

DESCARGO DE RESPONSABILIDAD DEL GRUPO BANCO MUNDIAL

Las guías sobre medio ambiente, salud y seguridad (MASS) tienen por objeto presentar ejemplos generales y específicos de las buenas prácticas internacionales de la industria, según se definen en las Normas de Desempeño sobre Sostenibilidad Ambiental y Social de la Corporación Financiera Internacional (IFC), el Marco Ambiental y Social del Banco Mundial, y las guías sobre MASS, así como información sobre diversas cuestiones sobre MASS. Cuando uno o más integrantes del Grupo Banco Mundial participen en un proyecto, estas guías se aplicarán de acuerdo con los requisitos de sus respectivas políticas y normas.

Las guías generales sobre MASS ofrecen información sobre aspectos comunes a todos los sectores industriales. Las diferentes guías sobre MASS correspondientes a sectores específicos —que, junto con las guías generales, integran las guías sobre MASS— se han diseñado para ser utilizadas como referencia junto con las guías generales. En el caso de proyectos complejos, es probable que deban utilizarse las guías correspondientes a varios sectores industriales, cuya lista completa se publica en <https://www.ifc.org/ehsguidelines>. La aplicación de estas guías se adapta a los peligros y riesgos identificados en cada proyecto, basándose en los resultados de una evaluación de MASS en la que se tengan en cuenta las variables específicas del lugar, tales como el contexto del país receptor, la capacidad de asimilación del medio ambiente y otros factores relativos al proyecto.

Si bien se han realizado esfuerzos razonables por garantizar que la información contenida en las guías sobre MASS sea precisa, exhaustiva y actualizada, el Grupo Banco Mundial no garantiza la precisión, exhaustividad, actualización, eficacia ni confiabilidad de esa información. El Grupo Banco Mundial no asume responsabilidad por errores, omisiones o discrepancias en la información establecida en las guías sobre MASS, ni ningún otro tipo de obligación con respecto al uso o la falta de uso o aprovechamiento de los datos, métodos, procesos, recomendaciones, conclusiones u opiniones aquí presentados. Tampoco formula manifestación alguna con respecto a la alineación o conformidad de las guías sobre MASS con los requisitos legales internacionales, nacionales o subnacionales de cualquier jurisdicción, o con normas de la industria. El Grupo Banco Mundial se exime expresamente de toda responsabilidad por cualquier tipo de daño, incluidos daños especiales, indirectos, incidentales, consecuentes o punitivos, que surjan por haber utilizado las guías sobre MASS o la información allí incluida, o por haberse basado en ellas, o que se relacionen con esas circunstancias.

La publicación y ofrecimiento de estas guías no significa que los integrantes del Grupo Banco Mundial brindan servicios profesionales o de otro tipo en nombre o representación de una persona o entidad, ni que aceptan cumplir alguna obligación que una persona o entidad tenga con alguna otra persona o entidad. Antes de decidir comenzar (o no) una actividad en un proyecto, debe procurarse recibir el asesoramiento profesional de personas calificadas y con experiencia.

Algunas partes de las guías sobre MASS pueden contener enlaces a sitios web de terceros. Los sitios vinculados no están bajo el control del Grupo Banco Mundial, que no es responsable de los contenidos de esos sitios ni de cualquier otro enlace en un sitio vinculado. El Grupo Banco Mundial no avala ni formula otras manifestaciones sobre la precisión o confiabilidad de esos sitios vinculados ni sobre sus contenidos.

El Grupo Banco Mundial está conformado por el Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento (BIRF), la Asociación Internacional de Fomento (AIF), la Corporación Financiera Internacional (IFC), el Organismo Multilateral de Garantía de Inversiones (MIGA) y el Centro Internacional de Arreglo de Diferencias Relativas a Inversiones (CIADI). A los efectos de esta exención de responsabilidad, las referencias al Grupo Banco Mundial serán a cualquiera de estas entidades que lo integran o a todas ellas, según lo exija el contexto.

Nada de lo establecido en estas guías sobre MASS constituirá ni se considerará una renuncia a los privilegios e inmunidades de cualquiera de esas entidades, que quedan reservados específicamente.

GUÍAS SOBRE MEDIO AMBIENTE, SALUD Y SEGURIDAD PARA LA FABRICACIÓN DE CEMENTO Y CAL

INTRODUCCIÓN

1. Las guías sobre MASS son documentos de referencia técnica que contienen ejemplos generales y específicos de las buenas prácticas internacionales para distintas industrias¹. Cuando uno o más integrantes del Grupo Banco Mundial participen en un proyecto, estas guías se aplicarán de acuerdo con los requisitos de sus respectivas políticas y normas. La presente guía deberá usarse junto con el documento de **guías generales sobre MASS**, que ofrece a los usuarios orientación acerca de temas de MASS comunes que pueden aplicarse a todos los sectores industriales. En el caso de proyectos complejos, es probable que deban utilizarse las guías correspondientes a varios sectores industriales, cuya lista completa se publica en www.ifc.org/ehsguidelines.
2. En las guías sobre MASS se recopilan los niveles e indicadores de desempeño que normalmente se pueden alcanzar en instalaciones nuevas con la tecnología existente y a costos razonables. Para aplicar estas guías a instalaciones ya existentes, puede ser necesario establecer metas específicas para el sitio y un cronograma adecuado para alcanzarlas.
3. La aplicación de estas guías deberá adaptarse a los peligros y riesgos identificados en cada proyecto, basándose en los resultados de una evaluación ambiental en la que se tengan en cuenta las variables específicas del lugar, tales como el contexto del país receptor, la capacidad de asimilación del medio ambiente y otros factores relativos al proyecto. La aplicabilidad de las recomendaciones técnicas específicas debe basarse en la opinión profesional de personas cualificadas y con experiencia.
4. En los casos en que la reglamentación del país receptor establezca niveles e indicadores distintos de los presentados en las guías sobre MASS, los proyectos deberán alcanzar los que sean más rigurosos. Cuando, en vista de las circunstancias específicas del proyecto, se considere necesario aplicar niveles o indicadores menos rigurosos que los establecidos en estas guías, las alternativas propuestas como parte de la evaluación ambiental del lugar en cuestión deberán justificarse de manera exhaustiva y detallada, de modo de demostrar que los niveles de desempeño alternativos elegidos son adecuados para proteger la salud humana y el medio ambiente.

APLICABILIDAD

5. Las **guías sobre MASS para la fabricación de cemento y cal** incluyen información pertinente para los procesos de fabricación de cemento y cal. La extracción de materia prima, una actividad común

¹ Las buenas prácticas internacionales de la industria se refieren al ejercicio de habilidades profesionales y a la diligencia, la prudencia y la previsión que se esperan razonablemente de profesionales capacitados y experimentados que realizan el mismo tipo de actividad en circunstancias iguales o similares a nivel mundial. Las circunstancias que estos profesionales pueden encontrar al evaluar el amplio espectro de técnicas de prevención y control de la contaminación a disposición de un proyecto pueden incluir, a modo de ejemplo, diversos niveles de degradación ambiental y de capacidad de asimilación del medio ambiente, así como distintos niveles de factibilidad financiera y técnica.

relacionada con los procesos de fabricación de cemento, se trata en las **guías sobre MASS para la extracción de materiales de construcción**². En estas guías sobre MASS no se aborda la producción de cemento con asbesto, que actualmente está sujeta a las restricciones de la [lista de exclusión](#) de la Corporación Financiera Internacional (IFC). En el anexo A se incluye una descripción completa de las actividades industriales de este sector. Este documento está organizado de la siguiente manera:

1. Impactos y manejo específicos de la industria	3
1.1 Medio ambiente.....	4
1.2 Salud y seguridad ocupacional.....	21
1.3 Salud y seguridad de la comunidad	27
2. Indicadores de desempeño y seguimiento.....	28
2.1 Medio ambiente.....	28
2.2 Salud y seguridad ocupacional.....	34
3. Referencias y fuentes adicionales.....	36
Anexo A. Descripción general de las actividades industriales.....	44

1. IMPACTOS Y MANEJO ESPECÍFICOS DE LA INDUSTRIA

6. En la sección 1 se incluye una síntesis de los aspectos relativos al MASS relacionados con la fabricación de cemento y cal, que se presentan durante la etapa operativa, así como algunas recomendaciones para su manejo. Por otra parte, en las **guías generales sobre MASS** se ofrecen recomendaciones para el manejo de ese tipo de cuestiones que son comunes a la mayoría de los establecimientos industriales durante las etapas de construcción y desmantelamiento.

² La composición química, la hidrología y la geología específicas de la caliza, junto con los microclimas relacionados, pueden generar el desarrollo de una biodiversidad única y de servicios ecosistémicos relacionados. Es importante evaluar y, de ser necesario, mitigar los impactos que un proyecto podría tener en la biodiversidad específica de la caliza, incluidas las especies relacionadas, sus hábitats y los servicios ecosistémicos que proporcionan. Para obtener más información, véanse Birdlife International y otros, *Extraction and Biodiversity in Limestone Areas* (Extracción y biodiversidad en áreas de caliza) (2014), <https://www.birdlife.org/sites/default/files/Extraction-and-Biodiversity-in-Limestone-Areas.pdf>; Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), *Biodiversity Management in the Cement and Aggregates Sector: Biodiversity Indicator and Reporting System* (Gestión de la biodiversidad en el sector del cemento y los áridos: Indicador de la biodiversidad y sistema de presentación de informes) (Gland, Suiza, UICN, 2014), <https://www.iucn.org/content/biodiversity-management-cement-and-aggregates-sector-biodiversity-indicator-and-reporting-system-birs>; Asociación Mundial del Cemento y el Hormigón (GCCA), *Sustainability Guidelines for Quarry Rehabilitation and Biodiversity Management* (Guías sobre sostenibilidad para la rehabilitación de canteras y la gestión de la biodiversidad) (Londres, GCCA, 2020), https://gccassociation.org/wp-content/uploads/2020/05/GCCA_Guidelines_Sustainability_Biodiversity_Quarry_Rehabilitation_May_2020-1.pdf.

1.1 Medio ambiente

7. Los problemas relacionados con el medio ambiente en los proyectos de fabricación de cemento y cal se presentan especialmente en las siguientes áreas:

- Consumo de energía.
- Gases de efecto invernadero (GEI).
- Emisiones a la atmósfera.
- Ruido y vibraciones.
- Aguas residuales.
- Residuos sólidos.

Consumo de energía

8. La fabricación de cemento y cal es una industria con un gran consumo de energía. Además de las recomendaciones sobre conservación de la energía que se ofrecen en las **guías generales sobre MASS**, en las siguientes secciones se brinda orientación sobre la eficiencia energética específica del sector en relación con el consumo de energía térmica y eléctrica.

Hornos de cemento y cal

9. En la actualidad se utilizan varios tipos de hornos en la fabricación de cemento, incluidos hornos con precalentador y precalcinador (PHP), hornos con precalentador (PH) y hornos largos de proceso seco (LD), así como hornos de proceso semiseco, de proceso semihúmedo (Lepol), de proceso húmedo y de eje³. Los hornos PHP son los que más se usan en la industria de la fabricación de cemento^{4, 5}. Tienen la

³ Los hornos LD tienen un consumo de calor mucho mayor que los hornos PHP y suelen tener importantes problemas de mantenimiento y costos relacionados. Los hornos de proceso semiseco y semihúmedo (Lepol) tienen un consumo de calor intermedio debido al contenido de humedad que hay en el material peletizado con que se alimenta el horno. Los hornos de proceso semihúmedo tienen un mayor consumo de electricidad y costos de mantenimiento más altos debido a las prensas de filtro, y en la actualidad se los suele considerar obsoletos. El horno de proceso húmedo, que ahora casi no se utiliza, es la tecnología de horno rotatorio más antigua y tiene el mayor consumo de calor.

⁴ Como se detalló en “Getting the Numbers Right”, una base de datos que mantiene la GCCA, cuyos miembros informantes abarcaron el 22 % de la producción mundial de clínker en 2019, los hornos PHP representaron alrededor del 65 % de esa producción en 2019; los hornos PH y LD representaron cerca del 20 % y del 2 %, respectivamente; y los hornos de proceso semiseco, semihúmedo (Lepol) y húmedo, y los hornos de eje representaron, en conjunto, alrededor del 13 %. Véase GCCA, conjunto de datos 8TGK%, volúmenes totales de producción de clínker por tipo de horno (%), en “Getting the Numbers Right”, *Global Cement Database on CO₂ and Energy Information* (base de datos mundial del cemento con información sobre el dióxido de carbono y la energía) (Londres, GCCA, 2019), <https://gccassociation.org/gnrl/>.

⁵ En 2013, China produjo el 60 % de todo el cemento del mundo. Hasta 2011, el 86 % de la producción china utilizaba tecnología de hornos PHP (en comparación con un 10 % en 2000). Véase Jing Ke y otros, “Estimation of CO₂ Emissions from China’s Cement Production: Methodologies and Uncertainties” (Cálculo de emisiones de dióxido de carbono de la producción de cemento de China: Metodologías e incertidumbres), *Energy Policy* 57 (2013),

demanda de energía térmica más baja (debido a la alta tasa de recuperación de calor del gas de los hornos en los ciclones y a la utilización del calor residual recuperado en el precalcinador) y no tienen agua para evaporar (a diferencia del horno de proceso semihúmedo o húmedo, cuya materia prima es acuosa o lodosa), y al mismo tiempo ofrecen la mayor capacidad de producción. La demanda de energía térmica específica de los hornos PH suele ser entre un 5 % y un 15 % más alta que la de los hornos PHP⁶. En el caso de nuevas fábricas de cemento y de mejoras importantes, las buenas prácticas internacionales de la industria para la fabricación de clínker de cemento establecen que, por lo tanto, debe usarse un horno de proceso seco equipado con un PHP para varias etapas (por lo general, cinco o seis etapas, según el contenido de humedad del combustible y de las materias primas)⁷.

10. La eficiencia térmica puede lograrse no solo mediante la selección de la tecnología de los hornos de cemento, sino también optimizando el diseño y las operaciones de la planta. Esto incluye una alta utilización de la capacidad, una relación longitud/diámetro optimizada, un diseño de hornos y sistemas de cocción optimizados, condiciones de operación uniformes y estables, optimización de controles de procesos, suministro de conductos de aire terciario (para el precalcinador), mantenimiento de condiciones del horno casi estequiométricas pero oxidantes, uso de mineralizantes, reducción del ingreso accidental de aire y mantenimiento de las especificaciones del material refractario del horno⁸. En condiciones ideales, el consumo de energía térmica específico de un horno PHP de varias etapas debe ser de entre 2,9 y 3,3 gigajulios (GJ)/tonelada de clínker⁹.

11. Para la fabricación de cal, se utilizan varios tipos de hornos, como hornos rotatorios largos (LRK), hornos rotatorios con precalentador (PRK), hornos regenerativos de flujo paralelo (PFRK) y hornos de eje anulares (ASK). Los hornos de eje de alimentación mixta (MFSK), como los ASK, los PFRK y otros hornos verticales/de eje, tienen un consumo de energía térmica significativamente menor (de 3 a 5 GJ/toneladas de cal) y mayor flexibilidad con respecto al combustible que las aplicaciones de hornos rotatorios, que

pp. 172-181, https://china.lbl.gov/sites/all/files/6329_ep_cement_co2.pdf. En la India, el segundo productor mundial de cemento en 2013, casi toda la capacidad instalada fabrica mediante proceso seco, y casi el 50 % de la capacidad se generó en los últimos diez años. La tecnología de hornos PHP se utilizó para el 40 % de la producción de cemento en 2013. Véase Agencia Internacional de Energía (AIE) y Consejo Empresarial Mundial de Desarrollo Sostenible (WBCSD), *Technology Roadmap: Low-Carbon Technology for the Indian Cement Industry* (Hoja de ruta de la tecnología: Tecnología con bajas emisiones de carbono para la industria cementera de la India) (París, AIE, 2013), https://docs.wbcsd.org/2013/02/Low_Carbon_Technology_for_the_Indian_Cement_Industry_IEA_WBCSD_Feb_2013.pdf.

⁶ Este rango para el consumo de energía térmica para hornos PH y PHP se basa en los datos incluidos en Frauke Schorcht y otros, *Best Available Techniques: Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide, Industrial Emissions Directive 2010/75/EU* (Mejores técnicas disponibles: Documento de referencia para la producción de cemento, cal y óxido de magnesio. Directiva 2010/75/UE sobre las emisiones industriales) (Bruselas, Comisión Europea [CE], 2013), sec. 1.3.3, cuadro 1.18, p. 47, https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/CLM_Published_def_0.pdf; y GCCA, base de datos "Getting the Numbers Right".

⁷ Schorcht y otros, *Best Available Techniques*, sec. 4.2.3.2, técnica C, p. 343.

⁸ En Schorcht y otros, *Best Available Techniques*, sec. 1.4.2.1.1, p. 100, se analizan otras técnicas para mejorar la eficiencia térmica del calcinador y PH.

⁹ Schorcht y otros, *Best Available Techniques*, sec. 1.4.2.1.1, pp. 100-101. Según el contenido de calor y humedad, el uso de combustibles alternativos aumentará el consumo de energía por encima de este rango. El uso de un sistema de derivación de gas también aumentará el consumo de energía.

consumen entre 5 y 8 GJ/tonelada¹⁰. Además del consumo de energía, hay otros factores importantes que influyen en la selección del horno, como las características de la caliza —por ejemplo, los hornos PFRK, en general, no pueden procesar granos de caliza muy pequeños—, la disponibilidad y las propiedades del combustible, y las propiedades de los productos de cal que exigen los clientes. Si los volúmenes de productos de cal y las consideraciones sobre la calidad lo permiten, se considera que usar hornos verticales es una buena práctica internacional de la industria porque tienen un mejor desempeño en materia de eficiencia ambiental/energética. (Entre los hornos verticales, la tecnología de PFRK es la más eficiente desde el punto de vista energético)¹¹.

12. La eficiencia en el consumo de energía térmica en hornos de cal puede optimizarse mediante i) la gestión de la energía y el control de los procesos, lo que incluye mejorar la calidad de los combustibles (alto valor calorífico/baja humedad), las tasas de flujo y las condiciones de combustión; ii) la selección del tamaño de grano de piedra adecuado; iii) la limitación del exceso de aire en los hornos LRK y PRK; iv) el mantenimiento periódico de los equipos, lo que incluye garantizar que el revestimiento refractario/de aislamiento del horno se encuentre en perfectas condiciones, y v) el uso de otras técnicas que sean específicas de los distintos tipos de hornos para la fabricación de cal¹².

Enfriadores de clínker

13. El objetivo del enfriador es reducir la temperatura del clínker tan rápido como sea posible para controlar la calidad del producto y generar temperaturas del clínker que sean adecuadas para las etapas de molienda final y mezcla. El aire caliente recuperado del enfriador proporciona aire de combustión para el quemador principal del horno y el PHP, o puede usarse para secado, con lo que se reduce el consumo de combustible. El único tipo de enfriador de clínker que se instala en la actualidad es el *enfriador de parrillas*, que se fabrica en muchas versiones, principalmente debido a su alta capacidad y a su mayor eficiencia de recuperación de calor en comparación con otros tipos de enfriadores. (Por lo general, las tasas de recuperación de calor de los enfriadores de parrilla más modernos oscilan entre el 65 % y el 75 %) ¹³. De acuerdo con las buenas prácticas internacionales de la industria, deben usarse enfriadores de parrillas de alta eficiencia —por ejemplo, con parrillas previas estáticas— y técnicas de optimización térmica, que incluyen usar en ese tipo de enfriadores placas que ofrezcan una mayor resistencia al flujo para permitir que el aire de enfriamiento se distribuya de manera más uniforme, controlando así que llegue a cada sector de las parrillas, y usar distintas velocidades para los ventiladores de enfriamiento¹⁴.

¹⁰ Schorcht y otros, *Best Available Techniques*, cuadro 2.23, p. 223.

¹¹ Asociación Europea de la Cal (EULA), *A Competitive and Efficient Lime Industry, Cornerstone for a Sustainable Europe (Lime Roadmap)* (Una industria de la cal eficiente y competitiva: La piedra angular para una Europa sostenible [Hoja de ruta de la cal]) (Bruselas, EULA, 2014), sec. 3, p. 14, <https://www.eula.eu/a-competitive-and-efficient-lime-industry-cornerstone-for-a-sustainable-europe-lime-roadmap-summary/>.

¹² En Schorcht y otros, *Best Available Techniques*, sec. 2.4.1, cuadro 2.34, p. 252, se analizan otras técnicas de optimización de la energía para distintos tipos de hornos de cal.

¹³ Instituto para la Productividad Industrial (IIP), “Conversion to High-Efficiency Grate Coolers” (Conversión a enfriadores de parrilla de alta eficiencia), *Energy Efficiency Technology Database* (s. f.), <http://www.iipinetwork.org/wp-content/letd/content/conversion-high-efficiency-grate-coolers.html>.

¹⁴ Schorcht y otros, *Best Available Techniques*, sec. 1.4.2.1.1, p. 100.

Otras medidas de eficiencia energética¹⁵

14. El consumo de energía eléctrica oscila, aproximadamente, entre 80 y 120 kilovatios-hora (kWh)/tonelada de cemento^{16, 17, 18}. Los motores utilizados para hacer funcionar ventiladores y otros equipos, en especial, para la molienda, representan una parte importante del total de energía eléctrica que se utiliza en un establecimiento cementero (un establecimiento común de este tipo tiene más de 500 motores)¹⁹. La demanda de energía eléctrica difiere según cada etapa del proceso de producción de cemento: la trituración y homogeneización de materia prima consumen aproximadamente el 30 % de la energía eléctrica total; la fabricación de clínker, aproximadamente el 25 %; y la fabricación de cemento, que incluye la molienda final, la mezcla y el empaquetado/transporte, aproximadamente el 45 %²⁰.

15. El consumo de energía eléctrica en el procesamiento del cemento puede reducirse al mínimo con equipos de alta eficiencia y mediante la aplicación de técnicas de eficiencia energética, como el uso de i) controles de proceso automatizados para molinos y separadores/clasificadores en la molienda/preparación de crudo, la gestión de los combustibles y la molienda final; ii) sistemas de gestión de potencia; iii) equipos eficientes desde el punto de vista energético, por ejemplo, sistemas mecánicos de transporte de materiales (que consumen menos energía que los sistemas neumáticos) y sistemas de silos de mezcla/de homogeneización por gravedad (que consumen menos energía que los sistemas de fluidificación con aire); iv) sistemas de molienda vertical y horizontal —los sistemas de molinos de rodillos y de molienda mediante presión de rodillos/de alta presión suelen ser un 50 % más eficientes que los molinos de bola— y separadores/clasificadores de alta eficiencia de tercera generación para preparación de crudo y combustible y molienda de cemento²¹; v) ciclones de PH con alta eficiencia y baja caída de presión (para reducir el consumo de energía en el sistema de gas de salida del horno); vi) motores de alta eficiencia y con un buen mantenimiento para el transporte, la molienda y las operaciones relacionadas con los hornos, y vii) propulsores de velocidad variable para los motores y ventiladores en el horno, el enfriador,

¹⁵ Puede encontrarse información útil adicional en Comisión Europea (CE), *Reference Document on Best Available Techniques for Energy Efficiency* (Documento de referencia sobre mejores técnicas disponibles para la eficiencia energética) (Bruselas, CE, 2009), https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/ENE_Adopted_02-2009.pdf.

¹⁶ Wang, Yufei, Zhengping Hao y Samuel Höller, “Analysis of CO₂ Mitigation Policies in the Chinese Cement Industry” (Análisis de las políticas de mitigación del dióxido de carbono en la industria cementera china), *ECEEE 2012 Summer Study on Energy Efficiency in Industry* (Estudio de verano sobre la eficiencia energética en la industria, Consejo Europeo para una Economía con Eficiencia Energética, 2012) (Wuppertal, Alemania, Instituto Wuppertal, 2012), http://epub.wupperinst.org/files/4635/4635_Wang.pdf.

¹⁷ GCCA, “Getting the Numbers Right”, conjunto de datos 33AGW.

¹⁸ Schorcht y otros, *Best Available Techniques*, sec. 1.3.3.2, p. 49.

¹⁹ Véase IIP, *High Efficiency Motors & Drives* (Motores y propulsores de alta eficiencia) (s. f.), <http://www.iipinetwork.org/wp-content/letd/content/high-efficiency-motors-drives.html>.

²⁰ Asociación Europea del Cemento (CEMBUREAU), “Electrical Energy Efficiency” (Eficiencia de la energía eléctrica) en *The Role of Cement in the 2050 Low Carbon Economy* (El papel del cemento en una economía con bajo contenido de carbono para 2050) (Bruselas, CEMBUREAU, 2013), pp. 39-41, <https://lowcarboneyconomy.cembureau.eu/wp-content/uploads/2018/09/cembureau-full-report.pdf>. Como se señala en la introducción de esta guía, los aspectos de la extracción de materia prima relacionados con MASS se abordan en las **guías sobre MASS para la extracción de materiales de construcción** de IFC.

²¹ IIP, *Vertical Roller Mills for Finish Grinding* (Molinos de rodillos verticales para molienda final) (s. f.), <http://www.iipinetwork.org/wp-content/letd/content/vertical-roller-mills-finish-grinding.html>.

el PH, el separador y los molinos, entre otros. Si estas técnicas se usan en conjunto, se puede ahorrar energía eléctrica con períodos de recuperación favorables para las inversiones^{22, 23}.

16. El consumo de energía eléctrica en la fabricación de cal representa una pequeña parte (alrededor del 10 %) del consumo de energía y suele ubicarse en torno a 60 kWh/tonelada de cal. Las oportunidades para mejorar la eficiencia en el consumo de energía eléctrica se relacionan principalmente con i) la aplicación de controles de los procesos y de la gestión de la energía; ii) la mejora de la eficiencia de los motores, y iii) la optimización de los procesos de enfriamiento y trituración/molienda mediante equipos de alta eficiencia²⁴. Estas medidas pueden generar ahorros de energía considerables; por ejemplo, la eficiencia de los motores puede mejorar alrededor del 10 %²⁵.

Gases de efecto invernadero

17. Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en la industria del cemento, en especial, de dióxido de carbono (CO₂)²⁶, se relacionan principalmente con la calcinación de caliza durante la fabricación de clínker (aproximadamente un 55 % de las emisiones totales de CO₂), con el combustible utilizado para calentar el horno (alrededor del 35 % de las emisiones de CO₂ suele provenir del uso de combustibles con alto contenido de carbono, como carbón y coque de petróleo), y con el uso y el transporte de electricidad (alrededor de un 10 % de las emisiones totales de CO₂, según la fuente de electricidad)²⁷. La intensidad de las emisiones de GEI durante la fabricación de cemento varía según i) la composición del material con que se alimenta el horno; ii) el tipo de combustible que se utiliza para la combustión; iii) el nivel general de eficiencia energética del establecimiento y la tecnología de horno elegida; iv) la relación clínker-cemento, y v) la intensidad de carbono del suministro de electricidad²⁸. Si bien los combustibles fósiles

²² *Ibidem*, "Cement" (Cemento) (s. f.).

²³ Worrell, Ernst, Katerina Kermeli y Christina Galitsky, *Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for Cement Making—An ENERGY STAR® Guide for Energy and Plant Managers* (Oportunidades para mejorar la eficiencia energética y ahorrar costos en la fabricación de cemento: Guía de ENERGY STAR® para administradores de energía y gerentes de planta) (Washington, DC, Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos [EPA], 2013), pp. 19-82, http://www.energystar.gov/sites/default/files/tools/ENERGY%20STAR%20Guide%20for%20the%20Cement%20Industry%2027_08_2013_Rev%20js%20reformat%2011192014.pdf.

²⁴ EULA, *A Competitive and Efficient Lime Industry, Cornerstone for a Sustainable Europe (Lime Roadmap)*, sec. 5.1.1, pp. 27-36.

²⁵ *Ibidem*, p. 14.

²⁶ Es poco probable que las plantas de cemento y cal emitan el potente óxido nitroso (N₂O) de los GEI debido a las altas temperaturas y a las condiciones de oxidación. La única posible fuente de N₂O serían las liberaciones directas de materia prima en el molino de crudo.

²⁷ WBCSD, *CO₂ and Climate Protection* (CO₂ y protección del clima) (Ginebra, WBCSD, s. f.), <https://www.wbcsd.org/Programs/Climate-and-Energy>.

²⁸ Pueden utilizarse opciones de energía renovable —incluidas la energía eólica, la energía solar fotovoltaica, la energía térmica solar y la generación de energía hidroeléctrica a pequeña escala— para la fabricación de cemento. La aplicación de estas tecnologías depende de factores como la disponibilidad de fuentes de energía renovables, de los precios de la electricidad y del tamaño de la planta. Véase AIE, *Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry* (Hoja de ruta de la tecnología: Transición con bajas emisiones de carbono en la industria cementera) (París, AIE, 2018), p. 37, <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry>. El grado de uso de la generación privada de energía renovable por parte del sector de medio ambiente, salud y seguridad es bajo.

convencionales siguen siendo la fuente de combustible predominante en los principales países productores de cemento del mundo²⁹ —incluidos China y la India, que en 2015 se ubicaron, respectivamente, en el primero y el segundo lugar como productores mundiales de cemento³⁰—, el reemplazo del uso de combustibles fósiles por combustibles de desechos³¹ y biomasa está aumentando a nivel mundial³².

18. La descarbonación de la caliza y las emisiones de CO₂ relacionadas con los combustibles en el proceso de fabricación de cal son similares a las que ocurren en la fabricación de cemento. Sin embargo, el consumo de electricidad y las emisiones de CO₂ relacionadas son, en general, menores en la fabricación de cal que en la de cemento. Los principales productores de cal también utilizan esencialmente combustibles fósiles convencionales para la fabricación de ese producto.

19. Las emisiones de GEI asociadas con los proyectos de fabricación de cemento o cal, así como la generación de energía térmica relacionada, deben cuantificarse anualmente de conformidad con las metodologías y buenas prácticas reconocidas internacionalmente.

20. En las **guías generales sobre MASS** se brindan recomendaciones para la gestión de las emisiones de GEI. Además de las medidas de eficiencia energética analizadas en las secciones anteriores de estas guías, las técnicas específicas del sector para reducir al mínimo las emisiones de CO₂ en la fabricación de cemento incluyen las siguientes³³:

²⁹ El combustible que más suele utilizarse en la industria cementera es el carbón pulverizado (carbón negro y lignito). Sin embargo, debido a su menor costo, se ha incrementado el uso del coque de petróleo. El carbón y el coque de petróleo generan emisiones de GEI más altas que otros combustibles con menor contenido de carbono; por ejemplo, generan alrededor de un 65 % más de emisiones por unidad que el gas natural. Además, el alto contenido de azufre en el combustible (una característica del coque de petróleo) puede causar problemas, incluida la acumulación de azufre en los anillos del horno.

³⁰ CEMBUREAU, *Cement and Concrete: Key Facts and Figures* (Cemento y hormigón: Cifras y datos básicos) (Bruselas, CE, 2020), <https://cembureau.eu/cement-101/key-facts-figures>.

³¹ Entre los combustibles de desechos que suelen utilizarse en la industria cementera se encuentran residuos peligrosos y no peligrosos con diversos niveles caloríficos. En Schorcht y otros, *Best Available Techniques*, sec. 1.2.4.3.1, p. 22, puede consultarse una lista de combustibles de desechos de uso común, entre los que se incluyen disolventes usados, residuos de aceites, neumáticos usados, combustibles derivados de residuos y residuos plásticos.

³² Los combustibles fósiles convencionales representaban alrededor del 85 % del uso de combustible mundial para la fabricación de cemento (sobre un porcentaje de energía total), seguidos de los combustibles fósiles y de desechos combinados (alrededor del 10 %) y de los combustibles de biomasa (alrededor del 5 %). En el año 2000, los valores eran de alrededor del 95 % de combustibles fósiles convencionales, alrededor del 4 % de combustibles fósiles y de desechos combinados, y alrededor del 1 % de combustibles de biomasa. Véase GCCA, "Getting the Numbers Right", conjunto de datos 25aAGFC, para "Nivel mundial" y "28 Estados de la UE".

³³ A medida que en el futuro se vaya demostrando con más claridad que las tecnologías de captura y almacenamiento o reutilización de carbono son viables desde el punto de vista técnico y comercial, se deberá considerar la posibilidad de aplicarlas en la industria cementera. Puede obtenerse información adicional en el Programa de Investigación y Desarrollo de Gases de Efecto Invernadero de la Agencia Internacional de Energía (IEAGHG), *Deployment of CCS in the Cement Industry* (Aplicación de la captura y almacenamiento de carbono en la industria cementera) (2013), https://ieaghg.org/docs/General_Docs/Reports/2013-19.pdf.

- Fabricar cementos mezclados —en los que el clínker se reemplace parcialmente por ceniza volante, escoria de alto horno, materiales volcánicos naturales, arcilla calcinada o caliza molida— o nuevos materiales cementicios con menor consumo de energía y menor emisión de GEI que el clínker por unidad de producto final, de modo que el consumo de combustible y las posteriores emisiones de CO₂ puedan reducirse en forma considerable^{34, 35, 36}.
- Reemplazar combustibles convencionales (carbón/coque de petróleo) por combustibles alternativos que tengan una menor relación de contenido de carbono-valor calorífico, o realizar la combustión conjunta de los convencionales con ese tipo de alternativos, lo que incluye pasar a combustibles con menor contenido de carbono (por ejemplo, gas natural o, si esto no fuera posible, fueloil) y seleccionar combustibles de desechos —como se analiza en la sección “Emisiones a la atmósfera” y en el apartado “Combustibles de desechos, desechos y emisiones a la atmósfera relacionadas” más adelante—, combustibles de biomasa (como arroz, cáscara de café, cáscara de palma, residuos de madera, etc.) o combustibles derivados de residuos (cuando haya una cantidad suficiente de esos combustibles alternativos a un costo económico)³⁷.
- Reemplazar parcialmente la materia prima, la caliza, por fuentes no carbonatadas de óxido de calcio o cal viva (CaO) —como escoria de alto horno, ceniza de lignito, ceniza de carbón, arena chancada para hormigón, etc.— a fin de reducir las emisiones de CO₂ del proceso y las del combustible relacionadas con la calcinación^{38, 39}.

³⁴ Por ejemplo, en el caso del cemento que contiene entre un 30 % y un 70 % de escoria granulada de alto horno, las emisiones de CO₂ pueden reducirse entre 100 y 430 kg por cada tonelada de cemento, en comparación con las emisiones habituales de 750 kg de CO₂ por tonelada de cemento. El mayor uso de cementos mezclados depende de la disponibilidad, de las propiedades y de los precios de los materiales sustitutos, de los estándares nacionales y de las consideraciones de mercado, como la aplicación prevista para el producto de cemento. Véase IIP, *Blended Cement Alternatives* (Alternativas de cemento mezclado) (s. f.), <http://www.iipinetwork.org/wp-content/letd/content/blended-cement-alternatives.html>.

³⁵ La relación clínker-cemento varía entre los principales productores de cemento. En China fue del 63 % en 2011 (73 % en 2005); en la India, del 70,5 % en 2013 (77,8 % en 2005); en la Unión Europea, del 73,6 % en 2013 (75,8 % en 2005), y en los EE. UU., del 83,5 % en 2013 (83,7 % en 2005). Para consultar las relaciones clínker-cemento de China, véase Ke y otros, “Estimation of CO₂ Emissions”, p. 7. Para obtener información sobre la India, la Unión Europea (UE) y los EE. UU., véase GCCA, “Getting the Numbers Right”, conjunto de datos 92AGW, para “India,” “28 Estados de la UE” y “Estados Unidos”.

³⁶ AIE y WBCSD (2018), “*Low-Carbon Transition in the Cement Industry*” (Transición con bajas emisiones de carbono en la industria cementera), pp. 32-35.

³⁷ IFC, *Increasing the Use of Alternative Fuels at Cement Plants: International Best Practice* (Incremento en el uso de los combustibles alternativos en plantas de cemento: Mejores prácticas internacionales) (Washington, DC, IFC, 2017), https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/33180042-b8c1-4797-ac82-cd5167689d39/Alternative_Fuels_08+04.pdf?MOD=AJPERES&CVID=IT3Bm3Z.

³⁸ Véanse Worrell, Kermeli y Galitsky, *Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for Cement Making—An ENERGY STAR® Guide for Energy and Plant Managers*, pp. 76-80; e IIP, *Alternative Raw Materials* (Materias primas alternativas) (s. f.). El grado en que puedan utilizarse materias primas alternativas depende de la composición de las materias primas convencionales disponibles (por ejemplo, caliza) y de la disponibilidad, del costo y de la composición de las materias primas alternativas, como el contenido de sílice, alúmina, óxido de magnesio y azufre.

³⁹ Seleccionar materias primas con menor contenido orgánico para evitar generar nuevas emisiones de CO₂ y emisiones más bajas de monóxido de carbono (CO), que suele ser inferior a entre el 0,5 % y el 1 % del total de los

- Los gases residuales que se descargan del horno, del sistema de enfriadores de clínker y del sistema de precalentamiento de los hornos contienen energía útil que puede utilizarse para el secado de materia prima y combustible o para la generación de energía. Si bien la fabricación de cemento no suele tener requisitos significativos de calentamiento a baja temperatura, el calor que permanece tras la recuperación del calor del proceso puede recuperarse mediante calderas de recuperación del calor para utilizarlo en un ciclo de generación de energía independiente o para complementar el vapor producido por la combustión de combustible para la generación privada de energía en el emplazamiento. La cantidad de calor residual disponible para la generación de energía a partir de calor recuperado depende del diseño y de la producción del sistema de hornos, del contenido de humedad de las materias primas y de la cantidad de calor necesaria para el secado en el sistema de molienda de materia prima, el sistema de combustible sólido y el molino de cemento. La generación de energía a partir de la recuperación del calor residual puede cubrir hasta un 30 % de las necesidades generales de electricidad de una planta de cemento a través de diversos tipos de sistemas basados en el ciclo Rankine, en especial, el ciclo Rankine de vapor, que se utiliza en la gran mayoría de los sistemas de recuperación del calor residual. Otros sistemas incluyen el ciclo Rankine orgánico y el ciclo Kalina⁴⁰.

21. En el caso de la fabricación de cal, las emisiones de GEI pueden reducirse al mínimo mediante i) el uso de hornos verticales más eficientes (según el volumen de producción y las especificaciones del producto de cal) y la optimización del horno como se analiza en la sección “Consumo de energía” más arriba; ii) la recuperación del calor residual del horno y durante la hidratación de la cal (el calor residual puede utilizarse para el secado y la molienda de materias primas), y iii) el cambio a combustibles con menos emisiones de GEI, incluidos combustibles de desechos, gas natural (o, si no fuera posible, fueloil) y biomasa, con sujeción a limitaciones técnicas⁴¹.

Emisiones a la atmósfera

22. El funcionamiento de los sistemas de hornos, los enfriadores de clínker y los molinos, así como la manipulación y el almacenamiento de materiales y productos intermedios y finales, generan emisiones atmosféricas procedentes de fuentes puntuales en la fabricación de cemento y cal. También puede haber emisiones de polvo provenientes de fuentes difusas.

23. En este sector de la industria predominan las fuentes de combustión para la generación de energía. En las **guías generales sobre MASS** se ofrece orientación para la gestión de emisiones de fuentes de combustión pequeñas con una capacidad de aporte de energía térmica de hasta 50 megavatios térmicos

gases emitidos durante el quemado de clínker. El CO es un indicador de las condiciones del proceso. Por lo general, las lecturas de CO alto son una señal de advertencia de que el proceso de fabricación no está funcionando correctamente (y que quizás se esté consumiendo más combustible). El CO debe controlarse permanentemente. Además, si se usan precipitadores electrostáticos, existe el riesgo de que se produzcan explosiones relacionadas con concentraciones de CO que superan entre el 0,5 % y el 1 %.

⁴⁰ Puede encontrarse una guía sobre recuperación del calor residual en IFC e IIP, *Waste Heat Recovery for the Cement Sector: Market and Supplier Analysis* (Recuperación del calor residual para el sector del cemento: Análisis de mercados y proveedores) (Washington, DC, IFC e IIP, 2014), https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/topics_ext_content/ifc_external_corporate_site/sustainability-at-ifc/publications/report_waste_heat_recovery_for_the_cement_sector_market_and_supplier_analysis.

⁴¹ EULA, *A Competitive and Efficient Lime Industry*, sec. 5, pp. 27-42.

(MWth), incluidas las normas sobre emisiones a la atmósfera para las emisiones de gases de salida. En las **guías sobre MASS para las plantas de energía térmica** se presenta información sobre fuentes de emisión de más de 50 MWth.

Material particulado

24. Las emisiones de material particulado (PM) son una consecuencia potencialmente significativa del proceso de fabricación de cemento y cal. Las principales fuentes de emisión de ese tipo de material y sus respectivos métodos de prevención y control recomendados se resumen en los párrafos a continuación.

25. Para las emisiones de material particulado relacionado con el funcionamiento de los sistemas de hornos y los enfriadores de clínker, incluido el quemado de clínker y caliza, se recomiendan las siguientes técnicas de prevención y control de la contaminación, además de mantener el buen funcionamiento de los hornos⁴²:

- Filtrar el polvo de los hornos y de los enfriadores de clínker y reciclar las partículas recuperadas usándolas para alimentar el horno, en el primer caso, y mezclándolas con el clínker, en el segundo.
- Usar sistemas de filtros de tela⁴³ como opción de control preferida, con los precipitadores electrostáticos como opción alternativa⁴⁴, para recabar y controlar las emisiones de material particulado fino (PM₁₀ y PM_{2.5}) en el gas de salida y el gas de derivación de hornos, así como en el aire de salida de los enfriadores.

26. En el caso de emisiones de material particulado relacionadas con el funcionamiento de los molinos, la técnica de control recomendada es captar el polvo del molino mediante filtros de tela⁴⁵ y reciclarlo dentro del molino.

27. En el caso de emisiones de material particulado y polvos fugitivos provenientes de la manipulación y el almacenamiento de materiales intermedios y finales (incluida la trituration y molienda de materias primas), de la manipulación y el almacenamiento de combustibles sólidos, del transporte de materiales (por ejemplo, en camiones o cintas transportadoras) y de las actividades de ensacado, las técnicas de prevención y control de contaminación recomendadas incluyen las siguientes:

⁴² “Mantener el buen funcionamiento de los hornos” se refiere a mantenerlos en todo momento en condiciones operativas óptimas.

⁴³ Los filtros de tela también se denominan filtros “de bolsa” o “de manga”. En este documento se utiliza el término “filtro de tela”.

⁴⁴ Si bien los precipitadores electrostáticos son confiables en condiciones operativas normales, existe el riesgo de explosión si las concentraciones de CO en el horno superan el 0,5 %. Para evitar esto, los operadores deben garantizar una gestión y control adecuados y constantes de los procesos de combustión, incluidos los niveles de CO, en especial, durante la puesta en funcionamiento del horno, para que la electricidad pueda desconectarse automáticamente de ser necesario. Los precipitadores electrostáticos también deben tener el tamaño adecuado para poder responder si se producen averías importantes en el horno durante las cuales grandes cantidades de clínker caliente y sin quemar pasen a través de los gases de salida del enfriador.

⁴⁵ Los precipitadores electrostáticos no son aptos para eliminar polvo del molino debido a los costos de inversión y a su eficiencia (emisiones relativamente altas) durante las puestas en funcionamiento y las paradas.

- Usar sistemas cerrados para manipular materiales (por ejemplo, operaciones de trituración, molienda de crudo y molienda de clínker) que se mantengan con presión negativa mediante extractores de aire, con eliminación del polvo del aire de ventilación mediante filtros de tela⁴⁶.
- Usar cintas transportadoras cerradas para transportar materiales y controlar las emisiones en los puntos de transferencia, incluidos los sistemas para limpiar las cintas de retorno.
- Diseñar lugares de almacenamiento cubiertos lo suficientemente grandes para el clínker y los combustibles sólidos, de modo de evitar que sea necesario llevar y traer esas sustancias con frecuencia de las pilas de acopio. Por ejemplo, los establecimientos suelen tener una capacidad de almacenamiento cubierto o de silo de clínker de entre 15 y 30 días de producción de ese material, aproximadamente, a fin de reducir al mínimo las transferencias de ese producto y para que se pueda continuar fabricando cemento mientras los hornos estén apagados para su mantenimiento anual.
- Implementar, en la medida de lo posible, sistemas automáticos para rellenar y manipular los sacos; esto incluye, por ejemplo, usar i) una máquina giratoria para rellenar sacos, que tenga un alimentador automático de sacos de papel y control de emisiones fugitivas, ii) un control automático del peso para cada saco durante la descarga, iii) cintas transportadoras para transportar los sacos a una máquina paletizadora y envolvedora, y iv) almacenamiento de los palés terminados en áreas abiertas para su posterior envío.
- Aplicar prácticas de almacenamiento para reducir los polvos difusos o fugitivos de las existencias de materiales y combustibles; por ejemplo, usar i) áreas cubiertas o cerradas para materias primas trituradas y premezcladas; ii) silos para combustibles convencionales, como carbón pulverizado y coque de petróleo; iii) áreas protegidas del viento y de las precipitaciones para combustibles derivados de residuos; iv) áreas cubiertas y cerradas o silos para el clínker, con extracción/recuperación automática de polvo, v) silos con extracción/recuperación automática de polvo para el cemento, conectados a un sistema de carga automática para camiones cisterna que transportan mercancías a granel; vi) tolvas o silos para distintos tamaños de cal quemada cribada, y vii) silos sellados para almacenar cal hidratada fina. Las emisiones de material particulado en áreas de almacenamiento/acopio también pueden reducirse rociando agua y con supresores químicos de polvo, incluidas técnicas de humidificación, en puntos importantes de carga y descarga.
- Realizar tareas de rutina de mantenimiento y una limpieza adecuada de la planta para que haya la menor cantidad posible de pequeñas fugas y escapes de aire, y utilizar sistemas de aspiración móviles y fijos para las operaciones de rutina y las averías.
- Utilizar diseños sencillos y lineales para las operaciones de manipulación de materiales a fin de reducir la necesidad de contar con varios puntos de transferencia; eso incluye contar con rutinas de pavimentación, humidificación y limpieza para las áreas de transporte por carretera.

28. En las **guías generales sobre MASS** pueden encontrarse otras recomendaciones para la gestión de emisiones de material particulado de otras fuentes difusas, incluidos polvos generados por vehículos que se desplazan dentro del establecimiento de fabricación de cemento o cal, o en sus alrededores.

⁴⁶ Para las actividades de hidratación de cal, los depuradores húmedos pueden ser efectivos cuando el uso de filtros de tela esté limitado por el alto contenido de humedad/la baja temperatura de los gases de combustión. Schorcht y otros, *Best Available Techniques*, sec. 4.6.3.2, p. 361.

Óxidos de nitrógeno

29. El proceso de combustión a alta temperatura del horno de cemento emite óxido de nitrógeno (NO_x)⁴⁷. Además de mantener el buen funcionamiento de los hornos, se recomiendan las siguientes técnicas de prevención y control:

- Usar quemadores de bajo NO_x (en el horno principal, al igual que en el precalcinador, según corresponda) para evitar puntos calientes con llamas localizadas que promuevan la generación de NO_x⁴⁸.
- Usar calcinadores de bajo NO_x.
- Usar combustibles con bajo contenido de nitrógeno.
- Elaborar un proceso de combustión en etapas, según corresponda, en hornos PHP y PH.
- Optimizar el flujo de aire primario y secundario para asegurar condiciones de combustión/quemado apropiadas, controlando rigurosamente el exceso de oxígeno y, por lo tanto, reduciendo al mínimo la formación y las emisiones de NO_x.
- Enfriar la llama⁴⁹ agregando agua al combustible o directamente a la llama para reducir la temperatura y aumentar la concentración de radicales hidroxilos.

30. Además de las técnicas de control primario antes mencionadas para reducir el NO_x, también pueden usarse técnicas secundarias, como la reducción no catalítica selectiva, según sea necesario⁵⁰.

31. Dado que las temperaturas de quemado de la caliza son más bajas, la fabricación de cal suele generar emisiones de NO_x más bajas que la de cemento. Además de mantener el buen funcionamiento de los hornos, las emisiones de NO_x pueden controlarse utilizando quemadores bajos en NO_x optimizados⁵¹.

⁴⁷ El monóxido de nitrógeno representa más del 90 % del NO_x emitido.

⁴⁸ Con respecto al uso de quemadores de bajo NO_x con precalcinador, véase Schorcht y otros, *Best Available Techniques*, sec. 4.2.6.1, p. 349. Con respecto a la optimización de los quemadores, si el quemador inicial funciona con un bajo porcentaje de aire primario, un quemador bajo en NO_x tendrá un efecto marginal en los niveles de NO_x. Enfriar la llama puede tener un impacto negativo en el consumo de combustible y, posiblemente, provoque un aumento de entre un 2 % y un 3 % en el uso de combustible, con un consiguiente aumento de las emisiones de CO₂. Véase Schorcht y otros, *Best Available Techniques*, sec. 1.4.5.1.2, p. 130.

⁴⁹ Para una descripción más detallada de las técnicas de enfriamiento de llama, véase Centro de Producción de Energía más Limpia de Gujarat (GCPC), *Cleaner Production Opportunities in Cement Manufacturing Sector* (Oportunidades de producción de energía más limpia en el sector de la fabricación del cemento) (s. f.), <http://www.gcpcenvs.nic.in/Experts/Cement%20sector.pdf>.

⁵⁰ Para obtener más información sobre la reducción no catalítica selectiva, agentes y aplicaciones de reducción, véase Schorcht y otros, *Best Available Techniques*, sec. 1.4.5.1.7, pp. 134-139.

⁵¹ Los quemadores bajos en NO_x se han adaptado a los hornos rotatorios y también pueden aplicarse a hornos de eje anulares en el caso de algunas condiciones específicas (alto flujo de aire primario). No se puede transferir directamente la técnica de los quemadores bajos en NO_x de los hornos de cemento a los hornos de cal. En los hornos de cemento, la temperatura de las llamas es más alta, y se han desarrollado quemadores bajos en NO_x para reducir los altos niveles iniciales de "NO_x térmico". En la mayoría de los hornos de cal, los niveles de NO_x son más bajos y el "NO_x térmico" no es tan alto. La técnica del quemador debe adaptarse a los combustibles utilizados, es

Compuestos orgánicos totales

32. En los procesos térmicos (combustión) en general, la existencia de compuestos orgánicos totales o de compuestos orgánicos volátiles suele estar relacionada con una combustión incompleta. En los hornos, las emisiones en condiciones estables normales serán bajas. Las concentraciones pueden aumentar durante la puesta en funcionamiento o en condiciones operativas anormales (alteraciones). Esta situación puede presentarse con frecuencia variable, por ejemplo, entre una o dos veces por semana y una vez cada dos o tres meses. Puede haber emisiones de compuestos orgánicos totales en las primeras etapas del proceso (precalentamiento, precalcinamiento), cuando la materia orgánica presente en el crudo se volatiliza a medida que el material se calienta. La materia orgánica se libera a temperaturas de entre 400 °C y 600 °C.

33. En circunstancias normales, las emisiones de compuestos orgánicos totales suelen ser bajas, aunque pueden ser mayores de acuerdo con el contenido orgánico volátil de la materia prima que se use en la planta. Si se puede elegir, al alimentar el sistema del horno con materias primas no deben ingresarse materias primas naturales o residuales que tengan un alto contenido de compuestos orgánicos volátiles; tampoco deben utilizarse combustibles con alto contenido de halógenos en la cocción secundaria. Para mantener el nivel de emisiones de compuestos orgánicos totales bajo, el proceso puede optimizarse, por ejemplo, manteniendo el buen funcionamiento de la planta, el proceso de cocción o la homogeneización del combustible y de la materia prima con que se alimentan los hornos, y optimizando tal funcionamiento y tales procesos. En caso de concentraciones elevadas de compuestos orgánicos totales, puede considerarse la posibilidad de realizar una adsorción con carbón activado, como en otros sectores⁵².

Dióxido de azufre

34. Las emisiones de dióxido de azufre (SO₂) en la fabricación de cemento se relacionan principalmente con el contenido de azufre volátil o reactivo en las materias primas y, en menor grado, con la calidad de los combustibles que se utilizan en el horno⁵³. Entre las técnicas de control de la contaminación recomendadas para reducir el SO₂ se incluyen las siguientes:

- Elegir materias primas y combustibles con bajo contenido de azufre volátil.
- Optimizar el proceso de quemado del clínker con técnicas que incluyan mantener el buen funcionamiento de los hornos, asegurar una distribución uniforme del material caliente en el tubo ascendente del horno y evitar condiciones reductoras en el proceso de quemado. Optimizar la concentración de oxígeno en el área de entrada del horno ayudará a captar SO₂ en la carga del horno, pero esto debe equilibrarse con los impactos en las emisiones de NO_x y CO.

decir, combustibles fósiles convencionales o combustibles de desechos. La combustión de los hornos de flujo paralelo regenerativos no tiene llama, por lo que los quemadores bajos en NO_x no se aplican a este tipo de horno. Véase Schorcht y otros, *Best Available Techniques*, sec. 2.4.6.1.3, p. 274.

⁵² Véase Schorcht y otros, *Best Available Techniques*.

⁵³ Las materias primas con alto contenido de azufre orgánico o pirita producen emisiones de SO₂ elevadas. El azufre introducido en el sistema del horno con los combustibles se oxida en SO₂ y no generará emisiones de SO₂ significativas dada la naturaleza fuertemente alcalina en la zona de sinterización, en la zona de calcinación y en la etapa más baja del precalentado. Véase Schorcht y otros, *Best Available Techniques*, sec. 1.3.4.3, p. 66, y sec. 1.4.3.2, p. 111.

- Usar un molino vertical de crudo, donde los gases pasen a través del molino para recuperar energía y reducir el contenido de azufre en el gas (en el molino, el gas con óxido de azufre [SO_x] se mezcla con el carbonato de calcio [CaCO₃] del crudo y produce sulfato de calcio [yeso]).
- Inyectar absorbentes, como hidróxido de calcio o cal hidratada (Ca(OH)₂), CaO o cenizas volantes con alto contenido de CaO en el gas de salida antes de los filtros.
- Usar depuradores húmedos o en seco⁵⁴.

35. Las emisiones de SO₂ en la fabricación de cal se relacionan con el contenido de azufre del combustible y de las materias primas, con el diseño y tipo de horno, y con los requisitos del producto. Los hornos de eje, incluidos los PFRK, suelen generar menos emisiones de SO₂ que los hornos rotatorios comunes o los hornos rotatorios con precalentadores. Si se eligen combustibles y materias primas con bajo contenido de azufre, se pueden reducir las emisiones de SO₂⁵⁵.

Metales pesados

36. Las emisiones de metales pesados —como plomo, cadmio y mercurio— durante la fabricación de cemento y cal pueden ser considerables, según la presencia que haya de metales pesados en las materias primas y en los combustibles fósiles y los derivados de residuos.

37. Los metales no volátiles se encuentran mayormente unidos al material particulado y pueden controlarse con mediciones de polvo y material particulado, según se analiza en la sección más arriba. Los materiales residuales captados deben tratarse como residuos peligrosos, como se describe en las **guías generales sobre MASS**.

38. Según la temperatura del gas residual, los metales volátiles, como el mercurio, solo son adsorbidos en parte por el polvo de gas bruto. Entre las técnicas recomendadas para limitar las emisiones de metales pesados volátiles se incluyen las siguientes:

- Implementar controles para el contenido de metal pesado volátil en los insumos y los combustibles de desechos mediante el seguimiento y la selección de materiales (lo que incluye aplicar técnicas selectivas de explotación de canteras para evitar materiales con altas concentraciones de metal).
- En el caso de concentraciones altas de metales pesados volátiles (en especial, mercurio), puede utilizarse el método de transferencia selectiva del polvo o de extracción del polvo del horno enriquecido con mercurio, en combinación con una inyección de absorbente, para limitar la acumulación de mercurio en el polvo del horno⁵⁶. El residuo sólido resultante debe tratarse como

⁵⁴ Si bien las emisiones de SO₂ no suelen ser un problema importante en la fabricación de cemento, pueden usarse depuradores en seco y húmedos para controlar estas emisiones. La depuración en seco es más costosa y, por lo tanto, es una técnica menos común que la depuración húmeda, y suele utilizarse cuando las emisiones de SO₂ pueden llegar a superar los 1500 miligramos por metro cúbico normal (mg/Nm³).

⁵⁵ Para obtener más información sobre el control de las emisiones de SO₂ en la fabricación de cal, véase Schorcht y otros, *Best Available Techniques*, sec. 2.4.6.2, p. 279.

⁵⁶ Esta técnica de transferencia o extracción de polvo es más eficiente con el molino de crudo desactivado, cuando el horno funciona solo (en comparación con cuando lo hace en línea con el molino de crudo para usar los gases del

residuo peligroso, según se describe en las **guías generales sobre MASS**. Las medidas para controlar varios agentes contaminantes, como los depuradores húmedos y la adsorción con carbón activado, también pueden ser efectivas para controlar las concentraciones altas de metales pesados volátiles⁵⁷.

Combustibles de desechos, desechos y emisiones a la atmósfera relacionadas

39. Dada su atmósfera fuertemente alcalina y la alta temperatura de la llama (hasta 2000 °C), los hornos de cemento pueden usar combustibles de desechos de alto valor calorífico, por ejemplo, disolventes usados, residuos de aceites, neumáticos usados, combustibles derivados de residuos y residuos plásticos. En casos excepcionales, los hornos de cemento también pueden usarse para eliminar residuos con poco valor calorífico o mineral que no contribuyan al proceso de producción de clínker. Solo debe considerarse la posibilidad de procesar simultáneamente residuos peligrosos (incluidos bifenilos policlorados, pesticidas organoclorados obsoletos y otros materiales clorados) si se cumplen determinados requisitos (que se analizan más adelante) con respecto al control del proceso, el control de las emisiones y el control de los insumos (por ejemplo, controlar el contenido de metales pesados, el valor calorífico, el contenido de ceniza y el contenido clorado). Si bien los combustibles fósiles pueden sustituirse por combustibles de desechos, según su composición, el uso de combustibles de desechos o el procesamiento simultáneo de residuos peligrosos, si no se realizan y controlan debidamente, pueden generar emisiones de compuestos orgánicos volátiles, contaminantes orgánicos persistentes, como dibenzodioxinas policloradas y dibenzofuranos policlorados, así como fluoruro de hidrógeno, cloruro de hidrógeno (que también podría surgir de compuestos orgánicos volátiles de materias primas con cloruro), y metales tóxicos y sus compuestos.

40. Los establecimientos que utilizan combustibles de desechos o que procesan simultáneamente residuos peligrosos en la fabricación de cemento deben documentar las cantidades y tipos de residuos que se utilizan y los estándares de calidad, por ejemplo, el valor calorífico mínimo y los niveles de concentración máximos de determinados agentes contaminantes, como bifenilos policlorados, cloruro, hidrocarburos aromáticos policíclicos, mercurio y otros metales pesados. Debe realizarse un seguimiento adecuado de las emisiones (tema que se analiza en la [sección 2 de estas guías](#)) cuando se quemen residuos en plantas cementeras, ya sea porque se los utiliza como combustible alternativo o para

horno para secar el crudo dentro del molino), ya que el polvo proviene del precalentador, que tiene concentraciones de mercurio más altas porque no se “diluye” dentro del molino de crudo. La temperatura del gas de combustión debe ser lo más baja posible, preferiblemente inferior a 130 grados Celsius (°C), para tener una tasa de adsorción alta. Véase Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), “Cement Clinker Production Facilities” (Establecimientos de producción de clínker para cemento) en *Guidance on Best Available Techniques and Best Environmental Practices* (Orientaciones sobre las mejores técnicas disponibles y las mejores prácticas ambientales) (Nueva York, PNUMA, 2016), sec. 3.2.1 y 3.2.2, pp. 10-12, http://mercuryconvention.org/Portals/11/documents/publications/BAT_BEP_E_interractif.pdf.

⁵⁷ Los depuradores húmedos son los más efectivos cuando las emisiones de mercurio se presentan predominantemente en forma de óxido. Si hay altos niveles de mercurio elemental, los depuradores húmedos no son tan efectivos, salvo que se utilicen aditivos para oxidar el mercurio. Los filtros de carbón activado se construyen con la modalidad de lecho compacto, con filtros modulares de diverso tamaño para adaptarse a distintos grados de caudal de gas y capacidades de hornos. Véase PNUMA, “Cement Clinker Production Facilities”, sec. 3.3.1 y 3.3.3.

destruirlos. Entre las técnicas de prevención y control recomendadas para estos contaminantes del aire se incluyen las siguientes⁵⁸:

- Implementar el seguimiento y control del contenido de metales pesados volátiles en los materiales de entrada y los combustibles de desechos mediante la selección de materiales y las medidas de control que se describen en la sección [Metales pesados](#). Los metales no volátiles deben gestionarse de acuerdo con las recomendaciones formuladas en la sección [Material particulado](#).
- Implementar prácticas de almacenamiento y manipulación apropiadas para los residuos peligrosos y no peligrosos que se usen como combustible de desechos o materia prima, según se describe en las **guías generales sobre MASS**.
- Inyectar directamente combustibles que tengan metales volátiles o altas concentraciones de compuestos orgánicos volátiles en el quemador principal, en lugar de hacerlo en los quemadores secundarios.
- Evitar combustibles con alto contenido de halógenos durante la cocción secundaria y durante las etapas de puesta en funcionamiento y parada.
- Asegurarse de que los gases de salida del horno se enfríen rápidamente y lleguen a una temperatura inferior a 200 °C en hornos largos de proceso húmedo y de proceso seco sin precalentamiento⁵⁹.

41. En la fabricación de cal, rara vez se utilizan combustibles de desechos y materias primas residuales debido a los requisitos de calidad del producto⁶⁰.

⁵⁸ La GCCA brinda orientación adicional sobre la gestión de combustibles de desechos y materiales en GCCA, *Guidelines for Co-Processing Fuels and Raw Materials in Cement Manufacturing* (Guías para el procesamiento simultáneo de combustibles y materias primas en la fabricación de cemento) (Londres, GCCA, 2019b), https://gccassociation.org/wp-content/uploads/2019/10/GCCA_Guidelines_FuelsRawMaterials_v04_AMEND.pdf.

⁵⁹ El fuego y los gases de alta temperatura destruyen las dibenzodioxinas policloradas y los dibenzofuranos policlorados, pero a una temperatura más baja (entre 250 °C y 500 °C) esas sustancias pueden resintetizarse. En los hornos PHP y PH puede conseguirse un menor tiempo de enfriamiento a una temperatura inferior a 200 °C, ya que en ellos el flujo en los ciclones es rápido, pero es más difícil lograr esto en otros tipos de hornos. El uso de carbón activado para adsorber metales traza volátiles (por ejemplo, mercurio), compuestos orgánicos volátiles o dibenzodioxinas policloradas y dibenzofuranos policlorados se encuentra aún en etapa de prueba debido a la diferente composición de gases. Si el equipo se mantiene en buenas condiciones de funcionamiento y se eligen con cuidado los insumos, se puede evitar tener que usar carbón activado. Puede conseguirse información sobre la prevención y el control de las emisiones de dibenzodioxinas policloradas y dibenzofuranos policlorados en WBCSD, *Formation and Release of POPs in the Cement Industry* (Formación y liberación de contaminantes orgánicos persistentes en la industria cementera), 2.ª ed. (Ginebra, WBCSD, 2006), <http://docs.wbcsd.org/2006/01/FormationAndReleaseOfPOPsInCementIndustry.pdf>.

⁶⁰ La fuente de combustible que se utiliza para fabricar cal tiene un impacto significativo en la calidad de la cal producida, principalmente por el contenido de azufre, que queda atrapado en el producto y reduce su valor. Distintos combustibles pueden afectar la calidad del producto si la combustión no se realiza por completo. Por lo tanto, debido a sus propiedades de combustión, el gas natural y el petróleo son los combustibles que más suelen utilizarse en la fabricación de cal. Puede utilizarse carbón (con bajo azufre) o coque de petróleo si el contenido de azufre resultante en el producto no representa un problema.

Ruido y vibraciones

42. Varias de las etapas de fabricación de cemento y cal generan altos niveles de ruido; por ejemplo, en la extracción de materias primas (como se analiza en las **guías sobre MASS para la extracción de materiales de construcción**); la trituración y el almacenamiento; la manipulación y el transporte de materias primas o de productos intermedios o finales, y el funcionamiento de extractores de aire. Para controlar las emisiones de ruido pueden utilizarse, por ejemplo, silenciadores para los extractores, cerramientos para los operadores de molinos, barreras acústicas, deflectores de sonido, aislamiento, etc. En las **guías generales sobre MASS** se indican los niveles para las medidas de reducción de sonido recomendadas y los niveles de ruido ambiental y en el lugar de trabajo.

Aguas residuales

Tratamiento de aguas residuales del proceso industrial

43. Los sistemas de enfriamiento generan aguas residuales en distintas etapas del proceso (por ejemplo, en cojinetes y anillos del horno). Entre las técnicas para tratar el agua residual del proceso industrial se incluyen la ecualización de flujos y cargas con ajuste del pH, la sedimentación para reducir los sólidos suspendidos utilizando recipientes de sedimentación o clarificadores, y distintos tipos de filtración para reducir los sólidos suspendidos que no se asientan. En las **guías generales sobre MASS** se analiza el manejo de aguas residuales industriales y se proporcionan algunos ejemplos de enfoques de tratamiento.

Consumo de agua y otros flujos de aguas residuales

44. En las **guías generales sobre MASS** 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. Los flujos contaminados deberán desviarse hacia el sistema de tratamiento de aguas residuales de procesos industriales.

45. Las aguas pluviales que circulan por las pilas de acopio de coque de petróleo, carbón y materiales de desechos pueden contaminarse. Debe evitarse que esas aguas entren en contacto con las pilas de acopio; para ello, se deberá cubrir o encerrar las pilas y controlar los escurrimientos. La aplicación de las técnicas de prevención de la contaminación recomendadas para las emisiones de polvo en las pilas de acopio de materias primas, clínker, carbón y residuos también puede ayudar a reducir al mínimo la contaminación de las aguas pluviales. Si esas aguas entran en contacto con las pilas de acopio, se debe proteger al suelo y a las aguas subterráneas contra una posible contaminación, para lo cual se podrá pavimentar o de otra forma revestir la base de las pilas, instalar controles de escurrimiento en torno a ellas y recolectar el agua de lluvia en un estanque revestido de modo que el material particulado se asiente antes de la separación, el control, y el reciclaje o el descarte. En las **guías generales sobre MASS** se proporcionan más recomendaciones sobre el manejo de las aguas pluviales contaminadas.

46. Si bien la fabricación de cemento no tiene un gran consumo de agua, puede contribuir al estrés hídrico en determinadas zonas estacionalmente áridas. En las **guías generales sobre MASS** se incluyen también recomendaciones para reducir el consumo de agua, especialmente en los sitios donde escasea. Además de las medidas de mantenimiento y limpieza, las empresas cementeras han logrado conservar agua al adoptar sistemas de enfriamiento en seco y no por evaporación, por ejemplo, en los condensadores en ciclos para la generación de energía.

Residuos sólidos

47. Entre las fuentes de residuos sólidos en la fabricación de cemento y cal se incluyen los residuos de la producción de clínker (conformados principalmente por rocas de desecho, que se separan en la cantera o se eliminan de las materias primas durante la preparación del crudo), así como los residuos de clínker que no cumplan con las especificaciones. Otro residuo potencial, que puede clasificarse como residuo peligroso, es el polvo del horno extraído del flujo de derivación y de la chimenea de emisión, si no se recicla en el proceso o en el producto final. El mantenimiento de la planta también genera algunos residuos; por ejemplo, aceite usado y desechos metálicos, y los materiales refractarios del horno pueden contener metales pesados. En la acumulación de polvo del horno puede haber otros materiales residuales, como álcali, cloruro o fluoruro⁶¹.

48. En la producción de cal, el polvo, la cal viva que no cumple con las especificaciones y la cal hidratada suelen reutilizarse o reciclarse para la fabricación de productos comerciales seleccionados; por ejemplo, para producir cal para uso en construcción, cal para estabilización del suelo, cal hidratada y productos peletizados.

⁶¹ Los filtros de prensa en las instalaciones más antiguas que todavía utilizan procesos semihúmedos, que hace tiempo se dejaron de usar, también pueden generar material filtrado alcalino.

49. En las **guías generales sobre MASS** se incluye información sobre el manejo de residuos peligrosos y no peligrosos.

1.2 Salud y seguridad ocupacional

50. Los impactos más significativos en materia de salud y seguridad ocupacional se producen durante la etapa operativa de los proyectos de fabricación de cemento y cal, e incluyen, principalmente, lo siguiente⁶²:

- Polvos peligrosos.
- Explosiones e incendios.
- Energías peligrosas.
- Peligros eléctricos.
- Espacios cerrados.
- Levantamientos complejos y críticos.
- Corte, soldadura por fusión y soldadura fuerte (trabajos en caliente).
- Calor.
- Ruido y vibraciones.
- Riesgos físicos.
- Radiación.
- Riesgos químicos y otras cuestiones de higiene industrial.

Polvos peligrosos

51. La exposición a material particulado fino se relaciona con el trabajo en la mayoría de las etapas de la fabricación de cemento y cal que generan polvo, pero, sobre todo, durante la explotación de la cantera (véase **guías sobre MASS para la extracción de materiales de construcción**), la manipulación de materias primas y la molienda de clínker o cemento. En especial, la exposición a la proporción respirable del polvo de sílice activa (cristalina) (SiO_2) y al asbesto, cuando este está presente en las materias primas y productos (por ejemplo, polvo de cemento), es un peligro potencial importante en el sector de la fabricación de cemento y cal, y deben seguirse normas de salud y seguridad específicas para controlar estos peligros⁶³. Entre los métodos para prevenir y controlar la exposición al polvo se incluyen los siguientes:

⁶² Puede obtenerse información más detallada sobre los impactos en materia de salud y seguridad ocupacional en las normas pertinentes de las buenas prácticas internacionales de la industria, como las que dicta la Administración de Salud y Seguridad Ocupacional de los Estados Unidos (OSHA Estados Unidos), *1910—General Industry* (1910: Industria general); las reglamentaciones y los códigos de práctica del Comité Ejecutivo de Salud y Seguridad del Reino Unido (HSE Reino Unido), y las pautas y los códigos de práctica de Australia y Nueva Zelanda.

⁶³ Varias fuentes ofrecen información sobre la prevención y el control del riesgo de inhalación de sílice, por ejemplo, Salud y Seguridad de Ontario, *Silica in the Workplace* (La sílice en el lugar de trabajo) (2011); OSHA, *OSHA's*

- Controlar el polvo con una buena limpieza y un buen mantenimiento, lo que incluye el uso de sistemas de limpieza con aspiradoras móviles para evitar la acumulación de polvo en las áreas pavimentadas.
- Usar cabinas cerradas y con aire acondicionado.
- Usar transportadoras/elevadores cerrados con controles de emisión en los puntos de transferencia para detectar emisiones de polvos fugitivos.
- Utilizar sistemas de extracción y reciclaje de polvo para eliminar el polvo de las áreas de trabajo, en especial en los molinos de trituración.
- Utilizar ventilación de aire (succión) en las áreas de ensacado de cemento.
- Medir la exposición de los trabajadores a polvos peligrosos.
- Usar equipos de protección personal (por ejemplo, mascarillas y respiradores) para abordar la exposición residual después de aplicar los procesos antes señalados y los controles de ingeniería⁶⁴.
- Implementar un programa de protección respiratoria. Un programa de protección respiratoria por escrito debe especificar los procedimientos operativos estándares establecidos para proteger a todos los trabajadores contra peligros respiratorios. Debe incluir un administrador para el programa diseñado, la selección del respirador, una evaluación médica, un procedimiento de prueba de ajuste, procedimientos para un uso correcto, el mantenimiento y procedimientos de

Respirable Crystalline Silica Standard for General Industry and Maritime (Norma de la OSHA sobre la sílice cristalina respirable para la industria general y la industria marítima) (2018); Conferencia Estadounidense de Higienistas Industriales Gubernamentales (ACGIH), *2021 Threshold Limit Values (TLVs) and Biological Exposure Indices (BEIs)* (Concentraciones máximas admisibles e índices biológicos de exposición 2021); OSHA Estados Unidos, *Occupational Safety and Health Standards, 1910.1053 Subpart Z, Toxic and Hazardous Substances, Respirable Crystalline Silica* (Normas de salud y seguridad ocupacional: 1910.1053, apartado Z: Sustancias tóxicas y peligrosas, sílice cristalina respirable, <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.1053> y 1910.1001 Subpart Z, Asbestos (1910.1001, apartado Z: Asbesto, <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.1001>); ASTM International, *ASTM E1132 13e1: Standard Practice for Health Requirements Relating to Occupational Exposure to Respirable Crystalline Silica* (ASTM E1132 13e1: Práctica estándar para requisitos de salud relacionados con la exposición ocupacional a sílice cristalina respirable) (West Conshohocken, PA, 2013), <https://www.astm.org/Standards/E1132.htm>; HSE Reino Unido, *Control of Substances Hazardous to Health, Regulations 2002: Approved Code of Practice and Guidance* (Control de sustancias peligrosas para la salud. Regulaciones 2002: Código de Práctica y Orientación Aprobado), L5, 6.ª ed. (2013), <https://www.hse.gov.uk/pubns/priced/l5.pdf>; y Cecala, Andrew B. y otros, *Dust Control Handbook for Industrial Minerals Mining and Processing* (Manual sobre control de polvos para la extracción y el procesamiento de minerales industriales), Informe n.º RI9701, 2.ª ed. (Cincinnati, Publicaciones del Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional [NIOSH], 2019), <https://www.cdc.gov/niosh/mining/UserFiles/works/pdfs/2019-124.pdf>.

⁶⁴ Para obtener más información, véanse HSE Reino Unido, *Respiratory Protective Equipment at Work, A Practical Guide* (Equipo de protección respiratoria en el trabajo: Guía práctica), HSG53, 4.ª ed. (2013), <https://www.hse.gov.uk/pubns/priced/hsg53.pdf>; ASTM International, *ASTM F3387-19: Standard Practice for Respiratory Protection* (ASTM F3387-19: Práctica estándar para la protección respiratoria) (West Conshohocken, PA, 2019), doi: [10.1520/F3387-19](https://doi.org/10.1520/F3387-19), <https://www.astm.org/Standards/F3387.htm>; y Nancy J. Bollinger y Robert H. Schultz, *NIOSH Guide to Industrial Respiratory Protection* (Guía del NIOSH sobre protección respiratoria industrial), publicación del Departamento de Servicios de Salud Humana [DHHS] número 87-116 (1987), <https://www.cdc.gov/niosh/docs/87-116/pdfs/87-116.pdf?id=10.26616/NIOSH PUB87116>.

calidad del aire (respiradores de suministro de aire), una evaluación del programa y del lugar de trabajo, y capacitación⁶⁵.

Explosiones e incendios

52. Muchos procesos diferentes y los combustibles utilizados en la industria cementera pueden causar incendios y explosiones. En promedio, un horno consume de 0,2 a 0,3 toneladas de carbón por kilogramo de producción cementera de clínker, por lo que el almacenamiento, la manipulación y el transporte de carbón presentan algunos de los peligros de incendio más comunes en la industria del cemento. Otros peligros de incendio importantes son los componentes eléctricos de plantas de generación de energía internas específicas, como transformadores y aparatos de comando, y el almacenamiento de sacos vacíos.

53. Los peligros de explosión más comunes en las plantas de cemento se relacionan con el polvo de carbón (explosión de polvo). Como el carbón se pulveriza en partes más pequeñas antes de su uso en un horno, esto aumenta drásticamente el riesgo de incendio/explosión. Los filtros de tela en el molino de carbón pueden explotar espontáneamente o como resultado de la electricidad estática. Además, la acumulación de mezclas de explosivos, como polvo de carbón esparcido en partículas finas en la atmósfera o el monóxido de carbono en la atmósfera, puede generar el peligro de una explosión en los precipitadores electrostáticos.

54. Las prácticas recomendadas pueden consultarse en las **guías generales sobre MASS** y en las normas pertinentes de las buenas prácticas internacionales de la industria⁶⁶.

⁶⁵ Para obtener más información, véanse OSHA Estados Unidos, *Occupational and Safety Health Standards, 1910.134(c) Subpart I, Respiratory Protection Program* (Normas de salud y seguridad ocupacional, 1910.134(c), apartado I: Programa de protección respiratoria), <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.134>, o ASTM, *Standard Practice for Respiratory Protection* (Práctica estándar de protección respiratoria), <https://www.astm.org/Standards/F3387.htm>.

⁶⁶ Véanse OSHA Estados Unidos, *1910 Subpart H, Hazardous Materials* (1910, apartado H: Materiales peligrosos), <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910SubpartH>; *Subpart L, Fire Protection* (Apartado L: Protección contra incendios), <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910SubpartL>; *Subpart S, Electrical* (Apartado S: Electricidad), <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910SubpartS>; National Fire Protection Association (NFPA), *NFPA 68-2002: "Guide for Venting of Deflagrations, 2002 edition"* (Guía para el venteo de deflagraciones, edición 2002), en vol. 13, *2004/2005 National Fire Codes*, <https://webstore.ansi.org/standards/nfpa-fire/nfpa682002>; *NFPA 69: Standard on Explosion Prevention Systems* (NFPA 69: Norma sobre sistemas de prevención de explosiones) <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=69>; *NFPA 70: National Electric Code* (NFPA 70: Código Eléctrico Nacional) (2020) <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=70>; *NFPA 77: Recommended Practice on Static Electricity* (NFPA 77: Práctica recomendada de electricidad estática) (2019), <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=77>; *NFPA 85: Boiler and Combustion Systems Hazards Code* (NFPA 85: Código sobre Peligros en Sistemas de Combustión y Calentadores) (2019), <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=85>; *NFPA 86: Standard for Ovens and Furnaces* (NFPA 86: Norma para hornos y calderas) (2019), <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=86>; *NFPA 499: Recommended Practice for the Classification of Combustible Dusts and of Hazardous (Classified) Locations for Electrical Installations in Chemical Process Areas* (NFPA 499: Práctica recomendada para la clasificación de polvos combustibles y de áreas peligrosas [clasificadas] para instalaciones eléctricas en áreas de procesos químicos) (2021), <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=499>.

Fuentes de energía peligrosa

55. Las fuentes de energía —incluidas las fuentes eléctricas, mecánicas, hidráulicas, neumáticas, químicas, térmicas u otras— en máquinas y equipos pueden ser peligrosas para los trabajadores. El arranque o la liberación de energía almacenada inesperados de una máquina o equipo mientras se lo está reparando o cuando se están realizando tareas de mantenimiento pueden causar lesiones graves o incluso la muerte de trabajadores. Las prácticas recomendadas pueden consultarse en las **guías generales sobre MASS** y en las normas pertinentes de las buenas prácticas internacionales de la industria en materia de salud y seguridad ocupacional⁶⁷.

Peligros eléctricos

56. La fabricación de cemento tiene un consumo intensivo de energía, y las plantas de cemento tienen equipos eléctricos de gran potencia instalados para el control, la distribución y el uso de energía eléctrica. Muy a menudo, las plantas cementeras están equipadas con unidades de generación de energía para fines específicos. La operación y el mantenimiento de los circuitos eléctricos y de las máquinas, herramientas y equipos eléctricos son una fuente común de peligros eléctricos, como electrocuciones, arcos eléctricos, quemaduras, incendios y explosiones. Las prácticas recomendadas pueden consultarse en las **guías generales sobre MASS** y en las normas pertinentes de las buenas prácticas internacionales de la industria en materia de salud y seguridad ocupacional⁶⁸.

Espacios cerrados

57. Cuando se opera una planta de cemento, los trabajadores deben ingresar periódicamente a espacios cerrados, como calderas, cámaras de filtros, tolvas, trituradoras, rampas, silos y molinos de trituración, como parte de su trabajo. Todavía se producen muertes y lesiones graves en espacios cerrados, a menudo debido a la falta de identificación y control adecuados de los peligros o de capacitación apropiada sobre

[standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=499](https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=499); NFPA 654: *Standard for the Prevention of Fire and Dust Explosions from the Manufacturing, Processing, and Handling of Combustible Particulate Solids* (Norma para la prevención de incendios y explosiones de polvo en la fabricación, el procesamiento y la manipulación de material particulado sólido combustible) (2020), <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=654>; y Sociedad Estadounidense de Ingenieros Mecánicos (ASME), *Boiler and Pressure Vessel Code* (Código sobre Calderas y Recipientes a Presión) (2021), <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/bpvc-complete-code-boiler-pressure-vessel-code-complete-set>.

⁶⁷ Algunos ejemplos incluyen OSHA Estados Unidos, *1910 Subpart J, General Environmental Controls*, 1910.147: *The Control of Hazardous Energy (Lockout/Tagout)* (1910, apartado J: Controles ambientales generales; 1910.147: Control de la energía peligrosa (bloqueo/etiquetado), <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.147>; OSHA Estados Unidos, *1910 Subpart S, Electrical*, 1910.333 *Selection and Use of Work Practices* (1910, apartado S: Electricidad; 1910.333: Selección y uso de prácticas de trabajo), <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.333>; Sociedad Estadounidense de Profesionales de la Salud (ASSP), *ANSI/ASSP Z244.1-2016 (R2020) The Control of Hazardous Energy: Lockout, Tagout and Alternative Methods* (ANSI/ASSP Z244.1-2016 (R2020) Control de la energía peligrosa: Bloqueo, etiquetado y métodos alternativos), <https://webstore.ansi.org/standards/asse/ansiasspz2442016r2020>; y HSE Reino Unido, *HSG253, The Safe Isolation of Plant and Equipment* (HSG253: Aislamiento seguro de la planta y los equipos) (2006), <https://www.hse.gov.uk/pubns/books/hsg253.htm>.

⁶⁸ Véanse OSHA Estados Unidos, *1910 Subpart S, Electrical*; ANSI/NEC y HSE, *HSG85 Electricity at Work: Safe Working Practices* (HSG85. Electricidad en el trabajo: Prácticas de trabajo seguro) (2013), <https://www.hse.gov.uk/pubns/books/hsg85.htm>.

ellos. Las prácticas recomendadas pueden consultarse en las **guías generales sobre MASS** y en las normas pertinentes de las buenas prácticas internacionales de la industria en materia de salud y seguridad ocupacional⁶⁹.

Levantamientos complejos y críticos

58. Las plantas de cemento tienen equipos grandes y pesados que suelen necesitar que se los reemplace o se los retire para su mantenimiento. Con ese propósito, es posible que deban realizarse operaciones para levantarlos que impliquen situaciones complejas y críticas, como levantar personal o materiales peligrosos, accesos o caminos de extracción obstruidos, operaciones de izado que superan el 75 % de la capacidad nominal del equipo, un margen de seguridad de los brazos de grúas inferior a 3 pies, peligros de proximidad (como tener que pasar a menos de 20 pies de una línea con electricidad) e izado en tándem o con varias grúas. Las prácticas recomendadas pueden consultarse en las **guías generales sobre MASS** y en las normas pertinentes de las buenas prácticas internacionales de la industria en materia de salud y seguridad ocupacional⁷⁰.

Corte, soldadura por fusión y soldadura fuerte (trabajos en caliente)

59. Las plantas cementeras dependen en gran medida de estructuras y equipos metálicos que se desgastan con el paso del tiempo y que necesitan mantenimiento constante. Para el departamento de mantenimiento de una planta cementera, los cortes y las soldaduras son actividades cotidianas que suelen estar relacionadas con otros peligros, como el trabajo en altura o el ingreso en espacios cerrados. Las prácticas recomendadas pueden consultarse en las **guías generales sobre MASS** y en las normas pertinentes de las buenas prácticas internacionales de la industria⁷¹.

⁶⁹ OSHA Estados Unidos, *1910 Subpart J, General Environmental Controls* 1910.146, *Permit-Required Confined Spaces* (1910, apartado J: Controles ambientales generales; 1910.146: Espacios cerrados para los que se necesita un permiso, <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.146>; ASTM D4276-02: *Standard Practice for Confined Area Entry* (ASTM D4276-02: Práctica estándar para el ingreso a áreas cerradas) (2020), <https://www.astm.org/Standards/D4276.htm>; y Standards Australia, AS 2865-2009, *Confined Spaces* (AS 2865-2009: Espacios cerrados), <https://www.standards.org.au/standards-catalogue/sa-snz/publicsafety/sf-037/as--2865-2009>.

⁷⁰ ASME, *ASME B30.19-2016, Safety Standard for Cableways, Cranes, Derricks, Hoists, Hooks, Jacks, and Slings* (ASME B30.19-2016: Norma de seguridad para cables transportadores, grúas, cabrias, elevadores, ganchos, gatos y eslingas), https://webstore.ansi.org/Standards/ASME/ASMEB30192016?source=blog&_ga=2.74808987.801118766.1632709424.2025001869.1632150268; OSHA Estados Unidos, *1910 Subpart N, Materials Handling and Storage* (1910, apartado N: Manipulación y almacenamiento de materiales), <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910SubpartN>; y OSHA Estados Unidos, *Safety and Health Regulations for Construction, 1926 Subpart CC, Cranes and Derricks in Construction* (Regulaciones sobre salud y seguridad para la construcción, 1926, apartado CC: Grúas y cabrias en la construcción), <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1926/1926SubpartCC>.

⁷¹ OSHA Estados Unidos, *1910 Subpart Q, Welding, Cutting and Brazing* (1910, apartado Q: Corte, soldadura por fusión y soldadura fuerte), <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910SubpartQ>; HSE Reino Unido, *Health and Safety Welding Resources* (Recursos para soldar de manera saludable y segura), <https://www.hse.gov.uk/welding/publications.htm>; Safe Work Australia, *Model Code of Practice: Welding Processes* (Código Modelo de Práctica: Procesos de soldadura), <https://www.safeworkaustralia.gov.au/doc/model-code-practice-welding-processes>; y NIOSH, publicación n.º DHHS-NIOSH-88-110, *Criteria for a Recommended Standard: Welding, Brazing, and Thermal Cutting* (Criterios para una norma recomendada: Soldadura por fusión, soldadura fuerte y corte térmico) (1988), <https://www.cdc.gov/niosh/docs/88-110/default.html>.

Calor

60. En una planta cementera, los peligros relacionados con el calor pueden presentarse de dos maneras: por contacto directo con superficies y materiales calientes, o por estrés térmico y fatiga térmica causados por trabajar durante mucho tiempo a altas temperaturas.

61. Mientras se realizan tareas de operación y mantenimiento de hornos, de las torres del precalentador, de los precipitadores electrostáticos o de otros equipos calientes pueden producirse lesiones por calor al entrar en contacto directo con el cemento caliente, el clínker caliente, el polvo derivado de los precipitadores u otros materiales, y por reacciones exotérmicas en el proceso de hidratación de la cal. De igual forma, el estrés térmico y la fatiga térmica pueden ser el resultado del trabajo prolongado al aire libre a altas temperaturas o de trabajos en el interior del establecimiento en áreas de alta temperatura; en especial, pueden sufrírselos los trabajadores de los hornos. Las prácticas recomendadas pueden consultarse en las **guías generales sobre MASS** y en las normas pertinentes de las buenas prácticas internacionales de la industria⁷².

Ruido y vibraciones

62. Los trabajadores pueden estar expuestos a ruidos en muchas de las etapas de la fabricación de cemento y cal, por ejemplo, en la extracción de materias primas (como se analiza en las **guías sobre MASS para la extracción de materiales de construcción**); la trituración y el almacenamiento; la manipulación y el transporte de materias primas o de productos intermedios o finales, y el funcionamiento de extractores de aire. En las **guías generales sobre MASS** se indican los niveles para las medidas de reducción de sonido recomendadas, así como los niveles de ruido ambiental y en el lugar de trabajo.

63. Las principales fuentes de ruido y vibraciones en las plantas de cemento y cal son las operaciones de triturado/molienda, y el funcionamiento de molinos, rampas, tolvas, equipos móviles, extractores de aire y sopladores. El control de las emisiones de ruido puede incluir el uso de silenciadores para extractores, cerramientos para los operadores de molinos, barreras acústicas, deflectores de sonido y aislamiento, y, si el ruido no puede reducirse a niveles aceptables, protección acústica personal, como se describe en las **guías generales sobre MASS**.

Riesgos físicos

64. Las lesiones que se producen durante las operaciones de fabricación de cemento y cal suelen estar relacionadas con resbalones, tropezones y caídas; con el contacto con objetos que caen o se desplazan, y con levantar objetos y hacer esfuerzos excesivos. Asimismo, pueden producirse otras lesiones en accidentes vehiculares, producto de entrar en contacto con máquinas que se mueven o con quedar atrapados en ellas, por ejemplo, camiones volquetes, vehículos con pala frontal, montacargas y máquinas ensacadoras. Las actividades relacionadas con el mantenimiento de equipos —entre ellos, trituradoras,

⁷² Véanse la sección sobre estrés térmico y fatiga térmica de ACGIH, *2016 TLVs and BEIs: Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices* (TLV y BEI 2016: Concentraciones máximas admisibles para sustancias químicas y agentes físicos e índices biológicos de exposición) (Cincinnati, ACGIH, 2016); NIOSH, *Criteria for a Recommended Standard: Occupational Exposure to Heat and Hot Environments* (Criterios para una norma recomendada: Exposición ocupacional al calor y a ambientes muy cálidos), <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2016-106/default.html>; y la página web sobre estrés térmico del NIOSH, <https://www.cdc.gov/niosh/topics/heatstress/default.html>.

molinos, separadores de molino, extractores, enfriadores y cintas transportadoras— son fuentes significativas de exposición a riesgos físicos. En las **guías generales sobre MASS** se describen diversas formas de controlar estos peligros⁷³.

Radiación

65. A veces se utilizan estaciones de rayos X para hacer un seguimiento constante de la mezcla de materias primas en la cinta transportadora que la lleva al molino de crudo. Deben tomarse medidas para proteger a los operadores de esas estaciones contra la radiación ionizante, como se describe en las **guías generales sobre MASS**.

Riesgos químicos y otras cuestiones de higiene industrial

66. El cromo puede provocar dermatitis alérgica de contacto a los trabajadores que manipulan el cemento⁷⁴. Para prevenir y controlar este posible peligro, se puede, por ejemplo, reducir la proporción de cromo soluble en las mezclas de cemento y utilizar equipos de protección personal adecuados para evitar el contacto con la piel, como se describe en las **guías generales sobre MASS**.

67. El óxido de calcio (CaO), o “cal viva”, reacciona con agua para producir hidróxido de calcio (Ca(OH)₂), es decir, “cal hidratada”, una solución cáustica sumamente corrosiva. El contacto accidental durante suficiente tiempo de la piel húmeda, los ojos o las membranas mucosas con cal viva o polvos de cal hidratada provocará quemaduras cáusticas en los tejidos. Esta también es una reacción exotérmica muy explosiva que genera vapor cargado de cal y salpicaduras de agua caliente, que son sumamente peligrosos debido a su alta temperatura y a sus propiedades cáusticas. Las áreas en las que estos compuestos se manipulan en forma de polvo o en donde se apaga la cal deben cubrirse y cerrarse, si es posible, para evitar generar peligro de polvo. Deben ofrecerse instalaciones para poder lavarse de inmediato la zona del cuerpo afectada, incluidas instalaciones para lavarse los ojos en los lugares donde se manipule cal viva. Para el proceso de hidratación de la cal deben proporcionarse equipos de protección personal, como gafas de seguridad, guantes, ropa de protección y cubrebotas, y deben adoptarse procedimientos de seguridad adecuados. En las **guías generales sobre MASS** se proporciona más información sobre la gestión de riesgos químicos.

1.3 Salud y seguridad de la comunidad

68. Los impactos en la salud y la seguridad de la comunidad durante la construcción, el funcionamiento y el desmantelamiento de establecimientos de fabricación de cemento y cal son los mismos que los de la mayoría de las instalaciones industriales, y se analizan en las **guías generales sobre MASS**.

69. Entre los impactos y riesgos para la salud y la seguridad de la comunidad, es importante destacar i) el tránsito y la mayor cantidad de vehículos estacionados cerca de la planta a la espera de recibir la

⁷³ Puede encontrarse más información sobre este tema en WBCSD, *Health and Safety in the Cement Industry: Examples of Good Practice* (Salud y seguridad en la industria del cemento; Ejemplos de buenas prácticas) (Ginebra, WBCSD, 2004), http://ficem.org/CIC-descargas/Suiza/CSI/Health-and-Safety-in-the-Cement-Industry_Examples-of-Good-Practice-2004.pdf.

⁷⁴ Para evitar la dermatitis alérgica de contacto, la UE limita el contenido de cromo soluble en el cemento a un máximo de 0,0002 % del peso seco total del cemento.

carga, ii) la sobrecarga de camiones, y iii) la afluencia de trabajadores, en especial durante la construcción del proyecto. En el primer caso, si no se las controla, las áreas de espera pueden convertirse en asentamientos informales que pueden aumentar la exposición de la comunidad local a riesgos de salud y seguridad. Estas áreas de espera deben confinarse, se las debe supervisar y no deben encontrarse sobre la carretera; además, deben proporcionarse instalaciones específicas con vestuarios y baños para los conductores y otros operadores. Con respecto a la sobrecarga de camiones, debe exigirse que en la planta se cumplan las directivas específicas e instrucciones de la administración con respecto a los procedimientos y límites de carga, para evitar mayores riesgos de accidentes de tránsito. En cuanto a la afluencia de trabajadores, deben implementarse planes de gestión de la fuerza de trabajo específicos para proteger la salud y la seguridad de las comunidades locales.

2. INDICADORES DE DESEMPEÑO Y SEGUIMIENTO

2.1 Medio ambiente

Guías sobre emisiones y efluentes

70. En los cuadros 1, 2 y 3 se presentan orientaciones sobre emisiones y efluentes para este sector. Los valores de referencia para las emisiones y efluentes de procesos en este sector son indicativos de las buenas prácticas internacionales de la industria, reflejadas en las normas correspondientes de los países que cuentan con marcos normativos reconocidos. Dichos valores pueden alcanzarse en condiciones normales de funcionamiento en instalaciones adecuadamente diseñadas y operadas, mediante la aplicación de las técnicas de prevención y control de la contaminación que se han analizado en las secciones anteriores de este documento. Estos niveles deberían alcanzarse, sin reducción, al menos un 95 % del tiempo de funcionamiento de la planta o unidad, para que se los compute como una proporción de sus horas de operación por año. La desviación de estos niveles en condiciones locales específicas del proyecto debe justificarse en la evaluación ambiental.

71. Las orientaciones sobre efluentes se aplican a aquellos efluentes tratados que se vierten de manera directa en aguas superficiales para uso general. Podrán establecerse niveles de vertido específicos para el emplazamiento basándose en la disponibilidad y las condiciones en el uso de los sistemas de tratamiento y recolección de aguas de alcantarillado público o, si se vierten directamente a las aguas superficiales, teniendo en cuenta la clasificación del uso de la masa de agua receptora, como se describe en las **guías generales sobre MASS**. Las orientaciones sobre emisiones se aplican a las emisiones de los procesos. En las **guías generales sobre MASS** se abordan pautas sobre las emisiones de fuentes de combustión relacionadas con actividades de generación de vapor y energía en instalaciones con una capacidad igual o inferior a 50 MWth. En las **guías sobre MASS para las plantas de energía térmica** se abordan las emisiones procedentes de fuentes de energía con una capacidad superior. En las **guías generales sobre MASS** se ofrecen también recomendaciones ambientales basadas en la carga total de emisiones.

Eficiencia en el uso de recursos y residuos

72. En el cuadro 4 se proporcionan ejemplos del uso de los recursos y de la generación de residuos en este sector, que pueden considerarse indicadores de las buenas prácticas internacionales de la industria

para nuevas maquinarias en el sector y que pueden utilizarse para hacer un seguimiento de los cambios en el desempeño a través del tiempo⁷⁵.

CUADRO 1. NIVELES DE EMISIONES A LA ATMÓSFERA PARA LA FABRICACIÓN DE CEMENTO		
CONTAMINANTES	UNIDADES	VALOR DE REFERENCIA
Material particulado (nuevo sistema de horno con limpieza de gas de combustión seco mediante precipitador electrostático o filtro de tela o híbridos)	mg/Nm ³	25 ^a
Material particulado (hornos existentes)	mg/Nm ³	100
Polvo (otras fuentes puntuales, como enfriador de clínker, molienda de cemento)	mg/Nm ³	25
SO₂	mg/Nm ³	400 ^b
NO_x	mg/Nm ³	600 NDA ^c Véase la nota al pie para DA ^c
Reducción de NH₃ en los gases de combustión (cuando se aplica una reducción no catalítica selectiva)	mg/Nm ³	<30-50 ^d
Cloruro de hidrógeno	mg/Nm ³	10 ^e
Fluoruro de hidrógeno	mg/Nm ³	1 ^e
Carbón orgánico total	mg/Nm ³	30 ^f
Dioxinas y furanos	ng TEQ/Nm ³	0,1 ^e
Cadmio y talio	mg/Nm ³	0,05 ^e
Mercurio	mg/Nm ³	0,05 ^e
Metales totales^g	mg/Nm ³	0,5
Notas: Emisiones procedentes de la chimenea del horno, a menos que se indique lo contrario. Valores promedios diarios corregidos a 273 K, 101,3 kilopascales (kPa), 10 % de O ₂ y gas seco, a menos que se indique otra cosa. ng TEQ/Nm ³ = nanogramos de equivalente tóxico de dioxina por metro cúbico normal. Véanse Van den Berg y otros, "The 2005 World Health Organization Re-evaluation of Human and Mammalian Toxic Equivalency Factors for Dioxins and Dioxin-like Compounds" (Reevaluación de los factores de equivalencia tóxica de dioxinas y compuestos similares a la dioxina para humanos y mamíferos, establecidos por la Organización Mundial de la Salud para 2005), <i>Toxicological Sciences</i> 93, n.º 2 (octubre de 2006), pp. 223-241, doi: 10.1093/toxsci/kfi055 ; y Organización Mundial de la Salud, <i>International Programme on Chemical Safety Guidelines</i> (Pautas para el Programa Internacional de Seguridad de las Sustancias Químicas), http://www.who.int/ipcs/assessment/tef_values.pdf .		

⁷⁵ Fe de erratas en el cuadro 4, efectuada en abril de 2025. Se corrige el valor de referencia de la industria correspondiente a la relación clínker-cemento, que debería ser "por debajo del 70 % al 75 %" y no "30 %". Se incluye una aclaración sobre los aditivos del cemento y se añade una nueva nota al pie ("f") con referencias. La nota al pie "e" se amplía para aclarar la influencia de la proporción de clínker en las emisiones de GEI.

NDA = cuenca atmosférica no degradada; DA = cuenca atmosférica degradada. La cuenca atmosférica debe considerarse degradada si se superan las normas de calidad del aire ambiente pertinentes (según se definen en las **guías generales de MASS**); se determinará la cuenca atmosférica degradada y no degradada para cada contaminante. Es posible que la evaluación ambiental pueda justificar valores de referencia más o menos rigurosos en función de consideraciones ambientales, técnicas, económicas y de salud comunitaria, sin exceder los límites establecidos por ley a nivel nacional. En todos los casos, la evaluación ambiental debe demostrar que los impactos ambientales de las emisiones cumplen con los requisitos de la sección 1.1 de las **guías generales sobre MASS**.

^a Si se aplican precipitadores estáticos o filtros de tela e híbridos, puede lograrse que los niveles de emisión de material particulado de gases de combustión de nuevos procesos de cocción de horno sean de $<10\text{-}20\text{ mg/Nm}^3$ (valor promedio diario). Véase Schorcht y otros, *Best Available Techniques*, sec. 4.2.5.3, p. 348. El valor de referencia es 10 mg/Nm^3 si más del 40 % del calor emitido procede de residuos peligrosos. Véase Comisión Europea (CE), *Directiva 2010/75/UE* relativa a la incineración de residuos.

^b Para consultar el valor de referencia de SO_2 , véase Schorcht y otros, *Best Available Techniques*, cuadro 4.4, p. 351.

^c El valor de referencia de NO_x de 600 mg/Nm^3 resulta de los parámetros del proyecto de IFC y debe aplicarse en cuencas atmosféricas no degradadas. En el caso de proyectos ubicados en cuencas atmosféricas degradadas o en zonas sensibles desde el punto de vista ecológico, es posible que los niveles de NO_x tengan que ser inferiores al valor de referencia para proteger la salud humana y el medio ambiente. La aplicación del valor de referencia de 600 mg/Nm^3 debería justificarse en la evaluación de impacto del proyecto, que deberá incluir un análisis técnico y financiero detallado de las medidas necesarias para alcanzar valores inferiores al valor de referencia. Es posible que sea necesario aplicar controles de la contaminación secundaria, incluida una reducción no catalítica selectiva, para alcanzar el valor de referencia o un valor más bajo. Para realizar una reducción no catalítica selectiva deben evaluarse y mitigarse los riesgos relacionados con el transporte, el almacenamiento y el uso de agentes de reducción (por ejemplo, amoníaco, urea), de conformidad con las pautas sobre manejo de materiales peligrosos incluidas en las **guías generales sobre MASS**.

^d La disminución de amoníaco depende del nivel de NO_x inicial y de la eficiencia en la reducción de NO_x .

^e Para el cloruro de hidrógeno, el fluoruro de hidrógeno, el cadmio y el talio, el mercurio y los metales totales, el valor de referencia es un valor promedio diario o un promedio durante un período de muestreo (mediciones puntuales durante al menos 30 minutos). Véase Schorcht y otros, *Best Available Techniques*, sec. 4.2.6.5, p. 352, para cloruro de hidrógeno y fluoruro de hidrógeno, y sec. 4.2.8, cuadro 4.5, p. 353, para metales. Para las dioxinas y furanos, el valor de referencia es el promedio durante un período de muestreo de 6 a 8 horas. Véase CE, *Reference Document on Best Available Techniques* (Documento de referencia sobre mejores técnicas disponibles), sec. 4.2.7, p. 353, para dioxinas y furanos. Si más del 40 % del calor emitido proviene de residuos peligrosos, el valor de referencia serán los valores promedios durante un período de muestreo de un mínimo de 30 minutos y un máximo de 8 horas. Véase CE, *Directiva 2010/75/UE* sobre la incineración de residuos.

^f Debe realizarse una evaluación detallada de los depósitos para determinar el nivel de carbón orgánico total en el depósito y definir el límite mínimo del compuesto orgánico total final que debe seguirse por debajo del valor de referencia de 30 mg/Nm^3 indicado.

^g Metales totales: arsénico, plomo, cobalto, cromo, cobre, manganeso, níquel, vanadio y antimonio. Véase Schorcht y otros, *Best Available Techniques*, cuadro 4.5, p. 353.

CUADRO 2. NIVELES DE EMISIONES A LA ATMÓSFERA: FABRICACIÓN DE CAL		
CONTAMINANTES	UNIDADES	VALOR DE REFERENCIA ^a
Polvo	mg/Nm ³	25
SO ₂	mg/Nm ³	200 para PFRK, ASK, MFSK, otros hornos de eje y PRK, o 400 para LRK
NO _x	mg/Nm ³	350 para PFRK, ASK, MFSK y otros hornos de eje, o 500 para LRK, PRK
Cloruro de hidrógeno	mg/Nm ³	10
Notas: Para consultar el valor de referencia de SO ₂ , véase Schorcht y otros, <i>Best Available Techniques</i> , cuadro 4.10, p. 365. Para NO _x , véase <i>ibidem</i> , cuadro 4.9, p. 364. ^a Valores promedios diarios corregidos a 273 K, 101,3 kPa, 10 % de O ₂ y gas seco, a menos que se indique otra cosa.		

CUADRO 3. NIVELES DE LOS EFLUENTES: FABRICACIÓN DE CEMENTO Y CAL		
CONTAMINANTES	UNIDADES	VALOR DE REFERENCIA
pH	U. est.	6-9
Sólidos suspendidos totales	mg/L	50
Aceite y grasa	mg/L	10

Incremento de temperatura	°C	<3 ^a
^a En el límite de una zona de mezcla establecida con criterios científicos, que tiene en cuenta la calidad del agua ambiental, el uso de las aguas receptoras, los receptores potenciales y la capacidad de asimilación.		

CUADRO 4. CONSUMO DE RECURSOS Y ENERGÍA		
INSUMOS POR UNIDAD DE PRODUCTO	UNIDAD	VALOR DE REFERENCIA DE LA INDUSTRIA
Energía de combustible: cemento	GJ/t de clínker	Horno PHP: 2,9-3,3 ^a
Energía eléctrica: cemento	kWh/t de cemento	80-105 ^b
Energía eléctrica: molienda de clínker	kWh/t de cemento	28-45 ^c
Energía de combustible: cal	GJ/t de cal	De 4 a 4,7 en hornos de eje de alimentación mixta ^d De 3,6 a 6 en hornos de eje y rotatorios avanzados ^d
Energía eléctrica: cal	kWh/t equivalente de cal	De 5 a 15 en hornos de eje de alimentación mixta ^d De 20 a 40 en hornos de eje y rotatorios avanzados ^d
Emisiones de GEI	Emisiones de CO ₂ (equivalente) en kg/t de cemento	De 550 a 700 (incluidas emisiones de GEI procedentes del consumo de energía) ^e
Relación clínker-cemento	%	Contenido de clínker por debajo del 70 % al 75 % (lo que implica un porcentaje de más del 25 % al 30 % de aditivos tales como yeso y sustitutos del clínker con materiales cementicios alternativos, como escoria de alto horno, cenizas volantes, puzolana, humo de sílice, esquisto calcinado, piedra caliza y otros productos, como la arcilla calcinada) ^f .

^a Parámetros de IFC; Schorcht y otros, *Best Available Techniques*; y Worrell, Kermeli y Galitsky, *Energy Efficiency Improvement* (Mejora en la eficiencia energética).

^b Parámetros de IFC; GCCA, "Getting the Numbers Right 2018", conjunto de datos 33AGW. Se recomienda consultar los datos de GCCA más recientes.

^c IIP, s. f., *Vertical Roller Mills for Finish Grinding*.

^d Schorcht y otros, *Best Available Techniques*.

^e Entre los parámetros de IFC se encuentran las emisiones de GEI procedentes del consumo de energía eléctrica, ya sea generada en el emplazamiento u obtenida de la red. Cabe señalar que estas emisiones pueden variar incluso más allá de este rango dependiendo de la relación clínker-cemento, influenciada por la cartera de productos de cemento, la fuente de combustibles del horno y otros factores.

^f La relación clínker-cemento varía ampliamente dependiendo de la composición del producto de cemento y las normas aplicables a esos productos (por ejemplo, EN 197-6, ASTM C150, C595, IS 269:2015 o normas locales de calidad del cemento). Los valores de referencia son indicativos; algunas aplicaciones para usuarios finales requieren un cemento con mayor proporción de clínker que otras, por lo que los valores deben adaptarse según corresponda. No obstante, la tendencia es promover cementos con menor proporción de clínker, que se utilizan cada vez más en esta industria.

Seguimiento ambiental

73. Deben implementarse programas de seguimiento ambiental para este sector a fin de abordar todas las actividades que, según se ha determinado, pueden tener un impacto significativo en el medio ambiente, tanto durante las operaciones normales como si hay perturbaciones. Las actividades de seguimiento

ambiental deben basarse en indicadores directos o indirectos de las emisiones, los efluentes y el uso de recursos de un proyecto en particular⁷⁶.

74. La frecuencia del seguimiento deberá ajustarse para poder obtener datos representativos sobre los parámetros que se están observando. El seguimiento deberá estar a cargo de personas capacitadas, quienes deberán aplicar procedimientos de seguimiento y registro y utilizar equipos adecuadamente calibrados y en buen estado de mantenimiento. Los datos de seguimiento se analizarán y revisarán con regularidad, y se compararán con las normas de operaciones para adoptar las medidas correctivas necesarias. En las **guías generales sobre MASS** se proporciona orientación adicional sobre los métodos de muestreo y análisis de emisiones y efluentes.

75. Los establecimientos que utilizan combustibles de desechos o materia prima residual en la fabricación de cemento deben documentar las cantidades y tipos de residuos que se utilizan como combustible o materia prima y los estándares de calidad, como el valor calorífico mínimo y los niveles de concentración máximos de determinados agentes contaminantes, como bifenilos policlorados, cloruro, hidrocarburos aromáticos policíclicos, mercurio y otros metales pesados.

2.2 Salud y seguridad ocupacional

Guías sobre salud y seguridad ocupacional

76. Para evaluar el desempeño en materia de salud y seguridad ocupacional, deben utilizarse las guías sobre exposición publicadas en el ámbito internacional. Algunos ejemplos incluyen las concentraciones máximas admisibles para la exposición en el trabajo y los índices biológicos de exposición publicados por la Conferencia Estadounidense de Higienistas Industriales Gubernamentales (ACGIH)⁷⁷; la *NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards* (Guía de bolsillo del NIOSH sobre riesgos químicos), publicada por el Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional de los Estados Unidos (NIOSH)⁷⁸; los límites de exposición tolerables publicados por la Administración de Salud y Seguridad Ocupacional de los Estados Unidos (OSHA)⁷⁹; y los valores límites de exposición profesional indicativos publicados por la Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo (EU-OSHA)⁸⁰.

Tasas de accidentalidad y letalidad

77. En el marco de la gestión de los proyectos, se debe tratar de reducir a cero el número de accidentes entre los trabajadores (ya sea contratados directamente o subcontratados), en especial accidentes que

⁷⁶ Los parámetros y frecuencias de seguimiento ambiental recomendados pueden consultarse en Schorcht y otros, *Best Available Techniques*, sec. 4.2.2, p. 341, y WBCSD (2012).

⁷⁷ La publicación está disponible en <https://portal.acgih.org/s/store#/store/browse/cat/a0s4W00000g02f8QAA/tiles>.

⁷⁸ Véase Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades (CDC), *NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards*, publicación del DHHS número 2005-149 (Cincinnati, Publicaciones del NIOSH, 2007), <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2005-149/pdfs/2005-149.pdf>.

⁷⁹ Véase OSHA, *TABLE Z-1 Limits for Air Contaminants* (CUADRO Z-1. Límites para contaminantes del aire) (s. f.); datos extraídos de <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.1000TABLEZ1>.

⁸⁰ Véase EU-OSHA, *Directiva 2019/1831: por la que se establece una lista de valores límite de exposición profesional indicativos*, 2019 <https://osha.europa.eu/en/legislation/directive/directive-20191831-indicative-occupational-exposure-limit-values>.

podrían provocar la pérdida de tiempo de trabajo, discapacidad o, lo que es peor, la muerte. Para comparar las tasas de letalidad con el desempeño de los establecimientos de este sector en países desarrollados, pueden consultarse publicaciones de fuentes autorizadas, como el Departamento de Estadísticas Laborales de los Estados Unidos, la Administración de Seguridad y Salud de Minas (MSHA), la Oficina de Salud y Seguridad del Reino Unido (HSE Reino Unido), y la Iniciativa de Sostenibilidad del Cemento del Consejo Empresarial Mundial de Desarrollo Sostenible (WBCSD) y la Asociación Mundial del Cemento y el Hormigón (GCCA)⁸¹.

Seguimiento de la salud y seguridad ocupacional

78. Se debe realizar un seguimiento de los riesgos ocupacionales en el ámbito laboral de cada proyecto en particular. Las actividades de seguimiento deben ser diseñadas e implementadas por profesionales acreditados como parte de un programa de seguimiento de la salud y seguridad ocupacional⁸². Además, en los establecimientos deberá llevarse un registro de los accidentes, las enfermedades, los incidentes peligrosos y otros accidentes relacionados con el lugar de trabajo. También deben controlarse en el lugar de trabajo las concentraciones de sílice, asbesto y otros materiales particulados, y la exposición a esas sustancias. Debe hacerse un seguimiento periódico de la incidencia de las enfermedades pulmonares en los trabajadores. En las **guías generales sobre MASS** se proporciona orientación adicional sobre programas de seguimiento de la salud y seguridad ocupacional.

⁸¹ Disponibles en <http://www.bls.gov/iif/>, <http://www.hse.gov.uk/statistics/index.htm> y <https://www.wbcd.org>, o <https://www.wbcd.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative> o <https://gccassociation.org/>, respectivamente.

⁸² Pueden incluirse en esta categoría higienistas industriales acreditados, higienistas ocupacionales matriculados y profesionales de seguridad certificados, o sus equivalentes.

3. REFERENCIAS Y FUENTES ADICIONALES

- ACGIH. 2018. *2018 TLVs and BEIs*. <https://www.acgih.org/science/tlv-bei-guidelines>.
- ACGIH. 2021. *2021 Threshold Limit Values (TLVs) and Biological Exposure Indices (BEIs)*. https://www.techstreet.com/standards/2021-threshold-limit-values-tlvs-and-biological-exposure-indices-beis?product_id=2198547.
- ACGIH. 2016. *2016 TLVs and BEIs: Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices*. Cincinnati: ACGIH.
- ANSI/NEC and HSE. 2013. *HSG85 Electricity at Work: Safe Working Practices*. <https://www.hse.gov.uk/pubns/books/hsg85.htm>.
- ASME. 2021. *Boiler and Pressure Vessel Code*. <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/bpvc-complete-code-boiler-pressure-vessel-code-complete-set>.
- ASME. n.d. *ASME B30: Safety Standard for Cableways, Cranes, Derricks, Hoists, Hooks, Jacks, and Slings*, <https://blog.ansi.org/2019/01/asme-b30-volumes-safety-standard-lifting/#gref>.
- ASSP. 2020. *ANSI/ASSP Z244.1-2016 (R2020) The Control of Hazardous Energy: Lockout, Tagout and Alternative Methods*. <https://webstore.ansi.org/standards/asse/ansiasspz2442016r2020>.
- ASTM International. 2013. *ASTM E1132 13e1: Standard Practice for Health Requirements Relating to Occupational Exposure to Respirable Crystalline Silica*. West Conshohocken, PA. <https://www.astm.org/Standards/E1132.htm>.
- ASTM International. 2019. *ASTM F3387-19: Standard Practice for Respiratory Protection*. West Conshohocken, PA. doi: [10.1520/F3387-19](https://doi.org/10.1520/F3387-19). <https://www.astm.org/Standards/F3387.htm>.
- ASTM International. 2020. *ASTM D4276-02: Standard Practice for Confined Area Entry*. <https://www.astm.org/Standards/D4276.htm>.
- Australian and New Zealand guidelines and codes of practice. 2016. <https://www.commerce.wa.gov.au/worksafe/australian-standards-and-australiannew-zealand-standards>.
- BirdLife International, Fauna & Flora International, FFI, IUCN, and WWF. 2014. *Extraction and Biodiversity in Limestone Areas*. Joint Briefing Paper. <https://www.birdlife.org/sites/default/files/Extraction-and-Biodiversity-in-Limestone-Areas.pdf>.
- Bollinger, Nancy J. and Robert H. Schultz. 1987. *NIOSH Guide to Industrial Respiratory Protection*. DHHS NIOSH Publication Number 87-116. <https://www.cdc.gov/niosh/docs/87-116/pdfs/87-116.pdf?id=10.26616/NIOSH PUB87116>.
- CDC. 2007. *NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards*. DHHS (NIOSH) Publication No. 2005-149. <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2005-149/default.html>.

- Cecala, Andrew B et al. 2019. *Dust Control Handbook for Industrial Minerals Mining and Processing*, Report no. RI9701 (2nd ed.). Cincinnati: NIOSH Publications.
<https://www.cdc.gov/niosh/mining/UserFiles/works/pdfs/2019-124.pdf>.
- CEMBUREAU. 2013. *The Role of Cement in the 2050 Low Carbon Economy*. Brussels: CEMBUREAU.
<https://lowcarboneyconomy.cembureau.eu/wp-content/uploads/2018/09/cembureau-full-report.pdf>.
- CEMBUREAU. 2020. *Cement and Concrete: Key Facts and Figures*. Brussels: EC.
<https://cembureau.eu/cement-101/key-facts-figures>.
- EC. 2009. *Reference Document on Best Available Techniques for Energy Efficiency*. Brussels: EC.
https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/ENE_Adopted_02-2009.pdf.
- EC. 2010. *Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 of November 2010 on Industrial Emissions (Integrated Pollution Prevention and Control)*. Official Journal of the European Union. L 334/17. Brussels: EC.
I think they refer to this <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32010L0075>.
- EU-OSHA. n.d. *Exposure to Chemical Agents and Chemical Safety*.
<https://osha.europa.eu/en/legislation/directives/exposure-to-chemical-agents-and-chemical-safety/osh-related-aspects/council-directive-91-414-eeec>.
- EU-OSHA. *Directive 2019/1831: Indicative Occupational Exposure Limit Values*, 2019,
<https://osha.europa.eu/en/legislation/directive/directive-20191831-indicative-occupational-exposure-limit-values>
- EULA. 2014. *A Competitive and Efficient Lime Industry, Cornerstone for a Sustainable Europe (Lime Roadmap)*. Brussels: EULA. <https://www.eula.eu/a-competitive-and-efficient-lime-industry-cornerstone-for-a-sustainable-europe-lime-roadmap-summary/>.
- GTZ-Holcim Public Private Partnership. 2006. *Guidelines on Pre- and Co-processing of Waste in Cement Production*. https://www.giz.de/de/downloads/giz-2020_en_guidelines-pre-coprocessing.pdf.
- GCCA. n.d. *Global Cement and Concrete Association* <https://gccassociation.org/>
- GCCA. 2019a. *GCCA Sustainability Guidelines for the monitoring and reporting of emissions from cement manufacturing*. Version 0.1. London: GCCA. https://gccassociation.org/wp-content/uploads/2019/10/GCCA_Guidelines_Emissions_v05_AMEND.pdf.
- GCCA. 2019b. *GCCA Sustainability Guidelines for co-processing fuels and raw materials in cement manufacturing*. Version 0.1. London: GCCA. https://gccassociation.org/wp-content/uploads/2019/10/GCCA_Guidelines_FuelsRawMaterials_v04_AMEND.pdf.
- GCCA. 2019c. "Getting the Numbers Right." *Global Cement Database on CO₂ and Energy Information*. London: GCCA. <https://gccassociation.org/gnr/>.

- GCCA. 2020. *GCCA Sustainability Guidelines for Quarry Rehabilitation and Biodiversity Management*. Version 0.1. London: GCCA. https://gccassociation.org/wp-content/uploads/2020/05/GCCA_Guidelines_Sustainability_Biodiversity_Quarry_Rehabilitation_May_2020-1.pdf.
- GCPC. n.d. *Cleaner Production Opportunities in Cement Manufacturing Sector*. <http://www.gcpcenviis.nic.in/Experts/Cement%20sector.pdf>.
- IIP. n.d. *Alternative Raw Materials*. <http://www.iipinetwork.org/wp-content/letd/content/alternative-raw-materials.html>.
- IIP. n.d. *Blended Cement Alternatives*. Industrial Efficiency Technology Database. <http://www.iipinetwork.org/wp-content/letd/content/blended-cement-alternatives.html>.
- IIP. n.d. *Cement*. Industrial Efficiency Technology Database. <http://www.iipinetwork.org/wp-content/letd/content/cement.html>.
- IIP. n.d. *Conversion to High-Efficiency Grate Coolers*. Energy Efficiency Technology Database. <http://www.iipinetwork.org/wp-content/letd/content/conversion-high-efficiency-grate-coolers.html>.
- IIP. n.d. *High Efficiency Motors & Drives*. Industrial Efficiency Technology Database. <http://www.iipinetwork.org/wp-content/letd/content/high-efficiency-motors-drives.html>.
- IIP. n.d. *Industrial Efficiency Technology Database*. <http://www.iipinetwork.org/wp-content/letd/index.html>.
- IIP. n.d. *Vertical Roller Mills for Finish Grinding*. Industrial Efficiency Technology Database. <http://www.iipinetwork.org/wp-content/letd/content/vertical-roller-mills-finish-grinding.html>.
- IEA and WBCSD. 2013. *Technology Roadmap: Low-Carbon Technology for the Indian Cement Industry*. Paris: IEA. https://docs.wbcsd.org/2013/02/Low_Carbon_Technology_for_the_Indian_Cement_Industry_IEA_WBCSD_Feb_2013.pdf.
- IEA. 2018. *Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry*. Technology Report. Paris: IEA. <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry>.
- IEAGHG. 2013. *Deployment of CCS in the Cement Industry*. https://ieaghg.org/docs/General_Docs/Reports/2013-19.pdf.
- IFC. 2017. *Increasing the Use of Alternative Fuels at Cement Plants: International Best Practice*. Washington, DC: IFC. https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/33180042-b8c1-4797-ac82-cd5167689d39/Alternative_Fuels_08+04.pdf?MOD=AJPERES&CVID=IT3Bm3Zbn.
- IFC and IIP. 2014. *Waste Heat Recovery for the Cement Sector: Market and Supplier Analysis*. Washington, DC: IFC and IIP. https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/topics_ext_content/ifc_external_corporate_site/sustainability-

[at-
ifc/publications/report_waste_heat_recovery_for_the_cement_sector_market_and_supplier_analysis.](#)

IUCN. 2014. *Biodiversity Management in the Cement and Aggregates Sector: Biodiversity Indicator and Reporting System (BIRS)*. Gland, Switzerland: IUCN.
<https://www.iucn.org/content/biodiversity-management-cement-and-aggregates-sector-biodiversity-indicator-and-reporting-system-birs>.

Ke, Jing, Michael McNeil, Lynn Price, Nina Zheng Khanna, and Nan Zhou. 2013. "Estimation of CO₂ Emissions from China's Cement Production: Methodologies and Uncertainties." *Energy Policy* 57 (June): 172–181. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.01.028>;
https://china.lbl.gov/sites/all/files/6329_ep_cement_co2.pdf.

Madlool, Naseer Abboodi, Rahman Saidur, Md Shouquat Hossain, and Nasrudin Abd Rahm. 2011. "A Critical Review on Energy Use and Savings in the Cement Industry." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15: 2042–2060.
https://www.researchgate.net/publication/215599462_A_critical_review_on_energy_use_and_savings_in_the_cement.

Ministry of Labour, Training and Skills Development of Ontario, Canada. 2011. *Silica on Construction Projects*. <https://www.labour.gov.on.ca/english/hs/pubs/silica/>.

NFPA. 2002. *NFPA 68-2002: Guide for Venting of Deflagrations, 2002 edition*. Vol. 13, 2004/2005 National Fire Codes. <https://webstore.ansi.org/standards/nfpa-fire/nfpa682002>.

NFPA. n.d. *NFPA 69: Standard on Explosion Prevention Systems*. <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=69>.

NFPA. 2020. *NFPA 70: National Electric Code*. <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=70>.

NFPA. 2019. *NFPA 77: Recommended Practice on Static Electricity*. <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=77>.

NFPA. n.d. *NFPA 85: Boiler and Combustion Systems Hazards Code*. <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=85>.

NFPA. 2019. *NFPA 86: Standard for Ovens and Furnaces*. <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=86>.

NFPA. 2021. *NFPA 499: Recommended Practice for the Classification of Combustible Dusts and of Hazardous (Classified) Locations for Electrical Installations in Chemical Process Areas*. <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=499>.

- NFPA. 2020. *NFPA 654: Standard for the Prevention of Fire and Dust Explosions from the Manufacturing, Processing, and Handling of Combustible Particulate Solids*. <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=654>.
- NIOSH. 1988. Publication No. DHHS-NIOSH-88-110. *Criteria for a Recommended Standard: Welding, Brazing, and Thermal Cutting*. <https://www.cdc.gov/niosh/docs/88-110/default.html>.
- NIOSH. *Criteria for a Recommended Standard: Occupational Exposure to Heat and Hot Environments*. <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2016-106/default.html>.
- NIOSH Heat Stress webpage. <https://www.cdc.gov/niosh/topics/heatstress/default.html>.
- US OSHA. n.d. 1910 General Industry Standards. <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1928>.
- OSHA. n.d. *Occupational and Safety Health Standards, 1910.1001 Subpart Z, Asbestos*. <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.1001>.
- OSHA. n.d. *Occupational and Safety Health Standards, 1910.1053 Subpart Z, Toxic and Hazardous Substances, Respirable Crystalline Silica*. <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.1053>.
- OSHA. n.d. *Occupational and Safety Health Standards, 1910.134(c) Subpart I, Respiratory Protection Program*. <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.134>.
- OSHA. n.d. *1910, Subpart H, Hazardous Materials*, <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910SubpartH>.
- OSHA. n.d. *Subpart L, Fire Protection*, <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910SubpartL>.
- OSHA. n.d. *Subpart S, Electrical*, <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910SubpartS>.
- OSHA. n.d. *1910 Subpart J, General Environmental Controls 1910.147: The Control of Hazardous Energy (Lockout/Tagout)* <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.147>.
- OSHA. n.d. *1910 Subpart S, Electrical, 1910.333 Selection and Use of Work Practices*, <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.333>.
- OSHA. n.d. *1910 Subpart J, General Environmental Controls 1910.146: Permit-Required Confined Spaces*, <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.146>.
- OSHA. n.d. *1910 Subpart N, Materials Handling and Storage*, <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910SubpartN>.

- OSHA. n.d. *Safety and Health Regulations for Construction: 1926 Subpart CC, Cranes and Derricks in Construction*, <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1926/1926SubpartCC>.
- OSHA. n.d. *1910 Subpart Q, Welding, Cutting and Brazing*, <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910SubpartQ>.
- OSHA. 2018. *OSHA's Respirable Crystalline Silica Standard for General Industry and Maritime. Fact Sheet*. <https://www.osha.gov/Publications/OSHA3682.pdf>.
- Passant, Neil, Martin Peirce, Howard J. Rudd, David W. Scott, Ian Marlowe, and John D. Watterson. *UK Particulate and Heavy Metal Emissions from Industrial Processes*. AEA Technology. https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/reports/empire/AEAT6270Issue2finaldraft_v2.pdf.
- Renzoni, Roberto, Christophe Ullrich, Sandra Belboom, and Albert Germain. 2010. *Mercury in the Cement Industry*. CEMBUREAU and the WBCSD Cement Sustainability Initiative. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/11617/CEMENT_Industry_-_Hg_report_CEMBUREAU_April_2010.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- Safe Work Australia. n.d. *Model Code of Practice: Welding Processes*. <https://www.safeworkaustralia.gov.au/doc/model-code-practice-welding-processes>.
- Schorcht, Frauke, Ioanna Kourti, Bianca Maria Scalet, Serge Roudier, and Luis Delgado Sancho. 2013. *Best Available Techniques (BAT): Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide*. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control). Joint Research Center Reference Reports. Brussels: European Commission. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC83006>.
- Shan, Yuli, Zhu Liu, and Dabo Guan. 2015. "CO₂ Emissions from China's Lime Industry." *Applied Energy* 166 (May). doi:[10.1016/j.apenergy.2015.04.091](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.091); https://www.researchgate.net/publication/277907090_CO2_emissions_from_China%27s_lime_industry.
- Standards Australia. 2009. *AS 2865-2009: Confined Spaces*. <https://www.standards.org.au/standards-catalogue/sa-snz/publicsafety/sf-037/as--2865-2009>.
- UK HSE. n.d. *Health and Safety Statistics*. <http://www.hse.gov.uk/statistics/index.htm>.
- UK HSE. n.d. *Health and Safety Welding Resources*. <https://www.hse.gov.uk/welding/publications.htm>.
- UK HSE. n.d. *Regulations and codes of practice*. <https://www.hse.gov.uk/pubns/books/index-legal-ref.htm>.
- UK HSE. 2006. *HSG253: The Safe Isolation of Plant and Equipment*. <https://www.hse.gov.uk/pubns/books/hsg253.htm>.
- UK HSE. 2013. *Control of Substances Hazardous to Health, Regulations 2002: Approved Code of Practice and Guidance*, L5 (6th ed.). <https://www.hse.gov.uk/pubns/priced/l5.pdf>.

- UK HSE. 2013. *Respiratory Protective Equipment at Work, A Practical Guide*, HSG53 (4th ed.).
<https://www.hse.gov.uk/pubns/priced/hsg53.pdf>.
- UNEP. 2016. "Cement Clinker Production Facilities" in *Guidance on Best Available Techniques and Best Environmental Practices*. New York: UNEP.
http://mercuryconvention.org/Portals/11/documents/publications/BAT_BEP_E_interractif.pdf.
- United States Department of Labor. n.d. *Injuries, Illnesses, and Fatalities*. Bureau of Labor Statistics.
<https://www.bls.gov/iif>.
- United States Department of Labor. n.d. Occupational Safety and Health Standards—Toxic and Hazardous Substances. *Table Z-1 Limits for Air Contaminants*.
https://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_table=STANDARDS&p_id=9992.
- US EPA. 1999. *Code of Federal Regulation Title 40, Part 63, Subpart LLL—National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants from the Portland Cement Manufacturing Industry*. Washington, DC: US EPA. www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?node=sp40.12.63.lll.
- 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: USA EPA.
<https://www.epa.gov/stationary-sources-air-pollution/lime-manufacturing-plants-national-emission-standards-hazardous-air>.
- US EPA. 2008. *Code of Federal Regulation Title 40, Part 63, Subpart EEE—National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants from Hazardous Waste Combustor*. Washington, DC: US EPA.
<https://www.epa.gov/stationary-sources-air-pollution/hazardous-waste-combustors-national-emission-standards-hazardous>.
- US EPA. 2012. *Title 40, Chapter I, Subchapter N, Part 411 Cement Manufacturing Point Source Category*. Washington, DC: USA EPA. <https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/CFR-2014-title40-vol29/pdf/CFR-2014-title40-vol29-part411.pdf>.
- Van den Berg, Martin, Linda Birnbaum, Michael Denison, Mike Vito, William Farland, Mark Feeley, Heidelore Fiedler et al. 2006. "The 2005 World Health Organization Re-evaluation of Human and Mammalian Toxic Equivalency Factors for Dioxins and Dioxin-Like Compounds." *Toxicological Sciences* 93, no.2 (October): 223–241. doi: [10.1093/toxsci/kfl055](https://doi.org/10.1093/toxsci/kfl055).
- Wang, Yufei, Zhengping Hao, and Samuel Höller. 2012. "Analysis of CO₂ Mitigation Policies in the Chinese Cement Industry." *ECEEE 2012 Summer Study on Energy Efficiency in Industry*. Wuppertal, Germany: Wuppertal Institute. http://epub.wupperinst.org/files/4635/4635_Wang.pdf.
- WBCSD. n.d. Cement Sustainability Initiative. <https://www.wbcsd.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative>.
- WBCSD. n.d. *CO₂ and Climate Protection*. Geneva: WBCSD.
<https://www.wbcsd.org/Programs/Climate-and-Energy>.

- WBCSD. 2004. *Health and Safety in the Cement Industry: Examples of Good Practice*. Geneva: WBCSD. <http://ficem.org/CIC-descargas/Suiza/CSI/Health-and-Safety-in-the-Cement-Industry-Examples-of-Good-Practice-2004.pdf>.
- WBCSD. 2005a. *Environmental and Social Impact Assessment (ESIA) Guidelines*. Geneva: WBCSD. <https://www.wbcsd.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative/Resources/Guidelines-for-Environmental-and-Social-Impact-Assessment-ESIA>.
- WBCSD. 2005b. *Guidelines for the Selection and Use of Fuels and Raw Materials in the Cement Manufacturing Process*. Geneva: WBCSD. <https://www.wbcsd.org/contentwbc/download/2429/30121>.
- WBCSD. 2006. *Formation and Release of POPs in the Cement Industry* (2nd ed). Geneva: WBCSD. <http://docs.wbcsd.org/2006/01/FormationAndReleaseOfPOPsInCementIndustry.pdf>.
- WBCSD. 2011a. *CO₂ and Energy Accounting and Reporting Standard for the Cement Industry*. Version 3.0. Geneva: WBCSD. <https://www.wbcsd.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative/Resources/CO2-Accounting-and-Reporting-Standard-for-the-Cement-Industry>.
- WHO. International Programme on Chemical Safety guidelines. http://www.who.int/ipcs/assessment/tef_values.pdf.
- Worrell, Ernst, Katerina Kermeli, and Christina Galitsky. 2013. *Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for Cement Making—An ENERGY STAR Guide for Energy and Plant Managers*. Washington, DC: EPA. http://www.energystar.gov/sites/default/files/tools/ENERGY%20STAR%20Guide%20for%20the%20Cement%20Industry%2027_08_2013_Rev%20js%20reformat%2011192014.pdf.

ANEXO A. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS ACTIVIDADES INDUSTRIALES

79. Los procesos de fabricación de cemento y cal son similares. Ambos implican la extracción en canteras y minas, la molienda de las materias primas y su homogeneización, como se muestra en el gráfico A.1. Para minimizar los costos de transporte y permitir el uso de las cintas transportadoras, las fábricas de cemento y cal suelen estar situadas junto a las fuentes de materias primas y en las cercanías de los mercados de productos. La fabricación de cemento y la de cal son industrias con un gran consumo de energía, que necesitan cantidades importantes de energía térmica y eléctrica, según el tipo de proceso de producción utilizado y de los equipos relacionados.

Fabricación de cemento

80. En la fabricación de cemento se procesan materias primas —principalmente caliza (carbonato de calcio), arcilla (silicatos de aluminio), arena (óxido de silicio) y mineral de hierro— para producir clínker, que se muele con yeso, caliza y otros materiales para fabricar el cemento. Una sola línea de producción compacta (un horno con precalentador y precalcinador [PHP] o solo con precalentador [PH], con una capacidad de producción de clínker de 3000 toneladas diarias) necesita, por lo general, un área llana de aproximadamente 400 000 m², además de una superficie adicional (que suele ser de 250 000 m² o más) para su futura expansión. La vida útil de las instalaciones del proyecto suele ser de al menos 40 a 50 años. Las plantas suelen procesar entre 2500 y 12 000 toneladas de cemento por día. El tamaño de la planta es un factor importante, ya que las diferencias en la escala de producción pueden tener un impacto significativo 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 unidad de producción de cemento.

81. Después de una etapa inicial de trituración y premezcla, las materias primas se unen y muelen para formar una mezcla homogénea —el crudo— que tenga la composición química requerida. La finura y el tamaño de las partículas de este crudo son características importantes para el proceso de quemado. Una vez realizada la mezcla, el proceso de producción continúa en una combinación de PH, precalcinador y horno rotatorio donde el crudo se calcina, lo que descompone el carbonato de calcio a aproximadamente 900 °C; así se libera dióxido de carbono y queda el óxido de calcio. A esto le sigue el proceso de producción del clínker, en el que el óxido de calcio reacciona a una temperatura de entre 1400 °C y 1500 °C con la sílice, la alúmina y óxidos ferrosos. En este punto, pueden agregarse a la mezcla de materias primas otros componentes —por ejemplo, arena de sílice, arena de fundición, óxido de hierro, residuos de alúmina, escoria de alto horno y residuos de yeso— para crear la composición específica deseada. La temperatura de la llama y de los gases producidos ronda los 2000 °C. El clínker caliente cae del horno al enfriador, donde debe enfriarse tan rápido como sea posible para mejorar la calidad del clínker y, al mismo tiempo, facilitar la recuperación de calor calentando aire secundario para la combustión. En la actualidad, para eso suelen utilizarse enfriadores de parrilla, en lugar de los enfriadores de satélites, que han quedado obsoletos. El clínker enfriado se tritura luego con yeso y caliza para producir cemento Portland y se muele con otros componentes 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, por ejemplo, puzolana natural, ceniza volante, escoria de alto horno y, en ocasiones, ceniza residual. No debe haber residuos carbónicos (procedentes normalmente de las plantas que generan energía a partir del carbón) en las cenizas volantes ni en las residuales. A veces se agrega carbonato de calcio en pequeñas cantidades como material de relleno.

Fabricación de cal

82. La cal se produce quemando CaCO_3 —o, con menos frecuencia, dolomita, que es una mezcla de carbonato de calcio y carbonato de magnesio— a temperaturas superiores a 800 °C para descarbonatar la materia prima y producir cal viva (óxido de calcio), que después se mantiene a temperaturas de entre 1200 °C y 1300 °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 utilizada 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), que puede adoptar dos formas: seca (en polvo) o lechada de cal (líquida). En el proceso de fabricación de cal apagada, primero se separa por tamaño y se hidrata; luego se almacena en tanques (en el caso de la lechada de cal) o en silos (cal seca) para su venta a granel o en sacos.

GRÁFICO A.1. PROCESOS DE FABRICACIÓN DE CEMENTO

