

El Grupo del Banco Mundial NO UTILIZA MÁS este documento. Las nuevas versiones de las Guías sobre Medio Ambiente, Salud y Seguridad del Grupo del Banco Mundial están disponibles en <http://www.ifc.org/ehsquidelines>.

Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para la fabricación de cemento y cal

Introducción

Las guías sobre medio ambiente, salud y seguridad son documentos de referencia técnica que contienen ejemplos generales y específicos de la práctica internacional recomendada para la industria en cuestión¹. Cuando uno o más miembros del Grupo del Banco Mundial participan en un proyecto, estas guías sobre medio ambiente, salud y seguridad se aplican con arreglo a los requisitos de sus respectivas políticas y normas. Las presentes guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para este sector de la industria deben usarse junto con el documento que contiene las **guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad**, en el que se ofrece orientación a los usuarios respecto de cuestiones generales sobre la materia que pueden aplicarse potencialmente a todos los sectores industriales. En el caso de proyectos complejos, es probable que deban usarse las guías aplicables a varios sectores industriales, cuya lista completa se publica en el siguiente sitio web: <http://www.ifc.org/ifcext/sustainability.nsf/Content/EnvironmentalGuidelines>

Las guías sobre medio ambiente, salud y seguridad contienen los niveles y los indicadores de desempeño que generalmente pueden lograrse en instalaciones nuevas, con la tecnología existente y a costos razonables. En lo que respecta a la

posibilidad de aplicar estas guías a instalaciones ya existentes, podría ser necesario establecer metas específicas del lugar así como un calendario adecuado para alcanzarlas.

La aplicación de las guías debe adaptarse a los peligros y riesgos establecidos para cada proyecto sobre la base de los resultados de una evaluación ambiental en la que se tengan en cuenta las variables específicas del emplazamiento, tales como las circunstancias del país receptor, la capacidad de asimilación del medio ambiente y otros factores relativos al proyecto. La decisión de aplicar recomendaciones técnicas específicas debe basarse en la opinión profesional de personas idóneas y con experiencia.

En los casos en que el país receptor tiene reglamentaciones diferentes a los niveles e indicadores presentados en las guías, los proyectos deben alcanzar los que sean más rigurosos. Si corresponde utilizar niveles o indicadores menos rigurosos en vista de las circunstancias específicas del proyecto, debe incluirse como parte de la evaluación ambiental del emplazamiento en cuestión una justificación completa y detallada de cualquier alternativa propuesta, en la que se ha de demostrar que el nivel de desempeño alternativo protege la salud humana y el medio ambiente.

Aplicabilidad

Las guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para la fabricación de cemento y cal incluyen información relevante para los proyectos de fabricación de cemento y cal. La extracción de materias primas, una actividad común asociada a los proyectos de fabricación de cemento, se trata en las guías

¹ Definida como el ejercicio de la aptitud profesional, la diligencia, la prudencia y la previsión que podrían esperarse razonablemente de profesionales idóneos y con experiencia que realizan el mismo tipo de actividades en circunstancias iguales o semejantes en el ámbito mundial. Las circunstancias que los profesionales idóneos y con experiencia pueden encontrar al evaluar el amplio espectro de técnicas de prevención y control de la contaminación a disposición de un proyecto pueden incluir, sin que la mención sea limitativa, diversos grados de degradación ambiental y de capacidad de asimilación del medio ambiente así como diversos niveles de factibilidad financiera y técnica.

sobre medio ambiente, salud y seguridad para la extracción de materiales de construcción. El Anexo A contiene una descripción completa de las actividades industriales de este sector. Este documento está dividido en las siguientes secciones:

Sección 1.0: Manejo e impactos específicos de la industria

Sección 2.0: Indicadores y seguimiento del desempeño

Sección 3.0: Referencias

Anexo A: Descripción general de las actividades de la industria

1.0 Manejo e impactos específicos de la industria

La siguiente sección contiene una síntesis de las cuestiones relativas al medio ambiente, la salud y la seguridad asociadas a la fabricación de cemento y cal que tienen lugar durante la fase operacional, así como recomendaciones para su manejo. Por otra parte, en las **guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** se ofrecen recomendaciones para el manejo de las cuestiones de este tipo que son comunes a la mayoría de las grandes actividades industriales durante las etapas de construcción y de desmantelamiento.

1.1 Medio ambiente

Entre las cuestiones ambientales relativas a los proyectos de fabricación de cemento y cal se incluyen principalmente las siguientes:

- Emisiones al aire
- Consumo de energía y combustibles
- Aguas residuales
- Generación de residuos sólidos
- Ruido

Emisiones al aire

Las emisiones al aire en la fabricación de cemento y cal son consecuencia de la manipulación y almacenamiento de materiales intermedios y finales, y del funcionamiento de hornos, enfriadores de clínker y molinos. Actualmente se utilizan varios tipos de hornos para la fabricación de cemento (con precalentador-precalcinador (PCP), con precalentador (PC), largos de proceso seco (LS), semisecos, semihúmedos y de proceso húmedo). Los hornos PCP suelen ser mejores en lo que a desempeño ambiental se refiere. Aunque aún siguen funcionando hornos de eje, por lo general sólo son viables desde un punto de vista económico para las plantas pequeñas, de modo que su número se está reduciendo con la renovación de las instalaciones.

En el caso de la fabricación de cal, existen cuatro tipos básicos de hornos que se utilizan para fabricar distintos tipos (reactividad) de cal viva: giratorios, de eje vertical (más de 10 variedades), de parrilla móvil y de calcinación con gas en suspensión.

Gases de escape

El uso de fuentes de combustión para generar energía es común en este sector de la industria. En las **guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** se proporciona orientación con respecto al manejo de pequeñas emisiones procedentes de fuentes de combustión con una capacidad de hasta 50 megavatios-hora (MWth), incluidas normas en materia de emisiones al aire para los gases de escape. En cuanto a las emisiones procedentes de fuentes con una capacidad de más de 50 MWth, consúltense las **guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para las centrales térmicas**.

Partículas

Uno de los impactos más significativos de la fabricación de cemento y cal son las emisiones de partículas. Las principales fuentes de estas emisiones y sus respectivos métodos recomendados de prevención y control incluyen las que se detallan a continuación.

En el caso de las emisiones de partículas asociadas con la manipulación y el almacenamiento de materiales intermedios y finales (incluido el triturado y la molienda de las materias primas), la manipulación y almacenamiento de combustibles sólidos, el transporte de materiales (p. ej. mediante camiones o cintas transportadoras) y las actividades de empaquetado, las técnicas recomendadas para la prevención y control de la contaminación incluyen las siguientes:

- Utilizar un diseño simple y lineal en las operaciones de manipulación de los materiales para reducir la necesidad de múltiples puntos de transferencia;
- Utilizar cintas transportadoras cerradas para el transporte de los materiales y para el control de las emisiones en los puntos de transferencia;
- Limpiar las cintas de retorno en los sistemas de cintas transportadoras;
- Almacenar las materias primas trituradas y premezcladas en naves cubiertas o cerradas;
- Almacenar el carbón pulverizado y el coque de petróleo en silos;
- Almacenar los combustibles derivados de residuos en zonas protegidas del viento y de otros factores climáticos;
- Almacenar el clínker en silos cubiertos / cerrados o en silos dotados de extracción automática de polvo;
- Almacenar el cemento en silos con un sistema automático de recarga y carga de las tolvas a granel;
- Almacenar la cal quemada cribada por tamaños en depósitos o silos y almacenar los granos finos de cal hidratada en silos sellados;

- Implementar un mantenimiento y organización adecuados de la planta para mantener al mínimo las pequeñas fugas y filtraciones de aire;
- Manipular el material (p.ej. durante las operaciones de triturado, molienda de crudo y molienda del clínker) en sistemas cerrados mantenidos mediante extractores a una presión negativa. Recoger el aire de ventilación y eliminar el polvo utilizando ciclones y filtros de bolsa;
- Implementar, en la medida en que sea posible, sistemas automáticos de llenado y manipulación de los sacos, incluido:
 - Emplear una máquina giratoria para rellenar los sacos dotada de un alimentador automático de sacos de papel y control de emisiones fugitivas
 - Utilizar un control automático de peso para cada saco durante la descarga
 - Utilizar cintas transportadoras para transportar los sacos hasta las empacadoras
 - Almacenar las paletas acabadas en naves cubiertas para su posterior envío

Para las emisiones de partículas asociadas con el funcionamiento de hornos, enfriadores de clínker y molinos, incluido el quemado de clínker y caliza, las técnicas recomendadas de prevención y control, además de mantener el buen funcionamiento de los hornos,² son:

- Recoger mediante filtros el polvo de los hornos y los enfriadores, y reciclar las partículas recuperadas en la alimentación del horno y en el clínker, respectivamente;
- Utilizar precipitadores electrostáticos (PEE) o filtros de tela (depuradores de filtro) para recoger y controlar las

² Garantizar el buen funcionamiento del horno significa mantener éste en condiciones permanentes de funcionamiento óptimas.

emisiones de partículas finas de los gases que generan los hornos;³

- Utilizar ciclones para separar las partículas gruesas de los gases más fríos, y posteriormente filtros de tela;
- Recoger mediante filtros de tela el polvo generado en la molienda⁴ y reciclarlo en el interior del molino.

Óxidos de nitrógeno

Las emisiones de óxido de nitrógeno (NO_x) se generan durante el proceso de combustión a altas temperaturas de los hornos de cemento. Las técnicas de prevención y control recomendadas, además de garantizar el buen funcionamiento de los hornos, son las siguientes:

- Mantener el flujo de aire secundario tan bajo como sea posible (p.ej. reducción de oxígeno);
- Enfriar la llama añadiendo agua al combustible o directamente a la llama (p.ej. disminución de la temperatura o incremento de la concentración de radical hidroxilo). Enfriar la llama puede tener un impacto negativo en el consumo de combustible, provocando un aumento de éste en 2–3 por ciento y, por tanto, un incremento proporcional de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂);
- Utilizar quemadores de bajo NO_x para evitar focos de emisión localizada;
- Desarrollar un proceso de combustión en etapas⁵, como el que se aplica en los hornos precalentadores-precalcinadores (PCP) y precalentadores (PC);

³ Aunque los PEE son fiables en condiciones normales de funcionamiento, existe un riesgo de explosión cuando las concentraciones de monóxido de carbono (CO) en los escapes del horno superan un 0,5 por ciento. Para evitar estos riesgos, los operadores deben garantizar un manejo y control adecuados y continuos de los procesos de encendido, incluido el seguimiento continuo de los niveles de CO (particularmente durante el encendido del horno) con el fin de cortar la electricidad cuando sea necesario.

⁴ Los PEE no son adecuados para extraer el polvo de los molinos.

- Fabricación de cal: la generación de óxido de nitrógeno (NO_x) suele ser menor en la fabricación de cal que en la de cemento. Como el quemado de la caliza suele realizarse a temperaturas más bajas, las emisiones de NO_x procedentes de esta fuente son inferiores y pueden controlarse utilizando quemadores de bajo NO_x.

Dióxidos de azufre

Las emisiones de dióxido de azufre (SO₂) en la fabricación de cemento están asociadas, principalmente, con el contenido en azufre volátil o reactivo de las materias primas⁶ y, en menor medida, con la calidad de los combustibles utilizados para la generación de energía. Las técnicas recomendadas de control de la contaminación para reducir el SO₂, además de garantizar el buen funcionamiento de los hornos, incluyen las siguientes:

- Utilizar un molino vertical y los gases que pasan por el molino para recuperar energía y reducir el contenido en azufre del gas. En el interior del molino, el gas que contiene óxido de azufre se mezcla con el carbonato de calcio (CaCO₃) de los metales brutos y genera sulfato de calcio (yeso);
- Seleccionar un combustible con bajo contenido en azufre;
- Inyectar en los gases de escape absorbentes como cal hidratada (Ca(OH)₂), óxido de calcio (CaO) o cenizas finas con un alto contenido en CaO antes de utilizar los filtros;
- Utilizar lavadores de gases húmedos o secos.⁷

Las emisiones de SO₂ suelen ser menores en la fabricación de la cal que en la de cemento por el menor contenido en azufre de las materias primas. Las técnicas para limitar las emisiones de SO₂ incluyen las siguientes:

⁶ Las materias primas con un alto contenido en azufre orgánico o pirita (FeS) generan emisiones elevadas de SO₂.

⁷ La limpieza en seco es una técnica más cara y, por lo tanto, menos frecuente que la limpieza húmeda y suele emplearse cuando las emisiones de SO₂ pueden ser superiores a 1.500 mg/Nm³.

- Seleccionar los materiales de cantera con un menor contenido en azufre volátil;
- Inyectar cal hidratada o bicarbonato en la corriente de gases de escape antes de utilizar los filtros;
- Inyectar cal viva o hidratada finamente dividida en la campana de combustión del horno.

Gases de efecto invernadero

Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), especialmente de dióxido de carbono (CO₂),⁸ están asociadas, principalmente, a la combustión y a la descarbonatación de caliza, que en su forma pura contiene un 44 por ciento de CO₂. Las técnicas recomendadas para la prevención y control de las emisiones de CO₂, además de garantizar el buen funcionamiento de los hornos, incluyen las siguientes:

- Producir cementos mezclados, que permiten una reducción significativa en el consumo de combustible y, por lo tanto, en las correspondientes emisiones de CO₂ por tonelada de producto final;
- Seleccionar y conducir procesos que fomenten la eficiencia energética (seco/ precalentador / precalcinador);
- Seleccionar combustibles con una baja proporción de contenido en carbono con respecto al poder calorífico (p.ej. gas natural, petróleo residual y algunos combustibles derivados de residuos);
- Seleccionar materias primas con un contenido más bajo en materia orgánica.

La contribución del monóxido de carbono a las emisiones de gases de efecto invernadero es pequeña (menos del 0,5–1 por

⁸ Debido a las elevadas temperaturas y a las condiciones de oxidación, es poco probable que las plantas de cemento y cal emitan el gas de efecto invernadero N₂O. La única fuente potencial de N₂O serían las emisiones directas procedentes de las materias primas del molino de crudo.

ciento de los gases totales emitidos).⁹ Estas emisiones suelen estar relacionadas con el contenido en materia orgánica de las materias primas. Las **guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** contienen recomendaciones adicionales para el manejo de los GEI.

Metales pesados y otros contaminantes atmosféricos

Los metales pesados (p.ej. el plomo, el cadmio y el mercurio) pueden constituir una fuente significativa de emisiones en la fabricación de cemento, y se generan por el uso de materias primas, combustibles fósiles y combustibles derivados de residuos. La mayor parte de los metales no volátiles están ligados a la presencia de materia en partículas. Las emisiones de metales volátiles, como el mercurio¹⁰, suelen proceder tanto de las materias primas como de los combustibles derivados de residuos, y no pueden controlarse mediante la utilización de filtros.

Las técnicas recomendadas para limitar las emisiones de metales pesados incluyen las siguientes:

- Implementar medidas de reducción del polvo / partículas, tal y como se describe más arriba, para captar metales ligados. En el caso de concentraciones elevadas de metales pesados volátiles (en particular, de mercurio), puede ser necesaria la absorción por carbón activado. Los residuos sólidos resultantes deben manejarse como residuos peligrosos, tal y como describen las **guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad**;

⁹ El CO constituye un indicador de las condiciones del proceso. Un elevado nivel de CO suele ser una señal de alarma de que el proceso de fabricación no está funcionando adecuadamente (lo que puede traducirse en un mayor consumo de combustible). El monóxido de carbono debe estar sometido a un seguimiento continuo. Además, la utilización de PEE lleva aparejado un riesgo de explosión relacionado con concentraciones de CO superiores al 0,5–1 por ciento.

¹⁰ El mercurio se introduce en los hornos principalmente a través de las materias primas (aproximadamente un 90 por ciento) y, en cantidades menores (aproximadamente un 10 por ciento), a través de los combustibles.

- Implementar un seguimiento y control del contenido en metales pesados volátiles en los insumos y en los combustibles derivados de residuos mediante la selección de materiales. Dependiendo de la clase de metales volátiles presentes en el flujo de gas, las opciones de control pueden incluir lavadores de gases húmedos y la adsorción por carbón activado;
- Hacer funcionar el horno de forma controlada y estable para evitar apagados de emergencia de los precipitadores electrostáticos (en caso de que la instalación los tenga);
- No deben utilizarse combustibles derivados de residuos durante el encendido o el apagado.

Combustibles derivados de residuos

Los hornos para fabricar cemento son capaces, gracias a su atmósfera altamente alcalina y a la elevada temperatura que alcanzan (2.000°C), de emplear combustibles derivados de residuos de un alto poder calorífico (p.ej. disolventes usados, residuos de aceite, llantas usadas, residuos plásticos y residuos químicos orgánicos, incluidos bifenilos policlorados [BPC], plaguicidas organoclorados (POC) obsoletos y otros materiales clorados). La utilización de combustibles derivados de residuos, si no es debidamente controlada y manejada, puede generar emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV), dibenzodioxinas policloradas (DDPC) y dibenzofuranos policlorados (DFPC), fluoruro de hidrógeno (FH), ácido clorhídrico (HCl), y metales tóxicos y sus compuestos.

La utilización de combustibles derivados de residuos o de materias primas residuales para la fabricación de cemento exige un permiso específico de las autoridades locales. Dicho permiso deberá especificar la cantidad y tipos de residuos que pueden utilizarse como combustible o como materia prima, e incluir asimismo normas de calidad como, por ejemplo, poder calorífico mínimo y concentraciones máximas de contaminantes

específicos (tales como BPC, cloro, HAP, mercurio y otros metales pesados).

Las técnicas recomendadas de prevención y control para este tipo de contaminantes atmosféricos incluyen las siguientes:

- Implementar técnicas de reducción de partículas para mitigar las emisiones de metales pesados no volátiles y manejar los materiales residuales recogidos como material peligroso tal y como se describe en las **guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad**;
- Implementar el seguimiento y control del contenido en metales pesados volátiles en los insumos y en los combustibles derivados de residuos a través de procesos de selección de los materiales. Dependiendo de la clase de metales volátiles presentes en el flujo de gas, las opciones de control pueden incluir lavadores de gases húmedos y la adsorción por carbón activado;
- Inyectar directamente combustibles que contienen metales volátiles o altas concentraciones de COV en el quemador principal, y no a través de los quemadores secundarios;
- Evitar el empleo de combustibles con un alto contenido en halógenos durante el calentamiento secundario y durante las fases de encendido y apagado;
- Mantener los plazos de enfriamiento del gas de los hornos (de 500 a 200°C) al mínimo para evitar o minimizar la síntesis de los DDPC y los DFPC ya destruidos^{11,12,13};
- Implementar prácticas adecuadas de almacenamiento y manipulación de los residuos peligrosos y no peligrosos

¹¹ Las DDPC y los DFPC quedan destruidos en la llama y en los gases de alta temperatura, pero pueden sintetizarse de nuevo con un intervalo de temperaturas más bajas (250–500°C). En los hornos PCP y PC, donde el flujo de ciclones es rápido, es posible, por lo general, operar con tiempos de refrigeración cortos a menos de 200°C, pero en otro tipo de hornos esto es mucho más difícil de lograr.

¹² El empleo de carbón activado en la industria del cemento para adsorber restos de metales volátiles (p.ej. mercurio), COV o DDPC–DFPC se halla aún en fase de experimentación, principalmente debido a la diferente composición de los gases. Unas buenas condiciones de funcionamiento y una cuidadosa selección de los insumos pueden eliminar la necesidad de utilizar carbón activado.

que vayan a usarse como combustible derivado de residuos o como materia prima, tal y como se describe en las **guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad**.

- Los combustibles y las materias primas residuales rara vez se emplean en la *fabricación de cal* debido a los requisitos de calidad del producto.¹⁴

Consumo de energía y combustibles

La fabricación de cemento y cal es una industria intensiva en energía. Los costos de la energía eléctrica y de los combustibles pueden representar un 40–50 por ciento de los costos de producción totales. Además de las recomendaciones sobre ahorro de energía contenidas en las **guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad**, las recomendaciones específicas para el sector incluyen las siguientes.

Hornos

En el caso de plantas nuevas y reestructuraciones significativas, las buenas prácticas internacionales para la fabricación de clínker de cemento implican la utilización de un horno de proceso seco con precalentamiento y precalcinación en etapas (hornos PCP). Los hornos PCP son los más utilizados en la industria cementera. Son los que menos calorías consumen (debido a la elevada recuperación del calor del gas del horno en los ciclones, y a las escasas pérdidas de

calor del horno), y no tienen agua alguna que evaporar (a diferencia de los hornos húmedos, que utilizan lechada), y al mismo tiempo son los de mayor capacidad productiva. También se utilizan con frecuencia, debido a su fácil funcionamiento, los hornos PC. El consumo de calor de los hornos PC es sólo ligeramente superior al de los hornos PCP; sin embargo, su capacidad productiva es significativamente menor que la de éstos. Los restantes tipos de hornos (hornos largos secos [LS], semisecos, semihúmedos y de proceso húmedo) se consideran obsoletos.¹⁵ Para mejorar la eficiencia energética, el calor del enfriador debe utilizarse como aire caliente utilizable, por ejemplo a través de un conducto de aire terciario en el precalcinador.

En el caso de la fabricación de cal, los hornos de cuba anular, los hornos regenerativos de flujo paralelo y otros hornos de cuba consumen menos energía y son más flexibles en lo que a combustibles se refiere. La sección sobre 'Uso de los recursos y residuos' (más adelante) indica cuál es el consumo medio de calor y electricidad en los diferentes tipos de hornos.

Enfriadores

El único tipo de enfriador de clínker que se instala en la actualidad es el "enfriador de parrilla", que se fabrica en muchas versiones. El objetivo del enfriador es rebajar la temperatura del clínker lo más rápidamente posible y calentar el aire secundario a la mayor temperatura posible a fin de reducir el consumo de combustible.

¹³ En SINTEF (2006) puede hallarse más información sobre la prevención y control de las emisiones de DDPC y DFPC.

¹⁴ El tipo de combustible utilizado en la fabricación de cal tiene un impacto significativo en la calidad de la cal que se produce, principalmente debido al contenido en azufre, que penetra en el producto y reduce su valor. Los diferentes tipos de combustibles pueden afectar a la calidad del producto si la combustión no es completa. Así pues, el gas natural y el petróleo, por sus propiedades de quemado, son los combustibles más empleados en la fabricación de la cal. El carbón (con bajo contenido en azufre) y el coque de petróleo cuando el contenido final en azufre del producto no constituye una preocupación. Los combustibles derivados de residuos y las materias primas residuales rara vez se emplean en la fabricación de cal debido a los requisitos de calidad del producto.

¹⁵ Los hornos de proceso en seco producen casi un 80 por ciento del cemento que se fabrica en Europa. Los hornos no secos deben pasar a utilizar procesos en seco si se actualizan o amplían. Los hornos largos secos (LS) consumen mucho más calor y suelen presentar problemas de mantenimiento (con sus correspondientes costos) significativos. Los hornos semisecos y semihúmedos (Lepol) ofrecen un consumo de calor intermedio debido a la humedad presente en la materia peletizada del horno. Los hornos semihúmedos consumen más electricidad y tienen unos costos de mantenimiento superiores debido a los filtros-prensa. Los hornos de proceso húmedo (ahora muy en desuso) son la más antigua de las tecnologías de hornos verticales, con el mayor consumo de calor y la menor capacidad productiva. Los hornos de cuba ya no se consideran una tecnología adecuada para fabricar cemento.

Combustibles

El combustible empleado con más frecuencia en la industria cementera es el carbón pulverizado (carbón negro y lignito). No obstante, el menor costo del coque de petróleo ha incrementado el uso de este tipo de combustible. El carbón y el coque de petróleo generan más emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que el petróleo residual y el gas natural (p.ej. aproximadamente unas emisiones un 65 por ciento mayores que el gas).¹⁶ Además, el alto contenido en azufre del combustible (característico del coque de petróleo) puede provocar problemas, particularmente, la acumulación de azufre en los anillos del horno. El empleo de combustible derivado de residuos como alternativa al combustible tradicional es cada vez más frecuente en la industria cementera. No obstante, deben tenerse en cuenta las preocupaciones relativas a las emisiones al aire, analizadas más arriba¹⁷.

Para garantizar que la incineración de residuos en los hornos de cemento no genera emisiones tóxicas puede ser necesario adoptar medidas de reducción de la contaminación. Cuando se quema petróleo residual en plantas de cemento debe llevarse a cabo un seguimiento adecuado (tal y como se describe más abajo, en la Sección 2).

Aguas residuales

Tratamiento de aguas residuales de procesos industriales

La principal fuente de aguas residuales son las operaciones de enfriamiento que se llevan a cabo en diferentes fases del

proceso (p.ej. cojinetes, anillos de horno). En algunas operaciones pueden generarse aguas residuales con un elevado pH y sólidos en suspensión. Las técnicas de tratamiento de las aguas residuales generadas por procesos industriales en este sector la compensación de flujo y carga con ajuste de pH; la sedimentación para la reducción de sólidos en suspensión utilizando cámaras de sedimentación o clarificadores; filtración multimedia para reducir los sólidos en suspensión no sedimentables. Las **guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** analizan el manejo de las aguas residuales industriales y ofrecen ejemplos para su tratamiento. La utilización de estas tecnologías y de buenas prácticas técnicas para el manejo de las aguas residuales debería garantizar que las instalaciones satisfagan los valores que indican las guías para la descarga de aguas residuales, y que se recogen en la tabla relevante de la Sección 2 de este documento sectorial.

Consumo de agua y otras corrientes de aguas residuales

En las **guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** se proporciona orientación sobre el manejo de aguas residuales no contaminadas procedentes de operaciones de servicios públicos, aguas pluviales no contaminadas y aguas de alcantarillado. Las corrientes contaminadas deberían desviarse hacia el sistema de tratamiento de aguas residuales de procesos industriales.

Las aguas pluviales que fluyen a través de los depósitos de coque de petróleo, carbón y materiales residuales situados al aire libre pueden resultar contaminadas. Debe evitarse que las aguas pluviales entren en contacto con dichos depósitos, cubriendo o cerrando éstos o instalando controles de corrientes. Las técnicas de prevención de la contaminación recomendadas para las emisiones de polvo de los depósitos de materias primas, clinker, carbón y residuos (descritas más arriba)

¹⁶ El petróleo residual y el gas natural representan menos del 6 por ciento del consumo total de combustible en Europa, porque son más caros que el coque de petróleo y que el carbón.

¹⁷ El empleo de residuos como combustible alternativo se ha convertido en una práctica común en los países industrializados. La tasa media estimada en la Unión Europea (UE) es del 12 por ciento. Los combustibles alternativos incluyen combustibles derivados de residuos, materiales absorbentes, residuos triturados (p.ej., plástico, goma), plásticos de bajo contenido en cloro, llantas, textiles, lodo de aguas servidas y filtros usados.

también pueden contribuir a minimizar la contaminación de las aguas pluviales. En caso de que las aguas pluviales entren en contacto con los depósitos, deben protegerse el suelo y las aguas subterráneas de la contaminación potencial pavimentando o protegiendo de algún otro modo los depósitos, instalando controles de escorrentía a su alrededor y recogiendo las aguas pluviales en una cámara forrada para que las partículas se acumulen antes de proceder a su separación, control, y reciclaje o descarga. Las **guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** contienen recomendaciones adicionales para el manejo de las aguas pluviales contaminadas.

Las recomendaciones para reducir el consumo de agua, especialmente en aquellos sitios en que pueda ser un recurso natural escaso, se analizan en las **guías sobre medio ambiente, salud y seguridad**.

Residuos sólidos

Las fuentes de residuos sólidos en la fabricación de cemento y cal incluyen los residuos generados por la fabricación del clínker, compuestos principalmente por restos de roca, que se separan de las materias primas durante la preparación del crudo. Otra posible corriente de residuos es la compuesta por el polvo de los hornos procedente del flujo de gas sobrante y la chimenea, si no se recicla durante el proceso.

El mantenimiento de las plantas genera pocos residuos (p.ej. aceites usados y chatarra). Otro material residual puede ser la acumulación de polvo procedente del horno que contenga álcali o cloruro/ fluoruro.¹⁸ En el proceso de fabricación de la cal, el polvo, la cal viva que no cumple con las especificaciones de calidad y la cal hidratada son reutilizados / reciclados en ciertos productos comerciales (p.ej. cal para uso en la construcción, cal

para la estabilización del suelo, cal hidratada y productos peletizados).

En las **guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** se proporciona orientación sobre el manejo de los residuos peligrosos y no peligrosos.

Ruido

La contaminación acústica está relacionada con varias de las fases del proceso de fabricación de cemento y cal, incluida la extracción de materias primas (analizada en las **guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para la extracción de materiales de construcción**); la molienda y almacenamiento; la manipulación y el transporte de materias primas, productos intermedios y productos finales y el funcionamiento de los extractores. Las **guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** señalan los niveles para las medidas recomendadas de reducción del ruido y los niveles de ruido ambiental.

1.2 Higiene y seguridad en el trabajo

Los impactos más significativos sobre la salud y la seguridad tienen lugar durante la fase operativa de los proyectos de fabricación de cemento y cal, e incluyen principalmente las siguientes cuestiones:

- Polvo
- Calor
- Ruido y vibraciones
- Riesgos físicos
- Radiación
- Riesgos químicos y otras cuestiones de higiene industrial

¹⁸ Las instalaciones más viejas que siguen empleando procesos semihúmedos en su mayoría interrumpidos también pueden generar filtraciones alcalinas procedentes de las prensas de filtro.

Polvo

La exposición a partículas finas está relacionada con el trabajo en la mayoría de las fases de la fabricación de cemento y cal en que se genera polvo, pero principalmente con el trabajo en las canteras (véase las **guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para la extracción de materiales de construcción**), la manipulación de materias primas y el triturado de clínker / cemento. La exposición a polvo activo (cristalino) de sílice (SiO_2), cuando éste se halla presente en las materias primas, es un riesgo potencialmente relevante en el sector de la fabricación de cemento y cal.¹⁹ Los métodos para prevenir y controlar la exposición al polvo incluyen los siguientes²⁰:

- Controlar el polvo mediante la implementación de una organización y mantenimiento adecuados;
- Utilizar cabinas cerradas y con aire acondicionado;
- Utilizar sistemas de extracción y reciclaje de polvo para eliminar éste de las zonas de trabajo, especialmente en los molinos de trituración;
- Utilizar la ventilación del aire (succión) en las zonas de ensacado del cemento;
- Utilizar equipos de protección personal (EPP), según corresponda (p.ej. máscaras y respiradores), para evitar exposiciones residuales una vez adoptados los citados controles procedimentales y técnicos;
- Utilizar sistemas aspiradores móviles para evitar la acumulación de polvo en las zonas pavimentadas;

¹⁹ La American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) considera el cemento pórtland un “polvo molesto”. Los trabajadores que han estado expuestos durante largo tiempo a polvo en partícula finas corren el riesgo de padecer neumoconiosis, enfisema, bronquitis y fibrosis.

²⁰ El Departamento de Seguridad e Higiene en el Trabajo estadounidense (OSHA, por su sigla en inglés), Silica eTool, contiene más información sobre la prevención y control de los riesgos asociados a la inhalación de sílice, disponible en: <http://www.osha.gov/SLTC/etools/silica/index.html>

Calor

Las principales exposiciones al calor en este sector tienen lugar durante las fases de funcionamiento y mantenimiento de los hornos u otras máquinas que generan calor, y a través de las reacciones exotérmicas durante el proceso de hidratación de la cal. Las técnicas recomendadas de prevención y control incluyen las siguientes:

- Proteger aquellas superficies en que es previsible la proximidad y contacto estrecho de los trabajadores con máquinas calientes, utilizando en caso necesario equipos de protección personal (EPP), como por ejemplo guantes y calzado aislantes;
- Minimizar el tiempo de trabajo requerido en entornos a elevadas temperaturas, estableciendo unos turnos más breves en los mismos;
- Suministrar y, en caso necesario, emplear, respiradores de aire u oxígeno;
- Implementar procedimientos de seguridad específicos de protección personal durante el proceso de hidratación de la cal con el fin de evitar la posible exposición a reacciones exotérmicas.

Ruido y vibraciones

Las principales fuentes de ruido y de vibraciones en la fabricación de cemento y cal son los extractores y los molinos de trituración. El control de las emisiones de ruido puede incluir la utilización de silenciadores para los ventiladores, recintos de protección para los trabajadores encargados del funcionamiento de los molinos, barreras contra el ruido y, en caso de que no pueda reducirse el ruido a un nivel aceptable, protección personal para los oídos, tal y como se describe en las **guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad**.

Riesgos físicos

Las lesiones durante el proceso de fabricación del cemento o de la cal suelen estar relacionadas con resbalones, tropiezos y caídas; contacto con objetos que caen / se desplazan; y levantamiento de pesos / esfuerzos excesivos. Otras lesiones son las que pueden ocurrir al entrar en contacto con o quedar apesado en maquinaria móvil (p.ej. camiones de carga, dúmpers, carretillas elevadoras). Las actividades relacionadas con el mantenimiento de los equipos, incluidas las trituradoras, molinos, separadores de molinos, extractores, enfriadores y cintas transportadoras, constituyen una fuente significativa de exposición a riesgos físicos. Las **guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** analizan el manejo de este tipo de riesgos²¹.

Radiación

En ocasiones se utiliza una estación de rayos X para realizar un seguimiento continuo de la mezcla de materias primas de la cinta transportadora que alimenta el molino de crudo. Los operadores de estos equipos deben protegerse implementando medidas de protección frente a las radiaciones ionizantes como las descritas en las **guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad**.

Riesgos químicos y otras cuestiones de higiene industrial

El cromo puede provocar dermatitis alérgica de contacto entre los trabajadores que manipulan el cemento²². La prevención y control de este riesgo potencial incluye la reducción de la

proporción de cromo soluble en las mezclas de cemento y la utilización de equipos de protección personal (EPP) adecuados para evitar el contacto epidérmico, tal y como describen las **Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad**.

El posible contacto accidental con CaO / CaOH a través de la piel, los ojos o las membranas mucosas es un riesgo específico en las plantas de producción de cal que debe ser evaluado, previsto y mitigado a través de procedimientos y equipos de emergencia. La presencia de humedad puede provocar quemaduras. Debe disponerse de instalaciones para limpiar inmediatamente la superficie del cuerpo afectada, incluyendo el lavado de ojos en caso de que se haya manipulado cal viva. Las zonas de manipulación del material deben, en la medida de lo posible, estar cubiertas y cerradas para evitar generar riesgos físicos. En las **guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** se proporciona orientación adicional sobre el manejo de los riesgos químicos.

1.3 Higiene y seguridad en la comunidad

Los impactos en la higiene y seguridad de la comunidad durante la construcción, puesta en funcionamiento y desmantelamiento de las fábricas de cemento y cal son comunes a los de la mayoría de las demás instalaciones industriales, y se analizan en las **guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad**.

²¹ En World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), Cement Sustainability Initiative (CSI), Health and Safety in the Cement Industry: Examples of Good Practice (2004) (disponible en: http://www.wbcscement.org/pdf/tf3/tf3_guidelines.pdf) se ofrecen orientaciones adicionales.

²² Las pruebas sobre el cemento de procedencia americana revelan un contenido en cromo de 5–124 partes ppm, mientras que los cementos europeos contienen 32–176 ppm. La UE limita el contenido de cromo soluble (Cr VI) en el cemento a un máximo del 0,0002 por ciento del peso seco total del cemento con el fin de evitar dermatitis alérgicas de contacto.

2.0 Indicadores y seguimiento del desempeño

2.1 Medio ambiente

Guías sobre emisiones y efluentes

En las Tablas 1, 2 y 3 figuran las guías sobre emisiones y efluentes para este sector. Los valores de las guías para las emisiones y efluentes del proceso industrial en este sector son indicativos de la práctica internacional recomendada para la industria reflejada en las normas correspondientes de los países con marcos normativos reconocidos. Dichos valores pueden alcanzarse en condiciones normales de funcionamiento de unas instalaciones adecuadamente diseñadas y utilizadas y mediante la aplicación de las técnicas de prevención y control de la contaminación analizadas en las secciones anteriores de este documento. Estos niveles deberán alcanzarse, sin dilución, al menos el 95% del tiempo en que la planta o la instalación está en funcionamiento, calculado en proporción a las horas de funcionamiento anuales. La desviación de estos niveles debido a las condiciones específicas del proyecto local deberá justificarse en la evaluación ambiental.

Tabla 1. Niveles de emisiones al aire para la fabricación de cemento*

Contaminantes	Unidades	Valor de las guías
Partículas (nuevo sistema de hornos)	mg/Nm ³	30 ^a
Partículas (hornos existentes)	mg/Nm ³	100
Polvo (otras fuentes localizadas incl. enfriamiento de clínker, trituración de cemento)	mg/Nm ³	50
SO₂	mg/Nm ³	400
NO_x	mg/Nm ³	600
HCl	mg/Nm ³	10 ^b
Fluoruro de hidrógeno	mg/Nm ³	1 ^b

Carbono orgánico total	mg/Nm ³	10
Dioxinas–furanos	mg TEQ/Nm ³	0.1 ^b
Cadmio y talio (Cd+Tl)	mg/Nm ³	0.05 ^b
Mercurio (Hg)	mg/Nm ³	0.05 ^b
Metales totales^c	mg/Nm ³	0.5

NOTAS:

* Emisiones procedentes de la chimenea del horno, a menos que se indique lo contrario. Valores medios diarios corregidos a 273 K, 101,3 kPa, 10 por ciento O₂ y gas seco, a menos que se indique otra cosa.

^a 10 mg/Nm³ si más del 40 por ciento del calor emitido proviene de residuos peligrosos.

^b Si más del 40 por ciento del calor emitido proviene de residuos peligrosos, valores medios durante el período muestral de un mínimo de 30 minutos y un máximo de 8 horas.

^c Metales totales = Arsénico (As), Plomo (Pb), Cobalto (Co), Cromio (Cr), Cobre (Cu), Manganeseo (Mn), Níquel (Ni), Vanadio (V) y Antimonio (Sb)

Las guías sobre efluentes se aplican a los vertidos directos de efluentes tratados a aguas superficiales de uso general. Los niveles de vertido específicos del emplazamiento pueden establecerse basándose en la disponibilidad y condiciones de los sistemas de tratamiento y recogida de aguas de alcantarillado público o, si se vierten directamente a las aguas superficiales, basándose en la clasificación del uso del agua receptora que se describe en las **guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad**. Las guías sobre emisiones pueden aplicarse a las emisiones procedentes de la combustión. Las guías sobre emisiones procedentes de la combustión, relacionadas con centrales de generación de vapor y energía a partir de fuentes con una capacidad igual o inferior a 50 MWth, se analizan en las **guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** y las guías sobre emisiones procedentes de centrales de mayor capacidad se analizan en las **guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para centrales térmicas**. En las **guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** se proporciona orientación sobre consideraciones ambientales basadas en la carga total de emisiones.

Tabla 2. Niveles de emisiones al aire: fabricación de cal

Contaminantes	Unidades	Valor de las guías ^a
Polvo	mg/Nm ³	50
SO ₂	mg/Nm ³	400
NO _x	mg/Nm ³	500
HCl	mg/Nm ³	10
NOTES: ^a Valores medios diarios corregidos a 273°K, 101,3 kPa, 10% O ₂ y gas seco, a menos que se indique otra cosa.		

Tabla 3. Niveles de efluentes: fabric. de cemento y cal

Contaminantes	Unidades	Valor de las guías
pH	S.U.	6–9
Sólidos suspendidos totales	mg/L	50
Aumento de temperatura	°C	<3 ^a
^a En el límite de una zona de mezcla científicamente determinada que tiene en cuenta la calidad del agua ambiente, la utilización del agua recibida, los receptores potenciales y la capacidad de asimilación		

Tabla 4. Consumo de recursos y energía.

Insumos por unidad de producto	Unidad	Indicador del sector
Energía combustible – cemento	GJ/t clinker	3,0–4,2 ^{a,b,c,d,g}
Energía eléctrica – cemento	kWh/t cemento equivalente	90–150 ^{a,b,c}
Energía eléctrica – molienda de clinker	kWh/t	40–45
Energía combustible – cal	GJ/t cal	4–4,7 hornos de eje de alimentador mixto ^b 3,6–6 hornos de eje avanzado y giratorios ^b
Energía eléctrica – cal	kWh/t cemento equivalente	5–15 hornos de eje de alimentador mixto ^b 20–40 hornos de eje avanzado y giratorios ^b
Materiales Materias primas sustitutivas empleadas para la producción de clinker	%	2–10 ^{a,f,h}
Materias primas sustitutivas en la producción de cemento	%	0–70/80 con escoria de alto horno ≥0–30 con ceniza fina
NOTAS: consúltense la Tabla 5 para notas y fuentes.		

Uso de los recursos y residuos

Las Tablas 4–7 que figuran a continuación recogen ejemplos de uso de los recursos y generación de residuos en este sector que pueden considerarse indicadores de la eficiencia del mismo y utilizarse para identificar cambios en el desempeño a lo largo del tiempo.

Tabla 5. Generación de emisiones y residuos.

Resultado por unidad de producto	Unidad	Indicador del sector
Residuos	Kg/t	0.25–0.6 ^a
Emisiones		
Polvo	g/t cemento equivalente	20–50 ^a
NO _x	g/t cemento equivalente	600–800 ^b
SO _x	Kg/t	0.1–2.0 ^{a,h}
CO ₂		
De la descarbonatación ⁱ	kg/t	400–525 ^{a,e,f,h,k}
De los combustibles	kg/t cemento equivalente	150–350 ^{a,e,f,h}

^a Buzzi–Unicem (2004).

^b IPPC (2001).

^c Ernest Orlando Lawrence, Berkeley National Laboratory (2004).

^d NRCan (2001).

^e CIF (2003).

^f Italcementi Group (2005).

^g Environment Canada (2004).

^h Lafarge (2004).

ⁱ Influido por las cantidades variables de ceniza fina y otros aditivos empleados.

^j Las emisiones de CO₂ procedentes de la incineración de residuos (al menos de la fracción biodegradable) se consideran neutrales en varios países.

^k World Business Council on Sustainable Development, Cement Sustainability Initiative, 2002.

Tabla 6. Consumo de calorías y capacidad productiva de los hornos para fabricar cemento.

Tipo de horno	Consumo de calor (MJ/t clinker)	Capacidad de producción máxima (t/día)
Precalentador–precalcinador — 3–6 etapas	3.000–3.800 ^a	12.000
Precalentador	3.100–4.200	4.000
Largo seco	≤5.000	3.800
Semiseco–semihúmedo (Lepol)	3.300–4.500	2.500
Proceso húmedo	5.000–6.000	1.500–2.000

NOTAS:

^aUn precalentador–precalcinador en seis etapas puede producir, en condiciones óptimas, 2.900 MJ/t de clinker.

Fuente: IPPC (2001).

Tabla 7. Consumo medio de calorías y electricidad en cuatro tipos de hornos de cal.

Tipo de horno ²³	Consumo de calorías (MJ/t de cal)	Consumo eléctrico (kWh/t de cal)
Hornos de eje	3.600–4.500	5–45
Hornos giratorios	4.600–5.400	18–40
Hornos de rejilla móvil	3.700–4.800	31–38
Precalentador con gases en suspensión²⁴	4.600–5.400	20–25

Fuente: IPPC (2001).

Seguimiento ambiental

En los programas de seguimiento ambiental implementados para este sector deben abordarse todas las actividades

²³ La cal viva reactiva requiere un mayor consumo.

identificadas que podrían tener impactos importantes en el medio ambiente durante las operaciones normales y en condiciones irregulares. Las actividades de seguimiento ambiental deben basarse en indicadores directos o indirectos de las emisiones, en los efluentes y en el uso de los recursos aplicables al proyecto concreto.

Las actividades de seguimiento deben llevarse a cabo con la frecuencia que sea suficiente para proporcionar datos representativos sobre el parámetro en cuestión. Estas actividades deben ser realizadas por personas idóneas, que han de seguir los procedimientos indicados de seguimiento y mantenimiento de registros y utilizarán equipos calibrados y mantenidos adecuadamente. La información obtenida debe ser analizada y examinada a intervalos periódicos y comparada con las normas operativas con el fin de adoptar las medidas correctoras que sean necesarias. Las **guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** contienen orientaciones adicionales sobre los métodos analíticos y de muestreo que pueden aplicarse en el caso de las emisiones y efluentes.

2.2 Higiene y seguridad en el trabajo

Guías sobre higiene y seguridad en el trabajo

Para evaluar el desempeño en materia de higiene y seguridad en el trabajo deben utilizarse las guías sobre exposición que se publican en el ámbito internacional, entre ellas: las guías sobre la concentración máxima admisible de exposición profesional (TLV®) y los índices biológicos de exposición (BEIs®) publicados por la American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH)²⁵, la Guía de Bolsillo sobre Riesgos Químicos publicada por el Instituto Nacional de Higiene

y Seguridad del Trabajo de los Estados Unidos²⁶, los límites permisibles de exposición publicados por la Administración de Seguridad e Higiene en el Trabajo de los Estados Unidos (OSHA, por su sigla en inglés)²⁷, los valores límite indicativos de exposición profesional publicados por los Estados miembros de la Unión Europea²⁸, u otras fuentes similares.

Tasas de accidentes y letalidad

Deben adoptarse medidas para reducir a cero el número de accidentes entre los trabajadores del proyecto (sean empleados directos o personal subcontratado), especialmente los accidentes que pueden causar una pérdida de horas de trabajo, diversos niveles de discapacidad o, inclusive, muerte. Como punto de referencia para evaluar las tasas del proyecto puede utilizarse el desempeño de instalaciones en este sector en países desarrollados, que se obtiene consultando las fuentes publicadas (por ejemplo, a través de la Oficina de Estadísticas Laborales de los Estados Unidos, el Comité Ejecutivo de Salud y Seguridad del Reino Unido y el World Business for Sustainable Development – Cement Sustainability Initiative)²⁹.

Seguimiento de la higiene y la seguridad en el trabajo

Es preciso realizar un seguimiento de los riesgos que pueden correr los trabajadores en el entorno laboral del proyecto concreto. Las actividades de seguimiento deben ser diseñadas y aplicadas por profesionales acreditados³⁰ como parte de un programa de seguimiento de la higiene y seguridad en el trabajo. En las instalaciones, además, debe llevarse un registro

²⁶ <http://www.cdc.gov/niosh/npg/>

²⁷

http://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_table=STANDARD&p_id=9992

²⁸ http://europe.osha.eu.int/good_practice/risks/ds/oel/

²⁹ Disponible en: <http://www.bls.gov/iif/>, en <http://www.hse.gov.uk/statistics/index.htm>, en www.wbcsd.ch y en <http://www.wbcsdcement.org/>

²⁴ Datos de una sola planta que ha estado funcionando en Noruega desde 1986.

²⁵ <http://www.acgih.org/TLV/>

de los accidentes y enfermedades laborales, así como de los sucesos y accidentes peligrosos. Las **guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** contienen orientaciones adicionales sobre los programas de seguimiento de la higiene y seguridad en el trabajo.

³⁰ Los profesionales acreditados incluyen: higienistas industriales certificados, higienistas ocupacionales diplomados o profesionales de la seguridad certificados o su equivalente.

3.0 Referencias y fuentes adicionales

- Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA). 2005. EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook. Copenhagen: AEMA. Disponible en <http://reports.eea.europa.eu/EMEP/CORINAIR4/en/page002.html>
- Cembureau (Asociación Europea del Cemento). 1999. Best Available Techniques for the Cement Industry. A Contribution from the European Cement Industry to the Exchange of Information and Preparation of the IPPC BAT Reference for the Cement Industry. Bruselas: Cembureau. Disponible en <http://www.cembureau.be/>
- Cement Industry Federation (CIF). 2003. Cement Industry Environment Report. Manuka, ACT: CIF. Disponible en <http://www.cement.org.au/>
- Cement Sustainability Initiative, World Business Council on Sustainable Development (WBCSD). 2002. Our Agenda for Action. Ginebra: WBCSD. Disponible en <http://www.wbcscement.org/agenda.asp>
- Comisión Europea. 2000. Directiva 2000/76/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 4 de diciembre de 2000 relativa a la incineración de residuos. Bruselas: CE. Disponible en http://europa.eu.int/eur-lex/en/consleg/pdf/2000/en_2000L0076_do_001.pdf
- Comisión Europea. 2001. Oficina Europea de Prevención y Control Integrado de la Contaminación (OEPCIC). Documento de referencia sobre mejores técnicas disponibles (BREF) para la fabricación de cemento y cal. Sevilla: EICCPB. Disponible en <http://eippcb.jrc.es/pages/FActivities.htm>
- Comisión Europea. 2004. Dirección General Centro Común de Investigación. Instituto de Prospectiva Tecnológica (IPTS). Promoting Environmental Technologies: Sectoral Analyses, Barriers and Measures. Bruselas: CE. Disponible en <http://www.jrc.es/>
- CSI. 2004. Formation and Release of POPs in the Cement Industry. Segunda edición, 2006. Ginebra: WBCSD. Disponible en http://www.wbcscement.org/pdf/formation_release_pops_second_edition.pdf
- CSI. 2005. Progress Report, June 2005. Ginebra: WBCSD. Disponible en http://www.wbcscement.org/pdf/csi_progress_report_2005.pdf
- CSI. 2005. CO₂ Accounting and Reporting Standard for the Cement Industry. Cement CO₂ Protocol, July. Ginebra: WBCSD. Disponible en <http://www.wbcscement.org/climate.asp>
- CSI. 2005. Environmental and Social Assessment Guidelines. Disponible en: http://www.wbcscement.org/web/publications/cement_esia_guidelines.pdf
- CSI. Guidelines on the Responsible Use of Fuel and Materials. 2005. Disponible en: <http://www.wbcscement.org/DocRoot/Vft3qGjo1v6HREH7jM6/tf2-guidelines.pdf>
- Environment Canada. 2004. Foundation Report on the Cement Manufacturing Sector. Draft No. 1, June. Gatineau, Quebec: Environment Canada. Disponible en <http://www.ec.gc.ca/>
- GTZ-Holcim Public Private Partnership. Guidelines on co-processing Waste Materials in Cement Production. Disponible en: http://www.holcim.com/gc/CORP/uploads/GuidelinesCOPROCEM_web.pdf
- National Safety Council. Radon Radioactivity and the Fly Ash Market. Itasca, IL: National Safety Council. Disponible en http://www.nsc.org/ech/radon/rad_faqs.htm
- Natural Resources Canada (NRC). 2001. Office of Energy Efficiency. Energy Consumption Benchmark Guide: Cement Clinker Production. Disponible en http://oee.nrcan.gc.ca/publications/industrial/BenchmCement_e.pdf
- United States (US) Environmental Protection Agency (EPA). 1999. Code of Federal Regulation Title 40, Part 63. National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants for Source Categories; Portland Cement Manufacturing Industry. Washington, DC: US EPA. Disponible en <http://www.epa.gov/EPA-AIR/1999/June/Day-14/a12893.htm>
- US EPA. 2003. 40 CFR Part 411. Cement Manufacturing Point Source Category. Effluent Limitations Guidelines, Cement Manufacturing Point Source Category. Washington, DC: US EPA. Disponible en http://www.access.gpo.gov/nara/cfr/waisidx_03/40cfr411_03.html
- US EPA. 2004. Code of Federal Regulation Title 40, Part 63. National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants for Source Categories; Lime Manufacturing Plants. Washington, DC: US EPA. Disponible en <http://www.epa.gov/fedrgstr/EPA-AIR/2004/January/Day-05/a23057.htm>
- US EPA. 2005. National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants: Final Standards for Hazardous Air Pollutants for Hazardous Waste Combustors (Phase I Final Replacement Standards and Phase II). 40 CFR Parts 9, 63, 260 et al. Washington, DC: US EPA. Disponible en <http://www.epa.gov/fedrgstr/EPA-AIR/2005/December/Day-19/a24198.htm>
- US National Library of Medicine, National Institutes of Health. Haz-Map—Occupational Exposure to Hazardous Agents. Disponible en <http://hazmap.nlm.nih.gov/index.html>
- Marlowe, I. y D. Mansfield. 2002. Substudy 10: Environment, Health and Safety Performance Improvement, Toward a Sustainable Cement Industry. Independent Report commissioned by the World Business Council for Sustainable Development. AEA Technology. Geneva: WBCSD. Disponible en: http://www.wbcscement.org/pdf/final_report10.pdf
- World Business Council for Sustainable Development y Foundation for Industrial and Scientific Research of Norway. 2006. Formation and Release of POPs in the Cement Industry, Segunda edición. Disponible en http://www.wbcscement.org/pdf/formation_release_pops_second_edition.pdf
- Worrell, E. y C. Galitsky. 2004. Energy Efficiency Improvement Opportunities for Cement Making. An ENERGY STAR Guide for Energy and Plant Managers. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. Patrocinado por la Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos. Berkeley, LA: University of California, Berkeley. Disponible en http://www.energystar.gov/ia/business/industry/Cement_Energy_Guide.pdf
- Wulf-Schnabel, J. y J. Lohse. 1999. Economic Evaluation of Dust Abatement Techniques in the European Cement Industry. Okopol: Institute for Environmental Strategies.

Anexo A: Descripción general de las actividades de la industria

Los procesos de producción del cemento y la cal son similares. Ambos requieren la extracción en cantera o en mina, el triturado y la homogeneización de materias primas, tal y como ilustra la Figura A.1. Para minimizar los costos de transporte y permitir la posibilidad de utilizar cintas transportadoras, las fábricas de cemento y cal suelen estar situadas junto las fuentes de las materias primas y en las cercanías de los mercados de productos. El cemento puede distribuirse a un costo bajo mediante camiones en un radio relativamente pequeño (alrededor de 100–150 Km de la planta) y, si la planta está situada junto a una masa de agua, mediante barcazas o barcos. Una sola línea de producción compacta (un horno precalentador-precalcinador [PCP], precalentador [PC], con una capacidad de producción de 3.000 toneladas diarias de clínker) precisa por lo general de unos 400.000 m² de terreno llano, además de una superficie adicional [de, por ejemplo, 250.000 m²] para su futura expansión. La vida media de una instalación típica es de al menos 40 a 50 años. El tamaño de la planta es un factor importante, ya que las diferencias en la escala de la producción tienen una influencia significativa en los costos de producción y, en consecuencia, en los costos de inversión para tecnologías de reducción y control de la contaminación. Una planta pequeña puede alcanzar el mismo nivel de desempeño ambiental que una de mayor tamaño pero a un mayor costo por nivel de producción de cemento.

La fabricación de cemento

El proceso de fabricación de cemento utiliza energía para procesar materias primas compuestas principalmente por caliza (carbonato de calcio, CaCO₃), arcilla (silicatos de aluminio), arena (óxido de silicio) y mineral de hierro para producir clínker, que se muele con yeso, caliza, etc. para producir cemento.

Tras la fase inicial anterior a la mezcla, las materias primas se mezclan y trituran juntas para formar una mezcla homogénea con la composición química necesaria (el crudo). La finura y el tamaño de las partículas de este crudo son características importantes del proceso de quemado. Una vez realizada la mezcla, el proceso de producción continúa en un horno giratorio en el que se calcina el crudo (p.ej. descomponer CaCO₃ a aproximadamente 900°C), lo que libera el dióxido de carbono (CO₂) y deja el CaO. A esto le sigue el proceso de producción del clínker, en el que el CaO reacciona a una elevada temperatura (1.400°C a 1.500°C) con el sílice, el óxido de aluminio y óxidos ferrosos. Para lograr la composición necesaria pueden añadirse a la mezcla de materias primas otros componentes (p.ej. arena de sílice, arena de fundición, óxido de hierro, residuos de aluminio, escoria de alto horno y residuos de yeso). La temperatura de la llama y de los gases producidos ronda los 2.000°C. El clínker caliente cae del horno al enfriador, donde debe enfriarse tan rápido como sea posible para mejorar la calidad del clínker y para recuperar energía calentando aire secundario. A estos efectos suelen utilizarse enfriadores de parrilla (en lugar de enfriadores de satélites). El clínker enfriado se tritura a continuación con el yeso y la caliza para producir cemento pórtland y se muele con otros componentes más para producir cementos compuestos o mezclados. El cemento se almacena después en silos o sacos. Los componentes de la mezcla son materiales con propiedades hidráulicas (p.ej. pozolano natural, ceniza fina, escoria de alto horno y, en ocasiones, ceniza pesada). En la ceniza fina y pesada no debería haber residuos carbónicos (procedentes normalmente de plantas que generan energía con carbón). A veces se añaden pequeñas cantidades de CaCO₃ como relleno.

La fabricación de cal

La cal se fabrica quemando CaCO_3 o (con menos frecuencia) dolomita (carbonato de calcio y magnesio), lo que proporciona un calor suficiente para alcanzar temperaturas por encima de los 800°C y hace que la descarbonatación de las materias primas genere óxido de calcio (CaO , conocido como cal viva). La cal viva se mantiene a continuación a temperaturas de $1.200\text{-}1.300^\circ\text{C}$, para ajustar la reactividad. La cal quemada puede suministrarse al usuario final en forma de cal viva (dura, media y blanda, en función de su reactividad). La cal blanda es la más reactiva y la más frecuentemente empleada por los fabricantes de acero. Alternativamente, la cal viva se transfiere a una planta de hidratación donde, tras una fuerte reacción exotérmica, reacciona con el agua para producir cal apagada (hidróxido de calcio, Ca(OH)_2). La cal apagada puede adoptar dos formas: seca (en polvo) o leche de cal (líquida). El proceso de fabricación de cal apagada consiste en su separación por tamaños, hidratación y almacenamiento en silos (cal seca) para

su venta a granel o en sacos, o en contenedores (lechada de cal). Hay que asegurarse de que la cal viva carezca de agua (además de la humedad atmosférica), porque su hidratación libera calor y provoca dilatación, lo que puede poner en peligro la seguridad.

Figura A.1: Procesos de fabricación

