

Mantus, E.K. 1992. All fired up: Burning Hazardous Waste in Cement Kilns. Washington: Environmental Toxicology International.

Murray, A. y Price, L. 2008. Use of Alternative Fuels in Cement Manufacture: Analysis of Fuel Characteristics and Feasibility for Use in the Chinese Cement Sector. China Energy Group, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, U.S. Department of Energy. Descargable en <http://china.lbl.gov/publications/use-alternative-fuels-cement-manufacture-analysis-fuel-characteristics-and-feasibility->

Mutz, D., Andres, C., Hengevoss, D. y Morf, L. 2007. Co-Processing Waste Material in Energy-Intensive Industries (EII): A global study with focus on Europe. Universidad de Ciencias Aplicadas de Suiza Noroccidental, GEO Partner AG Resource Management.

OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos). 2000. Strategic Waste Prevention, OECD Reference Manual. ENV/EPOC/PPC(2000)5/FINAL.

SCB (Secretaría del Convenio de Basilea). 2007. Actualización de las directrices técnicas generales para el manejo ambientalmente racional de desechos consistentes en contaminantes orgánicos persistentes, que los contengan o estén contaminados con ellos (COP). Disponible en [http://basel.int/pub/techguid/tg-pops\\_s.pdf](http://basel.int/pub/techguid/tg-pops_s.pdf) [Consultado el 1 de abril de 2009]

Szabó, L., Hidalgo, I., Ciscar, J.C., Soria, A. and Russ P. 2003. Energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions from the world cement industry. Report EUR 20769 EN. Institute for Prospective Technological Studies, Joint Research Center, Comisión Europea. <http://ftp.jrc.es/EURdoc/eur20769en.pdf>

Taylor, H.F.W. 1997. Cement chemistry. Segunda edición. Thomas Telford, Londres.

Twigger, L., Ritchie, A., Hudson, B., Laban, K. y Davies, C. 2001. Solid Waste Derived Fuels for Use in Cement & Lime Kilns - An International Perspective. Research and Development Technical Report P4-087/TR/1. Bristol: Environment Agency.

U.S. EPA (U.S. Environmental Protection Agency). 1993. Report to Congress on Cement Kiln Dust. Descargable en: <http://epa.gov/wastes/nonhaz/industrial/special/ckd/cement2.htm> [Consultado el 3 de marzo de 2009]

U.S. EPA (U.S. Environmental Protection Agency). 1996. RCRA Public Participation Manual, edición de 1996. Office of Solid Waste. Washington: U.S. Environmental Protection Agency. Descargable en <http://www.epa.gov/waste/hazard/tsd/permit/pubpart/manual.htm> [Consultado el 2 de noviembre de 2009]

U.S. EPA (U.S. Environmental Protection Agency). 1998. National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants; Proposed Standards for Hazardous Air Pollutants Emissions for the Portland Cement Manufacturing Industry; Proposed Rule. 40 CFR part 63, 24 de marzo de 1998, 63 FR 14181. Descargable en <http://www.epa.gov/ttn/atw/pcem/pcempg.html> [Consultado el 11 de marzo de 2010]

U.S. EPA (U.S. Environmental Protection Agency). 2004. Draft Technical Support Document for HWC MACT Standards. Volume I: Description of Source Categories. Office of Solid Waste and Emergency Response. Washington: U.S. Environmental Protection Agency.

U.S. EPA (U.S. Environmental Protection Agency). 2007. Cement. In: Energy Trends in Selected Manufacturing Sectors: Opportunities and Challenges for Environmentally Preferable Energy Outcomes. Descargable en: <http://www.epa.gov/ispd/energy/index.html> [Consultado el 2 March 2009] <http://www.epa.gov/sectors/pdf/energy/ch3-2.pdf>

U.S. EPA (U.S. Environmental Protection Agency). 2010. Materials Characterization Paper in Support of the Proposed Rulemaking: Identification of Nonhazardous Secondary Materials That Are Solid Waste Cement Kiln Dust (CKD). 18 de marzo de 2010. Descargable en: <http://www.epa.gov/wastes/nonhaz/define/pdfs/cement-kiln.pdf> [Consultado el 5 de noviembre de 2010]

<http://www.epa.gov/wastes/nonhaz/define/pdfs/cement-kiln-final.pdf>

U.S. Geological Survey. 2009. Cement. In: Mineral Commodity Summaries 2009. Washington: U.S. Geological Survey. Descargable en: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/> [Consultado el 2 de marzo de 2009]

PNUMA (Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente). 1999. Cuestiones definitorias en materia de contaminantes orgánicos persistentes: eliminación, destrucción, desechos y existencias. Comité Intergubernamental de Negociación de un Instrumento Internacional Jurídicamente Vinculante para la Aplicación de Medidas Internacionales respecto de ciertos Contaminantes Orgánicos Persistentes. Tercer período de sesiones. Ginebra, 6 a 11 de septiembre de 1999. UNEP/POPS/INC.3/3. Disponible en [http://www.chem.unep.ch/Pops/POPs\\_Inc/INC\\_3/inc-spanish/inc3-3/inc3-3s.pdf](http://www.chem.unep.ch/Pops/POPs_Inc/INC_3/inc-spanish/inc3-3/inc3-3s.pdf)

PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente). 2007. Directrices sobre mejores técnicas disponibles y orientación provisional sobre mejores prácticas ambientales de conformidad con el artículo 5 y el anexo C del Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes: Hornos de cemento que incineran desechos peligrosos. Grupo de Expertos sobre mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales. Ginebra: PNUMA.

UNSD (United Nations Statistics Division). 2008. United Nations Commodity Trade Statistics Database (UN Comtrade). <http://comtrade.un.org/db/>

Van der Sloot, H.A., van Zomeren, A., Stenger, R., Schneider, M., Spanka, G., Stoltenberg-Hansson, E. y Dath, P. 2008. Environmental CRITERIA for CEMENT Based Products, ECRICEM. Executive Summary. Energy Research Centre of the Netherlands (ECN). ECN Report N° ECN-E--08-011. Descargable en <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2008/e08011.pdf> [Consultado el 10 de marzo de 2009]

Van Oss, H.G. 2005. Background Facts and Issues Concerning Cement and Cement Data. Open-File Report 2005-1152. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.

Van Oss, H.G. and Padovani, A.C. 2003. Cement manufacture and the environment. Part II: Environmental Challenges and Opportunities. *Journal of Industrial Ecology*, 7 (1), 93 a 126.

Watson, C., Newman, J., Upton, S. and Hackmann, P. 2005. Round Table on Sustainable Development: Can Transnational Sectoral Agreements Help Reduce Greenhouse Gas Emissions? SG/SD/RT(2005)1. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos. <http://www.oecd.org/dataoecd/35/53/39357524.pdf>

WBCSD (Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible). 2005. Guidelines for the Selection and Use of Fuels and Raw Materials in the Cement Manufacturing Process. Cement Sustainability Initiative (CSI). Ginebra: WBCSD. Descargable en <http://www.wbcd.org/includes/getTarget.asp?type=d&id=MTc4NjA> [Consultado el 9 de octubre de 2008]

Zeevalkink, J.A. 1997. The Materials and Energy Potential Method for the Quantitative Distinction Between Waste Valorization and Elimination in the Cement Industry. TNO-Report TNO-MEP - R 96/502. TNO Institute of Environmental Sciences, Energy Research and Process Innovation. Apeldoorn: TNO.

## Anexo I

### Recopilación de los resultados de verificaciones de rendimiento y ensayos de combustión en hornos de cemento (Dr. Kare Helge Karstensen, comunicación personal, 6 de noviembre de 2009)

#### Introducción

1. Los análisis de las emisiones de hornos de cemento en busca de la presencia de compuestos orgánicos durante la incineración de materiales peligrosos se llevan a cabo desde la década de 1970, cuando se empezó a utilizar los hornos de cemento para la combustión de desechos. Lauber (1987), Ahling (1979) y Benestad (1989) describieron algunos de estos primeros análisis en hornos de los Estados Unidos, Suecia y Noruega, y confirmaron la capacidad de los hornos de cemento para destruir los componentes orgánicos de los desechos introducidos. Por ejemplo, la EDE típica obtenida para compuestos como el cloruro de metileno, el tetracloruro de carbono, el triclorobenceno, el tricloroetano y los PCB es del 99,995% y superior.

2. Se han realizado estudios de emisiones globales cuando se quema un combustible convencional como el carbón, y cuando se introducen desechos peligrosos, y generalmente las conclusiones indican que no se han podido detectar diferencias significativas en el uso de ambos combustibles. Así, por ejemplo, Branscome y otros (1985) observó que "no se detectó un aumento estadísticamente significativo en las tasas de emisión cuando se quemó el combustible procedente de los desechos (en oposición al carbón)". Los primeros estudios sobre emisiones de dioxina también llegaron a esta conclusión (Branscome y otros (1985), Lauber (1987) y Garg (1990)).

#### A. Resultados de los ensayos de incineración realizados en la década de 1970

3. A mediados del decenio de 1970 se llevaron a cabo ensayos en la planta de cemento de St. Lawrence, en Canadá, para medir la destrucción de diversos corrientes de desechos clorados introducidos en un horno de fabricación de cemento por vía húmeda. La EDE global establecida para los compuestos clorados fue superior al 99,986%. Este valor se consideró artificialmente bajo porque el agua utilizada para convertir la materia prima en pasta estaba contaminada con compuestos clorados de bajo peso molecular.

4. En 1978 se realizó una serie de ensayos en la planta de cemento de Stora Vika, en Suecia, para evaluar la eficiencia de su horno de cemento en proceso por vía húmeda para destruir varios corrientes de desechos clorados. Aunque se encontró cloroformo en los gases de la chimenea, la mayoría de los compuestos clorados no fueron detectados. Se determinó una EDE superior al 99,995% para el cloruro de metileno, y una EDE superior al 99,9998% para el cloroetileno.

#### B. Resultados de los ensayos de incineración realizados en la década de 1980

5. Los ensayos de incineración de la década de los ochenta siguieron demostrando que se podían obtener EDE altas para los constituyentes orgánicos en el combustible procedente de desechos peligrosos quemado en hornos de cemento. Los resultados de los ensayos de incineración de un horno de cemento de proceso por vía húmeda y uno de fabricación por vía seca ilustran los valores típicos obtenidos para las EDE. Los principales constituyentes orgánicos peligrosos seleccionados para los ensayos de incineración fueron el cloruro de metileno, el 1,1,2-tricloro-1,2,2-trifluoroetano (freón 113), la etilmetilcetona, el 1,1,1-tricloroetano y el tolueno. Como se resume en la tabla siguiente, la mayoría de las EDE fueron superiores al 99,99%. Las EDE inferiores al 99,99% fueron consecuencia de problemas de contaminación del laboratorio o a una selección inadecuada del constituyente orgánico peligroso principal.

**Tabla 1. EDE medias para un horno de cemento de proceso por vía húmeda y uno de fabricación por vía seca**

Constituyente orgánico peligroso principal seleccionado	Horno de fabricación por vía húmeda	Horno de fabricación por vía seca
Cloruro de metileno	99,983 %	99,96 %
Freón 113	>99,999 %	99,999 %
Etilmetilcetona	99,988 %	99,998 %
1,1,1-Tricloroetano	99,995 %	>99,999 %
Tolueno	99,961 %	99,995 %

### C. Resultados de los ensayos de incineración realizados en la década de 1990

6. Los ensayos de incineración realizados en los noventa se han centrado en la selección de compuestos como constituyente orgánico peligroso principal que normalmente no están presentes como contaminantes o generados como productos de combustión incompleta por la combustión de combustibles convencionales. El uso de este criterio ha derivado en la obtención de EDE más precisas.
7. En el análisis de la EDE de un horno de fabricación de cemento por vía seca provisto de precalentador, los constituyentes orgánicos peligrosos principales seleccionados fueron el tetracloruro de carbono y el triclorobenceno. Cuando se introdujeron en la zona de combustión del horno, la EDE obtenida fue superior al 99,999% para el tetracloruro de carbono y superior al 99,995% para el triclorobenceno. Para determinar los límites del sistema se determinó también la EDE cuando estos constituyentes orgánicos peligrosos principales se introdujeron en la entrada del horno (es decir, el extremo frío) junto con neumáticos. La EDE obtenida fue superior al 99,999% para el tetracloruro de carbono y superior al 99,996% para el triclorobenceno.
8. Los análisis de EDE realizados en un horno de cemento propiedad de United Cement respaldan los resultados anteriores. El constituyente orgánico peligroso principal seleccionado fue el hexafluoruro de azufre a causa de su estabilidad térmica y la facilidad para medirlo en los gases de la chimenea. Además, con este compuesto son improbables los problemas de "contaminación" y las interferencias con productos de combustión incompleta. En todos los casos se obtuvo EDE superiores al 99,9998%.
9. En 1999 se llevó a cabo en Colombia un ensayo de incineración con suelo contaminado con plaguicidas que se introdujo en la entrada del horno en un horno de fabricación por vía seca. Los resultados del ensayo de incineración mostraron una EDE superior al 99,9999% para todos los plaguicidas introducidos.

### D. Resultados de ensayos de incineración recientes

10. En 2003 se realizó en Viet Nam un ensayo de incineración con dos compuestos clorados insecticidas caducados que se introdujeron a una velocidad de dos toneladas por hora a través del quemador principal. La EDE para los insecticidas introducidos fue superior al 99,99999%.
11. En un ensayo de incineración de tres días que se realizó en Sri Lanka en 2006 se demostró que el horno de cemento era capaz de destruir los PBC de manera irreversible y ambientalmente racional sin provocar ninguna nueva formación de PCDD/PCDF o HCB. La eficiencia de destrucción y eliminación (EDE) fue superior al 99,9999% a la máxima velocidad de alimentación de PBC.
12. En Venezuela, en 2007, se llevó a cabo un ensayo de incineración de cinco días con suelo contaminado con contaminantes orgánicos persistentes en un horno de cemento. El suelo estaba contaminado con niveles relativamente bajos de varios plaguicidas clorados, siendo los principales aldrina, dieldrina y endrina (hasta un máximo de 551 mg/kg). Las mediciones mostraron los mismos niveles bajos de dieldrina en el gas de la chimenea (0,019  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ ) cuando se introdujo suelo no contaminado y cuando el horno se alimentó con 2 t/h de suelo contaminado que contenía hasta 522 mg de dieldrina/kg. Por lo tanto, se puede suponer que la EDE medida de 99,9994% obtenida con la mayor concentración de alimentación es, probablemente, más alta en realidad.
13. En un estudio reciente se evaluaron más de 2.000 mediciones de PCDD/PCDF en hornos de cemento y se observó que la mayoría de los hornos de cemento modernos que realizan coprocesamiento de desechos (incluyendo desechos orgánicos peligrosos) pueden cumplir con niveles de emisión de 0,1 ng de PCDD/PCDF eqt- $i/\text{m}^3$ .

### E. Resumen

14. Los datos antiguos que ofrecían resultados de EDE en hornos de cemento por debajo del 99,99% proceden, con toda probabilidad, de fuentes desfasadas o de ensayos mal diseñados, o ambas cosas. En los primeros años del desarrollo de este concepto y de las técnicas analíticas y de muestreo para evaluar su comportamiento medioambiental, hubo varios ejemplos en los que se seleccionaron constituyentes orgánicos peligrosos principales que no cumplían con los criterios necesarios. Por ejemplo, un problema importante con muchos de los primeros ensayos era que los constituyentes orgánicos peligrosos principales seleccionados para la evaluación de EDE eran compuestos orgánicos que se encuentran normalmente en niveles traza en las emisiones de chimenea de los hornos de cemento que queman únicamente combustibles fósiles. A pesar de que estos contaminantes orgánicos persistentes se emitían a niveles muy bajos, interferían en gran medida con las mediciones de la destrucción de constituyentes orgánicos peligrosos principales. Los profesionales

se dieron cuenta en seguida de que no se podía medir correctamente la EDE si en los ensayos se utilizaban constituyentes orgánicos peligrosos principales químicamente iguales o muy relacionados con el tipo de productos de combustión incompleta emitidos de manera rutinaria por las materias primas. Por esta razón, los primeros resultados de ensayos de EDE (anteriores a 1990) deben tratarse siempre con cautela.

15. No obstante, en algunos casos los factores operativos durante el ensayo o el muestreo y las técnicas analíticas contribuyeron a los bajos resultados de EDE. Normalmente, estos son problemas que ocurrieron sólo en los primeros ensayos realizados durante las etapas de desarrollo de esta tecnología y que es posible evitar en la actualidad. Los ensayos de incineración son una buena forma de demostrar el comportamiento de los hornos y su capacidad para destruir desechos de manera irreversible y racional, pero el diseño y las condiciones de los ensayos resultan cruciales.

#### F. Primeras aplicaciones de las reglas de los ensayos de incineración a la evaluación de los hornos de cemento

16. Desde principios de los años setenta, el Organismo de Protección Ambiental de los Estados Unidos y varios organismos estatales del Canadá, Noruega y Suecia han llevado a cabo estudios de la viabilidad de utilizar hornos de cemento para la destrucción de desechos peligrosos. Estos desechos han incluido una amplia gama de hidrocarburos, compuestos aromáticos y aceites de desecho. Para estos ensayos se han utilizado hornos de cemento de fabricación por vía húmeda y por vía seca, hornos de agregados y hornos de cal.

17. Los informes disponibles sobre hornos de cemento aportan datos sobre la actuación en lo que respecta a los siguientes compuestos específicos: triclorometano (cloroformo); diclorometano (cloruro de metileno); tetracloruro de carbono; 1,2-dicloroetano; 1,1,1-tricloroetano; tricloroetileno; tetracloroetileno; 1,1,2-tricloro-1,2,2-trifluoroetano (freón 113); clorobenceno; benceno; xileno; tolueno; 1,3,5-trimetilbenceno; etilmetilcetona; isobutilmetilcetona; hexafluoruro de carbono; fenoxiácidos; hidrocarburos clorados; compuestos alifáticos clorados; compuestos aromáticos clorados; PBC, y COP plaguicidas.

**Tabla 2. Resumen de EDE para compuestos seleccionados de los años setenta y ochenta**

Lugar	constituyente orgánico peligroso principal o componente de desecho	EDE
St. Lawrence Cement (Canadá)	Compuestos alifáticos clorados	>99,990
	Compuestos aromáticos clorados	>99,989
	PBC	>99,986
Stora Vika (Suecia)	Cloruro de metileno	>99,995
	Tricloroetileno	>99,9998
	Todos los hidrocarburos clorados	>99,988
	PBC	>99,99998
	Fenoles clorados	>99,99999
	Fenoxiácidos	>99,99998
	Freón 113	>99,99986
Brevik (Noruega)	PBC	>99,99999
San Juan Cement (Puerto Rico)	Cloruro de metileno	93,292-99,997
	Triclorometano	92,171-99,96
	Tetracloruro de carbono	91,043-99,996
Portland (Los Robles)	Cloruro de metileno	>99,99
	1,1,1-Tricloroetano	99,99
	1,3,5-Trimetilbenceno	>99,95
	Xileno	>99,99
General Portland (Paulding)	Cloruro de metileno	99,956-99,998
	Freón 113	>99,999
	Etilmetilcetona	99,978-99,997
	1,1,1-Tricloroetano	99,991-99,999
	Tolueno	99,940-99,988
Lone Star Industries (Oglesby)	Cloruro de metileno	99,90-99,99
	Freón 113	99,999
	Etilmetilcetona	99,997-99,999
	1,1,1-Tricloroetano	>99,999
	Tolueno	99,986-99,998
Marquette Cement (Oglesby)	Cloruro de metileno	99,85-99,92

Lugar	constituyente orgánico peligroso principal o componente de desecho	EDE
	Etilmetilcetona	99,96
	1,1,1-Tricloroetano	99,60-99,72
	Tolueno	99,95-99,97
Rockwell Lime	Cloruro de metileno	99,9947-99,9995
	Etilmetilcetona	99,9992-99,9997
	1,1,1-Tricloroetano	99,9955-99,9982
	Tricloroetileno	99,997-99,9999
	Tetracloroetileno	99,997-99,9999
	Tolueno	99,995-99,998
Lugar I	1,1,1-Tricloroetano	99,88-99,98
	Tricloroetileno	99,8-99,994
	Benceno	82,5-98,5
	Tetracloroetileno	99,87-99,989
	Tolueno	99,7-99,90
	Clorobenceno	99,3-99,4
	Etilmetilcetona	99,93-99,98
	Freón 113	99,988-99,998
Lugar II	Cloruro de metileno	>99,99996->99,99998
	1,2-Dicloroetano	99,91->99,9993
	1,1,1-Tricloroetano	99,9998-99,9999
	Tetracloruro de carbono	99,8-99,995
	Tricloroetileno	99,996-99,9993
	Benceno	99,75-99,93
	Tetracloroetileno	99,998-99,9998
	Tolueno	99,997-99,9998
	Clorobenceno	99,92-99,97
	Etilmetilcetona	99,996->99,999992
	Freón 113	99,99991-99,99998
Florida Solite Corp.	Etilmetilcetona	99,992-99,999
	Isobutilmetilcetona	99,995-99,999
	Tetracloroetileno	99,995-99,999
	Tolueno	99,998-99,999

Fuente: EPA (1986)

18. Obsérvese que los cálculos de EDE no incluyen correcciones para los compuestos medidos durante los ensayos realizados para establecer la línea de base.

19. La formación de productos de combustión incompleta es un asunto que suele generar gran preocupación pública. Algunos de los ensayos de hornos demostraron incrementos menores de los productos de combustión incompleta resultantes de la combustión de desechos. No obstante, los ensayos realizados en instalaciones calentadas con carbón demuestran que dichos productos de combustión incompleta son prácticamente inevitables para estos sistemas. Aunque se midieron cantidades traza (<23 partes por billón) de dibenzodioxinas policloradas y dibenzofuranos policlorados en San Juan durante un contratiempo del horno, y puede haber trazas en Stora Vika, el informe resumen de la EPA concluye que no están confirmadas como productos de combustión incompleta durante la producción de desechos.

20. Si se introducen compuestos orgánicos líquidos de desecho en el extremo de encendido del horno de cemento, se puede ver rápidamente que estarán sometidos a las altas temperaturas y los tiempos de residencia largos del proceso de producción del clínker de cemento. En consecuencia, serán destruidos completamente por la combinación de los procesos de pirólisis y oxidación.



## Anexo II

### Fuentes de emisiones a la atmósfera

#### A. Material particulado

1. El proceso de fabricación de cemento requiere el tratamiento térmico (secado, calentamiento, calcinación, clinkerización, enfriamiento) de materiales mediante el contacto directo con gases calientes. También entraña el transporte de material neumático y la clasificación y separación del material. Una vez finalizados estos procesos, es preciso separar el aire, el gas y los materiales pulverizados. Una separación incompleta da lugar a emisiones de polvo (por la chimenea principal del horno/molino de crudo, por la chimenea de enfriamiento del clínker, por las chimeneas de las cementeras, por las salidas de aire para la extracción de polvo de los puntos de traslado de materiales).

2. En la UE, la mejor técnica disponible para las emisiones de polvo procedentes de operaciones polvorizadas no provenientes de procesos de cocción en hornos, de enfriamiento y de los principales procesos de trituración, consiste en reducir las emisiones de polvo de operaciones polvorizadas (teniendo en cuenta un sistema de gestión de mantenimiento) a menos de  $10 \text{ mg/Nm}^3$  (nivel de emisión asociado a la mejor técnica disponible o NEA-mejor técnica disponible), expresadas como la media del período de muestreo (medición puntual durante al menos treinta minutos), mediante la depuración del gas de escape seco con un filtro. La mejor técnica disponible para las emisiones de gases provenientes de procesos de cocción en hornos consiste en reducir las emisiones de polvo (partículas) de los gases de combustión de estos procesos mediante la depuración del gas de escape seco con un filtro. El NEA-mejor técnica disponible es  $<10\text{-}20 \text{ mg/Nm}^3$ , expresado como valor diario promedio. Cuando se aplican filtros textiles o poliestirenos expandidos nuevos o de mejor calidad, se alcanza el nivel más bajo (EIPPCB, 2010).

#### B. Óxidos de azufre

3. Se forma  $\text{SO}_2$  a partir de la oxidación de un sulfuro o del azufre elemental contenido en el combustible durante la combustión. Asimismo, el sulfuro o el azufre elemental de las materias primas puede transformarse en  $\text{SO}_2$  al "asarse" u oxidarse en zonas del horno con suficiente oxígeno y donde la temperatura del material esté entre los 300 y los 600°C. Los sulfatos de la mezcla bruta también pueden transformarse en  $\text{SO}_2$  en condiciones de reducción localizada en el sistema del horno. La naturaleza alcalina del cemento mantiene la absorción directa del  $\text{SO}_2$  dentro del producto, lo cual atenúa la cantidad de emisiones de  $\text{SO}_2$  en la corriente de escape.

4. El rango de emisiones depende del contenido de compuestos de azufre volátiles en las materias primas: generalmente por debajo de  $300 \text{ mg/Nm}^3$ ; a veces hasta  $3.000 \text{ mg/Nm}^3$ .

5. En la UE, la mejor técnica disponible para emisiones de  $\text{SO}_x$  consiste en mantener las emisiones de  $\text{SO}_x$  en un nivel bajo o reducir dichas emisiones de los gases de combustión provenientes de procesos de cocción en hornos y/o de procesos de precalentamiento/precalcinación mediante la adopción de una de las siguientes medidas/técnicas: adición de absorbente o depurador húmedo (EIPPCB, 2010).

6. Los niveles de emisión asociados a la mejor técnica disponible para los  $\text{SO}_x$  son (EIPPCB, 2010):

Parámetro	Unidad	NEA-mejor técnica disponible (valor diario promedio) a)
$\text{SO}_x$ expresados como $\text{SO}_2$	$\text{mg/Nm}^3$	$<50 - <400$

a) El rango considera el contenido de azufre en las materias primas

#### C. Óxidos de nitrógeno

7. De los cuatro mecanismos de formación de  $\text{NO}_x$  en horno de cemento, la formación de  $\text{NO}_x$  térmico y de  $\text{NO}_x$  del combustible son las más importantes. El  $\text{NO}_x$  térmico se forma a partir de la oxidación de nitrógeno molecular en el aire a alta temperatura. Esto sucede dentro y alrededor de la llama en la zona de combustión de un horno de cemento a temperaturas mayores a 1.200°C.

8. El  $\text{NO}_x$  del combustible se forma a partir de la oxidación de nitrógeno en el combustible, cualquiera sea la temperatura de combustión del proceso de fabricación de cemento. Debido a que la temperatura de combustión es más baja en el calcinador y en algunos sitios donde también se produce una combustión adicional, en dichos sitios la formación de  $\text{NO}_x$  del combustible es generalmente mayor que la de  $\text{NO}_x$  térmico.

9. La generación de NOx de materia prima sólo ha sido demostrada en el laboratorio mediante el calentamiento de las materias primas del cemento que contienen nitrógeno a una temperatura de entre 300°C y 800°C en presencia de oxígeno. Aparentemente, el calentamiento lento, como el que ocurre en los hornos grandes de fabricación por vía seca y por vía húmeda, aumenta la producción de NOx de una determinada materia prima. La producción de NOx de materia prima es potencialmente menor cuando la materia prima se calienta rápidamente en un sistema de precalentamiento o precalcificación. El NOx inmediato se forma a partir de la reacción de ciertos radicales derivados del combustible con el nitrógeno elemental en la llama de un hidrocarburo y contribuye mínimamente a la generación total de NOx.

10. El rango de emisiones (persistente) es de 300 a 2.000 mg/Nm<sup>3</sup>.

11. En la UE, la mejor técnica disponible para las emisiones de NOx consiste en reducir las emisiones de NOx de los gases de combustión provenientes de procesos de cocción en hornos mediante la adopción de las siguientes medidas/técnicas de forma individual o combinada (EIPPCB, 2010):

- a) medidas/técnicas principales, como el enfriamiento de la llama, la utilización de quemadores con emisión reducida de NOx, la adición de mineralizantes para mejorar la combustibilidad de la mezcla bruta (clínker mineralizado), y la optimización de procesos;
- b) combustión por etapas (combustibles convencionales o derivados de residuos), también en combinación con una precalcificación y el uso de una mezcla de combustibles optimizada;
- c) reducción selectiva no catalítica;
- d) reducción catalítica selectiva, sujeta a la presencia de un catalizador y un proceso adecuados en la industria del cemento.

12. Los niveles de emisión asociados a la mejor técnica disponible para NOx son (EIPPCB, 2010):

Tipo de horno	Unidad	NEA-MTD (valor diario promedio)
Hornos de precalentamiento	mg/Nm <sup>3</sup>	<200 – 450 (b)
Hornos Lepol y hornos rotatorios largos	mg/Nm <sup>3</sup>	400 – 800 a)

a) Según sean los niveles iniciales y el amoníaco no reaccionado.

b) El NEA-MTD es 500 mg/Nm<sup>3</sup>, cuando tras la aplicación de las medidas/técnicas principales el nivel de NOx inicial es >1.000 mg/Nm<sup>3</sup>. El diseño existente del sistema del horno, y las propiedades de la mezcla combustible, incluidos los desechos y la combustibilidad de la materia prima, pueden influir en la capacidad para mantenerse dentro del rango. En hornos con condiciones favorables, se alcanzan niveles inferiores a 350 mg/Nm<sup>3</sup>. Sólo tres plantas (que utilizan una mezcla de fácil combustión) notificaron un valor más bajo, de 200 mg/Nm<sup>3</sup>, expresado como promedio mensual.

#### D. Óxidos de carbono

13. El CO es un producto de combustión incompleta de combustibles carbonáceos que se origina cuando hay una cantidad insuficiente de oxígeno, o una mezcla insuficiente de oxígeno y combustible en el sitio de combustión, seguida de un rápido enfriamiento de los productos de la combustión hasta alcanzar una temperatura inferior a la temperatura de ignición del CO antes de su oxidación completa. La formación involuntaria de CO puede suceder en cualquiera de los sitios de combustión del sistema del horno. La emisión de CO generalmente indica la presencia de combustible parcialmente consumido e inutilizado.

14. Sin embargo, cuando se utiliza una combustión con deficiencias de oxigenación en el conducto ascendente o en el calcinador como estrategia de control del NOx, es posible que se genere CO durante el piromprocesamiento y que pueda además aparecer en la emisión de gases de combustión si no se oxida una vez formado.

15. El CO<sub>2</sub> se forma a partir de la combustión de combustible carbonáceo y la calcinación del componente calcáreo de la mezcla de materias primas, consecuencia inevitable e invariable de la fabricación de cemento. De la cantidad total de CO<sub>2</sub> emitido por un horno de cemento, cerca de la mitad se genera a partir de la materia prima, mientras que el resto se genera a partir de la combustión. Se emite alrededor de una tonelada de CO<sub>2</sub> por cada tonelada de clínker producida. Los sistemas con

mayor eficiencia térmica emiten algo menos mientras que los sistemas con menos eficiencia térmica emiten un poco más.

### E. Emisiones orgánicas

16. Las emisiones de compuestos orgánicos volátiles de hornos de cemento son de interés debido a su papel en la formación de ozono atmosférico y porque algunos compuestos orgánicos volátiles han sido catalogados como contaminantes atmosféricos peligrosos. Las emisiones de hidrocarburos totales (de las cuales los compuestos orgánicos volátiles son un subconjunto) son fundamentalmente generadas como resultado de la evaporación y/o el agrietamiento de los constituyentes del petróleo y de los querógenos que se encuentran en la mezcla de materias primas.

17. El potencial de emisiones orgánicas varía según la selección de materias primas y la variabilidad de la concentración de constituyentes orgánicos dentro de las fuentes de materia prima. Los productos de combustión incompleta orgánicos pueden formarse como resultado de una combustión incompleta en cualquiera de los sitios de combustión dentro de un sistema de piroprocesamiento.

18. El rango de emisiones depende del contenido de materia orgánica volátil en la materia prima: generalmente, por debajo de  $50 \text{ mg/Nm}^3$ ; a veces hasta  $500 \text{ mg/Nm}^3$ .

19. En la UE, la mejor técnica disponible para emisiones de carbono orgánico total consiste en mantener dichas emisiones procedentes de gases de combustión originados en procesos de cocción en hornos en un nivel bajo mediante la adopción de la siguiente medida/técnica: evitar introducir en el horno materias primas con un alto contenido de compuestos orgánicos volátiles por la vía de suministro de materia prima. Por otra parte, en la UE, las instalaciones donde se coprocesan desechos peligrosos y otros desechos deben cumplir con los requisitos de la Directiva 2000/76/CE del Consejo.

### F. Gases ácidos

20. La totalidad de los oxidantes necesarios para convertir  $\text{SO}_2$  en trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) está presente en los productos de la combustión de combustibles fósiles. Por lo tanto, es posible que haya emisiones de  $\text{SO}_3$  y/o de niebla de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  en las plantas de cemento. Las emisiones de niebla de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  pueden además ser mayores en aquellas plantas donde se utilizan "depuradores húmedos para tubos de escape".

21. Si las materias primas contienen flúor de manera natural o si éste se agrega como mineralizante, es posible que el sistema de horno de cemento genere emisiones de HF.

22. No está completamente claro cómo se forma HCl dentro de los hornos de cemento. Sin embargo, se ha demostrado parcialmente que las emisiones de HCl podrían ser independientes del cloro que se introduce al sistema del horno, posiblemente debido a la afinidad del cloro con el calcio y los metales alcalinos. Es posible que se produzcan emisiones si la cantidad de cloro incorporada excede la capacidad del clínker de absorber el cloro que entra.

23. Rango de emisiones de HCl: sistemas de horno SP/PC<sup>17</sup>,  $<10 \text{ mg/Nm}^3$ ; hornos de procesos húmedos, hasta  $80 \text{ mg/Nm}^3$ .

24. En la UE, la mejor técnica disponible consiste en mantener las emisiones de HCl por debajo de  $10 \text{ mg/Nm}^3$  (NEA-MTD), expresadas como valor diario promedio o como la media del período de muestreo (mediciones puntuales durante al menos treinta minutos), mediante la adopción de las siguientes medidas/técnicas principales de forma individual o combinada: utilizar materias primas y combustibles con bajo contenido de cloro y/o limitar el contenido de cloro de todo desecho que vaya a utilizarse como materia prima y/o combustible en un horno de cemento (EIPPCB, 2010).

25. De manera similar, la mejor técnica disponible consiste en mantener las emisiones de HF por debajo de  $1 \text{ mg/Nm}^3$  (NEA-MTD), expresado como HF, expresadas como valor diario promedio o como la media del período de muestreo (mediciones puntuales durante al menos treinta minutos), mediante la adopción de la siguiente medida/técnica principal de forma individual o combinada: utilizar materias primas y combustibles con bajo contenido de flúor y/o limitar la cantidad de flúor de todo desecho que vaya a utilizarse como materia prima y/o combustible en un horno de cemento (EIPPCB, 2010).

17 SP = horno con precalentamiento de suspensión; PC = horno con precalcinador

**G. Amoníaco**

26. Es posible que aparezcan pequeñas cantidades de  $\text{NH}_3$  en los gases de escape de un horno de cemento a partir de la pirólisis de los compuestos nitrogenados de los combustibles fósiles y las materias primas. Las emisiones de amoníaco de los hornos de cemento son de especial interés debido a su potencial contribución a la bruma regional. Además, justo fuera de la chimenea tienen lugar reacciones atmosféricas entre el  $\text{NH}_3$  y los óxidos de azufre o  $\text{HCl}$  que producen sulfato de amonio, bisulfato de amonio o cloruro de amonio bajo la forma de partículas muy finas. Estos productos de reacción se pueden observar como una anomalía perjudicial conocida como "desprendimiento de un penacho". Según el lugar donde esté ubicado el observador de la chimenea, el penacho que se desprende puede dar la idea errónea de que no se controlan adecuadamente las partículas que se emiten por la chimenea del horno.

27. Como regla general, el rango de emisiones es  $<1$  a  $15 \text{ mg/Nm}^3$ , aunque con excepciones de hasta  $40 \text{ mg/Nm}^3$ .

**H. Benceno**

28. Es posible que las materias primas convencionales y alternativas contengan benceno, el cual se quema parcialmente al precalentar el material.

29. El rango de emisiones normalmente oscila entre 1 y  $2 \text{ mg/Nm}^3$ , y alcanza  $3 \text{ mg/Nm}^3$  o más en casos aislados.

**I. Metales pesados**

30. Los metales pesados están omnipresentes en todo el material de entrada de los hornos de cemento. Debido a que el polvo de gas limpio (el polvo que queda luego de aspirar el polvo del equipo) es una fracción del material de entrada, también contiene metales pesados. Además, los metales pesados semivolátiles y volátiles se evaporan y condensan, predominantemente, en la fracción de polvo fino.

31. La mayoría de las emisiones de metales pesados se mantienen por debajo de los límites de detección, y todas las emisiones, excepto las de mercurio, permanecen por debajo de los límites generalmente aceptados como seguros. Las emisiones de mercurio pueden exceder los  $0,05 \text{ mg/Nm}^3$  en casos de aportaciones excesivas de materiales.

32. En la UE, la mejor técnica disponible para emisiones de metal consiste en reducir al mínimo las emisiones producidas por los metales de los gases de combustión originados en procesos de cocción en hornos mediante la adopción de las siguientes medidas/técnicas de manera individual o combinada (EIPPCB, 2010):

- a) seleccionar materiales con bajo contenido de los metales pertinentes y limitar el contenido de dichos metales en el material, especialmente de mercurio;
- b) utilizar un sistema de garantía de la calidad que asegure las características de los materiales de desecho utilizados;
- c) aplicar medidas/técnicas efectivas para la eliminación del polvo.

33. Los niveles de emisión asociados a las mejores técnicas disponibles para emisiones metálicas son (EIPPCB, 2010):

Metales	Unidad	NEA-MTD (media del período de muestreo) (mediciones puntuales durante al menos treinta minutos))
Hg	$\text{mg/Nm}^3$	$<0,05$ (b)
Cd + Tl	$\text{mg/Nm}^3$	$<0,05$ a)
Sb + As + Pb + Cr + Co + Cu + Mn + Ni + V		$<0,5$ a)

- a) Se informaron niveles bajos (EIPPCB, 2010).
- b) Se informaron niveles bajos (EIPPCB, 2010). Los valores superiores a  $0,03 \text{ mg/Nm}^3$  deberán estudiarse más detalladamente. Los valores cercanos a  $0,05 \text{ mg/Nm}^3$  exigen la consideración de medidas/técnicas adicionales como las descritas en el EIPPCB (2010).

## J. Dibenzo-p-dioxinas policloradas y dibenzofuranos policlorados

34. Es posible que las materias primas convencionales (pocas veces) y las alternativas contengan dioxinas, furanos o precursores avanzados que se queman parcialmente al precalentar el material. Siempre que se incorpore cloro en presencia de un material orgánico puede que se formen dibenzo-p-dioxinas policloradas (PCDD) y dibenzofuranos policlorados (PCDF) en procesos de calentamiento (combustión). Estas dioxinas también pueden formarse mediante la utilización del "mecanismo de síntesis de novo" en el precalentador o luego de pasar por él, así como en el dispositivo de control de la contaminación atmosférica, siempre que haya una cantidad suficiente de precursores de cloro e hidrocarburos en el rango de temperatura entre 200°C y 450°C.
35. En un informe de Karstensen (2006b), se proporciona un estudio exhaustivo de las emisiones de PCDD/PCDF de hornos de cemento en países desarrollados y en desarrollo.
36. En un estudio realizado por CEMBUREAU, se presentaron las mediciones de PCDD y PCDF de 110 hornos de cemento de 10 países europeos. La concentración promedio, teniendo en cuenta todos los datos disponibles, fue de 0,016 ng eqt-i/m<sup>3</sup>. La concentración más baja y la más alta medidas se situaron entre <0,001 y 0,163 ng eqt-i/m<sup>3</sup>. Todas las mediciones se expresaron corregidas según condiciones estándar (gas seco, 273 K, 101,3 kPa y O<sub>2</sub> al 10%).
37. Un informe de la empresa Holcim Cement Company, que opera con hornos de cemento en todo el mundo, revela que los valores promedio de PCDD/PCDF de 2001 y 2002 fueron 0,041 ng eqt/Nm<sup>3</sup> (en 71 hornos) y 0,030 ng eqt/Nm<sup>3</sup> (en 82 hornos) respectivamente. De estas mediciones, 120 se registraron en países de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE), que mostraron un valor promedio de 0,0307 ng eqt/Nm<sup>3</sup>; los valores mínimo y máximo medidos fueron de 0,0001 y 0,292 ng eqt/Nm<sup>3</sup> respectivamente, y en nueve hornos largos de vía húmeda se obtuvieron medidas superiores a 0,1 ng eqt/Nm<sup>3</sup>. En el caso de las 29 mediciones en países no pertenecientes a la OCDE, el valor promedio fue 0,0146 ng eqt/Nm<sup>3</sup>; los valores mínimo y máximo medidos fueron 0,0002 y 0,074 ng eqt/Nm<sup>3</sup> respectivamente, y no se obtuvieron medidas mayores a 0,1 ng eqt/Nm<sup>3</sup>.
38. Los datos sobre PCDD/PCDF suministrados por Karstensen (2006b) muestran que:
- la mayoría de los hornos de cemento pueden cumplir con un nivel de emisiones de 0,1 ng eqt/Nm<sup>3</sup> si se adoptan las medidas primarias;
  - el coprocesamiento de desechos vertidos al quemador principal, entrada del horno o precalcinador no parece influir sobre las emisiones de COP o modificarlas;
  - los datos de hornos de cemento con precalentador y precalcinador de países en desarrollo muestran niveles de emisiones mucho menores que 0,1 ng eqt/Nm<sup>3</sup>.
39. En la UE, la mejores técnicas disponibles para las emisiones de PCDD/PCDF consiste en evitarlas, o mantenerlas en niveles bajos cuando se trate de emisiones de PCDD/PCDF provenientes de gases de combustión originados durante procesos de cocción en hornos, mediante la adopción de las siguientes medidas/técnicas de forma individual o combinada (EIPPCB, 2010):
- seleccionar y controlar cuidadosamente lo que ingresa a los hornos (materias primas), es decir cloro, cobre y compuestos orgánicos volátiles;
  - seleccionar y controlar con cuidado lo que ingresa a los hornos (combustibles), es decir cloro y cobre;
  - limitar/evitar la utilización de desechos que contengan materiales orgánicos clorados;
  - evitar el uso de combustibles con alto contenido de halógenos (por ejemplo cloro) en la cocción secundaria;
  - enfriar rápidamente los gases de escape del horno hasta menos de 200°C y reducir al mínimo el tiempo de residencia de los gases de combustión y el contenido de oxígeno en las zonas donde las temperaturas oscilan entre 300°C y 450°C;
  - dejar de introducir desechos para las operaciones de puesta en marcha y/o apagado.
40. Los NEA-MTD para las PCDD/PCDF oscilan entre <0,05 y 0,1 ng eqt-l/Nm<sup>3</sup>, expresados como valor promedio a lo largo del período de muestreo (6 a 8 horas) (EIPPCB, 2010). Por otra parte, en la UE, las instalaciones donde se coprocesan desechos peligrosos y otros desechos deberán cumplir con los requisitos de la Directiva 2000/76/CE del Consejo.

**K. Hexaclorobenceno y bifenilos policlorados**

41. A la fecha, ni el hexaclorobenceno (HCB) ni los PCB han sido sometidos a controles reglamentarios en las plantas de cemento. La mayoría de las mediciones que se han realizado no detectaron emisiones de HCB. En lo que respecta a las emisiones de PCB, 40 mediciones realizadas en 13 hornos en Alemania en 2001 revelaron la existencia de una concentración máxima de  $0,4 \mu\text{g PCB}/\text{Nm}^3$ ; en nueve de las 40 mediciones no se detectaron PCB. Como resultado del coprocesamiento de plaguicidas en Viet Nam, se registraron emisiones de dioxina bajo la forma de PCB de  $0,001 \text{ ng eq}/\text{m}^3$  y emisiones de HCB por debajo del límite de detección de  $31 \text{ ng}/\text{m}^3$ .

Fuentes: EIPPCB (2010), GTZ/Holcim (2006), PNUMA (2007), Karstensen (2006b), Greer (2003).

---