

MEDITERRANEAN

Manual de prevención de la contaminación en el **sector del cemento**

CLEANER production



Centro de Actividad Regional para la Producción Limpia (CAR/PL)
Plan de Acción para el Mediterráneo



Centro de Actividad Regional
para la Producción Limpia



Generalitat de Catalunya
Gobierno de Cataluña
**Departamento de Medio Ambiente
y Vivienda**

Manual de prevención de la contaminación en el **sector del cemento**



Centro de Actividad Regional para la Producción Limpia (CAR/PL)
Plan de Acción para el Mediterráneo



Centro de Actividad Regional
para la Producción Limpia



 Generalitat de Catalunya
Gobierno de Cataluña
**Departamento de Medio Ambiente
y Vivienda**

Nota: Esta publicación puede reproducirse total o parcialmente, con fines educativos y no lucrativos, sin permiso específico del Centro de Actividad Regional para la Producción Limpia (CAR/PL), siempre y cuando se mencione el origen de la información. El CAR/PL agradecería recibir una copia de cualquier publicación en la que este material se utilice como fuente. No está permitido el uso de esta información con fines comerciales o de venta sin permiso escrito del CAR/PL.

Las denominaciones empleadas en esta publicación y la presentación de material no implican la expresión de ninguna opinión por parte del CAR/PL en relación con el estatus legal de ningún país, territorio o área, ni de sus autoridades, ni respecto a sus fronteras y límites.

Si considera que algún punto del estudio puede mejorarse o existe alguna imprecisión, le agradeceríamos que nos lo comunicase.

Estudio publicado en mayo de 2008

Si desea solicitar copias adicionales o recibir cualquier información adicional, póngase en contacto con:

Centro de Actividad Regional para la Producción Limpia (CAR/PL)

Dr. Roux, 80
08017 Barcelona (España)
Tel. +34 93 553 87 90 – Fax. +34 93 553 87 95
E-mail: cleanpro@cprac.org
<http://www.cprac.org>

ÍNDICE

ÍNDICE	5
RESUMEN EJECUTIVO	11
INTRODUCCIÓN.....	13
1. PRODUCCIÓN LIMPIA / OBJETIVOS Y BENEFICIOS DE LA PREVENCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN	17
2. SITUACIÓN DE LOS PAÍSES DEL PLAN DE ACCIÓN PARA EL MEDITERRÁNEO.....	21
2.1. PAÍSES DEL SUR DEL MEDITERRÁNEO.....	21
2.1.1. ARGELIA.....	24
2.1.2. EGIPTO.....	26
2.1.3. LÍBANO	28
2.1.4. YAMAHIRIYA ÁRABE LIBIA POPULAR.....	30
2.1.5. MARRUECOS.....	32
2.1.5.1. <i>Introducción</i>	32
2.1.6. REPÚBLICA ÁRABE SIRIA	34
2.1.7. TÚNEZ	36
2.2. PAÍSES DEL NORTE DEL MEDITERRÁNEO	38
2.2.1. ESPAÑA.....	39
2.2.2. FRANCIA	41
2.2.2.1. <i>Industria del sector del cemento</i>	42
2.2.3. GRECIA	43
2.2.4. ITALIA	46
2.2.5. MÓNACO	48
2.2.5.1. <i>Industria y medio ambiente</i>	48
2.3. PAÍSES DEL ESTE DEL MEDITERRÁNEO.....	49
2.3.1. ALBANIA	50
2.3.2. BOSNIA-HERZEGOVINA	51
2.3.3. CHIPRE.....	53
2.3.4. CROACIA.....	55
2.3.5. ESLOVENIA.....	57
2.3.6. ISRAEL	59

2.3.7.	MALTA.....	61
2.3.8.	SERBIA y MONTENEGRO	62
2.3.9.	TURQUÍA	64
2.4.	SITUACIÓN DE LA INDUSTRIA DEL CEMENTO EN LOS PAÍSES DEL PAM.....	65
3.	DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS	77
3.1.	MATERIAS PRIMAS	77
3.1.1.	Materias primas básicas.....	77
3.1.1.1.	<i>Caliza</i>	78
3.1.1.2.	<i>Marga</i>	78
3.1.1.3.	<i>Arcilla</i>	78
3.1.1.4.	<i>Pizarra</i>	79
3.1.1.5.	<i>Yeso/anhidrita</i>	79
3.1.2.	Materias primas secundarias	79
3.1.2.1.	<i>Materiales correctivos</i>	79
3.1.2.2.	<i>Materias puzolánicas</i>	80
3.1.2.3.	<i>Reciclado y valorización material y energética de residuos</i>	81
3.2.	DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS PRODUCTIVOS	84
3.2.1.	Obtención de las materias primas.....	99
3.2.1.1.	<i>Explotación de las materias primas</i>	99
3.2.1.2.	<i>Transporte de materias primas</i>	99
3.2.1.3.	<i>Trituración de las materias primas</i>	99
3.2.2.	Almacenamiento y preparación de las materias primas	99
3.2.2.1.	<i>Almacenamiento de materias primas</i>	99
3.2.2.2.	<i>Molienda del crudo</i>	105
3.2.2.3.	<i>Homogeneización del crudo</i>	108
3.2.2.4.	<i>Requerimientos especiales del proceso semi-húmedo</i>	110
3.2.3.	Almacenamiento y preparación de los combustibles.....	112
3.2.3.1.	<i>Almacenamiento de combustibles</i>	113
3.2.3.2.	<i>Preparación de los combustibles</i>	113
3.2.3.3.	<i>Empleo de residuos como combustibles alternativos</i>	115
3.2.4.	Cocción del clínker	117
3.2.4.1.	<i>Composición del clínker</i>	118
3.2.4.2.	<i>Proceso de cocción del clínker</i>	120
3.2.4.3.	<i>Hornos rotatorios</i>	122
3.2.4.4.	<i>Hornos verticales</i>	146
3.2.4.5.	<i>Enfriadores de clínker</i>	146
3.2.5.	Molienda y almacenamiento del cemento.....	154
3.2.5.1.	<i>Almacenamiento del clínker</i>	154
3.2.5.2.	<i>Molino de cemento</i>	156
3.2.5.3.	<i>Almacenamiento del cemento</i>	161
3.2.6.	Productos de cemento	162
3.2.6.1.	<i>Propiedades y tipos de cemento</i>	162

3.2.7.	Ensacado y expediciones	167
3.2.8.	Puesta en obra del cemento	168
3.2.9.	Control de calidad	170
4.	PROBLEMÁTICAS AMBIENTALES EN LA FABRICACIÓN DEL CEMENTO: CORRIENTES RESIDUALES Y CONSUMOS	171
4.1.	FUENTES POTENCIALES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA.....	174
4.1.1.	Principales emisiones a la atmósfera	174
4.1.1.1.	<i>Obtención de la materia prima</i>	<i>176</i>
4.1.1.2.	<i>Preparación y almacenamiento de la materia prima</i>	<i>177</i>
4.1.1.3.	<i>Preparación y almacenamiento del combustible.....</i>	<i>177</i>
4.1.1.4.	<i>Cocción del clínker</i>	<i>177</i>
4.1.1.5.	<i>Molienda, ensacado y expedición de cemento.....</i>	<i>185</i>
4.1.2.	Gases de efecto Invernadero.....	185
4.1.2.1.	<i>El Efecto Invernadero y el Cambio Climático</i>	<i>186</i>
4.1.2.2.	<i>Convenio Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.....</i>	<i>186</i>
4.1.2.3.	<i>El Protocolo de Kyoto</i>	<i>187</i>
4.1.3.	Ruidos y vibraciones	190
4.1.4.	Olores.....	191
4.2.	FUENTES DE GENERACIÓN DE VERTIDOS LÍQUIDOS Y SU CONTROL	191
4.3.	FUENTES DE GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS Y SU CONTROL	191
4.4.	CONSUMO DE ENERGÍA	192
4.4.1.	Principales consumidores energéticos en el proceso de fabricación del cemento	192
4.4.1.1.	<i>Extracción de la materia prima</i>	<i>192</i>
4.4.1.2.	<i>Preparación de la materia prima</i>	<i>192</i>
4.4.1.3.	<i>Producción del clínker</i>	<i>193</i>
4.4.1.4.	<i>Molienda del cemento.....</i>	<i>193</i>
4.4.1.5.	<i>Expedición</i>	<i>194</i>
4.4.1.6.	<i>Tabla resumen.....</i>	<i>194</i>
4.5.	CONSUMO DE AGUA	195
4.6.	USO DE RESIDUOS INDUSTRIALES COMO MATERIAS PRIMAS O COMBUSTIBLES.....	196
4.6.1.	Beneficios medioambientales	196
4.6.2.	Beneficios socio-económicos.....	197
5.	OPORTUNIDADES PARA PREVENIR Y REDUCIR LA CONTAMINACIÓN.....	199
	FICHA TEÓRICA.....	200
5.1.	ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS DE CARÁCTER GENERAL	201
5.1.1.	OPTIMIZACIÓN DEL CONTROL DE PROCESO	201
5.1.2.	ADECUACIÓN Y CONTROL DE LAS SUSTANCIAS QUE ENTRAN AL PROCESO .	203

5.1.3.	REDUCCIÓN DEL CONSUMO DE RECURSOS NATURALES (MATERIAS PRIMAS).....	204
5.1.4.	REDUCCIÓN DEL RATIO CLÍNKER/CEMENTO.....	205
5.2.	ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA UNA CORRECTA GESTIÓN DE LA ENERGÍA....	206
5.2.1.	MEDIDAS INTEGRALES DE OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DEL PROCESO .	207
5.2.2.	MEJORAS DEL PROCESO EN VÍA SECA	209
5.2.3.	PRECALENTADORES EN SUSPENSIÓN.....	212
5.2.4.	ENFRIADOR DE PARRILLA DE VAIVÉN MODERNO	213
5.2.5.	TECNOLOGÍAS DE MOLIENDA PARA LA PREPARACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS.....	214
5.2.6.	INSTALACIÓN DE MOLINO DE RODILLOS PARA LA PREPARACIÓN DEL COMBUSTIBLE.....	215
5.2.7.	MEDIDAS DE OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE LA MOLIENDA FINAL DEL CEMENTO.....	217
5.2.8.	REDUCCIÓN DEL FLUJO DEL BY-PASS DE ÁLCALIS	219
5.3.	ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA EL CONTROL DE EMISIONES DE NO _x	220
5.3.1.	QUEMADOR DE BAJO NO _x	223
5.3.2.	ENFRIAMIENTO DE LLAMA	224
5.3.3.	COMBUSTIÓN POR ETAPAS	224
5.3.4.	REDUCCIÓN NO CATALÍTICA SELECTIVA (SNCR).....	226
5.4.	ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA EL CONTROL DE EMISIONES DE SO ₂	227
5.4.1.	REDUCCIÓN DEL CONTENIDO DE AZUFRE EN LAS MATERIAS PRIMAS Y COMBUSTIBLE.....	228
5.4.2.	ADICIÓN DE ABSORBENTE.....	230
5.4.3.	LAVADORES DE GASES SECOS	231
5.4.4.	LAVADORES DE GASES HÚMEDOS	232
5.4.5.	ADSORCIÓN CON CARBÓN ACTIVADO.....	233
5.5.	ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA EL CONTROL DE PARTÍCULAS.....	233
5.5.1.	Control de las emisiones de fuentes dispersas.....	234
5.5.2.	Control de las emisiones de fuentes puntuales:	234
5.5.3.	PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS	236
5.5.4.	FILTROS MANGAS.....	239
5.5.5.	FILTROS HÍBRIDOS.....	242
5.6.	ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA EL CONTROL DE COV'S Y PCDD/PCDF'S	244
5.6.1.	ELECCIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS Y COMBUSTIBLES	245
5.6.2.	ADICIÓN DE LA MATERIA PRIMA EN LA ZONA CALIENTE DEL HORNO.....	246
5.6.3.	ADSORCIÓN CON CARBÓN ACTIVADO.....	247
5.7.	ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA EL CONTROL DE EMISIONES DE METALES.....	247
5.7.1.	ELECCIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS O COMBUSTIBLES.....	249

5.7.2.	ADSORCIÓN EN CARBÓN ACTIVADO	249
5.8.	ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA LA REDUCCIÓN DE CO ₂	250
5.8.1.	SUSTITUCIÓN DEL COMBUSTIBLE POR RESIDUOS.....	250
5.9.	ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA LA REDUCCIÓN DE OLORES	251
5.10.	TERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA EL CONTROL DE LAS EMISIONES DE RUIDO.....	251
5.10.1.	Ruido generado por el flujo de aire.....	252
5.10.2.	Ruido generado por la maquinaria.....	253
5.10.3.	Ruido procedente de los edificios	253
5.11.	ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA EL CONTROL DE LAS VIBRACIONES.....	253
5.11.1.	Vibración del molino de rodillos	254
5.11.2.	Vibración en los silos de clínker.....	254
5.12.	ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA EL CONTROL DE RESIDUOS.....	254
5.13.	TECNICAS EMERGENTES.....	254
5.13.1.	TECNOLOGÍA DE FABRICACIÓN DEL CLÍNKER EN LECHO FLUIDIZADO	255
5.13.2.	COMBUSTIÓN POR ETAPAS COMBINADA CON REDUCCIÓN NO-CATALÍTICA SELECTIVA (SNCR).....	256
5.13.3.	REDUCCIÓN CATALÍTICA SELECTIVA (SCR)	257
6.	CASOS PRÁCTICOS	259
6.1.1.	INSTALACIÓN DE MOLINO DE RODILLOS HORIZONTAL	259
6.1.2.	CIRCUITO CERRADO DEL AGUA DE REFRIGERACIÓN	261
6.1.3.	INSTALACIÓN DE FILTRO HÍBRIDO	261
6.1.4.	INSTALACIÓN DE CICLONES.....	263
6.1.5.	INSTALACIÓN DE FILTROS DE MANGAS	263
6.1.6.	IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE CONTROL DE PROCESO.....	265
6.1.7.	IMPLEMENTACION DE PROGRAMA DE MANTENIMIENTO	265
7.	GLOSARIO.....	267
8.	BIBLIOGRAFÍA	271

RESUMEN EJECUTIVO

El reto actual de la industria cementera consiste en adoptar las medidas necesarias para permitir un desarrollo sostenible y garantizar su competitividad. La industria cementera aunque ya ha apostado por el medio ambiente, todavía tiene que realizar un mayor esfuerzo en la minimización del consumo de recursos naturales y del impacto medio ambiental.

Este Manual de Prevención de la Contaminación en el Sector del Cemento pretende ofrecer herramientas y criterios de decisión para la implantación de una mejora ambiental progresiva en las empresas de los países del plan de Acción para el Mediterráneo para alcanzar una Producción más Limpia.

El objetivo de la Producción más Limpia es la aplicación continua de una estrategia ambiental preventiva integrada en los procesos, productos y servicios con el fin de incrementar la eficiencia y reducir los riesgos para las personas y el medio ambiente. Dicha estrategia pasa por la evaluación y adopción paulatina de las mejores técnicas disponibles para minimizar la contaminación ambiental que sean técnica y económicamente viables de acuerdo con las características específicas de cada proceso productivo.

En este Manual se pone de manifiesto que la adopción de alternativas preventivas de la contaminación permiten reducir el consumo de recursos naturales (materias primas, energía, agua, etc.), disminuir las corrientes residuales y aumentar la eficiencia del proceso productivo, con lo que se consigue favorecer la economía del proceso, contribuyendo también a aumentar la competitividad de las instalaciones industriales.

Puesto que el objetivo prioritario de la Producción más Limpia es la minimización de las emisiones en su origen, el orden de actuación es: prevenir, reducir y reutilizar. Aunque también se tiene que contemplar, de forma complementaria, el tratamiento de las emisiones finales para minimizar el impacto medioambiental de las mismas.

Como se pone de manifiesto en el capítulo 2, el alcance de dichas actuaciones depende de la legislación vigente en cada país, existiendo grandes diferencias entre ellas, a excepción de los países de la Unión Europea que tienen que cumplir con la Directiva de Control y Prevención Integrado de la Contaminación (IPPC). En el capítulo 3 se describen las materias primas utilizadas y los principales procesos productivos. A continuación, en el capítulo 4 se recogen las principales fuentes potenciales de contaminación así como los consumos de energía más habituales para cada tipo de proceso.

Los principales aspectos ambientales asociados a la producción de cemento son el consumo de energía y las emisiones a la atmósfera de partículas, NO_x, SO₂ y CO₂. Las partículas son debidas a fuentes difusas y a focos puntuales y los gases provienen del foco principal que es el horno de clínker.

Los vertidos de agua se limitan a las escorrentías de lluvia, la refrigeración de equipos (normalmente en circuito cerrado) y al agua sanitaria y no son un impacto ambiental significativo; siendo el almacenamiento y la manipulación de combustibles, fuentes potenciales de contaminación del suelo y de las aguas subterráneas.

La industria del cemento se caracteriza por presentar un consumo intensivo de energía, por ello, las plantas de producción vienen aplicando, cada vez más, medidas de eficiencia energética; lo que conlleva a una reducción de emisiones asociadas al combustible.

En el capítulo 5 de este manual se presentan distintas alternativas para prevenir en origen la contaminación indicando en cada caso las mejoras que se podrían llegar a alcanzar. Asimismo, se recogen los tratamientos finales que se pueden utilizar para minimizar el impacto medioambiental producidos por las emisiones finales.

Por último, en el capítulo 6 se recogen una serie de casos prácticos con el objetivo de facilitar la toma de decisión con respecto a algunos tratamientos concretos. Se han seleccionado desde casos muy concretos en los que se indican las ventajas alcanzadas en una planta con la implementación de una de las alternativas propuestas hasta casos mas generales en los que se pone de manifiesto cuales son las alternativas mas utilizadas en un grupo de plantas o se describen las distintas etapas aplicadas para alcanzar una Producción más Limpia.

En el apartado de Bibliografía del presente manual se recogen una serie de publicaciones, instituciones y páginas web que pueden proporcionar al lector información adicional o complementaria a la contenida en el presente escrito.

INTRODUCCIÓN

La producción de cemento y sus aplicaciones presenta un fuerte vínculo con la actividad constructiva, ya que sus productos están dirigidos a diferentes etapas de la construcción; tanto a edificación, como a obra civil. Esta fuerte relación con la actividad constructora hace que este sector sea un sector estratégico para la industria.

La importancia del cemento radica en su propiedad de formar masas pétreas resistentes y duraderas cuando se mezcla con áridos y agua. El fraguado y endurecimiento de la mezcla ocurre transcurrido un cierto tiempo desde el momento en que se realiza la mezcla, lo que permite dar forma (moldear) la piedra artificial resultante. El cemento, además de ser de fácil disponibilidad, se puede adecuar a diversos requerimientos y presenta un bajo costo respecto a otros materiales.

El cemento ha jugado un papel clave en la historia de la civilización, y su uso puede constatarse desde la antigüedad. Los progresos económicos e industriales, las fuentes de materias primas y las condiciones climáticas, han conducido a diversos progresos tanto en materiales como en sistemas constructivos; de manera que en la actualidad se fabrican muchos tipos de cemento según los requerimientos del mercado.

Los productos derivados del cemento generalmente son productos con largos periodos de existencia, y una vez finalizada su utilidad es difícil hacer una separación en sus componentes originales, hecho que dificulta su reutilización, e incluso reciclaje. Básicamente estos productos están compuestos en su mayoría de materiales inertes, y si bien cuando son llevados a vertedero no contaminan el suelo ni las aguas, sí ocupan grandes espacios. La tendencia actual en los países desarrollados es cerrar el ciclo de vida del cemento y sus derivados mediante la reutilización y reciclaje de los residuos de construcción y demolición.

Al igual que otros sectores industriales, la industria cementera trata de alcanzar un desarrollo sostenible. El desarrollo sostenible requiere una visión a largo plazo en el que las empresas se centren en preservar la calidad de vida, lo que significa respetar las necesidades humanas y los ecosistemas tanto locales como globales. En este proceso dinámico no solamente se consideran aspectos medioambientales, sino también socioeconómicos como por ejemplo el bienestar social y el empleo. Algunas medidas se pueden implementar a corto plazo pero otras requieren largos periodos de planificación y adaptación. Muchas compañías ya han adoptado medidas efectivas en un amplio abanico de temas medioambientales y sociales y han incluso alcanzado nuevas oportunidades de mercado. Sin embargo, la aplicación de las nuevas tecnologías compatibles con un desarrollo sostenible, requiere una gran inversión por parte de las empresas. Dicho desarrollo depende, fundamentalmente, de la localización de los centros de producción, de las expectativas de sus accionistas o propietarios y de la identificación de nuevas oportunidades de mercado.

Asimismo hay que considerar que, en la actualidad, las fábricas no sólo se enfrentan al proceso de desarrollo sostenible, con todos los cambios que ello supone, sino que en paralelo también tienen que hacer frente al proceso de globalización. En definitiva, el desarrollo sostenible de la industria del cemento presenta oportunidades y retos de tal forma que los fabricantes necesitan adaptarse a todos estos cambios para encontrar la manera de mantener la rentabilidad de las fábricas y, al mismo tiempo, reducir el impacto medio ambiental de las mismas.

La creciente concienciación ambiental y su consecuente reflejo en las normativas medioambientales de los países ha puesto de manifiesto la necesidad de que todos los sectores productivos, incluidos el cementero, concentren esfuerzos en controlar, reducir y prevenir en origen la contaminación, minimizando las emisiones a la atmósfera y optimizando sus necesidades energéticas.

Los costes energéticos se sitúan alrededor del 30 % de los costes de producción de cemento, por lo que las empresas cementeras han ido optimizado sus procesos y equipos, mejorando progresivamente la eficiencia energética de las plantas de fabricación, especialmente desde los años 70. Además, más recientemente, la industria del cemento (que globalmente colabora en un 5 % aproximadamente de las emisiones de CO₂) se ve afectada en algunos países del Plan de Acción para el Mediterráneo por la nueva legislación derivada del Protocolo de Kyoto. De esta manera, muchas plantas deben hacer uso de derechos de emisión de gases de efecto invernadero, o bien pueden ser posibles objetivos de mecanismos de desarrollo limpio. Esto hace que cobre más importancia, aún, la optimización energética y el uso de materias primas de carácter renovable.

En la actualidad la industria cementera aporta en el campo de la valorización energética una solución ecológica y segura a la gestión de determinados tipos de residuos orgánicos utilizándolos como combustibles alternativos: harinas animales, aceites usados, disolventes, etc. A su vez, la industria cementera aporta un potencial importante de contribución ambiental en la gestión de residuos de otras actividades industriales, puesto que pueden ser utilizados como materias primas en la preparación del crudo (cenizas, lodos de papeleras, arenas de fundición, etc.) y/o como adiciones en la molienda de cemento (escorias de alto horno, humo de sílice, etc.).

De esta manera, se ha estructurado progresivamente una estrategia para optimizar las actividades del sector cementero, tanto desde el punto de vista ambiental como del de rentabilidad y competitividad. Las líneas esenciales de esta estrategia pueden resumirse de la siguiente manera:

- Mejorar el comportamiento ambiental de las instalaciones de fabricación con una mejor gestión ambiental, modernización de equipos y medios de protección del medio ambiente.
- Reducción del consumo energético necesario para la fabricación del cemento, y de sus costes, mediante:
 - Mejora de la eficiencia energética de los equipos y procesos de producción.
 - Investigación y potenciación de cementos con adiciones, que requieren para su fabricación de una menor cantidad de clínker, y, por consecuencia, de combustibles.

Utilización de residuos y subproductos como materias primas y combustibles alternativos, que aporta además de un ahorro de recursos no renovables, una contribución medioambiental por el reciclado y la valorización material y energética de residuos.

- Adaptación al nuevo marco de liberalización energética al que se encaminan la mayoría de los países del Plan de Acción para el Mediterráneo.
- La necesidad de las empresas de hacer frente a la competencia internacional y de ajustarse a normas de calidad y otros estándares internacionales como las normas de las series ISO-9000 e ISO-14000 o el EMAS.

Así, por tanto, se reconoce que la solución más eficaz a los problemas de contaminación ambiental es minimizar la generación de corrientes residuales, por medio de la aplicación de tecnologías limpias que corrigen el problema en su origen. Esta solución puede ser adoptada tanto en las industrias nuevas como en aquellas que procuran la modernización de sus instalaciones productivas.

Este Manual pretende ofrecer herramientas y criterios de decisión para la implantación de una mejora ambiental progresiva en las empresas, proporcionando información para la prevención de la contaminación en el sector del cemento para los países del Plan de Acción para el Mediterráneo.

Según el Estudio publicado en enero de 2004 por el Centro de Actividad Regional para la Producción más Limpia (CAR/PL) sobre "Estado de la Producción más Limpia en los Países del Plan de Acción para el Mediterráneo" y de acuerdo a las manifestaciones de los Puntos Focales Nacionales del CAR/PL con respecto al concepto de producción más limpia, la mayoría de los países mediterráneos han adoptado la definición del PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente), según el cual: "La producción más limpia consiste en la aplicación continua de una estrategia ambiental preventiva integrada en los procesos, productos y servicios con el fin de incrementar la eficiencia y reducir los riesgos para las personas y el medio ambiente". Si bien, existen casos en los

que la producción más limpia se asimila a conceptos como las mejores técnicas disponibles (MTDs) y las tecnologías más limpias.

Para la elaboración del presente Manual, en primer lugar, se realiza la detección de las potenciales problemáticas ambientales de las fábricas del sector del cemento, las cuales son:

- Consumo de energía.
- Emisiones a la atmósfera.
- Generación de residuos.

En segundo lugar, se estudian los procesos de fabricación de dicho sector en los países del Plan de Acción para el Mediterráneo, describiendo de forma detallada las problemáticas ambientales anteriormente expuestas; y, finalmente, se proponen alternativas de prevención en origen de la contaminación, especificando, a modo de ejemplo, casos prácticos de aplicación de algunas de las alternativas propuestas.

Así por tanto, el documento se estructura de la siguiente manera:

PARTE I: Producción Limpia / Objetivos y Beneficios de la Prevención de la Contaminación

En este apartado se define el concepto de “prevención de la contaminación”, y se resumen los beneficios de aplicar dichas técnicas de prevención.

PARTE II: Prevención de la Contaminación en el Sector Cementero

Esta parte describe tanto la situación actual del sector del cemento en la región del mediterráneo, como los procesos asociados a dicho sector, los principales impactos ambientales, y proporciona alternativas para la prevención de la contaminación.

PARTE III: Casos Prácticos

Se incluye en esta sección muestras específicas de empresas que han utilizado distintas alternativas para la prevención de la contaminación. Estos estudios de casos describen la estrategia seguida así como los beneficios, particularmente los ahorros en costes, que las empresas han logrado.

1. PRODUCCIÓN LIMPIA / OBJETIVOS Y BENEFICIOS DE LA PREVENCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN

La Producción más Limpia en un entorno industrial se centra en la ejecución eficaz de los procesos productivos de manera que se genere el valor mínimo de subproductos o corrientes residuales no aprovechables internamente con el mínimo consumo de materias primas y recursos.

La producción más limpia se apoya en tres ámbitos de actuación:

- Prevenir.
- Reducir.
- Reutilizar internamente.

La *prevención* se orienta hacia la toma de decisiones en el diseño de una nueva planta o el rediseño de existentes, con el objetivo de “prevenir” la contaminación, es decir, no generar la corriente residual. De manera que primará la selección alternativas que minimicen la generación de corrientes residuales, reduciendo así el impacto ambiental en el entorno.

La *reducción* o minimización se aplica en aquellos procesos que, a pesar de que ya están implantados en su totalidad, disponen de margen de mejora. Las modificaciones deberán considerar la reducción de las corrientes residuales generadas y/o consumo de materias primas y recursos naturales.

La *valorización* interna considera el uso de las corrientes residuales como materia prima dentro de la empresa, éste es el último recurso para limitar el impacto ambiental.

El efecto ambiental de las medidas será tanto o más positivo cuanto más intensamente se haga hincapié sobre el concepto de producción más limpia.

Desde el punto de vista de los costes se debe pensar en la producción más limpia como un proceso que genera beneficios con el paso del tiempo, así por tanto, la producción limpia reduce costes mejorando la eficacia productiva.

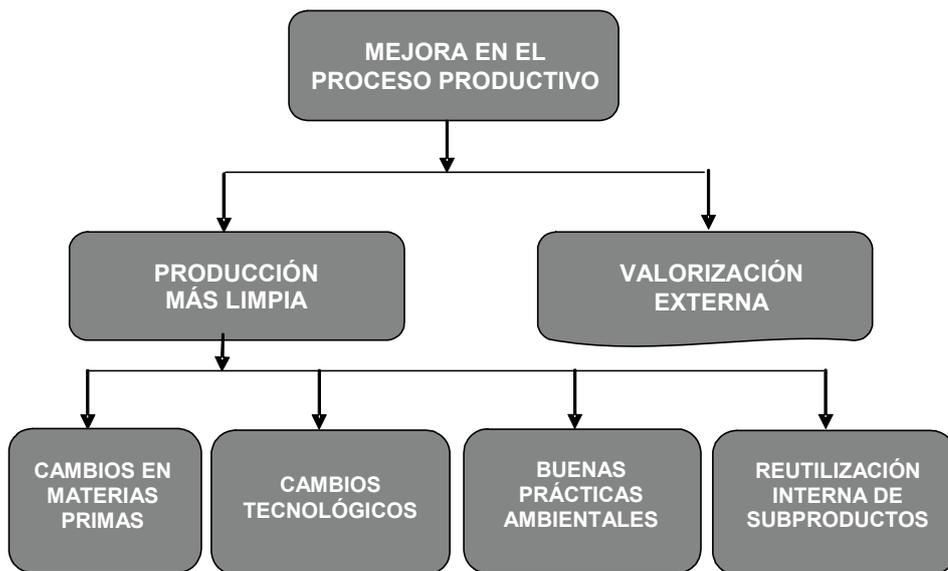
De esta manera, la planificación y el diseño de un proceso en el que se seleccionen técnicas que minimicen la generación de corrientes residuales, será a medio-largo plazo mucho más rentable ambiental y económicamente que aquellos procesos en los que tan sólo se da una correcta gestión de tratamiento de corrientes residuales al final del proceso.

Entre las principales causas que progresivamente están propiciando que la producción más limpia esté cada vez más presente en el sector del cemento, se encuentran las siguientes:

- Un marco legal cada vez más estricto y más controlado.
- Un consumo elevado de energía.
- Una incorporación en la gestión financiera del producto de los costes ambientales implicados.
- Sensibilización ambiental cada vez más creciente entre los fabricantes, consumidores y clientes.
- Mejora técnica aplicando procesos de producción más limpia que ofrecen unos productos de calidad igual o superior.

Las medidas de producción más limpia se pueden agrupar según las líneas de actuación que se muestran a continuación:

- Cambios en materias primas y combustibles: Medidas centradas en la mejora por sustitución o modificación de aquellas materias primas y combustibles consumidos en el proceso por otras con un potencial contaminante global inferior.
- Cambios tecnológicos: Medidas que representen modificaciones en los procesos.
- Medidas organizativas: Medidas encaminadas a conseguir un correcto uso de los equipos y sistemas con el fin de optimizar el funcionamiento de la planta.
- Reciclaje interno de subproductos o corrientes residuales: Reutilización, con o sin tratamiento previo en el propio proceso (según el caso) de las corrientes residuales generadas, considerándolas como nuevas materias primas.



La Prevención de la Contaminación es, tal y como define la EPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos): "...la máxima reducción posible de todos los residuos generados en su lugar de producción. Esto supone el uso adecuado de recursos mediante la reducción en origen, eficiencia en el uso de la energía, recuperación de materiales usados como entradas durante la producción y un menor consumo de agua. Existen dos métodos generales de reducción en origen que pueden usarse en un programa de prevención de la contaminación: cambios en los productos y cambios en los procesos. Estos reducen el volumen y la toxicidad de los residuos de producción y productos finales durante su ciclo de vida y en su disposición."

OBJETIVOS DE LA PREVENCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN

El objetivo del programa para la prevención en origen de la contaminación es mejorar la calidad del ambiente mediante la eliminación, y/o la disminución de la generación de corrientes residuales. La prevención de la contaminación incluye cualquier actividad iniciada por una empresa para reducir la cantidad de residuos generados por sus procesos de fabricación antes del reciclaje, tratamiento, o disposición de estos residuos fuera del lugar.

BENEFICIOS DE UN PROGRAMA PARA PREVENIR LA CONTAMINACIÓN

Las empresas que cuenten con un plan efectivo y continuo para prevenir la contaminación tendrán una ventaja significativa para competir en su industria, puesto que disminuyen los costes de operación y los costes de producción. Así, un programa de prevención de la contaminación puede presentar los siguientes beneficios:

- **Proteger la salud humana y la calidad del medio ambiente:** La reducción de los contaminantes emitidos al aire, tierra y agua, ayudará a proteger el medio ambiente y la salud humana.
- **Reducir los costes de operación:** A largo plazo, un programa efectivo de reducción de la contaminación puede suponer ahorros que amortizan los costes de desarrollar e implantar el programa.
- **Motivación de los empleados:** Los empleados se sentirán mejor en su empresa si creen que la gerencia se compromete a proporcionarles un ambiente de trabajo más seguro y, que a la vez, colabora como un miembro responsable de la comunidad.
- **Mejora de la imagen de la empresa:** Demostrar una conciencia ambiental mejora la imagen de la empresa, se crean opiniones más positivas hacia empresas que tienen una cultura de respeto a la naturaleza. Esto puede abrir nuevas oportunidades de mercado para determinados productos.
- **Mejora en el cumplimiento de la legislación ambiental:** Siguiendo un plan de prevención para la contaminación la empresa aumenta sus oportunidades de evitar infracciones y multas relacionadas con la legislación ambiental.

2. SITUACIÓN DE LOS PAÍSES DEL PLAN DE ACCIÓN PARA EL MEDITERRÁNEO

El objetivo de este apartado es proporcionar al lector una imagen general de la situación actual de los distintos países del Plan de Acción para el Mediterráneo, aportando información socioeconómica del país, aspectos concretos de la industria del país y los principales impactos ambientales asociados con la actividad industrial (en especial con el sector de fabricación de cemento), leyes y normativas existentes en el marco legal actual para prevenir y controlar la contaminación, agentes involucrados en la promoción de la producción más limpia, programas y planes de acción creados para promover la producción más limpia, así como las actividades y las herramientas utilizadas para promover y difundir la producción más limpia.

La información se ha obtenido a partir de fuentes bibliográficas de Organismos Oficiales como Institutos de Estadística, Agencias de Medio Ambiente, Agencias de Energía, Ministerios de Economía, etc., así como también de la segunda edición del estudio recientemente publicado por el Centro de Actividad Regional para la Producción Limpia (CAR/PL): "Estado de la producción más limpia en los países del Plan de Acción para el Mediterráneo". En esta nueva edición se actualiza y complementa el estudio que el Centro publicó en el año 2001, analizándose los principales avances registrados en los países mediterráneos en relación con la adopción de normativas, programas y planes de acción para la prevención de la contaminación y el fomento de la producción más limpia.

Se estudian a continuación los distintos países de la región agrupados en tres subregiones (Sur, Norte y Este), no estando revisada ni aprobada esta información por los Puntos Focales Nacionales de cada país por cuestiones prácticas.

2.1. PAÍSES DEL SUR DEL MEDITERRÁNEO

Este grupo engloba a Argelia, Egipto, Líbano, Libia, Marruecos, Siria y Túnez, países todos miembros de la Liga de Estados Árabes y con características específicas comunes, a pesar de las diferencias políticas que puedan existir. Todos ellos comparten algunos principios culturales e idiomas similares que facilita la acción común.

Varios de los aspectos principales de esta subregión son la modernización de la industria existente, el desarrollo del Derecho ambiental y del sistema legislativo, la adopción de planes de acción ambiental en el ámbito nacional y la instauración de centros nacionales para la producción más limpia que respalden la estrategia adoptada por cada país.

Industria y medio ambiente

A lo largo de las tres últimas décadas los países del sur del Mediterráneo han experimentado mejoras en cuanto a cuestiones de salud, la educación y el bienestar. Sin embargo, este desarrollo se ha visto influenciado negativamente por un aumento de la presión de la población, la recesión económica y los conflictos armados.

El rápido crecimiento de la población de los países del sur del Mediterráneo, unido al aumento de las actividades humanas, especialmente en las zonas urbanas, incrementa tanto la presión sobre el entorno, como la producción de residuos y contaminación.

El producto interior bruto (PIB) de los países del sur del Mediterráneo ha crecido considerablemente en la última década. La mayoría de países han puesto en marcha reformas y reestructuraciones económicas, fomentan la economía de mercado, la descentralización y han logrado reducir los índices de inflación.

El peso de la industria en estos países es considerable; representa más del 25,5% del PIB total de la subregión (sin incluir la extracción de crudo). La industrialización supone una importante fuente de ingresos para los estados gracias al comercio de sus productos, la creación de puestos de trabajo y la aportación de valor añadido sobre los productos primarios.

La estructura industrial de los países del Sur del Mediterráneo tiene algunos rasgos comunes:

- El desarrollo industrial de los países del sur del Mediterráneo se basa principalmente en la explotación de fuentes de energía naturales no renovables. El petróleo y el gas que se extraen en Libia, Argelia y Egipto han adquirido gran importancia, tanto desde el punto de vista de la exportación como del de las industrias de gran consumo energético y valor añadido que han proliferado en la zona.
- Además de centrarse en el petróleo y el gas, los países del sur del Mediterráneo muestran tendencia a concentrarse en otras actividades de extracción o de procesamiento de materias primas propias como, por ejemplo, fosfatos y otros minerales en Marruecos, o la industria agrícola en Siria.
- La presencia de industrias productoras de bienes de equipo es relativamente escasa a pesar de la importancia que tendría potenciar este sector en países como Egipto, Marruecos y Túnez.
- Por último, las exportaciones de los productos fabricados siguen siendo muy limitadas y el déficit de la balanza comercial muy alto. Con todo, la situación podría cambiar si se impulsasen nuevas políticas de fomento de las exportaciones.

A pesar de los recientes intentos por diversificar el tejido industrial, asignando importantes recursos de los presupuestos nacionales a la industria y a las infraestructuras que necesita, el comportamiento del sector manufacturero en los países del sur del Mediterráneo no ha sido satisfactorio. Este hecho responde a la tendencia dominante a importar bienes, a la falta de estrategias de desarrollo industrial aplicadas, a la protección artificial de la industria nacional y a la falta de cooperación en materia comercial e industrial entre los distintos países que componen esta subregión.

La minería y el procesamiento de minerales y metales industriales han crecido, como también lo ha hecho la extracción de combustible fósil.

Países como Egipto, Siria, Túnez y Marruecos, que tienen economías diversificadas, siguen centrándose en las industrias tradicionales como las de producción de alimentos, cemento y textiles.

Pocos países han podido establecer industrias competitivas mediante la introducción de tecnologías modernas. Además de que en muchos de esos países la industrialización sigue potenciándose mediante políticas incompatibles con el concepto de sostenibilidad.

El modelo de desarrollo industrial que se ha venido aplicando en los países del sur del Mediterráneo ha contribuido a la aparición de «puntos negros de contaminación» que han causado un importante deterioro ambiental y la sobrecarga de las infraestructuras públicas para la protección del medio ambiente en las grandes ciudades.

En los países con un nivel de industrialización comparativamente mayor (por ejemplo Egipto, Marruecos, Túnez o Siria), los problemas ambientales son todavía más serios como consecuencia de:

- Tratamientos inadecuados al final de línea, e incorrecta manipulación y eliminación de los residuos peligrosos;

- dificultad de controlar los efluentes y emisiones industriales debido a la falta de instrumentos y personal cualificado;
- falta de predisposición por parte de la mayoría de empresas contaminantes a invertir en medidas de disminución de la contaminación;
- falta de personal especializado y formado para gestionar el funcionamiento de las instalaciones de tratamiento de residuos.

No obstante, en la actualidad la industria está reconociendo la necesidad de evitar o reducir la generación de residuos a través de las nuevas tecnologías de prevención de la contaminación. Esta tendencia ha logrado mejorar paulatinamente las conductas de producción y consumo.

Marco político y legal

La legislación ambiental de todos los países del sur del Mediterráneo ha sido ampliamente revisada y modificada en los últimos años. En general, los países de la subregión adoptan una ley ambiental general (marco) que se complementa con normas sectoriales. Todos ellos han aprobado leyes de control de la contaminación industrial de las aguas que protegen directa o indirectamente el entorno marino y la mayoría de ellos han aprobado también las normativas sobre Evaluación del Impacto Ambiental (EIA) en los sistemas de concesión de permisos.

En la mayoría de países, la modernización del marco legal ha propiciado la regulación legal de aspectos relacionados con la PL, principalmente a través de leyes sobre residuos y de la introducción de nuevos requisitos ambientales en el proceso de obtención de permisos.

Es el caso, por ejemplo, de la Ley de Residuos de Argelia o de los requisitos de minimización de residuos establecidos en la legislación egipcia; la PL también figura en el proyecto de ley sobre residuos de Marruecos. La revisión del marco legal ha servido a Túnez para incluir requisitos más concretos para el ahorro energético e hídrico. Argelia también ha incluido medidas de prevención y reducción de la contaminación en origen y, como segunda opción, la valorización de los residuos generados.

No obstante, puede que se requiera de un determinado tiempo para lograr la completa aplicación de las leyes, ya que se necesita una estructura administrativa adecuada. Además de que el sector industrial tendrá mayor predisposición a someterse a una efectiva aplicación de la normativa si las medidas para el control de su cumplimiento van acompañadas de otras medidas proactivas como, por ejemplo, acuerdos voluntarios o incentivos económicos, existen pocos incentivos para adoptar la PL, aparte de evitar las posibles multas.

Líbano financia auditorías y ha aumentado el importe de los créditos favorables que concede para acelerar la adopción de nuevas tecnologías ambientales, y, entre otras cosas, la modernización ambiental.

En Siria también existen otros incentivos para industrias más limpias y para los inversores que invierten en modernización ambiental y en la adaptación a tecnologías más limpias.

En algunos países se están poniendo en marcha acuerdos e instrumentos voluntarios para aumentar la concienciación del sector industrial e incrementar su responsabilidad ambiental. En este sentido, Marruecos ha implantado el programa de «Responsible Care», que ha sido adoptado por algunas industrias, y en Argelia se están impulsando y dando a conocer mejor los sistemas de gestión ambiental y las auditorías ambientales.

En el marco internacional para la protección del medio ambiente a través de la prevención de la contaminación, todos los países del sur del Mediterráneo son miembros del Convenio de Basilea sobre Residuos Peligrosos y la mayoría han firmado el Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes. En cuanto a la reducción de la capa de ozono, todos ellos han firmado o ratificado también el Protocolo de Montreal y sus modificaciones, a excepción de la de

Pekín de 1999. Por lo que respecta al cambio climático, Argelia, Egipto, Marruecos y Túnez han ratificado el Protocolo de Kyoto.

En el marco del Plan de Acción para el Mediterráneo, y respecto a los protocolos centrados principalmente en las actividades situadas en tierra, todos los países del sur del Mediterráneo han ratificado el Protocolo para la Protección del Mar Mediterráneo contra la Contaminación Causada por Fuentes y Actividades Terrestres, aunque sólo algunos han aceptado las modificaciones de 1995, que incluyen, entre otros, los principios de precaución y de «quien contamina, paga», las mejores técnicas disponibles (MTD), las mejores prácticas ambientales (MPA) y tecnologías más limpias, los cuales deben tenerse en cuenta al elaborar los planes nacionales de lucha contra la contaminación.

2.1.1. ARGELIA

Introducción

Argelia es un país árabe ubicado en el norte de África, a orillas del Mediterráneo. Tiene una superficie total de 2.381.740 km² y una población aproximada de 31,3 millones de habitantes.

La gran importancia en la economía de este país reside en el sector de los hidrocarburos. Argelia posee la quinta mayor reserva de gas natural del mundo, es el segundo país exportador de gas y ocupa el decimocuarto puesto en reservas de crudo.

En los últimos años, la economía argelina ha registrado un crecimiento anual aproximado del 4 %, no obstante, se ha logrado reducir poco la elevada tasa de desempleo y mejorar el nivel de vida de la población de manera sustancial. El gobierno pretende continuar sus esfuerzos para diversificar la economía y atraer inversiones nacionales y extranjeras en sectores distintos al energético.

Tabla 2.1.1. Indicadores de la situación socioeconómica de Argelia.

Superficie	10 ⁶ km ²	2,4
Población	millones	31,3
Esperanza de vida	años	73
Energía per cápita	equiv. kg de petróleo	956
PIB actual	10 ⁹ \$	212,3
Crecimiento del PIB	%	6,1
PPA de PIB per cápita	\$	6.600

*Fuente: Grupo del Banco Mundial y global EDGE (2004)
(PPA = paridad de poder adquisitivo)*

Industria y medio ambiente

Argelia ha experimentado un crecimiento económico significativo durante las últimas cuatro décadas, el cual ha estado marcado por un desarrollo importante de la industria. Como consecuencia, un gran número de industrias se ha establecido en el norte del país, cerca de las grandes zonas urbanas y prácticamente no se ha tenido en cuenta el desarrollo sostenible.

Las tecnologías se eligieron exclusivamente en función del criterio de la productividad y, con frecuencia, a expensas de la contaminación, por lo que Argelia se enfrenta hoy en día a un grave problema de contaminación. La industria, y en concreto el sector de la minería y de las industrias petroquímica, química y metalúrgica, es la principal responsable de la contaminación del país.

La industria se concentra en las zonas litorales (menos del 2 % de la superficie total del país), donde también existe una mayor densidad de población (alrededor de las grandes zonas urbanas industrializadas y de las ciudades y, sobre todo, en Argel, Orán, Constantina, Annaba y Skikda).

El sector industrial privado se compone, en su inmensa mayoría, de pequeñas y medianas empresas (PYMES), cuyo número oscila entre las 25.000 y las 35.000 unidades. El 93 % de ellas son microempresas con menos de 10 trabajadores. Dichas PYMES se encuentran en todas las ramas de actividad, sobre todo en los sectores del textil y la confección, de la curtición y la zapatería, de los materiales de construcción, de la agroalimentación y de las industrias de transformación, y generan gran cantidad de residuos y aguas residuales.

Los principales impactos de la industria en el medio ambiente en Argelia son:

- La degradación de la calidad del aire (emisiones de contaminantes atmosféricos, como los gases de combustión, humo y polvo, vapores de metales pesados, etc.);
- la contaminación de los recursos hídricos (ríos, acuíferos, presas, aguas costeras, etc.);
- la generación de residuos industriales;
- las principales áreas de actividad industrial del país se extienden a lo largo de la zona litoral.

Industria del sector del cemento

El sector del cemento, como muchos otros sectores de la economía argelina, está cada vez más dirigido hacia la privatización. Este país está realizando esfuerzos para atraer potenciales inversionistas, lo que mejorará las oportunidades dentro del sector.

El consumo de cemento en Argelia creció en una media del 6,1 por ciento entre 1997 y 2003; consecuencia de un importante desarrollo del sector de la construcción del país. La construcción de nuevas viviendas y de mayor número de infraestructuras está contribuyendo a un aumento de la demanda nacional de cemento, por lo que se espera que ésta crezca con una media anual del 6,5 por ciento al menos hasta el 2009.

En cuanto a la producción de cemento, la producción local en el 2002 fue de 8,95 Mt y creció hasta 9 Mt en el 2003. La apertura de una nueva planta de 2,1 Mt de capacidad en el 2004, por la Compañía Argelina de Cemento (ACC), ha producido un aumento importante en la producción nacional.

En los últimos años se ha llevado a cabo la construcción de nuevas plantas. En la actualidad Argelia tiene 15 plantas integrales y presenta una capacidad de producción total de cemento de 14,5 Mt.

Las exportaciones de cemento son nulas. Por el contrario las importaciones juegan un papel importante dentro del sector, siendo Egipto el mayor proveedor de cemento y clínker de Argelia, seguido por Turquía. Las importaciones tuvieron su valor más alto en el 2003 con 2,5 Mt pero disminuyeron hasta 2 Mt en el 2004. Se espera que las importaciones continúen disminuyendo a partir de 2005 pero manteniendo, aun y así, una importante influencia dentro del sector.

Tabla 2.1.2. Datos principales de la industria del cemento en Argelia. Año 2004.

Producción (kt/año)	10.500
Consumo de cemento (kt/año)	12.000
Número de plantas integrales	15
Nº de empleados (aprox.)	6.029
Capacidad de producción de hornos de clínker kt/año (*)	12.500
Capacidad de prod. de cemento kt/año	14.500

Fuente. *Global Cement Report 2005*
(*). Año 2002. *World Cement Directory*

Tabla 2.1.3. Tipos de horno utilizados.

Número de hornos vía seca	16
Número de hornos vía húmeda	3
Número de hornos vía semi-húmeda	0
Número de hornos vía semi-seca	0
Número de hornos verticales	0
Total hornos	19

Fuente: *World Cement Directory 2002*

2.1.2. EGIPTO

Introducción

Egipto es un país árabe ubicado en el norte de África, a orillas del Mediterráneo. Tiene una superficie total de 1.001.450 km² y una población aproximada de 66,4 millones de habitantes.

Además de la capacidad agrícola del valle y el delta del Nilo, entre los recursos naturales de Egipto se cuentan el petróleo, el gas natural, los fosfatos y el mineral de hierro. El país cuenta con gas natural suficiente para satisfacer la demanda interna durante muchos años.

El sector industrial sigue estando dominado por la empresa pública, que controla prácticamente toda la industria pesada, si bien se ha iniciado un proceso de reformas y privatización del sector público cuyo fin es aumentar las oportunidades del sector privado. La construcción, los servicios no financieros y el mercado interior están privatizados en su mayor parte. Ello ha incentivado un crecimiento constante del PIB y de la tasa de crecimiento anual.

Egipto es la segunda economía del mundo árabe. La economía está dominada por el sector servicio, el cual cuenta con prácticamente la mitad del PIB.

Tabla 2.1.4. Indicadores de la situación socioeconómica de Egipto.

Superficie	10 ⁶ km ²	1,0
Población	millones	77,5
Esperanza de vida	años	71
Energía per cápita	equiv. kg de petróleo	726
PIB actual	10 ⁹ \$	316,3
Crecimiento del PIB	%	4,5
PPA de PIB per cápita	\$	4.200

Fuente: Grupo del Banco Mundial y global EDGE (2004)
(PPA = paridad de poder adquisitivo)

Industria y medio ambiente

La industria es uno de los principales sectores que están contribuyendo a impulsar la economía egipcia. Incluyendo las manufacturas y la minería, el sector industrial egipcio aporta alrededor del 20 % del PIB y emplea aproximadamente a un 14 % de la mano de obra. La capacidad de fabricación de Egipto se concentra en relativamente pocos sectores industriales. Siete sectores representan más del 80 % de los establecimientos. Los tres mayores son el sector de la alimentación y las bebidas, el textil y el de la industria química, los de mayor antigüedad en Egipto. Tras ellos se sitúan el sector de los minerales no metálicos, la producción de metales, productos químicos y los metales básicos.

Egipto es altamente dependiente de la importación; por ejemplo, necesita importar prácticamente la totalidad del consumo de madera y papel.

En Egipto, la distribución geográfica de la industria es muy desigual. En la actualidad, el 41 % de la producción industrial se concentra en El Gran Cairo, el 17 % en el delta del Nilo, el 16,8 % en Alejandría y el 14,2 %, en la zona del canal de Suez. El 11 % restante de la producción industrial se sitúa en el Alto Egipto. Este reparto desigual ha impulsado al país a embarcarse en un nuevo plan para incentivar la inversión industrial en nuevas comunidades ubicadas en las zonas no agrícolas del país.

El sector público, dominado por las grandes empresas, ostenta un lugar predominante en las industrias química y farmacéutica, en la ingeniería y en las eléctricas. Además, posee grandes fábricas textiles y refinerías de azúcar.

El sector privado, dominado por las pequeñas y medianas empresas (PYMES), engloba empresas dedicadas a la alimentación y las bebidas, a los productos lácteos, al hilado y tejido y a diversas artesanías. Algunas de las empresas del sector privado con mayores beneficios son la producción de herramientas ligeras y consumibles eléctricos y la estampación de tejidos y confección.

Alejandría es una zona fuertemente industrializada donde se produce: papel, metal, productos químicos, productos farmacéuticos, plásticos, productos alimentarios, aceites, detergentes y petróleo. La mayoría de los residuos que genera esta industria se vierten en el lago Mariout, al que también van a parar las aguas residuales tratadas procedentes de la estación depuradora de Alejandría.

Industria del sector del cemento

Debido a la mala situación económica del país el consumo de cemento ha ido disminuyendo en estos últimos años. El consumo nacional de cemento en el año 2002 fue de 27,2 Mt y desde entonces ha ido disminuyendo hasta alcanzar el valor de 24,5 Mt en el año 2004. Entre el 85-95 por ciento de todas las ventas de cemento en Egipto son todavía en forma de cemento embolsado;

hecho indicativo de que el principal demandante de cemento es la actividad del sector privado de la construcción. En términos de tipos de cemento, la gran mayoría de las ventas son de Cemento Pórtland Ordinario (OPC).

A finales del año 2004 la producción egipcia de cemento constaba de 14 plantas con 2 plantas de cemento blanco; lo que supone una capacidad anual de 33 Mt de clínker de cemento. En la actualidad, el mercado del cemento en Egipto busca una continua expansión y crecimiento del sector.

Egipto en el año 2003 figuró entre los cinco países mayores exportadores de cemento, con un valor de 7,4 Mt, lo que supuso un crecimiento del 5,4 por ciento respecto al año anterior. El número de compañías egipcias exportadoras de cemento creció de 6 en el año 2002 a 13 a finales del año 2003. Son muchos los mercados abastecidos en todo el mundo; en Oriente Medio cabe destacar Yemen y Sudán; y en Europa: España e Italia; incluso es proveedor de países del oeste de África y Estados Unidos.

Puesto que la producción es muy superior al consumo nacional, las importaciones de cemento son mínimas, muy diferente a la situación de los años 90 en los que se importaba unas 5 Mt aproximadamente para el consumo local. En la actualidad este valor no llega a 0,1 Mt.

Tabla 2.1.5. Datos principales de la industria del cemento en Egipto. Año 2004.

Producción (kt/año)	31.000
Consumo de cemento (kt/año)	24.500
Número de plantas integrales	14
Nº de empleados (aprox.)	6.029
Capacidad de producción de hornos de clínker kt/año	33.000
Capacidad de prod. de cemento kt/año	38.000

Fuente. *Global Cement Report 2005*

Tabla 2.1.6. Tipos de horno utilizados.

Número de hornos vía seca	27
Número de hornos vía húmeda	12
Número de hornos vía semi-húmeda	5
Número de hornos vía semi-seca	1
Número de hornos verticales	0
Total hornos	45

Fuente: *World Cement Directory 2002*

2.1.3. LÍBANO

Introducción

Líbano es un país árabe ubicado en la región del Oriente Medio y que linda con el mar Mediterráneo. Tiene una superficie total de 10.400 km² y una población aproximada de 4,4 millones de habitantes.

En Líbano opera un competitivo sistema de libre mercado y el país posee una fuerte tradición comercial de *laissez-faire*. La economía libanesa está principalmente orientada a los servicios; los principales sectores en crecimiento son la banca y el turismo.

Tabla 2.1.7. Indicadores de la situación socioeconómica de Líbano.

Superficie	10 ³ km ²	10,4
Población	millones	3,82
Esperanza de vida	años	72,63
Energía per cápita	equiv. kg de petróleo	1.169
PIB actual	10 ⁹ \$	18,83
Crecimiento del PIB	%	4
PPA de PIB per cápita	\$	5.000

Fuente: Grupo del Banco Mundial y global EDGE (2004)
(PPA = paridad de poder adquisitivo)

Industria y medio ambiente

En 1999 se identificaron más de 22.000 unidades industriales en el Líbano, según el Ministerio de Industria, y 29.282 según la Administración Central de Estadísticas, cifra que representaba un aumento de aproximadamente un 50 % desde principios de la década de los noventa. Más del 90 % de estas unidades son microindustrias con menos de diez empleados.

La industria se concentra en el Gran Beirut y en el monte Líbano. Debido a la falta de planificación urbanística, la mayor parte de las industrias pequeñas y microindustrias se ubican en zonas residenciales, fuera de las zonas industriales (el 95,6 % de las industrias en el Gran Beirut y el 75,3 % en el monte Líbano). No obstante, las grandes empresas (dedicadas al procesado de alimentos, al textil, a los productos químicos, y al cemento y los materiales de construcción), en general, sí están emplazadas en las zonas industriales.

Los datos indican que la recuperación del sector industrial ha sido sorprendente, pese a los estragos causados por la guerra. Está previsto que el crecimiento del sector durante el período 2001-2010 sea de entre un 8 y un 10 %.

Aproximadamente el 89 % de las industrias pertenece a siete subsectores principales: alimentación y bebidas (20 %), fabricación de metales (16 %), minerales no metálicos (12 %), mobiliario (11 %), tejido y acabado de textiles (16 %), productos de madera (10 %) y curtición (6 %).

La mayoría de las instalaciones industriales no están equipadas con instalaciones para el control de la contaminación y vierten sus efluentes contaminados en las aguas costeras y superficiales, lo que entraña un grave riesgo de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas. Además, se producen vertidos descontrolados de residuos industriales sólidos y emisiones a la atmósfera.

Industria del sector del cemento

El consumo de cemento en el Líbano muestra una continua reducción debido a la deuda estatal existente, lo cual se refleja en la caída de un 50 por ciento del consumo per cápita, pasando de 1.200 kg en 1997 a 681 kg en la actualidad. El mercado del cemento está relativamente poco sofisticado, el 80 por ciento del cemento que se usa es en bolsas y el 20 por ciento restante en forma de granel.

Actualmente Líbano tiene cuatro plantas de cemento, lo que supone una producción total de 4,8 Mt anuales. Esta producción es mayor al consumo y supone un exceso de capacidad del país. El gobierno libanés prohibió las importaciones en 1999 y en cuanto a la exportación en este sector el Líbano exportó 1 Mt a Iraq en 2004 y lucha por mantener ese nivel y abrir la exportación a otros países, por lo que se proyecta un crecimiento en las exportaciones del país en este sector.

Tabla 2.1.8. Datos principales de la industria del cemento en Líbano. Año 2004.

Producción (kt/año)	2.592
Consumo de cemento (kt/año)	12.000
Número de plantas integrales	4
Nº de empleados (aprox.)	6.029
Capacidad de producción de hornos de clínker kt/año (*)	4.416
Capacidad de prod. de cemento kt/año	4.800

Fuente. *Global Cement Report 2005*
(*) Año 2002. *World Cement Directory*

Tabla 2.1.9. Tipos de horno utilizados.

Número de hornos vía seca	8
Número de hornos vía húmeda	0
Número de hornos vía semi-húmeda	0
Número de hornos vía semi-seca	0
Número de hornos verticales	0
Total hornos	8

Fuente: *World Cement Directory 2002*

2.1.4. YAMAHIRIYA ÁRABE LIBIA POPULAR

Introducción

Libia es un país árabe ubicado en el norte de África a orillas del Mediterráneo. Tiene una superficie total de 1.759.000 km² y una población aproximada de 5,5 millones de habitantes.

El Gobierno domina la economía de orientación socialista de Libia a través del control total de los recursos petrolíferos del país, que representan aproximadamente el 95 % de los ingresos por exportación y el 30 % del producto interior bruto. Los ingresos generados por el petróleo y una población no muy elevada hacen posible que Libia disfrute de uno de los PIB (y de paridad de poder adquisitivo del PIB) más elevados de África. A pesar de los esfuerzos efectuados por diversificar la economía e incentivar la participación del sector privado, el control generalizado de los precios, los créditos, el comercio y las divisas obstaculiza el crecimiento.

Los sectores de la construcción y de la producción no relacionada con el petróleo, que representan aproximadamente el 20 % del PIB, han pasado de estar representados casi en exclusiva por las industrias de procesado de productos agrícolas a englobar también petroquímicas, siderurgias e industrias del aluminio.

Tabla 2.1.10. Indicadores de la situación socioeconómica de Libia.

Superficie	10 ⁶ km ²	1,76
Población	millones	5,7
Esperanza de vida	años	76,5
Energía per cápita	equiv. kg de petróleo	3.107
PIB actual	10 ⁹ \$	37,48
Crecimiento del PIB	%	4,9
PPA de PIB per cápita	\$	6.700

Fuente: Grupo del Banco Mundial y global EDGE (2004)
(PPA = paridad de poder adquisitivo)

Industria y medio ambiente

Como se ha mencionado anteriormente, el desarrollo industrial de Libia ha dependido en gran medida del sector del petróleo, tanto por lo que respecta a los ingresos generados por las inversiones como a la importación de materias primas. Entre las actividades industriales se cuentan las relacionadas con el petróleo (exploración, producción, transporte y comercio con productos derivados del petróleo), además de los sectores de la siderurgia, los fertilizantes, el cemento, las sustancias químicas y el tratamiento de los alimentos.

Hasta principios de los años ochenta, la totalidad del sector industrial estaba planificada por el Gobierno, el cual había asumido el control sobre los aspectos de la producción industrial que se consideraban sensibles o de una envergadura no asequible para el sector privado del país. No obstante, en la actualidad, la política del Gobierno se inclina a liberar la industria, incluida la de transformación, de su dependencia de la propiedad y del control foráneos. El Gobierno concentra su atención en desarrollar las industrias petroquímicas y petrolíferas.

La industria del procesado de alimentos encabeza el sector de la producción, seguida por otras industrias de importancia, como las textiles, y las fábricas de fertilizantes y de equipamiento de ingeniería.

Aunque el vertido de efluentes industriales sin tratar, a los sistemas de alcantarillado es una práctica extendida entre las PYME de las ciudades libias, se considera que este hecho no origina problemas de contaminación graves. Las grandes instalaciones de refinerías de petróleo, petroquímicas, siderurgias, químicas, industrias de fertilizantes y de acabados textiles están ubicadas en su mayor parte a lo largo del litoral, particularmente en el golfo de Surt. Con frecuencia, estas industrias realizan vertidos de efluentes sin tratar a través de emisarios directos al Mediterráneo.

Industria del sector del cemento

Libia está empezando una prometedora fase de desarrollo y las nuevas inversiones de compañías internacionales proyectan el desarrollo de numerosas infraestructuras haciendo que el sector de la construcción sea uno de los más prósperos del país, lo que supone un importante crecimiento en los niveles de consumo nacional de cemento.

La capacidad de producción anual de cemento en Libia es de 6,5 Mt distribuida entre las siete plantas existentes de las que cuatro de ellas presentan una capacidad de 1 Mt, una de 800.000 t y otra de 350.000 t.

El consumo de cemento es muy parecido a la producción nacional del mismo, por lo que Libia tradicionalmente ha importado tan sólo pequeñas cantidades de cemento de Egipto. Otro de sus proveedores es Extremo Oriente.

Tabla 2.1.11. Datos principales de la industria del cemento en Libia. Año 2004.

Producción (kt/año)	3.500
Consumo de cemento (kt/año)	3.500
Número de plantas integrales	7
Nº de empleados (aprox.)	6.029
Capacidad de producción de hornos de clínker kt/año	6.100
Capacidad de prod. de cemento kt/año	6.500

Fuente. *Global Cement Report 2005*

Tabla 2.1.12. Tipos de horno utilizados.

Número de hornos vía seca	11
Número de hornos vía húmeda	0
Número de hornos vía semi-húmeda	0
Número de hornos vía semi-seca	0
Número de hornos verticales	0
Total hornos	11

Fuente: *World Cement Directory 2002*

2.1.5. MARRUECOS

2.1.5.1. Introducción

Marruecos es un país árabe ubicado en el norte de África, a orillas del Mediterráneo. Tiene una superficie total de 446.550 km² y una población aproximada de 32,725 millones de habitantes.

La economía marroquí está cada vez más diversificada. Marruecos posee importantes reservas minerales, un sector agrícola (pesca incluida) diversificado, una amplia industria turística y un sector de industrias de transformación en desarrollo (principalmente centrado en la confección).

Aproximadamente un tercio del sector de la industria de transformación está relacionado con los fosfatos y otro tercio, con la agricultura. El tercio restante se divide entre la industria textil, de confección y metalúrgica.

Desde los años ochenta, el Gobierno marroquí ha proseguido un programa de reformas económicas con el apoyo del Fondo Monetario Internacional y del Banco Mundial. En el transcurso de la última década, las reformas han contribuido a aumentar la renta per cápita, a disminuir la inflación y a estrechar el déficit contable. No obstante, el crecimiento de la población, la migración de las zonas rurales a las urbanas y el incremento de la mano de obra activa están contribuyendo a aumentar el desempleo urbano, pese al fuerte crecimiento económico y a la creación de nuevos puestos de trabajo.

Tabla 2.1.13. Indicadores de la situación socioeconómica de Marruecos.

Superficie	10 ⁶ km ²	0,45
Población	millones	32,72
Esperanza de vida	años	70,66
Energía per cápita	equiv. kg de petróleo	359
PIB actual	10 ⁹ \$	134,6
Crecimiento del PIB	%	4,4
PPA de PIB per cápita	\$	4.200

Fuente: Grupo del Banco Mundial y global EDGE (2004)
(PPA = paridad de poder adquisitivo)

Industria y medio ambiente

Marruecos posee una de las industrias mineras más importantes de África y su industria petrolífera constituye un subsector esencial de la economía del país. Por su parte, la industria química está registrando un nuevo auge gracias a la explotación de la riqueza de fosfatos.

En el sector paraquímico, la industria farmacéutica ostenta una posición destacada y el país es uno de los principales mercados de la industria de lubricantes africana. La industria textil y la de curtidos representan aproximadamente una cuarta parte de la producción industrial total. En cuanto al procesado de alimentos, las principales industrias son la producción de azúcar, la molienda de harina y los productos lácteos. Marruecos posee asimismo varias fábricas de cemento.

Con respecto a las actividades del sector de la producción, el desglose por subsectores es el siguiente:

- Industria agroalimentaria (35 %, con más de 1.641 empresas);
- industria química y paraquímica (33 %, con 1.963 empresas);
- industria del textil y de los curtidos (17 %, con 1.744 empresas);
- industria mecánica, eléctrica y electrónica (12 % correspondiente a las industrias eléctricas y mecánicas y 3 % a las electrónicas; más de 1.051 empresas en conjunto).

En Marruecos, el 95 % del entramado de fabricación está integrado por pequeñas y medianas empresas (PYMES). Más de 14.000 PYMES registradas se hayan distribuidas en centros urbanos y enclaves industriales del país, con aproximadamente un 50 % de las grandes instalaciones ubicadas en Casablanca, en la región de El Mohamma. Su contribución al PIB es de un 36 % y proporcionan el 52 % del total de empleo. La ubicación de las PYMES en zonas urbanas densamente pobladas tiene consecuencias negativas tanto para el entorno como su población.

Las actividades industriales, con especial incidencia de los sectores químicos y paraquímico, agroalimentario (azúcar y aceites vegetales), textil y curtidos, tienen impactos negativos en el medio y, en especial, en los recursos hídricos. La contaminación de las aguas superficiales provocada por las actividades industriales es elevada, en particular en las cuencas del Sebu y del Oum er-R'bia.

Industria del sector del cemento

El mercado del consumo de cemento de Marruecos creció en un 9,3 por ciento en 2003 hasta aproximadamente 9,3 Mt, situando el consumo per cápita alrededor de 300 kg. Esta situación responde al crecimiento de la actividad constructora, debido al desarrollo de la industria del turismo. Casablanca representa el mayor mercado de cemento del país, y proporciona el 15 por ciento del total consumido. En el sector del cemento de Marruecos predomina el cemento embolsado, pero con

el desarrollo de la industria marroquí está tomando importancia el uso del cemento en forma de granel.

La capacidad de producción de cemento es de 11 Mt anuales distribuida en 12 plantas. No obstante, debido a un aumento continuado en el consumo de cemento por las causas explicadas en el párrafo anterior, se estima alcanzar una producción de 12,65 Mt en el 2008.

Las exportaciones de cemento disminuyeron un 21 por ciento los años 2003 y 2004 por el aumento de la demanda nacional. España, en particular las Islas Canarias, es el principal mercado al que Marruecos exporta clínker; mientras que a países africanos como Mauritania, La Gambia y Guinea exporta cemento.

En el ámbito de las importaciones, predomina la importación de clínker de cemento blanco desde España, Grecia y Turquía.

Tabla 2.1.14. Datos principales de la industria del cemento en Marruecos. Año 2004.

Producción (kt/año)	9.900
Consumo de cemento (kt/año)	9.700
Número de plantas integrales	12
Nº de empleados (aprox.)	6.029
Capacidad de producción de hornos de clínker kt/año (*)	7.600
Capacidad de prod. de cemento kt/año	11.000

Fuente. *Global Cement Report 2005*
(*) Año 2002. *World Cement Directory*

Tabla 2.1.15. Tipos de horno utilizados.

Número de hornos vía seca	10
Número de hornos vía húmeda	1
Número de hornos vía semi-húmeda	2
Número de hornos vía semi-seca	2
Número de hornos verticales	0
Total hornos	15

Fuente: *World Cement Directory 2002*

2.1.6. REPÚBLICA ÁRABE SIRIA

Introducción

Siria es un país árabe ubicado en el Oriente Medio y que linda con el mar Mediterráneo. Tiene una superficie total de 185.180 km² y una población aproximada de 18,45 millones de habitantes.

Es un país en vías de desarrollo, de rentas intermedias y con una economía diversificada basada en la agricultura, la industria y un sector energético en expansión.

A pesar de las importantes reformas y proyectos de desarrollo iniciados a principios de los 90, la economía Siria sigue influenciada negativamente por unas empresas públicas de escaso rendimiento, un nivel de inversiones escaso y una productividad industrial y agrícola relativamente bajas. La industria del petróleo ha representado casi las tres cuartas partes de los ingresos procedentes de la exportación.

El Gobierno ha reconducido sus prioridades de desarrollo económico, desde la expansión industrial hasta diversos sectores agrícolas, con el objetivo de lograr la autosuficiencia, potenciar los ingresos en concepto de exportaciones y contener la emigración de zonas rurales.

Tabla 2.1.16. Indicadores de la situación socioeconómica de Siria.

Superficie	10 ³ km ²	185
Población	millones	18,45
Esperanza de vida	años	70,03
Energía per cápita	equiv. kg de petróleo	1.137
PIB actual	10 ⁹ \$	60,44
Crecimiento del PIB	%	2,3
PPA de PIB per cápita	\$	3.400

*Fuente: Grupo del Banco Mundial y global EDGE (2004)
(PPA = paridad de poder adquisitivo)*

Industria y medio ambiente

El tejido industrial sirio está muy diversificado; los sectores más importantes, controlados predominantemente por el Estado, son el alimentario, el textil, el químico, el de ingeniería y el del cemento. Con todo, el sector privado ha empezado a despuntar en las industrias textiles, alimentaria y de cemento.

Siria considera que la calidad es un factor decisivo para sobrevivir a la competencia del comercio industrial mundial, por lo que ha prestado especial atención a dar a conocer los conceptos de la Gestión Total de la Calidad (GTC) y la Producción más Limpia (PL) y fomentado la obtención de certificados ISO por parte de las industrias nacionales.

La mayor parte de las industrias son PYMES, y las principales zonas de actividad se centran en los alrededores de Damasco, Alepo y Homs.

Los principales contaminantes generados por estas industrias son aguas residuales y emisiones a la atmósfera. Los residuos sólidos no se consideran una prioridad porque las empresas los reciclan y reutilizan o los venden para otros usos.

El tratamiento al que hay que someter a los residuos que generan es muy caro para este tipo de empresas, que no pueden costeárselo sin ayuda económica o incentivos de algún tipo. Por ello, el tratamiento de los contaminantes depende de la disponibilidad de técnicas de bajo coste en el contexto de las normativas y exigencias existentes.

El Gobierno actual ha demostrado su compromiso con un aumento significativo de las partidas previstas para la conservación del entorno y los servicios públicos correspondientes en los presupuestos de los ministerios e instituciones implicados.

Industria del sector del cemento

En Siria, a fecha del 2004, el consumo de cemento per cápita era de 304 kg, valor que es menor en la mitad este de la región que en la actualidad está experimentando un proceso de construcción emergente. Datos oficiales muestran que el consumo de cemento en Siria alcanzó en el 2004 el pico histórico de 6,4 Mt, superior a los 5,5 Mt del año anterior.

La producción de cemento base de Siria es de 8 plantas operativas controladas por 9 compañías estatales que se reparten una producción total de clínker de cemento de 4,83 Mta. Se espera que este año se alcance el valor de 5 Mt.

El proceso predominante en la producción de cemento es el proceso en vía seca, proceso a partir del cual se obtiene un ahorro energético significativo. No obstante, la mayor parte de sus líneas de producción no están equipadas con sistemas modernos de control de la contaminación.

La industria del cemento ha sido hasta ahora un monopolio estatal; en la actualidad se está abriendo al sector privado, lo que atrae un enorme interés por parte de inversores extranjeros de Arabia Saudí, Egipto, Turquía y China.

OMRAN es la única compañía autorizada para la importación de cemento, sus importaciones a Líbano, Jordania, Egipto y Turquía están aumentando estos últimos años. En el año 2004, alcanzaron el valor de 1,2 Mt, pero, sin embargo, no satisfacen la demanda existente.

Tabla 2.1.17. Datos principales de la industria del cemento en Siria. Año 2004.

Producción (kt/año)	5.200
Consumo de cemento (kt/año)	6.400
Número de plantas	8
Nº de empleados (aprox.)	6.775
Capacidad de producción de hornos de clínker kt/año	4.830
Capacidad de prod. de cemento kt/año (*)	6.010

Fuente. *Global Cement Report 2005*
(*) Año 2002. *World Cement Directory*

Tabla 2.1.18. Tipos de horno utilizados.

Número de hornos vía seca	12
Número de hornos vía húmeda	6
Número de hornos vía semi-húmeda	0
Número de hornos vía semi-seca	0
Número de hornos verticales	0
Total hornos	18

Fuente: *world cement directory 2002*

2.1.7. TÚNEZ

Introducción

Túnez es un país árabe ubicado en el norte de África, a orillas del mar Mediterráneo. Tiene una superficie total de 163.610 km² y una población de 10,07 millones de habitantes.

Históricamente, el crecimiento económico de Túnez ha dependido del petróleo, de los fosfatos, de la agricultura y del turismo. Las políticas económicas del Gobierno tuvieron un escaso éxito durante los primeros años de independencia. En 1986, el Estado lanzó un programa de ajuste estructural destinado a liberalizar los precios, reducir las tarifas y reorientar Túnez hacia una economía de mercado.

Desde la aplicación del programa de estabilización, el crecimiento de la producción interior, medida en función del crecimiento real del PIB, aumentó del 2,8 % registrado en el periodo 1982-1986 al 4,8 % registrado entre 1991 y 2001. Paralelamente, la inflación y el déficit en cuenta corriente decrecieron de modo significativo.

En 1990, Túnez se adhirió al Acuerdo General sobre Aranceles Aduaneros y Comercio (GATT). Además, hasta el año 2002, el Gobierno privatizó 163 empresas estatales.

El desempleo continúa siendo muy elevado para la economía del país (con una tasa de un 15 % de la población activa) y se está viendo agravado por el rápido crecimiento de la mano de obra.

Tabla 2.1.19. Indicadores de la situación socioeconómica de Túnez.

Superficie	10 ³ km ²	163,6
Población	millones	10,07
Esperanza de vida	años	74,89
Energía per cápita	equiv. kg de petróleo	825
PIB actual	10 ⁹ \$	70,88
Crecimiento del PIB	%	5,1
PPA de PIB per cápita	\$	7.100

*Fuente: Grupo del Banco Mundial y global EDGE (2004)
(PPA = paridad de poder adquisitivo)*

Industria y medio ambiente

El sector de la producción ha pasado a ser uno de los más dinámicos de la economía tunecina, mostrando una clara tendencia hacia la privatización de la industria, enmarcada en los programas de reestructuración económica. Aunque el sector de los servicios domina la economía, la industria continúa siendo uno de los principales contribuidores al crecimiento del PIB (cerca del 20 % en 1999), la creación de empleo y la generación de moneda fuerte resultado de la exportación.

Según los datos de los que se disponen, en 2001 el sector industrial tunecino estaba constituido por 5.262 empresas con 10 o más empleados, 2.292 de las cuales se dedicaban íntegramente a la exportación. Respecto a los sectores industriales, el sector textil suponía un 41 % de la industria del país, seguido del sector de la elaboración de alimentos con un 15 %, y del sector de los materiales de construcción, cerámica y vidrio con un 8 %.

Los principales problemas de contaminación están vinculados a un consumo desmedido de agua y energía y con la generación sustancial de residuos sólidos.

Industria del sector del cemento

El sector del cemento de Túnez, al igual que otros sectores de la economía, está dirigido a un proceso de privatización.

Túnez actualmente lleva a cabo un programa de construcción de autovías para la unión del centro con rutas costeras además de la construcción de otras infraestructuras, lo que constituye un importante motor para la industria del cemento.

El consumo de cemento en 2003 fue de 5 Mt, con un consumo per cápita de 500 kg; por lo que Túnez se encuentra, en cuanto a consumo de cemento, por delante de otros países africanos incluyendo Marruecos y Egipto. En el 2004 la demanda de consumo de cemento creció hasta 5,3 Mt y se espera que crezca anualmente entre un 4-8 por ciento en un corto/medio plazo de tiempo.

Túnez cuenta en la actualidad con seis plantas de cemento, cuatro de las cuales están privatizadas y se encuentran en fase de mejora. La capacidad de producción de clínker de Túnez es de 6,3 Mt anuales, aunque se espera que este valor crezca hasta 6,7 Mt cuando la mejora de las cuatro plantas privatizadas esté totalmente completada entre 2005 y 2006.

Las importaciones en la actualidad son mínimas, por lo que Túnez ha pasado, desde 2003, de ser un importador de cemento y clínker, a ser un nuevo exportador.

Tabla 2.1.20. Datos principales de la industria del cemento en Túnez. Año 2004.

Producción (kt/año)	6.000
Consumo de cemento (kt/año)	5.300
Número de plantas	6
Nº de empleados (aprox.)	3219
Capacidad de producción de hornos de clínker kt/año	6.300
Capacidad de prod. de cemento kt/año	7.100

Fuente. *Global Cement Report 2005*

Tabla 2.1.21. Tipos de horno utilizados.

Número de hornos vía seca	10
Número de hornos vía húmeda	3
Número de hornos vía semi-húmeda	0
Número de hornos vía semi-seca	0
Número de hornos verticales	0
Total hornos	13

Fuente: *World Cement Directory 2002*

2.2. PAÍSES DEL NORTE DEL MEDITERRÁNEO

Los cinco países del norte del Mediterráneo que componen este grupo - Grecia, Francia, Italia, Mónaco y España - se consideran estados europeos de renta elevada y todos, a excepción de Mónaco, son miembros de la Unión Europea (UE). Estos países comparten la obligación de cumplir la normativa de la UE y de adaptar sus directivas al Derecho nacional a corto plazo. Asimismo, están obligados a adoptar las medidas necesarias para satisfacer los requisitos de aquella normativa europea.

Industria y medio ambiente

El estado del medio ambiente en la UE ha ido empeorando de forma constante en las últimas décadas. Cada año se generan alrededor de 2.000 millones de toneladas de residuos y esta cifra está aumentando. Por todo ello, la protección del medio ambiente es uno de los principales retos a que se enfrenta Europa.

Como en los demás Estados miembros de la UE, el sector industrial en los países de la subregión norte del Mediterráneo es muy heterogéneo, presenta grandes diferencias entre regiones y a menudo se concentra cerca de zonas urbanas muy pobladas. La industria se ha visto forzada a invertir en equipos de tratamiento ambiental durante muchos años, y también a adoptar tecnologías más respetuosas con el medio ambiente. Una de las principales actividades industriales es la producción de automóviles, lo que representa una diferencia cuantitativa y cualitativa respecto a otras zonas del Mediterráneo y adquiere especial importancia al analizar el efecto de la cadena de suministros, que facilita la difusión de la PL y los sistemas de gestión ambiental.

Marco político y legal

Como Estados miembros de la UE, los países de la subregión norte del Mediterráneo, a excepción de Mónaco, están sometidos a la normativa europea.

Las medidas ambientales normalmente se adoptan mediante directivas o reglamentos propuestos por la Comisión Europea, si bien tienen que contar con la aceptación del Consejo Europeo. Una vez adoptadas, la Comisión se encarga de controlar su aplicación. La Dirección General de Medio Ambiente es el organismo de la Comisión encargado de cuestiones como el medio ambiente, la seguridad nuclear y la protección civil.

Durante las décadas de 1970 y 1980, la legislación ambiental de la UE se centraba principalmente en establecer límites a las emisiones de determinados contaminantes. Hacia los años 1990 se pusieron en marcha iniciativas de mayor calado como la regulación del consumo de recursos naturales o la prevención de la contaminación a través de normas «horizontales».

Muchas de estas normas se adoptaron a lo largo del Quinto Programa de Acción en materia de Medio Ambiente de la Comunidad Europea, en el que se establecía la estrategia ambiental de la Unión para el período 1992-2000. El Programa incluía un planteamiento integrado de lucha contra la contaminación y acciones para reducir los residuos que se traspusieron en la Directiva IPPC, que en buena medida coincide con los principios de la PL.

Con la Directiva IPPC la UE introdujo el concepto de las mejores técnicas disponibles (MTD) e inició la publicación de documentos de consulta relacionados, los BREF, en los que se describen soluciones de PL adoptadas por determinados sectores y aplicadas a tecnologías concretas.

El objetivo de esta Directiva es prevenir o reducir al mínimo la contaminación atmosférica, del suelo y del agua originada por las emisiones de las instalaciones industriales de los países miembros, con el objetivo de lograr un mayor nivel de protección ambiental. En la Directiva IPPC se definen las obligaciones mínimas que deben cumplir todas las plantas industriales afectadas, tanto las ya existentes como las de nueva creación. Estas obligaciones mínimas consisten en una lista de medidas de prevención de la contaminación (atmosférica, del suelo y del agua) derivada de efluentes industriales y otros residuos y sirven de base para redactar los permisos de explotación de las instalaciones industriales.

2.2.1. ESPAÑA

Introducción

España es un país europeo industrializado ubicado en la parte occidental de la cuenca mediterránea. Tiene una superficie total de 504.750 km² y una población de 44 millones de habitantes.

Tabla 2.2.1. Indicadores de la situación socioeconómica de España.

Superficie	10 ³ km ²	504,8
Población	millones	44
Esperanza de vida	años	79,52
Energía per cápita	equiv. kg de petróleo	3.084
PIB actual	10 ⁹ \$	937,6
Crecimiento del PIB	%	2,6
PPA de PIB per cápita	\$	23.300

*Fuente: Grupo del Banco Mundial y global EDGE (2004)
(PPA = paridad de poder adquisitivo)*

El empleo ha crecido considerablemente, lo que ha permitido a la economía crecer con mayor rapidez que la media de la zona euro.

En los últimos años, el comportamiento económico de España ha hecho gala de una notable fortaleza gracias a las reformas estructurales llevadas a cabo desde mediados de la década de los 90 y a la estabilidad del marco político macroeconómico.

Industria y medio ambiente

El rápido desarrollo experimentado por España en el último cuarto de siglo ha convertido al país en la octava economía mundial de entre los países de la OCDE. En muchos casos, este crecimiento ha ido acompañado de una mayor presión sobre el medio ambiente, tanto por lo que respecta al uso de recursos naturales (agua, suelo, etc.) como a la generación de contaminación.

Las principales industrias del país son las de alimentación y bebidas, las metalúrgicas, las de productos químicos, los astilleros, las automovilísticas, los fabricantes de maquinaria, las de textil y confección y el turismo. Entre las mercancías que exporta España destacan la maquinaria, los vehículos motorizados y los productos de alimentación y consumo.

Algunas de las mayores amenazas para el medio ambiente las causan el transporte, la producción de energía eléctrica y la agricultura.

Industria del sector del cemento

España mantiene su posición como el mayor mercado de cemento de Europa y de los países del PAM, siendo su consumo per cápita de 1.127 kg, valor bastante elevado. El consumo de cemento en España creció en torno al 3,9 por ciento hasta alcanzar el valor de 48 Mt en 2004.

La industria de la ingeniería civil contó con el 41 por ciento del consumo en el 2004 frente al 44 por ciento del 2003. El mercado de la edificación ha aumentado su importancia y ha pasado de un 56 a un 59 por ciento del consumo de cemento en el año 2004.

Por comunidades autónomas, Andalucía es el mayor mercado de cemento de España con un aumento respecto al 2003 del 14,2 %, seguido de Valencia, Cataluña y de la costa mediterránea con un crecimiento respecto al 2003 del 7,7 %.

En el año 2004, la producción nacional alcanza el valor de 46,6 Mt, distribuida en 36 plantas integrales, además de una docena de plantas de molienda.

Hay diez grupos en España que producen tanto clínker como cemento. Los tres grupos que están a la cabeza son Cemex, Cementos Portland Valderrivas y Holcim, entre ellos se reparten la mitad del consumo de cemento nacional. Cerca del 88 por ciento es servido por carretera, un diez por ciento por mar y un dos por ciento por tren.

Las exportaciones de cemento continúan su camino descendente, cerca de 0,3 Mt de las 1,3 Mt exportadas son de cemento blanco y alrededor de 18.000 t son de clínker. Estados Unidos fue el mercado de las exportaciones españolas de mayor importancia con 0,28 Mt.

Las importaciones de cemento y clínker en el 2004 crecieron casi un 10 por ciento el pasado año hasta 8,2 Mt, pero dentro de este total, las importaciones de cemento disminuyeron de 2,3 Mt en el 2003 a 1,9 Mt en el 2004 y las importaciones de clínker aumentaron de 5,9 Mt en el 2003 a 6,3 Mt en el 2004. Egipto es el primer mercado de las importaciones españolas con 3,5 Mt y una tasa de crecimiento del 119%.

Tabla 2.2.2. Datos principales de la industria del cemento en España. Año 2004.

Producción (kt/año)	45.500
Consumo de cemento (kt/año)	47.200
Número de plantas integradas	36
Nº de empleados (aprox.)	7.000
Capacidad de producción de hornos de clínker kt/año (*)	35.300
Capacidad de prod. de cemento kt/año	56.000

Fuente. Oficemen

Tabla 2.2.3. Tipos de horno utilizados.

Número de hornos vía seca	53
Número de hornos vía húmeda	3
Número de hornos vía semi-húmeda	0
Número de hornos vía semi-seca	4
Número de hornos verticales	0
Total hornos	60

Fuente: Oficemen2004

2.2.2. FRANCIA

Introducción

Francia es un país europeo industrializado cuya parte meridional linda con el mar Mediterráneo. Tiene una superficie total de 547.000 km² y una población aproximada de 60,66 millones de habitantes.

Tabla 2.2.4. Indicadores de la situación socioeconómica de Francia.

Superficie	10 ³ km ²	547
Población	millones	60,66
Esperanza de vida	años	79,6
Energía per cápita	equiv. kg de petróleo	4.366
PIB actual	10 ⁹ \$	1,74
Crecimiento del PIB	%	2,1
PPA de PIB per cápita	\$	28.700

Fuente: Grupo del Banco Mundial y global EDGE (2004)
(PPA = paridad de poder adquisitivo)

Francia es la cuarta mayor economía industrializada occidental. Posee importantes recursos agrícolas, una base industrial amplia y consolidada y mano de obra altamente cualificada. Cuenta, además, con un sector de servicios dinámico cuya actividad económica aumenta cada vez más y es responsable de prácticamente la totalidad de los puestos de trabajo creados en los últimos años.

Francia ha desarrollado con un éxito notable los sectores de telecomunicaciones, aeroespacial y armamentístico. En cuanto a la producción de energía, el país se ha concentrado sobre todo en el desarrollo de la energía nuclear, que hoy en día representa aproximadamente el 80 % de la

producción eléctrica del país. Los residuos nucleares se almacenan en instalaciones de reproceso en territorio francés.

Industria y medio ambiente

Francia es el cuarto país productor industrial del mundo. La industria manufacturera está altamente diversificada y constituye la fuente principal de ingresos derivados de exportaciones.

Los principales sectores industriales son:

- **Industria de la alimentación:** actualmente, el sector de la industria de la alimentación es el que genera un mayor número de puestos de trabajo en el país. Francia es el principal productor de remolacha azucarera del mundo y el segundo en producción de vino y queso. Entre otros productos alimenticios de importancia se cuentan la carne, el pan y los dulces.
- **Fabricación de automóviles, aviones, barcos y trenes:** Francia es el cuarto productor mundial de automóviles y, además, cuenta con una importante industria de fabricación de barcos, aviones y trenes.
- **Industria eléctrica y electrónica:** en Francia se produce equipamiento para telecomunicaciones, ordenadores, televisores, radios y otros artículos.
- **Industria metalúrgica:** la producción de hierro y acero, al igual que la industria del aluminio, constituye otra importante fuente de empleo en Francia.
- **Industria química y farmacéutica:** la industria química francesa produce una amplia gama de productos, que incluye desde sustancias químicas industriales, hasta plásticos, fertilizantes, solventes, cosméticos y productos farmacéuticos.
- **Industria textil:** produce artículos de algodón, seda y madera.

2.2.2.1. Industria del sector del cemento

El consumo de cemento en Francia disminuyó un 0,2 por ciento en 2003 siendo éste de 20,68 Mt. No obstante, la creciente actividad en la construcción de viviendas va a suponer un crecimiento en la demanda de este sector.

La industria contó con el 47,3 por ciento del consumo nacional de cemento en el 2003 y determinados productos con el 18,2 por ciento. El cemento en forma granel aumentó su cuota en el mercado del 71,1 por ciento en el 2002 al 72,2 por ciento en el 2003 mientras que el consumo de cemento embolsado cayó hasta el 27,8 por ciento.

En términos del uso del cemento, la ingeniería civil representa el 38 por ciento del consumo, seguido por un 36 por ciento de la construcción de viviendas, un 20 por ciento de la construcción de edificios comerciales e industriales y un 14 por ciento de destinado a la reparación de edificios.

La producción nacional de cemento es de 27,2 Mt distribuida en 29 plantas integradas, además de 5 plantas de molienda.

El uso de combustibles alternativos en el horno descendió del 34 por ciento al 33 por ciento en el 2003, el uso de piedra caliza y escoria como cemento aumentó mientras que el uso de cenizas volantes continuó disminuyendo.

El total de las exportaciones francesas aumentaron un 12 por ciento hasta alcanzar el valor de 1,71 Mt en el 2003, con exportaciones de cemento superiores al 8,7 por ciento y exportaciones de clínker que crecieron un 17,2 por ciento hasta 0,70 Mt. Alemania es el mercado líder de las exportaciones francesas con 0,30 Mt.

Las importaciones totales disminuyeron un 5 por ciento hasta 2,45 Mt, dentro de las cuales las de clínker disminuyeron un 13,1 por ciento hasta 0,24 Mt y las de cemento un 4,7 por ciento hasta

2,21 Mt. Grecia es el principal mercado de las importaciones de clínker. España y Bélgica son los mercados predominantes de las importaciones de cemento, con 1,02 Mt y 0,45 Mt respectivamente.

Tabla 2.2.5. Datos principales de la industria del cemento en Francia. Año 2004.

Producción (kt/año)	20.900
Consumo de cemento (kt/año)	21.800
Número de plantas integrales	29
Nº de empleados (aprox.)	14.291
Capacidad de producción de hornos de clínker kt/año (*)	21.051
Capacidad de prod. de cemento kt/año	27.200

Fuente. *Global Cement Report 2005*
 (*) Año 2002. *World Cement Directory*

Tabla 2.2.6. Tipos de horno utilizados.

Número de hornos vía seca	20
Número de hornos vía húmeda	2
Número de hornos vía semi-húmeda	1
Número de hornos vía semi-seca	18
Número de hornos verticales	3
Total hornos	44

Fuente: *World Cement Directory 2002*

2.2.3. GRECIA

Introducción

Grecia es un país europeo industrializado ubicado al sur de Europa y que linda con el mar Mediterráneo. Tiene una superficie total de 131.940 km² y una población de 10,6 millones de habitantes.

Tabla 2.2.7. Indicadores de la situación socioeconómica de Grecia.

Superficie	10 ³ km ²	131,9
Población	millones	10,67
Esperanza de vida	años	79,9
Energía per cápita	equiv. kg de petróleo	2.635
PIB actual	10 ⁹ \$	226,4
Crecimiento del PIB	%	3,7
PPA de PIB per cápita	\$	21.300

Fuente: *Grupo del Banco Mundial y global EDGE (2004)*
 (PPA = paridad de poder adquisitivo)

La economía griega ha experimentado durante años un sólido crecimiento, por encima de la media prevista para la UE. El sector servicios ha sido el que ha experimentado un crecimiento mayor y más rápido. El turismo es una de las principales fuentes de ingresos en divisas del país, si bien la industria ha tardado en expandirse y adolece de unas infraestructuras insuficientes. La industria alimentaria, en cambio, si ha proliferado en respuesta a los nuevos mercados de los países vecinos.

La producción de equipos de alta tecnología, especialmente en el campo de las telecomunicaciones, es uno de los sectores más dinámicos. La agricultura todavía da trabajo a un 15% de la mano de obra.

Industria y medio ambiente

A continuación se detallan algunas de las actividades económicas de mayor impacto ambiental en Grecia:

Industria química

Se trata de un sector que ha sabido hacer frente a la necesidad de que las empresas que lo integran tengan un perfil ambiental destacado. En este sentido es notorio que la industria química griega haya logrado un nivel suficiente de adaptación a los desarrollos tecnológicos internacionales en materia de prevención y control de la contaminación, dando prioridad a la intervención en el origen.

Industria papelera / textil / de curtido

La mayoría de industrias papeleras griegas cumplen con las directrices de la Directiva IPPC (Directiva europea relativa a la prevención y al control integrados de la contaminación), utilizan técnicas de producción progresivas y adoptan la mayoría de las mejores técnicas disponibles (MTD) rápidamente tras su aparición. En ocasiones, sin embargo, la incorrecta manipulación de los equipos le resta eficacia a la tecnología.

Sólo una de las industrias del curtido (la mayor tanto en tamaño como en producción) cumple con lo estipulado por la Directiva IPPC y ya ha implantado algunas MTD. En las demás empresas del sector, las MTD y cualquier otra medida destinada a reducir la contaminación son inexistentes.

La industria textil también es muy importante en Grecia. Genera un elevado número de puestos de trabajo y contribuye significativamente a los ingresos nacionales, ya que es un sector exportador que utiliza principalmente materia prima de producción local (el algodón). Existen unas 220 empresas de distinto tamaño en el sector textil, el 75 % de las cuales son de tamaño familiar, con menos de 10 empleados. A pesar de todo, actualmente se tiende a crear empresas más grandes; los pequeños negocios están desapareciendo progresivamente.

Buena parte de los problemas de contaminación del agua los provocan las industrias de acabado de textiles. Las empresas grandes que siguen invirtiendo en MTD muestran una mejora continua, mientras que las que siguen ancladas en las viejas prácticas sufren un constante declive. La principal necesidad por lo que respecta al control de la contaminación es el tratamiento de efluentes líquidos y la eliminación de los lodos rojos. Las áreas donde se concentran las industrias de acabado de textiles son las de Atenas, Viotia y Tesalónica.

Industrias del cemento, vidrio y cerámica

En las industrias productoras de cemento el grado de implantación de tecnologías incluidas entre las MTD es muy alto; por el contrario, el nivel actual de protección ambiental de las industrias productoras de cal dista mucho de ser satisfactorio. Los estrictos niveles de emisiones propuestos por el documento BREF son un problema. Las empresas griegas dedicadas a la producción de amianto y derivados aparentemente han implantado la mayor parte de MTD, sobre todo por una cuestión de salud e higiene de los trabajadores. Las industrias del vidrio, sin embargo, sólo han adoptado algunas medidas básicas contra la contaminación.

Industrias de transformación de metales

Las pequeñas y medianas empresas del sector tienen problemas económicos para implantar los nuevos desarrollos tecnológicos, a diferencia de las grandes industrias, que han logrado un grado

aceptable de adaptación a los desarrollos tecnológicos internacionales en materia de prevención y control de la contaminación, dando prioridad a la actuación en el origen.

Sector de la energía

Este sector está formado por grandes plantas de combustión de lignito y petróleo. Las instalaciones disponen de grandes unidades de combustión, de tratamiento de crudo y gas natural y de producción de electricidad a partir del lignito o petróleo, además de las cuatro refinerías existentes.

Industria alimentaria

La industria alimentaria es uno de los sectores más consolidados del país (con cerca de 1/3 del total de unidades industriales), estando dominada por un gran número de empresas dedicadas a la cría de aves de corral y ganado porcino, procesamiento de productos agrícolas, producción de aceite, tratamiento y envasado de productos de consumo, lácteos, bebidas, etc. Los problemas de contaminación los originan principalmente las pequeñas instalaciones o las empresas estacionales.

Industria del sector cementero

El consumo de cemento creció por noveno año consecutivo en el año 2003, por encima del 3,5 por ciento del año anterior, hasta un valor estimado de 11 Mt; siendo el consumo de cemento per cápita de una tonelada. Cabe destacar que el crecimiento en la demanda de cemento ha sido visible en la provincia de Attica, localización de los Juegos Olímpicos.

La demanda de cemento embolsado continúa disminuyendo y fue inferior al 24 por ciento en el año 2002 (los datos estadísticos del 2003 no están disponibles).

Debido a la geografía de Grecia y al escaso desarrollo de la infraestructura por tierra, el transporte por mar juega un papel muy importante en la distribución doméstica de cemento.

Grecia presenta una capacidad de producción anual de 16,5 Mt distribuida en 8 plantas, propiedad de 3 compañías diferentes, de las que el Grupo Heracles tiene el mayor ratio de ventas.

La presencia de grandes reservas de caliza cercanas al mar convierte a Grecia un país ideal para la exportación de cemento, lo que hace que los tres productores estén dentro del negocio exportador. En el año 2002, cuando la industria tenía que tratar con escasas capacidades de producción de cemento y una demanda doméstica creciente, las exportaciones de clínker de cemento disminuyeron considerablemente. Debido a esto, Heracles incrementó su producción y fue capaz de exportar un valor estimado de 0,45 Mt en el 2003. Estados Unidos es el mayor mercado de exportación del cemento producido en Grecia, cerca de 0,8 Mt en 2003.

En cuanto a clases de cemento, el cemento gris ocupa la mayor parte de las exportaciones a excepción de Albania y Serbia y Montenegro que también se les exportan importantes cantidades de cemento puzolánico. En lo que se refiere al clínker, Francia fue el principal destino en 2003.

Tabla 2.2.8. Datos principales de la industria del cemento en Grecia. Año 2004.

Producción (kt/año)	15.700
Consumo de cemento (kt/año)	10.100
Número de plantas	8
Nº de empleados (aprox.)	3.423
Capacidad de producción de hornos de clínker kt/año (*)	11.800
Capacidad de prod. de cemento kt/año	16.500

Fuente. *Global Cement Report 2005*
 (*) Año 2002. *World Cement Directory*

Tabla 2.2.9. Tipos de horno utilizados.

Número de hornos vía seca	15
Número de hornos vía húmeda	0
Número de hornos vía semi-húmeda	0
Número de hornos vía semi-seca	0
Número de hornos verticales	0
Total hornos	15

Fuente: *World Cement Directory 2002*

2.2.4. ITALIA

Introducción

Italia es un país europeo industrializado ubicado en la región mediterránea y que está rodeado por el mar Mediterráneo. Tiene una superficie total de 301.200 km² y una población aproximada de 58,1 millones de habitantes.

Tabla 2.2.10. Indicadores de la situación socioeconómica de Italia.

Superficie	10 ³ km ²	301,2
Población	millones	58,10
Esperanza de vida	años	79,68
Energía per cápita	equiv. kg de petróleo	2.974
PIB actual	10 ⁹ \$	1,609
Crecimiento del PIB	%	1,3
PPA de PIB per cápita	\$	27.700

Fuente: *Grupo del Banco Mundial y global EDGE (2004)*
 (PPA = paridad de poder adquisitivo)

Italia ha pasado de ser una economía fundamentalmente agrícola a ocupar el quinto lugar en el ranking mundial. Es un país de recursos escasos. Gran parte de su superficie no es apta para el cultivo, por lo que se ha convertido en un importador neto de alimentos.

La mayor parte de las materias primas necesarias para la fabricación y más del 80 % de las fuentes de energía del país son importadas. La fortaleza económica de Italia se basa en el procesamiento y fabricación de bienes, principalmente en medianas y pequeñas empresas familiares.

Industria y medio ambiente

Entre las cuestiones ambientales prioritarias destacan la contaminación atmosférica en las ciudades, la gestión del suelo y el agua, la gestión de los residuos, la conservación del entorno y el paisaje, el cambio climático, la gestión del transporte y la protección de zonas costeras y del entorno marino.

Los principales sectores industriales generadores de residuos tóxicos y peligrosos son: la industria química orgánica e inorgánica, el tratamiento de superficies, la industria electrónica, la minería y el transporte, el reciclaje, la industria textil, la industria de pasta y papel, la producción de energía, la industria agroalimentaria y la industria del curtido.

La industria emplea medidas reductoras del impacto en determinados procesos y sectores.

En la década de los 90, en el sector industrial italiano se produjeron significativos avances hacia la mejora de la calidad del aire. Las emisiones de SO_x, NO_x, CO, COV (procedentes de disolventes), dioxinas y furanos descendieron; de hecho fue el único sector que redujo las emisiones de CO₂. Italia ha hecho grandes progresos para el establecimiento de las infraestructuras que permitan gestionar la contaminación atmosférica industrial.

Industria del sector del cemento

Los planes estatales en Italia de construcción de nuevas infraestructuras han proporcionado a Italia una elevada demanda de cemento y hace que la ingeniería civil sea el sector de mayor consumo. Por ello, en el 2003, la demanda italiana de cemento creció hasta 43,5 Mt.

El mercado italiano de cemento está fragmentado en 20 grupos, con un total de 80 plantas que agrupan 54 plantas integrales y 26 plantas de molienda, presentando una capacidad total de producción de cemento de 58 Mta.

El total de las exportaciones disminuyeron alrededor del 5 por ciento en el 2003 hasta 2,26 Mt. Las exportaciones de clínker fueron escasas y no superiores a 600.000 t, esencialmente hacia Suiza y España. Albania mantiene su posición como el mayor mercado al que Italia exporta, representando el 22 por ciento de las exportaciones de cemento.

Tanto las importaciones de cemento como las de clínker aumentaron en el 2003, las de cemento de 2,1 Mt a 2,2 Mt y las de clínker de 1,8 Mt a 2,3 Mt. La mayor parte de las importaciones son dentro de las áreas mediterráneas y del Mar Negro. En la primera mitad del año 2004 el descenso en las importaciones de cemento se vio compensado por un aumento en las importaciones de clínker, principalmente por las planta de molienda independientes.

Tabla 2.2.11. Datos principales de la industria del cemento en Italia. Año 2004.

Producción (kt/año)	44.800
Consumo de cemento (kt/año)	45.000
Número de plantas	80
Nº de empleados (aprox.)	n.d.
Capacidad de producción de hornos de clínker kt/año (*)	n.d.
Capacidad de prod. de cemento kt/año	58.000

*Fuente. Global Cement Report 2005
(*) Año 2002. World Cement Directory*

Tabla 2.2.12. Tipos de horno utilizados.

Número de hornos vía seca	58
Número de hornos vía húmeda	11
Número de hornos vía semi-húmeda	0
Número de hornos vía semi-seca	39
Número de hornos verticales	1
Total hornos	109

Fuente: World Cement Directory 2002

2.2.5. MÓNACO

Introducción

Mónaco es un país europeo situado a orillas del mar Mediterráneo. Tiene una superficie total de 1,95 km² y una población de 32.409 habitantes.

Tabla 2.2.13. Indicadores de la situación socioeconómica de Mónaco.

Superficie	km ²	1,95
Población	miles	32,4
Esperanza de vida	años	79,57
Energía per cápita	equiv. kg de petróleo	n.d.
PIB actual	10 ⁹ \$	870
Crecimiento del PIB	%	0,9
PPA de PIB per cápita	\$	27.000

Fuente: Grupo del Banco Mundial y global EDGE (2004)
(PPA = paridad de poder adquisitivo)

Mónaco es un pequeño país con una economía basada principalmente el sector financiero, comercial y turístico. El turismo representa casi el 25 % de los ingresos anuales; el Principado de Mónaco ha sido un gran centro de turismo desde la inauguración de su famoso casino en 1856. Mónaco también destaca por sus actividades en el campo de las ciencias del mar.

2.2.5.1. Industria y medio ambiente

El sector industrial de Mónaco ha alcanzado un considerable desarrollo en menos de un siglo. Desde 1906, cuando el Estado financió la construcción del primer polígono en Fontvieille, se han instalado en él algunas industrias como la fábrica de cerveza de Mónaco o empresas del sector de la molturación de harina y la producción de chocolate. En los últimos veinte años, se han construido casi 200.000 m² de superficie industrial. El territorio disponible en el Principado es tan escaso que las instalaciones industriales se han ubicado en edificios de hasta trece pisos.

En la actualidad Mónaco presenta una industria bastante diversificada. Cuenta con un gran número de empresas consolidadas en varios sectores: unas 23 pertenecen a la industria química, farmacéutica, parafarmacéutica y cosmética; 13 al procesamiento de materias plásticas; 21 a las artes gráficas, edición y cartonaje; 22 a la industria eléctrica y electrónica y a la ingeniería mecánica y de precisión; 8 al sector textil y de confección y otras, como las constructoras, suman un total de unas 200 empresas.

El sector de productos químicos, farmacéuticos y cosméticos parece el de mayor peso, pero las empresas dedicadas al procesado de materias plásticas y a la fabricación de equipos eléctricos y electrónicos también tienen gran importancia. Otros sectores, como los que tienen que ver con la ingeniería mecánica, el envasado, las artes gráficas y la confección también son destacables, aunque no tanto. El principal problema ambiental asociado a estos sectores es la contaminación del agua.

Industria del cemento

Mónaco no presenta plantas de producción de cemento, por lo que se puede considerar que este sector no es de relevancia.

2.3. PAÍSES DEL ESTE DEL MEDITERRÁNEO

Este grupo incluye a países con una tendencia común a implantar una legislación ambiental similar a la de la Unión Europea. Algunos de ellos, como Chipre, Malta y Eslovenia, desde su integración en la UE se encuentran en proceso de adaptar su normativa a la de la UE. Turquía, como país candidato a la UE a corto o medio plazo, también se encuentra en un proceso de adaptación. Otros países como Bosnia-Herzegovina, Croacia y Albania también han iniciado un proceso de adopción de normativas ambientales similares a las aplicadas en la UE. Los países candidatos a entrar en la UE han iniciado un proceso de adaptación, con programas distintos en función de la fecha de integración, que incluye la adecuación de la industria interna y de las condiciones ambientales. Israel también ha sido incluido en este grupo porque, pese a no formar parte de la UE, posee muchas conexiones con ésta, en parte debidas a las similitudes en las características de sus industrias y en los compromisos asumidos para proteger el mar Mediterráneo.

Industria y medio ambiente

Los países agrupados en esta subregión difieren en cuanto a su pasado reciente. Algunos países del este del Mediterráneo, en concreto Albania, Bosnia-Herzegovina, Croacia y Eslovenia, atraviesan actualmente fases de transformación económica como resultado de las reformas emprendidas tras la caída del comunismo y de la liberalización gradual del mercado. La planificación central ha desaparecido casi por completo de su política y todos ellos se han embarcado en programas independientes de liberalización, de estabilización macroeconómica, de reformas legales e institucionales y de privatización. Desde 1990 se han dedicado a convertir sus economías al capitalismo y a abrir vías para la inversión extranjera. La industria constituye un componente importante de la economía en gran parte de estos países, al tiempo que el sector de los servicios gana cada vez más peso en algunos de ellos.

Marco político y legal

Los países de esta subregión han realizado un notorio progreso con respecto a la aprobación de nueva legislación ambiental. Sin embargo, hasta la fecha, este proceso no ha estado acompañado de una implantación efectiva, ni de las leyes y normativas antiguas, ni de las recién aprobadas. Los logros en hacer respetar esta normativa e impulsar a la industria a adoptar prácticas respetuosas con el medio ambiente pueden catalogarse en muchos casos de mediocres, cuando no pobres.

Para gran parte de los países del este del Mediterráneo, la legislación de la Unión Europea constituye una referencia obligada. La UE ha tenido una gran influencia en muchos de estos países, no sólo en términos de desarrollo económico, sino también en la gestión del medio ambiente, motivando un movimiento precoz hacia la armonización con las regulaciones europeas como medio de acelerar la adhesión a la UE.

En la mayoría de estos países, el otorgamiento de permisos para las actividades de producción es una función compartida entre distintos organismos y agencias gubernamentales, lo cual, con frecuencia, suele dar lugar a una gran falta de coordinación. En este sentido, algunos de ellos están solucionando esta cuestión aplicando el sistema IPPC por el que se establece un enfoque integrado

en la concesión de permisos. De entre ellos, Eslovenia, Chipre y Malta se hallan en una fase más avanzada.

En el marco internacional para la protección del medio ambiente mediante la prevención de la contaminación, todos los países del este del Mediterráneo han suscrito, firmado o ratificado el Convenio de Basilea sobre Residuos Peligrosos y el Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes. En cuanto a la reducción de la capa de ozono, también todos han ratificado el Protocolo de Montreal y, con la excepción de Albania, sus primeras enmiendas. En lo relativo al cambio climático, la mayoría de los países ha firmado o ratificado el Protocolo de Kyoto, Albania, Chipre, Eslovenia, Israel, Malta y Turquía.

Dentro del marco del Plan de Acción para el Mediterráneo, y con respecto a los protocolos centrados en actividades situadas en tierra, todos los países han ratificado el Protocolo para la Protección del Mar Mediterráneo contra la Contaminación Causada por Fuentes y Actividades Situadas en Tierra, aunque sólo algunos han aceptado las enmiendas de 1995.

En cuanto al Protocolo de Residuos Peligrosos, sólo Albania, Malta y Turquía lo han ratificado.

2.3.1. ALBANIA

Introducción

Albania es un país del este de Europa ubicado en la región mediterránea. Tiene una superficie total de 28.748 km² y una población aproximada de 3,5 millones de habitantes.

Tabla 2.3.1. Indicadores de la situación socioeconómica de Albania.

Superficie	10 ³ km ²	28,74
Población	millones	3,56
Esperanza de vida	años	77,24
Energía per cápita	equiv. kg de petróleo	522
PIB actual	10 ⁹ \$	17,46
Crecimiento del PIB	%	5,6
PPA de PIB per cápita	\$	4.900

*Fuente: Grupo del Banco Mundial y global EDGE (2004)
(PPA = paridad de poder adquisitivo)*

La conversión de Albania de una economía centralizada a un sistema orientado al mercado se inició a principios de 1992, después de que el PIB cayera en más del 50 % en relación con su valor máximo registrado en 1989. El Gobierno elegido democráticamente lanzó un ambicioso programa de reformas económicas y situó al país en el camino hacia la economía de mercado. Entre las reformas contempladas se contaban la privatización y la reforma del sector empresarial y financiero.

Industria y medio ambiente

Albania es un país con un nivel de renta entre bajo y medio, en comparación con el de otros países de la zona. La disponibilidad limitada de recursos restringe la inversión que se destina a proteger el medio ambiente. No obstante, dado que la contribución de la producción industrial al PIB ha disminuido desde 1990, el impacto de la actividad industrial en el medio ambiente se ha visto también considerablemente reducido como resultado de la eliminación de múltiples fuentes peligrosas de contaminación ambiental.

Aparte de la agricultura, que representa casi la mitad del total de la población activa, en el presente la actividad industrial se compone de las siguientes actividades: minería y enriquecimiento de cobre, minería del mineral de cromo, extracción y refinado del petróleo, materiales de construcción y producción eléctrica. Los principales residuos industriales se generan en estos sectores industriales.

La mayoría de las industrias de propiedad estatal se han cerrado, dejando como principal problema ambiental los residuos acumulados en las antiguas plantas industriales.

Industria del sector del cemento

El consumo de cemento en Albania se espera que aumente rápidamente por la presión de la construcción de nuevas viviendas e infraestructuras, pero los problemas políticos locales están retrasando la economía y hace que este crecimiento sea menor que el previsto en un primer momento. La demanda pasó de 1,65 Mt en el 2002 a 1,76 Mt en el 2003.

Albania no dispone de una capacidad sustancial de producción de cemento, dispone de 5 plantas con una capacidad total de 1,6 Mt. En la práctica, no más de 2 plantas están operativas, lo que limita la capacidad total a un valor de 0,2 Mt.

La oficina Albanesa de estadística señaló que 1,33 Mta de cemento fueron importadas en 2001, siendo la mayor parte de ellas desde Grecia y Croacia.

Tabla 2.3.2. Datos principales de la industria del cemento en Albania. Año 2004.

Producción (kt/año)	200
Consumo de cemento (kt/año)	1.850
Número de plantas integrales	5
Nº de empleados (aprox.)	n.d.
Capacidad de producción de hornos de clínker kt/año (*)	1.600
Capacidad de prod. de cemento kt/año	1.600

*Fuente. Global Cement Report 2005
(*) Año 2002. World Cement Directory*

Tabla 2.3.3. Tipos de horno utilizados.

Número de hornos vía seca	0
Número de hornos vía húmeda	0
Número de hornos vía semi-húmeda	2
Número de hornos vía semi-seca	0
Número de hornos verticales	0
Total hornos	2

Fuente: World Cement Directory 2002

2.3.2. BOSNIA-HERZEGOVINA

Introducción

Bosnia-Herzegovina es un país del este de Europa que linda con el mar Adriático. Tiene una superficie total de 51.129 km² y una población aproximada de 4,02 millones de habitantes.

Tabla 2.3.4. Indicadores de la situación socioeconómica de Bosnia-Herzegovina.

Superficie	10 ³ km ²	51,1
Población	millones	4,02
Esperanza de vida	años	72,85
Energía per cápita	equiv. kg de petróleo	1.096
PIB actual	10 ⁹ \$	26,21
Crecimiento del PIB	%	5
PPA de PIB per cápita	\$	6.500

Fuente: Grupo del Banco Mundial y global EDGE (2004)
(PPA = paridad de poder adquisitivo)

La economía de Bosnia-Herzegovina (B-H) todavía soporta la lacra de la planificación centralizada. La industria tiene exceso de personal, lo que refleja la rigidez de la economía planificada. Tres años de guerra destruyeron la economía y las infraestructuras. Sin embargo, el avance ha sido considerable desde la pacificación del país. La inflación se ha mantenido baja gracias al estricto régimen de caja de conversión adoptado. A pesar de todo, el crecimiento ha sido desigual. La preocupación más inmediata es revitalizar la economía. Para ello, la situación general debe encaminarse hacia el sector privado y la economía de mercado.

Una de las principales prioridades para proteger la zona mediterránea de B-H es la construcción de una infraestructura de saneamiento. Al carecer la región de una red de saneamiento completamente desarrollada, algunas poblaciones e industrias vierten las aguas residuales directamente a fosas sépticas mal estructuradas en las que a menudo se producen fugas que contaminan las aguas subterráneas.

Industria y medio ambiente

La contaminación de la cuenca fluvial adriática de Bosnia-Herzegovina, de una extensión total de 12.410 km², procede tanto de puntos de emisión como de fuentes difusas situadas principalmente en las áreas cársticas que, dada su vulnerabilidad, percolan rápidamente los contaminantes al subsuelo.

La industria a gran escala se estructura principalmente en empresas dedicadas a la industria: agroalimentaria, aluminio, tratamiento de superficies; madera, materiales de construcción, textil y eléctrica (hidroeléctrica y termoeléctrica). Debido a la situación creada por la guerra, la mayoría de industrias a gran escala que existía anteriormente funcionan a un rendimiento muy bajo que en muchos casos no llega al 10 % de la capacidad normal habitual antes de la guerra. Además, los sistemas de tratamiento de que disponen están fuera de uso.

El principal problema es la inexistencia de plantas de tratamiento de las aguas residuales industriales y municipales, ya que los efluentes se vierten directamente.

Industria del sector del cemento

La demanda de cemento en Bosnia-Herzegovina alcanzó en el año 2002 un pico de 1,7 Mt pero disminuyó en el 2003 alrededor de un 8 por ciento. El consumo per cápita de cemento se está estabilizando en los últimos años en un valor de alrededor 400 kg.

El alto porcentaje demandado de cemento embolsado, un 70 por ciento en el año 2003, está empezando a disminuir.

La capacidad de producción total en Bosnia-Herzegovina es de 1,05 Mt distribuida por dos plantas de cemento propiedad de HeidelbergCement y Asamer & Hufnagl.

Las exportaciones de cemento o de clínker son inexistentes, dado que la capacidad total es insuficiente para la demanda de cemento existente en el país.

Croacia realiza sus exportaciones a Bosnia-Herzegovina, seguido de Hungría, mientras que el cemento blanco es suministrado por Italia y Eslovaquia.

Bosnia-Tabla 2.3.5. Datos principales de la industria del cemento en Bosnia-Herzegovina. Año 2004.

Producción (kt/año)	920
Consumo de cemento (kt/año)	1.620
Número de plantas integrales	2
Nº de empleados (aprox.)	292
Capacidad de producción de hornos de clínker kt/año (*)	690
Capacidad de prod. de cemento kt/año	1.050

Fuente. *Global Cement Report 2005*
 (*) Año 2002. *World Cement Directory*

Tabla 2.3.6. Tipos de horno utilizados.

Número de hornos vía seca	2
Número de hornos vía húmeda	0
Número de hornos vía semi-húmeda	0
Número de hornos vía semi-seca	0
Número de hornos verticales	0
Total hornos	2

Fuente: *World Cement Directory 2002*

2.3.3. CHIPRE

Introducción

Chipre es una isla europea ubicada al nordeste de la cuenca mediterránea. Tiene una superficie total de 9.250 km² y una población aproximada de 780.000 habitantes.

Tabla 2.3.7. Indicadores de la situación socioeconómica de Chipre.

Superficie	10 ³ km ²	9,25
Población	miles	780,1
Esperanza de vida	años	77,65
Energía per cápita	equiv. kg de petróleo	3.203
PIB actual	10 ⁹ \$	15,71
Crecimiento del PIB	%	2,6 (Norte Chipre)
PPA de PIB per cápita	\$	20.300

Fuente: *Grupo del Banco Mundial y global EDGE (2004)*
 (PPA = paridad de poder adquisitivo)

Chipre cuenta con un mercado abierto libre y una economía basada en los servicios y, en parte, en la industria ligera. El pueblo chipriota es uno de los más prósperos del Mediterráneo. En los últimos

veinte años la economía ha dejado la agricultura para pasar a la industria ligera y los servicios. El sector servicios, en el que se incluye el turismo, representa cerca del 70 % del PIB y da empleo al 62 % del total de trabajadores.

El sector comercial es vital para el país, ya que la isla no es autosuficiente desde el punto de vista de la alimentación y dispone de escasos recursos naturales. Chipre tiene que importar el combustible, la mayoría de materias primas, la maquinaria pesada y los equipos de transporte.

Industria y medio ambiente

Las bases de la economía chipriota son el turismo y el sector servicios, incluidas las telecomunicaciones, la industria naviera y la banca.

Con el tiempo, la densa población de las zonas costeras, provocada por la actividad turística, los servicios y la considerable emigración procedente de zonas urbanas, ha acabado ejerciendo gran presión sobre el medio litoral, especialmente durante la temporada alta. Las actividades industriales contribuyen, además, a dicha presión, ya que las principales industrias (producción de energía, cemento, vino y refinerías de petróleo) se encuentran todas en la costa. Estas actividades están produciendo signos de contaminación local a pequeña escala. Con todo, la calidad del agua es buena en todo el país gracias a la existencia de leyes estrictas sobre vertido de aguas residuales y protección del medio ambiente y el hábitat natural.

Industria del sector del cemento

Las ventas de cemento en el sur de Chipre fueron de un total de 761.400 t en la primera mitad del año 2004, mayor al 630.900 t en el mismo periodo del 2003. El principal responsable de este aumento del consumo de cemento ha sido la creciente demanda del gobierno debido a los proyectos de construcción de nuevas infraestructuras.

El mayor productor de cemento en Chipre es la compañía Vassiliko Cement Works con una capacidad de 1,2 Mta, seguido por Cyprus Cement (CCC) con una producción de 0,4 Mta.

Los esfuerzos por mejorar la economía con el turismo y la construcción de nuevas infraestructuras hacen del sector del cemento en Chipre un mercado prometedor.

Tabla 2.3.8. Datos principales de la industria del cemento en Chipre. Año 2004.

Producción (kt/año)	1.890
Consumo de cemento (kt/año)	1.570
Número de plantas integrales	2
Nº de empleados (aprox.)	387
Capacidad de producción de hornos de clínker kt/año (*)	1.690
Capacidad de prod. de cemento kt/año (*)	1.730

Fuente. *Global Cement Report 2005*
(*) Año 2002. *World Cement Directory*

Tabla 2.3.9. Tipos de horno utilizados.

Número de hornos vía seca	2
Número de hornos vía húmeda	0
Número de hornos vía semi-húmeda	0
Número de hornos vía semi-seca	4
Número de hornos verticales	0
Total hornos	6

Fuente: World Cement Directory 2002

2.3.4. CROACIA

Introducción

Croacia es un país del este de Europa que linda con el mar Adriático. Tiene una superficie total de 56.542 km² y una población aproximada de 4,49 millones de habitantes.

Tabla 2.3.10. Indicadores de la situación socioeconómica de Croacia.

Superficie	10 ³ km ²	56,5
Población	millones	4,49
Esperanza de vida	años	74,45
Energía per cápita	equiv. kg de petróleo	1.775
PIB actual	10 ⁹ \$	50,33
Crecimiento del PIB	%	3,7
PPA de PIB per cápita	\$	11.200

Fuente: Grupo del Banco Mundial y global EDGE (2004)
(PPA = paridad de poder adquisitivo)

Croacia experimentó un proceso de industrialización y diversificación acelerado tras la Segunda Guerra Mundial. La descentralización tuvo lugar en 1965 y permitió el crecimiento de ciertos sectores, como por ejemplo, el turismo. Los beneficios generados por la industria croata se emplearon para desarrollar las regiones más pobres de la antigua Yugoslavia. Esto, junto con los programas de austeridad y la hiperinflación de los años ochenta, generó un gran descontento, que acabó por alimentar el movimiento independentista.

La privatización bajo el nuevo Gobierno croata apenas había dado comienzo cuando estalló la guerra de la independencia croata (1991-1995) que causó estragos en la infraestructura económica del país. Tras un período de desempleo creciente, empezaron a aplicarse reformas, que incluían un programa impositivo de valor añadido, el cual gozó de gran éxito, la privatización planificada de las empresas controladas por el Estado y la revisión de los presupuestos para recortar el gasto y el déficit. La baja inflación y la estabilidad monetaria han constituido los principales logros económicos.

Industria y medio ambiente

Los sectores industriales que desempeñan un papel activo en la economía y en la contaminación ambiental del país son el energético, cementero, alimentario, refino de petróleo, metalúrgico, químico, pasta y papel, textil y la agricultura.

Pese a que la industria no ha adoptado acuerdos voluntarios, el sector de producción energética, y en concreto las refinerías de petróleo y las centrales de energía térmica, es el que más activamente se ha involucrado en promover la producción más limpia. La situación se invierte en el sector de las PYMES, ya que su grado de cumplimiento con la legislación ambiental es peor que en las grandes empresas y carecen de información y formación sobre las oportunidades de la PL.

Croacia ha concluido la fase de formación primaria en PL. El concepto de PL está siendo introducido en la industria. No obstante, el país posee múltiples puntos calientes (hot spots) lo que indica la necesidad de una mayor acción en los temas de PL.

Industria del sector del cemento

El consumo de cemento en Croacia ha ido aumentando fuertemente en los últimos dos años. La Asociación de Cemento de Croacia muestra que el volumen creció alrededor de un 18 por ciento, con un consumo per cápita que ha llegado al valor de 165 kg, lo que ha sido en parte provocado por la puesta en marcha del programa estatal de autopistas.

La solidez de la actividad de la ingeniería civil ha originado que la parte del suministro nacional de cemento en forma granel aumentara y en el 2003 fuera el 61 por ciento de los suministros locales frente al 54 por ciento del año anterior. El 85 por ciento del suministro nacional se hace por carretera, por tren alrededor del 10 por ciento y por barco cerca del 5 por ciento.

La producción de cemento creció alrededor de un 8 por ciento en el 2003 hasta alcanzar el valor de 3,57 Mt, a pesar de que una de las plantas existentes estuvo parada durante un largo periodo de tiempo. Actualmente la capacidad nacional global de producción de cemento en Croacia es de 4,4 Mt distribuida en 7 plantas.

El uso de combustibles alternativos para el horno ha sido relativamente limitado hasta la fecha, pero debido a recientes investigaciones esto seguramente cambiará.

Croacia ha sido tradicionalmente un país exportador de cemento aunque los niveles de exportación en el año 2003 disminuyeron en respuesta a la situación nacional. Bosnia-Herzegovina es el principal mercado para las exportaciones croatas de cemento.

Con el cierre de una de las plantas, el volumen de las importaciones de cemento y de clínker aumentó. Las importaciones se hacen de Hungría y Eslovenia, y desde Eslovaquia y Grecia se importa cemento blanco. Las importaciones de clínker disminuyeron en el año 2003 pero en el 2004 alcanzaron el valor de 40.000 t.

Tabla 2.3.11. Datos principales de la industria del cemento en Croacia. Año 2004.

Producción (kt/año)	3.800
Consumo de cemento (kt/año)	2.730
Número de plantas integrales	7
Nº de empleados (aprox.)	1.811
Capacidad de producción de hornos de clínker kt/año (*)	2.600
Capacidad de prod. de cemento kt/año	4.400

Fuente. *Global Cement Report 2005*
(*) Año 2002. *World Cement Directory*

Tabla 2.3.12. Tipos de horno utilizados.

Número de hornos vía seca	5
Número de hornos vía húmeda	0
Número de hornos vía semi-húmeda	0
Número de hornos vía semi-seca	0
Número de hornos verticales	0
Total hornos	5

Fuente: World Cement Directory 2002

2.3.5. ESLOVENIA

Introducción

Eslovenia es un país del este de Europa, a orillas del mar Adriático. Tiene una superficie total de 20.273 km² y una población aproximada de 2 millones de habitantes.

Tabla 2.3.13. Indicadores de la situación socioeconómica de Eslovenia.

Superficie	10 ³ km ²	20,27
Población	millones	2,01
Esperanza de vida	años	76,14
Energía per cápita	equiv. kg de petróleo	3.288
PIB actual	10 ⁹ \$	39,41
Crecimiento del PIB	%	3,9
PPA de PIB per cápita	\$	19.600

Fuente: Grupo del Banco Mundial y global EDGE (2004)
(PPA = paridad de poder adquisitivo)

Eslovenia ganó la independencia de la antigua Yugoslavia en 1990. Desde entonces el gobierno implementó un comprehensivo programa de reformas, incluyendo la liberalización de precios y la reestructuración de la industria y de la economía en general. El proceso de privatización se ha llevado a cabo de acuerdo con los planes. En 1995, 215 grandes empresas ya habían sido privatizadas y 478 fueron privatizadas posteriormente. En dicha época la mayoría de las PYMES ya habían sido privatizadas (56.000) lo que correspondía a más de 90.000 empleados.

En la actualidad es uno de los países más prósperos de la Europa en transición y ocupa una posición privilegiada para unirse a las principales economías industriales modernas. Las empresas eslovenas tradicionalmente se han orientado hacia una economía de mercado y están avaladas por una gestión económica relativamente buena. Con todo, la economía eslovena depende mucho del comercio exterior, unos dos tercios del cual se produce con otros países de la UE, un motivo en el que se basa principalmente para solicitar su adhesión a la UE. Todo ello hace que Eslovenia sea muy sensible a cualquier cambio que se produzca en las relaciones comerciales con sus principales socios.

Industria y medio ambiente

Eslovenia es una economía pequeña y sus empresas son principalmente PYMES. Cuenta con alrededor de 141.000 empresas. Aproximadamente el 1,3 % del total corresponde a empresas de más de 1.000 trabajadores, mientras que el 89,7 % son microempresas o pequeñas y medianas

empresas (PYMES), con un número de 1 a 99 trabajadores. Es evidente que estas PYMES constituyen el grueso de la economía nacional, si bien es cierto que no disponen de los recursos necesarios para invertir en investigación y desarrollo y que se concentran principalmente en los núcleos urbanos. Las PYMES cuentan con asistencia técnica y directiva de instituciones como la Cámara de Comercio e Industria, el Centro de Desarrollo de Pequeñas Empresas y algunos parques tecnológicos de Maribor, Ljubljana.

De las 141.000 entidades empresariales eslovenas, el 80% son privadas. Los sectores industriales más desarrollados son el químico, el farmacéutico, el papelerero, el textil, el de alimentación y bebidas, el de elaboración de muebles, el de pequeños electrodomésticos para la cocina, el de la automoción y el de transformación de metales.

Sin duda, la industria es uno de los principales contaminadores de Eslovenia. La mayor parte de la contaminación atmosférica procede de la transformación del metal, la producción de electricidad, la industria papelera, las industrias de artes gráficas y fabricación de muebles (polvo, SO₂, NO_x, COT), la industria química, (CO, SO₂, NH₃) y la maderera (COT). La contaminación del agua es uno de los principales problemas ambientales; los principales contaminantes son las materias no solubles (procedentes de las industrias papeleras, artes gráficas, producción de energía, alimentarias y de transformación de metales), los problemas de DQO (generada por la industria papelera, artes gráficas y alimentaria), los nitratos y nitritos (procedentes de la industria transformadora del metal), el nitrógeno amoniacal (procedente del curtido y la industria química) y los metales (procedentes de la industria de transformación del metal y la industria química). La producción de residuos sólidos está experimentando un ligero descenso.

Industria del sector del cemento

El consumo de cemento de Eslovenia creció fuertemente en el año 2003 debido al aumento en la construcción de edificios y viviendas. Con un incremento del 16,4 por ciento en el consumo de cemento respecto al año anterior, hasta alcanzar los 1,35 Mt, se refuerza la posición de Eslovenia como el país del este de Europa con el mayor consumo per cápita de cemento, unos 600 kg/hab.

El 80 % del consumo de cemento se produce en forma granel. Un porcentaje similar de cemento se suministra por carretera.

Eslovenia presenta 2 plantas de producción de cemento con una capacidad total de 1,5 Mta y están en manos de los mayores productores de cemento austriaco.

La quema de combustibles alternativos se encuentra bien desarrollada; grasas animales, neumáticos usados y aceites usados son los más comúnmente utilizados.

En el año 2003 las exportaciones de cemento fueron de 0,17 Mt, con algo más de 58 por ciento destinadas a Italia. En cuanto al clínker, sus exportaciones son bastante pequeñas, con un valor alrededor de 8.000 t, todas ellas destinadas a Italia.

Las importaciones de cemento crecieron un 35,5 por ciento en el 2003 hasta 206.000 t lo que representa el 15 por ciento de la demanda local. Italia es la primera fuente de importación, suministró en 2003, 108.000 t de cemento portland y 5.000 t de cemento blanco.

Tabla 2.3.14. Datos principales de la industria del cemento en Eslovenia. Año 2004.

Producción (kt/año)	1.260
Consumo de cemento (kt/año)	1.230
Número de plantas	2
Nº de empleados (aprox.)	387
Capacidad de producción de hornos de clínker kt/año (*)	800
Capacidad de prod. de cemento kt/año	1.500

Fuente: *Global Cement Report 2005*

(*) Año 2002. *World Cement Directory*

Tabla 2.3.15. Tipos de horno utilizados.

Número de hornos vía seca	3
Número de hornos vía húmeda	0
Número de hornos vía semi-húmeda	0
Número de hornos vía semi-seca	0
Número de hornos verticales	0
Total hornos	3

Fuente: *World Cement Directory 2002*

2.3.6. ISRAEL

Introducción

Israel posee una economía diversificada y tecnológicamente avanzada, con un sector público importante, aunque en retroceso, y un potente sector de tecnologías de última generación. Los principales sectores industriales son la electrónica de alta tecnología y el equipamiento biomédico, los productos de metal, los productos alimenticios elaborados, la industria química y el equipamiento para el transporte. Además, Israel cuenta con un importante sector de servicios y es líder mundial en desarrollo de *software*.

Tabla 2.3.16. Indicadores de la situación socioeconómica de Israel.

Superficie	10 ³ km ²	20,77
Población	millones	6,27
Esperanza de vida	años	79,32
Energía per cápita	equiv. kg de petróleo	3.123
PIB actual	10 ⁹ \$	129
Crecimiento del PIB	%	3,9
PPA de PIB per cápita	\$	20.800

Fuente: *Grupo del Banco Mundial y global EDGE (2004)*

(PPA = *paridad de poder adquisitivo*)

Israel presenta un conjunto coherente de reglamentos y políticas ambientales. La PL queda plasmada en la legislación de las sustancias tóxicas y peligrosas y está controlada mediante un sistema de permisos. La aplicación de actividades preventivas se apoya directamente o a través del Centro Israelí para la Producción más Limpia y de los organismos gubernamentales.

Industria y medio ambiente

En las dos últimas décadas, a nivel industrial se han hecho avances importantes en los siguientes campos: la electrónica médica, la agrotecnología, las telecomunicaciones, los productos de química fina, el *software* y *hardware* informático y la talla y pulido de diamantes.

Los sectores de la alta tecnología, en los que se invierte capital y formación y los cuales requieren técnicas de producción sofisticadas, así como una inversión considerable en investigación y desarrollo (I+D), son los que registran una mayor tasa de crecimiento. Más del 90 % del presupuesto público anual de I+D se destina a las industrias de tecnología punta.

Industria del sector de cemento

El consumo per cápita actual de cemento en Israel es de 570 kg, este es un valor históricamente bajo para el país pero no para los valores establecidos a escala mundial. El 50 por ciento de la demanda es para la construcción de viviendas y el 33 por ciento para la de infraestructuras.

Israel dispone de 3 plantas de producción de cemento con una capacidad de 4,70 Mta de clínker y 6,2 Mta de cemento y no existen planes de aumentar dicha capacidad. Neshet Cement es el único productor de cemento en Israel.

Israel es un activo mercado tanto exportador como importador. Sin embargo, todas las exportaciones generalmente son hacia el mercado nacional palestino donde hay una competitividad potencial con Jordania y otros países vecinos que son activos en las exportaciones alrededor de Oriente Medio. Las exportaciones a Palestina alcanzaron un valor tan elevado como el de 1,6 Mt anuales pero en años recientes hasta el valor de 0,85 Mt en el 2003 t y ha mostrado signos de recuperarse con 0,95 Mt en el año 2004.

Las importaciones de cemento en Israel han sido procedentes históricamente de Rumania, Turquía, Jordania y Chipre y se han basado en acuerdos del gobierno israelí.

Tabla 2.3.17 Datos principales de la industria del cemento en Israel. Año 2004.

Producción (kt/año)	4 630
Consumo de cemento (kt/año)	3 820
Número de plantas	3
Nº de empleados (aprox.)	636
Capacidad de producción de hornos de clínker kt/año	4 700
Capacidad de prod. de cemento kt/año	6 200

Fuente. *Global Cement Report 2005*

Tabla 2.3.18. Tipos de horno utilizados.

Número de hornos vía seca	2
Número de hornos vía húmeda	6
Número de hornos vía semi-húmeda	0
Número de hornos vía semi-seca	1
Número de hornos verticales	0
Total hornos	9

Fuente: *World Cement Directory 2002*

2.3.7. MALTA

Introducción

Al poseer escasas materias primas propias y un mercado nacional muy limitado, Malta ha basado su desarrollo económico en el fomento del turismo y en las exportaciones de productos manufacturados. Desde mediados de los 80, la expansión que han experimentado estas actividades se ha convertido en el principal motor del fuerte crecimiento de la economía maltesa.

Tabla 2.3.19. Indicadores de la situación socioeconómica de Malta.

Superficie	km ²	316
Población	miles	398,5
Esperanza de vida	años	78,86
Energía per cápita	equiv. kg de petróleo	2.089
PIB actual	10 ⁹ \$	7,22
Crecimiento del PIB	%	1
PPA de PIB per cápita	\$	18.200

Fuente: Grupo del Banco Mundial y global EDGE (2004)
(PPA = paridad de poder adquisitivo)

Existe una sólida base para la fabricación de productos de gran valor añadido como los aparatos electrónicos y productos farmacéuticos, mientras que el sector manufacturero cuenta con más de 250 empresas de propiedad extranjera, orientadas hacia la exportación. El turismo genera el 35 % del PIB.

Industria y medio ambiente

La contribución del sector manufacturero al PIB es del 26 %, y su consumo total de energía generada ronda el 27 %. Los principales tipos de industria que conforman el sector abarcan desde la fabricación de semiconductores y otras piezas de equipos sofisticadas a la elaboración de alimentos y bebidas o la reparación de barcos. Otras actividades importantes del país son el turismo y la construcción.

Se consideran PYMES cerca del 90 % de las empresas, a las que presta asistencia técnica y ayuda a la gestión el Instituto para el Fomento de las Pequeñas Empresas (IPSE). La relación existente entre las PYMES respecto a la tecnología y las posibilidades de la PL es prácticamente nula y el apoyo que reciben de las grandes industrias para la puesta en marcha de la PL es muy escaso.

Industria del sector del cemento

Malta es un país en el que la demanda de cemento blanco es muy elevada, ésta representó el 35 por ciento de la demanda total el pasado año. El consumo per cápita de cemento es de unos 675 kg. El intervalo de consumo anual para los últimos ocho años hasta el año 2002 ha sido de 0,25 Mt a 0,28 Mt.

Todo el cemento requerido en el país es importado. Hace cinco años hubo planes de construcción de una planta de producción de cemento pero fue prohibido por problemas medioambientales. Se han instalado dos terminales de cemento en los últimos años, lo que ha permitido el suministro de cemento embolsado y en forma granel. Italia es el principal proveedor de cemento ya que cuenta con el 95 por ciento del volumen importado, los productores italianos han consolidado su posición dentro del mercado maltés con un alcanzando 0,23 Mt en 2003.

Tabla 2.3.20. Datos principales de la industria del cemento en Malta. Año 2004.

Producción (kt/año)	0
Consumo de cemento (kt/año)	250
Número de plantas	0
Nº de empleados (aprox.)	0
Capacidad de producción de hornos de clínker kt/año	0
Capacidad de prod. de cemento kt/año	0

Fuente: Global Cement Report 2005

Tabla 2.3.21. Tipos de horno utilizados.

Número de hornos vía seca	0
Número de hornos vía húmeda	0
Número de hornos vía semi-húmeda	0
Número de hornos vía semi-seca	0
Número de hornos verticales	0
Total hornos	0

Fuente: World Cement Directory 2002

2.3.8. SERBIA y MONTENEGRO

Introducción

Serbia y Montenegro son dos repúblicas independientes desde el 3 de junio de 2006. Anteriormente formaban una federación. A efectos del presente estudio, se consideraran los datos disponibles para la antigua federación.

Tabla 2.3.22. Indicadores de la situación socioeconómica de Serbia y Montenegro.

Superficie	10 ³ km ²	102,35
Población	millones	10,83
Esperanza de vida	años	74,73
Energía per cápita	equiv. kg de petróleo	n.d
PIB actual	10 ⁹ \$	26,27
Crecimiento del PIB	%	6,5
PPA de PIB per cápita	\$	2.400

Fuente: Grupo del Banco Mundial y global EDGE (2004)
(PPA = paridad de poder adquisitivo)

Industria y medio ambiente

Debido a las sanciones económicas y políticas impuestas en 1992, en la última década se ha intensificado la utilización de los recursos naturales. La contaminación del agua y el aire, así como la generación de residuos industriales, han alcanzado niveles preocupantes.

En los últimos 30 años, la calidad de las aguas ha caído considerablemente debido a la rápida industrialización y a las presiones de la urbanización. Unos 20.000 km² del territorio de Serbia y Montenegro se pueden clasificar como zonas degradadas debido a la erosión, las canteras o el depósito descontrolado de residuos.

Los minerales son el primer recurso natural de Serbia y Montenegro, por lo que las principales industrias del país son industrias extractivas. Los depósitos de antimonio y plomo están entre los más importantes de Europa. También se pueden encontrar carbón, zinc, oro, cromo y cobre y existen pequeños depósitos de gas natural.

Industria del sector del cemento

La disminución de la actividad constructora del país ha hecho que el consumo nacional de cemento disminuya un 5,8 por ciento y alcance un valor de 2,3 Mt. La construcción de viviendas es el principal mercado del sector y representa el 60 por ciento del total consumido. Las dos terceras partes del consumo de cemento en Serbia y Montenegro son de cemento embolsado pero el uso de cemento en forma granel es importante en el área de Belgrado.

Serbia y Montenegro tiene 4 plantas de producción de cemento lo que supone una capacidad total de 3,7 Mt, todas ellas están situadas en Serbia a excepción de una que se encuentra en la provincia de Kosovo.

Las importaciones de cemento son prácticamente nulas. Las exportaciones son pequeñas, en el año 2003 fueron de 0.15 Mt, normalmente abastecen los mercados de países vecinos.

Tabla 2.3.23. Datos principales de la industria del cemento en Serbia y Montenegro. Año 2004.

Producción (kt/año)	2.450
Consumo de cemento (kt/año)	2.400
Número de plantas	4
Nº de empleados (aprox.)	n.d
Capacidad de producción de hornos de clínker kt/año (*)	2.700
Capacidad de prod. de cemento kt/año	3.700

Fuente. *Global Cement Report 2005*
 (*) Año 2002. *World Cement Directory*

Tabla 2.3.24. Tipos de horno utilizados.

Número de hornos vía seca	6
Número de hornos vía húmeda	2
Número de hornos vía semi-húmeda	0
Número de hornos vía semi-seca	0
Número de hornos verticales	0
Total hornos	8

Fuente: *World Cement Directory 2002*

2.3.9. TURQUÍA

Introducción

Turquía es un país ubicado entre los continentes europeo y asiático, a orillas del mar Mediterráneo. Tiene una superficie total de 780.580 km² y una población aproximada de 70 millones de habitantes.

Tabla 2.3.25. Indicadores de la situación socioeconómica de Turquía.

Superficie	10 ³ km ²	780,6
Población	millones	69,66
Esperanza de vida	años	72,36
Energía per cápita	equiv. kg de petróleo	1.1815
PIB actual	10 ⁹ \$	508,7
Crecimiento del PIB	%	8,2
PPA de PIB per cápita	\$	7.400

Fuente: Grupo del Banco Mundial y global EDGE (2004)
(PPA = paridad de poder adquisitivo)

La estrategia de crecimiento, basada en las exportaciones y el libre mercado, ha situado a la economía turca entre las que presentan un más rápido crecimiento dentro de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE). Sin embargo, el programa de reformas iniciado a principios de los años ochenta no ha sido totalmente completado, resultando en una elevada inflación, estimulada principalmente por el gran déficit del sector público.

El descenso del peso de la agricultura en la economía coincide con la rápida expansión de los sectores de servicios e industrial. El sector textil representa la principal industria manufacturera turca y es el que más exporta. Con la creación de un Ministerio del Medio Ambiente en 1991, las cuestiones ambientales han ido adquiriendo cada vez más un mayor protagonismo.

Industria y medio ambiente

Los principales sectores industriales turcos son el manufacturero (textil, industria química, metalúrgica, papelera y alimentaria), la minería, el energético y el de la construcción. Otros sectores destacados son los de infraestructuras turísticas, vehículos automóviles y electrónica. La contaminación industrial de Turquía se debe principalmente a las actividades de producción. El sector manufacturero es el que más contribuye a la contaminación industrial del país.

En Turquía, las pequeñas y medianas empresas representan el 98,8 % del total de instalaciones de producción; la mayor parte del 1,2 % restante corresponde a empresas de tamaño medio. La ubicación de las industrias se ha convertido recientemente en un tema relevante en Turquía. Como demuestran las inversiones del Gobierno, actualmente existe cierta tendencia a fomentar el desarrollo de las zonas industriales ya existentes y a establecer otras nuevas, más que a potenciar el crecimiento de las PYMES situadas en zonas aisladas. En la actualidad, el 14 % de las PYMES se encuentran en zonas industriales organizadas y el 38 % en pequeñas zonas industriales; el resto corresponde a empresas aisladas.

Industria del sector del cemento

El consumo de cemento en Turquía muestra por segundo año consecutivo un incremento en el volumen demandado, alcanzando un valor en el 2003 de 28,11 Mt lo que representa un incremento nacional del 4,8 por ciento.

En cuanto a tipos de cemento, el cemento portland ordinario fue el 35,1 por ciento del cemento consumido en el 2003 mientras que el cemento blanco representó el 0,7 por ciento.

La capacidad de producción de cemento en Turquía es de 38 Mta de clínker y de 67 Mta de cemento, distribuida en 57 plantas. La producción creció un 7,13 por ciento en el 2003 y alcanzó el valor de 30,42 Mt. La principal razón de la disminución del ratio de la producción de clínker es la reducción de las exportaciones del mismo. El uso de combustibles alternativos está en sus primeros momentos aunque las regulaciones sobre este tema están en marcha desde el 2001.

Las exportaciones de cemento crecieron un 23,6 por ciento en 2003 alcanzando el valor de 7,39 Mt, de las que el 44,29 por ciento del volumen fueron destinados hacia Europa. Las exportaciones de clínker están disminuyendo y disminuyeron un 31,9 por ciento el pasado año hasta alcanzar el valor de 3,04 Mt y se espera que continúen disminuyendo en este año hasta 2,0 Mt. España e Italia suponen el 81 por ciento de las exportaciones de clínker.

Las importaciones de cemento son mínimas. Las importaciones de clínker en el 2003 fueron 12.300 t y la mayor parte de ellas fueron destinadas a alimentar los molinos del área de Estambul.

Tabla 2.3.26. Datos principales de la industria del cemento en Turquía. Año 2004.

Producción (kt/año)	38.200
Consumo de cemento (kt/año)	29.300
Número de plantas	57
Nº de empleados (aprox.)	8.743
Capacidad de producción de hornos de clínker kt/año (*)	38.000
Capacidad de prod. de cemento kt/año	67.000

Fuente. Global Cement Report 2005

(*) Año 2002. *World Cement Directory*

Tabla 2.3.27. Tipos de horno utilizados.

Número de hornos vía seca	54
Número de hornos vía húmeda	4
Número de hornos vía semi-húmeda	2
Número de hornos vía semi-seca	3
Número de hornos verticales	0
Total hornos	63

Fuente: World Cement Directory 2002

2.4. SITUACIÓN DE LA INDUSTRIA DEL CEMENTO EN LOS PAÍSES DEL PAM

Como ya se comentará más extensamente en el apartado 3. *Descripción de Procesos*, la producción del cemento se puede llevar a cabo mediante cuatro procesos diferentes: producción en vía húmeda, semihúmeda, semiseca, y vía seca. Este último es el proceso que presenta mayor ahorro energético, aspecto importante a considerar tanto medioambientalmente (menor consumo de combustibles, menor generación de emisiones a la atmósfera) como económicamente (ahorro de costes).

De los países del PAM, España, Turquía, e Italia son los que mayor número de hornos en vía seca presentan. Por el contrario Egipto, e Israel son los que utilizan mayor número de hornos en vía húmeda, siendo éste proceso el que mayor consumo energético requiere, por lo que tanto

medioambientalmente como económicamente son los hornos menos indicados en la producción de cemento, a excepción de los hornos verticales, que prácticamente se encuentran en desuso.

A continuación se muestra un gráfico con el porcentaje de utilización según el tipo de horno en los países del PAM, así como un gráfico con el porcentaje de la capacidad de producción instalada hasta la actualidad en dichos países, en el cual se puede observar que el 88% de la capacidad de producción de cemento en los países del PAM es en vía seca.

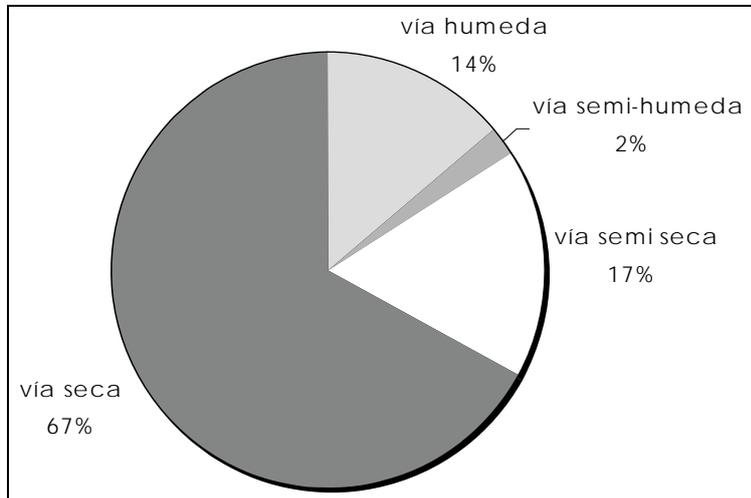


Gráfico 2.4.1. Tipos de horno instalados en los países del PAM a fecha de 2005.

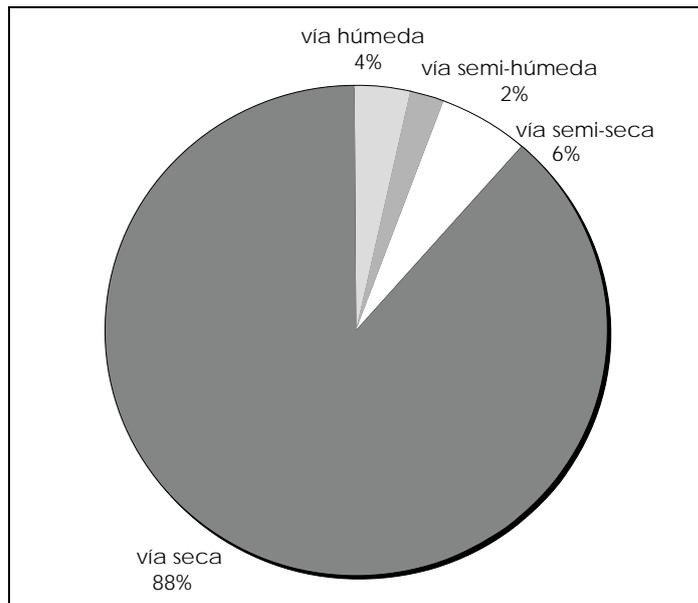


Gráfico 2.4.2. Capacidad instalada según el tipo de horno en los países del PAM a fecha de 2005.

La situación económica de los últimos años ha hecho que la reducción de costes sea un factor clave en nuestros días para cualquier sector industrial. Con este objetivo los fabricantes de cemento han adoptado numerosas medidas para reducir el consumo de materias primas y de energía, aumentando la eficacia y rendimiento de muchos de sus procesos, lo cual ha contribuido, de forma indirecta, a la mejora medioambiental de las fábricas.

Por lo que respecta al consumo de cemento, España, Italia, Egipto, Turquía y Francia son los países del PAM que mayor consumo presentan, siendo este valor en el año 2004 de 47.200, 45.000, 29.300, 24.500 y 21.800 kt respectivamente. Los consumos de los distintos países de la región del Plan de Acción para el Mediterráneo para distintos años se muestra en la tabla 2.4.1.

Tabla 2.4.1. Datos de consumo de cemento en los países del PAM (Ktoneladas).

País	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Albania	950	1.200	1.500	1.650	1.760	1.850
Argelia	7.611	9.000	9.500	10.500	11.500	12.000
Bosnia-Her	1.210	1.580	1.600	1.710	1.570	1.620
Croacia	1.830	1.823	1.923	2.280	2.710	2.730
Chipre	920	940	1.050	1.350	1.430	1.570
Egipto	27.200	26.300	26.700	27.200	26.600	24.500
Eslovenia	1.206	1.240	1.180	1.160	1.350	1.230
España	34.630	38.440	42.150	44.120	46.220	48.003
Francia	20.210	20.630	20.660	20.727	20.678	21.800
Grecia	8.500	9.100	9.550	10.640	11.000	10.100
Israel	4.850	4.519	4.376	4.350	3.820	3.820
Italia	36.120	38.338	39.469	41.300	43.500	45.000
Líbano	2.966	2.620	2.720	2.500	2.592	2.592
Libia	3.000	3.220	3.000	3.260	3.300	3.500
Malta	570	0	270	280	270	250
Marruecos	7.260	7.479	8.057	8.480	9.260	9.700
Mónaco	0	0	0	0	0	0
Serbia y Montenegro	1.500	2.248	2.452	2.475	2.330	2.400
Siria	4.865	4.200	4.800	5.060	5.500	6.400
Túnez	4.390	4.948	5.178	5.000	5.100	5.300
Turquía	31.529	31.500	25.250	26.811	28.106	29.300

Fuente: Global Cement Report 2005

Los datos de la tabla anterior quedan reflejados en el gráfico 2.4.3. Cabe destacar que el consumo tan elevado de Egipto es consecuencia de la gran población que presenta, siendo el consumo de cemento per cápita, relativamente bajo (410 kg/hab/año), valor reflejado en la tabla 2.4.2.

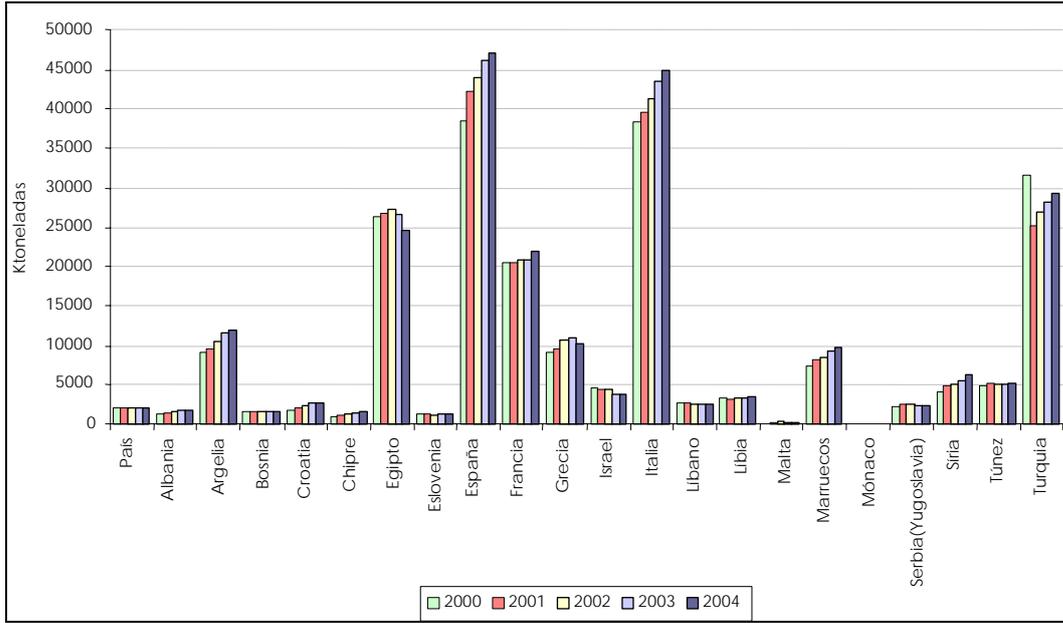


Gráfico 2.4.3. Consumo de cemento de los países del PAM (k toneladas).

De los datos mostrados en la tabla 2.4.1 se obtiene el gráfico del consumo global de cemento en la Región del Mediterráneo (ver gráfico 2.4.4). Se observa un incremento continuo desde el año 1995 al 2004. El consumo total de cemento durante el año 2004 en la región del Mediterráneo fue de 232,8 millones de toneladas siendo este valor el mayor en el tiempo considerado.

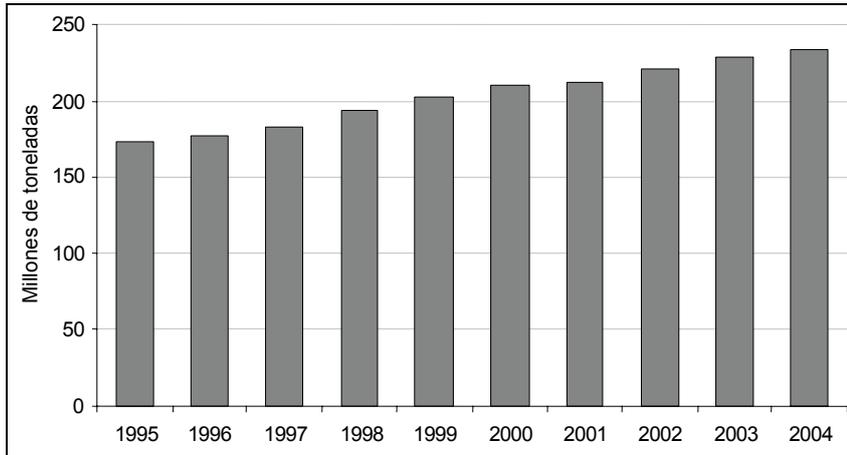


Gráfico 2.4.4. Consumo Global de cemento de los países del PAM (Mtoneladas).

Si se distingue por subregiones (Norte Sur, Este), se observa una gran diferencia entre las distintas regiones del mediterráneo (ver gráfico 2.4.5.). Así, por ejemplo, en el año 2000 el 54 % del consumo total de cemento en los países del Plan de Acción para el Mediterráneo corresponde a los países del Norte del Mediterráneo, mientras que esta cifra es del 27 % y 19 % para los países del Sur y Este del Mediterráneo respectivamente.

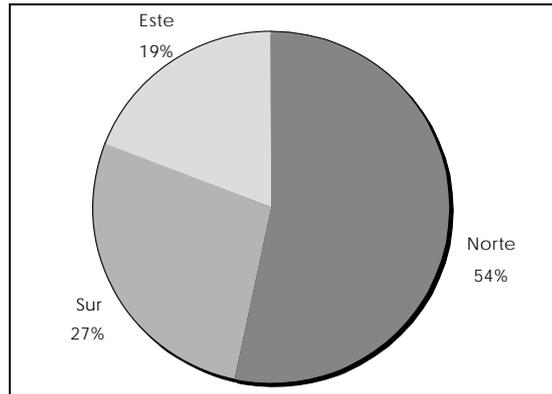


Gráfico 2.4.5. Consumo de cemento de los países del PAM. Año 2004.

Esta situación se ha mantenido a lo largo del tiempo y el Norte siempre ha sido la región de los países del Plan de Acción del Mediterráneo con una mayor demanda, que además ha ido creciendo a lo largo de los años (ver gráfico 2.4.6). El Sur ha ocupado también el segundo lugar, con un consumo también ascendente y el Este ha ocupado el último puesto con un consumo prácticamente constante.

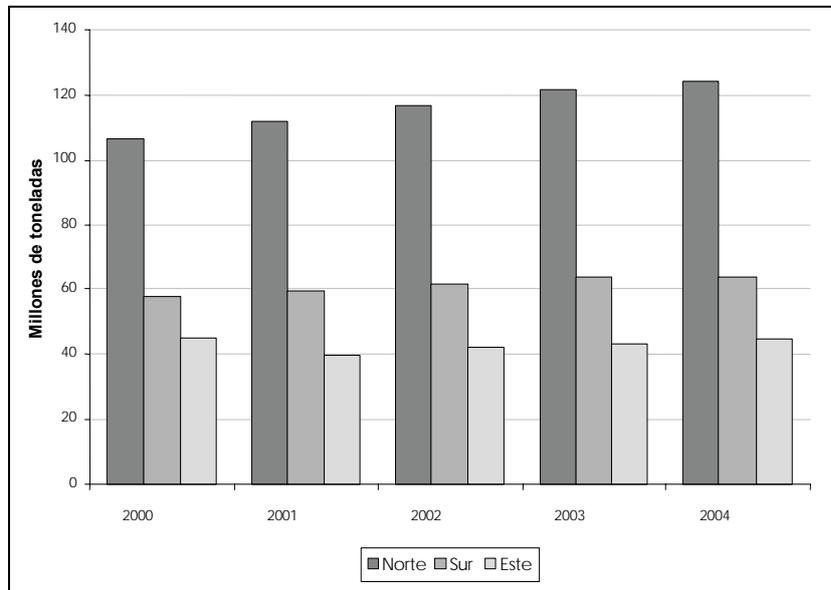


Gráfico 2.4.6. Consumo de cemento en los países del PAM.

En la tabla 2.4.2. se muestra el consumo per cápita de cada uno de los países del PAM en el 2004, siendo:

Tabla 2.4.2. Consumo per cápita de cemento en los países del PAM. Año 2004.

Países	Consumo (kg/hab/año)
Argelia	362
Egipto	369
Líbano	663
Libia	60
Marruecos	308
Siria	304
Túnez	515
España	1.126
Francia	366
Grecia	963
Italia	785
Mónaco	
Albania	497
Bosnia	412
Croacia	1.588
Eslovenia	643
Serbia(Yugoslavia)	678
Israel	307
Malta	570
Turquía	675

Fuente: *Global Cement Report 2005*

Relacionando el consumo per cápita de cemento con el PIB per cápita de cada país, gráfico 2.4.7, se observa una tendencia más o menos generalizada, según la cual los países con un mayor PIB per cápita presentan un mayor consumo per cápita de cemento. Cabe señalar dos casos extremos, el caso de Francia, que presenta un consumo per cápita de cemento muy bajo respecto al PIB, lo cual es consecuencia de que la actividad constructora no es de gran importancia dentro de la economía francesa; mientras que, por el contrario, en España el sector de la construcción es uno de los sectores con mayor influencia dentro de la economía del país. Y, como ya se ha comentado anteriormente, Egipto, a pesar de ser uno de los países con un mayor consumo de cemento (debido a la gran población que presenta), tiene un consumo per cápita de relativamente bajo.

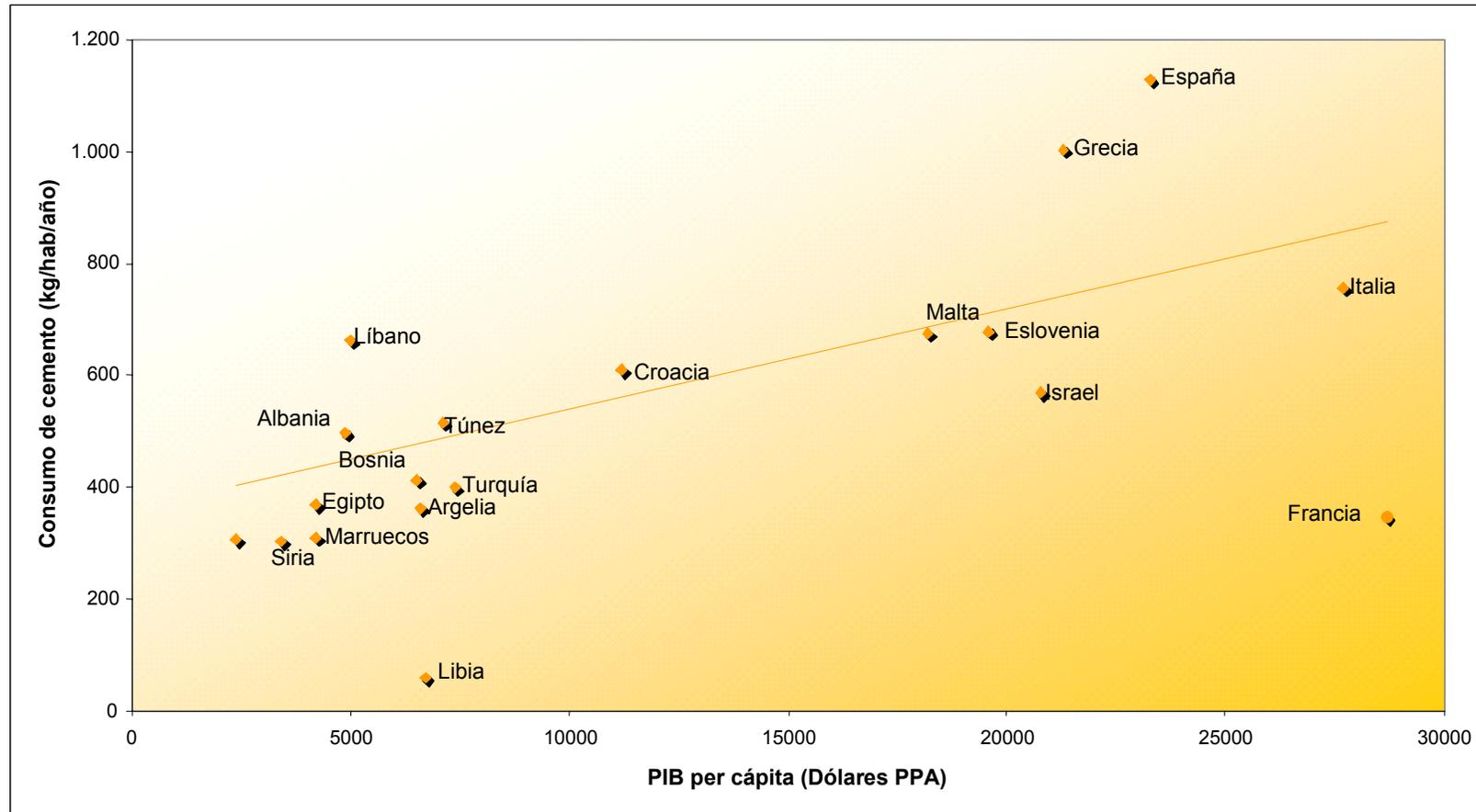


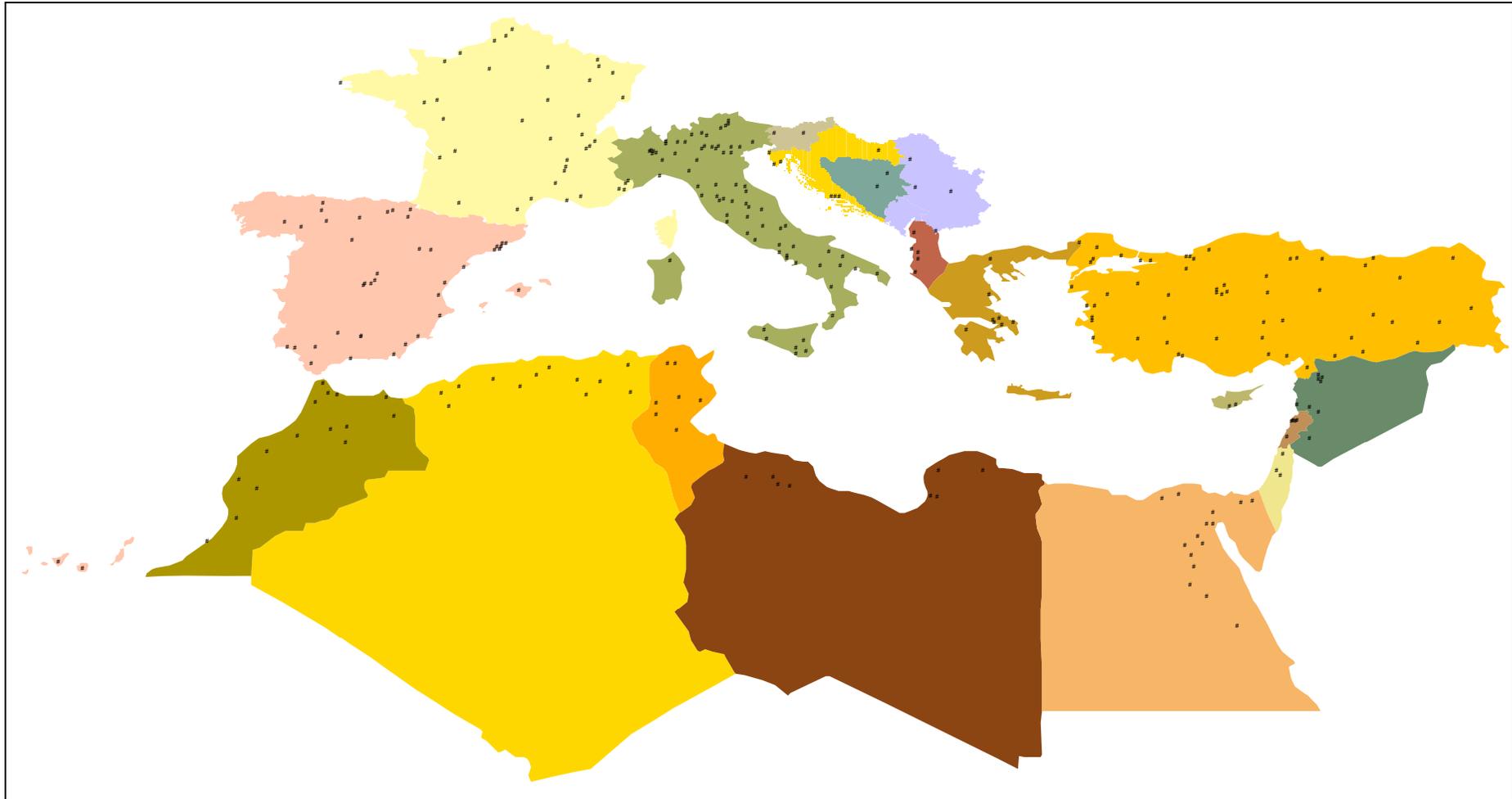
Gráfico 2.4.7. Consumo de cemento vs PIB per cápita. Año 2004.

En cuanto a la producción, al igual que en el caso del consumo, se observan grandes diferencias entre los distintos países del Mediterráneo, según se muestra en los datos de la tabla 2.4.3. y representado en el gráfico 2.4.9.

Tabla 2.4.3. Producción de cemento en los países del PAM (Toneladas).

País	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Albania	300	300	300	300	300	200	200	190	200	200
Argelia	6.820	7.460	7.130	7.800	7.680	8.400	8.600	8.900	9.000	10.500
Bosnia	0	0	0	500	500	630	700	850	800	920
Croacia	1.690	1.795	2.084	2.190	2.600	2.773	3.165	3.300	3.570	3.800
Chipre	1.022	1.500	1.450	2.950	2.950	1.450	1.500	1.790	1.860	1.890
Egipto	16.934	18.700	19.700	20.950	22.030	24.100	25.700	28.500	29.100	31.000
Eslovenia	0	1.064	1.011	1.150	1.223	1.255	1.240	1.180	1.200	1.260
España	28.491	27.791	26.693	33.080	35.830	38.410	40.900	42.420	44.700	46.602
Francia	19.730	19.420	19.610	18.700	19.530	20.040	20.430	19.437	19.655	20.900
Grecia	13.940	14.500	14.700	14.750	14.350	15.420	15.200	14.680	15.500	15.700
Israel	5.600	5.600	5.400	6.476	6.354	5.703	4.703	4.582	4.607	4.630
Italia	34.000	33.832	34.378	36.100	37.300	39.020	39.804	41.400	43.500	44.800
Líbano	2.450	3.780	3.650	3.310	3.200	2.900	2.900	3.200	3.300	4.400
Libia	3.200	0	0	3.000	3.000	3.200	3.000	3.320	3.320	3.500
Malta	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Marruecos	6.405	6.800	7.500	7.414	7.530	7.830	8.397	8.800	8.397	9.900
Mónaco	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Serbia y Montenegro (Yugoslavia)	0	2.200	2.100	1.800	1.500	2.229	2.512	2.485	2.100	2.450
Siria	4.463	4.471	4.840	4.607	4.781	4.252	5.200	5.010	5.010	5.200
Túnez	4.960	4.400	4.800	4.750	4.210	5.383	5.464	5.550	5.750	6.000
Turquía	31.500	35.236	36.034	37.488	34.816	35.950	29.960	32.758	35.095	38.200

Como se puede ver, los países con mayor producción son España, Italia, Turquía y Egipto, siendo éstos mismos países los que mayor número de fábricas de cemento presentan, tanto integrales (producción de clínker y cemento) como de molienda (sin producción de clínker), ver gráfico 2.4.8.



Fuente: Global Cement Report 2005

Gráfico 2.4.8. Distribución de las Plantas de Cemento en los países del Plan de Acción para el Mediterráneo.

De los datos de la tabla 2.4.3. se obtiene el siguiente gráfico de producción de cemento en los países del PAM a lo largo de los años 2000-2004.

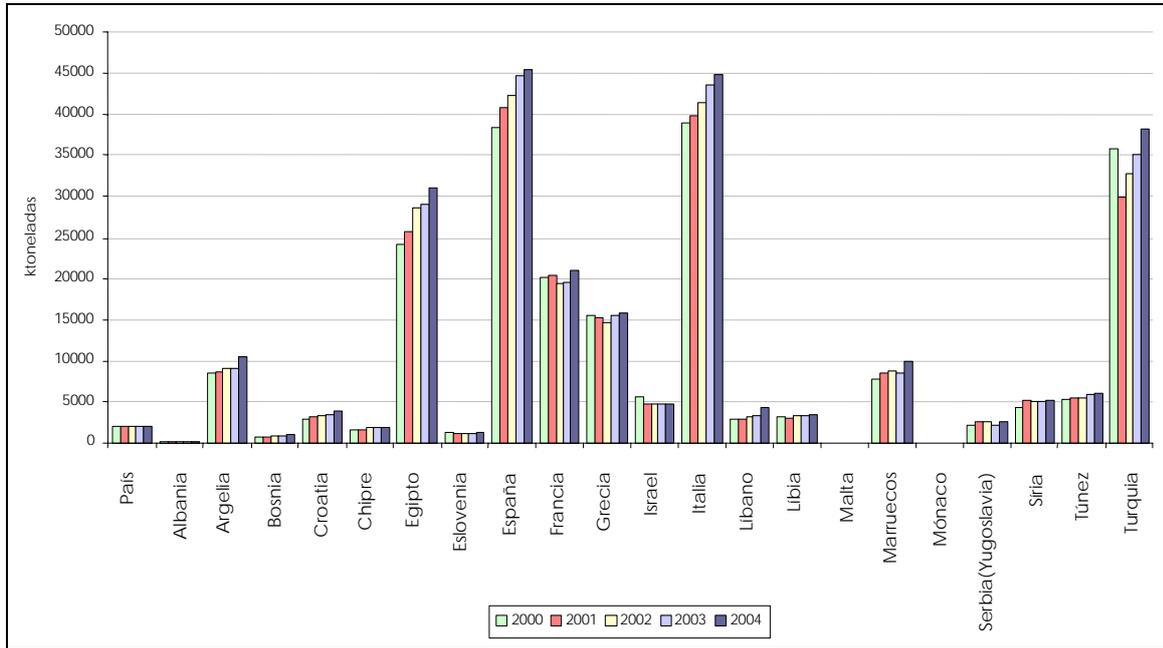


Gráfico 2.4.9. Producción de cemento en los países del PAM (Toneladas).

A su vez, de la tabla 2.4.3 se obtiene la producción total de cemento en los países del PAM. Dicha producción se ha mantenido en torno a 200 millones de toneladas anuales, manteniéndose una cierta tendencia de aumento a lo largo de los años (ver gráfico 2.4.10). Como se puede observar, la producción total de cemento durante el año 2004 en los países del PAM fue de 250,75 millones de toneladas.

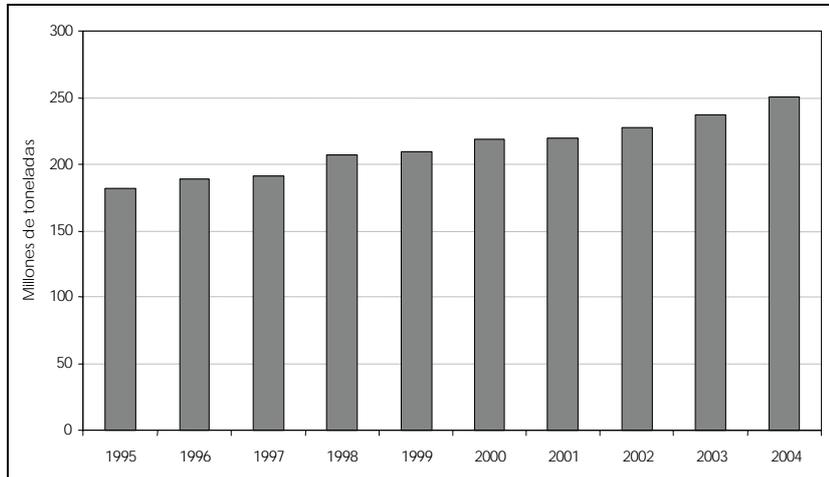


Gráfico 2.4.10. Producción Global de cemento de los países del PAM (Mtoneladas).

La producción de cemento, al igual que el consumo, presenta una diferencia considerable entre las distintas subregiones del Mediterráneo (ver gráfico 2.4.11). En el año 2004 el 51 % de la producción total de cemento en los países del Plan de Acción para el Mediterráneo corresponde a los países del Norte del Mediterráneo, mientras que esta cifra es del 28 % y 21 % para los países del Sur y Este del Mediterráneo respectivamente. La misma tendencia se ha presentado a lo largo del tiempo (ver gráfico 2.4.12).

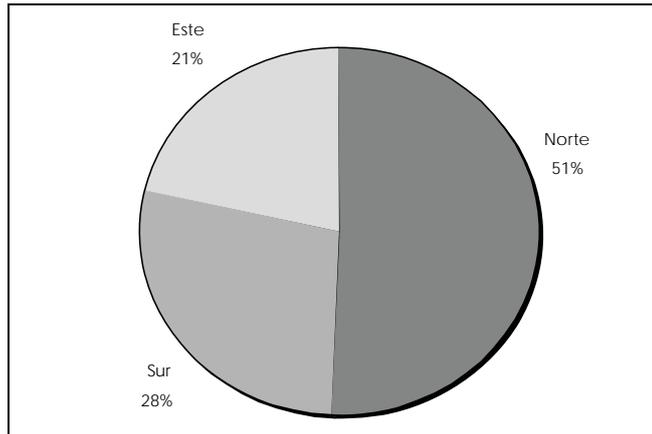


Gráfico 2.4.11. Producción Global de cemento de los países del PAM en el año 2004.

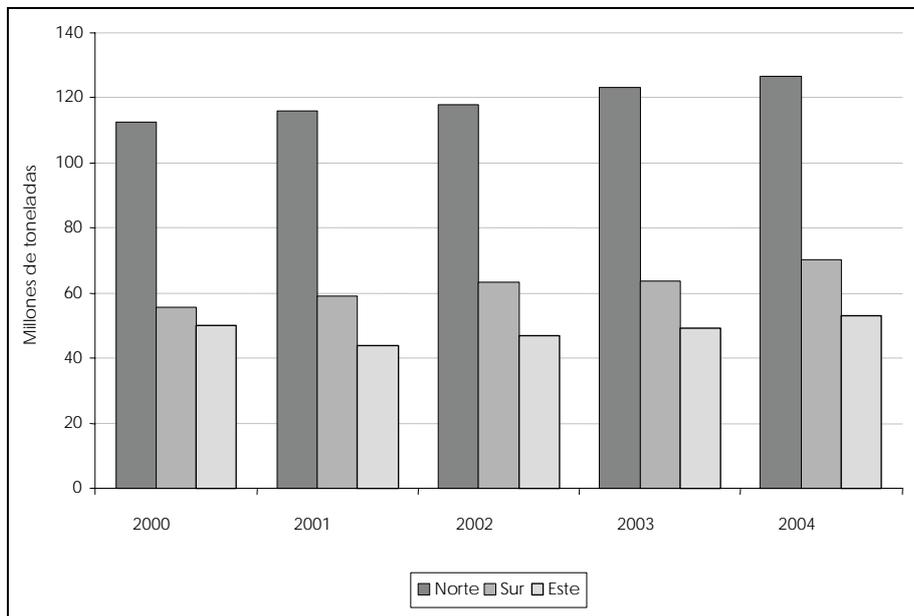


Gráfico 2.4.12. Producción de cemento de los países del PAM.

3. DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS

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

Se fabrica a partir de una mezcla de clínker (resultado de la calcinación hasta fusión parcial de mezclas de calizas y arcillas) y yeso que actúa como controlador de fraguado. Además se le pueden añadir otro tipo de adiciones activas como cenizas volantes, escorias de alto horno, caliza, humo de sílice, puzolanas, bauxita, arena o minerales de hierro.

3.1. MATERIAS PRIMAS

3.1.1. Materias primas básicas

El proceso de fabricación del cemento comienza con la obtención de las materias primas necesarias para conseguir la composición deseada de óxidos metálicos para la producción de clínker (ver apartado 3.2.4. *Cocción del clínker*).

Las materias primas básicas para la fabricación de clínker son principalmente:

- Un aporte de carbonato: generalmente calizas o margas. Son las encargadas de aportar el CaO que luego reaccionará en el horno para formar los silicatos, que son los componentes realmente activos en el clínker.
- Un aporte de fundentes: generalmente arcillas o pizarras. Son las encargadas de aportar los óxidos que funcionan como fundentes y que contribuyen a la formación de fase líquida en el horno facilitando las reacciones.

Como se ha comentado anteriormente, para la producción del cemento se le añade yeso al clínker, que actúa como controlador de fraguado.

En la tabla 3.1.1 se muestra la composición típica de algunas materias primas básicas:

Tabla 3.1.1. Composición de las Materias Primas Básicas.

Constituyente	Caliza	Marga	Arcilla
SiO ₂	0,5-3	3-50	37-78
Al ₂ O ₃ + TiO ₂	0,1-1	1-20	7-30
Fe ₂ O ₃ + Mn ₂ O ₃	0,1-0,5	0,5-10	2-15
CaO	52-55	5-52	0,5-25
MgO	0,5-5	0,5-5	= 5
K ₂ O	= 0,3	= 3,5	0,55
Na ₂ O	= 0,1	= 0,2	0,1-0,3
SO ₃	= 0,1	0,1-4	= 3
CO ₂ + H ₂ O	40-44	2-42	1-20

Fuente: VDZ y otras referencias
 (*)Valores expresados en % en peso

3.1.1.1. Caliza

Las calizas son rocas sedimentarias, formadas por depósito de los productos de alteración química y física de rocas preexistentes, primitivas como el feldespato de calcio. Su componente fundamental es el CaCO₃. Se encuentra en las capas superficiales de muchos cerros y montañas, en depósitos de profundidad variable, los hay de más de 200 metros. Para la fabricación de cemento se extraen grandes volúmenes de caliza, puesto que ésta representa aproximadamente el 80 % de las materias primas que forman el clínker (ver apartado 3.2.4.1 *Composición del clínker*). Además la piedra caliza se puede moler junto con el clínker actuando como relleno en el cemento, puesto que no participa en las reacciones de endurecimiento.

Normalmente la cantera de caliza se encuentra cerca de la planta de producción de cemento; de no ser así el coste del cemento se elevaría considerablemente. Debido a su dureza, la caliza se extrae de las canteras con el empleo de explosivos. Una voladura puede producir de 30 a 100 mil toneladas de materia prima.

3.1.1.2. Marga

La marga se compone de arcillas y carbonatos. Es posible distinguir distintos tipos de margas en función de las relaciones cuantitativas de los distintos componentes: marga arcillosa, marga y marga calcárea. La marga frecuentemente lleva nódulos de yeso, calcita y pirita, es de color gris claro hasta oscuro, café o verdoso. El tamaño de los granos es igual al de la arcilla (< 0,02 mm). La marga, debido a su abundancia y al hecho de contener material calcáreo y arcilloso en estado homogeneizado, constituye una excelente materia prima para la elaboración del cemento.

3.1.1.3. Arcilla

La arcilla es la segunda materia prima en importancia para la fabricación de cemento ya que cuando la caliza empleada no contiene suficiente alúmina y sílice, es necesaria la adición de material arcilloso. Las arcillas están formadas principalmente por hidrosilicatos de alúmina, sin embargo, exhiben una amplia variación en su composición mineralógica y química. Varían desde las compuestas exclusivamente por silicatos de aluminio (blancas), hasta las que pueden contener más de 50 % de sílice libre, o contener hidróxido de hierro, sulfuro de hierro, carbonato de calcio, etc. El hidróxido de hierro es el componente colorante más frecuente de las arcillas. Puesto que la granulometría es importante, se prefiere la presencia de sílice finamente dividida. La arcilla es igualmente la principal fuente de álcalis en el proceso de fabricación de cemento.

3.1.1.4. Pizarra

Se les llama "pizarra" a las arcillas constituidas principalmente por óxidos de silicio de un 45 a 65 %, por óxidos de aluminio de 10 a 15 %, por óxidos de hierro de 6 a 12 % y por cantidades variables de óxido de calcio de 4 a 10 %. Es también la principal fuente de álcalis. La pizarra representa aproximadamente un 15 % de la materia prima que formará el clínker. Como estos minerales son relativamente suaves, el sistema de extracción es similar al de la caliza aunque requiere explosivos con menor potencia.

3.1.1.5. Yeso/anhidrita

El yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y la anhidrita (CaSO_4), sulfatos de calcio, se consideran materias primas fundamentales en la producción de cemento. Son añadidos al clínker por la capacidad de regulación del fraguado y endurecimiento que tienen los productos resultantes de su deshidratación parcial o total, al amasarlos con cantidades limitadas de agua (ver apartado 3.2.8. *Puesta en obra del cemento*). El yeso, muy difundido en la litosfera, se presenta como selenita (cristales monocristalinos), como sericolita (yeso fibroso), como alabastro yesoso, de estructura granular, o en masas cristalinas mixtas constituyendo la piedra de yeso, muy abundante.



Caliza

Arcilla

Pizarra

Yeso

Imagen 3.1.1. Materias primas para la fabricación del cemento.

3.1.2. Materias primas secundarias

Muy habitualmente debe apelarse a otras materias primas secundarias bien naturales (materias puzolánicas, bauxita, arena, etc.) o bien subproductos o residuos de otros procesos de fabricación (cenizas, escorias de alto horno, humo de sílice, etc.).

La incorporación de estas materias primas secundarias puede ser como pequeñas "adiciones" o incluso como "componente principal" según el tipo de cemento. Este es el caso de las materias puzolánicas que dan lugar al cemento puzolánico (ver apartado 3.2.6. Productos de cemento).

La adición de estos materiales permite alcanzar la calidad y propiedades deseadas del cemento.

3.1.2.1. Materiales correctivos

Para corregir la composición de los compuestos deseados en las materias primas se utilizan correctores naturales que proporcionan los óxidos principales que compondrán las fases principales del clínker (silicatos de calcio - tri y dicálcicos - y aluminatos de calcio) como: la bauxita (Al_2O_3), el mineral de hierro (Fe_2O_3) y la arena (SiO_2) (ver tabla 3.1.2. *Composición de las materias correctivas*).

Tabla 3.1.2. Composición de las Materias Correctivas.

Constituyente	Arena	Minerales de hierro	Bauxita
SiO ₂	80-99	4-11	2,9
Al ₂ O ₃ + TiO ₂	0,5-3	0,2-3	57,5
Fe ₂ O ₃ + Mn ₂ O ₃	0,5-2	19-95	22,8
CaO	0,1-3	0,1-34	2,4
MgO	= 0,5	= 1,5	0,04
K ₂ O	= 1	Trazas	0,04
Na ₂ O	= 0,5	Trazas	0,02
SO ₃	= 0,5	Trazas	0,12
CO ₂ + H ₂ O	= 5	0,1-30	13,5

Fuente: VDZ y otras referencias
 (*)Valores expresados en % en peso

Arena

La Arena es un tipo de árido cuyas partículas tienen tamaños comprendidos entre 0,16 y 5 mm. Las características más importantes para el uso de los áridos son la granulometría, el grado de redondeamiento, la litología y la ausencia de vidrio, materia orgánica, sales solubles y arcillas.

Minerales de Hierro

Los óxidos de hierro naturales, especialmente la hematita, son utilizados como fuente de Fe₂O₃ en la fabricación del cemento. Además, el óxido de hierro es utilizado para colorear el cemento y, por ende, los hormigones preparados con él, ya que su color depende del color de los áridos y del cemento. Para la fabricación de cemento, el óxido de hierro debe contener más de 75 % de Fe₂O₃ y granulometría menor de 1".

Bauxita

Los minerales de bauxita son óxidos de aluminio hidratados, denominados gibbsita (Al₂O₃ x 3H₂O) que contiene 65,4 % Al₂O₃ y boehmita y diásporo (Al₂O₃ x H₂O) que contienen 85 % Al₂O₃. La arcilla bauxítica es utilizada en la fabricación de cemento debido a que presenta un alto contenido en Al₂O₃, superior a 35 %, y una favorable relación entre Al₂O₃ y SiO₂.

3.1.2.2. Materias puzolánicas

Otra materia natural utilizada en la fabricación del cemento es la puzolana. Es un material de silíceos o sílico-aluminoso (ver tabla 3.1.3. *Composición de las puzolanas*) de origen natural de grano fino, que en presencia de hidróxido de calcio y agua puede endurecer a temperatura ambiente. Los productos de la reacción puzolánica son hidratos del silicato cálcico, que son los constituyentes que proporcionan la resistencia mecánica. Las rocas sedimentarias que contienen cantidades superiores de silicio reactivo, así como las rocas con un alto contenido de silicio libre de origen orgánico, también pertenecen al grupo de materiales puzolánicos naturales.

Tabla 3.1.3. Composición de las Puzolanas.

Constituyente	Puzolanas
SiO ₂	53,9 , 63,2
Al ₂ O ₃	15,2-20,4
TiO ₂	0,6-1,2
P ₂ O ₅	0,1-0,2
Fe ₂ O ₃	5,2-7,9
Mn ₂ O ₃	0,1-0,3
CaO	2,7-8,5
MgO	1,12,7
SO ₃	0,0-0,3
K ₂ O	1,5-6,0
Na ₂ O	1,5-4,3
LOI	7,1-11,6
CO ₂	0,6-4,8
H ₂ O	–
S ²⁻	–
CaO _{libre}	–

Fuente: VDZ y otras referencias
 (*)Valores expresados en % en peso

3.1.2.3. Reciclado y valorización material y energética de residuos

La industria cementera emplea ciertos residuos y subproductos minerales de composición similar a la de sus materias primas o que incluso mejoran las prestaciones de los cementos. Dadas las enormes cantidades de materias primas que procesa el sector, este reciclaje supone un gran ahorro de recursos naturales y evita el vertido de grandes volúmenes de materiales aprovechables.

La utilización de residuos y subproductos minerales como materia prima en el proceso cementero aporta las siguientes ventajas al entorno:

- Evita la ocupación de vertederos y sus impactos asociados.
- Reducción de la explotación de canteras, sustituyendo recursos naturales por residuos.
- Disminución del consumo energético al fabricar menos clínker gracias al uso de las adiciones.
- Reducción de las emisiones a la atmósfera al disminuir el consumo de combustibles.

La tabla 3.1.4. muestra los residuos o subproductos industriales más utilizados en la industria del cemento de los países del Plan de Acción para el Mediterráneo:

Tabla 3.1.4. Tipos de residuos más frecuentemente empleados como materias primas en la industria del cemento.

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

Fuente: Cembureau, 1997

Cenizas volantes

Las cenizas volantes son un residuo de grano fino procedente de la combustión del carbón pulverizado. Se precipitan en los precipitadores electrostáticos o mecánicos que poseen las centrales eléctricas. Las cenizas volantes pueden ser de naturaleza silíceas o calcáreas. Las primeras presentan solamente características puzolánicas, las calcáreas pueden además tener características hidráulicas, éstas últimas consisten esencialmente en el CaO reactivo, SiO₂, y Al₂O₃.

Cenizas de piritas

Con el nombre de cenizas de piritas se conoce al residuo que queda al tostar la piritas para la obtención de ácido sulfúrico. Este material está compuesto principalmente por óxidos e hidróxidos de hierro y otros metales.

Escoria de alto horno

La escoria de alto horno se obtiene de la fundición del mineral de hierro en un alto horno. La escoria de alto horno en forma de vidrio (amorfo) se produce por el rápido enfriamiento de la escoria fundida con agua y/o aire comprimido para conseguir un material granulado. El contenido de material en estado amorfo es decisivo para las características hidráulicas, por lo que se debe mantener tan alto como sea posible. Normalmente, el contenido en material amorfo es superior al 90%.

Humo de sílice

El humo de sílice, al que también se le conoce como microsílíce o humo de sílice condensado, es otro material que se emplea como aditivo puzolánico. Es un subproducto de la producción de aleaciones silíceas o ferro-silíceas. Este producto en forma de polvo de color gris claro a oscuro o en ocasiones gris azulado verdoso, es resultado de la reducción de cuarzo muy puro con carbón mineral en un horno de arco eléctrico durante la manufactura del silicio o de aleaciones de ferrosilicio.

Arenas de fundición

Las arenas de fundición están constituidas por granos de cuarzo (dióxido de silicio) y por arcilla (silicato hidratado de aluminio), de manera que se pueden utilizar como materia prima en la producción de cemento.

Lodos de papeleras

En la producción de clínker se puede utilizar lodos de papeleras como materia prima debido a su alto contenido en carbonato cálcico.

Yesos y fosfoyesos

Se pueden utilizar yesos procedentes de la desulfuración de gases y producción de ácido fosfórico como materias primas en la molienda de cemento.

Esquistos calcinados

Estos materiales son obtenidos por calcinación controlada de minerales de origen natural. El esquisto calcinado, particularmente el bituminoso, se produce en un horno especial a temperaturas de aproximadamente 800 °C y finamente molido presenta propiedades hidráulicas pronunciadas, así como propiedades puzolánicas. Los esquistos calcinados presentan la siguiente composición: (SiO₂), CaO, (Al₂O₃), (Fe₂O₃) y otros compuestos.

Residuos de demolición

Residuos producidos por la demolición de edificios, carreteras, y otras estructuras.

Tabla 3.1.5. Composición de las materias primas secundarias.

Constituyente	Escoria de alto horno granulada	Esquistos calcinados	Cenizas volantes pulverizadas
SiO ₂	32,3-40,5	34,3-36,7	40-55
Al ₂ O ₃	7,1-14	11,3-11,4	24-30
TiO ₂	0,3-1,9	0,6-0,6	0,7-1,3
P ₂ O ₅	0,0-0,2	0,2-0,2	0,1-1,5
Fe ₂ O ₃	0,2-2,4	7,3-10,4	5-15
Mn ₂ O ₃	0,2-1,7	0,1-0,1	0,1-0,4
CaO	35,3-45,9	27,3-31,6	1,5-8
MgO	0,0-11,7	1,8-2,0	1,5-3,5
SO ₃	0,1-0,3	10,1-11,2	0,4-2,5
K ₂ O	0,2-1,1	2 0-2,1	1,0-4,5
Na ₂ O	0,2-0,6	0,3-0,3	0,4-1,5
LOI	0,1-1,9	4,2-8,0	0,8-5,0
CO ₂	0,1-1,3	2,6-7,0	–
H ₂ O	0,1-1,1	1,0-1,7	–
S ²⁻	0,9-2,1	0,1-0,2	–
CaO _{fibre}	–	–	0,1-1,5

Fuente: VDZ y otras referencias
 (*)Valores expresados en % en peso

Estos residuos se pueden emplear en dos fases diferentes del proceso productivo. Una de ellas es en la preparación inicial de las materias primas o "crudo". La otra es la fase de molienda del clínker junto con otros minerales para dar lugar al cemento:

En la preparación del crudo.

Para la obtención del clínker son necesarios ciertos minerales que se pueden encontrar en la naturaleza o en algunos residuos. Algunos de los residuos y subproductos que se reciclan en otros procesos industriales y se usan en la preparación del crudo son:

- Cenizas de piritita, por su alto contenido en hierro.
- Escoria seca de alto horno.
- Lodos de papelera, por su alto contenido en carbonato cálcico.
- Arenas de fundición, por su alto contenido en óxido de silicio.
- Residuos de demolición, de naturaleza cálcica o silícea.

En la molienda de cemento.

Los materiales susceptibles de ser empleados como componentes en la molienda de cemento (como adiciones al clínker) tienen características que mejoran sus propiedades, tales como la trabajabilidad, retención de agua, durabilidad, resistencia mecánica, resistencia a sulfatos, resistencia al hielo, etc. Estos materiales pueden ser naturales, como las puzolanas, o provenir de subproductos de otros procesos industriales tales como:

- Escoria de horno alto.
- Puzolanas industriales.
- Cenizas volantes de central térmica.
- Humo de sílice de la industria de ferroaleaciones.
- Esquistos calcinados.
- Sulfato de calcio proveniente de la desulfuración de gases industriales y preparación de ácido fosfórico (yesos/fosfoyesos).

Las adiciones se dosifican de manera controlada con básculas y se introducen de manera conjunta a los molinos. La proporción relativa de cada componente se ajusta de manera automática, en base a los resultados de los análisis efectuados por analizadores de rayos X.

3.2. DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS PRODUCTIVOS

La química básica del proceso de la fabricación del cemento empieza con la descomposición del carbonato cálcico (CaCO_3) a unos $900\text{ }^\circ\text{C}$ dando óxido cálcico (CaO , cal) y liberando dióxido de carbono gaseoso (CO_2); este proceso se conoce como calcinación o descarbonatación. Sigue luego el proceso de clinkerización en el que el óxido de calcio reacciona a alta temperatura (normalmente $1.400 - 1.500\text{ }^\circ\text{C}$) con sílice, alúmina y óxido de hierro para formar los silicatos, aluminatos y ferritos de calcio que componen el clínker. El clínker se muele conjuntamente con yeso y otras adiciones para producir el cemento.

Existen cuatro procesos para la fabricación del cemento; proceso seco, semisecho, semihúmedo y húmedo:

- **Proceso por vía húmeda:** las materias primas (a menudo con alto contenido de humedad) se muelen con agua para formar una pasta bombeable. La pasta es alimentada directamente al horno, o previamente se pasa por un secador de pasta.
- **Proceso por vía semihúmeda:** la mezcla cruda húmeda se seca parcialmente en filtros prensa. Las tortas del filtro, o bien son extruidas en gránulos y alimentadas a un precalentador de parrilla, o son alimentadas directamente a un secador de tortas de filtrado para la producción de crudo, el cual se muele, se seca, y se alimenta a un horno con precalentamiento en suspensión.

- **Proceso por vía semiseca:** la harina cruda seca se peletiza (granula) con agua y se alimenta a un precalentador de parrilla como paso previo al horno o en algunos casos, a un horno largo equipado con cadenas.
- **Proceso por vía seca:** las materias primas son trituradas y secadas para formar el crudo o harina, que tiene la forma de un polvo fluido. El crudo se alimenta a un horno con precalentador o con precalcinador, o más raramente, puesto que prácticamente se encuentra en desuso, a un horno largo de vía seca. En este proceso el control químico de las materias primas es más eficiente y el consumo de energía es menor, ya que al no tener que eliminar el agua añadida, los hornos son más cortos y el clínker requiere menos tiempo sometido a las altas temperaturas. La figura 3.2.1. muestra un diagrama de flujo de un proceso de vía seca con horno con precalcinador.

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

Históricamente, el desarrollo del proceso de fabricación del clínker está caracterizado por el cambio del sistema "húmedo" a "seco". Los primeros hornos – introducidos alrededor 1895 - eran largos hornos que trabajaban en vía húmeda. Estos hornos permitían un fácil manejo y homogeneización de las materias primas, especialmente cuando las materias primas estaban mojadas o exhibían grandes fluctuaciones en la composición química de los materiales individuales. Con una tecnología más moderna y avanzada, ha sido posible alimentar el proceso con un material homogéneo por vía seca, es decir sin la adición de agua para preparar una mezcla cruda. La ventaja principal de un proceso seco moderno sobre un sistema húmedo tradicional es un consumo de combustible más bajo y por tanto, unos costes y emisiones más bajos.

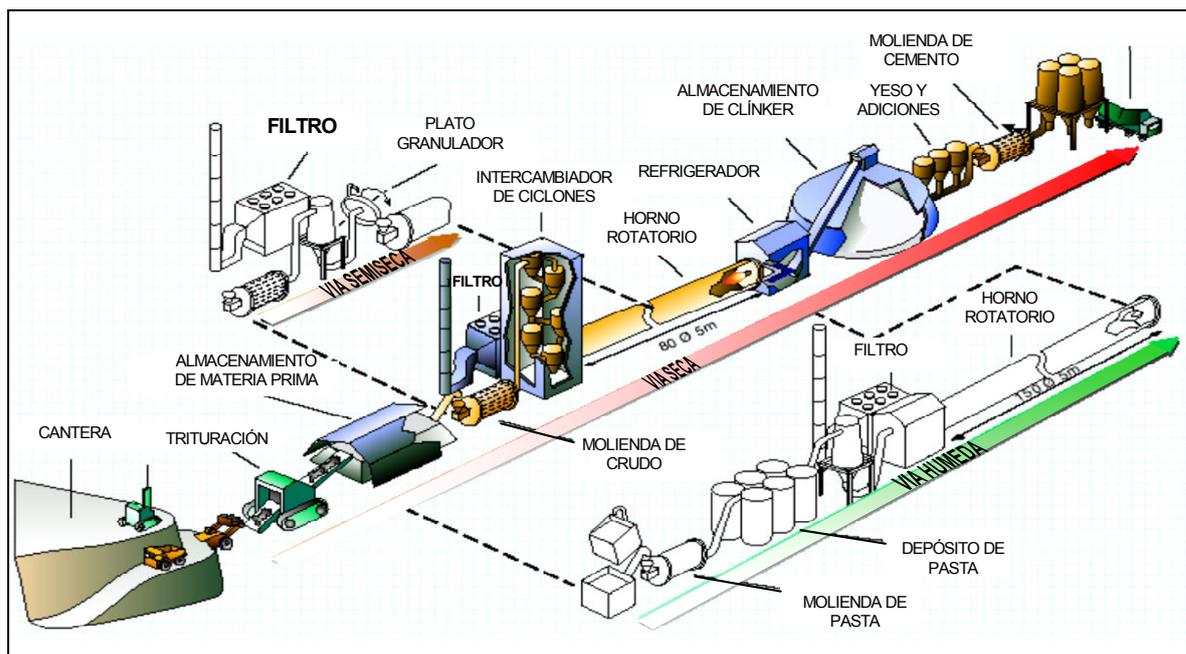


Figura 3.2.1. Proceso de fabricación del cemento. Fuente: Documents de referència sobre les millors tècniques disponibles aplicables a la indústria del ciment.

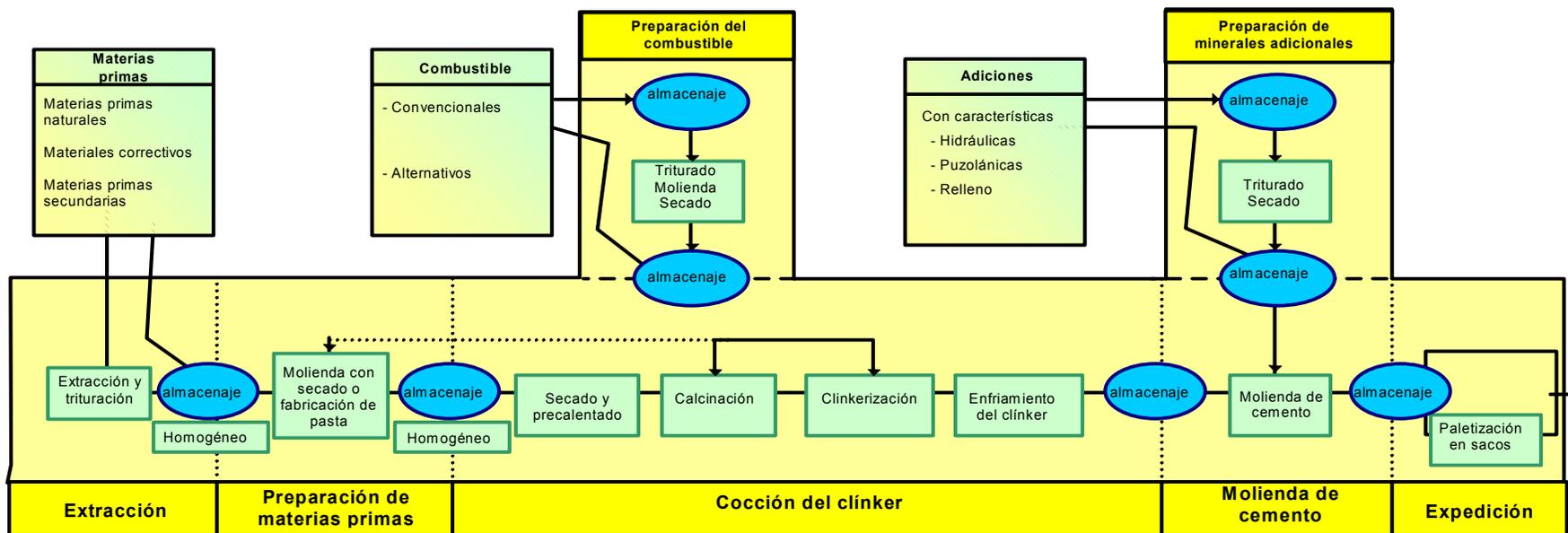
Hoy en día la selección del proceso por vía húmeda se utiliza tan sólo cuando se dan condiciones muy especiales en la materia prima y en las condiciones de proceso.

Todos los procesos comentados anteriormente tienen en común las siguientes seis etapas:

- Obtención (extracción) de las materias primas.
- Almacenamiento y preparación de las materias primas para la obtención del *crudo*.
- Almacenamiento y preparación de combustibles.

- Cocción de materias primas para la obtención del clínker.
- Molienda del clínker con otros componentes para la obtención de *cemento*.
- Almacenamiento, ensacado y expedición de cemento.

La figura 3.2.2. muestra las distintas etapas u operaciones unitarias comunes a los procesos de fabricación de cemento:



Fuente Cembureau, 1997

Figura 3.2.2. Etapas u operaciones unitarias comunes a los procesos de fabricación del cemento.

En la tabla 3.2.1. se muestran las distintas operaciones unitarias requeridas según el proceso productivo:

Tabla 3.2.1. Operaciones unitarias según el proceso productivo.

Sub-Procesos	Pasos del los procesos	PROCESOS DE PRODUCCIÓN							
		Seco		Semi-seco		Semi-húmedo		Húmedo	
Extracción	Extracción de las materias primas	x		x		x		x	
	Trituración de las materias primas	x		x		x		x	
	Almacenamiento de las materias primas	x		x		x		x	
	Prehomogenización de las materias primas	x		x					
Preparación de las materias primas	Molienda del crudo/ secado con molino de bolas, molinos verticales etc.	x		x					
	Almacenamiento del crudo	x		x					
	Mezcla y homogenización del crudo	x		x					
	Paletización del crudo			x					
	Molienda de la pasta						x		x
	Mezcla y almacenamiento de la pasta						x		x
	Homogenización de la pasta						x		x
	Filtración de la pasta con filtros prensa						x		
	Almacenamiento de la torta de filtrado						x		
	Nodulización de la torta de filtrado							x	
Cocción del clínker	Identificación en detalle del proceso (*)	1	2	3	4	5	6	7	8
	Equipos de secado de gránulos o nódulos de pasta internos a los hornos largos				x				x
	Equipos de secado de gránulos o nódulos o torta de filtrado de pasta externos al horno			x		x	x	x	
	Precalentamiento del crudo	x	x	x	x	x	x	x	x
	Calcinación del crudo	x	x	x	x	x	x	x	x
	Clinkerización del crudo	x	x	x	x	x	x	x	x
	Enfriamiento del crudo	x	x	x	x	x	x	x	x
	Almacenamiento del crudo	x	x	x	x	x	x	x	x
Molienda del	Molienda del cemento en molino de bolas, prensa de rodillos, molinos verticales etc.	x		x		x		x	
	Almacenamiento del cemento	x		x		x		x	
Expedición del cemento	Expedición al por mayor, embolsado o empalización mediante transporte por carretera, ferroviario o marítimo	x		x		x		x	

Fuente: Cembureau, 1997

Identificación en detalle del proceso (*)

1. Hornos con precalentador de 4 o de 4 a 6 etapas de ciclones.
2. Hornos largos en vía seca, hornos con precalentador de 1 a 2 etapas de ciclones.
3. Precalentador de parrilla móvil (Lepol).
4. Hornos largos de gránulos con sistema interno de cruzado.
5. Hornos con precalentador de ciclones y precalcificación con secado externo.
6. Precalentador de parrilla móvil (Lepol).
7. Hornos con precalcificador de 2 etapas con secado de pasta externo.
8. Hornos húmedos largos con sistema de cadenas.

En la tabla 3.2.2. se muestran las características técnicas según el proceso productivo que se detallan en los apartados correspondientes del presente capítulo:

Tabla 3.2.2. Características de operación de los procesos en el horno.

TIPO DE PROCESO		SECO			SEMI-SECO		SEMI-HÚMEDO		HÚMEDO	
Tipo de horno Lepol = precalentador de parrilla móvil SP = Horno con precalentador de ciclones PC = Horno con precalentador y precalcinador de ciclones		Largo 1 etapa SP 2 etapas SP	4 etapas SP	De 4 a 6 etapas PC	Largo	Lepol	Lepol (3 cámaras)	De 3 a 4 etapas SP y Pc con secado	Largo	2 etapas PC con secado
CARACTERÍSTICAS DEL HORNO	Alimentación	Materia prima seca			Materia prima paletizada		Torta de filtrado		Pasta	
	Porcentaje de humedad [%]	0,5-1,0			10-12		16-21		28-43	
	Dispositivo de intercambio de calor	Precalentador de ciclones y cadenas	Precalentador de ciclones	Precalentador de ciclones	Intercambiadores cruzados	Precalentador de parrilla móvil	Precalentador de parrilla móvil	Precalentador de ciclones	Cadenas e intercambiadores cruzados	Precalentador de ciclones
	Capacidad del horno [t/d]	300-2600	300-4000	2000-10000	300-1500	300-2000	300-3000	2000-5000	300-3600	2000-5000
	Consumo específico de calor	3,6-4,5	3,1-3,5	3,0-3,2	3,5-3,9	3,2-4,5	3,6-4,5	3,4-3,6	5,0-7,5	4,5-50
ADITIVOS DE PROCESO	Flujo de los gases de salida de la chimenea [Nm ³ /kg cli [seco]	1,7-2,0	1,8-2,0	1,8-1,9	1,7-1,8	1,9-2,1	3,4-4,0	2,1-2,3	2,2-3,2	2,1-2,3
	Contenido de O ₂ [%vol]	4-5	8-9	8-9	4-5	6-10	12-14	8-10	4-5	5-6
	Temperatura a la entrada del depurador de gases [°C]	150	150	150	200	100	100	120-150	180-220	120-150
	Punto de rocío	45-65			50-60		55-65		70-80	

Fuente: Cembureau, 1997

El proceso por vía seca

En el proceso por vía seca la harina, o crudo, se introduce en el horno en forma seca y pulverulenta. Éste se prepara mediante el secado y molido de los componentes de las materias primas en molinos de bolas, o molinos de rodillo verticales, haciendo uso de los gases de escape calientes o de los gases de enfriamiento de clínker para secado.

Posteriormente se homogeneiza y/o mezcla en silos mediante sistemas continuos o por lotes. El material crudo finamente molido y homogeneizado, previamente a su entrada en el horno, se precalienta hasta una temperatura de aproximadamente 810-830 °C. En hornos de precalentamiento

en suspensión (ver apartado 3.2.4.3. *Hornos rotatorios*), el crudo alimenta una serie de ciclones, se introduce por la etapa de ciclones superior, descendiendo hacia los ciclones inferiores en contracorriente con los gases calientes de la combustión. Este contacto en suspensión del crudo con los gases provoca un eficiente intercambio de calor, posibilitando que la harina entre al horno parcialmente calcinada (a unos 1.000 °C) mientras que los gases salen del intercambiador a una temperatura de unos 400 °C aportando parte de este calor residual al secado de las materias primas en su paso por el molino de crudo. Finalmente los gases se dirigen al precipitador electrostático para su depuración (ver apartado 4.1. *Principales emisiones a la atmósfera y su control*, y apartado 5.5. *Alternativas Tecnológicas para el control de las emisiones de partículas*).

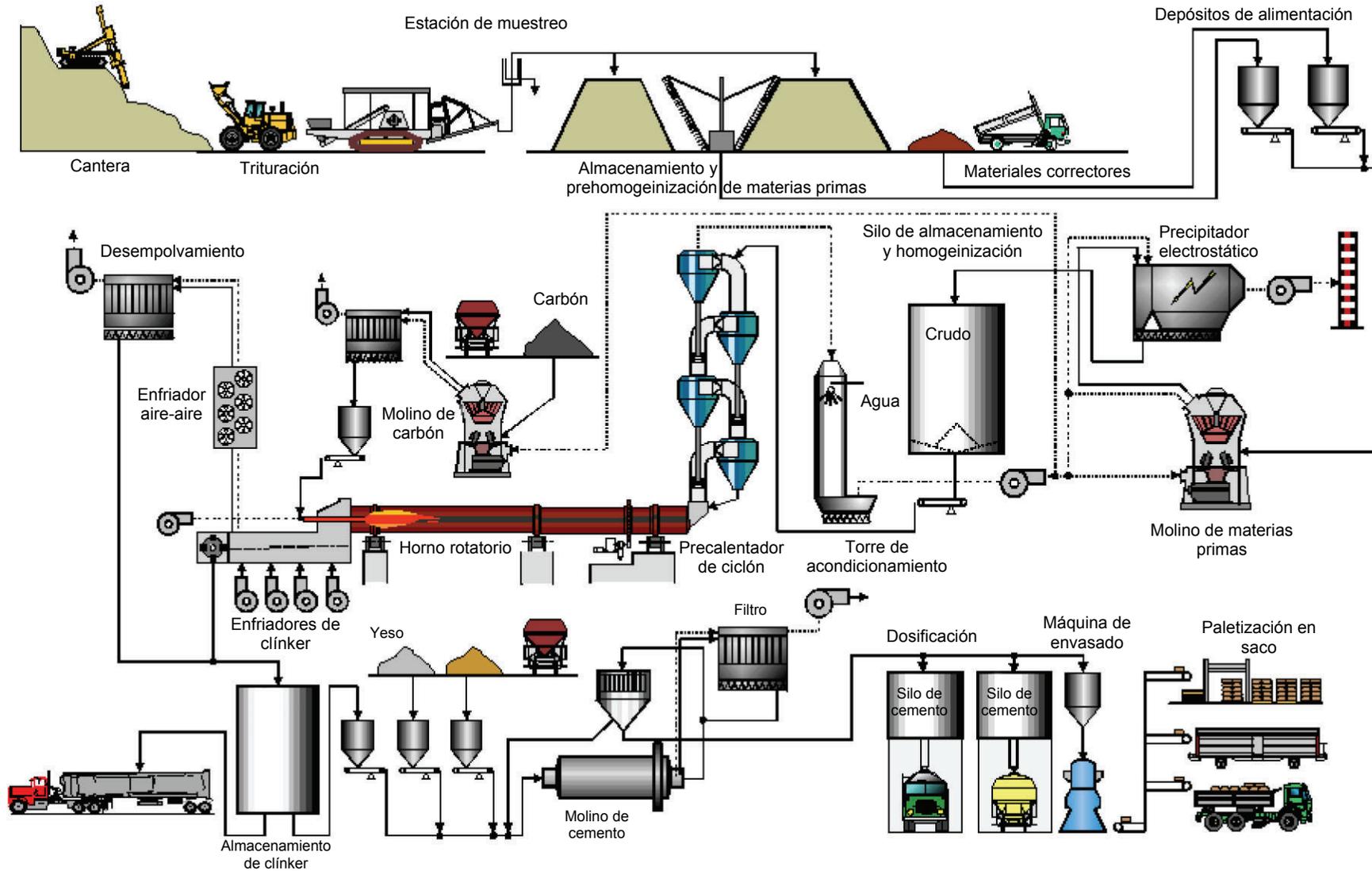
Tanto el polvo recogido en el precipitador electrostático o electrofiltro, como el recogido en los filtros de mangas, es reintroducido en el proceso, ya sea con las materias primas, vía quemador con el combustible, o añadido al molino de cemento.

En el proceso por vía seca de horno-intercambiador, las altas concentraciones de álcalis y cloruros pueden originar atascos en el intercambiador, especialmente en los ciclones inferiores. Además, pueden provocar en el producto final una reacción con ciertos áridos de alto contenido en sílice. Una forma de combatirlo es extraer por medio de un sistema de by-pass, parte de los gases en esa zona, que arrastran partículas cargadas de halogenuros alcalinos, para luego ser enfriado y condensar así los álcalis, antes de que las partículas sean recogidas en el electrofiltro o en el filtro de mangas. Este polvo es usualmente reciclado al proceso.

Se puede obtener un aumento considerable de la capacidad de producción de clínker con el empleo de hornos con precalcinador (ver apartado 3.2.4.3. *Hornos rotatorios*), en los que se sitúa un segundo dispositivo de combustión entre el horno y la sección del precalentador. En el precalcinador, se puede quemar hasta el 60 % del combustible total del sistema del horno. Los sistemas de horno con precalentador y precalcinador de ciclones de 5 a 6 etapas se consideran la tecnología estándar para las nuevas plantas, pues las etapas adicionales de ciclones mejoran la eficacia térmica.

En algunos casos, el crudo se alimenta directamente a un horno seco largo sin el precalentador externo. Este es el caso de los hornos largos (ver apartado 3.2.4.3. *Hornos rotatorios*). Mediante un sistema de cadenas en la entrada del horno se proporciona el intercambio de calor entre los gases de combustión de la zona caliente del horno y la alimentación del horno.

No obstante, si la humedad de las materias primas permite el proceso por vía seca, las nuevas instalaciones recurren a hornos más cortos con varias etapas de intercambio de calor, por ser más eficientes energéticamente, ya que los hornos secos largos poseen un alto consumo energético.



Fuente Cembureau

Figura 3.2.3. Proceso de producción del cemento por vía seca.

El proceso por vía semiseca

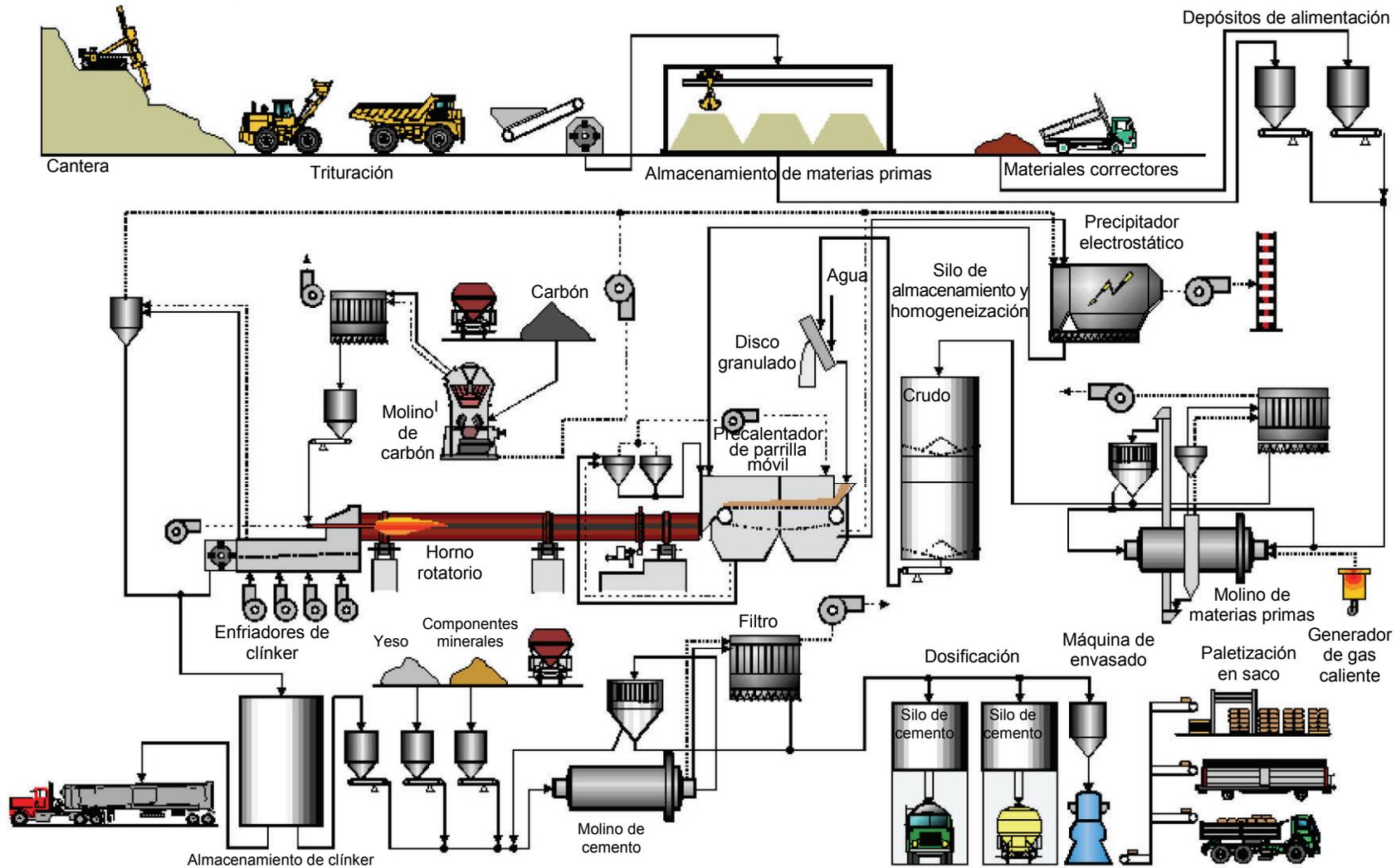
En el proceso semiseco, el crudo seco se paletiza (granula) con agua, formando gránulos con un 10-12 % de agua, que son depositados en parrillas móviles a través de las cuales se hacen circular gases calientes provenientes del horno (sistema de "Lepol") que permiten secar, precalentar y precalcinar parcialmente el crudo.

El horno Lepol (ver apartado 3.2.4.3. *Hornos rotatorios*) representa el primer sistema en que parte de la etapa de cocción (la calcinación) tiene lugar en una instalación estacionaria fuera del horno. Se puede alcanzar un grado más alto de calcinación si en el compartimiento caliente del precalentador de parrilla se quema parte del combustible.

Los gases de escape calientes del horno pasan primeramente a través de las capas de gránulos precalentados en la cámara de gas caliente y luego a través de unos ciclones colectores de polvo. Tras ser parcialmente desempolvados en los ciclones, los gases se hacen pasar por el compartimiento de secado del precalentador de parrilla.

Una desventaja del proceso semiseco es que los gases de escape del horno no se pueden utilizar en la etapa de secado ni molienda del crudo debido a su baja temperatura.

Las instalaciones modernas raramente utilizan este proceso, por ser los costes de mantenimiento de precalentadores de parrilla bastante elevados.



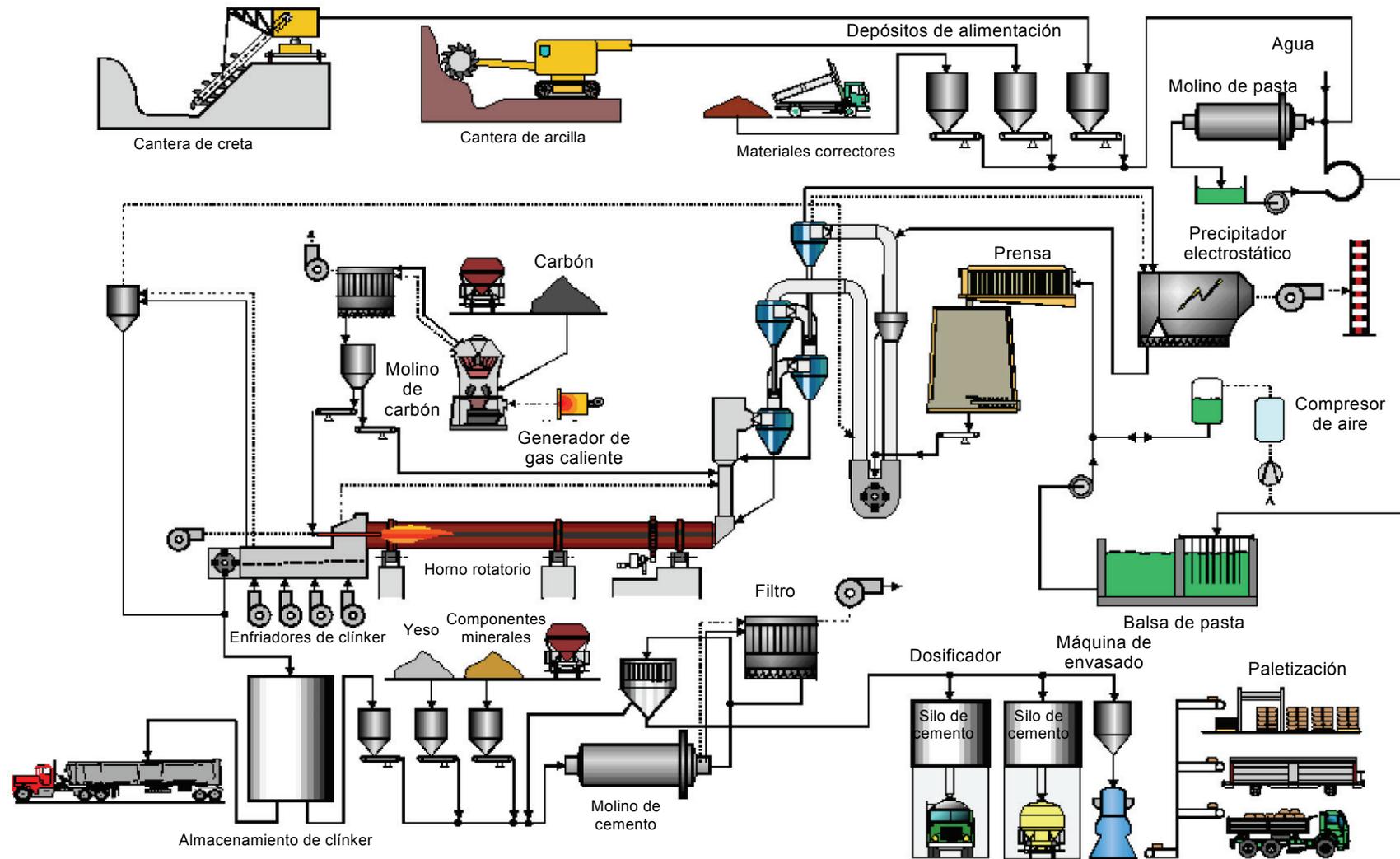
Fuente Cembureau

Figura 3.2.4. Proceso de producción del cemento por vía semi-seca.

El proceso por vía semihúmeda

Antiguamente la materia prima, pasta de crudo y agua, se hacía pasar a través de un filtro prensa y las tortas de filtrado se extruían en forma de gránulos para ser alimentadas a hornos de precalentamiento de parrilla. En las plantas modernas las tortas de filtrado se almacenan en compartimentos intermedios antes de ser alimentadas a trituradoras o a secadores, donde se produce crudo seco de alimentación que alimenta a un horno rotativo moderno con precalcinador y/o precalentador.

Los precalentadores de parrilla semihúmedos funcionan de la misma manera que los semisecos, comentados anteriormente, con la diferencia que pueden instalarse sistemas de triple paso de gas.



Fuente Cembureau

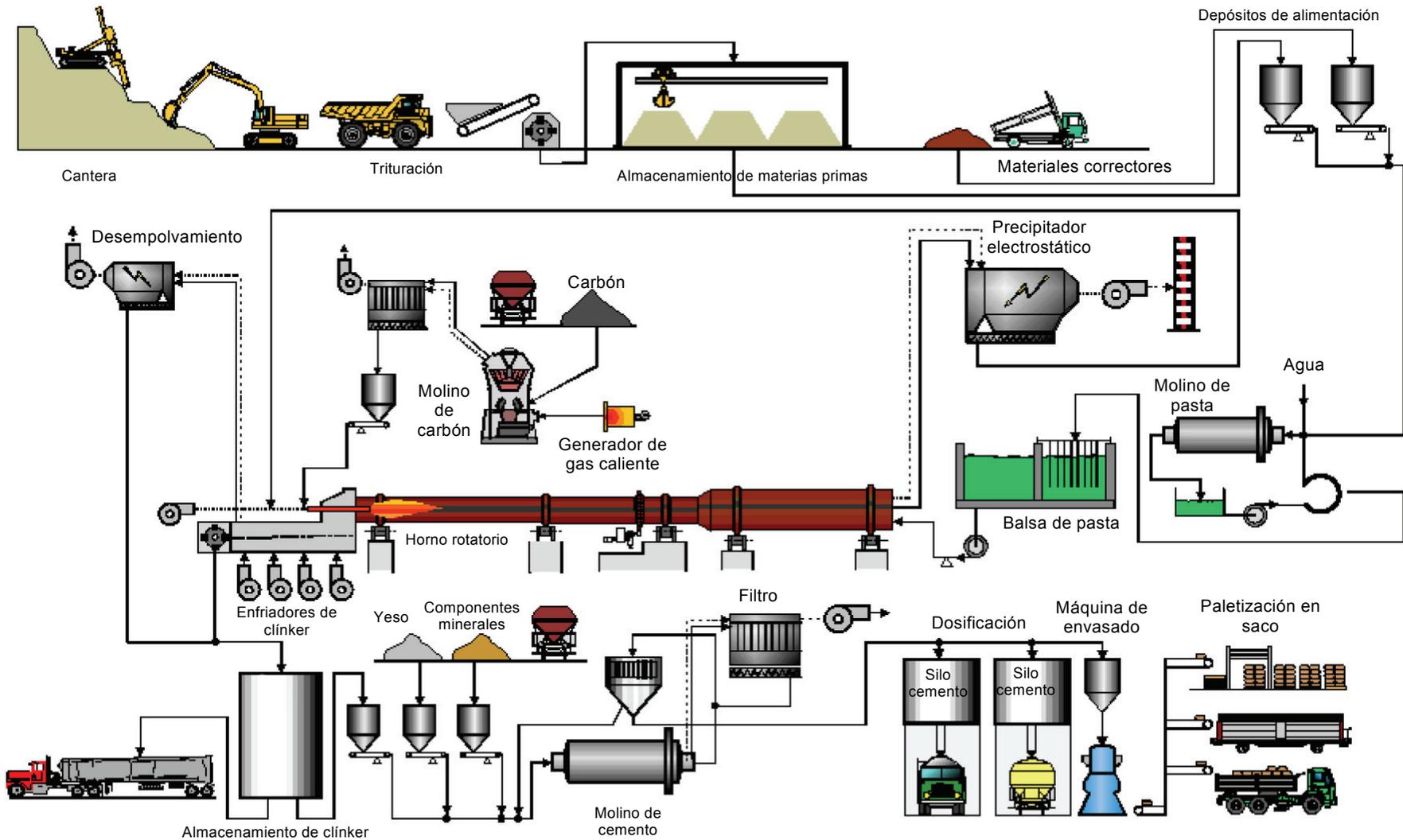
Figura 3.2.5. Proceso de producción del cemento por vía semi-húmeda.

El proceso por vía húmeda

En el proceso húmedo las materias primas se muelen con agua para formar una pasta bombeable con un contenido en agua de aproximadamente un 30 a 40 %. La pasta una vez mezclada y homogeneizada en silos especiales puede ser o directamente alimentada al horno, o previamente se pasa por un secador de pasta (en los sistemas húmedos modernos).

En el horno, el agua se evapora en la zona de secado, justo a la entrada del mismo. La zona de secado se diseña con cadenas para facilitar el intercambio de calor entre la mezcla y los gases de combustión. Después de pasar la zona de secado, el crudo desciende por el horno donde se calcinará y quemará en la zona de la sinterización formando así el clínker. Los hornos rotatorios húmedos pueden alcanzar una longitud total de hasta 240 m, frente a los hornos secos cortos con longitudes de 55 a 65 m (sin la sección del precalentador).

Este tipo de proceso presenta un alto consumo de calor, el consumo energético es el 100 % mayor que en el caso de los procesos por vía seca, y además produce grandes volúmenes de gases de combustión y de vapor de agua; por lo que tan sólo se suelen utilizar en el caso en el que las materias primas lo requieren por su alto contenido en humedad.



Fuente Cembureau

Figura 3.2.6. Proceso de producción del cemento por vía húmeda.

3.2.1. Obtención de las materias primas

El proceso de fabricación del cemento es un proceso industrial dónde grandes cantidades de materias primas son convertidas en productos comerciales, como clínker o cemento.

3.2.1.1. Explotación de las materias primas

Como ya se ha comentado anteriormente, las principales materias primas como la caliza y la arcilla, se extraen de canteras, en la mayor parte de los casos próximas a la fábrica, y suele realizarse de forma integrada a la producción de cemento. Se extraen por barrenación y detonación con explosivos.

Si se utiliza una tecnología moderna los impactos producidos por las voladuras son mínimos.

3.2.1.2. Transporte de materias primas

Una vez que las grandes masas de piedra han sido fragmentadas se transportan a la unidad de trituración mediante camiones.

3.2.1.3. Trituración de las materias primas

El material de la cantera es fragmentado en los trituradores, cuya tolva recibe las materias primas, que por efecto de impacto y/o presión, son reducidas a unos tamaños inferiores a los 40 mm.

Después de una trituración primaria, las materias primas se transportan a la planta de cemento para su almacenamiento y posterior preparación.



Figura 3.2.7. Trituración de las materias primas.

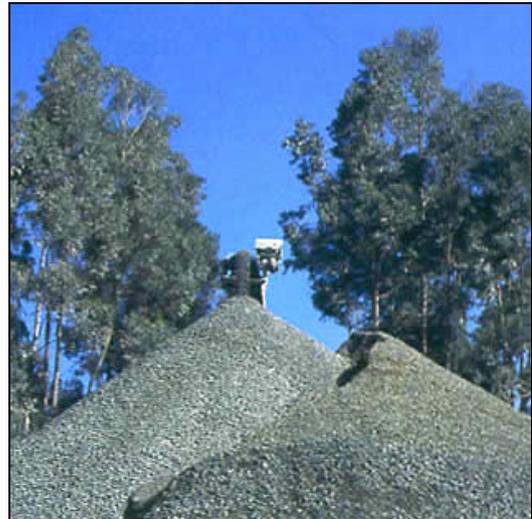


Figura 3.2.8. Piedra caliza triturada.

3.2.2. Almacenamiento y preparación de las materias primas

3.2.2.1. Almacenamiento de materias primas

Cada materia prima, ya triturada, se almacena en naves, silos, lista para ser alimentada al molino de crudo. De manera aproximada, se requieren de 1,5 a 1,6 toneladas de materias primas (secas) para producir una tonelada de clínker.

La necesidad de emplear almacenes cubiertos depende de las condiciones climáticas y del porcentaje de finos en las materias primas al salir de la planta de trituración. En el caso de una planta

de 3.000 t/día de producción de clínker, el almacenamiento promedio se estima entre 20.000 y 40.000 t de material.

Las materias primas secundarias, que normalmente se suministran a través de fuentes externas, se pueden almacenar en silos o tolvas, tanto junto a las materias primas básicas como separadamente, y son finalmente preparadas de manera conjunta. Las materias primas secundarias con propiedades peligrosas, tales como cenizas volantes y fosfoyesos, deben ser almacenadas y preparadas de acuerdo a requerimientos específicos.

La materia prima debe ser alimentada al horno tan homogénea químicamente como sea posible. Esto se consigue mediante el control de la alimentación en la planta de molienda de crudo. Cuando el material de la cantera varía en su calidad, se puede lograr una prehomogenización inicial por apilamiento del material en capas longitudinales (o circulares) según el tipo de parque, y se extrae posteriormente tomando secciones transversales de toda la pila. De esta manera se puede compensar la variación de la calidad de la materia prima con una eficacia de mezcla del 70-90 %. Cuando el material de la cantera es homogéneo, pueden emplearse sistemas de apilamiento y extracción más simples.

A continuación se detallan los métodos de almacenamiento más comunes.

Métodos de almacenamiento de materia prima (sin prehomogeneización)

Los almacenamientos sin prehomogeneización son usados para materias primas que no requieren ser homogeneizadas.

- Método de almacenamiento en estratos: Principalmente con almacenamiento en capas longitudinales, equipado con brazos de apilamiento y recuperación con recogedoras laterales, pórtico o semi-pórtico, alcanzando un leve mezclado (ver figuras 3.2.10. y 3.2.11.).
- Método de almacenamiento en cono: Almacenamiento sin homegeneización equipado con brazos de apilamiento de cinta basculante en almacenamiento longitudinal. La recuperación se realiza mediante recuperadores de rueda de ganchos.

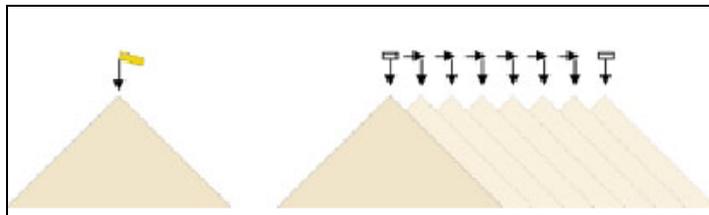


Figura 3.2.9. Método de almacenamiento en cono.

Además de los métodos automáticos mencionados anteriormente, también se utilizan sistemas semi-automáticos de almacenamiento:

- Almacenamiento longitudinal y circular mediante alimentadores de descarga por gravedad.
- Almacenamiento por desplazamiento en la parte superior de la pila de material de una grúa.
- Almacenamiento en silo por alimentadores de descarga por gravedad.

SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO SIN PREHOMOGENEIZACIÓN



Figura 3.2.10. Método de almacenamiento en estratos.
Recogedora pórtico.

- Disponible para todo tipo de materiales, incluido materiales pastosos
- Se pueden cargar o recuperar los materiales desde pilas separadas.
- La capacidad de almacenamiento puede ser ampliada.
- Bajo coste inicial.

SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO SIN PREHOMOGENEIZACIÓN



Figura 3.2.11. Método de almacenamiento en estratos.
Recogedora Lateral.

- Disponible para materiales pastosos.
- Se pueden cargar o recuperar los materiales desde pilas separadas.
- La capacidad de almacenamiento puede ser ampliada.

La prehomogeneización es la mezcla proporcional de los diferentes tipos de caliza, arcilla, o cualquier otro material que lo requiera. Como ya se ha comentado anteriormente, se utiliza cuando el material de la cantera varía en su calidad, y se puede lograr una eficacia de mezcla del 70 al 90 %.

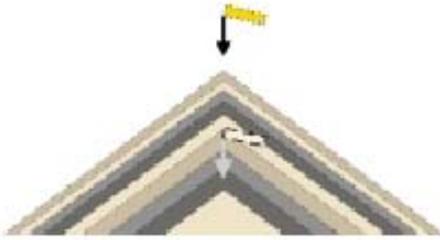


Figura 3.2.12. Método de almacenamiento Chevron.

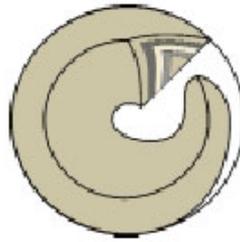


Figura 3.2.13. Método de Chevron de almacenamiento continuo (Chevcon).



Figura 3.2.14. Método de almacenamiento Windrow.

- Método de almacenamiento Chevron: Método equipado con brazos apiladores y cintas basculantes de carga en sistemas de prehomogeneización longitudinales, y brazos apiladores en sistemas de prehomogeneización circulares. La recuperación se realiza mediante recogedoras puente y recuperadoras de rueda de cangilones.
- Método de almacenamiento Chevcon: Método equipado con brazos cargadores en sistemas de prehomogeneización circular para almacenamientos continuos. La recuperación se realiza mediante recogedoras puente y recuperadores de rueda de cangilones.
- Método de almacenamiento Windrow: Equipado con recogedoras puente en sistemas de almacenamiento con prehomogeneización en foso, en relación a materiales pastosos y brazos cargadores giratorios en sistemas de prehomogeneización. La recuperación se realiza mediante recogedoras puente y recuperadoras de rueda de cangilones.

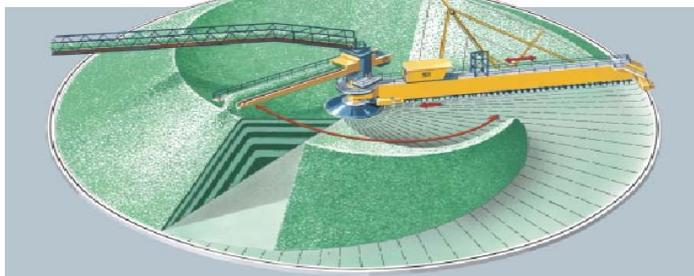
SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO CON PREHOMOGENEIZACIÓN



Figura 3.2.15. Método Chevron con sistema de prehomogeneización longitudinal.

- Disponible para materiales desde secos a levemente pastosos.
- Ajuste eficiente de grandes variaciones en la composición química de los materiales.
- La capacidad de almacenamiento puede ser ampliada fácilmente.

SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO CON PREHOMOGENEIZACIÓN



- Buen efecto de homogeneización en continuo.
- No existen problemas de finales de cono.
- Óptima utilización del espacio.
- Operación continua totalmente automática.

Figura 3.2.16. Método Chevcon con sistema de prehomogeneización circular para almacenamientos continuos.



- Sistema de almacenamiento tan sólo para materiales muy viscosos.
- Sistema económico para grandes almacenamientos diseñados para alimentación directa de cualquier tipo de molino.
- Utilización óptima del espacio.

Figura 3.2.17. Método Windrow con sistema de prehomogeneización en foso.

3.2.2.2. Molienda del crudo

El crudo se muele dosificando las materias primas en proporciones precisas para obtener la harina cruda formulada con la menor dispersión posible, puesto que la alimentación de materias primas a un horno necesita ser lo más homogénea posible desde el punto de vista de su composición química. Esto se logra controlando la alimentación a la planta de molienda de crudo, prestando especial atención a su composición química y a su adecuada finura.

Así, por tanto, para lograr un crudo de composición química homogénea es de gran importancia que las materias primas que alimentan el molino se pesen y dosifiquen con la mayor exactitud posible, paso esencial para conseguir un buen funcionamiento del horno y para obtener un clínker de alta calidad. Además la medición y dosificación también son unos factores importantes de cara a la eficiencia energética del sistema de molienda.

El equipo más común de pesaje y dosificación usado en la alimentación de materias primas a los molinos consta de tolvas intermedias por producto, llenadas desde el parque de materias primas o por alimentación exterior, extracción de las tolvas con básculas dosificadoras y un alimentador de banda para introducir el material al molino.

En los casos de los procesos por vía seca y semiseca, las materias primas son secadas y molidas en proporciones definidas y bien controladas en un molino para producir un crudo seco. En los procesos húmedos y semihúmedos, las materias primas forman una pasta que molida mediante la adición de agua produce una lechada.

El crudo que sale del proceso de molienda requiere posteriormente una mezcla y homogeneización para lograr su óptima composición antes de ser enviado al horno.

Dependiendo del proceso tecnológico aplicado se pueden requerir pasos adicionales, como, por ejemplo, la preparación del crudo en gránulos secos (proceso semiseco) o un crudo filtrado, secando parcialmente la mezcla en las prensas de filtro (proceso semihúmedo).



Figura 3.2.18. Molienda de harina cruda.

Las materias primas, así como los componentes correctivos en los casos en que fuera necesario, en proporciones controladas, se muelen y se mezclan juntas para formar una mezcla homogénea con la composición química requerida.

Para los sistemas de horno seco y semiseco, las materias primas con una humedad de aproximadamente 8-12 %, se muelen y se secan hasta lograr un polvo fino. Dependiendo de la construcción del molino, la materia prima puede ser secada haciendo uso principalmente de los gases calientes de salida del horno y/o del aire de salida del enfriador de clínker. Para las materias primas con alto contenido de humedad, y en los procesos de arranque, puede necesitarse un hogar auxiliar para proporcionar calor adicional. El contenido de agua residual en el crudo de alimentación debe ser inferior al 0,5 %.

Los sistemas de molienda en seco más usuales en los países del Plan de Acción para el Mediterráneo son:

- Molino de bolas con descarga central.
- Molino de bolas, barrido por aire.
- Molino vertical de rodillos.
- Molino horizontal de rodillos.
 - Capacidad de secado se limita a aproximadamente en un 5 % de humedad.
 - Sólo hay unas pocas instalaciones hasta ahora.

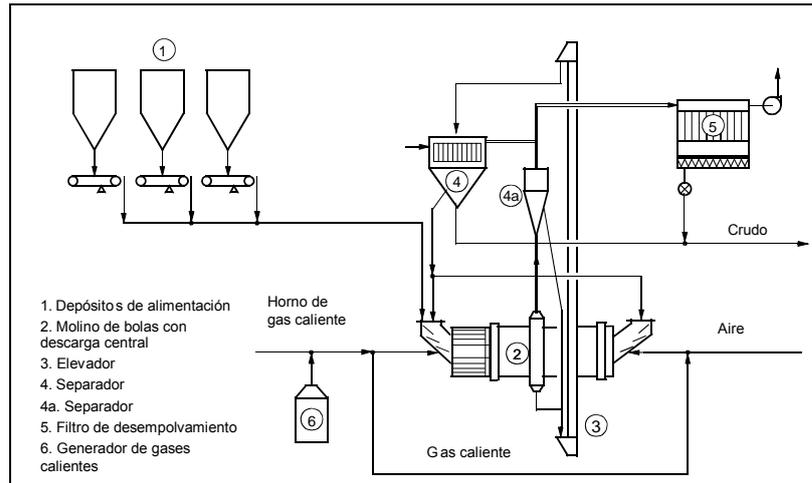
Otros sistemas de molienda en seco menos frecuentemente empleados son:

- Molino de bolas con descarga final en circuito cerrado.
 - Limitación de la capacidad de secado al 6 % (usando los gases de salida del horno).
 - Limitación de la capacidad de producción en 300 t/h.
 - El consumo de energía eléctrica es medio.
- Molino en circuito abierto.
- Prensa de rodillos, con o sin secador triturador.
 - Capacidad de secado sin secador triturador limitada a 5 % humedad (usando los gases de salida del horno).
 - La capacidad de producción se limita a unas 200 t/h por unidad.

La finura y la distribución granulométrica de las partículas de crudo que salen del sistema de molienda son de gran importancia para el subsiguiente proceso de calcinación.

El patrón fijado para estos parámetros se alcanza mediante el ajuste del separador empleado para la clasificación del producto que sale del molino. Los sistemas de molienda por vía seca están equipados con separadores de aire y funcionan en un circuito cerrado. Las porciones gruesas separadas de las materias primas se retroalimentan al circuito.

Los molinos de rodillo requieren menos energía y tienen una capacidad de secado superior a los molinos de bolas, pero no son apropiados para los materiales muy abrasivos. Los molinos de bolas tienen un diámetro de hasta 6 m y una capacidad de hasta 400 t/h, y presentan una necesidad energética de 12-16 kW.h/t. Los molinos de rodillo se construyen con capacidades de procesamiento de hasta 400 t/h y presentan unas necesidades energéticas específicas menores, alrededor de 10-14 kW.h/t., puesto que trabajan con presiones más elevadas y necesitan una alimentación con un contenido de agua relativamente más bajo.



Fuente Cembureau

Figura 3.2.19. Molienda de crudo con molino de bolas de descarga central.

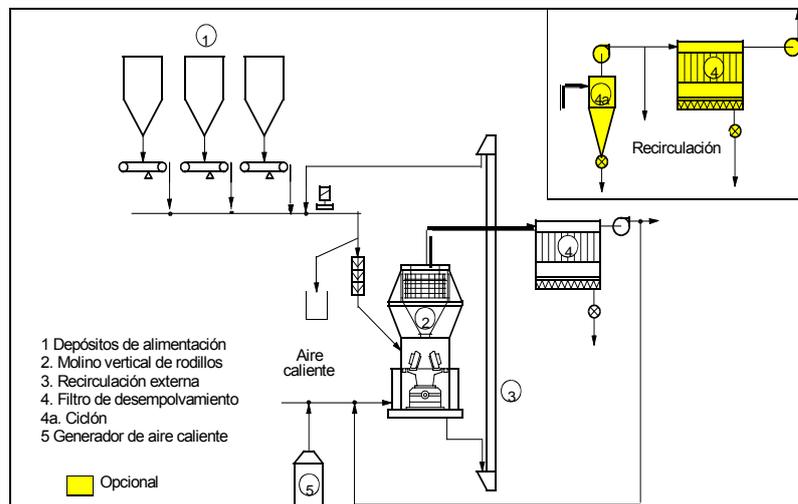


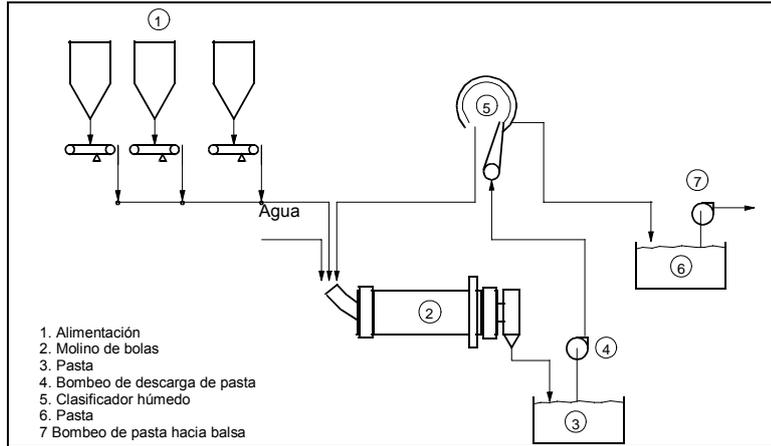
Figura 3.2.20. Molienda de crudo con molino vertical de rodillos.

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

Los hornos de vía húmeda o semihúmeda emplean la molienda húmeda. La mezcla de materias primas se muele en un molino lavador o molino de bolas con la adición de agua para formar una pasta. Especialmente si se requiere añadir arena como materia prima secundaria, el material se hace pasar por un molino de bolas. Para lograr la finura requerida de la pasta, que cumpla con las demandas de calidad, suelen utilizarse los sistemas de molienda en circuito cerrado.

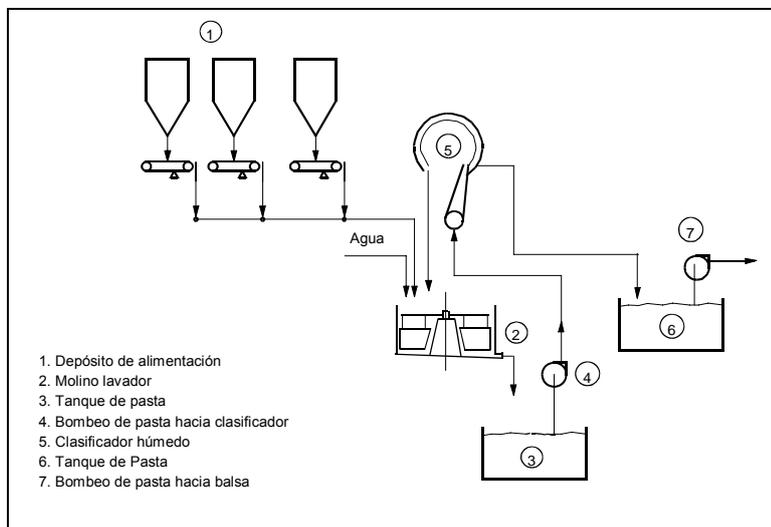
El proceso húmedo es especialmente eficaz cuando las materias primas contienen más del 20 % de agua.

Para reducir el consumo de combustible la adición de agua en la molienda de la materia prima se debe controlar para que sea la mínima necesaria que permita el flujo requerido y las características necesarias de la pasta para su bombeo.



Fuente Cembureau

Figura 3.2.21. Molienda de crudo húmedo con molino de bolas en circuito cerrado.



Fuente Cembureau

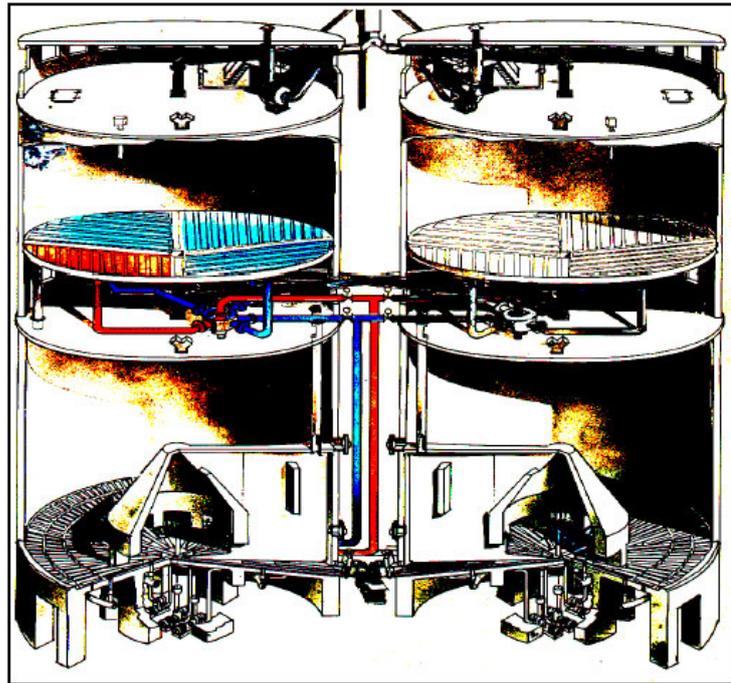
Figura 3.2.22. Molienda de crudo húmedo con lavador en circuito cerrado.

3.2.2.3. Homogeneización del crudo

El crudo, o la pasta en el proceso húmedo, que procede de la molienda requiere un mezclado y homogeneización adicional para conseguir la composición requerida de la mezcla, previamente a su alimentación al horno.

Sistema de homogeneización por cargas (BHS)

La homogeneización del crudo por cargas (*BHS por sus siglas en inglés - Batch Type Homogenising Systems*) se lleva a cabo normalmente en dos silos y el almacenamiento en uno. Normalmente los silos de homogeneización se encuentran por encima de los silos de almacenamiento, de manera que se permite la descarga por gravedad del crudo homogeneizado. La homogeneización se consigue mediante la aireación de los silos durante dos horas aproximadamente. El efecto de mezclado es más de 10:1.



Fuente: Cembureau

Figura 3.2.23. Silos de homogeneización y almacenamiento del crudo.

Sistema de homogeneización en continuo (CHS)

El sistema de homogeneización en continuo (*CHS por sus siglas en inglés - Continuous Homogenising Silo System*) consiste en un silo de homogeneización, normalmente localizado por encima del silo de almacenamiento. La descarga de crudo mediante rebose es continua. El efecto de homogeneización es hasta 10:1.

Sistema de mezcla y almacenamiento en continuo (CBS)

El silo de mezcla continuo (*CBS por sus siglas en inglés - Continuous Blending and Storage Silo*) se usa simultáneamente tanto para el mezclado del crudo como para su almacenamiento. El mezclado se realiza mediante un efecto de formación de conductos seccionales. El efecto de mezclado es de 5:1.

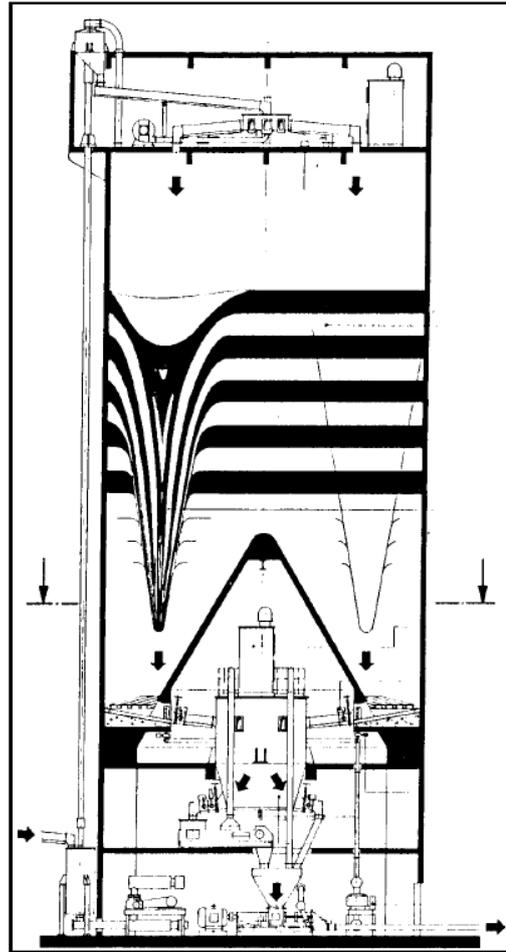


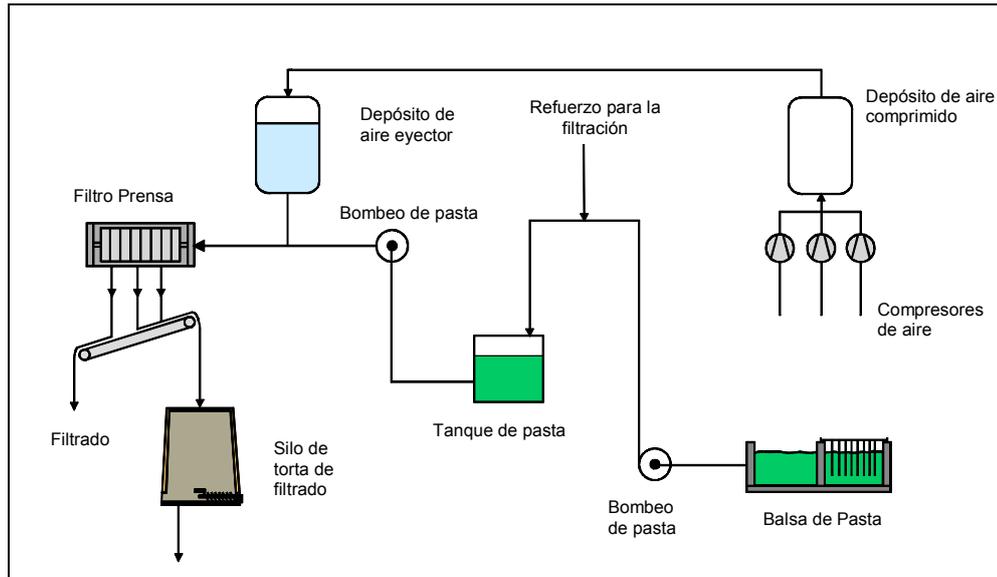
Figura 3.2.24. Sistema de mezcla continuo (CBS).

Mezclado / homogeneización y Almacenamiento de la pasta en balsas o silos (SBHB)

Para la mezcla y homogeneización de la pasta tan sólo se pueden usar sistemas por carga. El mezclado y la homogeneización de la pasta se puede llevar a cabo tanto en silos como en balsas (*SBHB por sus siglas en ingles –Slurry Blending/Homogenising and Storage in Basins or Silos*). El efecto de mezclado y homogeneización en el silo tiene lugar mediante la introducción de elevadas cantidades de aire comprimido en la pasta, en al menos cuatro puntos. En las balsas, este efecto tiene lugar mediante la rotación de agitadores. Adicionalmente se introduce aire comprimido a las balsas.

3.2.2.4. Requerimientos especiales del proceso semi-húmedo

Como ya se ha comentado anteriormente, en las instalaciones modernas, la pasta resultante en el proceso semi-húmedo se filtra en un filtro prensa y se hace pasar por un equipo de secado, de manera que se obtiene un crudo seco para alimentar al horno.



Fuente Cembureau

Figura 3.2.25. Filtro prensa para pasta en proceso vía húmeda.

El propósito del proceso de filtración es reemplazar el gasto de energía puramente térmica del proceso de secado, como ocurre en hornos húmedos, por procesos de filtrado mecánico mucho más económicos con filtros prensa.

Normalmente la filtración permite la eliminación de 2/3 del contenido de agua en la pasta (por ejemplo, 36 % de mezcla de pasta (0,87 kg agua/kg cli) se filtra llegando a 18 % de mezcla en la torta de filtrado conteniendo así unos 0,34 kg agua/kg cli).

Ecurrido de la pasta en un filtro prensa

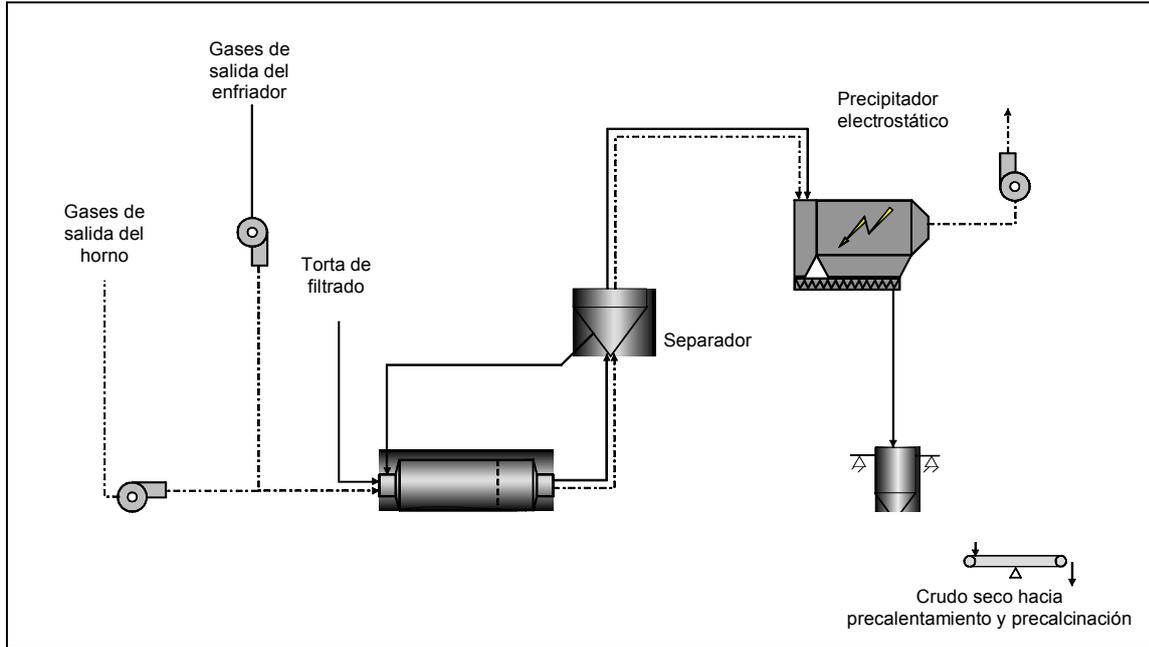
La presión de filtrado en los filtros prensa de escurrido de pasta se encuentra alrededor de los 15 – 20 bares, y los tiempos de retención son de 15 a 35 minutos, siendo los tiempos de carga y descarga de la prensa de 10 minutos.

Secado de la torta de filtrado

Se utiliza esencialmente dos tipos de secado de la torta de filtrado:

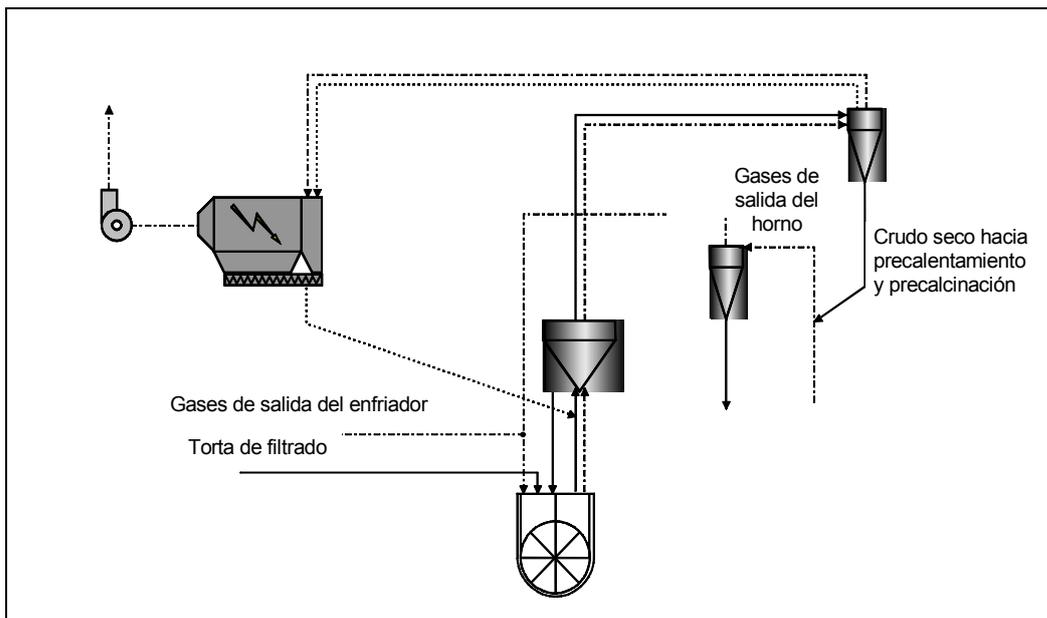
- Secadores de dispersión o rotatorios.
- Combinación de trituradores / secadores.

Se emplean los gases de salida del horno y del enfriador de clínker para el secado de la torta.



Fuente Cembureau

Figura 3.2.26. Secador rápido de rotación y dispersión para la torta de filtrado.



Fuente Cembureau

Figura 3.2.27. Combinación de secador rápido/ triturador por el secado de la fuerza de filtrado.

3.2.3. Almacenamiento y preparación de los combustibles

Las industrias cementeras requieren una gran cantidad de energía para la calcinación de las materias primas en los hornos. Esta energía es suministrada por el combustible, y representa el mayor coste económico en la fabricación de cemento.

Se pueden emplear diversos combustibles para proporcionar la energía térmica requerida por el proceso. Hoy en día se emplean principalmente dos diferentes tipos de combustibles en el calentamiento del horno de cemento:

- Coque de petróleo y/o carbón pulverizado.
- Fuel oil.

El elevado coste impide normalmente el empleo de gas natural o fuel oil, pero la elección del combustible depende en gran parte de la situación local.

Las altas temperaturas y los largos tiempos de permanencia de los gases en el horno, implican un considerable potencial de destrucción de los compuestos orgánicos. Esto permite emplear residuos de otros procesos productivos como combustibles alternativos (Ver apartado 3.2.3.3. *Empleo de residuos como combustibles alternativos*).

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

3.2.3.1. Almacenamiento de combustibles

Coque de petróleo y carbón

El carbón y el coque de petróleo se almacenan de forma similar a las materias primas, en muchos casos, en almacenes cubiertos. Para los almacenamientos de larga duración se emplean grandes montones y compactos exteriores a cielo abierto. Estos montones deben ser tratados para prevenir la erosión por lluvia y viento, mediante riego asfáltico, riego con agua y materiales tensoactivos, cubriéndolos con hierba, etc. Si existe suelo de hormigón bajo los montones apilados se puede recoger y depurar el agua drenada.

Cuando se almacena carbón de relativamente alto contenido en materias volátiles, se necesita observar una buena práctica en términos de compactación y altura de las pilas, para evitar el riesgo de ignición espontánea cuando se almacena por períodos largos.

El carbón y el coque de petróleo pulverizados se almacenan exclusivamente en silos. Por razones de seguridad (como el riesgo de autoignición o explosiones causadas por electricidad estática), estos silos deben estar equipados con medios de seguridad. En la mayoría de los casos disponen de válvulas antiexplosión y sistemas de inertización con CO₂ o nitrógeno.

Fuel oil

El fuel oil se almacena en tanques de acero. El trasiego de fuel oil requiere de previo calentamiento a una temperatura alrededor de 80 °C, para aumentar así su fluidez. Esto se logra mediante sistemas de calentamiento con vapor o con aceite térmico y el calorifugado en las conducciones.

3.2.3.2. Preparación de los combustibles

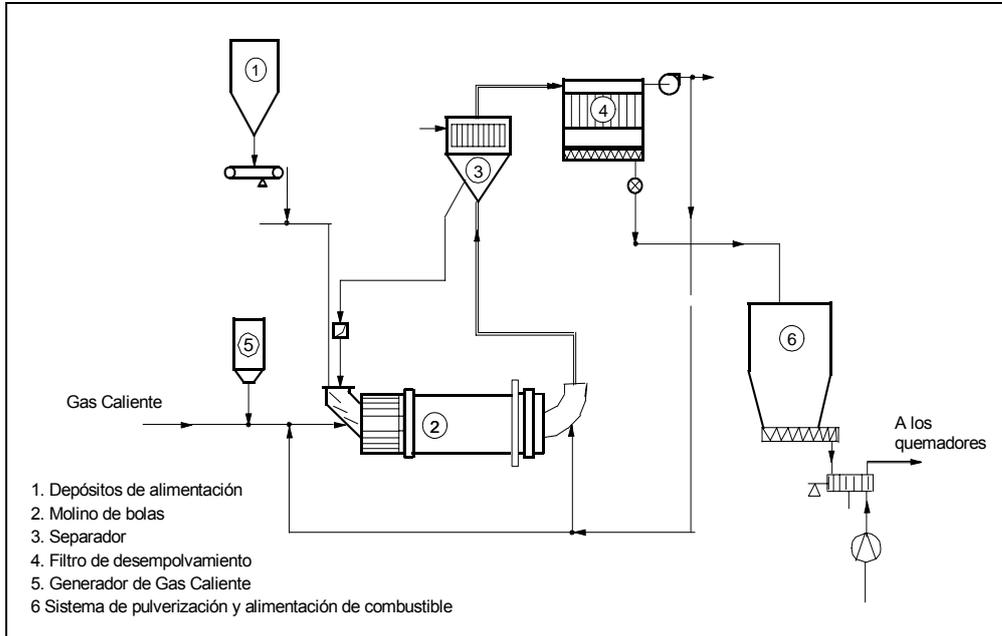
La naturaleza física de los combustibles usados en una planta del cemento - sólido, líquido o gaseoso - determina, además del diseño de los sistemas del almacenaje, la preparación y la combustión - tanto para los combustibles fósiles convencionales como para los combustibles alternativos.

Los combustibles líquidos no requieren normalmente acondicionamiento, mientras que los sólidos suelen exigir una costosa preparación (trituration, molienda y secado), que normalmente se suele llevar a cabo en la propia planta. En todos los casos, los sistemas de preparación, almacenamiento y combustión de los combustibles deben ser diseñados y operados con un alto nivel de seguridad frente a incendio o explosión.

Coque de petróleo y carbón

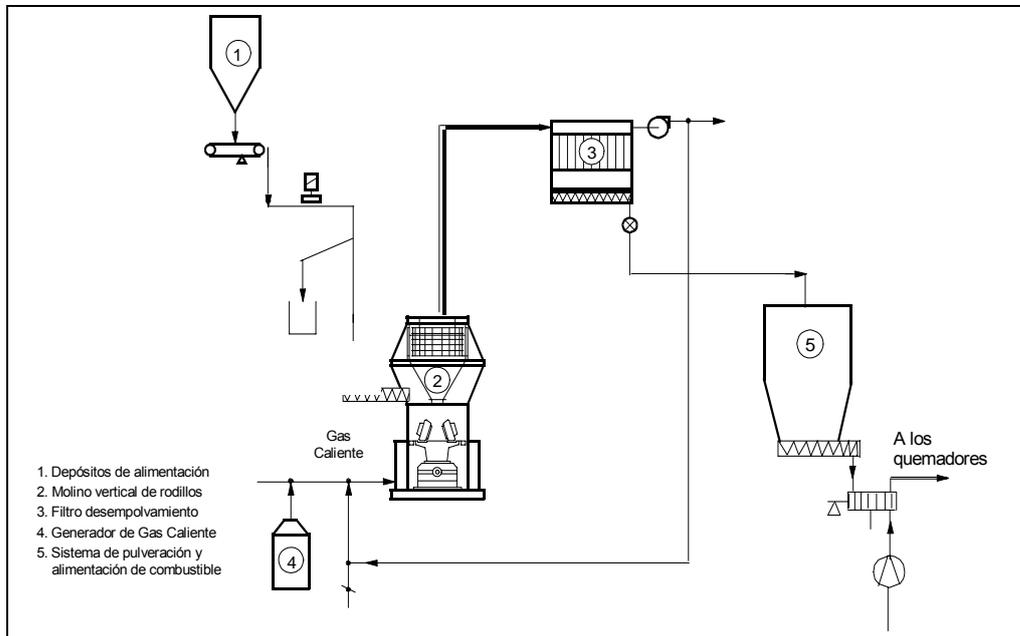
Se emplean tres sistemas principalmente de trituración y molienda de combustible:

- Molino de bolas, barrido por aire.
- Molino de rodillos vertical.
- Molino de impactos.



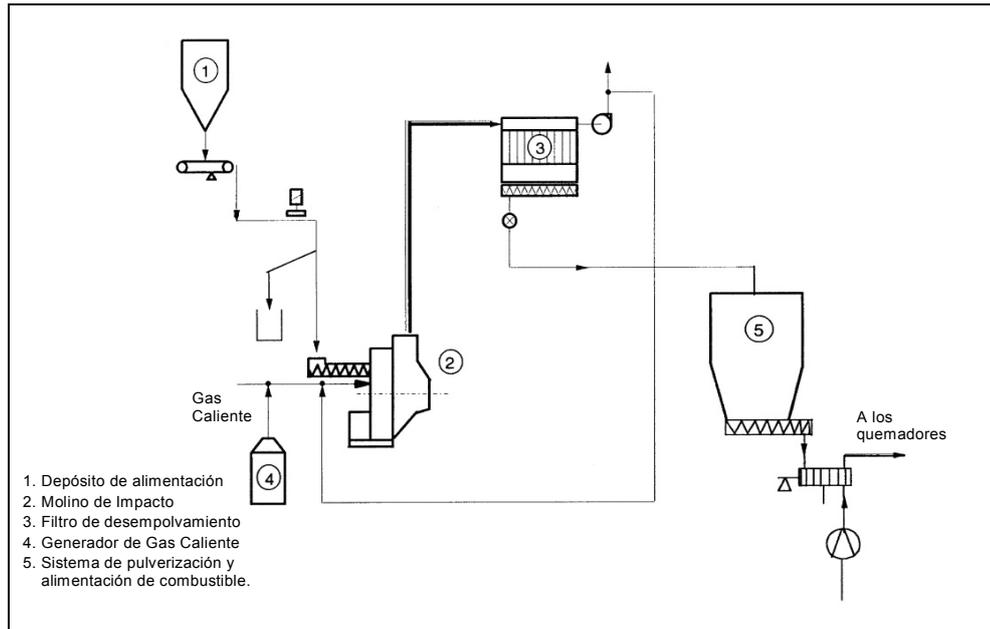
Fuente Cembureau

Figura 3.2.28. Molienda de combustible con molino de bolas.



Fuente Cembureau

Figura 3.2.29. Molienda de combustible con molino vertical de rodillos.



Fuente Cembureau

Figura 3.2.30. Molienda de combustible con molino de impactos.

La finura del combustible pulverizado es muy importante. Si es demasiado fino, las temperaturas de la llama pueden ser demasiado elevadas. Si es demasiado grueso puede ocurrir una mala combustión. El combustible pulverizado se puede alimentar directamente al quemador (sin almacenamiento ni medida intermedios) o – lo que se practica comúnmente hoy – se puede almacenar en silos de carbón con sistemas de medición y alimentación adecuados.

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

Fuel oil

En el caso de utilizar fuel oil, para facilitar su manipulación y combustión se calienta a 120-140 °C, lo que reduce su viscosidad a 10-20 cSt. Adicionalmente, se eleva la presión a 20-40 bar. El fuel oil, a viscosidad y presión adecuadas, se inyecta en el horno a través de una boquilla de atomización.

3.2.3.3. Empleo de residuos como combustibles alternativos

Las altas temperaturas en los hornos y largos tiempos de residencia inherentes al proceso de fabricación del cemento, suponen un alto potencial para la destrucción de compuestos orgánicos, lo que posibilita la utilización de una amplia variedad de combustibles, subproductos de otros procesos industriales o derivados de residuos, tanto líquidos (aceites usados, solventes, residuos de destilación, etc.) como sólidos (neumáticos usados, residuos de madera, papel, cartón, plástico, lodos urbanos e industriales, etc.).

Los incineradores normales de desechos funcionan a 1.100 °C con un tiempo de retención de gases de 2 segundos para poder lograr una destrucción del 99,99 % de los desechos incinerados. En el caso de los hornos para cemento:

- Los gases de combustión permanecen tiempos de residencia más altos, a muy alta temperatura (hasta 2.000 °C) y en una atmósfera rica en oxígeno, por lo cual el horno de clínker se considera el sistema más efectivo para la completa destrucción de los compuestos orgánicos presentes en los residuos;
- el poder calorífico del flujo de desechos se utiliza como combustible mientras se logra, al mismo tiempo, la destrucción total del material;
- y la interacción de los gases de combustión con la materia prima presente en el horno hace que los gases ácidos (sulfurosos y halogenados) formados en la combustión sean neutralizados y que la parte mineral no combustible del residuo quede retenida en la estructura del clínker de forma irreversible.

Además las ventajas de la utilización de combustibles alternativos en los hornos de clínker se pueden resumir en:

- Evita el vertido de estos residuos y sus impactos asociados,
- Tratamiento ecológico y seguro de los residuos, aprovechando al máximo su energía y minerales sin generar impactos añadidos sobre el entorno,
- Ahorro de combustibles fósiles no renovables (carbón y derivados del petróleo),
- Disminución global de las emisiones, en particular las de CO₂ (uno de los gases responsables del efecto invernadero) al sustituir combustibles fósiles por materiales que hubieran sido incinerados o fermentados en vertederos, con sus correspondientes emisiones,
- Alternativa de gestión económica y flexible, pues permite volver a utilizar combustibles fósiles cuando se mejoren las prácticas de reducción de residuos.

Por estas razones el empleo de combustibles alternativos es una práctica asentada en la mayoría de los países desarrollados. El nivel de sustitución mantiene una tendencia creciente.

A continuación se presenta una tabla de ejemplos de residuos utilizados como combustibles alternativos:

Tabla 3.2.3. Residuos como combustibles alternativos.

Combustibles líquidos alternativos
Disolventes de bajo contenido en cloro, lubricantes como aceites vegetales y grasas, residuos de destilación, aceites hidráulicos, aceites aislantes, etc.
Sólidos finos, granulados o pulverizados
Serrín, lodos de aguas negras, plásticos granulados, harina animal, residuos de la agricultura, residuos de producción de madera, neumáticos, etc.
Sólidos gruesos
Neumáticos, residuos de caucho, residuos de plástico, residuos de madera, materia orgánica, etc.
Combustibles gruesos alternativos
Neumáticos enteros, balas de plástico, material en bolsas y tambor

Almacenamiento de los combustibles alternativos

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

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

La práctica totalidad de los combustibles alternativos empleados en las fábricas de cemento son sólidos o líquidos, a excepción de algunos casos en los que se puede utilizar gases residuales. Los residuos líquidos se almacenan en depósitos estancos, dotados de sus correspondientes cubetos de protección contra posibles pérdidas o derrames. Los residuos sólidos se almacenan en acopios, en naves o en tolvas.

Preparación de los combustibles alternativos

Los combustibles sólidos (neumáticos, papel, plástico) se someten a tratamientos que incluyen la adecuación del tamaño mediante trituración o corte, para adaptar el residuo a las instalaciones de almacenamiento, manipulación y combustión de la fábrica de cemento.

La mayor parte del combustible que se alimenta al horno (65-85 %) tiene que estar finamente molida, puesto que debe quemar de manera fácil y completa, mientras que el resto (15-35 %) puede ser alimentado sin pulverizar (como por ejemplo los neumáticos enteros o troceados), siendo introducido por puntos alternativos al quemador.

Los combustibles líquidos (lubricantes, disolventes, etc.) pueden en su mayoría alimentarse al horno en su composición original, aunque normalmente se les somete a procesos de mezcla y homogeneización en plantas específicamente diseñadas (plantas de preparación de residuos), con el fin de optimizar la combustión en el horno, tanto desde un punto de vista de operación del mismo como de su comportamiento ambiental.

Las plantas de preparación de residuos son normalmente operadas por empresas especializadas en gestión de residuos, que envían a la fábrica de cemento el residuo líquido preparado con las especificaciones concretas correspondientes a cada horno.

3.2.4. Cocción del clínker

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

En el proceso de formación del clínker (también llamado clinkerización o sinterización) es esencial mantener las temperaturas del material en el horno entre 1.400 - 1.500 °C, que se corresponden con unas temperaturas de llama de cerca de 2.000 °C. La reacción de clinkerización se realiza bajo condiciones oxidantes, por lo que se requiere un exceso de aire en la zona de clinkerización del horno.

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

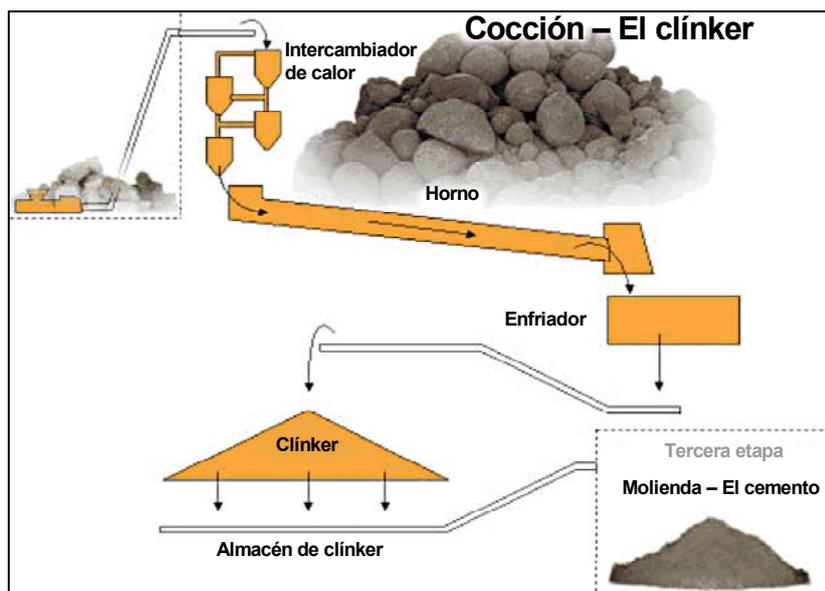


Figura 3.2.31. Etapa de cocción.

3.2.4.1. Composición del clinker

El clinker está compuesto principalmente por silicato tricálcico, silicato dicálcico, aluminato tricálcico y aluminoferrito tetracálcico. Se realiza a partir de una mezcla de materias primas como la piedra caliza, marga, arcilla, arena, mineral de hierro, bauxita y otros componentes en proporciones definidas. Cuando esta mezcla se calienta a la gama de temperaturas de la sinterización, los compuestos nuevos forman las distintas fases del clinker.

La tabla 3.2.4. muestra las proporciones típicas del clinker. Los términos alita y belita fueron introducidos por el E. TRNEBOHM del A., que examinando el clinker a través del microscopio en 1897 utilizó las primeras letras del alfabeto para señalar los componentes principales porque no sabía su composición. Estos nombres todavía se utilizan para distinguir entre los silicatos puros y las fases del silicato en el clinker, que incorporan siempre cantidades pequeñas de aluminio, hierro, magnesio, metales alcalinos, y trazas de otros elementos.

Tabla 3.2.4. Composición del clinker.

CONSTITUYENTE	FÓRMULA (Abreviatura)	CONTENIDO (% en peso)	
		Rango	Media
Silicato tricálcico	$3 \text{ CaO SiO}_2(\text{C}_3\text{S})$	46 – 79	61
Silicato dicálcico	$2 \text{ CaO SiO}_2(\text{C}_2\text{S})$	5 – 30	15
Aluminoferrita de calcio	$2 \text{ CaO (Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3)[\text{C}_2(\text{A},\text{F})]$	4 – 16	8
Aluminato tricálcico	$3 \text{ CaO Al}_2\text{O}_3(\text{C}_3\text{A})$	6 – 18	12
Óxido de calcio libre	CaO (C)	0,1 – 4	
Óxido de magnesio	MgO (M)	0,7 – 1,5	1,5

Fuente: Ullmann's

Silicato tricálcico (C₃S)

Es el compuesto con el contenido más alto de CaO del sistema binario CaO-SiO₂. C₃S. Es decisivo y determina la mayoría de las características del cemento. Su fraguado es lento y el endurecimiento es

bastante rápido. Alcanza una resistencia muy alta cuando se muele y mezcla con agua, por ello aparece en gran proporción en los de endurecimiento rápido y en los de altas resistencias iniciales.

Se forma por la reacción de estado sólido entre el óxido de calcio y silicio, y puede ser producido a partir de piedra caliza y cuarzo puro, muy finamente molidos, y calcinados a una temperatura extremadamente alta. La cinética de la reacción es más elevada en presencia de calcio, aluminio, y de óxidos del hierro (III) a una temperatura de 1.450 °C aproximadamente. Por esta razón, las materias primas usadas en la producción de clínker contienen como constituyente predominante el óxido de calcio y silicio y además las cantidades necesarias de aluminio y de óxido del hierro (III) para formar una proporción de la mezcla de cerca del 20-25 %.

El C_3S presenta un alto calor de fraguado, siendo necesario disminuir su porcentaje para grandes masas de hormigón, para tales casos se preferirá silicato dicálcico.

Silicato dicálcico (C_2S)

Es el compuesto que le otorga al cemento resistencia a largo plazo, por ser lento su fraguado y lento su endurecimiento. Su calor de hidratación es el más bajo de los componentes principales, y su estabilidad química es mayor que la del silicato tricálcico. Por ello los cementos con alto contenido de silicato dicálcico son más resistentes a los sulfatos que los de bajo contenido.

Se forma, al igual que el silicato tricálcico, por reacción entre el óxido de calcio y silicio, cuando el clínker del cemento no se satura totalmente con el óxido de calcio. En mezclas ricas en cal, el C_2S se forma a temperaturas por debajo de 1.000 °C por la reacción de estado sólido. Durante el proceso de sinterización por encima de 1.250 °C, el C_2S incorpora Ca^{2+} adicional, dando por resultado la formación de C_3S .

Aluminato tricálcico (C_3A)

Suministra al cemento un calor de hidratación muy grande, elevadísima velocidad de fraguado y gran retracción, y, a pesar de que sus características hidráulicas no son muy pronunciadas, junto con los silicatos, mejora bastante la resistencia inicial del cemento.

Su estabilidad química es buena frente a ciertas aguas agresivas (por ejemplo, agua de mar) y muy débil frente a los sulfatos.

Es el compuesto con el contenido más alto de CaO entre las fases del aluminato. C_3A contiene el óxido de aluminio que no se combina en aluminoferrito cálcico. Se funde produciendo óxido de calcio. El C_3A puro se cristaliza en forma cúbica. La malla cristalina puede incorporar diversos iones en la solución sólida, por ejemplo, Fe^{3+} , Mg^{2+} , Si^{4+} , o K^+ y Na^+ . Debido a la incorporación de los metales alcalinos, se produce un cambio de la cristalización de cúbico a ortorrómbico y a monoclinico, y ésta da lugar a una reactividad hidráulica más alta con respecto a C_3A cúbico.

Aluminoferrito tetracálcico [$C_4(AF)$]

Este compuesto no participa en las resistencias mecánicas y su presencia se debe a la necesidad de utilizar fundentes que contienen hierro en la fabricación del clínker. Tiene un bajo calor de hidratación y gran velocidad de fraguado. Su resistencia a las aguas selenitosas y agresivos en general es la más alta de todos los constituyentes. Su color oscuro lo hace prohibitivo para los cementos blancos, en los que se utilizan otros fundentes en su fabricación.

En el clínker del cemento común, la composición de la aluminoferrita de calcio corresponde a la fórmula $4 CaO Al_2O_3 Fe_2O_3$. Puede incorporar hasta 2 % del óxido de magnesio en su malla cristalina. Esto causa un cambio en color de marrón a gris, el color del cemento común.

Cal libre (CaO) y periclasa (MgO).

Los componentes de menor importancia de clínker del cemento son el óxido de calcio libre (cal libre) y el óxido de magnesio (periclasa). Reaccionan con agua para formar hidróxido de calcio e hidróxido de magnesio, que ocupan más espacio que los óxidos originales. Por lo tanto, el óxido de calcio libre y el óxido de magnesio pueden causar expansión cuando están presentes en cantidades elevadas. En este caso la reacción con agua procede muy lentamente y todavía continúa cuando el cemento ha comenzado a endurecer.

Por lo tanto, todos los estándares del cemento contienen especificaciones apropiadas para limitar el contenido de CaO y de MgO de modo que no ocurra la expansión que perjudique al mortero y el hormigón (productos derivados del cemento).

Compuestos de metales alcalinos

Estos son, por ejemplo, los sulfatos y compuestos alcalinos-metálicos que contienen aluminato de calcio. El clínker contiene hasta un 2 % de óxidos de metales alcalinos ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) y hasta un 2 % de sulfato (SO_4^{2-}). Los sulfatos de metales alcalinos se forman a las temperaturas de sinterización. No se mezclan con el aluminoferrito en el clínker. Las soluciones sólidas de sulfato alcalino-metálico se cristalizan durante el enfriamiento con una composición que depende del ratio $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$. La cantidad total de metales alcalinos y la naturaleza de su unión en el clínker, puede afectar perceptiblemente al proceso de endurecimiento y propiedades mecánicas del cemento.

Otros componentes

Otros componentes que se pueden encontrar en el clínker del cemento portland común no tienen una influencia significativa en las propiedades del cemento. Cementos especiales pueden contener aluminatos cálcicos en diferentes proporciones que determinan las propiedades finales del producto.

3.2.4.2. Proceso de cocción del clínker

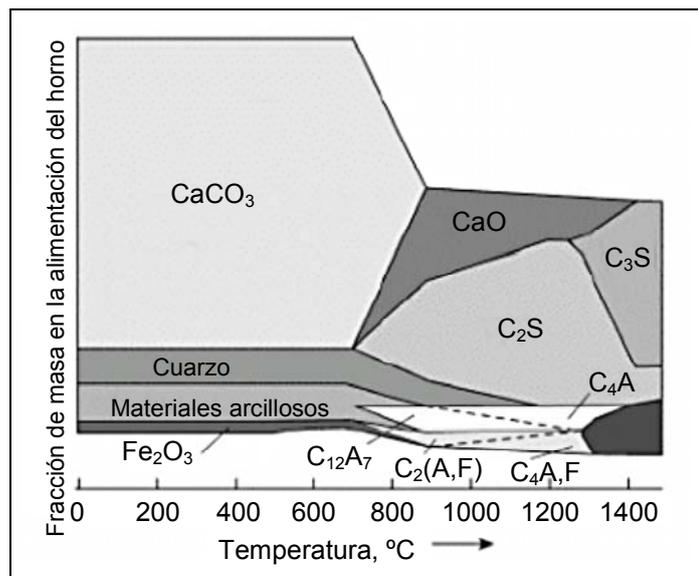
En esta fase del proceso -la más importante en términos de calidad del producto, potencial de emisiones, y coste-, las materias primas se alimentan al horno donde son secadas, precalentadas, calcinadas y sinterizadas para producir clínker de cemento, inmediatamente enfriado con aire, y almacenado.

La cocción consiste en una reacción entre sólidos finamente divididos (muy lenta) y la formación de una fase líquida, que acelera las reacciones y el desarrollo de los nuevos componentes (ver figura 3.2.32). El crudo en el horno va adquiriendo cada vez mayor temperatura, lo que da lugar a que se vayan produciendo una serie de transformaciones físicas y químicas. Convencionalmente este proceso se divide en las siguientes fases:

- I. **Composición inicial (20 °C):** Calcita (CaCO_3), cuarzo (SiO_2), minerales de arcilla ($\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) y componentes de hierro (Fe_2O_3).
- II. **Secado y precalentamiento (20-700 °C):** El secado implica la evaporación de la humedad de la materia prima a una temperatura de 110 °C. En el calentamiento inicial se evapora el agua líquida retenida y la de absorción, seguida por la deshidratación, a temperaturas mayores de 450 °C, de los minerales de arcilla, y activación de óxidos por la descomposición de dichos minerales.
- III. **Precalentamiento y calcinación (700-1.000 °C):** Se completa el proceso de disociación de los carbonatos de calcio y de magnesio y aparece una cantidad considerable de óxido de calcio libre. Se produce así mismo la descomposición de los minerales arcillosos deshidratados en los óxidos SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 . Los óxidos de hierro comienzan a reaccionar con la cal y la alúmina, para formar aluminoferrito tetracálcico líquido a 1.300 °C temperatura a la que se disuelven los minerales, incrementando la reacción entre ellos. Como

resultado de estas reacciones, se obtiene la primera formación de las fases del clínker que transcurren en estado sólido, C_3A , CA , $C_2(A,F)$, $C_{12}A_7$, y en parte C_2S .

- IV. **Cocción (900-1.250 °C):** Hasta aquí todas las reacciones han sido endotérmicas. En esta fase se producen las reacciones de fase sólida, a los 1.338 °C los materiales disueltos en el aluminoferrito tetracálcico (C_4AF) reaccionan formando todo el silicato dicálcico (C_2S) y la formación inicial del fundido C_3A . Estas reacciones son exotérmicas, lo que provoca un intenso aumento de la temperatura en un tramo relativamente corto del horno.
- V. **Cocción (1.250-1.450 °C):** El aluminato tricálcico (C_3A) se termina de formar a los 1400 °C. La cal que se encuentra en exceso reacciona con parte del silicato dicálcico (C_2S) para formar silicato tricálcico (C_3S).
- VI. **Enfriamiento:** El enfriamiento del clínker comienza en la zona de pre-enfriamiento del horno. La longitud de esta zona y la velocidad de enfriamiento dependen de varios factores, como por ejemplo, de la posición del quemador primario y el tipo de enfriador. El clínker deja el horno desde temperaturas de 1.350 °C (zona de la sinterización cerca de la salida del horno) a 1.150 °C (zona de enfriamiento con enfriadores de satélites). La optimización del enfriamiento a través de nuevas técnicas mejora la eficacia global del sistema de horneado. Además, el clínker y las características del cemento se pueden influenciar positivamente por una alta velocidad de enfriamiento, especialmente en la zona de pre-enfriamiento del horno. En esta fase se forma por completo la estructura y composición definitiva del clínker, en la cual figuran C_3S , C_2S , C_3A , $C_4(A,F)$ la fase vítrea y los componentes secundarios.



Fuente: Ullmann's

Figura 3.2.32. Composición en el horno en función de la temperatura.

En el proceso de clinkerización, la carga del horno debe alcanzar temperaturas de $1.400 \div 1.500$ °C, con temperatura punta de los gases de 2.000 °C. El proceso debe realizarse bajo condiciones oxidantes, por ello se requiere un exceso de aire en la zona de sinterización; estas condiciones son esenciales para la formación de las fases del clínker y la calidad del cemento final.

Desde el punto de vista de los procesos físico químicos, se suele dividir el proceso de cocción en las siguientes cinco etapas:

- I. Secado.
- II. Precalentamiento (hasta 500 °C).

- III. Descarbonatación o precalcinación (700-1.000 °C)
- IV. Clinkerización (1.000-1.450 °C)
- V. Enfriamiento (1.450-80 °C)

3.2.4.3. Hornos rotatorios

Desde la introducción del horno rotatorio, en 1895, éste se ha convertido en el corazón de las modernas instalaciones de producción de cemento. Los primeros hornos rotatorios fueron largos (valores L/D de hasta 35÷40), hasta llegar a los modernos (de valores L/D³ 10). El horno vertical se emplea todavía para la producción de cal, pero sólo en muy pocos países está en uso para la producción de clínker de cemento, y en estos casos, en plantas de pequeña escala.

Los sistemas de horneado aplicados comúnmente son por tanto hornos rotatorios, con, o sin, sistemas adicionales que más tarde se analizarán (precalentamiento y precalcinación) dependiendo del diseño de proceso principal seleccionado.

El horno rotatorio consiste en un cilindro metálico que está revestido interiormente de material refractario. Su longitud puede sobrepasar los 150 metros, con diámetros de hasta 4.5 metros. Está inclinado ligeramente (2 al 5 %) y gira a una velocidad lenta (100 a 180 revoluciones por hora, dependiendo de su diámetro e inclinación). La alimentación es continua y se efectúa por la parte superior, en forma de pasta cuando se trata del proceso de vía húmeda o en forma de polvo seco cuando se trata del proceso de vía seca. El producto se mueve en el interior por gravedad, debido a la inclinación del horno y favorecido por la rotación del mismo, de modo que va avanzando por el horno desde la entrada, por la parte superior, hasta la salida, por la parte inferior, pasando por todas las zonas del horno y por lo tanto, viéndose expuesto a todas las fases que se producen a lo largo del mismo.



Figura 3.2.33. Horno rotatorio.

El flujo del crudo en el horno se produce a contracorriente con los gases calientes procedentes de la combustión. A continuación del horno se sitúa un enfriador de manera que el clínker se enfría con el aire que entra y éste se va calentando de manera que sirve para avivar la combustión, aportando el aire necesario para que ésta se produzca. Cuando este aire, a gran temperatura, llega a la parte superior del horno, sirve para precalentar y secar el crudo que va entrando por la parte superior del

horno. Finalmente, el aire sale del horno por una chimenea a una temperatura considerable acompañado de polvo del crudo, por lo que es necesario disponer algún sistema de filtro para evitar la emisión de polvo al aire ambiente.

La carga de producto suele cubrir únicamente el 10-12 % de la sección interior del horno. El combustible se inyecta por el extremo inferior del horno mediante una tobera o mechero que se alimenta con carbón pulverizado o con fuel-oil.

En el caso de vía húmeda, los hornos tienen una longitud mayor, debido a que han de disponer de una zona de secado donde se elimine el agua de la pasta. Este es el punto débil del proceso de vía húmeda, ya que esa zona de secado supone un mayor requerimiento de espacio, además de un gran consumo de combustible.

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

- En el mechero principal, presente en todos los hornos, situado en la parte más baja del horno rotatorio. La llama alcanza una temperatura cercana a los 2.000 °C. Los gases de combustión se mantienen a más de 1.200 °C durante un tiempo superior a 5 segundos, en atmósfera oxidante (exceso de oxígeno).
- En la zona del horno en que se produce la descarbonatación de la caliza (calcinación), en la que la combustión se realiza a temperaturas cercanas a los 1.200 °C, manteniéndose los gases a una temperatura superior a 850 °C durante unos 3 segundos.

La ubicación concreta de la segunda zona de combustión varía para distintas tipologías de hornos. Los hornos más modernos disponen de cámaras de combustión en la parte baja de la torre de ciclones (precalcinador), donde se realiza la combustión con aporte de aire caliente proveniente del enfriador de clínker. Algunos hornos disponen de precalcinador sin aporte de aire terciario, por lo que la combustión se realiza con el exceso de oxígeno proveniente del mechero principal.

En hornos vía seca que no disponen de precalcinador o en hornos vía semiseca o semihúmeda, la combustión puede realizarse en la primera zona del horno rotatorio. Este sistema está especialmente indicado para combustibles densos y alimentados en tamaños relativamente grandes (como por ejemplo neumáticos enteros o troceados).

En hornos de vía húmeda o en hornos largos, la alimentación de combustibles alternativos puede realizarse en una zona del horno rotatorio adecuada al efecto (sistema patentado 'Mid Kiln'). La apertura realizada en el horno rotatorio y el sistema de compuertas permite que se pueda alimentar combustible en cada rotación del horno.

Tabla 3.2.5. Condiciones de combustión en hornos rotatorios.

Parámetro	Rangos
Temperatura de combustión	1.800-2.000 °C (Quemador principal)
Tiempo de retención	5-10 seg a T>1.200 °C
Contenido en oxígeno	2-3 %

Fuente Cembureau

Si las materias primas de entrada al horno poseen un alto contenido en álcalis y se requiere un cemento de menor o de bajo contenido en éstos, se puede añadir un by-pass para eliminarlos. En la zona de sinterización del proceso de cocción del clínker, donde se alcanzan temperaturas de 1450 °C, algunos álcalis se volatilizan, especialmente si se presentan en forma de sulfatos. Los álcalis volatilizados se arrastran con la corriente de gases calientes que, en el caso de un horno con precalentadores, volverán a introducirse en el sistema. Para reducir el contenido de álcalis se instala un by-pass que extraiga parte de los gases calientes del sistema que posteriormente pasan por un sistema de filtrado para retirar las partículas ricas en compuestos alcalinos. La cantidad de gases que

deben ser desviados al by-pass depende de las cantidades de álcalis que quieren eliminarse, normalmente con el 10-20 % suele ser suficiente para obtener un nivel aceptable.

Hornos rotatorios largos

Los hornos largos son los tipos de hornos rotatorios más antiguos empleados en la producción de clínker de cemento.

Los hornos largos más grandes tienen una relación longitud a diámetro de 38:1 y pueden tener más de 200 metros de longitud. Están diseñados para desarrollar todas las fases del proceso que conllevan desde el secado hasta la clinkerización (secado, precalentamiento, precalcación y clinkerización), de tal manera que sólo se completan con el sistema de alimentación y el enfriador. La parte primera de los hornos largos va equipada con pantallas de cadenas para mejorar la transferencia térmica.

Estos hornos (figura 3.2.34.) se pueden alimentar con pasta, tortas de filtrado molidas, nódulos o crudo seco y por ello, son aptos para todos los tipos de proceso. No obstante, hoy en día tan sólo se utilizan los hornos largos en el caso de tener una materia prima húmeda, puesto que si la humedad de las materias primas permite el proceso vía seca, las nuevas instalaciones recurren a hornos más cortos con varias etapas de intercambio de calor, por ser más eficientes energéticamente.

El proceso en vía húmeda con hornos largos se desarrolló para el caso de tener materias primas muy húmedas, más fáciles de homogeneizar en dilución con agua. Éstas una vez trituradas, mezcladas y homogenizadas en forma de pasta se introducen directamente en el horno rotatorio con un contenido en agua del 32 al 40 % para aumentar su fluidez. El agua se evapora en la zona de secado, en la sección de entrada.

Los hornos largos de vía húmeda están caracterizados por unas dimensiones importantes en relación a su capacidad de producción (máximo 3.600 t/d). Eso aparece sobre las curvas que dan las relaciones entre producción y diámetro interior de enladrillado (figura 3.2.35.), por una parte, y entre producción y volumen interior de enladrillado (figura 3.2.36.) por otra.

La producción volumétrica de los hornos vía húmeda varía en una banda que va de 0,3 a 0,9 t/d*m³ con una media de 0,6 t/d*m³. Se constata una tendencia a la disminución de este cociente, en paralelo al aumento del diámetro del horno.

La carga térmica en la zona de cocción (para la sección transversal de esta zona medida dentro del enladrillado), varía en la banda desde 14,2 a 29,7 GJ/m²*h con un valor medio de 19,6 GJ/m²*h. La carga térmica tiende a aumentar al mismo tiempo que el diámetro del horno. Una correlación bastante buena ($R^2 = 0,91$) se obtiene entre carga térmica y producción (figura 3.2.37.).

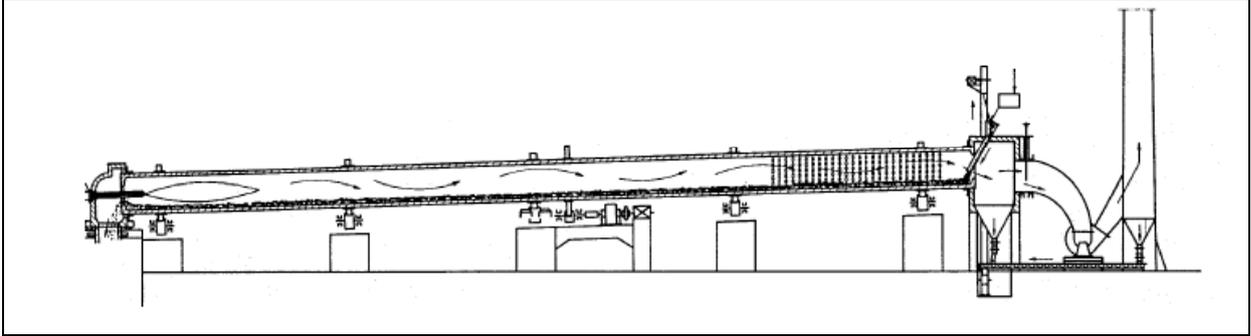
Los hornos por vía húmeda presentan un consumo energético muy elevado, puede ir desde 4.500 a 7.000 kJ/kg de clínker. Este fue y es el motivo por el cual estos hornos están en desuso, excepto en algunos casos particulares, donde la aptitud a consumir combustibles de sustitución permitió compensar este consumo elevado por una reducción sensible del coste unitario de la energía térmica.

Las ventajas de una instalación por vía húmeda son esencialmente:

- Un ahorro en el consumo de energía eléctrica aproximadamente de 15 al 20 % con relación al método por vía seca (para el conjunto de la instalación).
- La posibilidad de consumo de combustibles de sustitución o residuos industriales hasta un 100 %.
- Una tolerancia mayor, que el método por vía seca, respecto a los elementos menores (cloruros y sulfatos alcalinos).
- Una elevada fiabilidad mecánica vinculada a la simplicidad.

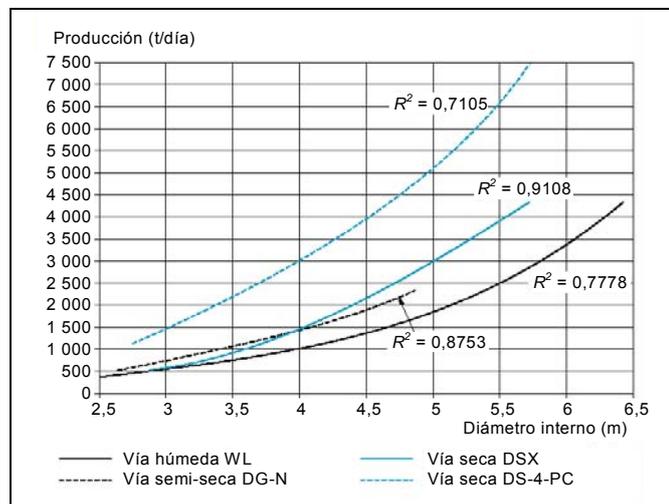
En cambio, los inconvenientes principales son los siguientes:

- El consumo de energía térmica puede alcanzar 2 a 2,4 veces el del método por vía seca.
- La capacidad de producción unitaria se limita a 3.600 t/d mientras que existen hornos por vía seca de 7.500 t/d.



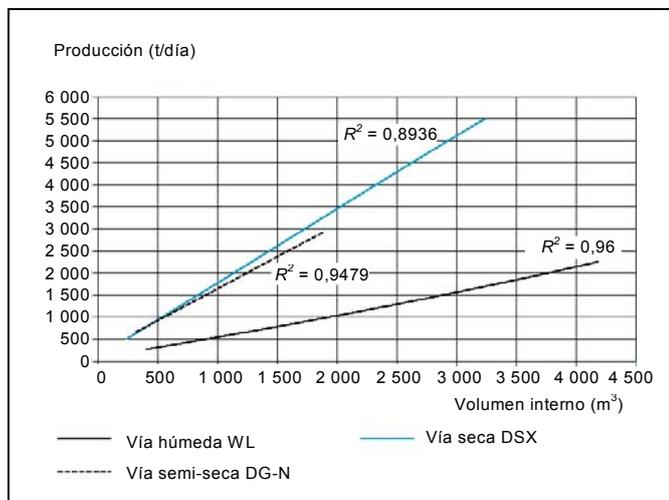
Fuente: Cembureau

Figura 3.2.34. Horno largo de vía húmeda.



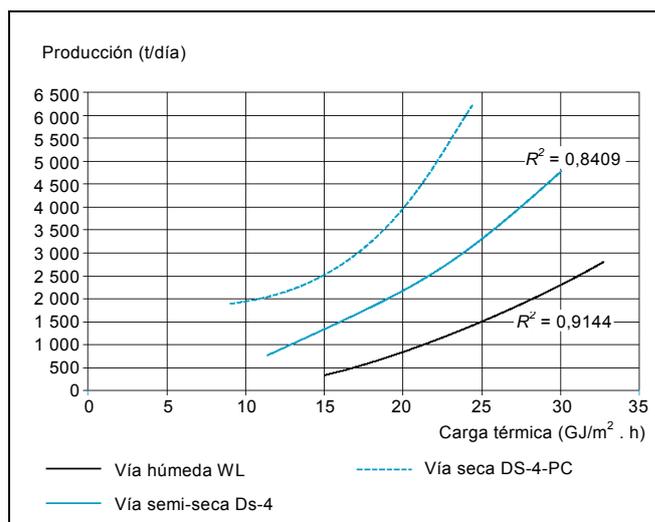
Fuente: Techniques de l'Ingénieur

Figura 3.2.35. Relación entre la producción y el diámetro interno.



Fuente: Techniques de l'Ingénieur

Figura 3.2.36. Relación entre la producción y el volumen interior del horno.



Fuente: *Techniques de l'Ingénieur*

Figura 3.2.37. Relación entre la producción y la carga térmica.

Hornos rotatorios equipados con precalentadores

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

Tecnología del precalentador de parrilla

La tecnología del precalentador de parrilla, mejor conocido como horno Lepol, se inventó en 1928. Representa la primera instalación en que parte del proceso de cocción (secado y parte de la descarbonatación) tiene lugar en una instalación estacionaria fuera del horno, en una parrilla móvil. El final de la descarbonatación y la clinkerización se hace en la parte rotatoria del sistema de cocción. Esto permite que el horno rotativo sea más corto y reducir así la pérdida de calor e incrementar la eficiencia energética del total de la instalación.

Este método se desarrolló como alternativa al método por vía húmeda y, con relación a éste, ofrece el interés de una fuerte reducción (de 20 a 30 %) del consumo específico térmico del sistema de cocción.

En los hornos Lepol la operación de cocción va precedida de una fase de granulado, de manera que la materia prima se transforma en gránulos aceptables por la parrilla. En el precalentador de parrilla (ver figura 3.2.39.) los gránulos hechos con harina cruda y agua (proceso semiseco) o las tortas filtradas de lechada húmeda (proceso semihúmedo) se alimentan a una parrilla horizontal móvil que se desplaza a través de un túnel cerrado. Las placas de la parrilla permiten el paso de aire a través de las mismas. El túnel se divide en una cámara de gas caliente y una cámara de secado separadas por un tabique atravesado por la parrilla. El tabique permite evitar lo mejor posible el paso directo de los humos calientes hacia la cámara de secado.

Los gases de salida del horno rotatorio, a una temperatura de 1.000 °C aproximadamente, aspirados por un ventilador, cruzan el lecho de gránulos en dos ocasiones:

- Primeramente a través de las capas de gránulos en la cámara de gas caliente, cediendo una gran parte de su calor para salir de la rejilla a 100-120 °C y luego a través de los ciclones del colector intermedio de polvo, donde se eliminan las partículas grandes de polvo que pueden causar desgastes en el ventilador.
- Posteriormente, un segundo ventilador dirige el gas a la parte superior de la cámara de secado, atravesando las capas húmedas de gránulos, y finalmente lo lleva al colector de polvo.

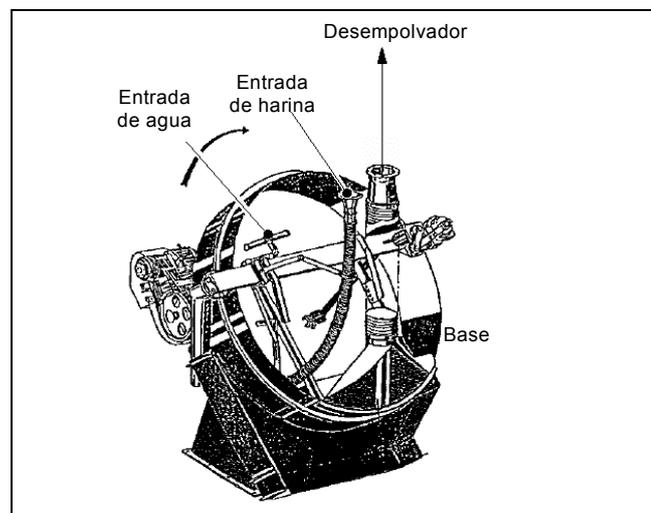
Durante este intercambio, los gránulos secados y parcialmente descarbonatados (de 20 a un 30 %), entran en el horno a una temperatura de 840 °C.

La parrilla Lepol está constituida por un conjunto sin fin de placas, de una anchura de 4 a 5,6 m y una longitud entre ejes de 20 a 62 m. El grosor de la capa de gránulos es ajustable entre 150 y 200 mm. La velocidad de la rejilla es ajustable entre 25 y 50 m/h.

Para aumentar la producción de la instalación por encima de la producción nominal, se utiliza un quemador auxiliar de precalcinación en la cámara caliente, con el objetivo de poseer un margen de maniobra en términos de ventilación, para llevar la cantidad de oxígeno en salida de horno de 1,5 a 3,5-4,5 %. Por tanto, el aire necesario para la combustión del combustible de precalcinación es aportado por los humos del horno. Del 20 al 25 % del calor total puede ser aportado por el quemador de precalcinación, de manera que la descarbonatación de la harina sobre la parrilla puede alcanzar un 55 al 60 %, en vez de 20 al 30 % sin precalcinación.

Las condiciones de explotación del horno Lepol, así como las del refrigerador, están determinadas por la granulación previa de la materia prima antes de la introducción en la parte rotatoria; aspecto que se concreta por el cociente de producción volumétrica. Este valor es más elevado que en el caso del horno vía seca sin precalcinación, de alrededor 30 %. La producción volumétrica de los hornos Lepol varía en una banda que va desde 1,5 a 3,2 t/d*m³ con un valor medio de 2,1 t/d*m³. Como para los hornos de vía húmeda, se constata una tendencia a la disminución de la producción volumétrica con el aumento del diámetro del horno.

La carga térmica en la zona de cocción varía en una banda desde 10,2 a 19,2 GJ/m²*h con un valor medio de 14,5 GJ/m²*h, sin ninguna correlación con la producción. El consumo térmico del método por vía semiseca es inferior a la del método por vía semihúmeda. Se constata que puede variar en un rango bastante amplio, de 3.200 a 5.000 kJ/kg de clínker según las condiciones de operación.



Fuente: *Techniques de l'Ingénieur*

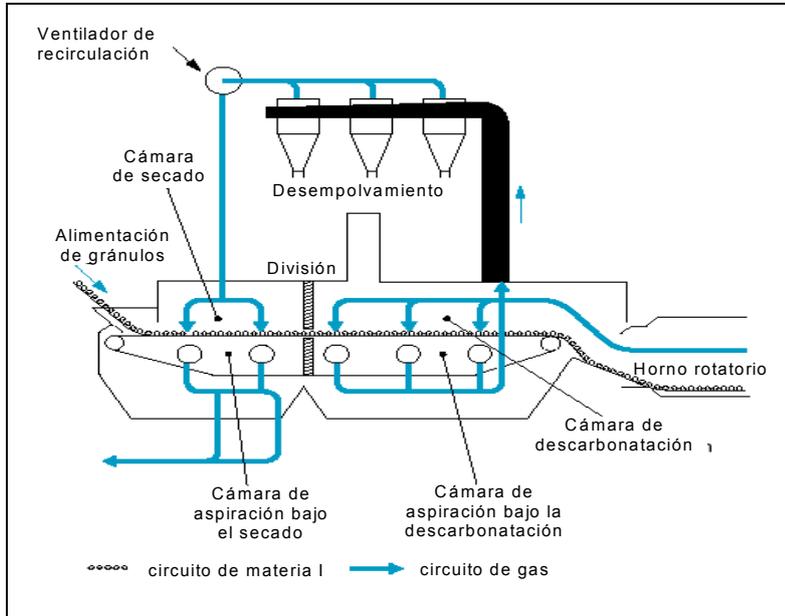
Figura: 3.2.38. Granulador.

Las ventajas del método Lepol son:

- El consumo de energía térmica es inferior al del horno por vía húmeda.
- La buena granulometría del clínker.
- La simplicidad de la operación
- El buen control de las recirculaciones internas.

Los inconvenientes son:

- La necesidad de una materia prima apta para la granulación;
- la imposibilidad de recuperar el calor sensible de los humos a causa de su baja temperatura;
- la capacidad de producción unitaria limitada;
- la dificultad en el control de las entradas de aire (20 %) y del perfil de las presiones en las cámaras de la parrilla.



Fuente: *Techniques de l'Ingénieur*

Figura 3.2.39. Parrilla Lepol.

Tecnología del precalentador en suspensión en X etapas: DS-X (Dry Short X)

La invención del precalentador de suspensión o intercambiador de calor de ciclones en los comienzos de los años 30 fue una gran innovación en el proceso cementero.

Este tipo de precalentadores requiere que el crudo sea seco (proceso en vía seca); de manera que el precalentamiento e incluso la calcinación parcial del crudo seco tiene lugar por el mantenimiento de la harina cruda en suspensión con los gases calientes de salida del horno rotativo.

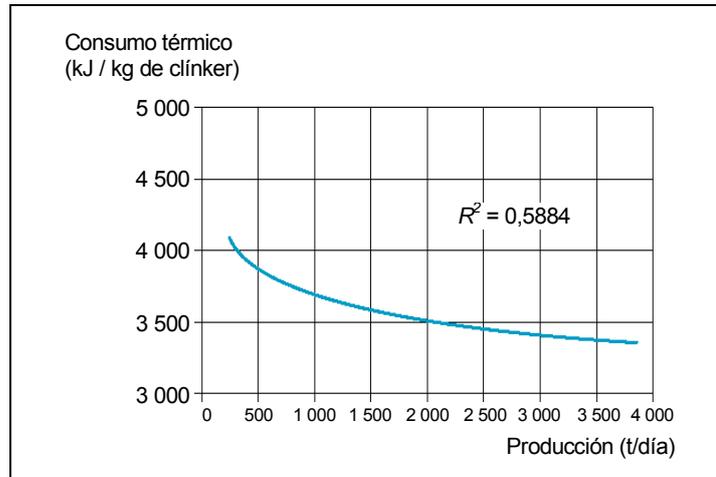
Mediante este sistema de precalentamiento se obtiene una disminución significativa del consumo específico de energía, por lo que se ha ido sustituyendo el proceso en vía húmeda por el proceso en vía seca con la tecnología de precalentador en suspensión. Actualmente, prácticamente todos los hornos de la industria del cemento en funcionamiento en los países del Plan de Acción para el Mediterráneo, utilizan este tipo de proceso.

Por otra parte, este método permitió alcanzar capacidades de producción unitaria más importantes, hasta 4.500 a 5.000 t/d, sin recurrir a precalcificación. El horno más grande de este tipo se construyó en 1974 con 6,2 m de diámetro y una producción de 5.000 t/d.

La producción volumétrica varía en un rango que va de 1,2 a 2,9 t/d*m³ con un valor medio de 1,7 t/d*m³. La carga térmica en la zona de cocción varía de 11,3 a 30,9 GJ/m²*h con un valor medio de 17,1 GJ/m²*h. Existe una correlación (0,84) entre producción y carga térmica (figura 3.2.37.).

El consumo térmico del método por vía seca es el más reducido teóricamente de los cuatro procesos considerados (húmedo, semihúmedo, semisecho, seco), aunque se constata que puede variar en un rango bastante amplio, de 3.150 a 4.150 kJ/kg de clínker según las condiciones de operación

(figura 3.2.40). El efecto del tamaño del horno, por la reducción de las pérdidas por las paredes, consigue una mejora respecto a las instalaciones de grandes dimensiones, y puede alcanzar 300 kJ/kg a 400 kJ/kg de clínker.



Fuente: *Techniques de l'Ingénieur*

Figura 3.2.40. Relación entre consumo térmico y producción.

La cocción del clínker en el horno en vía seca con precalentadores en suspensión implica dos fases:

- El precalentamiento y una descarbonatación parcial (del 20 al 50 %) se efectúan en la parte estática de la instalación: intercambiador de ciclones;
- el final de la descarbonatación y el clinkerizado son efectuados en el horno rotativo.

Se pueden aplicar diversos sistemas de precalentador en suspensión. Generalmente tienen entre cuatro y seis etapas de ciclones en configuraciones donde las materias primas están relativamente secas y no requieren una contribución térmica muy importante para efectuar su secado.

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

Los precalentadores de suspensión presentan problemas de incrustaciones en las paredes de los ciclones y conductos, en los casos en que las materias primas, y/o el combustible, contienen cantidades elevadas de materiales como cloruros, sulfatos y álcalis. Estas incrustaciones frecuentemente causan taponamientos con las consiguientes paradas del horno durante bastantes días. Una posible solución a dicho problema es la desviación del gas del horno, es decir la extracción y depuración de parte de la corriente de gas de salida del horno. Este gas se enfría para condensar los álcalis y luego se trata en un colector de polvo antes de ser emitido a la atmósfera.

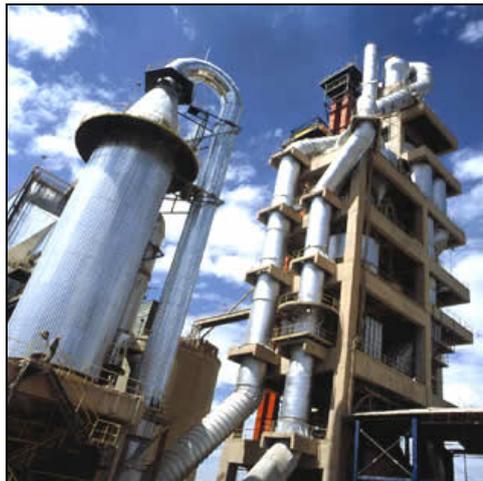


Figura 3.2.41. Precaentador.

El diseño estándar desde los años 70 ha sido el precalentador de cuatro etapas de ciclones (ver figura 3.2.42), época en que se construyeron gran número de plantas con un rango de 1.000 a 3.000 toneladas/día.

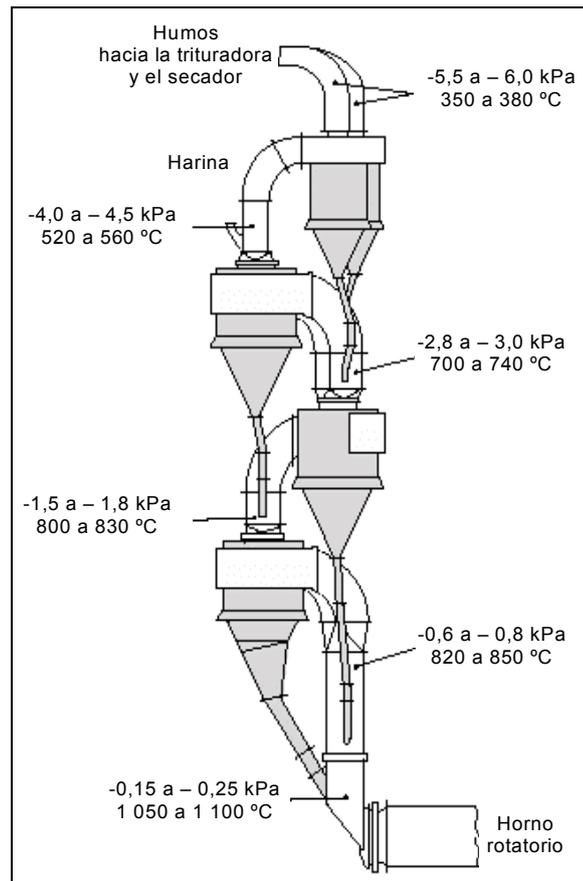
Casi todos los precalentadores de suspensión de cuatro etapas trabajan adosados a hornos rotatorios con tres apoyos. Los hornos, con diámetros de 3,5 a 6 metros, tienen relaciones de longitud a diámetro del rango de 13:1 a 16:1. Estos hornos, mecánicamente más sencillos que los hornos largos secos y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

El intercambiador de 4 etapas permite un equilibrio entre el calor disponible en los gases que salen del mismo (entre 350 y 380 °C) y la necesidad de calor para evaporar la humedad en las materias primas con 8 o un 9 % de agua. En la etapa superior de los ciclones, el objetivo principal es la separación y limitar así las recirculaciones de materia (harina). Normalmente se tienen valores cercanos a 50 g/Nm³, lo que representa alrededor del 8 % de la producción del horno.

Los fabricantes proponen distintas disposiciones (figura 3.2.43.) de los intercambiadores de ciclones. Las mejoras más recientes del intercambiador consisten en reducir de manera muy importante las pérdidas de carga de los ciclones sin deteriorar la función de separación. Estos cambios pueden ser:

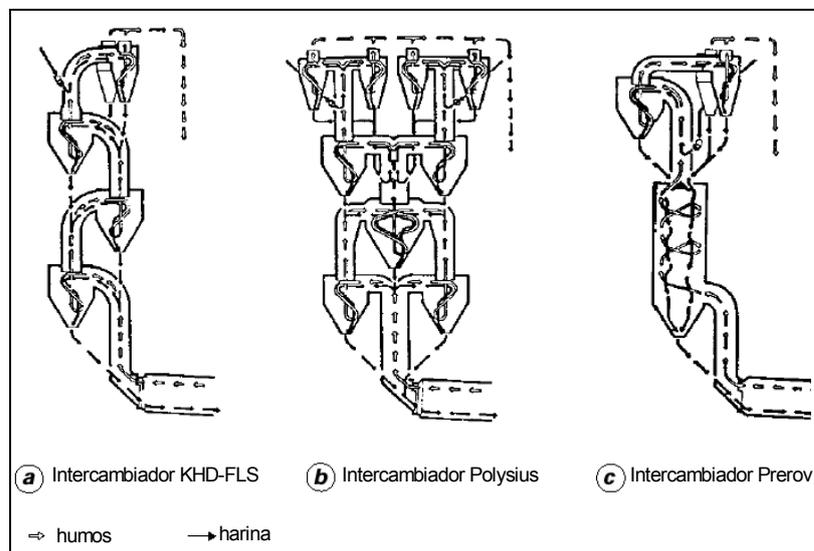
- Modificación del diseño del tubo de entrada en el ciclón.
- Modificación de la relación de aspecto para conseguir mayores aceleraciones.
- Mejora del comportamiento de los tubos interiores a los ciclones.

Es posible obtener una pérdida de carga del conjunto del intercambiador de 3 kPa mientras que las configuraciones iniciales eran aproximadamente de 5,50 kPa para un intercambiador de 4 etapas. Por ello el consumo específico de energía eléctrica se ha podido reducir, para la instalación completa, de 25 a 16 kWh/t de clínker.



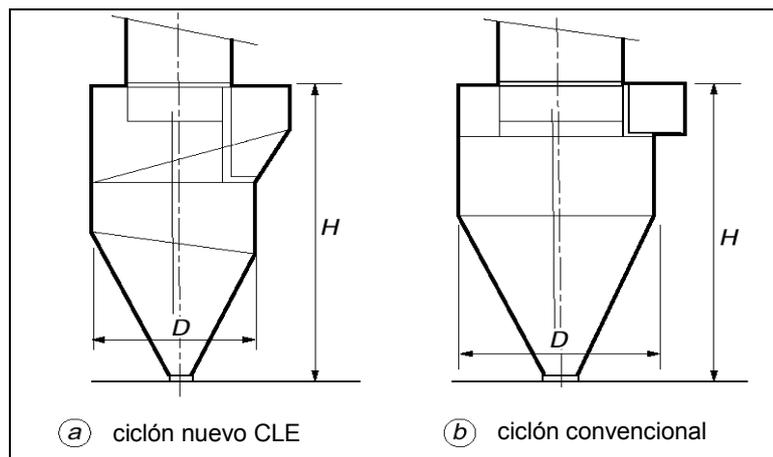
Fuente: *Techniques de l'Ingénieur*

Figura 3.2.42. Pre calentador en cuatro etapas de ciclones.



Fuente: *Techniques de l'Ingénieur*

Figura 3.2.43. Intercambiadores de ciclones.



Fuente: *Techniques de l'Ingénieur*

Figura 3.2.44. Esquema de un ciclón.

Las ventajas del sistema de cocción por vía seca mediante precalentamiento en suspensión son esencialmente:

- La recuperación óptima del calor sensible de los humos.
- El escaso consumo térmico específico.
- La gran facilidad de operación.
- La posibilidad de alcanzar elevadas capacidades de producción.

Los inconvenientes principales son los siguientes:

- Enorme sensibilidad a la presencia de elementos menores (álcalis, cloro, azufre, etc.).
- Fuerte heterogeneidad de la granulometría del clínker.

Hornos rotatorios con precalentador y precalciner en X etapas: DS-X-SF y DS-X-PC

La industria japonesa, motivada por el fuerte crecimiento de consumo de cemento en los años 1963-1973 (aumentado un 10 % anual) desarrolló la tecnología de la precalcinación.

La precalcinación consiste en desplazar hacia el intercambiador de ciclones la parte fundamental de la fase de descarbonatación (90 %) que se efectuaba en el horno rotatorio.

La precalcinación se desarrolló para responder a los siguientes objetivos:

- Aumentar la capacidad unitaria de las nuevas herramientas de producción limitada a 4.500-5.000 t/d en el método de vía seca clásico.
- Aumentar la capacidad de producción de instalaciones existentes en vía seca o en la conversión de otros métodos;
- reducir el coste de inversión expresado en unidad monetaria por tonelada de producción anual;
- mejorar la fiabilidad de las instalaciones por la reducción del diámetro del horno rotatorio (a partir de 5,50 m de diámetro los hornos requieren operaciones de reparación del refractario en la zona de cocción de aproximadamente de 3 meses en vez de 12 meses);
- mejorar los consumos específicos gracias al efecto de la reducción de tamaño y a la mejora de la calidad del intercambio térmico;
- reducir las emisiones de NO_x ;
- permitir la integración de sistemas de bypass de manera económica.

De esta manera se desarrolló la precalcincación (PC sobre la figura 4.2.45.) mediante un hogar auxiliar, en el cual:

- La alimentación de materia puede proceder del nivel 3 ó 4 del intercambiador de ciclones;
- la alimentación de combustible se hace en forma de carbón, fuel, o coque de petróleo;
- la contribución en oxígeno necesaria para la combustión puede ser proporcionada o por los gases del horno, o por el refrigerador;
- la salida de materia hacia el horno rotatorio puede hacerse a partir del nivel de los ciclones inferiores (4, 5 ó 6).

Con la hipótesis de dimensiones de hornos rotatorios idénticos, la adición de un precalcinador permite el aumento de la capacidad de la instalación de un factor 2 a 2,3.

Principios generales

El precalcinador tiene por origen las observaciones de los principios siguientes:

- El horno rotatorio es un excelente intercambiador de calor en su parte más caliente, la zona de clinkerización, donde el intercambio se hace por radiación. Esta zona constituye cerca de 1/3 de la longitud del horno (figura 3.2.46.).
- En una instalación con precalentador sin precalcincación, la parte fundamental de la descarbonatación (de 80 a 90 %) tiene lugar en el horno rotatorio. Se considera que esta fase ocupa el 2/3 de la longitud del horno donde las condiciones de intercambio térmico son de 12 a 17 kJ/kg de clínker y por metro de horno. La figura 3.2.46. muestra la evolución de la temperatura media de la materia en una instalación industrial.
- La fase de descarbonatación exige las necesidades de calor más importantes en relación al conjunto de las fases del método (1.965 kJ/kg de clínker). La figura 4.2.47. muestra la evolución de una pequeña cantidad de materia, en laboratorio, según el ciclo calor "Q", temperatura "T" de los procesos. En una instalación industrial, donde las temperaturas no son homogéneas, se constata (figura 3.2.46) un principio de descarbonatación previamente a la temperatura media de 900 °C y una descarbonatación total más allá de 900 °C.
- El intercambio de calor entre materia y humos efectuado por convección es mejorado por la puesta en suspensión de las materias, aunque la divergencia de temperatura es escasa (figura 3.2.46.).

En parte, a partir de estas observaciones, la compañía japonesa IHI desarrolló, a principios de los años 1970, el precalcinador designado bajo el nombre de proceso SF (Suspensión Furnace), gracias al cual la descarbonatación del crudo alcanza del 80 al 90 % antes de su introducción en el horno rotatorio, de 50 al 60 % del combustible se utiliza en el hogar de precalcincación

Según la proporción de combustible inyectada en la precalcincación se obtiene la siguiente proporción de descarbonatación:

Tabla 3.2.6. Proporción de descarbonatación.

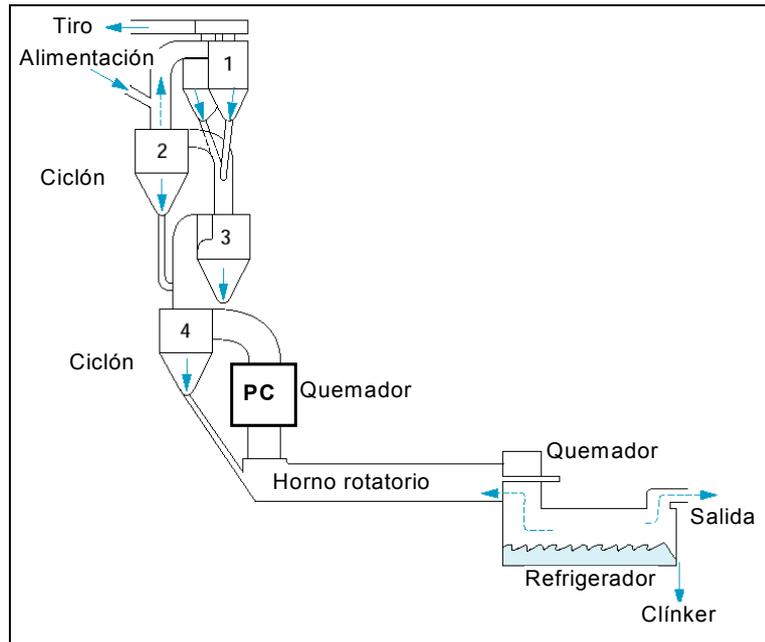
Ratio de combustible inyectado en la precalcincación	Ratio de descarbonatación
10 %	20 %
55 %	80 %

Fuente: *Techniques de l'Ingénieur*

Se distinguen dos sistemas de precalcincación según el método de alimentación de aire de combustión:

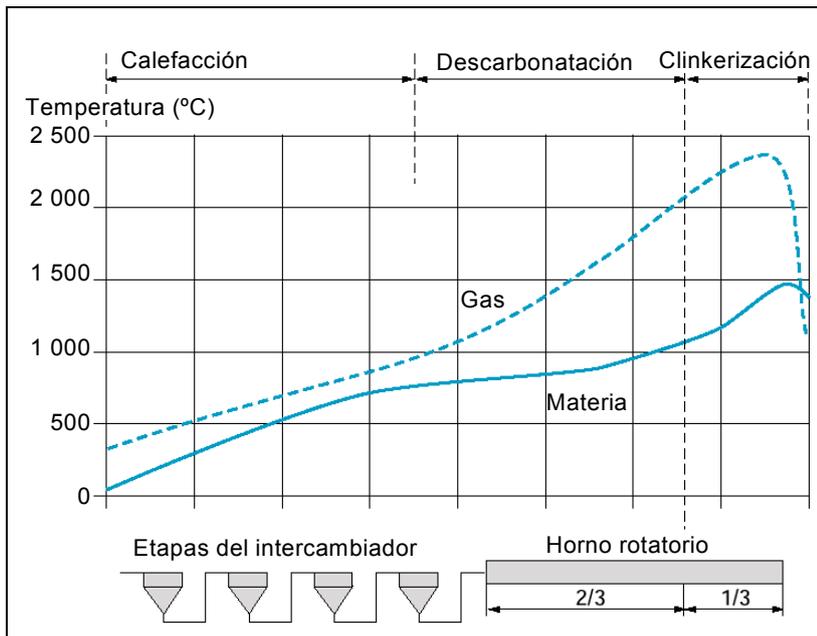
- Sin conducto de aire terciario.

- Con conducto de aire terciario.



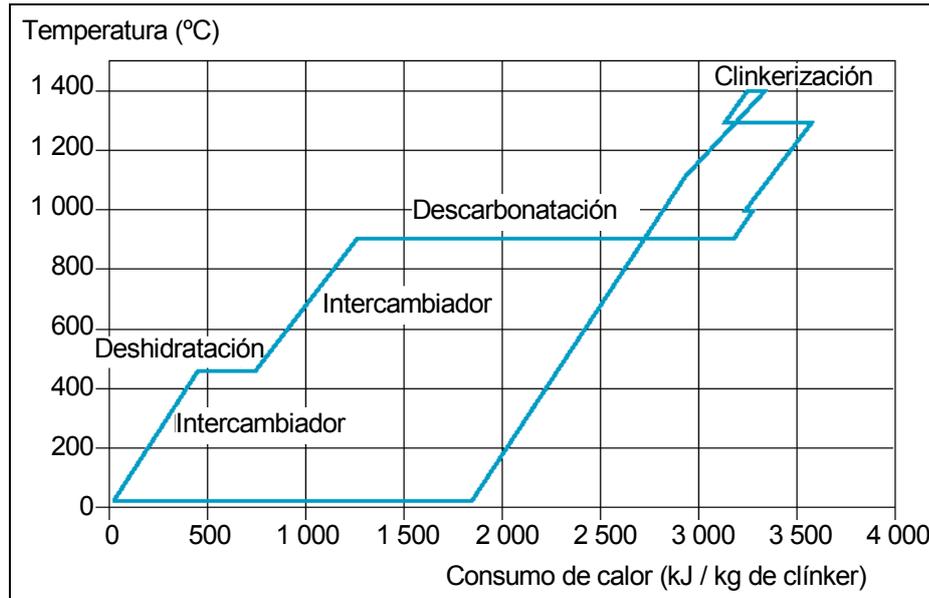
Fuente: *Techniques de l'Ingénieur*

Figura 3.2.45. Horno con precalentador y precalcinador.



Fuente: *Techniques de l'Ingénieur*

Figura 3.2.46. Perfil de temperaturas de gases en el proceso de cocción.

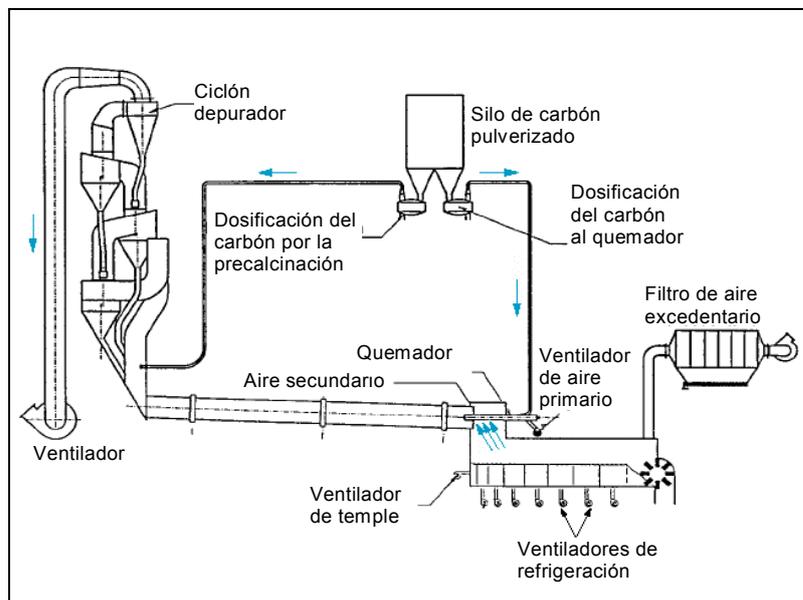


Fuente: *Techniques de l'Ingénieur*

Figura 3.2.47. Proceso de cocción.

Precalcinación sin aire terciario

En la precalcinación sin aire terciario (figura 3.2.48.), el aire de combustión es proporcionado por el exceso de aire del quemador del horno rotatorio.



Fuente: *Techniques de l'Ingénieur*

Figura 3.2.48. Precalcinación sin aire terciario.

En la figura 3.2.49. la red de curvas permite determinar para un exceso de aire definido en la precalcinación, el exceso de aire necesario en el quemador principal para conseguir una tasa de precalcinación elegida.

Esto provoca una disminución de la temperatura de la llama T de más de 100 °C, ya que implica una fuerte disminución de los cambios térmicos en la zona de cocción donde éstos se producen por radiación (proporcionales a T^4).

La figura 3.2.48. permite evaluar la variación de la temperatura adiabática de la llama del quemador principal en función del exceso de aire. Por encima de una tasa de precalcificación aproximadamente de 15 al 20 %, la llama no está suficiente caliente para garantizar un clinkerización correcto, este es el principal inconveniente de esta técnica.

Las curvas de las figuras son establecidas para un carbón de PCI (poder calorífico inferior) de 31 MJ/kg.

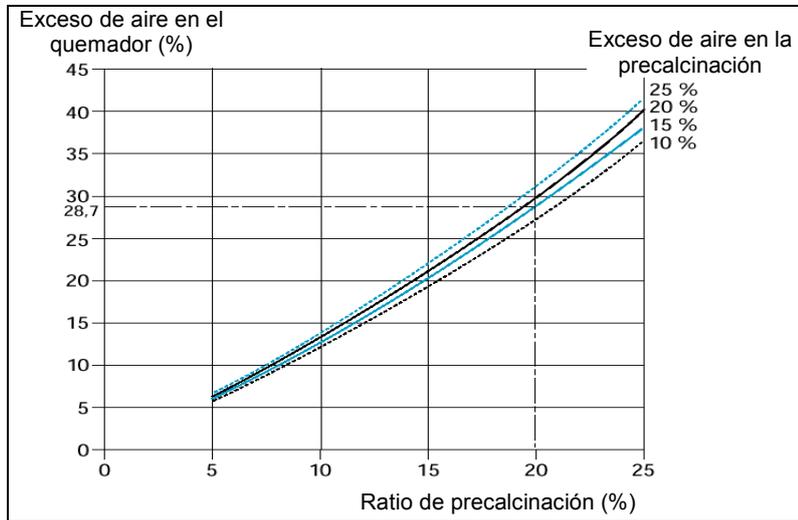
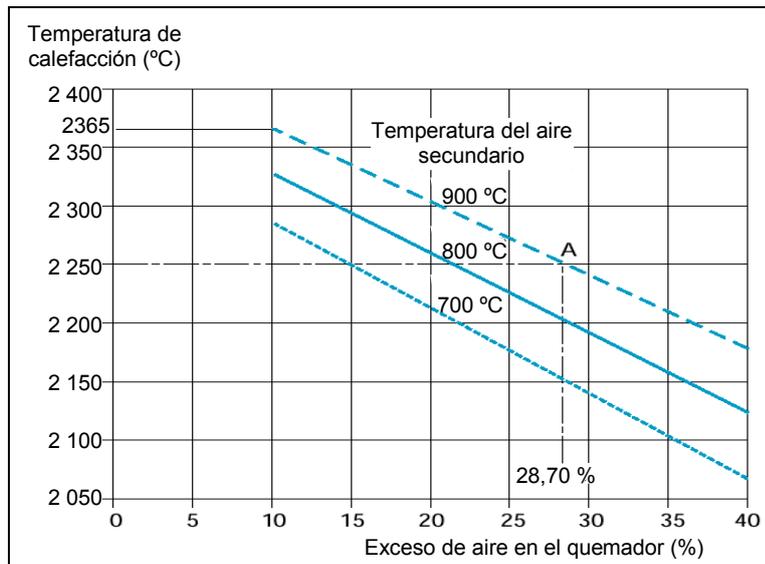


Figura 3.2.49. Relación entre el exceso del aire del quemador y el ratio de precalcificación.



Fuente: *Techniques de l'Ingénieur*

Figura 3.2.50. Relación entre la temperatura de la llama y el exceso de aire.

Este tipo de precalcificación no se prevé en el marco de nuevas instalaciones, pero se procede a su utilización en instalaciones existentes cuando el objetivo es:

- Realizar un pequeño aumento de la capacidad de producción sin una modificación importante;
- reducir la carga térmica en zona de cocción para una capacidad de producción igual.

Los humos de salida del horno se conducen a la precalcificación mediante un conducto vertical. Este conducto se puede alargar y modificar en forma de codo, de manera que se ofrece un tiempo

suficiente para garantizar la combustión. En la práctica, la combustión raramente se completa y se observa un contenido en CO de aproximadamente 0,1 a 0,2 %.

La producción volumétrica de los hornos de precalcinación sin aire terciario (o parcial) es por término medio $2,49 \text{ t/d} \cdot \text{m}^3$; siendo la carga térmica en la zona de cocción, por término medio, de $19,6 \text{ GJ/m}^2 \cdot \text{h}$.

Comparando estos datos con los del proceso en vía seca sin precalcinación, se pone de manifiesto que la precalcinación sin aire terciario o parcial aporta un aumento de producción específica del 20% aproximadamente, a costa de un aumento importante de la carga térmica, que pasa a ser del mismo orden de magnitud que la de la vía húmeda.

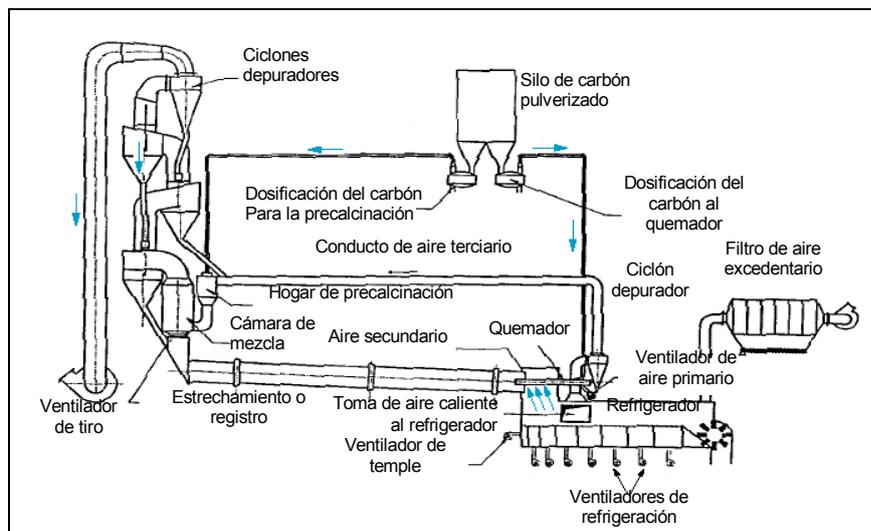
Precalcinación con aire terciario

En la precalcinación con aire terciario, el aire de combustión del hogar de precalcinación es entregado por un conducto independiente. Esto permite alcanzar niveles de precalcinación superiores al 20 %, pudiendo alcanzar hasta el 95 %. En la figura 3.2.51. se muestra un esquema del principio general. El sistema más completo incluye:

- Un hogar instalado en la parte baja del precalentador. El cual recibe el aire de combustión procedente del horno o del enfriador de clínker, por un conducto de aire terciario que bordea el horno. El aire terciario es depurado, eliminando el polvo, mediante un ciclón o una cámara de decantación.
- Una cámara de mezcla cuya función es mezclar los gases procedentes del horno rotatorio y los procedentes del hogar de precalcinación.
- Un estrechamiento o un registro cuyo objetivo es permitir el ajuste de las proporciones de gas.
- Dos sistemas de medida de combustible, uno para el quemador en la cabeza del horno, y otro para el precalcinador.

En este caso, precalcinación con aire terciario, desaparece el inconveniente principal del precalcinador sin aire terciario, puesto que el exceso de aire en el quemador es idéntico al de un horno sin precalcinación.

La producción volumétrica en los hornos dotados de precalcinación con aire terciario, es por término medio de $3,5 \text{ t/d} \cdot \text{m}^3$; siendo la carga térmica en zona de cocción de $16 \text{ GJ/m}^2 \cdot \text{h}$. Con relación a la vía seca sin precalcinación, el aumento de producción es por término medio de 2,1 mientras que la carga térmica en zona de cocción es aproximadamente del mismo nivel.



Fuente: *Techniques de l'Ingénieur*

Figura 3.2.51. Precalcinación con aire terciario.

Clasificación

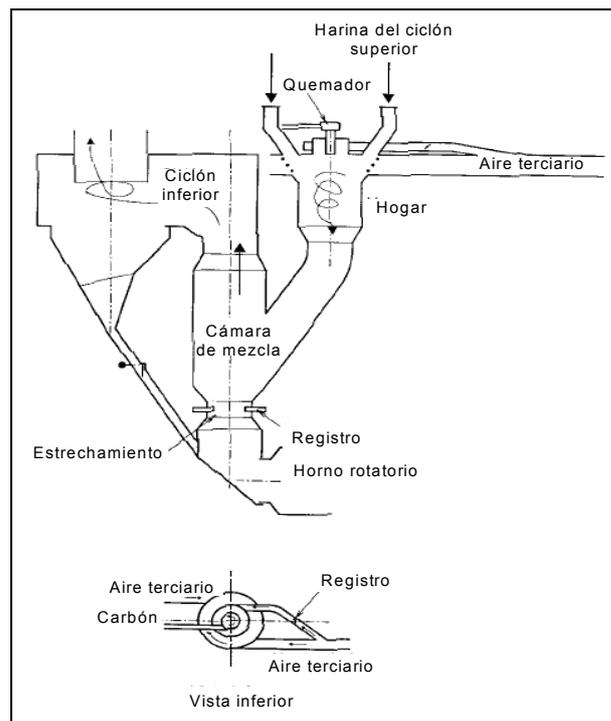
Los sistemas de precalcinación se pueden agrupar en tres clases:

- *Clase 1.* Agrupa los sistemas donde se pone en suspensión la materia en un conducto tubular, en el cual la materia y los gases entran en contacto. La longitud del conducto se adapta para obtener un tiempo de contacto suficiente. Esta agrupación representa los sistemas más simples y no presentan conducto de aire terciario.
- *Clase 2.* Agrupa los sistemas donde la suspensión de la materia no es lineal, sino acelerada en espiral, en un vórtice donde las turbulencias deben activar los intercambios. La mayoría de los sistemas propuestos pertenecen a esta clase.
- *Clase 3.* En esta clase, la materia permanece mucho más tiempo en el hogar de precalcinación. Está en proceso de desarrollo y presenta pocas realizaciones industriales.

Realizaciones industriales

Las ventajas innegables de la precalcinación condujeron a los proveedores a proponer una gran diversidad de soluciones tecnológicas industriales. Daremos algunos ejemplos a modo ilustrativo.

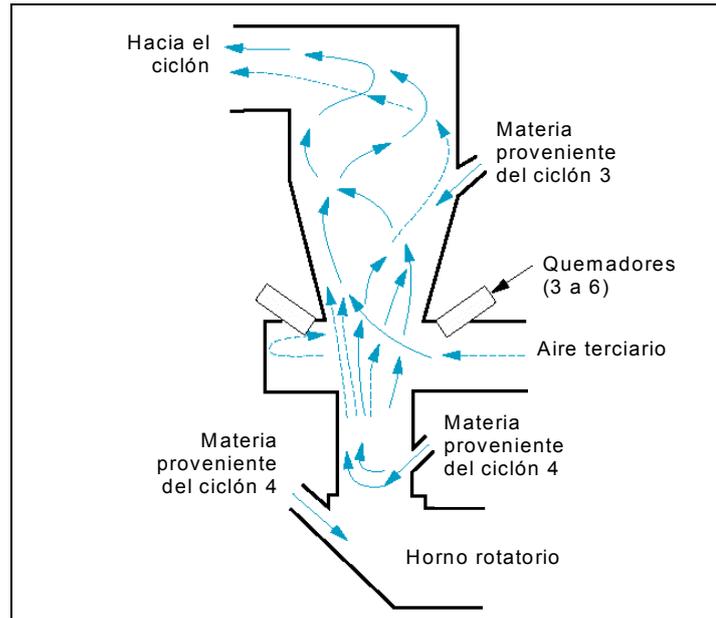
Sistema RSP (Reinforced Suspension Preheater), de Onoda Cement Co., fue la primera realización industrial, data de 1972 (Tahara, Japón). Este sistema, representado sobre la figura 3.2.52., implica un hogar, una cámara de mezcla, un estrechamiento, un registro; es de *Clase 2*.



Fuente: *Techniques de l'Ingénieur*

Figura 3.2.52. Sistema RSP.

Sistema NSF, de IHI Co., fue la primera realización industrial, data de 1971 (Chichibu, Japón). Se realizaron dos versiones sucesivas: SF y NSF (figura 4.2.53.). Se diferencian por la posición de los quemadores e introducción de la materia en el hogar y son de *Clase 2*.

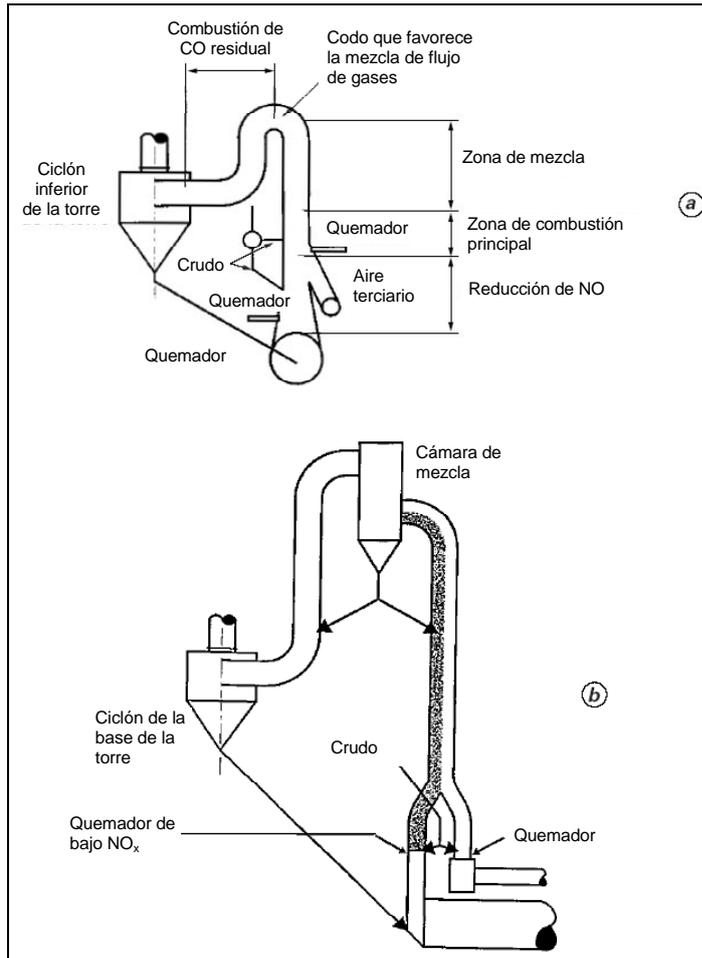


Fuente: *Techniques de l'Ingénieur*

Figura 3.2.53. Sistema NSF.

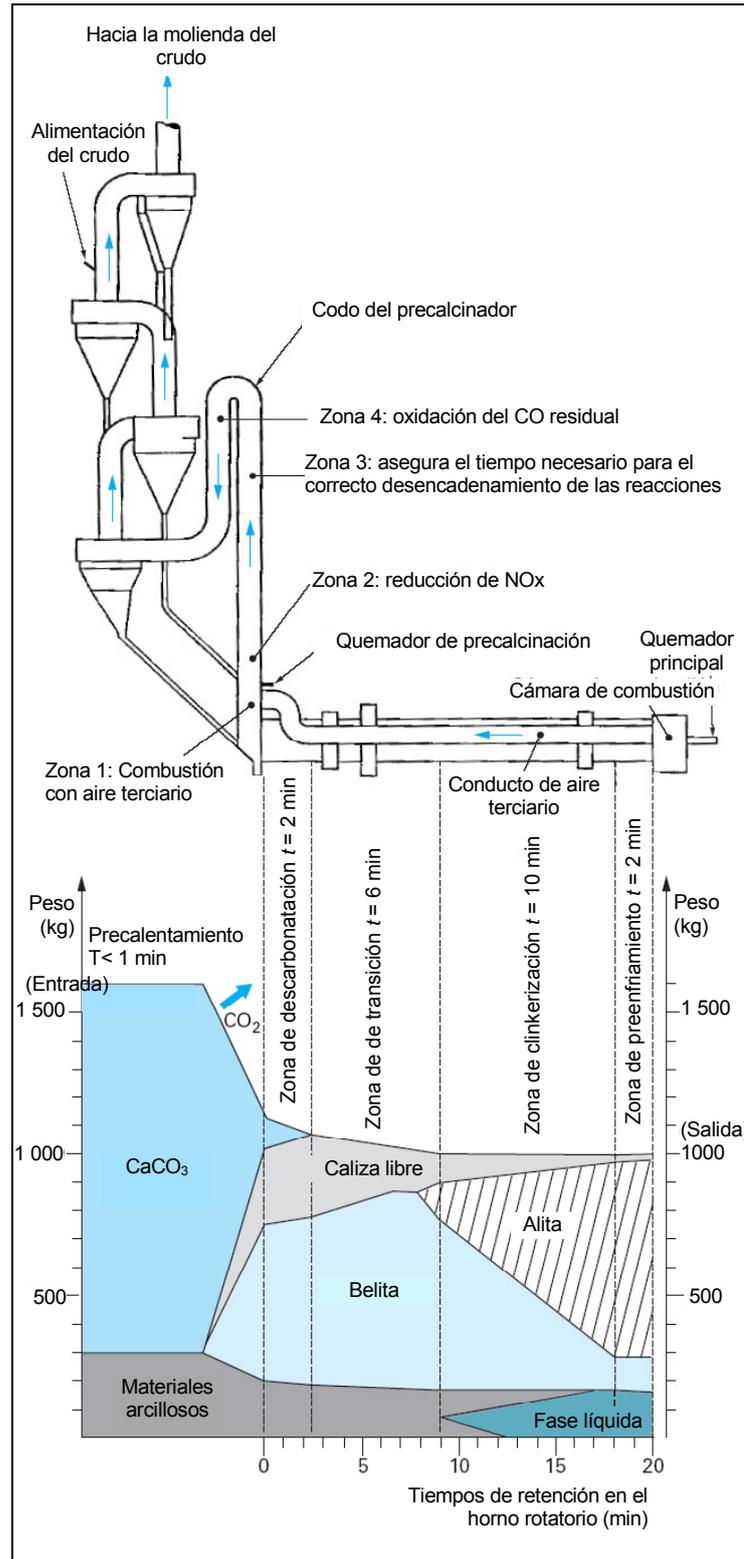
Sistema Pyroclon de KHD (Colonia, Alemania)

- Pyroclon S: El primer sistema Pyroclon S (Especial) usa la técnica de precalcinación sin aire terciario y es de *Clase 1*.
- Pyroclon R y RP: Los sistemas siguientes Pyroclon R (Regular) (figura 3.2.54.) y RP (Regular-Pyrorapid) utilizan o no los humos del horno en un conducto de precalcinación abastecido con aire terciario (*Clase 2*). Se instala una cámara de mezcla a la entrada y a salida de manera tangencial en la parte superior de la cámara de precalcinación. El precalcinator se divide en 4 secciones.
- Pyrorapid: Los sistemas de precalcinación R, RP y RP *low NOx* pueden asociarse a un horno rotatorio designado bajo el término de Pyrorapid (figura 3.2.55.).



Fuente: Techniques de l'Ingénieur

Figura 3.2.54. Sistema Pyroclon R.



Fuente: Techniques de l'Ingénieur

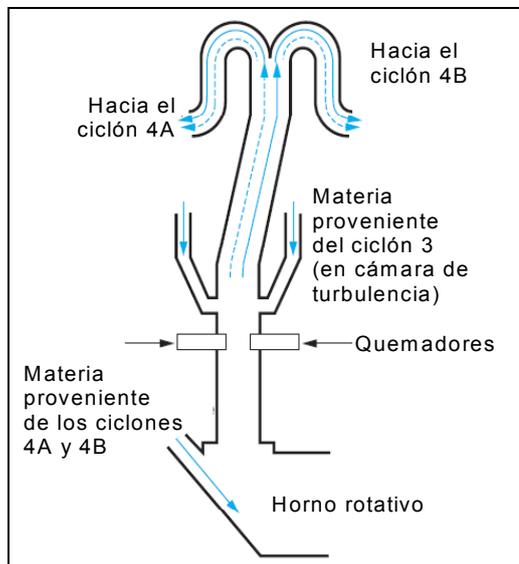
Figura 3.2.55. Sistema Pyroclon asociado a un horno Pyrorapid. Evolución del peso de las materias sólidas.

Sistemas Prepol de Polysius

- La precalcinación AT (Air Through) se hace sin aire terciario (Clase 1) en una envoltura rectangular que conecta el horno a los ciclones del nivel inferior. En este conducto, los humos

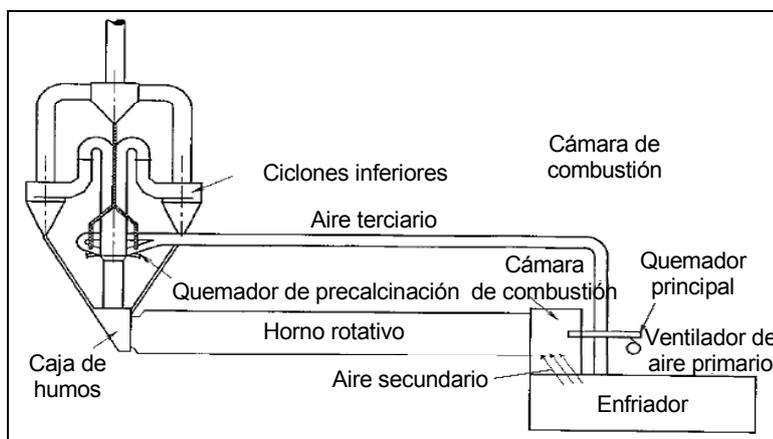
del horno encuentran la materia que viene de la cámara de turbulencias (nivel 3) a 700 °C aproximadamente y el combustible inyectado de cada lado (figura 3.2.56.).

- Precalcinador AS y AS-LC. El precalcinador AS (Air Separate) está constituido por un tubo vertical seguido de un codo superior antes de los ciclones inferiores del precalentador (figura 3.2.57.). La alternativa LC (low calories), - clase 1 - permite la combustión de un combustible de calidad mediocre, de escaso poder calorífico – con alto contenido en cenizas.
- Precalcinador AS- C.C. Este precalcinador AS- C.C. (Air Separate Low Calories, clase 2) incluye una cámara de combustión y una cámara de mezcla. Está representado en la figura 3.2.58.
- Precalcinador AS- MSC Este sistema, cuyas iniciales significan a "Multi Stage Calciner", se estudió con vistas a obtener una reducción de las emisiones de NOx. Su principio es una combustión gradual (figura 3.2.59.).
- Los sistemas AS (Clase 2) ofrecen la posibilidad de instalar una inyección de amoníaco si es necesario ir más lejos en la reducción de NOx. Ofrecen, en efecto, un rango de temperatura que permite esta inyección en el marco del método SNCR (Reducción Selectiva No Catalítica).



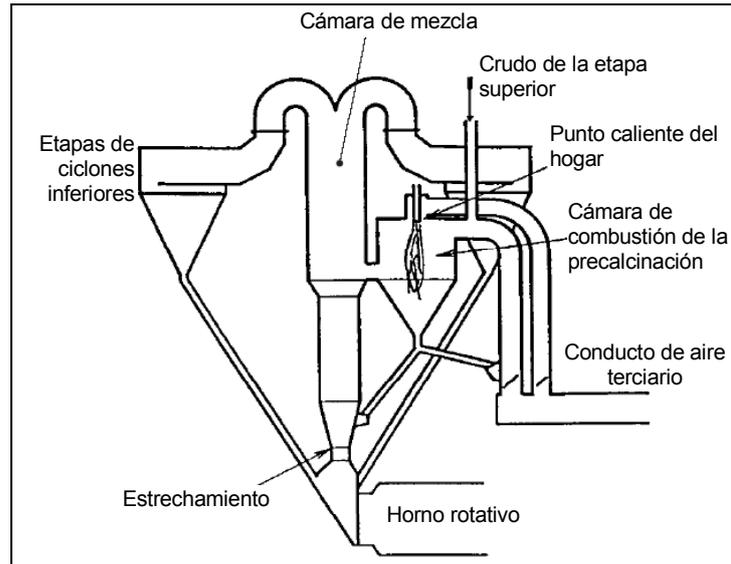
Fuente: *Techniques de l'Ingénieur*

Figura 3.2.56. Sistema Prepol AT.



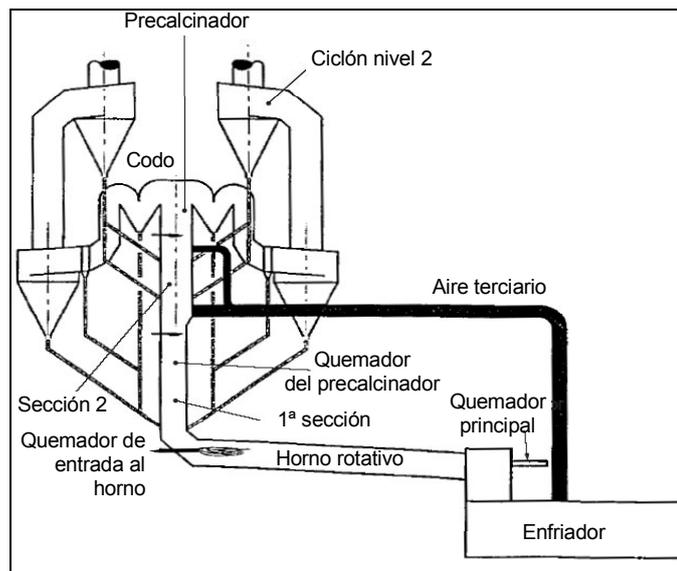
Fuente: *Techniques de l'Ingénieur*

Figura 3.2.57. Sistema Prepol AS.



Fuente: *Techniques de l'Ingénieur*

Figura 3.2.58. Sistema Prepol AS-CC.



Fuente: *Techniques de l'Ingénieur*

Figura 3.2.59. Sistema Prepol AS-MS-C.

Sistema FCB Ciments français.

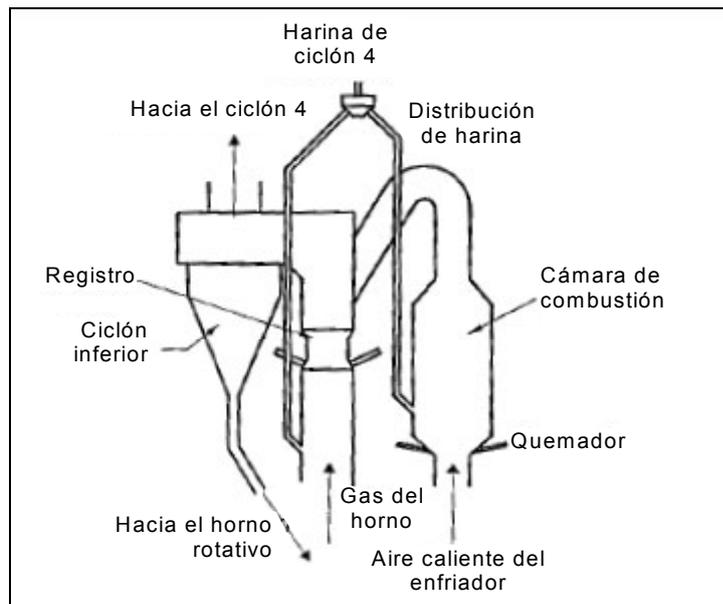
En el hogar de este precalcinador de *Five Coil Babcock (FCB)*, de Clase 2, no hay puesta en rotación de los flujos.

Sistemas FL Smidth

Las primeras evoluciones datan de 1974. La empresa danesa propone los sistemas siguientes (de clase 2):

- El sistema ILC (In line calciner). Este sistema se emplea con una vuelta simple. El precalcinador está en el tubo vertical del horno rotatorio. El fabricante preconiza este sistema para producciones que van de 1.500 a 4.000 t/d. El cociente de precalcación admitido es de 55 al 65 % y puede utilizar le permite un trasiego de gas de hasta 100 %.

- El sistema SLC-S (Separate line calciner special). Este montaje, similar al precedente (figura 3.2.60.), se utiliza con una vuelta simple o doble. La cámara de combustión se sitúa en paralelo al el tubo vertical del horno. Este montaje se recomienda para una producción de 1.500 a 5.500 t/d, siendo el porcentaje de precalcinación de 55 al 60 %.
- El sistema SLC (Separate line calciner). El dispositivo SLC se adapta al sistema de los precalentadores de doble línea de ciclones. Se coloca al precalcinador en paralelo con el tubo vertical del horno rotatorio. Como el sistema anterior, la combustión tiene lugar en aire puro y caliente. La recomendación del fabricante es:
 - Producción: a partir de 3.000 t/d;
 - cociente de precalcinación: de 55 al 65 %;
 - desviación posible: hasta 30 %.

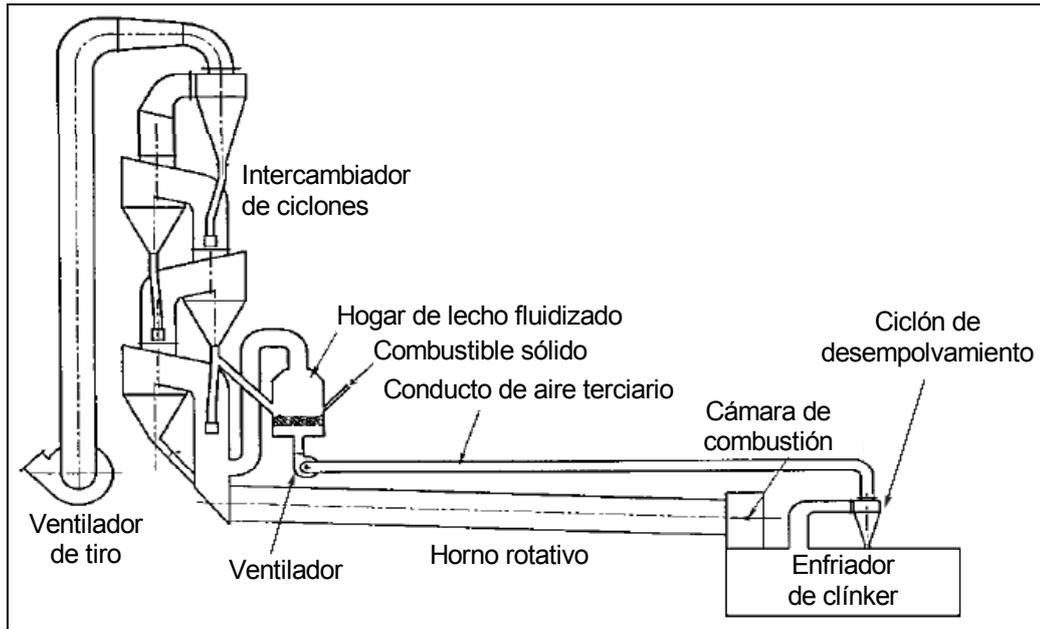


Fuente: Techniques de l'Ingénieur

Figura 3.2.60. Sistema SLC.

Sistema MFC de Mitsubishi

La primera evolución industrial data de 1972. La empresa japonesa concibió un hogar de precalcinación que funcionaba en lecho fluidificado. Dos tipos MFCa "carry-over" y MFCb "over flow", son poco diferentes. Para ilustrar, la figura 3.2.61. muestra el primer tipo. La utilización de un lecho fluidificado permite teóricamente el empleo de combustibles de baja calidad. A pesar de esta ventaja, este tipo de hogar no ha tenido difusión en los países de Plan de Acción para el Mediterráneo.



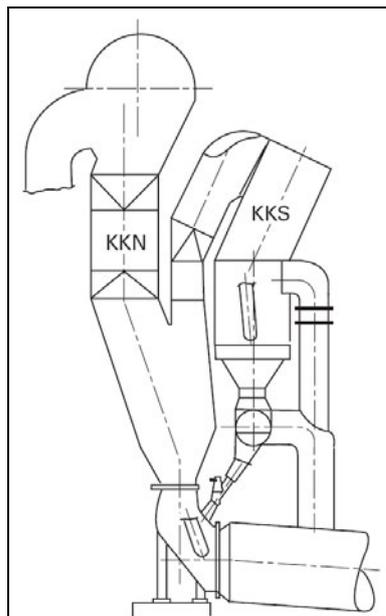
Fuente: *Techniques de l'Ingénieur*

Figura 3.2.61. Sistema MFC de Mitsubishi.

Precalcinador Prerov

El precalcinador Prerov (figura 3.2.62.) incluye dos partes:

- El precalcinador (KKS) propiamente dicho, el cual en la parte inferior, se introducen la harina de los ciclones N-1 y el combustible.
- La cámara de postcombustión (KKN) de amplia sección y dotada de un codo, garantiza un tiempo de estancia de varios segundos al carbón sin quemar y la harina que viene del precalcinador (KKS). Los humos del precalcinador y el horno se mezclan antes de entrar en el nivel de ciclón inferior N.



Fuente: *Techniques de l'Ingénieur*

Figura 3.2.62. Precalcinador Prerov.

3.2.4.4. Hornos verticales

Los primeros hornos empleados fueron hornos verticales intermitentes, similares a los de la cocción de la cal, en los que la materia prima se cargaba en forma de briquetas, mezclada con el combustible. Su uso en los Países del Plan de Acción para el Mediterráneo ha quedado reducido a unos pocos hornos, puesto que el clínker resultante de un horno rotatorio es de superior calidad y más regular en sus características, además de tener una producción mayor, lo que motiva que el horno rotativo sea actualmente el procedimiento más empleado, a pesar de su mayor coste y el requerimiento de instalaciones más complejas y de mayor envergadura. En la actualidad el uso de los hornos verticales queda reducido prácticamente a países en vías de desarrollo como China (80 % de su capacidad) e India.

Los hornos de este tipo constan de un cilindro vertical de 2 a 3 metros de diámetro y de 8 a 10 metros de altura, forrado de refractario.

El crudo, una vez homogeneizado, se mezcla con el combustible en las debidas proporciones y se lleva a un mezclador que vierte en un plato granulador, donde se le añade al polvo molido una pequeña cantidad de agua. Por efecto de la rotación del plato granulador, el crudo queda en forma de gránulos. Estos gránulos se dejan caer sobre la parte alta del horno, donde se distribuyen regularmente por su superficie por medio de una tolva giratoria. La parte superior del horno es cónica para mantener el grado de compacidad por el efecto de retracción de los granos al secarse, ya que al perder éstos humedad ocupan un menor volumen. A medida que van bajando estos gránulos por la cuba del horno se realizan las fases de secado de los gránulos, precalentamiento, calcinación, clinkerización y enfriamiento. Así, por tanto, el material durante la cocción atraviesa primeramente una zona corta de sinterización en la parte superior del horno, zona que está ligeramente ensanchada. Se enfría luego por el aire de combustión inyectado desde la parte inferior y cae por la parte más baja del final del horno sobre una parrilla, ya en la forma de clínker. Los hornos verticales producen menos de 300 t /día de clínker. Sólo son económicos para las pequeñas fábricas, por esa razón ha disminuido su número.

En teoría, los hornos verticales pueden alcanzar la eficiencia energética de los hornos rotatorios, pero en la práctica su consumo energético varía entre 3,7 GJ/t y 6,6 GJ/t.

3.2.4.5. Enfriadores de clínker

El enfriador de clínker es una parte integral del sistema del horno y tiene una decisiva influencia en el desarrollo y economía del rendimiento energético de la planta.

El enfriador tiene dos tareas: recuperar el calor del clínker caliente tanto como sea posible (el clínker sale del horno alrededor de los 1.450 °C) para devolverlo al proceso; y reducir la temperatura del clínker a un nivel apto para su manipulación posterior.

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

Los enfriamientos rápidos son beneficiosos para el clínker, mejorando su molturabilidad y optimizando la reactividad del cemento.

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

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

En los años setenta dominaba el enfriador planetario o de satélites sobre el enfriador de parrilla por razones de fiabilidad, de coste de mantenimiento, de simplicidad de operación y de coste de inversión (ausencia de eliminación de polvo). No obstante surgieron una serie de circunstancias:

- Resultados pobres para los enfriadores planetarios en hornos de grandes dimensiones (4.000 t/d).
- Mejoras decisivas en la tecnología de los enfriadores de parrilla.
- La necesidad de producir el aire terciario a 800-900 °C para el precalcinador, que el enfriador planetario era incapaz de proporcionar.

Estas circunstancias motivaron un cambio de filosofía de la tecnología, pasando a dominar los enfriadores de parrilla. Además, la inversión de la tendencia se produjo debido a los siguientes motivos:

- Una nueva oportunidad técnico-económica.
- Una modificación en la tecnología de las placas de los enfriadores de parrilla convencionales.
- Los nuevos enfriadores de parrilla eran los únicos que permitían el aumento de las capacidades de producción.

Enfriadores rotatorios (tubular)

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

El caudal del flujo de aire de enfriamiento se determina en función del aire requerido para la combustión del combustible. En el rendimiento del enfriador intervienen, la velocidad de paso y el diseño interno del mismo. El diseño de los volteadores debe tener en cuenta el intercambio de calor y controlar el ciclo de retorno del polvo hacia el horno. No hay efecto de temple en este tipo de enfriador, al igual que en el enfriador planetario como se verá en el siguiente apartado.

Este tipo de enfriadores es bastante simple mecánicamente (figura 3.2.63.), no obstante, presenta dos dificultades de proceso si se utiliza sobre hornos de gran capacidad:

- La formación de acumulaciones en la caída del clínker en la parte de la entrada.
- La fluctuación de la velocidad del aire en la zona equipada de elevadores.

El primero de estos problemas puede solucionarse mediante un sistema automático de limpieza, y el segundo problema puede solucionarse aumentando el diámetro del tubo.

El tubo, cuya relación longitud/diámetro es aproximadamente de 10 a 1, gira a una velocidad comprendida entre 2,5 y 3,0 rpm.

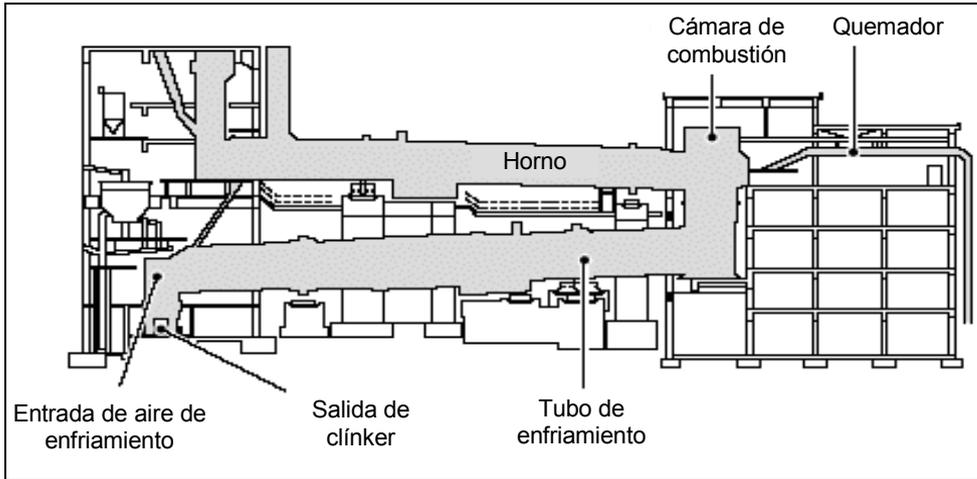
El equipamiento interior del tubo (figura 3.2.64.) está formado por hormigón o ladrillos refractarios en un 60 % de su longitud

Las principales dimensiones para un enfriador rotatorio se dan en la tabla 3.2.7.

Tabla 3.2.7. Características dimensionales teóricas de los enfriadores rotatorios

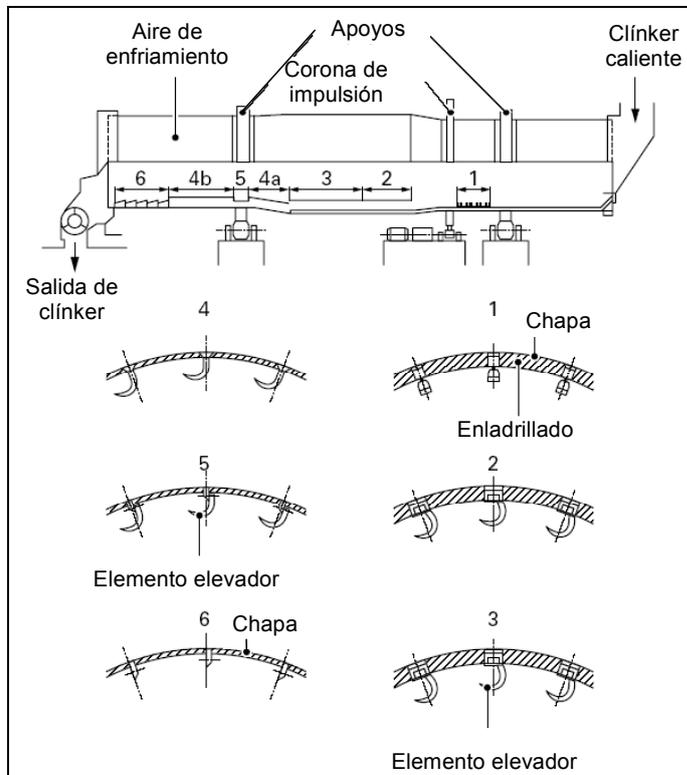
Características	Producción	
	2.300 t/d	3.200 t/d
Diámetro (m)	4,4-4,8	5,2-5,6
Longitud (m)	46	54

Fuente: Techniques de l'Ingénieur



Fuente: Techniques de l'Ingénieur

Figura 3.2.63. Enfriador rotatorio o tubular.



Fuente: Techniques de l'Ingénieur

Figura 3.2.64. Enfriador tubular. Dispositivos interiores de elevación del clínker.

Enfriador planetario (o de satélites)

El enfriador planetario, o de satélites (figura 3.2.65. y 3.2.66.), consta de varios tubos, típicamente de 9 a 11, fijados al horno rotativo en el extremo de la descarga.

Los enfriadores van unidos al horno a lo largo de una circunferencia perimetral, y el material pasa a ellos a través de unas aberturas situadas en el horno. La cantidad de aire de enfriamiento se determina por el aire requerido para la combustión del combustible. El aire entra en cada uno de los tubos desde el extremo de la descarga, permitiendo el intercambio de calor en contracorriente. Al igual que en el enfriador tubular, los dispositivos internos para el volteo y dispersión del clínker son esenciales.

Cada tubo, cuya relación longitud/diámetro es aproximadamente de 10 para 1, se sujeta entre 2 apoyos, unos de los cuales es fijo y otro deslizante, éste último en la parte de la salida de clínker. El recubrimiento interior de los tubos está formado por hormigón o ladrillos refractarios en un 20% de su longitud a partir de la brida de empalme al tubo, y el resto, de cucharones y elevadores para mejorar el intercambio térmico.

Este tipo de enfriador no presenta ningún parámetro operativo variable. El alto desgaste y el choque térmico, en conjunción con los ciclos de polvo dentro de los tubos, origina que el clínker salga con altas temperaturas por lo que el ratio de recuperación de calor es bajo. La temperatura de salida del clínker sólo puede reducirse adicionalmente por inyección de agua dentro de los tubos del enfriador o sobre la carcasa de los mismos.

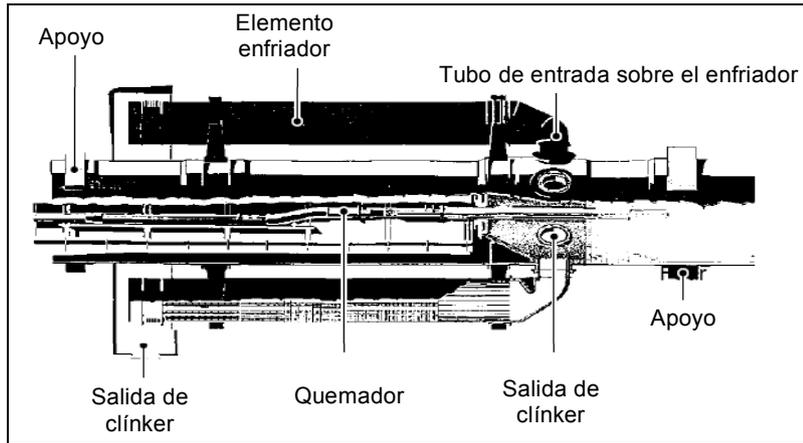
El enfriador planetario no es apto para implantar una precalcinación, puesto que con este sistema es prácticamente imposible extraer aire terciario. Sin embargo, es posible instalar un quemador auxiliar en la parte de entrada al horno, en la parte baja de la torre de precalentamiento. En este quemador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

La integración de un enfriador de satélites en una línea de cocción aporta numerosas simplificaciones tanto a nivel mecánico como a nivel de operación, siempre que la capacidad del horno permanezca en valores medios (< 2.500 t/d).

La ventaja más notoria es la ausencia de aire excedente; eso conduce a la supresión de todos los dispositivos de depuración que son necesarios en el caso de los enfriadores de parrilla.

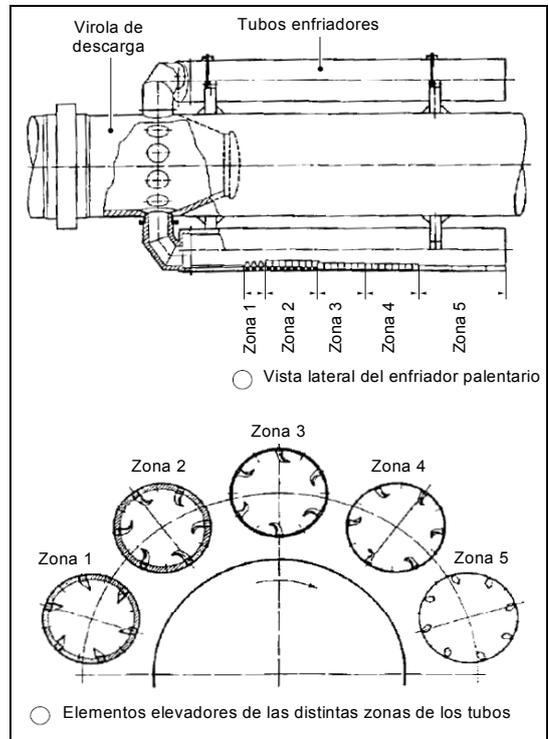
En cambio, existe algunos inconvenientes, como:

- El elevado coste de mantenimiento y la falta de fiabilidad, más allá de 2.000 a 2.500 t/d;
- el fuerte ruido vinculado a la caída del clínker en las partes equipadas de elevadores;
- la imposibilidad de aumento de producción más allá del nominal;
- la elevada temperatura (150 a 300 °C) del clínker a la salida;
- la ausencia del efecto de temple del clínker;
- la tendencia a alejar la cocción de la entrada, para evitar acumulaciones y dificultades en los tubos, pero creando cristales menos reactivos;
- el rendimiento medio (55 al 65 %) es menor cuanto más alejado esté el enfriador de la zona de cocción;
- el inconveniente principal reside en la imposibilidad de proporcionar el aire terciario necesario para el precalcificador, etapa que se ha generalizado sobre todos los nuevos hornos.



Fuente: Techniques de l'Ingénieur

Figura 3.2.65. Enfriador Planetario o de satélites.



Fuente: Techniques de l'Ingénieur

Figura 3.2.66. Ubicación de los enfriadores.

Enfriadores de parrilla

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

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

Enfriadores de parrilla deslizante

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

Enfriadores de parrilla de vaivén, convencionales

El transporte del clínker en el enfriador de parrilla de vaivén se efectúa por el empuje progresivo sobre el lecho del clínker de los bordes de ataque de las filas alternadas de placas. El movimiento relativo de los bordes de ataque se genera mediante accionamientos hidráulicos o mecánicos (cigüeñal) conectados a cada segunda fila. El clínker se desplaza desde el final de alimentación al final de descarga, pero la parrilla es fija (figura 3.2.67. y 3.2.68.).

Las placas de la parrilla se fabrican en acero moldeado resistente al calor y son básicamente de 300 mm de ancho. Cada placa va taladrada para permitir el paso del aire a través de ella.

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

- Zona de recuperación. El aire de enfriamiento caliente producido en esa zona se emplea para la combustión en el quemador principal (aire secundario) y en el precalcinador (aire terciario);
- zona de enfriamiento posterior, donde el aire de enfriamiento adicional enfría el clínker a temperaturas más bajas.

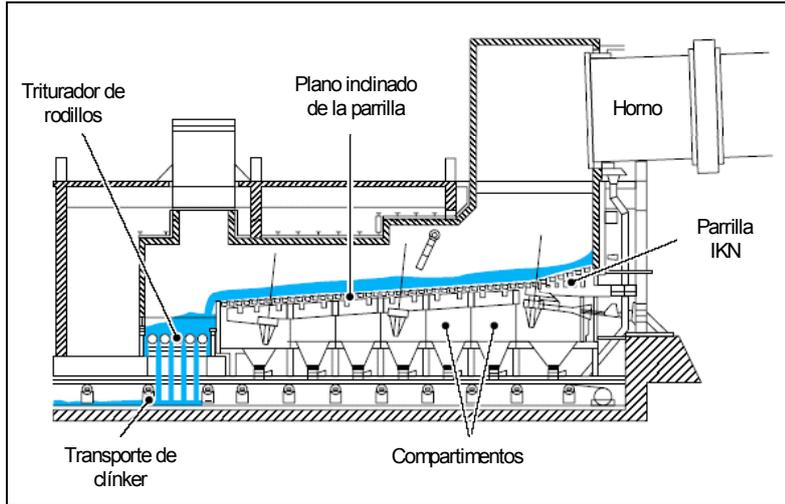
Las unidades más grandes en funcionamiento tienen una superficie activa de unos 280 m² y capacidad de enfriamiento de 10.000 t/día de clínker. Los problemas característicos de estos enfriadores son la segregación y distribución desigual del clínker, conduciendo al desequilibrio aire-clínker, fluidificación del clínker fino, incrustaciones, y una baja duración de las placas.

Enfriadores de parrilla de vaivén, modernos

La introducción y desarrollo de la tecnología moderna de los enfriadores de parrilla de vaivén comenzó alrededor de 1983 (figura 3.2.69.). El diseño proponía eliminar los problemas de los enfriadores convencionales obteniendo un intercambio térmico más cercano al óptimo y también enfriadores más compactos empleando menos aire de enfriamiento y sistemas de desempolvado más pequeños.

Los enfriadores de parrilla de vaivén modernos cubren una gama de producción de 1.900 t/d a 9.100 t/d. Las características clave de esta tecnología son (dependiendo del suministrador):

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



Fuente: *Techniques de l'Ingénieur*

Figura 3.2.67. Enfriador de parrilla de vaivén, convencional inclinado.

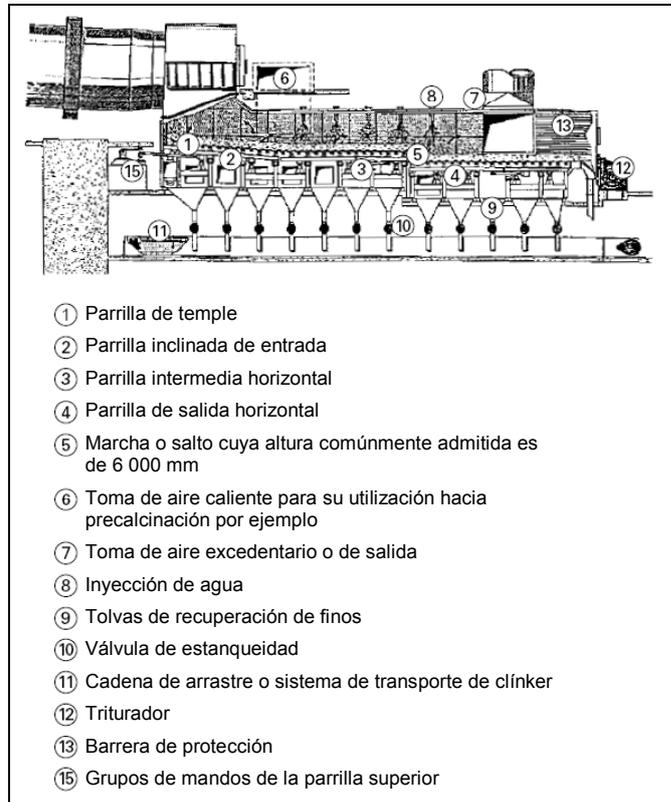
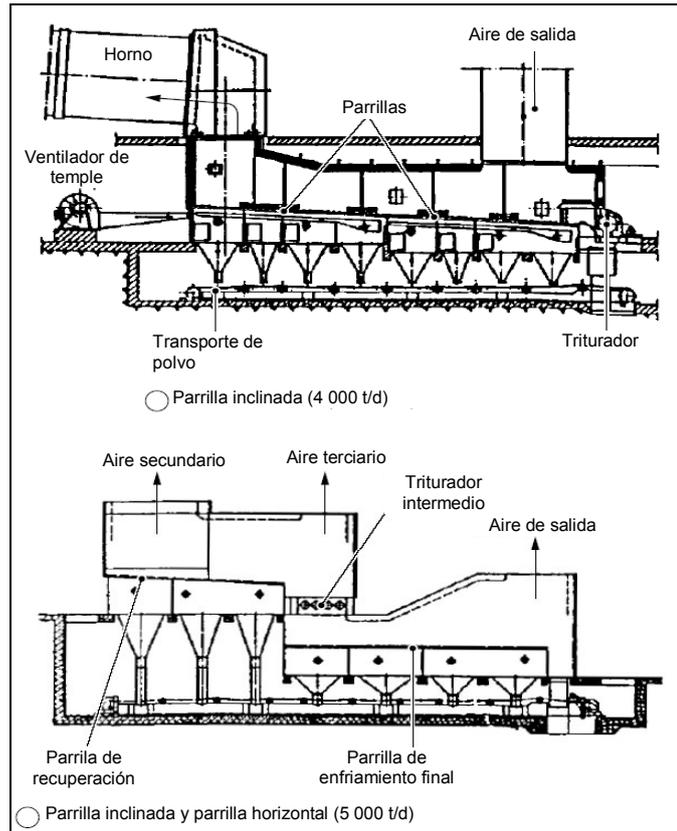


Figura 3.2.68. Corte longitudinal de un enfriador de parrilla de vaivén, convencional.



Fuente: *Techniques de l'Ingénieur*

Figura 3.2.69. Enfriadores de parrilla de vaivén, moderno.

Otros enfriadores (verticales)

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

Comparación de enfriadores de clínker

Para los tres tipos de principales de enfriadores (de parrilla, de satélites y rotatorio), la tabla 3.2.8. se compara los siguientes términos:

- Condiciones de explotación;
- costes de explotación;
- proceso;
- coste de inversión.

Los rangos mostrados, con respecto a los costes de mantenimiento, son muy extensos. En efecto, para el enfriador de parrilla, según sea de concepción antigua, o reciente, los costes directos pueden variar del base, al doble; los costes indirectos (vinculados a la falta de fiabilidad) pueden ser también muy variables. Para el enfriador planetario, las condiciones de explotación tienen una gran importancia; un enfriador de satélites sobrecargado (de 15 a 20 %) más allá de su capacidad nominal verá su estabilidad muy reducida y podrá tener elevados costes directos e indirectos de mantenimiento.

Tabla 3.2.8. Comparación de los tres tipos de enfriadores.

Elementos de comparación		Enfriadores de parrilla	Enfriadores planetarios	Enfriadores rotatorios
Condiciones de explotación	Capacidad de producción (t/día)	de 0 a 10000	de 0 a 2000	de 0 a 2000
	Emisión de polvo a través del aire excedentario	Posible	Nula	Nula
	Ruido	Bajo	Alto	Alto
Costes de explotación	Rendimiento (%)	de 65 a 85	de 55 a 65	de 55 a 70
	Consumo eléctrico (kWh/t de clínker)	de 6 a 8	de 2 a 3	de 2 a 3
	Mantenimiento	de 3 a 6	de 3 a 5	de 2 a 4
Proceso	Flexibilidad de capacidad	sí	no	no
	Calidad del clínker (temple)	sí	no	no
	Recuperación del calor del gas (otros equipos)	Posible	Realización limitada	Realización limitada
	Recuperación del calor del gas de precalcinación	Posible	Imposible	Posible
Inversión	Costes de inversión	1	0,6	

Fuente: *Techniques de l'ingénieur, Fuors de cimentiere*

3.2.5. Molienda y almacenamiento del cemento

En esta etapa el clínker se mezcla con el regulador de fraguado (yeso) y con las posibles adiciones (escorias de alto horno, humo de sílice, puzolana, caliza, cenizas volantes, etc.) y se introduce en los molinos para su molienda. Una vez alcanzada la finura deseada, el producto que obtenemos finalmente es el cemento. La proporción de cada componente depende del tipo concreto de cemento fabricado.

3.2.5.1. Almacenamiento del clínker

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

Los sistemas de almacenamiento de clínker más comunes son:

- Depósito longitudinal con descarga por gravedad (figura 3.2.70.).
- Depósito circular con descarga por gravedad (figura 3.2.71.).
- Silo de almacenamiento de clínker (figura 3.2.72.).
- Silos esféricos tipo domo (figura 3.2.73.).

MÉTODOS DE ALMACENAMIENTO DE CLÍNKER

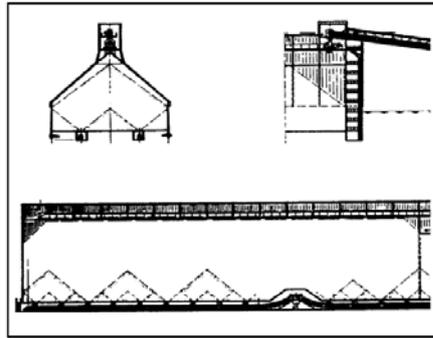


Figura 3.2.70. Almacenamiento longitudinal con descarga por gravedad.

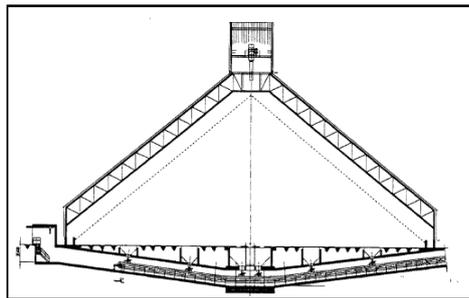


Figura 3.2.71. Almacenamiento circular con descarga por gravedad.

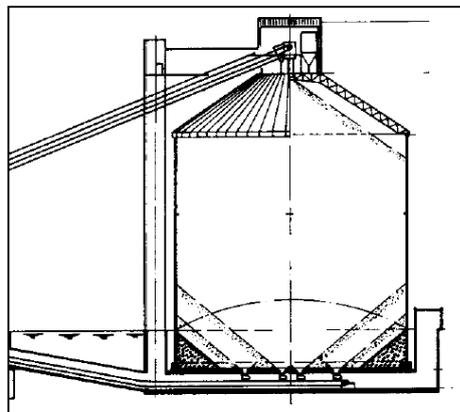


Figura 3.2.72. Silo de almacenamiento de clínker.

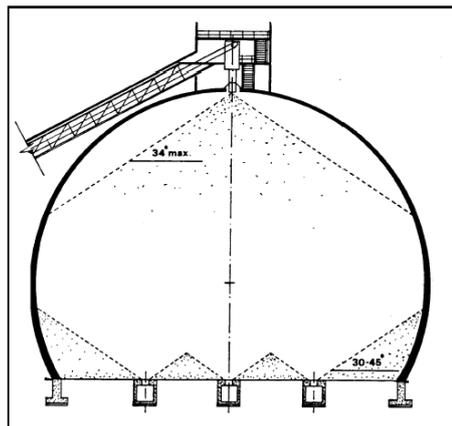


Figura 3.2.73. Silo esférico tipo domo.

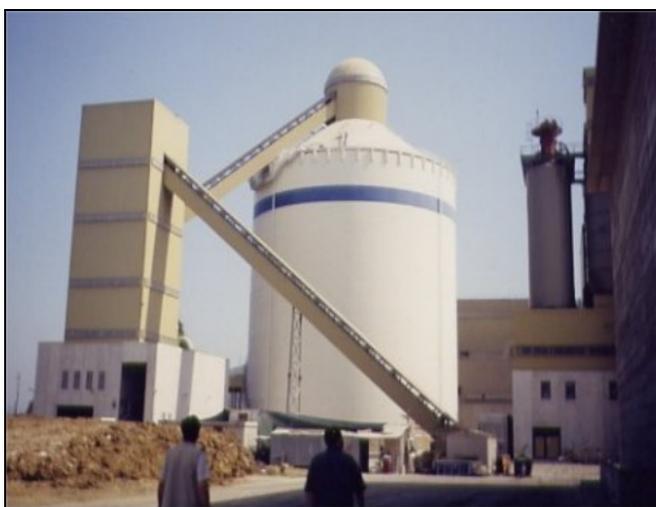


Figura 3.2.74. Silo de clínker.

Los distintos componentes se almacenan en zonas separadas, se dosifican por medio de básculas y se añaden de manera conjunta y continuada al molino de cemento.

3.2.5.2. Molino de cemento

En el proceso de molienda (figura 3.2.75.), los componentes se muelen, se entremezclan íntimamente y el material se hace pasar por separadores (los componentes adicionados se pueden moler junto con el clínker o pueden necesitar secarse y molerse por separado). Si el cemento posee las características físico-químicas necesarias se almacena en silos estancos; en caso contrario, se reenvía al molino para continuar su molienda.

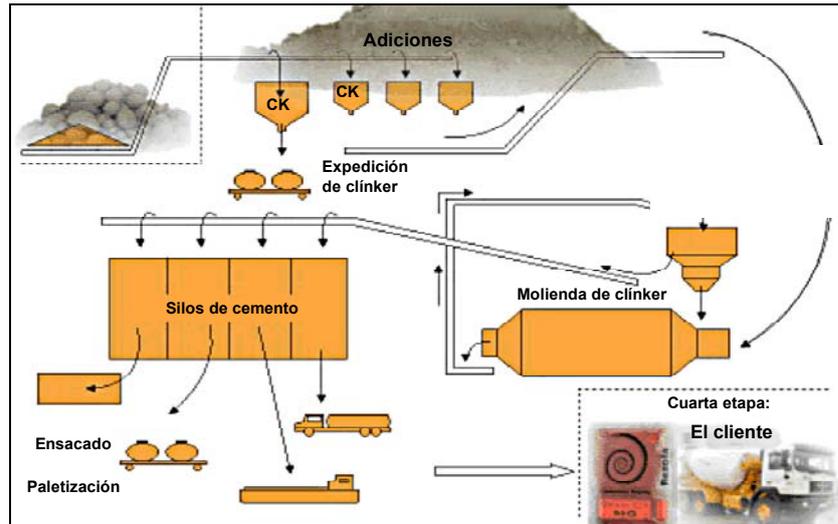


Figura 3.2.75. Proceso de molienda de clínker para la obtención del cemento.

Las plantas de molienda pueden estar en ubicaciones separadas de las plantas de producción de clínker. El tipo de molienda del cemento y el diseño de la instalación, dependen del tipo de cemento que se vaya a producir. Tienen gran importancia la molturabilidad, la humedad y la abrasión de los componentes del cemento producido.

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

Pesaje y dosificación de la alimentación del molino

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

Molienda de clínker

Debido a la gran variedad de tipos de cemento requeridos por el mercado, hoy en día se tiende a los sistemas de molienda de última generación equipados con separador dinámico de aire.

Los sistemas de molienda más comúnmente empleados son:

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

Otros sistemas de molienda son:

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

El principio de trabajo de los molinos verticales de rodillos se basa en la acción de 2 a 4 rodillos moledores, soportados en brazos articulados y montados sobre una mesa horizontal de molienda o

pista de rodadura. Está especialmente indicado para el molido y secado simultáneo de materias primas para cemento o escoria, debido a que los molinos verticales de rodillos pueden manejar contenidos relativamente altos de humedad en la alimentación del molino. El tiempo de permanencia del material en el molino es bastante corto para prevenir la prehidratación del clínker, por ejemplo en el caso de molienda de cemento con escorias.

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



Figura 3.2.76. Molienda de cemento. Cementera de Holcim España.

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

Molienda de adiciones

Los materiales susceptibles de ser empleados como componentes en la molienda de cemento (como adiciones al clínker) tienen características que mejoran sus propiedades, tales como la trabajabilidad, retención de agua, durabilidad, resistencia mecánica, resistencia a sulfatos, resistencia al hielo, etc. Estos materiales pueden ser naturales o provenir de subproductos de otros procesos industriales tales como:

- Puzolanas industriales.
- Cenizas volantes de central térmica.
- Escoria de horno alto.
- Humo de sílice de la industria de ferroaleaciones.
- Esquistos calcinados.
- Sulfato de calcio proveniente de la desulfuración de gases industriales.

Las adiciones, compuestos minerales de carácter natural o industrial, se muelen generalmente junto con el clinker y el yeso.

La decisión de moler las adiciones separadamente depende básicamente de los siguientes factores:

- El porcentaje de adiciones en el producto final y en el total de la producción de cemento.
- Si se dispone de una molienda de repuesto.
- Si hay una considerable diferencia entre la molturabilidad del clinker y las adiciones.
- El contenido de humedad de las adiciones.

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

Sistemas de molienda combinada

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

Frecuentemente es necesario un sistema separado de aire-calefacción para mantener la sequedad, especialmente en caso de que la escoria tenga un contenido de humedad más alto y evitar las pérdidas de calidad causadas por la prehidratación en el molino.

En el caso de la producción de cemento portland compuesto y de cemento de alto horno, la instalación de molienda opera en circuito cerrado con un separador de aire. En general, la molienda en circuito abierto se utiliza principalmente para la producción del cemento portland con una fineza de menos de 3500 cm^2/g .

Sistemas de molienda separada

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

Durante la molienda simultánea de varios componentes principales, la distribución del tamaño de partícula del cemento depende de la capacidad de los componentes individuales a ser molidos y la clase y duración de la molienda.

Los procesos de molienda de dos etapas son caracterizados por una combinación de dos etapas de molienda que muelen configuradas de diferente manera. Este sistema ofrece la posibilidad de molienda y secado de componentes húmedos como la escoria. Además, uno de los componentes puede ser pre-molido en la primera etapa hasta la distribución requerida de tamaño de partícula optimizada para la segunda etapa.

Una posible configuración se caracteriza por la molienda por separado de los componentes principales, almacenaje de los componentes finos, y una etapa de mezcla la cual permita la producción de un cemento acabado con diferentes formulaciones requeridas, reactividades, fineza, distribución de tamaño, etc.

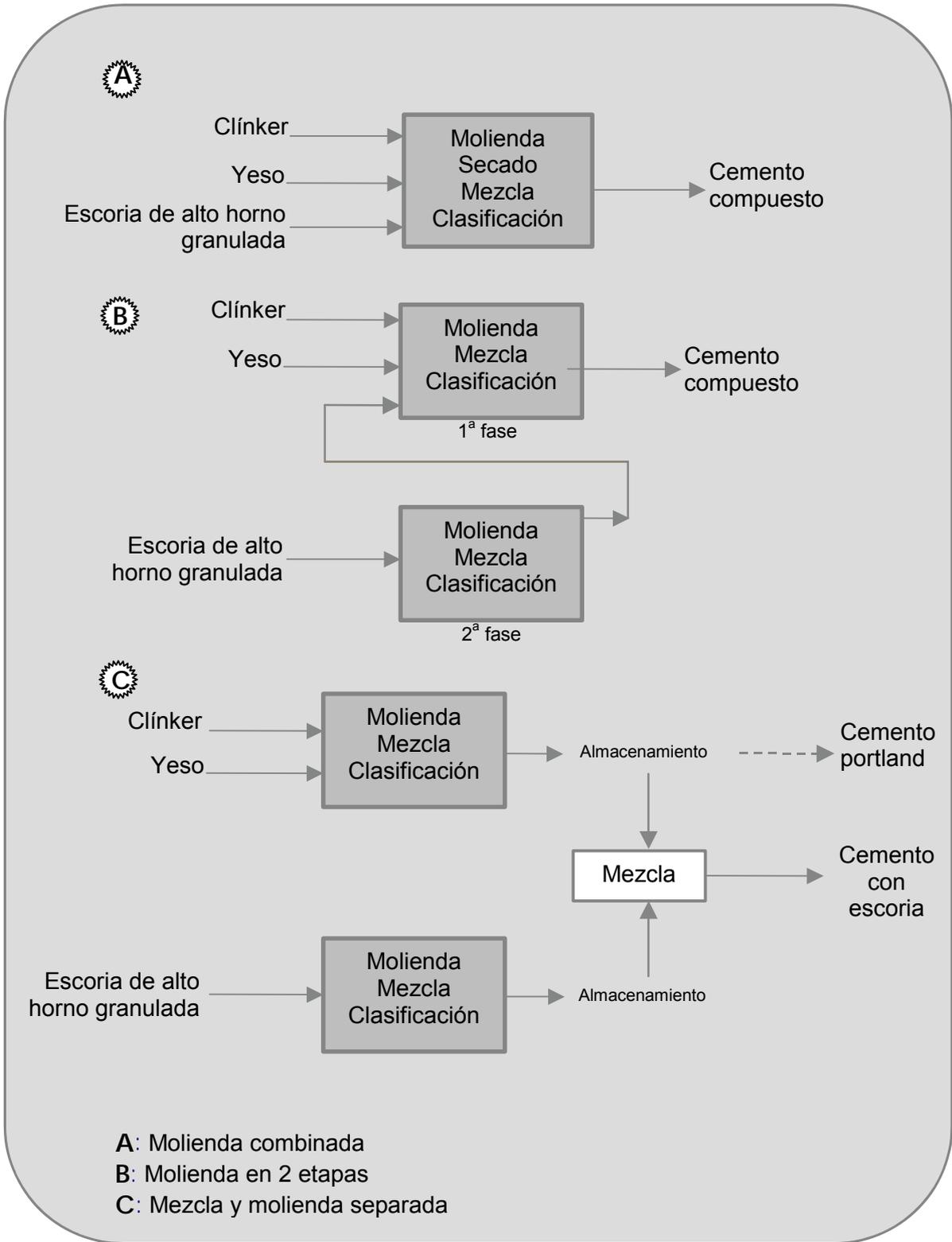


Figura 3.2.77. Principales procesos tecnológicos en la molienda del cemento.

Separación por distribución granulométrica de las partículas

La distribución granulométrica de las partículas del producto que sale de la molienda de cemento es de gran importancia para la calidad del cemento. La regulación de estos parámetros se logra por el

ajuste del separador. La última generación de separadores de rotor en jaula de ardilla tiene muchas ventajas sobre los diseños previos, tales como:

- Bajo consumo específico de energía (menor sobremolido).
- Incremento de la capacidad (eficiencia).
- Posibilidad de enfriar el producto.
- Mayor flexibilidad para los ajustes en la finura del producto.
- Mejor control de la distribución del tamaño de las partículas y por ello mejor uniformidad del producto.

3.2.5.3. Almacenamiento del cemento

El cemento es enviado a los silos de almacenamiento, de los que se extrae mediante sistemas mecánicos y neumáticos, siendo transportado a donde será envasado en sacos de papel, o directamente a granel. Los sistemas mecánicos normalmente tienen un costo de inversión más alto pero mucho menor costo de operación que el transporte neumático.

El sistema utilizado más habitualmente es una combinación de transportadores fluidificados o de rosca, y elevadores de cangilones.

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

Las configuraciones más corrientes de los silos de cemento son:

- Silo de celda única con tolva de descarga.
- Silo de celda única con cono central.
- Silo multicelular.
- Silo domo con cono central.

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

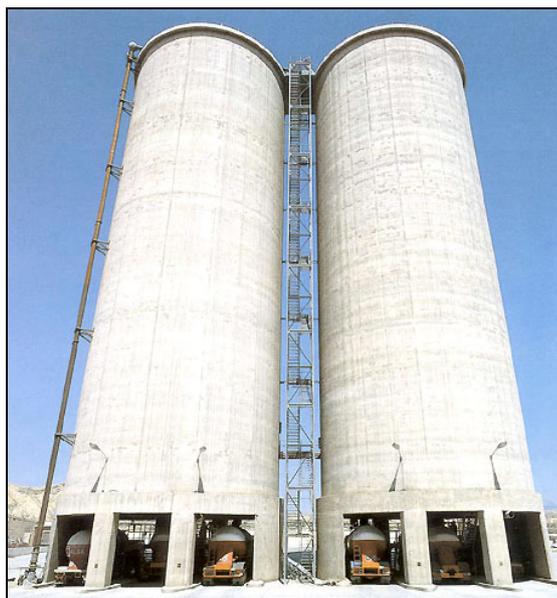


Figura 3.2.78. Silos de cemento. Uniland Cementera. España.

3.2.6. Productos de cemento

3.2.6.1. Propiedades y tipos de cemento

La industria de cemento produce los tipos y clases de cemento, obtenidos por diversas mezclas de minerales, que son requeridos en el mercado. Los progresos económicos e industriales, las fuentes de materias primas, y las condiciones climáticas han conducido a diversos progresos en métodos de edificación y tipos de materiales de construcción y, por lo tanto, a diversos tipos de cemento, según las características físicas y químicas y aplicaciones finales requeridas.

Características físicas y químicas

Como paso previo a la descripción de las mismas debemos establecer la definición de lo que se denomina índice de hidraulicidad. Este índice es un número que se obtiene de realizar la razón entre los componentes ácidos y básicos del cemento. $I = \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{SO}_3$ CaO + MgO + K₂O + Na₂O.

Si este valor varía entre 0,65-1,20, decimos que se trata de un cemento de fraguado rápido - fraguan en un tiempo menor a una hora -; en cambio si este valor se ubica entre 0,50 - 0,65, lo que tenemos es un cemento de fraguado lento – tiempo superior a 8 horas.

Las características físicas y mecánicas más importantes son:

Finura de molido

Es una característica íntimamente ligada al valor de hidraulicidad del cemento, ya que influye decisivamente en la velocidad de las reacciones químicas que tienen lugar durante su fraguado y primer endurecimiento. Al entrar en contacto con el agua, los granos de cemento se hidratan sólo en una profundidad de 0,01 mm, por lo que si dichos granos fuesen muy gruesos, su rendimiento sería muy pequeño al quedar en su interior un núcleo prácticamente inerte. Si el cemento posee una finura excesiva, su retracción y calor de fraguado son muy altos (lo que en general resulta perjudicial); el conglomerante resulta ser más susceptible a la meteorización (envejecimiento) tras un almacenamiento prolongado; y disminuye su resistencia a las aguas agresivas.

Debido a que las resistencias mecánicas aumentan con la finura, se debe optar por una solución de compromiso: el cemento debe estar finamente molido pero no en exceso. Lo deseable es que un cemento alcance debidas resistencias, a las distintas edades, por la razón de la calidad del clínker más bien que por razones de finura de molido.

Expansión

Este fenómeno, a largo plazo, se debe a la existencia de cal libre o magnesio en exceso. Se deberá realizar la medición de esta condición en el cemento antes de la construcción de la obra para evitar trágicos incidentes.

Resistencias mecánicas

Como resistencia del cemento, se entiende la de un mortero normalizado de acuerdo a las normas vigentes. Esta propiedad resulta importante, pero suele jugar como espada de doble filo, pues tiende a oponerse a la durabilidad.

Fraguado y endurecimiento

Esta es sin duda la característica principal del cemento, y por la cual resulta tan importante para su puesta en obra. El fraguado se realiza por el agregado de agua que produce hidrólisis de algunos

compuestos y posteriores hidrataciones y recombinaciones, tras las cuales el cemento adquiere la dureza de la piedra. La hidratación del cemento se produce en 2 tiempos:

1. Fraguado: durante el fraguado la masa plástica se pone cada vez más rígida (duración de minutos a 18 horas).
2. Endurecimiento: la masa rígida aumenta su dureza y resistencia mecánica (dura 28 días, pero se ha registrado la continuidad del mismo a varios años). Este fenómeno incluye una serie de reacciones complejas (*ver apartado 3.2.8. Puesta en obra del cemento*).

Cementos comunes

Debido al gran número de tipos de cementos, se ha considerado necesario separar los "cementos comunes" de los "cementos con características especiales".

Los cementos comunes son aquellos aptos para aplicaciones estructurales y que, además, pueden utilizarse para aplicaciones no estructurales en la construcción. Parte del cemento puede consistir en adiciones minerales provenientes de fuentes naturales o industriales. Estas adiciones minerales pueden tener diferentes características:

- Hidráulicas (escoria de alto horno)
- Puzolánicas (rocas volcánicas, cenizas volantes, microsílíce, arcilla calcinada)
- De relleno (piedra caliza).

Podemos distinguir, de manera general, según las características de los minerales adicionados, entre cinco tipos principales de cemento común:

- Cemento portland.
- Cemento portland compuesto.
- Cemento de alto horno.
- Cemento puzolánico.
- Cemento compuesto.

Cemento portland

El cemento portland es un cemento hidráulico producido por la mezcla y molienda del clínker con un pequeño porcentaje de yeso o de anhidrita (sulfato de calcio) natural o industrial, que actúa como regulador del proceso de endurecimiento, y que contiene generalmente una o más de las formas de sulfato de calcio, como una adición durante la molienda. Este tipo de cemento, de fraguado lento, se aplica para prefabricados y hormigones de alta resistencia.

Cemento portland Compuesto

Es el cemento portland con adiciones. Contiene del 6 al 35 % de otros componentes principales además del clínker. Es el tipo de cemento intermedio entre el anterior, y el cemento portland puzolánico y el cemento siderúrgico (de escorias de alto horno), permitiendo una gradación continua entre uno y otro. Su uso es para fabricación de hormigón armado y hormigón en masa.

Cemento de alto horno

Estos cementos corresponden a cementos con un alto porcentaje de escoria de alto horno que actúa, junto con el clínker, de conglomerante hidráulico. La escoria granulada de alto horno es el subproducto del tratamiento de minerales de hierro en el alto horno, que para ser usada en la

fabricación de cemento, debe ser obtenida en forma granular por enfriamiento rápido y además debe tener una composición química conveniente. Es barata pero fragua y endurece lentamente.

Es un buen cemento para grandes macizos pero está contraindicado para ambientes con temperatura baja que retardan aún más el fraguado, no debiendo emplearse para $T < 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Da lugar a un color verdoso por lo que hay que tenerlo en cuenta para el hormigón visible. Necesitan humedad durante unas dos semanas, siendo el calor y la sequedad sus grandes enemigos.

Cemento puzolánico

El cemento que contiene puzolana se obtiene por la pulverización conjunta de una mezcla de clínker portland y puzolana con la adición eventual de sulfato de calcio. El contenido de puzolana debe estar comprendido entre 15 % y 50 % en peso del total. La puzolana es un material silicoso o silico-aluminoso, que por si misma puede tener poca o ninguna actividad hidráulica pero que, finamente dividida y en presencia de humedad, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio a temperaturas ordinarias para formar compuestos que poseen propiedades hidráulicas.

Cemento compuesto

Los cementos compuestos son aglomerantes que contienen, además de clínker de cemento Portland y yeso, uno o más de los siguientes materiales: Material hidráulico latente, generalmente escoria granulada de alto horno, componentes puzolánicos tales como puzolana natural, ceniza volcánica, humos de sílice, arcilla calcinada, etc. y/o aditivos inertes, en la mayoría de los casos caliza. Da lugar a hormigones lentos, de poca retracción y baja resistencia, no siendo aptos para el hormigón armado.

Tabla 3.2.9. Principales tipos de cementos.

Tipos	Denominación	Designación
CEM I	Cemento portland	CEM I
CEM II	Cemento portland con escoria	CEM II/A-S
		CEM II/B-S
	Cemento portland con humo de escoria	CEM II/A-D
	Cemento portland con puzolana	CEM II/A-P
		CEM II/B-P
		CEM II/A-Q
		CEM II/B-Q
	Cemento portland con ceniza volante	CEM II/A-V
		CEM II/B-V
		CEM II/A-W
		CEM II/B-W
	Cemento portland con esquistos calcinados	CEM II/A-T
		CEM II/B-T
	Cemento portland con caliza	CEM II/A-L
		CEM II/B-L
		CEM II/A-LL
CEM II/B-LL		
Cemento portland compuesto	CEM II/A-M	
	CEM II/B-M	
CEM III	Cemento con escorias de alto horno	CEM III/A
		CEM III/B
		CEM III/C
CEM IV	Cemento puzolánico	CEM IV/A
		CEM IV/B
CEM V	Cemento compuesto	CEM V/A
		CEM V/B

Cementos con características especiales

Estos no son otros que los cementos de uso general antes vistos, los cuales tienen incorporadas ciertas propiedades especiales que le agregan utilidad para determinadas aplicaciones particulares.

Cementos sulfato-resistentes

Los cementos sulfato-resistentes se usan para estructuras de hormigón que se exponen al ataque de sulfatos solubles en las aguas subterráneas, las aguas superficiales, y los suelos. Los cementos de portland con un contenido bajo de C_3A (menos de 3 %), y los cementos de escoria de alto horno con por lo menos 65 % de escoria granulada, están suficientemente probados en Europa y otras partes del mundo, logrando los requisitos de resistencia química. La conveniencia de estos cementos depende de las condiciones ambientales regionales.

Cementos de bajo calor de hidratación

Los cementos de bajo calor de hidratación se utilizan en grandes estructuras de hormigón, y se caracterizan por poseer una generación baja de calor durante la hidratación.

El calor de la hidratación conduce a un aumento de la temperatura del hormigón que puede causar tensión y la formación de grietas. La característica fundamental de estos cementos es un desarrollo inicial menor de la resistencia.

Cementos de bajo contenido alcalino

Los cementos de bajo contenido alcalino se utilizan en la producción del hormigón que contiene áridos con capacidad de reaccionar con álcalis (áridos que contienen SiO_2 , como el ópalo, sílex, algunos minerales silicatados, humos volcánicos, etc.). La reacción se conoce como reacción álcali-silíceo y provoca la expansión y eventualmente el craqueado. Se utilizan bajo condiciones atmosféricas húmedas. Estos cementos se definen globalmente como cementos con un contenido total máximo del álcali inferior al 0.6 % (calculado como Na_2O equivalente) mientras que en la composición del cemento portland se pueden considerar aceptables contenidos del 2 %.

Cementos con aluminato de calcio.

Son cementos con un contenido Al_2O_3 entre el 36 y 55 %, un aglomerante hidráulico que solidifica y endurece por la hidratación de los aluminatos. El componente principal es el aluminato monocálcico anhidro ($\text{CaO Al}_2\text{O}_3$, CA). Las características hidráulicas se basan principalmente en la hidratación del CA. El rápido desarrollo de la resistencia (de más de 20 N/mm^2 después de 6 h y de más de 40 N/mm^2 después de 24 h) junto con el comportamiento de endurecimiento normal (> 60 minutos, similar al cemento portland) y una alta resistencia química de morteros densos y de hormigones, son las características principales de este cemento. Un aumento en el contenido de Al_2O_3 provoca un incremento en la resistencia refractaria.

Las resistencias a corto plazo son mayores que las del cemento portland, si bien las de largo plazo son inferiores como consecuencia del efecto de conversión (formación de aluminato de calcio hidratado que da lugar a una mayor porosidad). Es más estable ante aguas agresivas y de mar que el cemento portland. Es necesario tener mucho más cuidado en la elección de los áridos y los aditivos que en el portland normal. Los recubrimientos pueden ser inferiores, debido a la mayor protección contra la corrosión que proporciona la liberación de álcalis de este cemento.

Otros cementos

Existen muchos tipos de cemento con características específicas que se utilizan a menudo para propósitos especiales. En la mayoría de los casos no se estandarizan si no pueden ser introducidos en el mercado dentro de una legislación nacional. Algunos ejemplos se nombran a continuación:

Los cementos super-sulfato. Están compuestos por escoria de alto horno con un contenido en anhídrita al menos del 5 % (CaSO_4), y un máximo de clínker de cemento portland del 5 %. El uso del cemento impermeable es ventajoso, por ejemplo, en la compactación de suelos. El cemento impermeable es un cemento portland común que contiene cantidades pequeñas de sustancias impermeables agregadas durante la molienda a temperaturas elevadas.

Los cementos para pozos de petróleo. Se utilizan para cementar la cubierta de acero de las paredes de la perforación de los pozos de gas y de petróleo, formando el revestimiento del mismo y para sellar formaciones porosas. Son portland y puzolánicos que fraguan incluso a alta temperatura y alta presión debido a su composición.

El cemento de fraguado regulado. Fragua rápidamente y endurece también muy rápidamente debido a su alto contenido del compuesto $11 \text{ CaO} \cdot 7 \text{ Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaFe}_2$.

El cemento expansivo. Contiene generalmente cantidades grandes de aluminatos y de sulfatos. El cemento se expande al endurecer, por la formación del ettringita.

Los cementos de albañilería. El cemento de albañilería es un conglomerante hidráulico finamente molido, producido en fábrica y formado esencialmente por la presencia de clínker de cemento Portland para desarrollar su resistencia mecánica.

Cementos blancos. Está normalizada la blancura del cemento para poder ser catalogado como tal.

3.2.7. Ensacado y expediciones

Durante mucho tiempo, el cemento ha sido suministrado en sacos de papel (figura 3.2.79.). Sin embargo, la tendencia actual es distribuirlo a granel (figura 3.2.80.), transportándolo en camiones cisterna. El cemento puede ser enviado a puntos de expedición por transporte terrestre o marítimo.



Figura 3.2.79. Transporte de cemento en sacos.



Figura 3.2.80. Sistema de carga de cemento a granel.

Transporte a granel

Las ventajas de la adquisición de cemento a granel son varias; entre ellas, las siguientes:

- Economía en la compra de cemento.
- Economía de manejo en descarga, almacenamiento y manipulación.
- Economía por pérdida, originada en sacos deteriorados o mojados.
- Incremento en la productividad de la obra, por contar con cemento inmediatamente disponible.
- Evita el riesgo de robo.

Por otra parte, desde el punto de vista de la economía social, significa para el país un ahorro de divisas al disminuir la importación de insumo para la fabricación del envase.

El vehículo de transporte del cemento es un tanque a presión, que se carga en los silos de almacenamiento por gravedad, y está provisto de una compresora que se utiliza para descargar el material. El chofer regula los controles para dar la mezcla adecuada de aire y cemento que lleva el material hasta el silo de obra.

Los primeros vehículos graneleros tenían un diseño de doble cono, con un descargador central y un dispositivo de aireación ubicado a todo lo largo del interior del recipiente. Debido a la geometría del cono, resultaba apropiado para descargar únicamente productos que podían ser fluidificados.

Posteriormente, por la necesidad de incrementar la capacidad y obtener vehículos versátiles para acarrear una mayor cantidad de productos, se introdujeron mejoras en los diseños, permitiendo ser adaptados a varios usos, incluso al transporte de líquidos (comprendiendo de productos inflamables a sólidos granulares), mediante una conversión de los sistemas de válvulas y de ventilación del recipiente. Los vehículos se tipifican como cisternas, remolques y la combinación de ambos.

3.2.8. Puesta en obra del cemento

Al amasar con agua el cemento o sus mezclas con arena (mortero) y piedra (hormigón), la pasta obtenida, plástica, comienza a perder esta propiedad después de algún tiempo – una hora, por ejemplo –, y acaba por transformarse en una masa completamente rígida, aunque todavía no resistente, al cabo de tres o cuatro horas.

Este fenómeno de hidratación se puede dividir en dos fases: fraguado y endurecimiento. Durante el fraguado, que transcurre en horas, se disuelven en la fase líquida de la pasta los componentes del cemento más fácil y rápidamente solubles en agua. Este proceso transcurre con desprendimiento de calor y la pasta va perdiendo plasticidad y adquiriendo rigidez, hasta que al final la pasta queda totalmente consolidada. Durante el endurecimiento, que tiene lugar a continuación y que se prolonga durante muchísimo más tiempo (días, meses y años) continúan los procesos de hidratación y consolidación, a ritmo continuo pero decreciente, aumentando paulatinamente la rigidez, dureza y resistencias mecánicas de la pasta y disipándose el calor hidratación.

Existe un efecto que puede aparecer al amasar con agua un cemento, que se conoce como "falso fraguado", consiste en un agarrotamiento prematuro de la masa, que tiene lugar de uno a cinco minutos después de comenzar el amasado. No altera las propiedades del cemento, por lo que es inofensivo; se soluciona continuando el amasado del cemento.

Las reacciones de hidratación principales, son:

3.2.9. Control de calidad

El control de calidad comienza desde la selección de las materias primas de acuerdo a su composición química y continúa con la dosificación y molienda para asegurar la preparación adecuada de la mezcla para calcinarse, donde se debe comprobar que se obtengan los compuestos químicos necesarios para la fabricación del cemento requerido. En la molienda final se debe verificar que el producto cumpla con parámetros de calidad como resistencia a la compresión, trabajabilidad, etc., y de esta manera dar cumplimiento a lo establecido en la política de calidad.

4. PROBLEMÁTICAS AMBIENTALES EN LA FABRICACIÓN DEL CEMENTO: CORRIENTES RESIDUALES Y CONSUMOS

Existen diversas problemáticas medioambientales derivadas de los procesos de fabricación del cemento, pero éstas dependen en gran medida tanto de las materias primas y combustibles utilizados, como de los procesos llevados a cabo en dicha industria.

Los aspectos ambientales asociados a la industria del cemento se pueden separar en dos grupos: los asociados a la etapa de extracción de materias primas y los asociados a las etapas de producción de clínker y de cemento.

Los aspectos ambientales asociados a la extracción de las materias primas vienen determinados principalmente por el deterioro paisajístico y del medio natural, por el ruido, las vibraciones y el polvo producido por las voladuras y por las actividades propias de la cantera. Por lo que se refiere a estos aspectos, cabe decir que actualmente la extracción de minerales ya no se limita a cubrir las necesidades de los recursos, si no que también busca ser aceptada por la sociedad en general, desde un punto de vista medioambiental. Otro aspecto ambiental, indirecto, de las explotaciones es el asociado al transporte de materias primas desde la explotación hasta la planta de producción (principalmente consumo de energía, emisiones de los vehículos, emisiones difusas de partículas a la atmósfera y ruido), motivo por el cual, tanto desde un punto de vista ambiental como económico, es muy importante que la planta de producción esté tan próxima como sea posible a la explotación.

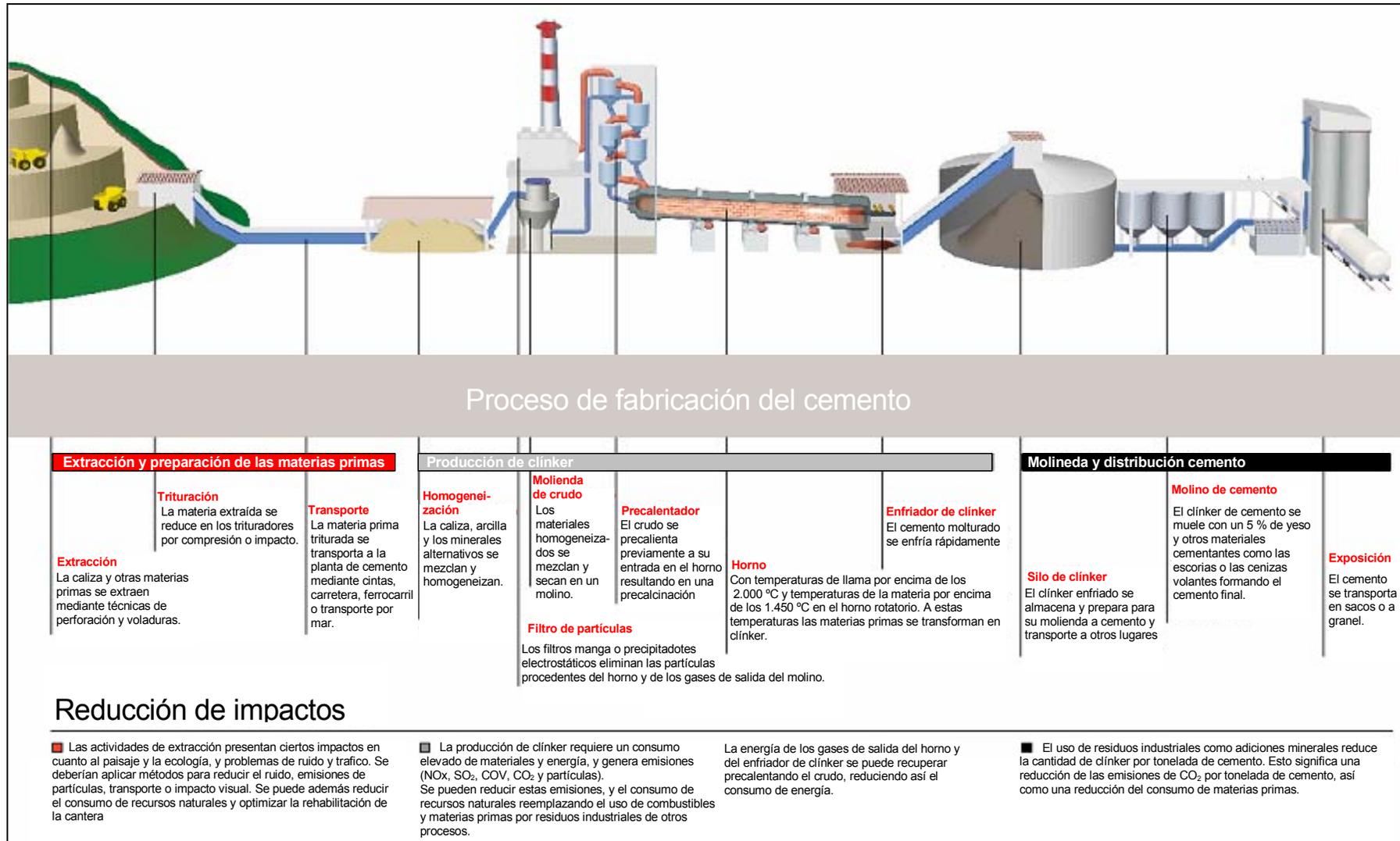
Los principales aspectos ambientales asociados a la producción de clínker y de cemento son las emisiones a la atmósfera (polvo, NO_x, SO₂, CO₂, COV, etc.) y el consumo de energía.

Los vertidos de agua se limitan a las escorrentías de lluvia, la refrigeración de equipos (normalmente en circuito cerrado) y al agua sanitaria; siendo el almacenamiento y la manipulación de combustibles, fuentes potenciales de contaminación del suelo y de las aguas freáticas.

En este capítulo se describen tanto las corrientes residuales (contaminación atmosférica, vertidos líquidos y residuos), como el consumo de energía y agua para los principales procesos en la fabricación del cemento.

En algunos casos se proponen determinadas opciones de gestión, que en cualquier caso deberían ser contrastadas particularmente con las obligaciones de gestión de las corrientes residuales que estén establecidas en cada país, aquellas que son de obligado cumplimiento.

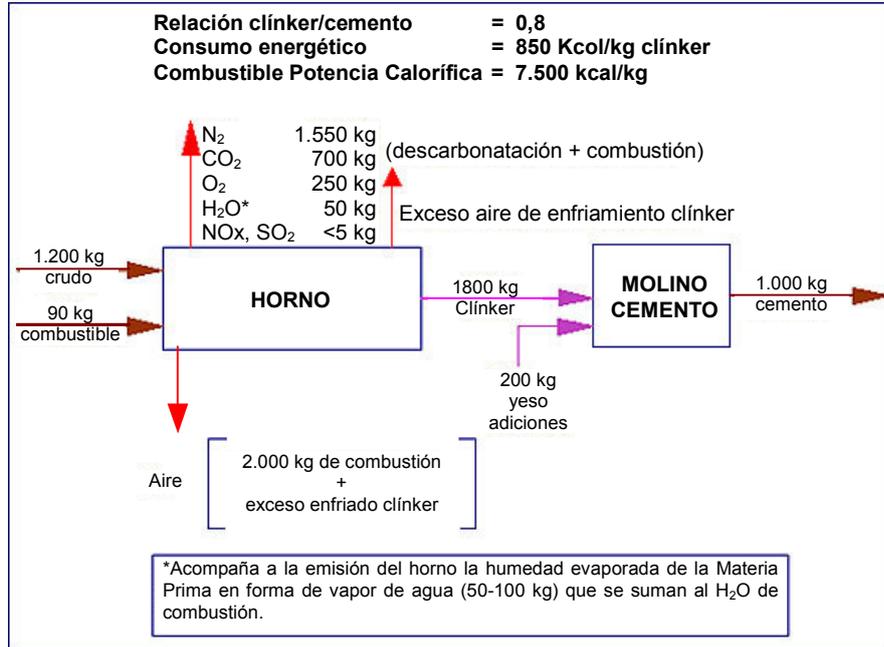
Con el objeto de facilitar la comprensión de lo descrito en los distintos apartados de este capítulo, se muestra a continuación un esquema del proceso de fabricación del cemento con sus impactos ambientales asociados:



Fuente: Adaptado de una figura original de Holcim.

Figura 4.0.1. Esquema del proceso de fabricación del cemento y sus impactos ambientales asociados.

A continuación se muestra un balance de masas para una tonelada de cemento y una tabla resumen de los principales contaminantes generados según la etapa del proceso productivo:



Fuente: Oficemen

Figura 4.0.2. Balance de masas para una tonelada de cemento.

Tabla 4.0.1. Principales contaminantes según la etapa del proceso productivo.

Fuente de contaminación	Part	SOx	NOx	COx	COV	Metales	Halógenos	Dioxinas y furanos	NH ₃	S.S.	pH
Preparación y almacenamiento de la materia prima	A										
Preparación y almacenamiento de los combustibles	A										
Horno	A	A	A	A	A	A	A	A			
Enfriador de clinker	A										
Molienda de cemento	A										
Almacenamiento de cemento	A										
Drenaje										W	W

A: Al aire, W: Al agua, L: Al suelo.

Fuente: Cembureau

4.1. FUENTES POTENCIALES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

4.1.1. Principales emisiones a la atmósfera

La industria del cemento emite a la atmósfera una serie de contaminantes que pueden proceder de fuentes puntuales o dispersas (figura 4.1.1.).

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

- Partículas sólidas.
- Óxidos de nitrógeno.
- Dióxido de azufre.

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

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

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

Estas operaciones emiten a la atmósfera, básicamente, partículas sólidas como único contaminante.

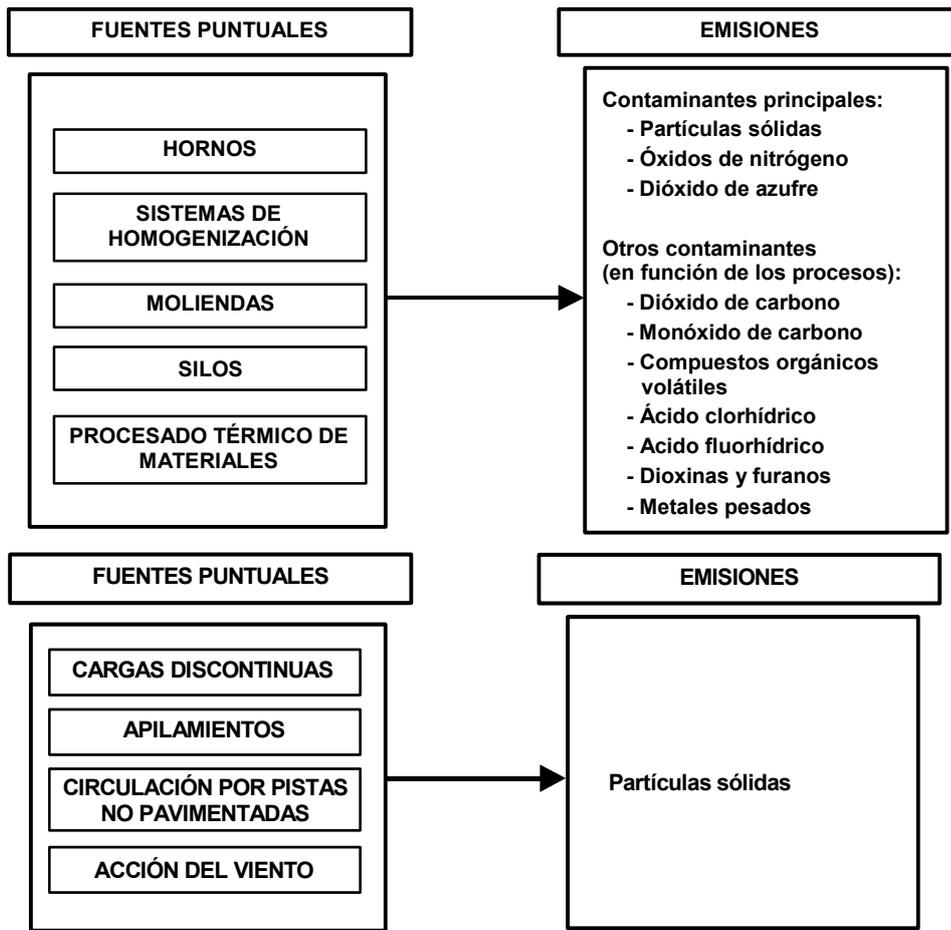
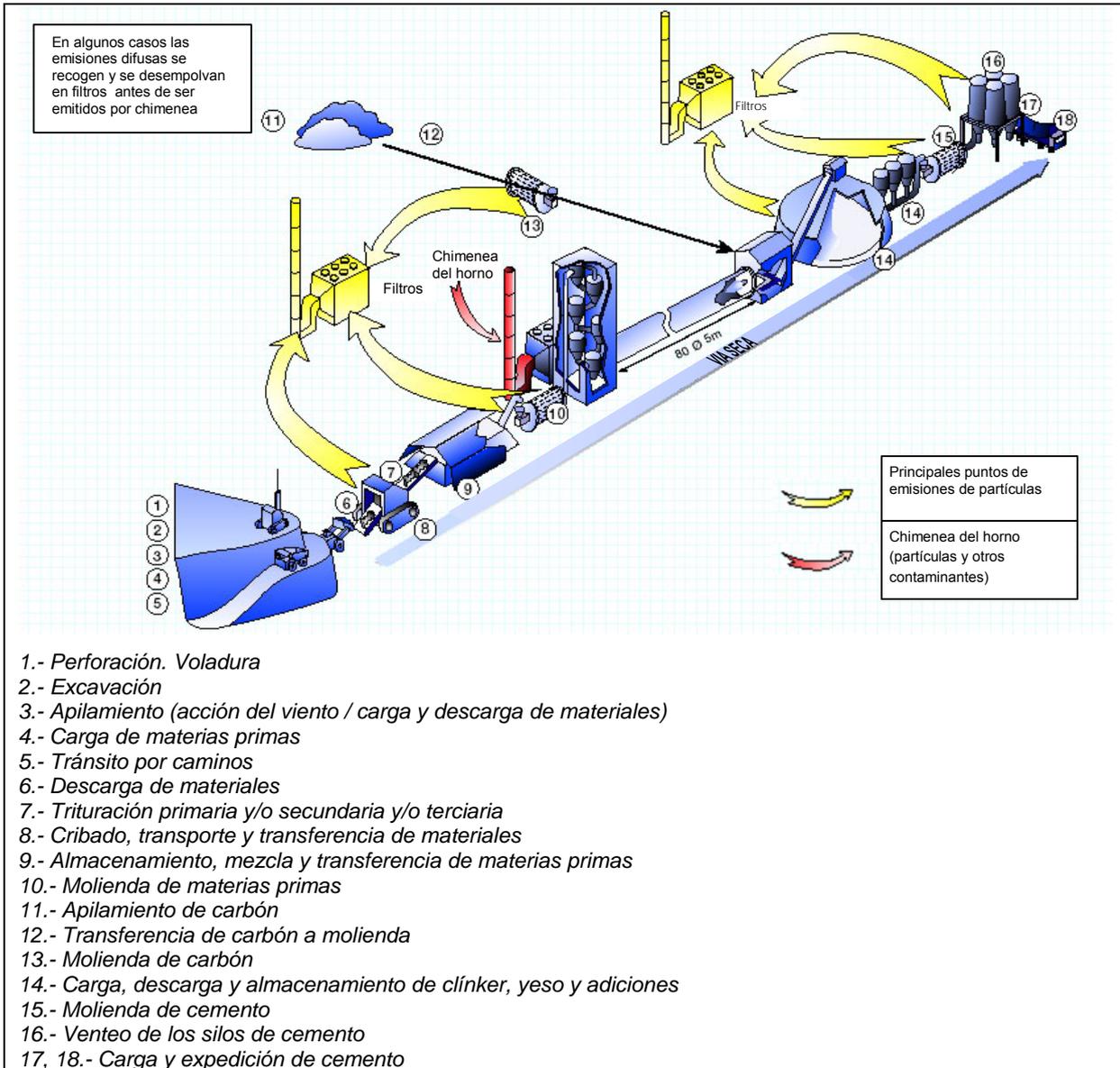


Figura 4.1.1. Contaminantes atmosféricos ligados a la industria del cemento.

A continuación se muestra un esquema de proceso de fabricación del cemento, con los principales focos de emisión de partículas y otros contaminantes a la atmósfera (figura 4.1.2.).



Fuente: Documents de referència sobre les Millors Tècniques Disponibles aplicables a la Indústria del Ciment.

Figura 4.1.2: Esquema de proceso de fabricación del cemento: focos emisores de partículas y otros contaminantes a la atmósfera.

En el presente apartado se describen las principales emisiones a la atmósfera según las distintas etapas del proceso de fabricación del cemento, así como los sistemas de medición y control más habituales para los contaminantes típicos del sector.

4.1.1.1. Obtención de la materia prima

Resulta evidente que, por su propia naturaleza, la extracción de materias primas de las canteras es susceptible de generar impactos ambientales. Sin embargo, puede precisarse que dichos impactos permanecen en su mayoría localizados y no tienen efectos a gran escala, más allá de las inmediaciones de la explotación.

En general las perturbaciones causadas por la explotación de las canteras son bastante limitadas y específicas, tales como las emisiones de polvo, el ruido procedente de las voladuras, el arranque de los motores y el tráfico de vehículos pesados. No obstante, la aplicación de buenas prácticas y mediante la tecnología moderna (ver capítulo 5. Oportunidades para prevenir y reducir la

contaminación) se pueden reducir considerablemente estos impactos, resultando prácticamente no significativos.

4.1.1.2. Preparación y almacenamiento de la materia prima

En esta fase las emisiones a la atmósfera son de escaso volumen y concentración y se remiten únicamente a emisión de partículas procedentes de las operaciones de molienda de materias primas. En países secos, es especialmente relevante la emisión de partículas provenientes de operaciones de almacenamiento y manipulación de materias primas, tales como:

- El transporte a fábrica.
- Las operaciones de carga y descarga.
- La acción del viento sobre los almacenamientos.
- Los puntos de transferencia.
- El transporte interno.

Emisiones que pueden ser, en algunos casos, significativas a nivel local cuando no se dispone de los sistemas adecuados de control.

4.1.1.3. Preparación y almacenamiento del combustible

Como en el caso de las materias primas, las operaciones de transporte, manipulación (carga y descarga, envasado) y almacenamiento de combustibles sólidos son también una fuente potencial de emisión de partículas; pero, de la misma manera, con el uso de la tecnología y prácticas ambientales adecuadas, la emisión de partículas en esta etapa no constituye un problema significativo.

4.1.1.4. Cocción del clínker

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

- Óxidos de nitrógeno (NO_x).
- Dióxido de azufre (SO₂).
- Partículas (polvo).

La legislación medioambiental y la operación de las fábricas suele centrarse en estos tres contaminantes; aunque las emisiones de dióxido de carbono, CO₂, también se consideran de especial relevancia en la producción de cemento.

Los principales constituyentes de los gases de salida de un horno de cemento son: nitrógeno del aire de combustión, CO₂ de la descarbonatación del CaCO₃ y de la oxidación del combustible, vapor de agua del proceso de combustión y de las materias primas, y exceso de oxígeno (ver tabla 4.1.1.):

Tabla 4.1.1. Composición de los gases emitidos por el horno.

Compuesto	% en Volumen
Nitrógeno (N ₂)	45-75
Dióxido de carbono (CO ₂)	11-29
Agua (H ₂ O)	10-39
Oxígeno (O ₂)	4-12
Resto (incluido contaminantes)	< 1

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

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

El contenido de estos dos compuestos en los gases emitidos se ve afectado, además de por las condiciones de la combustión, por el contenido en materia orgánica de las materias primas, que se ven parcialmente oxidadas en contacto con los gases del horno.

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

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

La emisión de estos cuatro contaminantes es normalmente muy baja (ver tabla 4.1.2.), pero su control permite garantizar una correcta operación del horno en actividades de tratamiento de residuos.

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

La capacidad de absorción del material varía con su estado físico y químico. Este, a su vez, depende de la zona del horno en la que se encuentre. Por ejemplo, el material que sale de la etapa de calcinación (descarbonatación) de un horno tiene un alto contenido de óxido de calcio y tiene, por consiguiente, una alta capacidad de absorción (neutralización) de ácidos, tales como HCl, HF y SO₂.

A modo de ejemplo se puede observar en la tabla 4.1.2. datos típicos de emisiones en hornos. La amplitud de los rangos de emisión de los hornos se explica por los siguientes factores:

- El efecto de las materias primas, de origen local, y, en menor medida, de los combustibles.
- La edad y el diseño de la planta, así como las técnicas empleadas.

Tabla 4.1.2. Rango de emisiones típicos de hornos de cemento.

	mg/Nm ³	Kg/t de clínker	t/año
NO _x (como NO ₂)	< 200-3.000	< 0,4-6	400 -6.000
SO ₂	< 10-3.500	< 0,02-7	< 20-7.000
Partículas (polvo)	5-200	0,01-0,4	10 - 400
CO	500-2.000	1-4	1.000-4.000
CO ₂	400-520 g/Nm ³	800-1.040	0,8-1,04 millones
COT	5-500	0,01-1	10-1.000
HF	< 0,4-5	< 0,8-10 g/t	< 0,8 -10
HCL	< 1-25	< 2-50 g/t	< 2 -50
PCDD/F	< 0,1 mg/Nm ³	< 200-1.000 g/t	< 0,2-1 g/año
Metales			
(Hg, Cd, Ti)	0,01-0,3 (prin. Hg)	20-600 mg/t	20-600 kg/año
(As, Co, Ni, Se, Te)	0,001-0,1	2-200 mg/t	2-200 kg/año
(Sb, PB, Cr, Cu, Mn, V, Sn, Zn)	0,005-0,3	10-600 mg/t	10-600 kg/año

Fuente: Cembureau

Los volúmenes habituales de gases emitidos por el horno de clínker gris varían normalmente entre 1.700 y 2.500 m³ por t de clínker (gas seco, 101,3 kPa, 273 K). Los sistemas de horno con precalentador y precalciner normalmente tienen volúmenes de gas de alrededor de 2.000 m³/t de clínker (gas seco, 101,3 kPa, 273 K).

Emisiones de Óxidos de Nitrógeno

El monóxido de nitrógeno (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂) son los óxidos de nitrógeno predominantes en los gases emitidos por el horno de cemento (NO > 90 % de los óxidos de nitrógeno).

Las emisiones de NO_x dependen fundamentalmente del tipo de horno que se emplee y de las características de cocción de las materias primas.

El rango de las emisiones de óxidos de nitrógeno aproximadamente se encuentra entre 200 y 3.000 mg NO_x/m³ (como NO₂, gas seco, 273 k, 101,3 kPa, 10 % O₂).

Hay dos fuentes principales para la producción de NO_x:

- NO_x térmico: parte del nitrógeno en el aire de combustión reacciona con oxígeno para formar óxidos de nitrógeno.
- NO_x de combustible: los compuestos de nitrógeno presentes en el combustible reaccionan con el oxígeno para formar óxidos de nitrógeno.

NO_x térmico

La formación de NO_x térmico se potencia en gran medida cuando la temperatura de combustión es superior a los 1.200 °C, reaccionando las moléculas de nitrógeno y oxígeno en el aire de combustión.

El NO_x térmico se produce principalmente en la zona de clinkerización del horno, en la que se alcanzan temperaturas cercanas a los 2.000 °C. La cantidad de NO_x térmico generado en esta zona

está relacionado tanto con la temperatura como con el contenido de oxígeno (factor de exceso de aire). Cuanto mayor sea el exceso de oxígeno, mayor será la formación de NO_x térmico.

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

NO_x de combustible

El NO_x de combustible se genera por oxidación del nitrógeno (N) presente en el combustible, el cual se combina con otros átomos de nitrógeno para formar N₂ gas o reacciona con el O₂ para formar NO_x combustible.

En un precalcinador la temperatura suele estar en el rango de 900 - 1.150 °C, baja para la formación de NO_x térmico, por lo que la mayor parte del NO_x formado en esta zona del horno será NO_x combustible. Lo mismo ocurre cuando parte del combustible se alimenta en la zona de entrada al horno, donde se genera una zona de combustión secundaria a una temperatura similar a la correspondiente a un precalcinador.

En los hornos dotados de precalcinadores, donde hasta el 60% del combustible puede quemarse en el precalcinador, la formación de NO_x térmico es más baja que en los hornos en los que todo el combustible se quema en la zona de sinterización.

Además de la temperatura y el contenido de oxígeno (factor del exceso de aire), la formación de NO_x puede estar influenciada por la forma de la llama y su temperatura, la geometría de la cámara de combustión, la reactividad y el contenido de nitrógeno del combustible, la presencia de humedad, el tiempo de reacción y el diseño del quemador.

Emisiones de Dióxido de Azufre

Las emisiones de SO₂ de las fábricas de cemento están directamente relacionadas con el contenido en compuestos volátiles de azufre en las materias primas. Los hornos que emplean materias primas con contenidos bajos de compuestos volátiles de azufre tienen emisiones muy bajas de SO₂, en algunos casos por debajo de los límites de detección.

El dióxido de azufre (SO₂) es el principal compuesto de azufre emitido (99 %), aunque también se generan pequeñas cantidades de SO₃ y, en condiciones reductoras, puede generarse sulfuro de hidrógeno (H₂S). El rango de emisiones de SO₂ es de 10 a 3.500 mg/Nm³.

En la materia prima los compuestos de azufre están presentes principalmente como sulfatos (como por ejemplo el sulfato de calcio, CaSO₄) o como sulfuros (como por ejemplo la pirita, FeS₂).

Sulfatos

Los sulfatos de las materias primas son térmicamente estables por encima de temperaturas de 1.200 °C, cuando entran en la zona de sinterización del horno se descomponen formando SO₂. Parte del SO₂ se combina con álcalis y se incorpora así en la estructura del clínker. El resto del SO₂ se lleva a las zonas menos calientes del horno, donde reacciona tanto con el óxido de calcio calcinado como con el carbonato de calcio, y se reintroduce a la zona de sinterización de nuevo (absorción química).

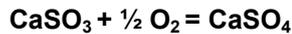
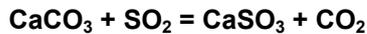
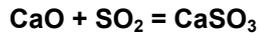
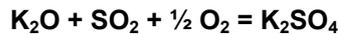
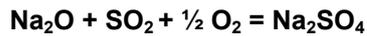


Figura 4.1.3. Reacciones químicas con el SO₂-

Los compuestos de azufre inorgánicos u orgánicos de los combustibles están sujetos al mismo ciclo, consistente en la descomposición térmica, oxidación a SO₂ y reacción con álcalis u óxido de calcio. Mediante este ciclo cerrado, todo el azufre que es introducido por los combustibles o por los sulfatos de la materia prima, abandonan el horno incorporados al clínker, sin ser emitidos a la atmósfera como emisiones de SO₂; por lo que el azufre presente en combustibles en hornos con precalentador no genera emisiones significativas de SO₂. El exceso de oxígeno (del 1 al 3 % de O₂ mantenido en el horno para conseguir una buena calidad del cemento) oxidará los compuestos sulfurosos liberados, convirtiéndolos en SO₂.

Sulfuros (o compuestos de azufre orgánicos)

Los sulfuros y el azufre orgánico presentes en las materias primas se evaporan en cuanto la temperatura del crudo comienza a elevarse, a diferencia de los sulfatos, se descomponen y oxidan a temperaturas moderadas de 400 a 600 °C produciendo SO₂; y el 30 % o más se emite desde la primera etapa del intercambiador de ciclones. A estas temperaturas no hay suficiente óxido de calcio para reaccionar con el SO₂. Los gases de esta etapa se emiten a la atmósfera o se llevan al molino de crudo cuando éste está en funcionamiento.

En el molino de crudo, entre el 20 y el 70 % del SO₂ será capturado por las materias primas finamente molidas (absorción físico-química). Por ello es importante que, cuando hay compuestos volátiles de azufre en las materias primas, la molienda de crudo se optimice para que actúe como sistema de captación de SO₂.

En un horno con precalentador de parrilla, la absorción de SO₂ también es buena, puesto que el gas se hace pasar a través del lecho de materia prima parcialmente calcinada y a través de mezclas de carbonatos de calcio en la cámara de secado.

En hornos largos vía seca o húmeda, la absorción química de SO₂ es generalmente menos eficaz, debido al contacto reducido entre los gases de salida y la materia prima. En estos sistemas de horno, prácticamente todo el azufre entrante contribuye a emisiones de SO₂, y los niveles de emisión de SO₂ son mayores que en un horno vía seca con precalentamiento.

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

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

La conjunción de estas condiciones puede producir emisiones más elevadas de SO₂ al no darse el mismo porcentaje de fijación de los óxidos de azufre en el mismo grado que en la fabricación de clínker gris.

Emisiones de Partículas (Polvo)

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

Las principales fuentes de partículas por chimenea (fuentes localizadas, o puntuales) son los hornos, los molinos de crudo, los enfriadores de clínker y los molinos de cemento. En todos estos procesos circulan grandes volúmenes de gases que fluyen a través de materiales pulverulentos, y como resultado estos gases quedan cargados de partículas, por lo que deben ser desempolvados. El uso de materiales y combustibles secundarios no tiene influencia en la emisión de partículas del horno, que sólo depende de la eficiencia de desempolvado.

El diseño y la fiabilidad de los precipitadores electrostáticos modernos y de los filtros de mangas, aseguran que las partículas emitidas se puedan reducir a niveles no significativos; incluso se han podido lograr en algunas instalaciones niveles de emisión por debajo de 10 mg/m^3 . Normalmente el rango de emisiones de partículas se encuentra entre 5 y 200 mg/Nm^3 .

Emisiones de CO₂

(Ver también Gases de Efecto Invernadero, apartado 4.1.2.)

Tradicionalmente, las emisiones de CO₂ no eran consideradas como contaminantes. Con la firma y ratificación por la mayoría de los países del PAM del Protocolo de Kyoto, las emisiones de CO₂ pasan a ser contabilizadas en estos países como Gases de Efecto Invernadero (GEI), y por tanto, sujetas a las legislaciones nacionales y los mecanismos implementados en el Protocolo de Kyoto (comercio de derechos de emisión, proyectos de aplicación conjunta y mecanismos de desarrollo limpio).

Aproximadamente el 5 % de las emisiones antropogénicas a nivel global de CO₂ son emitidas por la actividad de la industria cementera. Debido a esto, dicha industria está sujeta al uso de derechos de emisión de GEI en muchos de los países del PAM.

Las fuentes de emisión de CO₂ pueden ser las siguientes:

- Calcinación de carbonatos y combustión de carbón orgánico contenido en la materia prima.
- Combustión de combustibles fósiles (en el horno y fuera de él).
- Combustión de biomasa en el horno (no contabiliza como GEI).

Las emisiones totales de CO₂ dependen por tanto de los siguientes parámetros:

- Tipo de proceso (eficiencia del proceso y subproceso).
- Combustible usado.
- Ratio clínker/cemento.

La emisión de dióxido de carbono (CO₂) es de 900 a 1.000 kg/t de clínker gris, en relación a un consumo específico de aproximadamente 3.500 a 5.000 MJ/tonelada de clínker, pero dependiendo así mismo del tipo de combustible. El ratio es menor si se refiere a las toneladas de cemento, puesto que en la molienda de cemento se adicionan otros minerales y yeso. En el caso del clínker blanco el ratio es superior debido a su mayor consumo energético.

En la fabricación de cemento gris por vía seca aproximadamente un 60 % del CO₂ generado se origina en el proceso de disociación del carbonato cálcico de la caliza en óxido de calcio y CO₂ (denominado descarbonatación o calcinación de la caliza) y el 40 % restante se produce en la combustión del combustible. Las emisiones resultantes de la combustión son directamente proporcionales al consumo específico, y a la relación entre el contenido de carbono (C) y el poder calorífico del combustible.

En el caso de la biomasa, no se contabiliza su emisión como GEI (gas de efecto invernadero).

Las emisiones del CO₂ de la combustión en la industria del cemento, se han reducido progresivamente, alrededor del 30 %, en los últimos 25 años principalmente por la instalación de hornos más eficientes.

Emisiones de CO

La emisión de CO está relacionada con el contenido de materias orgánicas en las materias primas y con las condiciones del proceso de fabricación, pero también puede producirse por una combustión incompleta cuando el control de la alimentación de los combustibles sólidos no es óptima. Dependiendo de las características de las canteras, se aportan al proceso entre 1,5 y 6 g de carbono orgánico por kg de clínker proveniente de las materias primas.

Los ensayos realizados con materias primas de varios orígenes han demostrado que entre el 85 y el 95 % de los compuestos orgánicos presentes en las materias primas se oxidan completamente a CO₂ en presencia de un 3 % de oxígeno en exceso; mientras entre el 5 y el 15 % se oxidan parcialmente a CO. La concentración de CO puede superar en algunos casos, con algunas materias primas, los 2.000 mg/Nm³ (Informe Cembureau, 1997).

Para asegurar que la velocidad de alimentación del combustible sólido es uniforme debe disponerse de un buen diseño de las tolvas, cintas transportadoras y alimentadores. De no ser así, se podría producir una combustión subestequiométrica que puede llevar a puntas de corta duración mayores del 0,5 % de CO. Estos picos de CO provocan la desconexión automática de los filtros electrostáticos para evitar el riesgo de explosión, lo que provoca un incremento en la emisión de partículas.

Emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles

En general, la emisión de compuestos orgánicos volátiles (COV) y de monóxido de carbono en los procesos de combustión va a menudo asociada a combustiones incompletas. En condiciones normales de operación, en los hornos de cemento la emisión de estos compuestos es baja, debido al largo tiempo de residencia de los gases en el horno, la elevada temperatura y las condiciones de exceso de oxígeno.

No obstante las materias primas básicas como la caliza, marga, arcilla o pizarra, pueden contener por encima de un 0,8 % de materia orgánica (dependiendo de las condiciones geológicas de su yacimiento). Una gran parte de esta materia orgánica se volatiliza en las primeras etapas del proceso de cocción (precalentamiento, precalcificación), incluso a temperaturas moderadas de 400 a 600 °C, a medida que el crudo se va calentando, dando lugar a emisiones de COV's.

Se ha demostrado que aproximadamente del 85 al 95 % de la materia orgánica contenida en la materia prima, en presencia de un exceso de oxígeno del 3 %, se convierte a CO₂ en los gases de salida del horno, y entre un 5-15 % se oxida a CO. Tan sólo una pequeña proporción (normalmente menor del 1 % del Carbono Orgánico Total -COT-) es emitido como compuestos orgánicos volátiles (hidrocarburos).

El contenido en COV de los gases del horno de cemento se encuentra normalmente entre 10 y 100 mg/Nm³. En algunos casos se alcanzan emisiones de COV de hasta 500 mg/Nm³ debido a las características de las materias primas [Informe Cembureau, 1997].

Las concentraciones de COV's pueden aumentar durante las operaciones de arranque o en casos de perturbaciones de la marcha normal del horno. La frecuencia con la que ocurren situaciones de operación anómala del horno es muy variable, desde una o dos veces a la semana hasta una vez cada dos o tres meses.

Emissiones de Dibenzodioxinas policloradas (PCDDs) y dibenzofuranos (PCDFs)

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

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

En el caso de una operación correcta, la producción de cemento raramente constituye una fuente significativa de emisiones de dioxinas y furanos. No obstante, parece que todavía existe considerable incertidumbre respecto a las emisiones de PCDD/F [Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, 1997].

La nueva ratificación del Convenio de Estocolmo sobre Compuestos orgánicos persistentes (COP's) intenta prevenir y reducir la emisión no intencionada de dibenzo-p-dioxinas policloradas (PCDD), dibenzofuranos policlorados (PCDF), bifenilos policlorados (PCB) y hexaclorobenceno (HCB). Los hornos de cemento de desechos peligrosos están explícitamente mencionados en el Convenio de Estocolmo (Anexo C parte II) como "Fuente industrial que tiene un potencial comparativamente alto de formación y emisión de estos compuestos químicos al ambiente".

Datos obtenidos a partir de varios hornos muestran emisiones de PCDD/PCDF tan altas como 1,76 ng EQT/m³ cuando operan sus dispositivos de control de contaminación atmosférica dentro del rango de 200-230 °C. Otras pruebas realizadas indicaron mayores emisiones para algunos hornos en los que se quemaban residuos peligrosos.

En distintos estudios realizados se ha identificado una correlación positiva entre concentración de emisiones de PCDD y temperatura del precipitador electrostático/chimenea. Se observó en general la siguiente correlación: la temperatura del precipitador electrostático registrada osciló entre los 255 °C y los 400 °C; las emisiones de PCDD fueron más altas a los 400 °C, decreciendo unas cincuenta veces con una temperatura de 255 °C. A temperaturas menores de 250 °C en la entrada del precipitador electrostático/chimenea, no hubo correlación entre temperatura y emisiones de PCDD [Karstensen, 2004].

Investigaciones más detalladas sugieren que – siempre y cuando la combustión sea buena – el factor principal de control es la temperatura del dispositivo de captación de polvos del sistema de limpieza de gases. Las plantas equipadas con precipitadores electrostáticos de baja temperatura parecen tener emisiones bien controladas con o sin desechos como combustibles [PNUMA, 2003].

Tras las distintas investigaciones realizadas se puede decir que los hornos de cemento pueden cumplir con niveles de emisión de 0,1 ng EQT/Nm³, que es el valor límite en la legislación europea para plantas de incineración y co-incineración de residuos (directiva del Consejo 94/67/CE y directiva del Consejo y del Parlamento 2000/76/CE).

En el momento actual la industria del cemento está desarrollando investigaciones ulteriores en este campo.

Emissiones de Metales y sus compuestos

Los dos flujos de entrada en el horno de cemento, materias primas y combustibles, contienen metales en concentraciones variables en función de su origen. En particular, el uso de residuos como combustibles puede variar la entrada de metales en el proceso, por lo que, en consecuencia, es conveniente conocer los niveles de metales pesados de los flujos de materias primas y combustibles.

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

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

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

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

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

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

4.1.1.5. Molienda, ensacado y expedición de cemento

Como en el caso de las materias primas y combustibles, las operaciones de molienda, transporte, almacenamiento y manipulación (carga y descarga, envasado) de cemento son una fuente potencial de emisión de partículas, pero constituyen un problema poco significativo mediante la aplicación de buenas prácticas ambientales y el uso de la tecnología adecuada.

4.1.2. Gases de efecto Invernadero

La lucha contra el cambio climático se ha convertido en la cuestión medioambiental más importante en los últimos años. La comunidad científica internacional considera que existe una relación entre las emisiones de dióxido de carbono de las actividades energéticas (generación eléctrica, transporte, calefacción, procesos térmicos) y los cambios en el clima observados en las últimas décadas.

En 1992 la Organización de Naciones Unidas (ONU) estableció el Convenio Marco de la Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, firmado por más de 140 países. La Convención establece las líneas básicas de actuación a nivel internacional, con especial hincapié en el estudio de las consecuencias del cambio climático y los medios para luchar contra él.

El Protocolo de Kyoto del año 1997 se estableció en el marco de la Convención, y se convierte en la primera herramienta de ámbito internacional para la lucha contra el cambio climático en la que se establecen objetivos cuantitativos concretos de reducción de las emisiones.

El Protocolo de Kyoto establece, como una de las herramientas, el comercio de emisiones. La Unión Europea ha puesto en marcha desde el año 2005 un mercado de ámbito europeo para la comercialización de derechos de emisiones de dióxido de carbono. El mercado afecta exclusivamente a las actividades industriales intensivas en energía, entre las que se incluye la fabricación de clínker.

El mercado de emisiones supone un cúmulo de desafíos para las empresas industriales. Algunos, como el seguimiento de las emisiones, se resolverán con un esfuerzo importante. Otras cuestiones como el impacto del mercado sobre la competitividad de las empresas y la contribución del mercado al cumplimiento de Kyoto quedan aún en el aire.

En este momento es difícil precisar qué impacto económico tendrá el establecimiento del mercado de emisiones en la industria. Lo que sí se puede dar por descontado es que las instalaciones afectadas por el mercado deberán incorporar de forma inmediata los procedimientos, y metodologías que permitan seguir las emisiones de dióxido de carbono de sus instalaciones de producción.

Las metodologías de seguimiento deben adaptarse, en la medida de lo posible, a los equipamientos existentes en las fábricas, con cambios menores (mantenimiento y calibración de básculas, etc.). En algunos casos, los requisitos de precisión exigidos podrían obligar al fabricante a realizar modificaciones de equipos y procedimientos. En cualquier caso, un seguimiento preciso, económico y ágil de las emisiones de CO₂ se ha convertido en obligación para las fábricas de cemento afectadas por el Protocolo de Kyoto.

A continuación se describe brevemente qué son el efecto invernadero y el cambio climático, los aspectos básicos del mercado, qué nuevas exigencias comporta para las empresas y fábricas de cemento, y cómo seguirán estas últimas sus emisiones de CO₂.

4.1.2.1. El Efecto Invernadero y el Cambio Climático

La comunidad científica considera plausible que el cambio climático observado en la Tierra en las últimas décadas está provocado por el incremento en la atmósfera de los gases de 'efecto invernadero'. Los más importantes son el vapor de agua, el dióxido de carbono y el metano.

Los gases de efecto invernadero tienen la propiedad de captar la radiación infrarroja que emite la superficie del globo terráqueo, calentada por la incidencia de la radiación solar. Este fenómeno natural es el que ha permitido que las condiciones de temperatura en la troposfera (parte baja de la atmósfera) fueran adecuadas para la profusión de vida en la Tierra, incluido el ser humano.

El incremento en la concentración de los gases de efecto invernadero provocado por las actividades humanas (combustibles fósiles, agricultura y ganadería) desequilibra el balance de radiación térmica entre el Sol y la Tierra; es decir, altera el balance entre la radiación solar que llega a la Tierra y la que la Tierra emite al espacio. De forma resumida se puede decir que el incremento en la concentración de los gases de efecto invernadero provoca que el globo terráqueo emita menos energía al espacio y, por tanto, se incremente la cantidad de energía presente en la atmósfera. Esto provoca un incremento de las temperaturas de la atmósfera y los océanos, lo que afecta a los regímenes de lluvia, al desarrollo de los bosques y al medio ambiente en su conjunto.

Por todo ello, la comunidad internacional, en aplicación del principio de precaución, decidió iniciar actuaciones de estudio y lucha contra el cambio climático.

4.1.2.2. Convenio Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

La Organización de Naciones Unidas (ONU) impulsó la negociación y firma del Convenio Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático en 1992, resultado de diversas resoluciones de la Asamblea General de Naciones Unidas que en la parte final de la década de los ochenta

argumentaban la necesidad de actuar conjuntamente para estudiar y mitigar el cambio climático y sus consecuencias, en aplicación del principio de precaución, y teniendo en cuenta las notables incertidumbres que hemos resumido en el apartado anterior.

Cerca de 150 países de todo el mundo, y de muy distintos niveles económicos y sociales, han ratificado el Convenio, cuyo objetivo fundamental es "la estabilización de las concentraciones de los gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático".

Las líneas básicas del Convenio son las siguientes:

- El estudio del cambio climático y de sus efectos sobre la naturaleza. En este sentido se da gran importancia a la elaboración de inventarios nacionales de emisión, al seguimiento y observación de datos climatológicos, y a la cooperación internacional en esta materia.
- Los países desarrollados asumen su responsabilidad en las emisiones históricas de gases de efecto invernadero, y por tanto, la necesidad de que sean ellos los que encabecen e impulsen la lucha contra el cambio climático.
- La dotación de recursos técnicos, humanos y financieros es fundamental. En este sentido, los países pobres deben obtener recursos que les permitan contribuir a la lucha contra el cambio climático, sin renunciar en modo alguno a sus legítimas aspiraciones de desarrollo económico y de bienestar, con mención explícita a la "erradicación de la pobreza". La dotación de recursos financieros a través de organismos internacionales (Banco Mundial de Desarrollo, p.e.), y la transferencia de tecnología son dos cuestiones mencionadas repetidamente en la Convención.

La lucha contra el cambio climático debe ser compatible con el crecimiento económico, un crecimiento económico que debe ser sostenible en términos de uso eficiente y racional de los recursos energéticos y naturales.

El Convenio establece como instrumento de actuación en materia de lucha contra el cambio climático, la aprobación de Protocolos que desarrollen el Convenio.

4.1.2.3. El Protocolo de Kyoto

El Protocolo de Kyoto de 1997 toma el nombre de la ciudad japonesa en la que se celebró la Conferencia de las Partes de la Convención a finales de dicho año.

En el Protocolo de Kyoto se establece un reparto internacional de reducciones de emisión de gases de efecto invernadero para treinta y ocho países, con el fin de alcanzar el objetivo de que las emisiones conjuntas de dichos países se reduzcan en al menos el 5 % de lo emitido en 1990 en el periodo de compromiso comprendido entre el año 2008 y el 2012 (establece que el cumplimiento debe acreditarse a lo largo de los años 2008 a 2012 como media de las emisiones del quinquenio).

En la tabla 4.1.3. se puede ver que la mayoría de países del Plan de Acción del Mediterráneo han ratificado el Protocolo de Kyoto:

Tabla 4.1.3. Protocolo de Kyoto en los países del PAM.

Situación del Protocolo en los países del PAM		
	Ratificado	No ratificado (a fecha de Noviembre 2005)
SUR	Argelia	Líbano
	Egipto	Libia
	Marruecos	Siria
	Túnez	
NORTE	España	Mónaco
	Francia	
	Grecia	
	Italia	
ESTE	Albania	Bosnia-Herzegovina
	Chipre	Croacia
	Eslovenia	Serbia y Montenegro
	Israel	
	Malta	
	Turquía	

Los gases de efecto invernadero contemplados en el Protocolo de Kyoto son seis:

- Dióxido de carbono (CO₂).
- Metano (CH₄).
- Óxido nitroso (N₂O).
- Hidrofluorocarbonos (HFC).
- Perfluorocarbonos (PFC).
- Hexafluoruro de azufre (SF₆).

De ellos, ocupan un papel preponderante el dióxido de carbono (CO₂), generado mayormente en procesos de combustión (centrales térmicas, calderas, vehículos, calefacción, etc.); y el metano (CH₄), que proviene de la descomposición de la materia orgánica (fermentación en vertederos de residuos urbanos, explotaciones ganaderas, etc.).

Los sumideros de gases (reforestación, por ejemplo), el mercado internacional de emisiones y los mecanismos flexibles son opciones plasmadas en el Protocolo para que los firmantes del mismo puedan cumplir sus compromisos sin hacerlo exclusivamente en base a esfuerzos realizados en el propio país. Esta flexibilidad es, además de necesaria, absolutamente coherente con la naturaleza del problema medioambiental con el que nos enfrentamos. Se trata de una cuestión de ámbito mundial y, aunque los efectos del cambio climático varían de una a otra zona del planeta, no importa en qué parte del globo terráqueo se produzcan las emisiones, la atmósfera en su conjunto se ve afectada.

De entre los contemplados en el Protocolo, el que parece aportar mayores potencialidades es el 'Mecanismo de Desarrollo Limpio' (Clean Development Mechanism). Consiste, de forma resumida, en que un país firmante del Protocolo invierte en otro país en vías de desarrollo, y las reducciones en las

emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de la inversión se contabilizan como realizadas en el país origen de la inversión. Las inversiones pueden corresponder a empresas o a organismos gubernamentales, y pueden realizarse directamente o a través de 'fondos de carbono' establecidos por entidades como el Banco Mundial. Este mecanismo es un estímulo a la inversión en países en vías de desarrollo, lo que es uno de los frutos más positivos en términos de cooperación internacional que pueden derivarse del Protocolo de Kyoto, y merece, por tanto, estímulo tanto de las administraciones públicas como de las empresas.

Las políticas forestales merecen una atención especial, porque además de aportar sumideros para descontar emisiones, permiten la recuperación de espacios naturales y la potenciación de las economías rurales. Esta vía encuentra hoy por hoy dificultades y limitaciones, que convendría superar en el futuro para que pueda hacer una aportación relevante en la lucha contra el cambio climático.

El Protocolo de Kyoto es una apuesta firme por:

- La mejora por la eficiencia energética de los procesos productivos.
- La eficiencia energética de los modos de transporte y calefacción, que representan la parte del león de las emisiones globales.
- La implantación de mecanismos de cooperación internacional, que permitan luchar contra el cambio climático mientras se apoya el desarrollo económico y social de los países menos favorecidos.
- Los sumideros y depósito de emisiones (reforestación, políticas agrarias, etc.).
- La investigación y desarrollo de formas de generación y transformación de la energía (papel de las energías renovables, expectativas de la fusión nuclear, gas natural, hidrógeno, etc.).

Los desafíos planteados por el cambio climático deben convertirse en un impulso para la innovación, la inversión y el ingenio, y, por ende, para las economías.

El protocolo de Kyoto en la industria del cemento

La industria del cemento es uno de los sectores más afectados, ya que constituye una de las principales fuentes de emisión de CO₂, agravada por la construcción de autovías, carreteras y otras infraestructuras. Cada tonelada de cemento consumida causa la emisión de 498 kilogramos de CO₂.

En concreto, la industria del cemento mundial genera alrededor del 5 % de las emisiones de gases de efecto invernadero, que proceden, por un lado, del consumo de combustibles (40 %) y, por otro, del proceso de fabricación del cemento, debido a la descarbonatación de las materias primas (60 %); este último CO₂, proviene de la reacción química que se produce dentro del horno.

En la tabla 4.1.4. se muestra tanto la producción de cemento como las toneladas de CO₂ producidas por la descarbonatación del clínker en los países del PAM para el año 2002:

Tabla 4.1.4. Producción de cemento y toneladas de CO2 emitidas por la descarbonación de la materia prima, en el año 2002.

	Producción clínker, kt año 2002	kt CO2 por descarbonación de clínker, año 2002
Albania	190	25
Argelia	8.900	4.488
Bosnia	850	150
Croacia	3.300	1.684
Chipre	1.790	798
Egipto	28.500	11.469
Eslovenia	1.180	626
España	42.420	21.193
Francia	19.437	9.973
Grecia	14.680	7.729
Israel	4.582	3.491
Italia	41.400	19.947
Líbano	3.200	1.422
Libia	3.320	1.496
Malta	0	0
Marruecos	8.800	5.086
Mónaco	0	0
Serbia y Montenegro	2.485	1.195
Siria	5.010	2.443
Túnez	5.550	3.003
Turquía	32.758	16.243

Fuente: CDIAC

En este contexto la industria del cemento está buscando nuevos caminos en la mejora de su eficiencia energética, realizando mejoras en sus instalaciones para optimizar la eficiencia energética y para desarrollar procesos y productos que requieran menos energía; además está estudiando otras alternativas posibles para reducir sus emisiones de CO₂.

Para ello se han modificado hornos, sistemas de enfriamiento, se han buscado combustibles alternativos, además de emplear adiciones minerales que, molidas junto con el clínker, dan lugar a cementos de prestaciones similares o mejoradas, lo que reduce la fabricación de clínker. Todas estas mejoras reducen las emisiones específicas de fabricación de cemento por energía consumida y producto.

4.1.3. Ruidos y vibraciones

El ruido, en determinadas circunstancias, como puede ser la proximidad de la planta, o de la cantera, a núcleos habitados o espacios de interés natural, puede ser un aspecto ambiental significativo en este sector industrial.

El ruido generado por las actividades industriales en la producción de cemento tiene su origen principalmente en el funcionamiento de la maquinaria, y en las voladuras de las canteras (en el caso de fábricas integradas). Los equipos mecánicos (molinos, transportadores de cadenas, enfriadores de satélites, etc.) generan ruido como consecuencia de la fricción y choque entre materiales sólidos. Los

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

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

- Tipo de fuente emisora de ruido.
- Intensidad del ruido.
- Frecuencia del sonido: graves/agudos.
- Ubicación del equipo y disponibilidad de espacio.

Tres son las formas de combatir las emisiones de ruidos:

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

Las medidas que habitualmente se adoptan a nivel industrial son los cerramientos, las barreras acústicas, el capotaje de las cintas transportadoras, la colocación de material absorbente y los silenciadores. La medida más habitual para combatir el ruido generado por los molinos y compresores es la instalación de cerramientos insonorizados con material aislante y/o absorbente, que reduce la transmisión al exterior de los elevados niveles de intensidad sonora producidos en este tipo de instalaciones. En los ventiladores se actúa con la instalación de silenciadores.

4.1.4. Olores

La emisión de malos olores dependerá básicamente de un contenido elevado en azufre en las materias primas y combustibles, pero generalmente no se considera un impacto significativo.

4.2. FUENTES DE GENERACIÓN DE VERTIDOS LÍQUIDOS Y SU CONTROL

Las aguas derivadas de esta actividad son de tres tipos: aguas residuales, que están constituidas por aguas sanitarias, aguas de limpieza de las instalaciones y servicios auxiliares (laboratorio); aguas de refrigeración generadas en las purgas del sistema de circuito cerrado (que pueden incluir aguas de regeneración de los equipos de intercambio iónico o de las de rechazo de la osmosis inversa); y las aguas pluviales, que son recogidas con una red de colectores independientes.

Las aguas generadas por el proceso de fabricación del cemento, que no son evaporadas en el horno, se recirculan al proceso. El agua de filtrado procedente del filtro prensa en el proceso semihúmedo se recoge y trata mediante métodos físicos y químicos, previamente a su descarga al medio receptor.

Generalmente las aguas de vertido de esta actividad tienen una incidencia poco significativa en su entorno, si bien siempre se debe tener en cuenta las características específicas del medio hídrico receptor.

4.3. FUENTES DE GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS Y SU CONTROL

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

- Materiales fuera de especificaciones, que son desechados de las materias primas durante la preparación del crudo, y,
- partículas provenientes del by-pass o del filtro, que no puedan ser recirculadas al proceso.

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

- Aceites usados y grasas de lubricación.
- Líquidos dieléctricos de transformadores eléctricos.
- Otros líquidos.

4.4. CONSUMO DE ENERGÍA

La industria del cemento se caracteriza por ser una industria intensiva en energía, junto con la industria del papel, acero y petroquímica. El coste de la energía en la producción del cemento portland se sitúa entre el 20 y el 30 % del los costes totales. Si se reduce el gasto energético repercute inmediatamente en beneficios económicos y medioambientales, por lo que la optimización del consumo de energía es un objetivo prioritario en la industria del cemento.

Un aumento de la eficiencia energética conlleva siempre una disminución de todas las emisiones asociadas al proceso de combustión (NO_x , SO_2 , CO_2 , CO y metales pesados). No obstante la reducción de estas emisiones no se debe considerar proporcional a la reducción del consumo energético, puesto que pueden depender también de las materias primas y los procesos asociados.

Por lo que respecta a las emisiones de CO_2 , más de la mitad de estas emisiones asociadas a la producción de cemento son resultado de la descarbonatación de las materias primas cálcicas y por tanto éstas son independientes del proceso de combustión. Si se usaran combustibles considerados de emisión cero (como los biocombustibles) para el proceso térmico, las emisiones de CO_2 sólo podrían ser reducidas en un 54 %.

4.4.1. Principales consumidores energéticos en el proceso de fabricación del cemento

4.4.1.1. Extracción de la materia prima

Las principales materias primas de la industria del cemento son la piedra caliza y arcilla. Generalmente la materia prima principal (piedra caliza) se extrae de una explotación minera adyacente o muy cercana a la planta.

El material extraído se selecciona, tritura, muele y mezcla para conseguir la granulometría y composición química adecuada para el proceso térmico en el horno de clínker. Todo este proceso consume alrededor de 8,8 kWh/t de materia prima, en donde el 88 % de la energía es consumida en el proceso de extracción, y el 12 % restante en el proceso de trituración. Cabe considerar que al menos se requieren 1,5-1,75 toneladas de materia prima por cada tonelada de cemento.

4.4.1.2. Preparación de la materia prima

Una vez el mineral se ha mezclado en las proporciones adecuadas con aditivos correctores y/o algún tipo de residuo de origen industrial se procede a su molienda. Esta molienda puede ser húmeda o seca en función del tipo de horno que exista en la planta.

La molienda y preparación de la materia prima consume entre 25 y 35 kWh/t dependiendo del tipo de molienda; siendo inferior el gasto eléctrico en el caso de molienda húmeda respecto a la seca. La eficiencia de los procesos de molienda es difícil de evaluar, pues es muy complicado estimar cuánto trabajo es necesario para alcanzar una determinada granulometría. Esta eficiencia se sitúa entre 6% y el 25 %; al tratarse de consumo de energía eléctrica, un aumento de la eficiencia en el proceso conlleva una disminución de las pérdidas asociadas a las líneas de transmisión y la generación eléctrica.

Uno de los aspectos a tener en cuenta en cuanto a la preparación de las materias primas para su entrada en el horno, es el contenido en humedad de ésta. Como ya se ha comentado en el apartado 4. Descripción de los procesos, cuando la materia prima contiene más de un 20 % de agua, es preferible el proceso húmedo. Si bien el proceso húmedo disminuye la emisión de polvo, requiere energía térmica adicional para eliminar con posterioridad el agua de la materia prima. Generalmente la pasta que alimenta el horno en proceso en vía húmeda tiene un contenido en agua del 36 %, mientras que cuando el proceso es en vía semihúmeda, este contenido varía entre 17 % y 22 %, traduciéndose en un ahorro de energía térmica en la producción de clínker.

4.4.1.3. Producción del clínker

La producción del clínker es el proceso más intensivo en energía, sumando más del 90 % del consumo total de la industria del cemento. En esta etapa se utiliza la energía térmica para:

- Calentamiento de la materia prima.
- Evaporación de la humedad libre.
- Calcinación de los componentes carbonatados.
- Proceso de clinkerización.

El consumo de energía térmica es muy dependiente del tipo de proceso que se utilice para fabricar el clínker, más concretamente del porcentaje de humedad en términos generales hay que hacer la distinción entre proceso seco y húmedo.

Proceso húmedo

En un horno rotatorio húmedo, la alimentación suele contener un 36 % de agua. Estos hornos fueron desarrollados como alternativa a los hornos largos secos para mejorar el control sobre el grado de finura del crudo de alimentación. El consumo energético en este tipo de hornos varía entre 5,3 GJ/t de clínker y 7,1 GJ/t de clínker (31 % - 25 % de eficiencia térmica). Este intervalo es consecuencia de la variabilidad que existe en el contenido de agua en la alimentación de crudo y la energía necesaria para su evaporación.

Proceso seco

En un horno seco, el contenido en agua del crudo de alimentación es del 0,5 %, y por tanto se reducen las necesidades energéticas para evaporar el agua y se acorta la longitud del horno rotatorio. El consumo típico de un horno con 4/5 etapas de ciclones de precalentamiento oscila entre 3,2 GJ/t y 3,5 GJ/t de clínker (55-50 % de eficiencia), mientras que un horno con seis etapas de precalentamiento consume teóricamente 2,9-3.0 GJ/t de clínker. Los hornos más eficientes con precalcinador y precalentador utilizan 2,9 GJ/t de clínker en el proceso, alcanzando el 60 % de eficiencia térmica.

4.4.1.4. Molienda del cemento

El consumo de energía depende del área superficial requerida del producto (finura) y los aditivos usados. El consumo de energía eléctrica requerida en la etapa de molienda final depende fuertemente de la dureza de la materia prima (caliza, clínker, puzolana, etc.) y la finura requerida del producto final, así como la cantidad de aditivos usados. La ceniza de alto horno es un material duro que requiere más energía en la molienda; entre 50 y 70 kWh/t de material para 3.500 Blaine (cm²/g).

Tradicionalmente, el molino de bolas es el más utilizado para realizar esta molienda, de los descritos en el punto 3.2.5. Los molinos de bolas modernos usan entre 32 y 37 kWh/t para conseguir una finura de 3.500 Blaine (cm²/g).

4.4.1.5. Expedición

En esta etapa se consume energía adicional en las cintas transportadoras y en el sistema de empaquetado. Generalmente estos consumos son bajos y no superan el 5 % del consumo total de energía en la producción de cemento.

El gasto energético estimado para los sistemas auxiliares se sitúa en 10 kWh/t de clínker.

4.4.1.6. Tabla resumen

A continuación se recogen las características y los rangos de consumo energético en el proceso de elaboración del cemento para los procesos húmedo, semi-húmedo, semi-seco, seco largo, SP (precalentador de ciclones) y NSP (precalentador de ciclones con precalcinador).

Un caso más concreto y desglosado del consumo energético en función de la tecnología empleada (Húmeda, SP y NSP), se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4.4.1. Características y consumo de energía por tipo de proceso.

	Húmedo	Semi-húmedo	Semi-seco	Seco largo	SP	NSP
Consumo específico de calor [GJ/t]	5,0-7,5	3,4-4	3,2-3,9	3,6-4,5	3,1-3,5	3,1-3,2
Consumo eléctrico específico [MWh/t]	0,025	0,03	0,03	0,025	0,022	0,022
Capacidad del horno [t/d]	300-3.600	300-5.000	300-2.000	300-2.800	300-4.000	2000-13.000
Alimentación	Pasta	Torta de filtrado	Materia prima paletizada	Materia prima seca	Materia prima seca	Materia prima seca
Porcentaje de humedad [%]	28-43	16-21	10-12	0,5-1,0	0,5-1,0	0,5-1,0
Tipo de horno	Largo	Largo/Lepol	Largo/Lepol	Largo	Corto	Corto
Dispositivos de intercambio de calor	—	Ciclones/precalentador de parrilla	Ciclones/precalentador de parrilla	—	Precalentador de ciclones	Precalentador de ciclones

Fuente: Ipts, 2003

Tabla 4.4.2. Tabla resumen de consumos en GJ/t_{cli}.

CONSUMIDOR	TIPO DE PROCESO					
	HÚMEDO		SECO –(SP)		SECO – (NSP)	
	GJ/t cli	%	GJ/t cli	%	GJ/t cli	%
Teórico (%=rendimiento térmico sobre del horneado)	1,78	30,5	1,83	36,6	1,76	49,9
Pérdida gases de salida	0,75	12,1	1,38	27,7	0,50	14,1
Evaporación de la mezcla	2,24	35,9	0,30	6,0	0,24	6,7
Polvo en los gases de salida	0,01	0,2	0,01	0,3	0,00	0,0
Descarga de clínker	0,06	0,9	0,06	1,2	0,07	1,9
Gases de salida enfriamiento de clínker	0,19	3,0	0,59	11,8	0,61	17,4
Pérdidas pared del horno	0,68	10,9	0,61	12,2	0,18	5,0
Consumos varios	0,09	1,4	0,19	3,8	0,17	4,9
TOTAL CONSUMO DE HORNO	5,84	93,7	4,99	92,7	3,53	90,0
Extracción de materia prima	0,03	0,5	0,03	0,6	0,03	0,8
Preparación/molienda de materia prima	0,11	1,7	0,11	2,0	0,11	2,8
Molienda del cemento	0,22	3,5	0,22	4,0	0,22	5,5
Expedición	0,04	0,6	0,04	0,7	0,04	0,9
TOTAL CONSUMO DE LA PLANTA	6,23	100,0%	5,38	100,0%	3,92	100,0%

Fuente: The Rotary Cement Kiln, Chemical Publishing Co., Inc.; CEMBUREAU y otros.

(SF: Suspension Furnace –Precaentamiento / PC: Precalciner – Precalcinerador)

4.5. CONSUMO DE AGUA

Dependiendo del proceso productivo, la industria del cemento puede ser caracterizada por ser gran consumidora de agua. Este es el caso del proceso por vía húmeda o semihúmeda. No obstante, las características de dichos procesos no implican prácticamente generación de vertidos líquidos.

En las fábricas de cemento se necesitan unos 0,6 m³ de agua por tonelada de cemento para la refrigeración de las máquinas. La mayor parte de esta agua se suele encontrar en circulación, por lo que sólo hay que reponer las pérdidas.

A parte del uso de agua para la refrigeración de las máquinas, en los procesos en vía húmeda o semihúmeda, hay un elevado consumo de agua en la etapa de la molienda de las materias primas, puesto que se adiciona agua para formar una pasta que será introducida al horno. Siendo esta adición de agua normalmente de 400 a 600 litros de agua por tonelada de materia seca para el caso de molienda en molinos de bolas y de 500 a 800 l/t materia seca para la molienda de la materia prima en molinos lavadores.

Puesto que a mayor contenido en agua en la pasta mayor será el consumo energético requerido en el horno, se debe reducir dicho consumo, de manera que sea la mínima posible que permita el flujo requerido y las características necesarias de la pasta para su bombeo.

Como se puede observar en la tabla 4.5.1., el proceso de vía semihúmeda presenta una reducción del 60 % del consumo de agua respecto al de vía húmeda, no obstante, requiere un aporte medio de 0,26 m³ de agua por tonelada de clínker.

Tabla 4.5.1. Consumo de agua en función del tipo de horno.

TIPO DE HORNO	CONSUMO DE AGUA (m ³ /t de clínker)	OBSERVACIONES
Largo de vía húmeda	0,65 – 0,85	Para aumentar la fluidez de la pasta
De vía semihúmeda y semiseca	0,17 – 0,35	
De vía seca	Ninguno	

Fuente: Cembureau

4.6. USO DE RESIDUOS INDUSTRIALES COMO MATERIAS PRIMAS O COMBUSTIBLES

Desde mediados de los ochenta, las materias primas y los combustibles alternativos derivados de procesos industriales, han sido utilizados en la industria del cemento.

La correcta utilización de materias primas y combustibles alternativos, así como las adiciones minerales en las plantas de cemento, presenta bastantes ventajas medioambientales y socio-económicas (ver 4.6.1. *Beneficios medioambientales* y 4.6.2. *Beneficios socio-económicos*); por lo que los hornos de cemento juegan un papel importante, tanto económica como ecológicamente, en programas de reciclaje y valorización.

4.6.1. Beneficios medioambientales

Conservación del medio natural

Los hornos de cemento hacen uso tanto del contenido calorífico como del mineral de los materiales alternativos. Combustibles fósiles como el carbón o crudo de petróleo, son sustituidos por otros materiales, que de no ser utilizados en el proceso de producción del cemento, serían vertidos o incinerados.

La parte mineral de los combustibles alternativos (cenizas) así como los residuos industriales no combustibles, o subproductos, pueden sustituir en parte la materia prima natural (caliza, arcilla, etc.). Prácticamente todos los componentes de estos materiales quedan introducidos en el producto, y – salvo pocas excepciones- no se generan residuos.

El uso de las adiciones minerales procedentes de otros procesos industriales, como sustitutos del clínker, reduce tanto el consumo de recursos naturales de materias primas, como recursos de energía, puesto que se reduce el consumo intenso de energía que requiere la producción de clínker.

Protección de la atmósfera

Considerando las características especiales del proceso de cocción, las emisiones procedentes del horno de cemento son independientes de las características de los combustibles. La utilización de residuos industriales como combustibles en las plantas de cemento elimina las emisiones correspondientes procedentes de plantas incineradoras y vertederos, y permite no generar nuevas emisiones.

Protección de aguas superficiales y subsuelo

Debido al uso de los residuos industriales como combustibles en el proceso de cemento, estos residuos no son llevados a vertederos, por lo que se elimina la generación de efluentes líquidos y de gases contaminantes en vertederos, reduciendo así el riesgo de contaminación.

Reducciones de gases de efecto invernadero

Mediante la sustitución de los combustibles fósiles por combustibles alternativos (renovables) se reduce la emisión global de CO₂ de origen térmico (neutralidad del CO₂). Un ratio de sustitución térmica del 40 % en una planta de cemento con una producción anual de un millón de toneladas de clínker, reduce la generación neta de CO₂ en unas 100.000 toneladas.

Aún más importante resulta la sustitución del clínker por adiciones minerales, reduciéndose tanto la formación de CO₂ de combustión de los combustibles fósiles, como el CO₂ generado de la descarbonatación de la materia prima.

Además, el uso de materias primas y combustibles alternativos, así como adiciones minerales, contribuyen significativamente al programa mundial de reducción de gases de efecto invernadero.

Generación eléctrica

Mediante una utilización apropiada de residuos, los hornos de cemento contribuyen al suministro eléctrico o térmico de energía, reduciendo el consumo de recursos naturales y reduciendo la emisión global de CO₂.

4.6.2. Beneficios socio-económicos

Reducción de tasas de depósitos controlados de residuos

Las plantas cementeras se benefician económicamente con el uso de residuos industriales, puesto que no sólo se ahorran el coste de la materia prima sustituida, sino que reciben una remuneración por su gestión, ofreciendo un precio competitivo a un menor coste que el requerido para su deposición en vertederos o tratamiento en incineradoras especializadas. Además se reduce la inversión pública requerida para la instalación de plantas incineradoras.

Reducción de requerimientos de tierra

Mediante la integración de hornos de cemento en programas nacionales de gestión de residuos se reduce el requerimiento de tierra adicional para vertedero.

Inversiones en Tecnologías Limpias

Los materiales sustitutivos procedentes de corrientes residuales generalmente reducen el coste de producción de cemento, reforzando la posición de la industria particularmente con relación a las importaciones de países con legislaciones ambientales menos restrictivas. Esto facilita también el desarrollo de la industria en tecnologías más limpias de emisiones a la atmósfera.

5. OPORTUNIDADES PARA PREVENIR Y REDUCIR LA CONTAMINACIÓN

El objetivo del presente capítulo es proporcionar un elemento de reflexión para los técnicos y dirección de las industrias del sector del cemento sobre sus propios procesos y alternativas tecnológicas más respetuosas con el medio ambiente, así como proporcionar una guía a las autoridades competentes para establecer políticas concretas que impulsen mejoras ambientales.

Para ello, el presente capítulo recoge la información disponible sobre las alternativas tecnológicas de prevención en origen y reducción de la contaminación en la industria del cemento para los países del Plan de Acción para el Mediterráneo. Para su determinación el esquema seguido ha sido realizar un análisis de las diferentes técnicas que pueden tener un efecto de reducción de las emisiones y el consumo de energía que se produce durante la fabricación del cemento, en concreto, de los niveles de reducción esperados con la aplicación de la técnica, la aplicabilidad real de la misma y los costes de inversión y operación, así como los inconvenientes encontrados durante el funcionamiento a escala industrial.

Las alternativas tecnológicas propuestas varían desde modificaciones de los sistemas tradicionales de producción proponiendo, en algunos casos, sistemas alternativos a determinados procesos de producción u operaciones unitarias, hasta alternativas para el control de las emisiones finales de dichas instalaciones. Asimismo, las alternativas tecnológicas propuestas se complementan con otras medidas de carácter general basadas en las buenas prácticas y en la motivación del personal que permiten, en su conjunto, la optimización de cada instalación industrial.

Se han clasificado las alternativas de la siguiente manera:

- Alternativas tecnológicas de carácter general.
- Alternativas tecnológicas para una correcta gestión de la energía.
- Alternativas tecnológicas para el control de las emisiones de NO_x.
- Alternativas tecnológicas para el control de las emisiones de SO₂.
- Alternativas tecnológicas para el control de emisiones de partículas.
- Alternativas tecnológicas para el control de COV's.
- Alternativas tecnológicas para el control de PCDD/F.
- Alternativas tecnológicas para el control de emisiones de metales.
- Alternativas tecnológicas para el control de emisiones de CO₂.
- Alternativas tecnológicas para el control de olores.
- Alternativas tecnológicas para el control del ruido.
- Alternativas tecnológicas para el control de vibraciones.
- Alternativas tecnológicas para el control de residuos.
- Técnicas emergentes.

Se definen todas estas alternativas y se presentan algunas de ellas en forma de ficha (por ser una alternativa importante a destacar, ver 5.1.1. *Ficha teórica*), detallando, en la medida de lo posible, tanto una descripción de la misma como los beneficios ambientales y económicos de su implantación,

así como su coste de inversión en plantas nuevas y plantas existentes. Las alternativas que se presentan no son excluyentes ni son las únicas posibles sino que, en general, las fábricas adoptan varias medidas de forma simultánea, como se describe en los casos prácticos.

Los datos económicos presentados se han tomado del documento de referencia BREF (Reference Document on Best Available Techniques in the Lime and Cement Manufacturing Industries, año 2000), del Documento de BAT (Best Available Techniques de Cembureau año 1997) y del documento "The Impact of Best Available Techniques (BAT) on the Competitiveness of the European Cement Industry", año 2001. Estos datos son sólo indicativos y se presentan a modo de referencia del orden de magnitud de las distintas alternativas, normalmente se expresa en millones de euros (M.€). Los costes de inversión no incluyen costes adicionales para el equipamiento o construcciones civiles necesarias para la implantación de la medida.

Se debe tener en cuenta que la aplicación de estas medidas en una planta nueva presenta aspectos totalmente diferentes a la aplicación de estas medidas en plantas existentes. Además la aplicación de estas técnicas está muy condicionada por aspectos locales propios de cada fábrica, por lo que la información suministrada en este capítulo no puede ser considerada aplicable a todas y cada una de las instalaciones de fabricación, ni en lo que se refiere a la posibilidad práctica de aplicar las técnicas, ni en los niveles de emisión asociados.

Se han considerado también como plantas nuevas aquellas plantas que emprenden mejoras a elevados costes, como por ejemplo incrementos significativos de la capacidad y/o realizando cambios en los procesos. Por el contrario, las plantas que llevan mejoras de inversiones limitadas, como modernización de áreas o equipos limitados, se consideran como rehabilitaciones en la misma categoría que plantas existentes.

FICHA TEÓRICA	
Actuación	Actuación: prevención en origen (sustitución de materias primas, cambios tecnológicos, Buenas Prácticas Ambientales) o tratamiento final.
Etapa del proceso	Etapa u operación en la que se aplica la Alternativa. En el Proceso de producción del cemento se pueden diferenciar las siguientes etapas: Obtención de la materias primas, preparación y almacenamiento de las materias primas, preparación y almacenamiento de los combustibles, cocción del clínker, molienda y almacenamiento del cemento, expedición.
Problemática medioambiental	Afecciones más importantes sobre el medio ambiente que se realizan con el proceso productivo original, éstas se minimizan o disminuyen con la aplicación de la Alternativa.
Beneficios ambientales de la Alternativa	Principales ventajas que se obtienen con la aplicación de la Alternativa.
Descripción	Bases científicas y tecnológicas en las que se basa la Alternativa, y descripción de su funcionamiento.
Procedimiento	Descripción de las aplicaciones más utilizadas para la integración de la Alternativa en el proceso productivo.
Comentarios	Información adicional complementaria de los apartados anteriores
Aspectos económicos	Siempre que sea posible, se realizará una orientación económica de los costes de implantación y funcionamiento de las Alternativas. Los datos que se presentan se han tomado del documento de referencia: BREF, Reference Document on Best Available Techniques in Cement Industry (2001).

5.1. ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS DE CARÁCTER GENERAL

Además de la proximidad de la planta de producción, tanto como sea posible, a la planta de extracción para evitar los impactos ambientales asociados al transporte de las materias primas (consumo de energía, emisiones de los vehículos, emisiones difusas de partículas a la atmósfera y ruido), existen algunas alternativas tecnológicas disponibles para la fabricación de cemento que incluyen una serie de medidas primarias generales:

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

Alternativa	5.1.1. OPTIMIZACIÓN DEL CONTROL DE PROCESO
Actuación	Actuación: Prevención en origen de la contaminación. Buenas Prácticas Ambientales.
Etapa del proceso	Proceso de Producción del cemento.
Problemática medioambiental	Generación de emisiones a la atmósfera y consumo energético.
Beneficios ambientales de la alternativa	Los principales beneficios de la aplicación de esta alternativa son: <ul style="list-style-type: none"> • Reducción del consumo de combustible. • Menor consumo energético. • Reducción de las emisiones a la atmósfera (partículas, NO_x, SO₂, CO, etc.).
Descripción	La optimización del proceso de producción de cemento implica el control del flujo de material a través del sistema de producción. Los resultados suministrados por el laboratorio, como efecto de los análisis realizados periódicamente en varios puntos del proceso de producción, proporcionan la información oportuna para el ajuste de los puntos clave en planta y sistemas de control. El grado de automatización varía entre la opción de automatización total, desde el tratamiento de la muestra hasta el análisis incluyendo los ajustes de los parámetros del proceso de producción, y parcial en el ámbito de laboratorio.

	<p>La exigencia de precisión y reproducibilidad analítica y una eficiencia creciente de los laboratorios han motivado a una inversión en laboratorios automatizados originando datos con información de calidad sobre las materias primas, combustible, proceso y producto final.</p> <p>La optimización del proceso de clinkerización mediante la estabilización de los parámetros del proceso se hace normalmente para reducir el consumo específico de combustible, para aumentar la calidad del clínker y para incrementar el tiempo de vida de los equipos (el revestimiento refractario, por ejemplo).</p> <p>La reducción de emisiones tales como partículas, NO_x y SO₂, es un efecto secundario consecuencia de esta optimización. Un funcionamiento suave y estable del horno, con los parámetros del proceso próximos a los valores de diseño, proporciona beneficios durante el funcionamiento del horno, y genera menos emisiones.</p> <p>La optimización incluye medidas como:</p> <ul style="list-style-type: none"> • La homogeneización de las materias primas. • La seguridad de la dosificación uniforme de combustible. • La optimización del funcionamiento del enfriador. <p>Así mismo, para asegurar que la velocidad de alimentación del combustible sólido es uniforme, con mínimas puntas, es esencial tener buenos diseños de tolvas, cintas transportadoras y alimentadores, así como un sistema moderno de alimentación gravimétrica de combustible sólido.</p>
<p>Procedimiento</p>	<p>La reducción de temperatura de llama, la disminución de combustible, así como la formación de zonas de atmósfera reductora en el horno, proporciona menores emisiones de NO_x. El control del contenido en oxígeno es crítico para el control de NO_x. Generalmente cuanto menor contenido de oxígeno en el extremo final de un horno, menos NO_x se produce. Sin embargo, se debe llegar a un equilibrio entre la generación de NO_x y la generación de CO y SO₂, puesto que al disminuir el porcentaje de oxígeno se aumenta la generación de CO y SO₂.</p> <p>Aplicando técnicas de optimización del control del proceso se han documentado reducciones de NO_x de hasta un 30 %. No obstante, la experiencia de aplicación de sistemas de optimización de proceso indica que la reducción de las emisiones de NO_x tiene valores más modestos y no resulta cuantificable a priori, por depender de las emisiones de partida y otros muchos factores.</p> <p>La reducción de las emisiones de SO₂ se origina por la disminución de su volatilidad a menores temperaturas de llama y de combustión, y por la atmósfera oxidante en el horno, junto con un funcionamiento estable del mismo. El efecto positivo del control del proceso sobre las emisiones de SO₂ es marginal para hornos con precalentadores aunque es considerable para hornos largos (vía seca y húmeda), en los que se han documentado reducciones en las emisiones de SO₂ de hasta un 50 % [Cembureau, 1997].</p> <p>En hornos con precipitadores electrostáticos se reducen las emisiones de partículas, y, de esta manera, también se reducen las emisiones de cualquier sustancia absorbida por las dichas partículas, como por ejemplo los metales.</p>
<p>Comentarios</p>	<p>La optimización del funcionamiento del horno se puede aplicar a todos los tipos de hornos e incluye muchos factores, desde la formación de los operadores del horno hasta la instalación de nuevos equipos, como sistemas de dosificación, silos de homogeneización, lechos de premezcla o modificaciones del enfriador de clínker.</p>

Aspectos económicos	<p>El coste de estas medidas, por tanto, es muy variable, oscilando entre 0 y 5 millones de euros [Cembureau, 1997]. La efectividad de estas medidas es también muy variable en función de cada instalación, de los niveles de partida de las emisiones, y de otros muchos factores.</p> <p>Varios suministradores de equipos para la industria del cemento han desarrollado sistemas expertos de control basados generalmente en el control de la combustión tomando como referencia los niveles de NO_x. La inversión requerida para un sistema computerizado del control de alto nivel es de 300.000 € aproximadamente, pudiendo ser necesaria una inversión adicional para instalar los sistemas requeridos de dosificación y medición en la planta [Cembureau, 1997].</p>
---------------------	--

Alternativa	5.1.2. ADECUACIÓN Y CONTROL DE LAS SUSTANCIAS QUE ENTRAN AL PROCESO
Actuación	Actuación: Prevención en origen de la contaminación. Buenas Prácticas Ambientales, y/o sustitución de materias primas.
Etapa del proceso	Proceso de producción del cemento.
Problemática medioambiental	Generación de emisiones a la atmósfera.
Beneficios ambientales de la alternativa	Reducción de la generación de emisiones a la atmósfera.
Descripción	Elección y control de las sustancias que entran al proceso tanto como materias primas, como combustibles.
Procedimiento	Algunos combustibles y materias primas pueden tener elevados contenidos en nitrógeno, azufre, metales pesados, o compuestos orgánicos que afectan a las emisiones de NO _x , SO ₂ , metales pesados o COV's respectivamente. Mediante la aplicación de esta técnica, eligiendo materias primas y combustibles adecuados, se puede evitar la generación de dichas emisiones.
Comentarios	El estado físico de los combustibles también afecta a la generación de NO _x . Así, por ejemplo, los combustibles líquidos se pueden controlar más fácilmente y tienden a generar menores emisiones de NO _x que los combustibles sólidos, debido a la reducción de formación del punto caliente. Para los combustibles sólidos, la evolución del NO _x térmico parece estar relacionado con la granulometría, de manera que cuanto menor es dicha granulometría, menores son las emisiones de NO _x , de nuevo, probablemente relacionado con la formación del punto caliente. Por lo que es importante controlar la granulometría del combustible.
Aspectos económicos	No se puede dar una estimación del coste económico, puesto que depende en gran medida del mercado de materias primas y combustibles.

Alternativa	5.1.3. REDUCCIÓN DEL CONSUMO DE RECURSOS NATURALES (MATERIAS PRIMAS)
Actuación	Actuación: Prevención en origen de la contaminación. Buenas Prácticas Ambientales, sustitución de materias primas.
Etapa del proceso	Proceso de producción del cemento.
Problemática medioambiental	Consumo de recursos naturales, impacto ambiental debido a la deposición de residuos industriales en vertederos.
Beneficios ambientales de la alternativa	Reducción del consumo de recursos naturales. Elimina el impacto visual generado por la deposición de los residuos en los vertederos.
Descripción	El máximo aprovechamiento de los materiales que se emplean en la fabricación del cemento, así como la utilización de residuos de otros procesos industriales como sustitutos, reduce el consumo total de materias primas.
Procedimiento	<p>La industria cementera emplea ciertos residuos y subproductos minerales de composición similar a la de sus materias primas o que incluso mejoran las prestaciones de los cementos. Dadas las enormes cantidades de materias primas que procesa el sector, este reciclaje supone un gran ahorro de recursos naturales y evita el vertido de grandes volúmenes de materiales aprovechables.</p> <p>La utilización de residuos y subproductos minerales como materia prima en el proceso cementero aporta las siguientes ventajas al entorno:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Reduce la explotación de canteras, sustituyendo recursos naturales por residuos. • Evita la ocupación de vertederos y sus impactos asociados. <p>Otro ejemplo de aprovechamiento de subproductos es la utilización del polvo captado en el filtro del horno de clínker reintroduciéndolo al proceso en la molienda de crudo.</p>
Comentarios	<p>Los materiales susceptibles de ser empleados como materias primas pueden ser subproductos de otros procesos industriales tales como:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cenizas de piritas, por su alto contenido en hierro. • Escorias seca de alto horno. • Lodos de papelera, por su alto contenido en carbonato cálcico. • Arenas de fundición, por su alto contenido en óxido de silicio. • Residuos de demolición, de naturaleza cálcica o silíceas. <p>El empleo de residuos aptos para sustituir a las materias primas reduce el consumo de recursos naturales, pero es conveniente hacerlo siempre con un control adecuado de las sustancias que se introducen en el horno.</p>
Aspectos económicos	Las plantas cementeras cobran por la gestión de residuos. Al ahorrarse el coste de la materia prima sustituida, pueden ofrecer un precio competitivo respecto a la deposición en vertederos o tratamiento en incineradoras especializadas. No obstante en el arco mediterráneo se detectan unos bajos precios de vertido que hacen que ninguna tecnología de gestión de residuos sea competitiva contra los vertederos, incumpliendo así, la jerarquía de gestión de residuos.

Alternativa	5.1.4. REDUCCIÓN DEL RATIO CLÍNKER/CEMENTO
Actuación	Actuación: Prevención en origen de la contaminación. Buenas Prácticas Ambientales.
Etapa del proceso	Molienda del cemento.
Problemática medioambiental	Generación de emisiones a la atmósfera y consumo energético.
Beneficios ambientales de la alternativa	Reducción del consumo de energía y de la generación de emisiones a la atmósfera. Elimina el impacto visual generado por la deposición de los residuos en los vertederos.
Descripción	Esta técnica permite reducir el consumo de energía y las emisiones de la industria del cemento, expresada por unidad de cemento producido, mediante la reducción del contenido de clínker por tonelada de cemento.
Procedimiento	<p>Determinados materiales son susceptibles de ser utilizados como componentes en la molienda de cemento (como adiciones al clínker) puesto que mejoran sus propiedades, tales como la trabajabilidad, retención de agua, durabilidad, resistencia mecánica, resistencia a sulfatos, resistencia al hielo, etc.</p> <p>Así, por tanto, la adición de minerales en la molienda de cemento, reduce la producción de clínker, por lo que constituye una reducción de las emisiones totales por unidad de cemento producido.</p> <p>La utilización de residuos y subproductos minerales como adiciones al clínker en el proceso cementero aporta las siguientes ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Disminuye el consumo energético al fabricar menos clínker gracias al uso de las adiciones. • Reducción de las emisiones a la atmósfera al disminuir el consumo de combustibles.
Comentarios	<p>Los materiales susceptibles de ser empleados como sustitutos al clínker pueden ser naturales o provenir de subproductos de otros procesos industriales tales como:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Puzolanas naturales o industriales, • cenizas volantes de central térmica, • escoria de horno alto, • humo de sílice de la industria de ferroatomociones, • esquistos calcinados,
Aspectos económicos	<p>Mediante el uso de adiciones naturales o residuos industriales como sustitutos al clínker se obtiene un beneficio económico debido al ahorro del coste de energía para la producción del clínker sustituido.</p> <p>Las plantas cementeras cobran por la gestión de residuos. Al ahorrarse el coste de la materia prima sustituida, pueden ofrecer un precio competitivo respecto a la, deposición en vertederos o tratamiento en incineradoras especializadas. No obstante en el arco mediterráneo se detectan unos bajos precios de vertido que hacen que ninguna tecnología de gestión de residuos sea competitiva contra los vertederos, incumpliendo así, la jerarquía de gestión de residuos.</p>

5.2. ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA UNA CORRECTA GESTIÓN DE LA ENERGÍA

Las mayores oportunidades existentes para aumentar la eficiencia energética del proceso de fabricación de cemento se sitúan en la etapa de cocción del clínker:

- Medidas integrales de optimización energética del proceso.
- Mejoras del proceso en vía seca.
- Precalentadores en suspensión.
- Enfriador de parrilla de vaivén moderno.

Además se pueden considerar oportunidades de optimización del consumo de energía en los procesos de trituración y molienda:

- Tecnologías de molienda para preparación de las materias primas.
- Molienda de rodillos para la preparación del combustible.
- Medidas integrales de optimización energética de la molienda final del cemento.

Asimismo, existe la posibilidad de la reformulación del producto con objeto de mejorar la eficiencia energética (ver apartado 5.1. *Alternativas Tecnológicas de Carácter General*):

- Contenido en álcalis del cemento.
- Reducción del ratio clínker/cemento.

En la siguiente tabla, de forma resumida, se recogen las posibles transformaciones para mejorar la eficiencia energética que se pueden llevar a cabo en el horno de una planta existente.

Tabla 5.2.1. Posibilidades de transformación de los tipos de horno.

DE / A	Húmedo	Semi-húmedo	Semi-seco	Seco largo	Seco con precalentador	Seco con precalcinador	Vertical
Húmedo		√	√		√	√	
Semi-húmedo					√	√	
Semi-seco					√	√	
Seco largo					√	√	
Seco con precalentador						√	
Seco con precalcinador							
Vertical							√

Fuente: IPTS, 2003

Alternativa	5.2.1. MEDIDAS INTEGRALES DE OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DEL PROCESO
Actuación	Actuación: Prevención en origen de la contaminación. Buenas prácticas ambientales y/o Cambios tecnológicos.
Etapa del proceso	Cocción del clínker.
Problemática medioambiental	Consumo energético.
Beneficios ambientales de la alternativa	<p>Un aumento de la eficiencia energética en la etapa de cocción conlleva siempre una disminución de todas las emisiones asociadas al proceso de combustión de una manera directa (NO_x, SO₂, CO₂), así como una reducción en la utilización de recursos naturales en caso de que éstos se usen como combustible.</p> <p>Asimismo, el ahorro en consumo eléctrico y sus pérdidas asociadas (transporte y generación) repercute indirectamente en la contaminación originada en el proceso de generación eléctrica.</p>
Descripción	Se entiende por medidas de optimización energética del proceso de cocción, aquellas medidas que mejoran la eficiencia energética que se pueden identificar en el proceso. Estas medidas resultan de la realización de una auditoría energética a toda la instalación, identificando posibles oportunidades asociadas a los consumos energéticos mostrados en la tabla 5.4.1.
Procedimiento	<p>Disminución de las pérdidas asociadas a los gases de salida del horno</p> <ul style="list-style-type: none"> • Instalación de dispositivos que aumenten la transferencia de calor de los gases a los materiales • Operación con niveles óptimos de oxígeno. • Optimización de la geometría de la llama del quemador y su temperatura. • Mejorar o añadir capacidad a la etapa de precalentamiento. <p>Reducción de las posibilidades de absorción energética de las materias primas y el combustible (p.e. reducción del contenido de agua)</p> <p>Disminución del contenido de polvo en los gases de salida reduciendo las turbulencias del gas.</p> <p>Disminución de la temperatura de descarga del clínker</p> <p>Reducción de las pérdidas por radiación del horno, usando mezclas correctas y refractarios más eficientes.</p> <p>Reducción de la temperatura de salida de los gases provenientes del enfriador</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mejora de la eficiencia del enfriador (p.e. reducción del exceso de aire, control del espesor de la cama de clínker o introducción de nuevas parrillas). • Recirculación del exceso de aire de enfriamiento. • Utilización del aire de salida para secado de materias primas y combustibles o precalentamiento de combustibles o aire. <p>Disminución de fugas de aire</p> <ul style="list-style-type: none"> • Eliminación de aperturas innecesarias.

	<ul style="list-style-type: none"> • Provisión de sellados energéticamente más eficientes. • Operación con la máxima temperatura de aire primario como sea posible. <p>Medidas generales</p> <ul style="list-style-type: none"> • Existencia de programas de gestión de la energía. • Existencia de programas de mantenimiento (aislantes, sistemas de aire comprimido, etc.). • Motores de alta eficiencia. • Ventiladores de alta eficiencia con motores de velocidad variable. • Optimización de sistemas de aire comprimido.
Comentarios	<p>No todas las medidas se pueden aplicar a todas las plantas. La aplicabilidad depende del estado actual y futuro de la planta.</p> <p>A pesar de que los cambios tecnológicos reducen el consumo de energía, cambios en las costumbres y actitudes del personal empleado en planta pueden tener incluso un impacto mayor en la eficiencia energética.</p>
Aspectos económicos	<p>La inversión puede ser muy variable en función del estado de la planta y las medidas adoptadas.</p> <p>El impacto económico debido al ahorro de energía puede ser doble:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Disminución del combustible o kWh eléctrico consumido por tonelada de clínker. • Disminución de los costes ambientales (como compra de derechos de emisión de CO₂ en los países que corresponda o disminución de costes en los tratamientos finales de la contaminación).

Alternativa	5.2.2. MEJORAS DEL PROCESO EN VÍA SECA
Actuación	Actuación: Prevención en origen de la contaminación. Cambios tecnológicos.
Etapa del proceso	Cocción del clínker.
Problemática medioambiental	Generación de emisiones a la atmósfera y consumo energético.
Beneficios ambientales de la alternativa	Reducción de la generación de emisiones a la atmósfera y aprovechamiento energético.
Descripción	<p>Esta ficha desarrolla las posibles mejoras de reducción de energía térmica en un horno de vía seca ya instalado mediante la adición de un precalentador y un precalcinador en la zona externa al horno:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Conversión de un horno largo de vía seca a un horno con precalentador. • Conversión de un horno con precalentador a uno con precalentador y precalcinador. • Conversión de un horno largo a un horno con precalentador y precalcinador.
Procedimiento	<p>Los hornos largos para procesos en vía seca están prácticamente en desuso. Como se ha comentado en la alternativa anterior, mediante un precalentamiento en una zona externa al horno se consigue que éste sea más corto, por lo que se reducen las pérdidas de calor e incrementa la eficiencia energética del total de la instalación. Este es el caso de los intercambiadores de ciclones previos al horno para los procesos en vía seca. Puede haber varias etapas de ciclones, precalentamiento de 2 etapas, 4 etapas y de 6 etapas las más modernas.</p> <p>Además mediante un precalcinador posterior a los ciclones, se consigue desplazar el proceso de descarbonatación del horno rotatorio, con ello se mejoran los consumos específicos gracias al efecto de la reducción del tamaño del horno y a la mejora de la calidad del intercambio térmico.</p> <p>En la siguiente tabla se recoge el consumo de energía que conlleva cada tipo de horno y se puede observar como disminuye conforme se aumentan las etapas de ciclones, se añade un precalcinador y se instala un enfriador de alta eficiencia.</p>

Tabla 5.2.2 Consumo específico por tipo de horno.

Tipo de Horno	Consumo (MJ/ ton clínker)
Proceso seco	4.500
Precalentador con 1 etapa de ciclones	4.200
Precalentador con 2 etapas de ciclones	3.700
Precalentador con 4 etapas de ciclones	3.350
Precalentador con 4 etapas y precalcinador	3.200
Precalentador con 5 etapas, precalcinador y enfriador de alta eficiencia	3.000
Precalentador con 6 etapas, precalcinador y enfriador de alta eficiencia	2.900

Fuente: Cembureau, 1997 y Cement Industry Federation

Comentarios

- Conversión de horno largo vía seca en un horno con precalentador en X etapas.

La instalación de precalentadores en suspensión de varias etapas reduce las pérdidas de calor existentes en un horno largo equipado con cadenas y esto incrementa la eficiencia energética del sistema.

Con los nuevos precalentadores, la productividad del horno aumenta debido a que se produce el 40 % de la calcinación de la materia antes de entrar al horno. Además la longitud del horno se acorta en un 20-30 % lo que reduce las pérdidas por radiación. Ya que la capacidad de la planta aumenta, el enfriador de clínker deberá ser adaptado conforme al nuevo volumen de producción.

El ahorro energético depende del consumo energético del tipo de horno seco y el número de precalentadores instalados (ver tabla 5.2.2. Consumo específico por tipo de horno).

- Conversión de un horno con precalentador en un horno con precalentador y precalcinador de varias etapas.

La instalación de un precalcinador generalmente provoca el incremento de la capacidad de la planta mientras disminuye el consumo específico de combustible y las emisiones de NOx térmico (debido a la baja temperatura de combustión en el precalcinador).

Generalmente, al realizarse esta conversión se mantiene el horno, la cimentación y las torres, mientras que se sustituyen el enfriador y el precalcinador por otros que se adapten a la nueva capacidad de la planta.

El ahorro de combustible depende fuertemente de la eficiencia del horno existente y de los nuevos parámetros de proceso. (P.e. grado de precalcinación, eficiencia de enfriamiento).

La conversión de un horno rotatorio de una planta de Italia permitió un aumento de la capacidad del 80-100 % (de 1.100 t/d a 2.000-2.200 t/d), mientras se reduce el consumo específico de combustible de 3,06 a 2,63-2,74 GJ/ ton clínker, lo que supone un ahorro del 11-14 % [Sauri, 1993].

	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Conversión de horno largo en un horno con precalentador y precalcinador:</u> <p>Esta opción incluye las dos mejoras anteriormente comentadas realizándolas en un único paso.</p> <p>Si esta conversión es factible económicamente, se estima un ahorro energético de 1,2 GJ/ton de clínker con respecto al horno largo en vía seca.</p>
<p>Aspectos económicos</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Conversión de horno largo en vía seca en un horno con precalentador en X etapas.</u> <p>La conversión de un horno largo puede ser atractiva cuando éste necesite ser reemplazado y si la instalación de un nuevo horno resultara muy cara.</p> <p><i>Vleuven</i> (1994) estima unos costes de 25 \$ por ton/año para la instalación de precalentadores en suspensión.</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Conversión de un horno con precalentador en un horno con precalentador y precalcinador de varias etapas.</u> <p>Para la instalación de un precalentador y precalcinador a partir de un horno con precalentador se estiman unos costes de inversión de 15 \$ por ton/año [LBNL, 2004]. Es posible que con el incremento de la capacidad de producción se ahorre 1 \$/ ton en costes de operación [Jaccard and Willis,1996].</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Conversión de horno largo en un horno con precalentador y precalcinador.</u> <p>Se asume un coste de 25 \$ por ton de clínker/año [LBNL, 2004].</p>

Alternativa	5.2.3. PRECALENTADORES EN SUSPENSIÓN
Actuación	Actuación: Prevención en origen de la contaminación. Cambios tecnológicos.
Etapa del proceso	Cocción del clínker.
Problemática medioambiental	Consumo energético.
Beneficios ambientales de la alternativa	Mayor aprovechamiento energético.
Descripción	La instalación de precalentadores en suspensión reduce el consumo de energía del ventilador de los gases de escape del horno.
Procedimiento	Dependiendo de la eficacia del ventilador, se puede ahorrar entre 0,6-0,7 kWh/ton clínker por cada 50 mm de columna de agua de pérdida de carga reducidos. Para muchos hornos antiguos el ahorro energético, si se instala este tipo de sistema, puede estar entre 0,6-1 kWh/ton de clínker [Birch, 1990].
Comentarios	El inconveniente que puede presentar el sistema es el aumento de la carga de partículas en los gases de salida y por tanto incrementar las partículas arrastradas de la torre del precalentador. Sin embargo, si a continuación de éstos se encuentra en línea el equipo de molienda de materias primas, el problema del arrastre de partículas es menor.
Aspectos económicos	La instalación del sistema puede ser cara, sin embargo, a menudo implica una reconstrucción o la modificación de las torres del precalentador, por lo que los costes son muy variables en función de las condiciones específicas de cada planta. Se estima un coste de 2,8 € por ton de clínker/año [LBNL, 2004].

Alternativa	5.2.4. ENFRIADOR DE PARRILLA DE VAIVÉN MODERNO
Actuación	Actuación: Prevención en origen de la contaminación. Cambios tecnológicos.
Etapa del proceso	Cocción del clínker.
Problemática medioambiental	Consumo energético.
Beneficios ambientales de la alternativa	Mayor aprovechamiento energético.
Descripción	El enfriador de parrilla de vaivén es la variante moderna de los enfriadores, se instalan en casi todas las plantas con hornos modernos de capacidad superior a 10.000 t/d. Recupera más calor que el que recuperan otros tipos de enfriadores.
Procedimiento	<p>Las ventajas del enfriador de parrilla son su gran capacidad (permitiendo grandes capacidades del horno) y la eficiente recuperación del calor (la temperatura del clínker que sale del enfriador puede llegar a ser de 83 °C en vez de 120-200 °C como ocurre en el caso de los enfriadores planetarios) [Vleuten, 1994].</p> <p>Los enfriadores modernos de vaivén incrementan la eficiencia de recuperación de calor en 65 % o más, mientras que se reducen las fluctuaciones de ésta.</p>
Comentarios	La conversión o instalación de esta tecnología es atractiva económicamente cuando se va a instalar un precalcinador o cuando se ha aumentado la capacidad de la planta. Ya que la recuperación de aire terciario necesario para el precalcinador es incompatible con los enfriadores planetarios [Cembureau, 1997], limitando la eficiencia de recuperación de calor.
Aspectos económicos	<p>Es la alternativa preferente para plantas de alta capacidad. Para plantas que producen menos de 500 ton/día este sistema puede ser muy caro.</p> <p>El coste de conversión se estima entre 0,4-5 \$ por ton/año, dependiendo del grado de reconstrucción necesario. Los costes anuales de operación incrementan en 0,1 \$/ton clínker [Jaccard and Willis, 1996].</p>

Alternativa	5.2.5. TECNOLOGÍAS DE MOLIENDA PARA LA PREPARACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS
Actuación	Actuación: Prevención en origen de la contaminación. Cambios tecnológicos.
Etapa del proceso	Preparación de las materias primas.
Problemática medioambiental	Consumo energético.
Beneficios ambientales de la alternativa	Reducción de la generación de emisiones a la atmósfera y aprovechamiento energético.
Descripción	<p>El tradicional molino de bolas que se emplea para la molienda de materias primas puede ser reemplazado por molinos de rodillos de alta eficiencia energética, por molinos de bolas combinados con prensas de rodillo de elevada presión o por molinos de rodillos horizontales. Estas tecnologías ahorran energía sin comprometer la calidad del producto.</p> <p>La elección del sistema de molienda puede variar en diferentes instalaciones en función de múltiples factores. Mientras el consumo energético del molino de bolas es superior, éstos tienen unos costes de operación y mantenimiento inferiores a otros molinos. Los costes de inversión son difícilmente comparables de manera general, ya que juega un papel muy importante las limitaciones específicas del emplazamiento. Otros factores no económicos que afectan a la elección son el contenido en humedad de las materias primas (los molinos verticales pueden secar y moler, mientras que la prensa de rodillos y los molinos horizontales necesitan un secador aparte) y la finura deseada del producto. Algunas opciones consisten en la operación de dos tipos de molinos seguidos con el fin de aprovechar las ventajas de ambos.</p> <p>La instalación de clasificadores y separadores de alta eficiencia en los molinos añade, además, una mejora energética.</p>
Procedimiento	<p><u>Los molinos de rodillo</u> requieren menos energía y tienen una capacidad de secado superior a los molinos de bolas, pero no son apropiados para materiales muy abrasivos.</p> <p>Los molinos de rodillo se construyen con capacidades de procesamiento de hasta 400 t/h y presentan unas necesidades energéticas específicas menores que las de un molino de bolas, alrededor de 10-14 kWh/t., puesto que trabajan con presiones más elevadas y necesitan una alimentación con un contenido de agua relativamente más bajo.</p> <p>Con la instalación de un molino de rodillo vertical u horizontal, se estiman ahorros energéticos de 6-7 kWh/ton de materia prima [LBNL, 2004]. Alcanzándose un ahorro del 20 % si se usa el molino horizontal frente al molino vertical de rodillos [wbcasd, 2002].</p> <p>En la siguiente tabla se muestra el porcentaje de consumo energético de cada sistema de molienda respecto al del molino de bolas.</p>

Tabla 5.2.3. Porcentaje de consumo energético respecto al molino de bolas.	
Tipo de molino	%
Molino vertical de rodillos	70-75
Molino horizontal de rodillos	65-70
Prensa de rodillos (o molienda de rodillos de alta presión)	50-65

Fuente: LBNL, 2000

Clasificadores/Separadores de alta eficiencia:
 Estos clasificadores separan las partículas finas de las gruesas de forma más eficiente y selectiva, lo que evita una sobremolienda. Se pueden usar tanto para la molienda de materias primas como para la molienda final.
 Se estiman ahorros eléctricos del 8 % del consumo específico. [LBNL, 2004]

Comentarios	<p>Una ventaja adicional de la instalación en línea de un molino vertical de rodillos es que éste puede combinar el secado de materias primas con el proceso de molienda usando el calor residual del horno o del enfriador de clínker.</p> <p>En cuanto a la instalación de clasificadores o separadores de alta eficiencia, la sustitución de un clasificador convencional por uno de alta eficiencia permite incrementar en un 15 % la capacidad de molienda y mejorar la calidad del producto debido a la mayor uniformidad del tamaño de las partículas. La mejora en el tamaño de las materia prima implica un ahorro en el consumo de combustible en el horno y un incremento en la calidad del clínker.</p>
Aspectos económicos	<p>Se encuentran en el mercado varios diseños de molinos de rodillos.</p> <p>La instalación de un molino de rodillos conlleva unos costes de inversión que se estiman en 5 \$ por tonelada de materia prima [Holderbank, 1993].</p> <p>La instalación de clasificadores o separadores implica un coste de 2 \$ por ton de materia prima/año [Holderbank, 1993].</p>

Alternativa	5.2.6. INSTALACIÓN DE MOLINO DE RODILLOS PARA LA PREPARACIÓN DEL COMBUSTIBLE
Actuación	Actuación: Prevención en origen de la contaminación. Cambios tecnológicos.
Etapas del proceso	Preparación del combustible.
Problemática medioambiental	Reducción de la generación de emisiones a la atmósfera y aprovechamiento energético.
Beneficios ambientales de la alternativa	Reducción de la generación de emisiones a la atmósfera y aprovechamiento energético.

<p>Descripción</p>	<p>La preparación del combustible se lleva a cabo in situ. Ésta puede incluir la trituración, la molienda y el secado del carbón (El carbón se transporta húmedo para prevenir la formación de polvo durante el transporte, si fuera necesario secar el carbón se puede emplear el calor residual del horno, p.e. del enfriador de clínker).</p> <p>El molino de rodillos es un sistema de trituración y molienda del combustible más eficiente energéticamente que la molienda mediante bolas o por impactos (ver tabla 5.2.3. <i>Comparación del consumo energético de los tipos de molino</i>) [Cembureau, 1997].</p>  <p>Figura 5.2.3. Molino de rodillos vertical.</p>								
<p>Procedimiento</p>	<p>Una ventaja del molino de rodillos es que puede admitir el combustible sin haberlo triturado previamente (tamaños grandes de carbón), admite tipos de carbón con una humedad alta y puede controlar largas variaciones en el rendimiento. Sin embargo para carbones abrasivos es preferible el uso de molino de bolas.</p> <p>Los molinos de rodillos de carbón están disponibles para rendimientos de 5 a 200 ton /h.</p> <p>En la siguiente tabla se muestran los valores de consumo para los diferentes tipos de molienda de combustible. Se puede observar cómo el consumo energético del molino de rodillos es considerablemente inferior al de bolas y al de impactos.</p> <p>Tabla 5.2.4. Comparación del consumo energético de los tipos de molinos.</p> <table border="1" data-bbox="437 1368 1362 1671"> <thead> <tr> <th>Tipo de molino</th> <th>Consumo (kWh/ ton combustible)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Molino de bolas</td> <td>45-60</td> </tr> <tr> <td>Molino de impactos</td> <td>25-26</td> </tr> <tr> <td>Molino de rodillos</td> <td>16-18</td> </tr> </tbody> </table> <p>Fuente: Cembureau, 1997</p>	Tipo de molino	Consumo (kWh/ ton combustible)	Molino de bolas	45-60	Molino de impactos	25-26	Molino de rodillos	16-18
Tipo de molino	Consumo (kWh/ ton combustible)								
Molino de bolas	45-60								
Molino de impactos	25-26								
Molino de rodillos	16-18								
<p>Comentarios</p>	<p>De la misma manera que para la molienda de materias primas y la molienda final, existe un sistema de prensa de rodillos generalmente más eficiente que la molienda convencional de molinos. La prensa de rodillos puede ser usada para moler las materias primas y el carbón, aunque el equipo de molienda necesita una protección especial contra las explosiones.</p>								

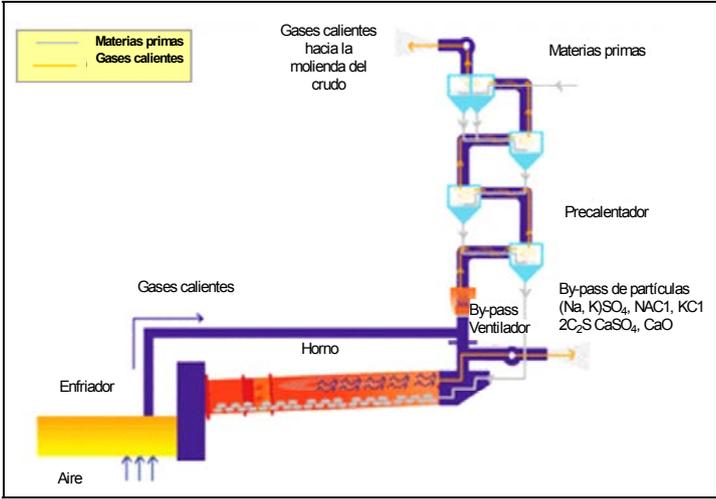
Aspectos económicos	Los costes de inversión del molino de rodillos son generalmente superiores a los costes del molino de bolas o del molino de impactos, pero los costes de operación son menores, aproximadamente 20 % inferiores respecto a los costes del molino de bolas y menos del 50 % que los costes del molino de impactos [Cembureau, 1997]. Se estima un ahorro de 7-10 kWh/ton de carbón.
---------------------	--

Alternativa	5.2.7. MEDIDAS DE OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE LA MOLIENDA FINAL DEL CEMENTO
Actuación	Actuación: Prevención en origen de la contaminación. Buenas Prácticas Ambientales y cambios tecnológicos.
Etapa del proceso	Molienda del cemento.
Problemática medioambiental	Consumo energético.
Beneficios ambientales de la alternativa	Reducción de la generación de emisiones a la atmósfera y aprovechamiento energético
Descripción	Se entiende por medidas de optimización energética de la etapa de molienda final, aquellas medidas que mejoran la eficiencia energética tanto de control como de tipo de molino o clasificadores.
Procedimiento	<p>Control de proceso y gestión. Molienda.</p> <p>Los sistemas de control de las operaciones de molienda se han desarrollado usando la misma filosofía que los sistemas de control del proceso (<i>ver ficha 5.2.1</i>).</p> <p>El sistema controla el flujo de entrada al molino y a los clasificadores, consiguiendo un producto estable de alta calidad.</p> <p>Conceptos de molienda avanzada</p> <p>La eficiencia energética de los molinos de bolas para el uso de la molienda final es relativamente baja, se consume entre 30-42 kWh/ton clínker dependiendo de la finura del cemento [Cembureau, 1997]. Los nuevos conceptos de molienda, instalación de prensas de rodillos; molinos de rodillos y prensas de rodillos para una premolienda en combinación con molinos de bolas puede disminuir a 20-30 kWh/ton clínker este consumo.</p> <p>Para la molienda final, normalmente, se emplean molinos verticales con barrido de aire con clasificadores. Actualmente se está comenzando a usar una tecnología que consiste en la premolienda con molinos verticales de rodillos sin barrido de aire combinado con un molino de bolas. La adición de un sistema de premolienda previa al molino de bolas implica un ahorro energético entre 6 y 22 kWh/ton cemento. Una variación en la tecnología de molino de rodillos es el molino de rodillos con anillo de barrido de aire, el cual ha mostrado un consumo de 23 kWh/ton de cemento para un cemento de granulometría 3.000 cm²/g.</p> <p>Otro nuevo concepto de molino de rodillos es el <i>Horomill</i>, se trata de un molino horizontal de rodillos compacto que puede obtener el producto final en una etapa. La presión generada por los rodillos esta entorno a 700-1.000 bar [Marchal, 1997]. Este tipo de molino consume para la molienda de cemento portland de una granulometría de 3.200 cm²/g aproximadamente 21 kWh/ton y menos de 25 kWh/ton para la molienda de cemento puzolánico de una granulometría de 4.000 cm²/g.</p>

	<p>Las compañías que han instalado el molino horizontal de rodillos muestran ahorros de energía superiores al 20 % en la molienda de materias primas (comparando con molino de rodillos vertical) y del 40 % para molienda de cemento.</p> <p>Hoy en día, la prensa de rodillos de alta presión se usa frecuentemente si se quiere aumentar la capacidad de los molinos. Este tipo de prensa está formada por dos rodillos que presionan el material hasta alcanzar más de 3.500 bar, incrementando la eficiencia de la molienda drásticamente.</p> <p>Clasificadores de alta eficiencia</p> <p>Estos clasificadores separan las partículas finas de las gruesas de forma más eficiente y selectiva, lo que evita una sobremolienda y por lo tanto un ahorro energético.</p> <p>Mejoras en los materiales de la molienda</p> <p>Especialmente en el molino de bolas se pueden realizar mejoras en los materiales de molienda para que sean más resistentes al desgaste. Un incremento en la carga de la distribución de las bolas, en la dureza superficial del medio de molienda y en el revestimiento del molino resistente al desgaste conlleva un ahorro en el desgaste de los materiales así como de consumo energético.</p>								
Comentarios	<p>Conceptos de molienda avanzada</p> <p>Se muestra una tabla resumen con los consumos comentados en el párrafo anterior.</p> <p>Tabla 5.2.5. Comparación del consumo energético de los molinos de la molienda final.</p> <table border="1" data-bbox="438 1164 1364 1489"> <thead> <tr> <th>Tipo de molino</th> <th>Consumo (kWh/ ton combustible)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Molino de bolas</td> <td>>30-42</td> </tr> <tr> <td>Molino de rodillos vertical con molino de bolas</td> <td>23</td> </tr> <tr> <td>Molino de rodillos horizontal</td> <td>21-25(*)</td> </tr> </tbody> </table> <p>Fuente: LBNL, 2004</p> <p>(*)Dependiendo del tipo de cemento y su granulometría.</p> <p>Los ahorros energéticos si se reemplaza un molino de bolas por un molino final de nueva tecnología (molino de rodillos) se estiman en 20 kWh/ton cemento [LBNL, 2004].</p>	Tipo de molino	Consumo (kWh/ ton combustible)	Molino de bolas	>30-42	Molino de rodillos vertical con molino de bolas	23	Molino de rodillos horizontal	21-25(*)
Tipo de molino	Consumo (kWh/ ton combustible)								
Molino de bolas	>30-42								
Molino de rodillos vertical con molino de bolas	23								
Molino de rodillos horizontal	21-25(*)								
Aspectos económicos	<p>Conceptos de molienda avanzada</p> <p>El molino horizontal de rodillos al ser un sistema compacto capaz de obtener el producto final con una única etapa tendrá unos costes de capital bajos.</p> <p>Para la instalación de una prensa de rodillos se estima un coste de aproximadamente 4 \$ por ton/año de cemento.</p> <p>Los costes de capital de la prensa de rodillos son inferiores a los de otros sistemas o, por lo menos, comparables.</p>								

	<p>Estos nuevos conceptos de molienda avanzada permiten una reducción en los costes de operación del 30-40 %.</p> <p>Clasificadores de alta eficiencia</p> <p>En un estudio que se realizó en Gran Bretaña se obtuvo una reducción del uso de electricidad de 6 kWh/ton de cemento después de la instalación de estos clasificadores en la molienda final y un incremento de la producción del 25 % [Parkes, 1990].</p> <p>Holderbank estimó una reducción del 8 % del consumo de energía (5 kWh/t) mientras que otros estudios estimaron 1,7-2,3 kWh/t de cemento [LBNL, 2004, LBNL, 2000].</p> <p>Los ahorros actuales varían en función de la planta y el tipo de cemento y finura requerido. Por ejemplo, los ahorros eléctricos para la instalación de nuevos clasificadores de alta eficiencia en una planta de cemento en Francia (Origny-Rochefort) variaron entre 0 y 5 kWh/ ton supusieron un coste de inversión de 2 \$ por tonelada de materia final al año. [LBNL, 2004]</p>
--	--

Alternativa	5.2.8. REDUCCIÓN DEL FLUJO DEL BY-PASS DE ÁLCALIS
Actuación	Actuación: Prevención en origen de la contaminación. Cambios tecnológicos.
Etapas del proceso	Cocción del clínker.
Problemática medioambiental	Reducción del consumo energético.
Beneficios ambientales de la alternativa	Reducción de la generación de emisiones a la atmósfera y aprovechamiento energético.
Descripción	<p>Muchos clientes solicitan un cemento de bajo contenido en álcalis porque esto les permite una mayor libertad de elección de áridos para formar el hormigón. Hoy en día, estos requerimientos han cambiado y se puede vender un producto de mayor contenido en álcalis.</p> <p>Por otro lado, en algunos países las materias primas tienen un alto contenido en álcalis (p.e. Egipto), por lo tanto el precalentador y el precalcinador deben estar equipados con un sistema de by-pass para disminuir ese contenido. La reducción mediante el by-pass dependerá en gran medida del tipo de cemento que se demande.</p>
Procedimiento	<p>Para lograr la reducción del contenido de álcalis, se utiliza un sistema de by-pass de los gases calientes y partículas de la planta cargados con metales alcalinos. El by-pass evita el taponamiento del precalentador, ya no recibe todo el caudal de gases de salida del horno y, por tanto, llegan menos partículas.</p> <p>Sin embargo, la producción de cemento de bajo contenido en álcalis lleva asociado un mayor consumo energético, ya que se está retirando del proceso de cocción gas caliente que se utilizaría para el precalentamiento y se está disminuyendo la cantidad de partículas que podrían formar parte del clínker.</p> <p>Se estiman ahorros de 2-5 Kcal/kg por porcentaje de gas que se deja de pasar por el by-pass. El menor valor se atribuye a los hornos con precalcinador y el mayor a los hornos con precalentador.</p>

	<p>Normalmente el by-pass supone entre el 10-70 % de los gases de salida del horno. De manera ilustrativa, si se asume una reducción del 20 % de la cantidad de gases que pasa al by-pass, se ahorraría entre 0,16-0,4 GJ/ton de clínker [LBNL, 2004].</p> <p>El uso de cenizas volantes y escorias de alto horno como áridos puede reducir la necesidad de producir cemento de bajo contenido en álcalis.</p>  <p>Figura 5.2.4. Proceso de producción con by-pass de álcalis.</p>
<p>Comentarios</p>	<p>El cambio en la composición del cemento, a parte de suponer un ahorro energético por la disminución del uso del by-pass de álcalis, supone la maximización del uso de nuevas tecnologías de control de NO_x, disminuir las emisiones de NO_x y de partículas, ya que pasaría un mayor caudal de gas por estas tecnologías que de otra manera (retirado con el by-pass) se emitirían a la atmósfera directamente.</p> <p>Otro beneficio es la reducción de las emisiones de partículas y la posibilidad de recircular al horno la generación de partículas que se produce por el gas del by-pass, ya que al ser menor cantidad no provocaría el taponamiento del sistema.</p>
<p>Aspectos económicos</p>	<p>No hay costes asociados a esta alternativa ya que se trata de únicamente de un cambio en el proceso, pero puede suponer costes adicionales a los consumidores ya que puede provocar la sustitución de los áridos usados por otro tipo para generar un hormigón con las mismas características.</p>
	<p>Esta técnica es un caso concreto de la 5.1.4 “REDUCCIÓN DEL RATIO DE CLÍNKER/CEMENTO” con lo que se puede suprimir.</p>

5.3. ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA EL CONTROL DE EMISIONES DE NO_x

Las alternativas tecnológicas de carácter general descritas en el punto 5.1, como la optimización del control de proceso (controlando el contenido en oxígeno), la elección de materias primas y combustibles con menor contenido en nitrógeno, la instalación de precalcinador/precalentador, entre otras, mejoran las emisiones de NO_x debido al menor consumo energético requerido y el mantenimiento del punto de trabajo en los parámetros de diseño; haciendo énfasis en aquéllos que son decisivos para la formación de NO_x.

Las mejores técnicas disponibles para la reducción de las emisiones de NO_x son la combinación de las medidas primarias generales anteriormente expuestas y las siguientes técnicas, que se describen una a una más adelante en formato ficha.

- Quemador de bajo NO_x .
- Enfriamiento de llama.
- Combustión por etapas.
- Reducción no-catalítica selectiva (SNCR).

El uso conjunto de la combustión por etapas y la reducción no-catalítica selectiva está en fase de desarrollo (ver apartado 5.14. *Técnicas emergentes*).

Algunos hornos modernos vía seca con intercambiador de ciclones y precalcificación han alcanzado niveles de emisión por debajo de 500 mg/Nm^3 (expresados como NO_2); en algunos casos utilizando únicamente medidas primarias, y en otros casos utilizando además la combustión por etapas. Las características de la materia prima (dificultad de cocción) y el diseño del horno pueden hacer inviable alcanzar dichos valores.

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

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

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

En cuanto a la instalación de quemadores de bajo NO_x , los resultados suelen ser satisfactorios, aunque en algunos casos no se ha observado reducción alguna en las emisiones de NO_x .

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

- Los hornos de nueva construcción en vía seca y con precalcinador con sistema de combustión por etapas podrían alcanzar valores de emisión de NO_x inferiores a los 500 mg/Nm^3 .
- Los hornos de vía seca con precalcinador que no dispongan de sistemas de combustión por etapas se situarán normalmente en el rango $500\text{-}800 \text{ mg/Nm}^3$.
- Los hornos de vía seca sin precalcinador que apliquen las medidas primarias descritas anteriormente deberían normalmente obtener valores de emisión por debajo de 1.200 mg/Nm^3 . Para reducir la emisión de NO_x en hornos de vía seca con intercambiador de 4 etapas se ha aplicado la inyección de amoníaco en 20 hornos europeos, obteniéndose de esta manera valores inferiores a 800 mg/Nm^3 , valores que requieren como contrapartida el transporte y manipulación de compuestos amoniacales, además de la emisión a la atmósfera de la parte de amoníaco que no haya reaccionado con el NO_x .
- Para hornos vía seca de menos de cuatro etapas, vía semi y vía húmeda no existen medidas secundarias que se hayan mostrado efectivas; los valores alcanzables por éstos son los resultantes de la combinación de técnicas primarias.

Como ya se ha mencionado en anteriores ocasiones, los rangos descritos son de tipo general, y habrá casos en los que las emisiones de una instalación se sitúen incluso por debajo del rango

esperable para su tecnología, y otros en los que las características de las materias primas o del proceso darán lugar a valores de emisión superiores a los rangos descritos. En este sentido, es conveniente destacar que los rangos de emisión habituales en instalaciones nuevas de clínker gris (entre 500 y 800 mg/Nm³) son, en general, menores que los de las instalaciones existentes (entre 800 y 1.200 mg/Nm³).

A continuación se muestra una tabla con las características de aplicación de las distintas técnicas de reducción de NO_x:

Tabla 5.3.1. Vista general de las técnicas para el control de las emisiones de NO_x.

Técnica	Aplicabilidad	Eficiencia de reducción (%)	Emisiones ⁽²⁾		Costes ⁽³⁾	
			mg/m ³ ⁽¹⁾	kg/t ⁽²⁾	Inversión	Operación
Quemador de bajo NO_x	Todos los hornos	0-30	400	0,8	0,15 – 0,8	0
Enfriador de llama	Todos los hornos	0- 50	400	0,8	0 – 0,2	0 – 0,5
Combustión por etapas	Precalcinador	10-50	<500-1.000	<0,1-2,0	0,1 -,2	0
	Precaentamiento				1 - 4	0
SNCR	Precaentamiento y precalcincación	10-85	200-800	0,4 – 1,6	0,5 - 1,5	0,3 – 0,5

(1) Referido normalmente a promedios diarios, gas seco, 273 K, 101,3 kPa y 10 % O₂.

(2) kg/t clínker: basado en 2000 m³t de clínker.

(3) El coste de inversión está expresado en M.€ y el coste de operación en € / t de clínker, referido normalmente para una capacidad de horno de 3.000 t de clínker por día y una emisión inicial superior a 2000 mg NO_x/Nm³.

Fuente: Cembureau

Alternativa	5.3.1. QUEMADOR DE BAJO NO _x
Actuación	Actuación: Prevención en origen. Cambios tecnológicos.
Etapa del proceso	Cocción del clínker.
Problemática medioambiental	Generación de emisiones de NO _x a la atmósfera.
Beneficios ambientales de la alternativa	<p>Aunque su instalación no siempre trae ligada una reducción de las emisiones de NO_x, se han conseguido reducciones de hasta un 30 % de estas emisiones [Int. Cem. Rev., Octubre 1997] en los hornos en los que más éxito han tenido este tipo de quemadores, si bien no es usual que se supere el 10 % de reducción.</p> <p>Estos quemadores de bajo NO_x se pueden aplicar a todos los hornos rotativos, habiéndose conseguido niveles de emisión de 600 - 1.000 mg/Nm³ [Informe Dutch, 1997].</p>
Descripción	El principio de esta técnica se basa en la reducción de los puntos calientes localizados mediante el uso de gas inducido en torbellino y bajos ratios de aire primario.
Procedimiento	<p>La formación de óxidos de nitrógeno tiene lugar, salvo una pequeña proporción, en combustibles que presentan nitrógeno orgánico por combinación química entre el nitrógeno y el oxígeno del aire. Las condiciones que se deben evitar para minimizar la formación de NO_x son altas temperaturas de combustión y atmósfera oxidante.</p> <p>En los quemadores de baja emisión de NO_x, la zona central de combustión tiene un defecto de aire, de manera que la temperatura en esta zona está limitada por este defecto de aire, y la atmósfera es reductora; la combustión se completa con la introducción de aire secundario en la zona exterior de la llama.</p> <p>Los quemadores de bajo NO_x varían en detalle, pero esencialmente el combustible y el aire se inyectan en el interior del horno por medio de tubos concéntricos. La proporción de aire primario se reduce a un 6- 10% de lo que se requiere para la combustión estequiométrica, normalmente en torno a un 13 % en quemadores de combustión indirecta [World Cement, abril 1990] o un 20-25 % en los tradicionales de combustión directa. El aire axial se inyecta con un elevado momento en el canal exterior.</p> <p>El combustible se puede insuflar a través de la tubería central o el canal medio. Se emplea un tercer canal para el aire en torbellino, que se inyecta por álabes a la salida de la tobera.</p> <p>El efecto neto del diseño de este quemador es producir una ignición muy rápida, especialmente de los compuestos volátiles del combustible, en una atmósfera en defecto de oxígeno, lo que tenderá a reducir la formación de NO_x.</p>
Comentarios	Los quemadores de baja emisión de NO _x pueden aplicarse tanto en instalaciones existentes como en nuevas.
Aspectos económicos	El coste de inversión para un quemador de bajo NO _x es aproximadamente de 150.000 a 350.000 € para una capacidad de horno de 3.000 toneladas de clínker/día [Cembureau, 1997] [Dutch, 1997]. Si los sistemas de combustión existentes son directos se debe cambiar a un sistema indirecto de combustión para permitir que ésta se efectúe con un bajo flujo de aire primario, lo que significará un coste de inversión de cerca de 600.000 a 800.000 € para una capacidad de horno de 3.000 toneladas de clínker/día [Cembureau, 1997]. En España la totalidad de hornos existentes utilizan sistemas indirectos de alimentación de combustible.

Alternativa	5.3.2. ENFRIAMIENTO DE LLAMA
Actuación	Actuación: Prevención en origen. Cambios tecnológicos.
Etapa del proceso	Cocción del clínker
Problemática medioambiental	Generación de emisiones de NO _x a la atmósfera
Beneficios ambientales de la alternativa	La reducción de las emisiones de NO _x puede alcanzar el 50 %. Esta reducción se puede alcanzar en condiciones óptimas, estando la máxima reducción basada en unas emisiones iniciales de 2.000 mg/Nm ³
Descripción	Enfriamiento de la temperatura de llama mediante la adición de agua.
Procedimiento	La adición de agua al combustible o directamente a la llama, reduce la temperatura e incrementa la concentración de radicales hidroxilo. Esto puede tener un efecto positivo en la reducción del NO _x en la zona de combustión. Los resultados son óptimos si se alcanzan cuando se usan combustibles alternativos con cierto contenido en agua.
Comentarios	<p>Hay que considerar un consumo de agua entre 3 y 20 kg/t_{cl}, teniendo en cuenta que dicha agua añadida puede causar problemas de operación en el horno.</p> <p>Se debe considerar un consumo energético adicional entre 10 y 65 MJ/t_{cl} debido al calor adicional necesario para provocar la evaporación del agua añadida.</p> <p>Por tanto, en este sistema de reducción de NO_x se debe contabilizar una pequeña emisión adicional de CO₂ del 0,1-1,5 % asociada al incremento del gasto energético. Las emisiones adicionales de CO₂ pueden ser minimizadas si se usan aguas residuales.</p> <p>El sistema de inyección de NO_x, o la adición de agua al combustible, puede aplicarse tanto en instalaciones existentes como en nuevas.</p>
Aspectos económicos	<p>El coste de inversión para un sistema de enfriamiento de llama mediante adición de agua es aproximadamente de 0 a 200.000 €.</p> <p>La vida útil es superior a los 5 años y hay que considerar unos costes operativos de 0,03 a 0,52 €/t_{cl} además de una posible penalización difícil de estimar, por una posible reducción de la capacidad de producción de clínker (debido a limitaciones del gasto volumétrico, el cual se ha incrementado con la inyección de agua) [BREF, 2001].</p>

Alternativa	5.3.3. COMBUSTIÓN POR ETAPAS
Actuación	Actuación: Prevención en origen. Cambios tecnológicos.
Etapa del proceso	Cocción del clínker: hornos con precalentamiento y/o precalcificación
Problemática medioambiental	Generación de emisiones de NO _x a la atmósfera
Beneficios ambientales de la alternativa	Algunas plantas modernas con buena optimización logran niveles de emisión por debajo de 500 mg NO _x /Nm ³ con combustión por etapas.

<p>Descripción</p>	<p>Esta técnica consiste básicamente en escalonar la combustión en varias fases, introduciendo el combustible por varios puntos, realizándose principalmente en precalcinadores especialmente diseñados.</p> <p>La primera etapa de combustión tiene lugar en el quemador principal del horno. La segunda etapa de combustión consiste en un quemador en la entrada del horno, que produce una atmósfera reductora que descompone una parte de los óxidos de nitrógeno generados en la zona de sinterización.</p>
<p>Procedimiento</p>	<p>La elevada temperatura en esta zona es particularmente favorable para la reacción que reconvierte los NO_x en nitrógeno elemental. En la tercera etapa de la combustión el combustible se alimenta dentro del calcinador con una cantidad de aire terciario, produciendo allí una atmósfera reductora, también. Este sistema reduce la generación de NO_x del combustible, y también disminuye los NO_x que salen del horno.</p> <p>En la cuarta y etapa final de la combustión, el aire terciario sobrante se alimenta dentro del sistema como "aire de remate" para completar la combustión. [Dutch, 1997].</p> <p>El principio de esta técnica, descrito anteriormente, es el mismo en el que se basa la reducción de NO_x observada en los hornos que introducen combustibles no pulverizados, por ejemplo neumáticos troceados, en la zona de la entrada del horno.</p> <p>Los calcinadores actualmente en uso difieren unos de otros esencialmente en la ubicación de la entrada del combustible, la manera en la que se distribuye el combustible, la alimentación del horno y el aire terciario, y en su configuración geométrica. [Dutch, 1997].</p>
<p>Comentarios</p>	<p>La tecnología de la combustión por etapas puede emplearse sólo en hornos equipados con precalcinador. Se precisan modificaciones sustanciales en las plantas con sistemas de precalentadores ciclónicos sin precalcinadores.</p> <p>Si el proceso de combustión no se completa en el precalcinador, pueden incrementarse las emisiones de CO y SO₂ [Informe Cembureau, 1997] habiéndose detectado problemas con el CO y atascos cuando se pretenden elevadas eficacias [Cembureau, 1997]. A pesar de que se garantizan reducciones en las emisiones de NO_x de hasta un 50 %, es muy difícil llegar a esos valores manteniendo los niveles de emisión del CO.</p> <p>En hornos vía húmeda o en hornos largos, la alimentación de combustibles alternativos puede realizarse en una zona adecuada del horno, creando una zona reductora (sistema patentado 'Mid Kiln'). La apertura realizada en el horno rotatorio y el sistema de compuertas permite que se pueda alimentar combustible en cada rotación del horno.</p>
<p>Aspectos económicos</p>	<p>El coste de inversión para instalar una combustión por etapas en un horno con precalcinador es de 0,1-2 millones de euros, dependiendo del diseño del calcinador existente [Cembureau, 1997].</p> <p>En un horno de 3.000 toneladas/día con precalentador y precalcinador, el coste de inversión de la instalación del precalcinador y el conducto de aire terciario es de alrededor de 1 a 4 millones de euros. [Cembureau, 1997].</p> <p>El coste de inversión para transformar un horno de 3000 t/día con precalentador y enfriador planetario en un horno con precalcinador y con enfriador de parrilla es de unos 15-20 M. €.</p>

Alternativa	5.3.4. REDUCCIÓN NO CATALÍTICA SELECTIVA (SNCR)
Actuación	Actuación: Tratamiento final.
Etapa del proceso	Cocción del clínker: hornos con precalentamiento y/o precalcación
Problemática medioambiental	Generación de emisiones de NO _x a la atmósfera
Beneficios ambientales de la alternativa	Este proceso permite alcanzar eficacias de reducción de más del 50 %. Hay varias instalaciones SNCR a escala real en funcionamiento; la mayoría de ellas se diseñaron y funcionan con valores de reducción de NO _x del 10 al 50% (con relaciones molares NH ₃ /NO ₂ de 0,5-0,9) y niveles de emisión de 500-800 mg NO _x /Nm ³ .
Descripción	La SNCR consiste en la inyección de compuestos NH ₂ -X (comúnmente agua amoniacal con un 25 % NH ₃ , también amoníaco gas, soluciones de urea, nitrocal, cianamidas, biosólidos u otras sustancias similares) en el gas de salida para reducir el NO _x a N ₂ .
Procedimiento	<p>La reacción (reducción de NO_x a N₂) tiene un punto óptimo en un rango de temperaturas de 800 a 1.000 °C, debiéndose proporcionar un tiempo suficiente de retención para que los agentes inyectados reaccionen con el NO_x.</p> <p>Es importante mantener el rango de temperaturas mencionado anteriormente. Si la temperatura cae por debajo de este nivel se emite amoníaco sin reaccionar, y a temperaturas significativamente elevadas el amoníaco se oxida a NO_x, con lo que las emisiones del gas que se pretende eliminar en lugar de reducirse, se incrementan.</p> <p>La eficacia de la reducción de NO_x aumenta con la relación molar NH₃/NO₂, el valor de la reducción de NO_x no se puede aumentar simplemente a voluntad, puesto que una dosificación más alta tiene más probabilidades de causar escapes de NH₃. Estas emisiones de NH₃ sin reaccionar han tenido lugar en otros sectores industriales, en forma de aerosoles de cloruros y sulfatos amónicos, los cuales no son captados en los filtros, llegando a ser visibles como una columna blanca sobre la chimenea.</p> <p>En definitiva, la eficiencia de la reducción depende de la temperatura, del tiempo de residencia, de la concentración en amoníaco y de NO_x en los gases.</p>
Comentarios	<p>El acceso a la ventana de temperatura correcta es fácil de conseguir en hornos con precalentador y hornos con precalcador. Sin embargo, no ocurre lo mismo en los hornos Lepol, y de hecho no existe ninguna instalación a escala industrial de SNCR en este tipo de hornos. En hornos largos de vías seca y húmeda es imposible acceder a la temperatura correcta con el necesario tiempo de retención, por lo que esta técnica no es de aplicación en los mismos.</p> <p>Es preciso señalar que esta técnica trata de limitar las emisiones de unos contaminantes, los NO_x, utilizando un agente reductor, el amoníaco, sensiblemente más peligroso en caso de emisiones a la atmósfera que los contaminantes que trata de eliminar.</p> <p>El amoníaco que no ha reaccionado se puede oxidar y transformarse en NO_x en la atmósfera. Los escapes de NH₃ pueden enriquecer en amoníaco el polvo que posteriormente se capta en el electrofiltro, inhabilitándolo para ser recirculado al molino de cemento, con lo que se genera un residuo que precisa un tratamiento específico [Cembureau, 1997]. Se requiere calor adicional para evaporar el agua de la solución amoniacal, lo que causa un pequeño incremento de las emisiones de dióxido de carbono.</p>

	<p>Además es un peligro potencial para el medio ambiente el transporte, almacenado y manipulación de amoníaco, por lo que se requieren medidas adicionales de seguridad.</p> <p>Tabla 5.3.2. Diferentes aspectos medioambientales relacionados con el compuesto empleado en SNCR.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Agua amoniacal</th> <th>Bio-sólidos</th> <th>Urea</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Consumo de agua</td> <td>1,5 kg/t_{cli}</td> <td>140 kg/t_{cli}</td> <td>1,5 kg/t_{cli}</td> </tr> <tr> <td>Consumo energético</td> <td>5 kJ/kg_{cli}</td> <td>500 J/kg_{cli}</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Emisión de gases</td> <td>NH₃, N₂O, CO₂, aerosoles, polvo</td> <td>NH₃, N₂O, CO₂, aerosoles, polvo</td> <td>NH₃, N₂O, CO₂, CO, aerosoles, polvo</td> </tr> </tbody> </table>				Agua amoniacal	Bio-sólidos	Urea	Consumo de agua	1,5 kg/t _{cli}	140 kg/t _{cli}	1,5 kg/t _{cli}	Consumo energético	5 kJ/kg _{cli}	500 J/kg _{cli}	0	Emisión de gases	NH ₃ , N ₂ O, CO ₂ , aerosoles, polvo	NH ₃ , N ₂ O, CO ₂ , aerosoles, polvo	NH ₃ , N ₂ O, CO ₂ , CO, aerosoles, polvo
	Agua amoniacal	Bio-sólidos	Urea																
Consumo de agua	1,5 kg/t _{cli}	140 kg/t _{cli}	1,5 kg/t _{cli}																
Consumo energético	5 kJ/kg _{cli}	500 J/kg _{cli}	0																
Emisión de gases	NH ₃ , N ₂ O, CO ₂ , aerosoles, polvo	NH ₃ , N ₂ O, CO ₂ , aerosoles, polvo	NH ₃ , N ₂ O, CO ₂ , CO, aerosoles, polvo																
Aspectos económicos	<p>El la siguiente tabla se resumen los parámetros económicos en función del compuesto empleado en la SNCR.</p> <p>Tabla 5.3.3. Resumen de aspectos económicos.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Agua amoniacal</th> <th>Bio-sólidos</th> <th>Urea</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Vida útil</td> <td>> 5 años</td> <td>S.D.</td> <td>S.D.</td> </tr> <tr> <td>Inversión</td> <td>0,5-1,5 M€</td> <td>0,4-0,6 M€</td> <td>0,5-1 M€</td> </tr> <tr> <td>Costes operativos</td> <td>0,3-0,5 €/t_{cli}</td> <td>1,9-5,5 €/t_{cli}</td> <td>1-1,5 €/t_{cli}</td> </tr> </tbody> </table> <p>Para un horno con precalentador de 3.000 toneladas/día con una emisión inicial de NO_x de hasta 2.000 mg/Nm³ y con reducción de NO_x hasta del 65 % (es decir, 700 mg NO_x/Nm³) el coste de inversión para SNCR empleando agua amoniacal como agente reductor es de 0,5-1,5 M. €.</p> <p>El coste está muy influenciado por las regulaciones de seguridad sobre el almacenamiento de agua amoniacal.</p> <p>El coste operativo para el mismo horno es 0,3-0,5 €/t de clínker, estando principalmente determinado por el coste del amoníaco inyectado [Cembureau, 1997].</p>				Agua amoniacal	Bio-sólidos	Urea	Vida útil	> 5 años	S.D.	S.D.	Inversión	0,5-1,5 M€	0,4-0,6 M€	0,5-1 M€	Costes operativos	0,3-0,5 €/t _{cli}	1,9-5,5 €/t _{cli}	1-1,5 €/t _{cli}
	Agua amoniacal	Bio-sólidos	Urea																
Vida útil	> 5 años	S.D.	S.D.																
Inversión	0,5-1,5 M€	0,4-0,6 M€	0,5-1 M€																
Costes operativos	0,3-0,5 €/t _{cli}	1,9-5,5 €/t _{cli}	1-1,5 €/t _{cli}																

5.4. ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA EL CONTROL DE EMISIONES DE SO₂

Las mejores técnicas disponibles para la reducción de las emisiones de SO₂ son la combinación de las medidas primarias generales anteriormente descritas, y la adición de absorbente en hornos de vía seca (para emisiones iniciales no superiores a 1.200 mg/m³) o el lavador de gases secos o húmedos (para emisiones iniciales superiores a 1.200 mg/m³).

La siguiente tabla muestra la comparación de las alternativas tecnológicas en términos de aplicabilidad, eficiencia de reducción, emisiones y costes.

Tabla 5.4.1. Vista general de las técnicas para el control de las emisiones de SO₂.

Técnica	Hornos aplicables	Eficiencia de reducción	Emisiones		Costes ⁽³⁾	
			(mg/m ³) ⁽¹⁾	Kg/t cli ⁽²⁾	Inversión	Operación
Adición de absorbente	Todos	60 - 80 %	400	0,8	0,2 - 0,3	0,1 - 0,4
Lavador seco	Seco	> 90 %	<400	<0,8	11	1,4 - 1,6
Lavador húmedo	Todos	> 90 %	<200	<0,4	6-10	0,5 - 1
Carbón activado	Seco	> 95 %	<50	<0,1	15 ⁽⁴⁾	N.D.

1) Referido a condiciones normales

2) Kg/t clínker: calculado para 2000 m³/t cli

3) Los costes de investigación están expresados en 10⁶ € y de operación en €/t cli

4) Estos costes incluyen el proceso SNCR, referido para una capacidad del horno de 2000 t clínker/ día y una emisión inicial de 50-600 mg SO₂/m³.

Alternativa	5.4.1. REDUCCIÓN DEL CONTENIDO DE AZUFRE EN LAS MATERIAS PRIMAS Y COMBUSTIBLE
Actuación	Actuación: Prevención en origen de la contaminación. Sustitución de materias primas.
Etapas de proceso	Preparación de la materia prima y combustible. Cocción del clínker.: hornos con precalentamiento y/o precalcación y otros
Problemática medioambiental	Generación de emisiones de SO ₂ .
Beneficios ambientales de la alternativa	Reducción de las emisiones de SO ₂ .
Descripción	El azufre se puede encontrar en el combustible y/o de forma volátil o no volátil en las materias primas. La oxidación de éste durante la cocción del clínker produce la formación de SO ₂ .
Procedimiento	Sustitución de las materias primas o combustibles con alto contenido en azufre, por otros ambientalmente más adecuados.
Comentarios	El comportamiento del azufre en hornos con precalentamiento y hornos Largos secos/húmedos es significativamente diferente. En los hornos de precalentamiento y precalcación el contenido en azufre del combustible no genera prácticamente emisiones debido al lavado eficiente de los gases de salida del horno a contracorriente con el crudo caliente en la etapa de precalentamiento y/o precalcación. En el horno con precalentamiento todo el azufre del combustible se transforma en un compuesto bien definido como el K ₂ SO ₄ y Ca ₂ K ₂ (SO ₄) ₃ o en una solución sólida en los minerales del clínker, por

	<p>ejemplo en forma de Belita. Por lo tanto el contenido en azufre del combustible no contribuye de manera significativa al aumento de las emisiones de SO₂ en los hornos con precalentamiento y/o precalcificación.</p> <p>Sin embargo, el contenido en azufre del combustible si se emplean otros hornos puede producir un impacto significativo en cuanto a emisiones de SO₂. Ya que en este caso, el contacto entre el crudo y los gases de salida es menos intenso (reducción del efecto de lavado). En este tipo de horno, un promedio del 10 - 50 % del azufre contenido en el combustible se emite en forma de SO₂.</p> <p>El azufre contenido en las materias primas en forma de sulfuros (Pirita) o azufre orgánico puede incrementar las emisiones de SO₂ en los hornos de precalentamiento y precalcificación. Un promedio del 30 - 50 % de los sulfuros presentes en las materias primas se emite en forma de SO₂.</p> <p>El contenido de azufre de las materias primas en forma de sulfatos no contribuye al aumento de las emisiones de SO₂ en este tipo de hornos, pero lo abandona de la misma forma que el azufre presente en el combustible, es decir, integrado en el clínker</p> <p>Si se emplean otros hornos, generalmente hornos de vía húmeda, el contenido de azufre en las materias primas contribuye al aumento de las emisiones de SO₂ de forma similar al contenido de azufre en los combustibles. Los sulfuros se oxidan a SO₂ y los sulfatos se disocian. En torno al 10 - 50 % del azufre contenido en las materias primas se emiten del horno en forma de SO₂.</p> <p>Por tanto, una reducción de los sulfuros contenidos en la materia prima puede reducir las emisiones de SO₂ en los hornos con precalentamiento y/o precalcificador. Sin embargo la reducción del azufre y los sulfatos del combustible no influye en las emisiones de SO₂ que se generen en estos tipos de hornos.</p> <p>En otros tipos de horno distintos a aquellos que tienen precalentador, todo el azufre contribuye a la emisión de SO₂.</p> <p style="text-align: center;">Tabla 5.4.2. Emisiones de SO₂ en los hornos de cemento.</p> <table border="1" data-bbox="512 1317 1442 1787"> <thead> <tr> <th></th> <th>Lepol, hornos de precalentamiento/precalcificación</th> <th>Otros hornos</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Azufre del combustible</td> <td>No se generan emisiones</td> <td>Se generan emisiones</td> </tr> <tr> <td>Azufre volátil en materias primas</td> <td>Se generan emisiones</td> <td>Se generan emisiones</td> </tr> <tr> <td>Azufre no volátil en materias primas</td> <td>No se generan emisiones</td> <td>Se generan emisiones</td> </tr> </tbody> </table>		Lepol, hornos de precalentamiento/precalcificación	Otros hornos	Azufre del combustible	No se generan emisiones	Se generan emisiones	Azufre volátil en materias primas	Se generan emisiones	Se generan emisiones	Azufre no volátil en materias primas	No se generan emisiones	Se generan emisiones
	Lepol, hornos de precalentamiento/precalcificación	Otros hornos											
Azufre del combustible	No se generan emisiones	Se generan emisiones											
Azufre volátil en materias primas	Se generan emisiones	Se generan emisiones											
Azufre no volátil en materias primas	No se generan emisiones	Se generan emisiones											
Aspectos económicos	Los aspectos económicos relativos a esta medida son los asociados al coste de sustitución de la materia prima o combustible que contiene azufre por otros de bajo contenido [BREF, 2001].												

Alternativa	5.4.2. ADICIÓN DE ABSORBENTE
Actuación	Actuación: Tratamiento final.
Etapa del proceso	Cocción del clínker: horno rotatorio.
Problemática medioambiental	Generación de emisiones de SO ₂ a la atmósfera.
Beneficios ambientales de la alternativa	<p>Se pueden lograr reducciones de dióxido de azufre de 60 a 80 % por inyección de absorbente en hornos con precalentador en suspensión.</p> <p>Esta técnica se puede aplicar tanto a plantas existentes como a nuevas instalaciones.</p>
Descripción	<p>Consiste en la adición de absorbentes tales como cal apagada (Ca(OH)₂), cal viva (CaO) o cenizas volantes activadas con alto contenido de CaO al gas de salida del horno para absorber parte del SO₂.</p> <p>El SO₂ reaccionará con la cal para dar CaSO₃ y CaSO₄, que entran al horno junto con las materias primas y se incorporan al clínker.</p>
Procedimiento	<p>Esta técnica es capaz de limpiar las corrientes de gas con concentraciones moderadas de dióxido de azufre y se puede aplicar a temperaturas de más de 400 °C. Los valores de reducción más altos se pueden lograr a temperaturas que excedan los 600 °C.</p> <p>Es recomendable emplear un absorbente basado en cal apagada con una superficie específica alta y elevada porosidad. La cal apagada no tiene reactividad alta, por consiguiente tienen que aplicarse elevadas relaciones molares Ca(OH)₂/SO₂, entre 3 y 6.</p> <p>Las corrientes de gas con concentraciones altas de dióxido de azufre requieren de 6 a 7 veces las cantidades estequiométricas de absorbente, implicando altos costes de explotación.</p>
Comentarios	<p>En los casos en los que las medidas primarias descritas en el apartado 5.1. <i>Alternativas tecnológicas de carácter general</i>, no sean suficientes, pueden adoptarse medidas adicionales al final del proceso en el caso que la especial situación del entorno de la fábrica justifique las grandes inversiones que hay que realizar para la instalación y mantenimiento de estos dispositivos.</p> <p>La adición de absorbente es, en principio, aplicable a todos los hornos, aunque es empleada mayormente en los de vía seca con precalentadores de suspensión. Para hornos con precalentador se ha encontrado que la inyección directa de cal apagada en el gas de salida es menos eficiente que la adición de cal apagada al crudo entrante en el precalentador.</p> <p>Lo normal en hornos de clínker gris es que los niveles iniciales no superen los 1200 mg/m³. Para éstos, la adición de absorbente reduciría las emisiones a niveles de alrededor de los 400 mg/m³. Si por el contrario los niveles iniciales son superiores a los 1200 mg/m³ la adición en los hornos de absorbentes, como por ejemplo cal apagada, no resulta económicamente viable.</p> <p>La adición de cal en la alimentación del horno reduce la calidad de los gránulos/ nódulos y causa problemas de flujo en los hornos Lepol.</p> <p>La adición de absorbente se emplea en algunas plantas para asegurar que no se exceden los límites normales en situaciones punta. Por tanto, en general, no es de funcionamiento continuo, sino sólo cuando lo requieren las circunstancias específicas.</p>

Aspectos económicos	<p>Con una concentración inicial de dióxido de azufre de hasta 3.000 mg/Nm³, una reducción de hasta el 65 % y un coste de cal apagada de 85 €/t, el coste de inversión de un horno con precalentador de 3.000 t clínker/día es de alrededor de 0,2 - 0,3 M. € y los costes de explotación sobre 0,1 - 0,4 €/t clínker.</p> <p>La vida media de los equipos supera los 5 años [BREF, 2001].</p>
---------------------	---

Alternativa	5.4.3. LAVADORES DE GASES SECOS
Actuación	Actuación: Tratamiento final.
Etapa del proceso	Cocción del clínker: horno rotatorio.
Problemática medioambiental	Generación de emisiones de SO ₂ a la atmósfera.
Beneficios ambientales de la alternativa	<p>Se pueden lograr reducciones de dióxido de azufre superiores al 90 % con el uso de lavadores de gases secos.</p> <p>Esta técnica se puede aplicar tanto en plantas existentes como en nuevas plantas, siempre que la concentración de emisiones de SO₂ sea elevada.</p> <p>Permite la reducción no sólo de SO₂ sino también de otros componentes que se encuentren presentes en los gases de salida.</p>
Descripción	<p>Los lavadores de gases secos se denominan también absorbedores de Lecho fluidizado (CFBA, por sus siglas en inglés Circulating Fluidized Bed Absorber), se trata de un reactor de columna tipo Venturi en el que se genera un lecho fluidizado formado por una mezcla de cal apagada, cal viva (los absorbentes) y el crudo.</p> <p>El lavador se ubica a la salida de los gases del horno, antes de su emisión a la atmósfera.</p>
Procedimiento	<p>El contacto intensivo entre el gas y el absorbente, el elevado tiempo de residencia y la baja temperatura de operación cerca del punto de condensación permite una elevada eficiencia de absorción del SO₂.</p> <p>El gas de salida del Venturi esta cargado con absorbente el cual se recupera en el precipitador electrostático.</p> <p>Una parte del absorbente recuperado se recircula al CFBA y la otra parte se añade a la entrada del horno donde se convierte en clínker.</p>
Comentarios	La máxima eficiencia de reducción se alcanza cuando las concentraciones de SO ₂ en los gases de salida se encuentran próximas a 3.000 mg/Nm ³ .
Aspectos económicos	<p>El coste de inversión de esta técnica supone 11 M. €/t clínker.</p> <p>La vida útil es superior a los 9 años y hay que considerar unos costes operativos alrededor de 1,6 €/t clínker.</p> <p>Si se incluye la contribución en la reducción del yeso requerido para la molienda del cemento debida al mayor contenido en azufre que posee el clínker, los costes de operación se reducirán a 1,4 €/t clínker. Esta contribución esta sujeta a fuertes variaciones en función de la planta de producción de cemento de que se trate [BREF, 2001].</p>

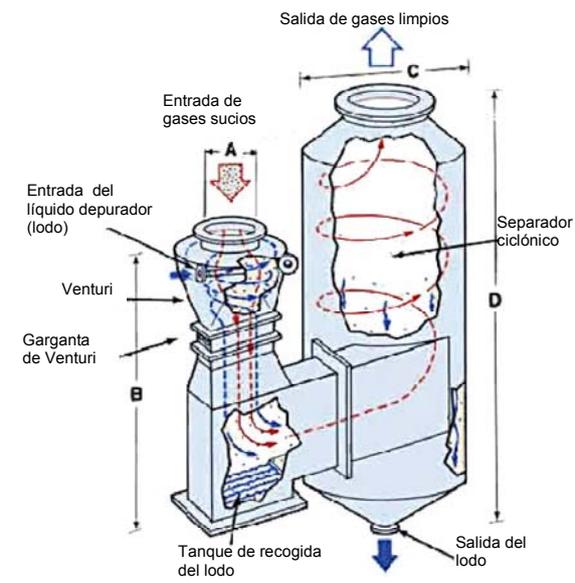
Alternativa	5.4.4. LAVADORES DE GASES HÚMEDOS
Actuación	Actuación: Tratamiento final.
Etapa / Operación	Cocción del clínker: horno rotatorio.
Problemática medioambiental	Generación de emisiones de SO ₂ a la atmósfera.
Beneficios ambientales de la alternativa	<p>Se pueden lograr reducciones de dióxido de azufre de 75 a 90 % mediante la instalación del lavador de gases húmedos a la salida de los gases del horno. Y la reducción de otros contaminantes como HCl, partículas residuales, metales y emisiones como NH₃</p> <p>Esta técnica se puede aplicar tanto en plantas existentes como en nuevas plantas, siempre que la concentración de emisiones de SO₂ sea elevada.</p> <p>Se genera yeso que se utiliza para la producción del cemento.</p>
Descripción	Es una alternativa al sistema anteriormente descrito de CFBA.
Procedimiento	<p>Los gases de escape del horno pasan por un intercambiador de calor gas/agua antes de entrar en el lavador a una temperatura de 115 °C.</p> <p>En el lavador, el SO₂ se absorbe en un lodo al 6-10 % de carga de sólidos formado por 98 % de yeso dihidratado (CaSO₄*2H₂O) y 2 % de caliza (CaCO₃). El lodo se pulveriza a contracorriente de los gases de escape y se recoge en un tanque de recirculación que se encuentra en la parte baja del lavador, donde se oxida con el aire.</p> $\text{CaSO}_3 + 0,5 \text{O}_2 \longrightarrow \text{CaSO}_4$ <p>Una parte del lodo es bombeada a una centrifuga donde se separan el yeso del agua. El resto se reinyecta a través de una tubería en el lavador. El lodo de caliza de 30 % de humedad se inyecta por la tubería antes que a los inyectores de aerosoles para reemplazar el absorbente usado.</p> $\text{CaSO}_3 + \text{SO}_2 \longrightarrow \text{CaSO}_3 + \text{CO}_2$ <p>Los gases de escape salen del lavador a una temperatura de 70 °C.</p>  <p>El diagrama ilustra el funcionamiento de un lavador Venturi de gases húmedos. Se muestra la entrada de gases sucios (A) que se mezclan con un líquido depurador (lodo) que pasa por un Venturi y una garganta de Venturi (B). Los gases pasan por un separador ciclónico (D) y salen limpios (C). El lodo se recoge en un tanque de recogida del lodo y se recicla.</p>

Figura 5.4.1. Lavador Venturi de gases húmedos.

Comentarios	La máxima eficiencia de reducción se alcanza cuando las concentraciones de SO ₂ en los gases de salida se encuentran en torno a 3.000 mg/Nm ³ .
Aspectos económicos	<p>La vida útil de un lavador húmedo de gases es de 6 años, se requiere un coste de inversión entre 10-14 M. €/t clínker.</p> <p>Los costes de operación de la implantación de esta técnica en una planta de referencia incluidos el material necesario, la potencia consumida y los costes de mantenimiento son de 2,7 € t cli. Estos costes se ven reducidos a 0,3-0,8 €/t cli si se aprovechan los beneficios que puede aportar la técnica, es decir, por el calor generado en el intercambiador de calor y su posible venta, 3,5 €/t cli, y por el yeso generado en el proceso que se puede utilizar en la molienda del cemento, 0,18 €/t clínker [BREF, 2001].</p>

Alternativa	5.4.5. ADSORCIÓN CON CARBÓN ACTIVADO
Actuación	Actuación: Tratamiento final.
Etapas del proceso	Cocción del clínker: Gases de salida del horno.
Problemática medioambiental	Generación de emisiones de SO ₂ a la atmósfera.
Beneficios ambientales de la alternativa	Reducción de las emisiones de COV's, SO ₂ , NH ₃ y metales pesados (HM). En concreto reducción superior al 95 % de SO ₂ .
Descripción	El sistema POLVITEC consiste en un lecho de carbón activado.
Procedimiento	<p>Los gases de salida del horno desempolvados se hacen pasar a través de un lecho de carbón activado donde compuestos como los COV's, SO₂ y NH₃ son adsorbidos. Tras lo cual los gases limpios son emitidos a la atmósfera.</p> <p>El carbón activado usado se extrae periódicamente hacia un silo separado y se reemplaza con nuevo adsorbente. El carbón procedente del silo se alimenta al horno junto con otros combustibles. El SO₂ adsorbido queda posteriormente integrado en el clínker.</p> <p>Debido a las características del carbón activado, tan sólo se pueden adsorber con alta eficiencia compuestos orgánicos de más de cinco carbonos.</p>
Comentarios	Es una técnica muy cara, que hace necesaria su financiación por entidades públicas.
Aspectos económicos	Esta medida supone unos costes tanto de inversión como de operación bastante elevados [BREF, 2001].

5.5. ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA EL CONTROL DE PARTÍCULAS

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

- Reducción de las emisiones dispersas mediante la aplicación de las técnicas descritas más adelante, apartado 5.5.1. *Control de las emisiones de fuentes dispersas.*

- Reducción de las emisiones de partículas por chimeneas mediante la instalación de, (ver apartado 5.5.2. *Control de las emisiones de fuentes puntuales*):
 - Filtros electrostáticos, con sistemas de medición de CO que minimicen el número de disparos.
 - Filtros de mangas multicámara y sistemas de detección de rotura de las mangas.

5.5.1. Control de las emisiones de fuentes dispersas

Las principales fuentes dispersas de emisión se generan en el almacenamiento y la manipulación de las materias primas, los combustibles y el clínker, y por el tráfico de vehículos por la fábrica.

Mediante una disposición simple y lineal de la planta se minimizan las posibles fuentes de emisiones; y un mantenimiento completo y apropiado de la instalación presenta siempre el resultado indirecto de la reducción de las emisiones dispersas por la reducción de las fugas de aire y puntos de derrame. El empleo de dispositivos y sistemas de control automáticos también ayudan a la reducción de las emisiones dispersas.

Algunas técnicas para la disminución de las emisiones dispersas son:

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

5.5.2. Control de las emisiones de fuentes puntuales

Hay tres fuentes puntuales principales de emisiones de polvo en las plantas de cemento. Estas son los hornos, los enfriadores de clínker y los molinos de cemento. En cada uno de estos subprocesos, los gases de salida del horno, o aire, se hacen pasar a través de material pulverulento, de manera que no hay posibilidad de una reducción primaria.

Hoy en día las emisiones en estos tres tipos de focos se combaten con la instalación de precipitadores electrostáticos (EPs), filtros mangas o filtros híbridos.

La tabla 5.5.1. muestra de manera general los datos disponibles. Esta tabla es un resumen y debería leerse conjuntamente con los correspondientes puntos que siguen a continuación.

Tabla 5.5.1. Vista general de las técnicas para el control del polvo.

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

(1) Para hornos referidos a medias diarias, gas seco, 273 K, 101,3 kPa y 10 % de oxígeno

(2) El coste de inversión está expresado en M€/t cli y coste de explotación en €/t cli para reducir las emisiones hasta <50 mg/Nm³, referido normalmente a una capacidad de horno de 3.000 t de clínker por día y emisión inicial de hasta 500 g de polvo/Nm³

(3) Efectos adicionales sobre otras emisiones

Fuente: Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España de fabricación de cemento (2003)

Tanto los EPs como los filtros mangas, tienen sus ventajas y sus desventajas. Ambos tipos tienen una eficacia muy alta de desempolvado durante el funcionamiento normal de la instalación. Algunos de estos filtros nuevos, adecuadamente dimensionados y mantenidos y en condiciones de funcionamiento óptimas, han permitido alcanzar valores de emisión de entre 5 y 20 mg/Nm³.

No obstante, en condiciones especiales tales como: concentración alta de CO, arranque del horno, entrada en funcionamiento del molino de crudo o parada del mismo; la eficacia de los EPs puede reducirse significativamente mientras que no se afecta la eficacia de los filtros mangas. Por consiguiente los filtros mangas tienen una mayor eficacia total si están bien mantenidos y las mangas filtrantes se sustituyen periódicamente.

Debido a las temperaturas máximas de operación en el caso de los filtros mangas y debido a la resistividad eléctrica del polvo entrante en el EP, los gases de salida del horno se deben acondicionar mediante la inyección de agua en la torre de acondicionamiento, o en el conducto de salida del gas, o bien pueden ser enfriados mediante aire en un intercambiador de calor, o mediante dilución en aire.

Una desventaja de los filtros mangas, es que las mangas filtrantes usadas son residuos, y deben adaptarse a las regulaciones nacionales correspondientes.

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

Alternativa	5.5.3. PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS								
Actuación	Actuación: Tratamiento final.								
Etapa del proceso	Cocción del clínker: Horno, Enfriador de clínker, molino de cemento.								
Problemática medioambiental	Generación de partículas a la atmósfera.								
Beneficios ambientales de la alternativa	<p>Reducción de las emisiones de partículas con un rendimiento de hasta el 99,99 % y posibilidad de recuperación de reactivos.</p> <p>El consumo de energía de la precipitación electrostática es inferior al de otros sistemas de depuración de partículas de eficacia semejante.</p> <p>Tabla 5.5.2. Reducción de la generación de partículas con un EP en función del proceso.</p> <table border="1" data-bbox="435 752 1362 1095"> <thead> <tr> <th data-bbox="435 752 639 972">Beneficio ambiental</th> <th data-bbox="639 752 884 972">Precipitador electrostático para los gases de salida del horno</th> <th data-bbox="884 752 1117 972">Precipitador electrostático para los gases de salida del enfriador de clínker</th> <th data-bbox="1117 752 1362 972">Precipitador electrostático para los gases de salida del molino de cemento</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="435 972 639 1095">Reducción de la generación de partículas</td> <td data-bbox="639 972 884 1095">Hasta el 99,99 %</td> <td data-bbox="884 972 1117 1095">Hasta el 99,9 %</td> <td data-bbox="1117 972 1362 1095">Hasta el 99,99 %</td> </tr> </tbody> </table> <p>No se garantiza la máxima eficiencia para aplicaciones en cualquier tipo de horno. La eficiencia más alta tan sólo se garantiza en condiciones normales de operación. Durante situaciones de parada y arranque se obtienen menores eficiencias.</p>	Beneficio ambiental	Precipitador electrostático para los gases de salida del horno	Precipitador electrostático para los gases de salida del enfriador de clínker	Precipitador electrostático para los gases de salida del molino de cemento	Reducción de la generación de partículas	Hasta el 99,99 %	Hasta el 99,9 %	Hasta el 99,99 %
Beneficio ambiental	Precipitador electrostático para los gases de salida del horno	Precipitador electrostático para los gases de salida del enfriador de clínker	Precipitador electrostático para los gases de salida del molino de cemento						
Reducción de la generación de partículas	Hasta el 99,99 %	Hasta el 99,9 %	Hasta el 99,99 %						
Descripción	<p>Los precipitadores electrostáticos generan un campo electrostático a lo largo del camino de las partículas en la corriente de aire. Las partículas se van cargando negativamente y emigran hacia las placas colectoras cargadas positivamente. Las placas colectoras se someten a golpeteo o vibración periódica para su limpieza, descargando el material que cae en tolvas colectoras situadas por debajo.</p> <p>Es importante que los ciclos de limpieza del EP sean optimizados para minimizar las macro-partículas reentrantes y así limitar al máximo la visibilidad del penacho emitido. Los EPs se caracterizan por su facultad para funcionar bajo condiciones de altas temperaturas (hasta aproximadamente 400 °C) y elevada humedad.</p> <p>De entre las ventajas de los precipitadores electrostáticos, se encuentra también, la capacidad de tratar grandes caudales de gas, con pérdidas de carga pequeñas, del orden de 0,25 a 1,25 mbar.</p>								



Figura 5.5.1. Precipitador electrostático.

Procedimiento

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

El funcionamiento puede verse perjudicado por las acumulaciones del material que puede formar una capa aislante sobre las placas colectoras, reduciendo así la intensidad del campo eléctrico. Esto se puede originar si hay entradas altas de cloruros y azufre en el horno, formando cloruros y sulfatos metálicos alcalinos. Los cloruros de metales alcalinos forman un polvo muy fino (0,1-1 μm) y tienen una resistividad específica alta (entre 10^{12} - 10^{13} Ωcm) formando capas aislantes sobre los electrodos y dificultando la eliminación del polvo.

En plantas existentes donde los precipitadores electrostáticos instalados no ofrecen los estándares de operación, se pueden aplicar las siguientes técnicas de mejora:

- La introducción de álabes en el flujo de gas de salida.
- Mejora del sistema eléctrico.
- Consideración del uso de torres de acondicionamiento aguas arriba del EP, introduciendo vapor de agua en la corriente de gas y mejorando así el rendimiento del precipitador.
- Consideración del uso de agua pulverizada de acondicionamiento en el propio conducto, para controlar la temperatura.
- Instalación de un separador ciclónico anterior al EP, en el caso en que las condiciones de los gases de salida lo requieran, aumentando la eficiencia del EP.
- Sustitución del EP por filtros mangas, cuando se requieren mayores mejoras.

Comentarios	Tabla 5.5.3. Comentarios de los EP en función del proceso.			
	Comentarios	Precipitador electrostático para los gases de salida del horno	Precipitador electrostático para los gases de salida del enfriador de clínker	Precipitador electrostático para los gases de salida del molino de cemento
	Consumo de agua (kg/t cli)	25-75 (1)	---	---
	Consumo de energía eléctrica (kWh/t cli)	1,5-2,0 (2)	1,0-1,6	1,0-1,6
	Generación de residuos (g _{acero} / t cli)	5-20	5-20	5-20
Vida útil	> 30	> 10	> 10	
<p>(1) El consumo de agua depende de la temperatura en la salida del precalentador, la duración relativa de la operación directa con el molino de crudo apagado y la humedad de la materia prima.</p> <p>(2) Hay un consumo de energía eléctrica para la energización del EP y operación del ventilador del filtro y la torre de acondicionamiento.</p> <p>El mantenimiento de los precipitadores electrostáticos no se puede realizar on-line, pero no requiere complicación alguna.</p> <p>Una desventaja de los precipitadores electrostáticos es el riesgo de explosión resultado de combustiones incompletas en el horno. Este riesgo se minimiza mediante la automatización del P cuando el contenido en monóxido de carbono en el gas de entra del EP alcanza un nivel alto (por debajo del límite de explosión). Para un funcionamiento eficaz de los precipitadores electrostáticos, es importante evitar los disparos de CO.</p>				
Aspectos económicos	Tabla 5.5.4. Aspectos económicos de los EP en función del proceso.			
	Comentarios	Precipitador electrostático para los gases de salida del horno	Precipitador electrostático para los gases de salida del enfriador de clínker	Precipitador electrostático para los gases de salida del molino de cemento
	Coste de Inversión (MEuro)	1,5-3,8 (0,6-0,8)	0,8-1,2	0,8-1,2
	Coste de operación (Euro / t cli)	0,1-0,2	0,09-0,18	0,09-0,18

El coste de inversión para un nuevo EP para un horno con una capacidad de 3.000 t clínker/día, con una carga inicial de partículas de hasta 500 g/m³ y un contenido de polvo en el gas limpio <50 mg/Nm³ es de alrededor de 1,5-3,8 millones de euros, y un extra de 0,6-0,8 millones de euros para la torre de acondicionamiento y el ventilador del filtro si se requiriese. El coste de explotación asociado es alrededor de 0,1-0,2 €/t clínker.

Para un enfriador de clínker de una capacidad de horno de 3.000 t clínker/día, carga inicial de partículas de hasta 20 g/m³ y contenido de polvo del gas limpio <50 mg/Nm³ y molino de bolas para cemento con una capacidad de 160 t cemento/hora, con un nivel inicial de hasta 300 g/m³ y contenido de polvo en el gas limpio <50 mg/Nm³, el coste de inversión es de cerca de 0,8-1,2 millones de euros y el coste de explotación de 0,09-0,18 €/t clínker [Cembureau, 1997].

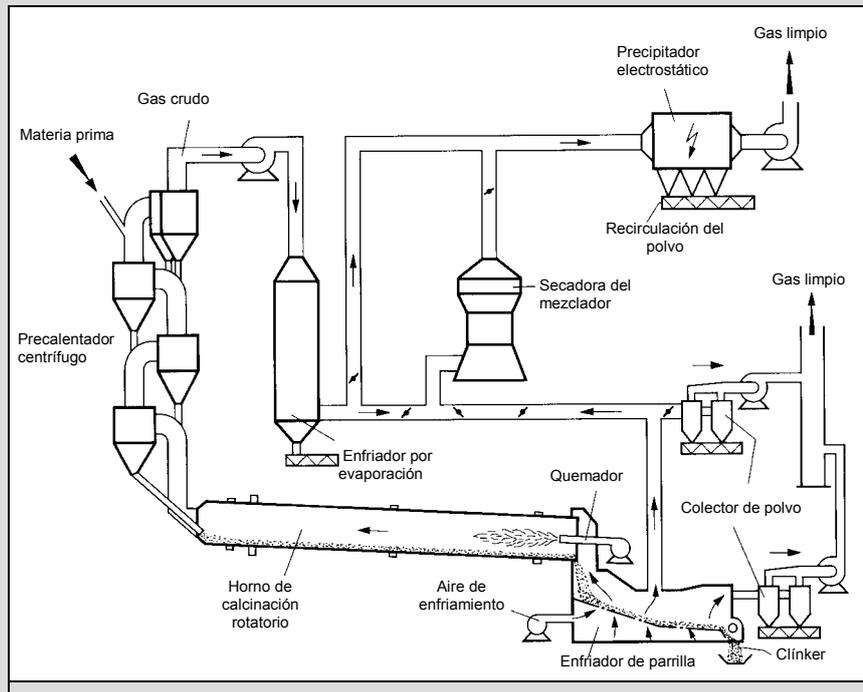
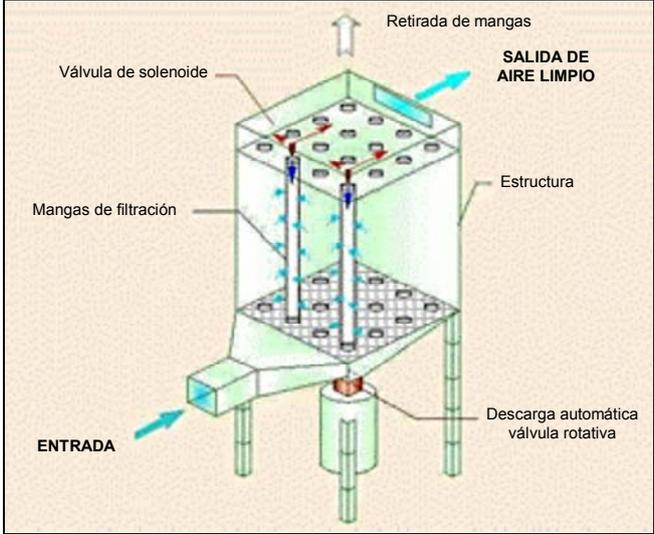


Figura 5.5.2. Proceso de fabricación del cemento con horno rotatorio, precalentador centrífugo y precipitador electrostático y colector de polvo.

Alternativa	5.5.4. FILTROS MANGAS
Actuación	Actuación: Tratamiento final.
Etapas del proceso	Cocción del clínker: horno, enfriador de clínker, molino de cemento.
Problemática medioambiental	Generación de partículas a la atmósfera.
Beneficios ambientales de la alternativa	Se consigue una reducción de las emisiones de partículas a la atmósfera de hasta un 99,99 %.
Descripción	El principio básico de los filtros mangas es emplear una membrana de tejido que es permeable al gas, pero que retiene el polvo.

<p>Procedimiento</p>	<p>Los diseños actuales de filtros de telas dependen del método de limpieza utilizado: Los métodos más comunes de limpieza incluyen flujo de gas inverso, agitación mecánica, vibración e impulsión con aire comprimido.</p> <p>El filtro limpiado con vibrador es la forma más primitiva de los filtros de bolsas. Los extremos inferiores abiertos de las bolsas están sujetos, en las aberturas, a la placa de tubos que separa la cámara inferior de entrada de gas sucio de la cámara superior de gas limpio. Los apoyos de las bolsas, de los que están suspendidas éstas, se encuentran conectados a un mecanismo vibrador. El gas sucio fluye hacia arriba y al interior de las bolsas de filtro, y el polvo se recolecta sobre las superficies internas de las bolsas.</p> <p>Puesto que la torta de polvo aumenta de espesor, la resistencia al flujo de gas se incrementa; y por consiguiente, es necesario realizar períodos de limpieza del medio filtrante para controlar la caída de presión del gas a lo largo del filtro.</p> <p>El filtro de mangas puede tener múltiples compartimentos que se aíslan individualmente en caso de la rotura de alguna manga (Figura 5.5.3.). Esto incrementa el coste y tamaño del filtro, pero permite realizar un mantenimiento on-line. El dimensionamiento del filtro debe ser suficiente para permitir el funcionamiento correcto del filtro en caso de que un compartimento quede fuera de servicio. La instalación de "detectores de mangas rotas" en cada compartimento permite conocer las necesidades de mantenimiento.</p>  <p>Figura 5.5.3. Esquema de funcionamiento de un filtro manga.</p> <p>Según el método de limpieza utilizado (continuo o discontinuo) se distinguen dos tipos de filtros de mangas: de aire inverso y por sacudida.</p> <p>El método por sacudida se realiza cuando existe la posibilidad de suspender el servicio del filtro durante un corto periodo de tiempo. Por tanto, exige un funcionamiento discontinuo con un ciclo de filtración y otro de limpieza. El tipo más barato y sencillo consiste en un cierto número de bolsas reunidas en el interior de una carcasa. Funciona con una velocidad aproximada de 0,01 m/s a través de la bolsa filtrante. La limpieza se puede llevar a cabo manualmente para unidades pequeñas. Existe también una versión más complicada y robusta que incluye un mecanismo automático de agitación para la limpieza de las telas que puede funcionar por métodos mecánicos, vibratorios o de pulsación. Las bolsas están sujetas a un soporte mecánico conectado a un sistema capaz de emitir sacudidas o vibraciones mediante un motor eléctrico. Al ser el tejido más grueso, se pueden utilizar velocidades frontales más elevadas, de hasta 0,02 m/s, y permite el funcionamiento en condiciones más severas que las admisibles en el caso anterior.</p>
----------------------	---

	<p>Respecto al método de aire inverso, existen muchos dispositivos diferentes pero el mecanismo habitual de limpieza consiste en la introducción, en contracorriente y durante un breve periodo de tiempo de un chorro de aire a alta presión mediante una tobera conectada a una red de aire comprimido. La velocidad frontal alcanza aproximadamente 0,05 m/s y es posible tratar altas concentraciones de polvo con elevadas eficacias. Mediante este tipo de filtro se pueden tratar mezclas de difícil separación en una unidad compacta y económica. Este mecanismo de limpieza se denomina también de chorros pulsantes o 'jet pulse' y es más eficaz que la anterior.</p> <p>El método que reúne las dos técnicas anteriores, por sacudida y aire inverso, se emplea para conseguir un funcionamiento en continuo, para ello los elementos filtrantes deben encontrarse distribuidos entre dos o más cámaras independientes, cada una de las cuales dispone de su propio sistema de sacudida y de una entrada de aire limpio. El aire entra en las mangas en sentido contrario por medio de un ventilador que fuerza el flujo, de fuera a dentro, lo que favorece la separación de la torta.</p>												
<p>Comentarios</p>	<p>El empleo de filtros de mangas con gases a temperaturas altas exige el montaje de tejidos más resistentes que los normalmente suministrados, y por tanto con un coste superior.</p> <p>La principal ventaja de los filtros mangas es que la eficacia siempre es elevada, incluso si se cambian los parámetros del proceso (por ejemplo, en el arranque o parada del horno, enfriador de clínker o molino de cemento, etc.)</p> <p>Una de las principales desventajas de los filtros mangas es la elevada caída de presión (8-20 mbar) que tiene lugar en el filtro, causando mayor consumo de energía en el ventilador.</p> <p>No obstante, los filtros mangas son los más adecuados a instalar en la industria del cemento debido a su simplicidad, fiabilidad, mayores ratios de eliminación que los EP y competitividad económica. Además, estos filtros pueden eliminar determinados contaminantes susceptibles de ser emitidos, por adsorción en las tortas del colector de polvo, en la superficie de la bolsa.</p>												
<p>Aspectos económicos</p>	<p>Tabla 5.5.5. Aspectos económicos de los EP en función del proceso.</p> <table border="1" data-bbox="509 1397 1442 2007"> <thead> <tr> <th data-bbox="509 1397 761 1733">Comentarios</th> <th data-bbox="761 1397 975 1733">Filtro manga para los gases de salida del horno</th> <th data-bbox="975 1397 1206 1733">Filtro manga para los gases de salida del enfriador de clínker, con sistema de limpieza por impulsos de aire</th> <th data-bbox="1206 1397 1442 1733">Filtro manga para los gases de salida del molino de cemento con sistema de limpieza por impulsos de aire</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="509 1733 761 1854">Coste de Inversión (MEuro)</td> <td data-bbox="761 1733 975 1854">0,15-0,35 (0,6-0,8)</td> <td data-bbox="975 1733 1206 1854">1,0-1,4</td> <td data-bbox="1206 1733 1442 1854">0,3-0,5</td> </tr> <tr> <td data-bbox="509 1854 761 2007">Coste de operación (Euro / t cli)</td> <td data-bbox="761 1854 975 2007">0,5-0,9</td> <td data-bbox="975 1854 1206 2007">0,10-0,15</td> <td data-bbox="1206 1854 1442 2007">0,03-0,04</td> </tr> </tbody> </table>	Comentarios	Filtro manga para los gases de salida del horno	Filtro manga para los gases de salida del enfriador de clínker, con sistema de limpieza por impulsos de aire	Filtro manga para los gases de salida del molino de cemento con sistema de limpieza por impulsos de aire	Coste de Inversión (MEuro)	0,15-0,35 (0,6-0,8)	1,0-1,4	0,3-0,5	Coste de operación (Euro / t cli)	0,5-0,9	0,10-0,15	0,03-0,04
Comentarios	Filtro manga para los gases de salida del horno	Filtro manga para los gases de salida del enfriador de clínker, con sistema de limpieza por impulsos de aire	Filtro manga para los gases de salida del molino de cemento con sistema de limpieza por impulsos de aire										
Coste de Inversión (MEuro)	0,15-0,35 (0,6-0,8)	1,0-1,4	0,3-0,5										
Coste de operación (Euro / t cli)	0,5-0,9	0,10-0,15	0,03-0,04										

	<p>La inversión que se requiere para instalar un filtro de mangas nuevo en un horno de una capacidad de 3.000 t clínker/día, con un nivel de emisión inicial de hasta 500 g/m³ y contenido de polvo en el gas limpio <50 mg/Nm³ es de cerca de 1,5-3,5 M. €, y un extra de 0,6-0,8 millones más de euros para la torre de acondicionamiento y el ventilador del filtro. Las torres de acondicionamiento son necesarias sólo para aplicaciones a bajas temperaturas con mangas, por ejemplo, de poliacrilonitrilo. El coste de explotación para el mismo filtro de mangas del horno es de alrededor de 0,5-0,9 €/t de clínker.</p> <p>La inversión que se requiere para instalar un filtro de mangas con sistema de limpieza por impulsos de aire en un enfriador de parrilla de clínker para una capacidad de horno de 3.000 t/día, con un nivel inicial de emisión de hasta 20 g/m³ y contenido de polvo en el gas limpio <50 mg/Nm³ es de alrededor de 1,0-1,4 M. € (incluidos el intercambiador de calor por aire y el ventilador del filtro) y el coste de explotación es de cerca de 0,10-0,15 €/t clínker.</p> <p>Para un molino de cemento de bolas con una capacidad de 160 toneladas de cemento/hora, con niveles iniciales de emisión de 300 g/m³ y con contenidos en polvo en el gas limpio <50 mg/Nm³, el coste de inversión de un filtro de mangas con sistema de limpieza por impulsos de aire es de alrededor de 0,3-0,5 millones de euros incluyendo el ventilador del filtro, y el coste de explotación de 0,03-0,04 €/t clínker [BREF, 2001].</p>
--	--

Alternativa	5.5.5. FILTROS HÍBRIDOS
Actuación	Actuación: Tratamiento final.
Etapas del proceso	Cocción del clínker.
Problemática medioambiental	Generación de partículas a la atmósfera.
Beneficios ambientales de la alternativa	Reducción de las emisiones de partículas en 99,99 %.
Descripción	<p>Los filtros híbridos (Advanced Hybrid Filter) son un sistema de control de la contaminación que elimina partículas microscópicas de los gases de salida de plantas de carbón, incineradoras y plantas de cemento, está formado por un precipitador electrostático y un filtro de mangas</p> <p>Esta tecnología se encuentra actualmente implantada en varias cementeras, en concreto en España se instaló el primer filtro híbrido en la fábrica de Gádor (Almería) en 2004.</p>
Procedimiento	Estos dispositivos aprovechan las ventajas de los dos medios tradicionales de depuración de partículas que existen en las fábricas de cemento: en primer término, conservan un campo electrostático debido a que su eficacia de captación teórica se sitúa en torno al 90 % (captación debida a precipitación electrostática y por sedimentación) y a continuación cuentan con un campo de mangas que depura una corriente de gases más limpia que la de un filtro de mangas convencional.

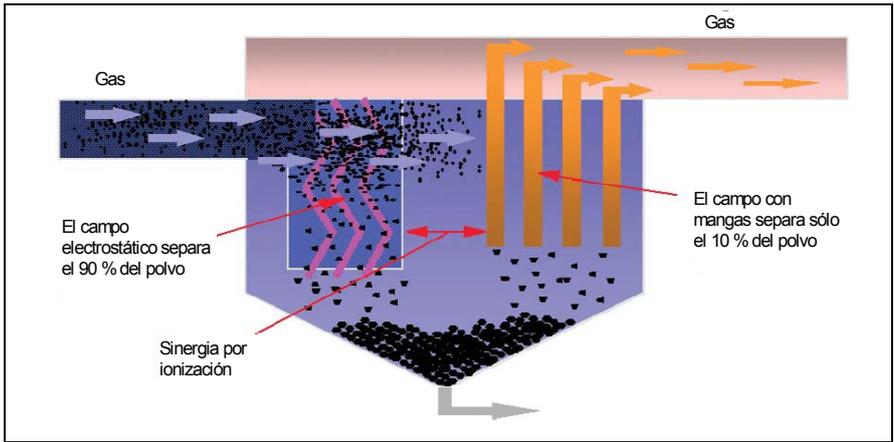
	 <p>Fuente: <i>Cemento y Hormigón</i>, Mayo 2005</p> <p>Figura 5.5.4. Esquema de funcionamiento de un filtro híbrido.</p> <p>Ante situaciones en las que un electrofiltro clásico se desconecta, por presencia de CO, o bien se comporta de manera degradada, como en el caso de los periodos transitorios que se producen durante los cambios de marcha, el filtro híbrido continúa depurando los gases de manera eficiente a causa del papel que ejercen las mangas.</p> <p>Las mangas están sometidas a unas sollicitaciones mecánicas muy inferiores a las de un filtro de mangas convencional ya que la carga de polvo que soportan es más reducida y el número de limpiezas es por ello mucho menor. Como consecuencia se alarga la vida útil de las mangas, se reduce el consumo de aire de limpieza y la pérdida de carga del filtro, lo cual permite ahorrar energía.</p>
<p>Comentarios</p>	<p>Según las investigaciones, hay una importante ventaja adicional, las partículas más finas de polvo que durante la marcha normal escapan de la parte electrostática y llegan hasta la manga, quedan ionizadas por efecto del campo eléctrico y tienen una cierta tendencia a repelerse entre ellas. Este efecto facilita la eliminación del polvo de la superficie de la manga que puede realizarse con bajo caudal de aire a baja presión, lo cual asimismo ayuda a disminuir el esfuerzo mecánico al que está sometido el medio filtrante y alarga su vida útil. Según estas mismas informaciones, el efecto electrostático residual es de muy corta duración y se perdería si, por ejemplo, se situara en serie un filtro de mangas convencional a continuación de un filtro electrostático existente.</p> <p>En la siguiente tabla 5.5.6 se recogen las ventajas de implantar esta tecnología frente a otro tipo de alternativas de sustitución en una planta que quiere cambiar el precipitador electrostático existente.</p>

Tabla 5.5.6. Evaluación de las diferentes alternativas de sustitución.				
	Filtro Híbrido	Transformación del EP en filtro de mangas	Optimización del EP	Nuevo filtro de mangas
Emisiones	√√	√	X	√
Duración de la parada	14 días	19 días	3 días	5 días
Espacio disponible	√	√	√	X
Consumo energético	√	X	√√	X
Aspectos económicos	El coste de inversión de implantar un filtro híbrido en una planta que actualmente cuenta con un precipitador electrostático es inferior al de convertirlo en un filtro de mangas, al de sustituirlo por un filtro de mangas nuevo, y aproximadamente igual al coste que conlleva la optimización del EP [Cemento y Hormigón, 2005].			

5.6. ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA EL CONTROL DE COV'S Y PCDD/PCDF'S

La fuente principal de emisiones de COV's (Compuestos Orgánicos Volátiles) procedentes de los hornos de cemento, es la materia orgánica presente en la materia prima. Una porción de dicha materia orgánica es extraída cuando se expone a altas temperaturas en el sistema de horno. En estas condiciones, algunos compuestos orgánicos se oxidan (queman), pero otros abandonan el horno en forma de emisiones. Cuanto menor sea el contenido de materia orgánica en la materia prima y cuanto mayor sean las temperaturas en el horno, menores serán las emisiones de COV's.

El comportamiento de extracción de la materia orgánica presente en la materia prima depende, entre otras cosas, del tipo de horno. Así por ejemplo, la concentración de oxígeno en los gases de salida de hornos con precalentamiento tiene tan sólo un leve efecto respecto a las emisiones de COV's, mientras que la concentración de oxígeno en hornos largos húmedos y hornos largos secos presentan un alto potencial de reducción de COV's.

Con un incremento en la concentración de oxígeno, las emisiones de COV's en hornos húmedos son menores, para la misma materia prima, comparado con los hornos con precalentamiento. Esto se debe a las elevadas diferencias de temperaturas entre el crudo y los gases de salida en los hornos largos húmedos y secos, comparado con los hornos con precalentadores.

La combustión en la zona de quemado produce temperaturas de llama por encima de los 2.000 °C. Por tanto, todos los compuestos orgánicos que son inyectados en el quemador principal son completamente oxidados (quemados) y no contribuyen a las emisiones de COV's. Tanto en la etapa secundaria de cocción, como en el precalciner, se producen temperaturas de llama del orden de 900-1.100°C; por lo que se debe tener especial atención en la elección, preparación e inyección de los combustibles.

La emisión de COV's en hornos de cemento se encuentra normalmente entre 10 y 100 mg/Nm³; pero, en función de las características de las materias primas, se pueden generar hasta 500 mg/Nm³.

Un aspecto a tener en cuenta es la emisión de CO, que normalmente es elevada cuando el contenido de materia orgánica presente en la materia prima es elevado. Los COV's extraídos de la materia prima pueden ser oxidados a CO₂ o CO. Especialmente en áreas donde hay poco contenido en O₂, o

donde no se presentan temperaturas altas, se producen oxidaciones incompletas de los COV's, produciendo así CO.

Para reducir las emisiones de COV's en piroprocesos, hasta un cierto nivel controlado, existen básicamente tres medidas:

- Manteniendo el proceso existente reduciendo la cantidad de materia orgánica en el sistema.
- Modificando el proceso existente (medidas de prevención en origen o medidas de reducción).
- Manteniendo el proceso existente añadiendo una unidad de limpieza de gas para los gases de salida (medida de reducción secundarias, tratamiento final).

Otro aspecto a tener en cuenta es la formación de compuestos orgánicos persistentes, dioxinas y furanos (PCDDs y PCDFs), en los procesos de combustión, El rápido enfriamiento de los gases de salida del horno a una temperatura inferior a 200 °C se considera la mejor medida para evitar la formación de estas moléculas, así como una cuidadosa selección y control de las materias primas que entran al horno.

Las medidas primarias parecen ser suficientes para cumplir con el nivel de emisión de 0,1 ng EQT/Nm³ en condiciones normales de operación.

A continuación se describen algunas medidas para reducir las emisiones de COV's con eficiencias del 0 al 95 %. Estas medidas requieren ciertas condiciones previas a su aplicación. En algunos casos es posible ajustar el sistema de horno existente para permitir la aplicación de las medidas de reducción. Esto, no obstante, causa problemas adicionales de coste de inversión.

La aplicación de estas medidas se encuentra limitada a casos muy específicos y normalmente van relacionadas con altos costes de inversión y operación. No hay posibilidad de aplicación de medidas de prevención en origen de emisiones COV's sin elevados costes de inversión y operacionales.

La única técnica de reducción secundaria (tratamiento final) posible es la adsorción en carbón activado (ver ficha 5.6.4.) que permite reducir las emisiones de compuestos orgánicos con más de seis carbonos C₆. Compuestos más pequeños o iguales a C₅ no son eliminados de manera eficaz. Se debe mencionar, no obstante, que más del 80 % de las emisiones de COV en el horno de cemento consiste en compuestos iguales o menores a C₅.

Alternativa	5.6.1. ELECCIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS Y COMBUSTIBLES
Actuación	Actuación: Prevención en origen de la contaminación. Sustitución de las materias primas.
Etapas del proceso	Preparación de la materia prima y combustible.
Problemática medioambiental	Generación de emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles (COV's).
Beneficios ambientales de la alternativa	Reducción de las emisiones de COV's.
Descripción	Dependiendo de la historia geológica de la roca usada como materia prima, tendrá un contenido u otro de materia orgánica. Una porción de esta materia orgánica es extraída tras ser introducida en el horno. Algunos de los compuestos orgánicos son oxidados, otros abandonan el horno como emisiones. Así, cuanto menor sea el contenido de materia orgánica presente en la materia prima, y cuanto mayor sea la temperatura de eliminación de los compuestos orgánicos, menor será la generación de emisiones orgánicas procedentes del horno.

Procedimiento	Sustitución de las materias primas o combustibles con alto contenido en materia orgánica por otros ambientalmente más adecuados.
Comentarios	No es posible la reducción del contenido de materia orgánica en materias primas naturales.
Aspectos económicos	Los aspectos económicos relativos a esta medida son los asociados al coste de sustitución de la materia prima o combustible de alto contenido en materia orgánica.

Alternativa	5.6.2. ADICIÓN DE LA MATERIA PRIMA EN LA ZONA CALIENTE DEL HORNO
Actuación	Actuación: Prevención en origen de la contaminación. Modificación del proceso.
Etapa del proceso	Cocción del clínker: Horno.
Problemática medioambiental	Generación de emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles (COV's).
Beneficios ambientales de la alternativa	Reducción de las emisiones de COV's, hasta el 95 %.
Descripción	Adición de la materia prima con contenido en materia orgánica en la zona caliente del horno.
Procedimiento	Si algún componente de la materia prima es causante de elevadas emisiones de COV's, ésta se añade directamente en la zona caliente del horno, de manera que los compuestos orgánicos son quemados antes que puedan salir a la atmósfera.
Comentarios	<p>Si la parte principal de la materia prima es responsable de emisiones de COV's, es posible añadir todo el material a un calcinador flash donde el incremento de la temperatura destruye prácticamente toda la materia orgánica. Para instalar dicho calcinador con todos los equipos requeridos adicionales, se necesita una inversión mayor. Además el consumo de energía en un horno con calcinador flash, es significativamente mayor que el comparado con un horno con precalentador.</p> <p>Las desventajas de esta adición son: un elevado consumo de energía en el horno, posibilidad de requerimientos de obra adicional en el punto de inyección, y una alimentación al horno menos homogénea, lo que puede resultar en una menor calidad del clínker.</p> <p>El rango de consumo de energía térmica debido a la aplicación de esta medida va de 0-3.300 KJ/ t cli, siendo prácticamente nulo si se añaden pequeñas porciones de materia prima directamente a la zona caliente del horno.</p> <p>Esta medida tan sólo es aplicable para componentes que representen una porción muy baja de la materia prima.</p>

Aspectos económicos	Los costes de inversión de esta técnica se encuentran por encima de los 25 M Euros, teniendo en cuenta que si sólo se añade una pequeña porción de la materia prima en la zona caliente, el coste es mucho menor, y que si se requiere hacer pasar toda la materia prima por un calcinador flash, el coste es mucho mayor. Los costes operacionales están por encima de los 8,9 euros/ t clínker [BREF, 2001].
---------------------	--

Alternativa	5.6.3. ADSORCIÓN CON CARBÓN ACTIVADO
Actuación	Actuación: Tratamiento final. Solución secundaria solo si con técnicas primarias se supera 0.1 ng/m ³ .
Etapa del proceso	Cocción del clínker. Gases de salida del horno.
Problemática medioambiental	Generación de emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles (COV's) y PCDD/PCDF.
Beneficios ambientales de la alternativa	Reducción de las emisiones de COV's, SO ₂ , NH ₃ y metales pesados (HM) y PCDD y PCDF.
Descripción	El sistema POLVITEC consiste en un lecho de carbón activado.
Procedimiento	Los gases de salida del horno desempolvados se hacen pasar a través de un lecho de carbón activado donde compuestos como los COV's, SO ₂ y NH ₃ son adsorbidos. Tras lo cual los gases limpios son emitidos a la atmósfera. El carbón activado usado se extrae periódicamente hacia un silo separado y se reemplaza con nuevo adsorbente. Procedente del silo de carbón, se alimenta al horno junto con otros combustibles donde los COV's adsorbidos se queman. Debido a las características del carbón activado, tan sólo se pueden adsorber con alta eficiencia compuestos orgánicos de más de cinco carbonos.
Comentarios	Es una técnica muy cara, que debe ser financiada por entidades públicas.
Aspectos económicos	Esta medida supone unos costes tanto de inversión como de operación bastante elevados [BREF, 2001].

5.7. ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA EL CONTROL DE EMISIONES DE METALES

Los metales más pesados que el Titanio (4,51 g/cm³) son considerados como metales pesados (HM). No todos los metales pesados son tóxicos, y no todas las toxicidades de los metales son del mismo nivel. No obstante en algunos países se diferencian los metales pesados por su toxicidad:

- Clase I: Cd, Hg, Ti.
- Clase II: As, Co, Ni, Se, Te.
- Clase III: Pb, Cr, Cu, Pt, V, Sn, Pd, Sb, Mn, Rh.

Los HM de Clase I son los más tóxicos y los metales Clase III son los menos tóxicos.

Las principales fuentes de emisión de metales pesados procedentes de la chimenea de los hornos de cemento son el contenido en metales pesados de las materias primas y de los combustibles. Dependiendo de su comportamiento en el sistema de horno, se distinguen tres tipos de metales:

- Metales pesados no volátiles o con volatilidad baja (As, Be, Co, Cr, Cu, Mn, Sb, Se, Te, V, Zn): son incorporados al clínker hasta casi el 100 % y prácticamente no aparecen como emisiones.
- Metales pesados semi-volátiles (como el Ti, Pb y Cd): No se incorporan completamente en el clínker. La parte remanente, que no se encuentra incorporada al clínker, queda casi completamente adsorbida en la superficie de las partículas de polvo, en el sistema de los gases de salida del horno. Los filtros como los precipitadores electrostáticos y filtros mangas, pueden eliminar los metales semi-volátiles con eficacia. El polvo recogido en el filtro normalmente se reintroduce en el horno, lo cual causa una acumulación interna de metales pesados en el sistema de horno. Para prevenir esto, una porción del polvo recogido en el filtro se alimenta al molino de cemento.
- Metales pesados volátiles: Los metales pesados volátiles no pueden ser eficazmente controlados mediante el desempolvamiento de los gases de salida del horno, puesto que una porción de metales volátiles siempre permanece volátil (no se adsorben en la superficie de las partículas de polvo). El ejemplo más característico en la industria del cemento es el mercurio, Hg. El Hg se emite en alto grado en forma vapor, por tanto, cuanto menor sea la temperatura de los gases de salida en el filtro, mayor será la proporción de mercurio adsorbido en las partículas del polvo que pueden ser eliminadas por los gases de salida.

Para reducir las emisiones de metales pesados en piroprocesos, existen básicamente tres métodos:

- Manteniendo los procesos existentes reduciendo la entrada de metales pesados al sistema.
- Modificando los procesos existentes (medidas primarias de reducción o prevención en origen de la contaminación).
- Manteniendo los procesos existentes añadiendo un unidad separada de limpieza de gas para los gases de salida (medidas de reducción secundaria, o tratamientos finales).

Cada medida de reducción requiere sus condiciones previas. Las medidas de reducción de emisiones de metales pesados más comunes son reducción de HM en la entrada y un desempolvamiento eficaz. Para evitar la acumulación de HM en el sistema de horno, una porción del polvo del filtro debe ser continuamente o periódicamente extraído del proceso. Adicionalmente existen medidas de reducción secundarias, como la adsorción en carbón activado, que son sólo requeridas si el contenido en HM volátiles es muy elevado.

Alternativa	5.7.1. ELECCIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS O COMBUSTIBLES
Actuación	Actuación: Prevención en origen de la contaminación. Sustitución de las materias primas.
Etapa / Operación	Preparación de la materia prima y combustible.
Problemática medioambiental	Generación de emisiones de metales pesados (HM).
Beneficios ambientales de la alternativa	Reducción de las emisiones metales pesados (HM).
Descripción	Los metales pesados se encuentran de manera natural en algunas materias primas de fabricación del cemento. Los metales pesados no volátiles alcanzan la unidad de desempolvamiento incorporados en las partículas de polvo. Los metales semi-volátiles y volátiles, pueden alcanzar el equipo de desempolvamiento tanto de la misma manera que anteriormente, incorporada en las partículas (por ejemplo el Ti), como en forma vapor (por ejemplo el Hg). Cuanto mayor es el contenido en HM volátiles en la materia prima o combustibles mayores son normalmente las emisiones, pero generalmente con un nivel bajo.
Procedimiento	Sustitución de las materias primas o combustibles con alto contenido en metales pesados por otros ambientalmente más adecuados.
Comentarios	La reducción de HM semi-volátiles y volátiles de las materias primas naturales o combustibles es virtualmente imposible. Se debe evitar el uso de residuos como materias primas alternativas o combustibles alternativos que tengan un contenido excesivo en HM.
Aspectos económicos	Los aspectos económicos relativos a esta medida son los asociados al coste de sustitución de la materia prima o combustible de alto contenido en HM.

Alternativa	5.7.2. ADSORCIÓN EN CARBÓN ACTIVADO
Actuación	Actuación: Tratamiento final. Solución secundaria solo si con técnicas primarias se supera 0.1 ng/m ³ .
Etapa de proceso	Cocción del clínker. Gases de salida del horno.
Problemática medioambiental	Generación de emisiones de metales pesados (HM).
Beneficios ambientales de la alternativa	Reducción de las emisiones de metales pesados (HM), COV's, SO ₂ y NH ₃ .
Descripción	El sistema POLVITEC consiste en un lecho de carbón activado.
Procedimiento	Los gases de salida del horno desempolvados se hacen pasar a través de un lecho de carbón activado donde compuestos como los HM, COV's, SO ₂ y NH ₃ son adsorbidos. Tras lo cual los gases limpios son emitidos a la atmósfera.

	El carbón activado usado se extrae periódicamente hacia un silo separado y se reemplaza con nuevo adsorbente. Procedente del silo de carbón, se alimenta al horno junto con otros combustibles donde los HM adsorbidos quedan integrados en el clínker o por el contrario, emitidos por el sistema del horno. Si se produce una acumulación de HM, los HM deben ser eliminados del sistema mediante una pequeña extracción del polvo recogido en el filtro del horno y mediante su alimentación a los molinos de cemento.
Comentarios	La adsorción en carbón activado es una medida muy cara que tan sólo es factible aplicar mediante financiación de las entidades públicas.
Aspectos económicos	Es una técnica que supone unos costes de inversión y operación bastante elevados [BREF, 2001].

5.8. ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA LA REDUCCIÓN DE CO₂

Como se dijo en el apartado 5.1.1.4 *Cocción del clínker*, las emisiones de CO₂ dependen de la eficiencia energética del proceso, del combustible usado y del ratio clínker/cemento, salvo que se realice un tratamiento final de captura de CO₂, tratamiento que se encuentra en fase de desarrollo.

Así, por tanto, la reducción de emisiones CO₂ presenta las siguientes alternativas para su prevención en origen:

- Mejora de la eficiencia energética del proceso. Ver apartado 5.1 *Alternativas Tecnológicas para una Correcta Gestión de la Energía*.
- Cambio de una tecnología por otra de mayor eficiencia energética (p.e. de un proceso vía húmeda a vía seca). Ver apartado 5.1 *Alternativas Tecnológicas para una Correcta Gestión de la Energía*.
- Remplazar combustibles por residuos
- Reducción del ratio clínker/cemento. Ver apartado 5.1.4. *Reducción del ratio de clínker/cemento* y 5.2.11.

Alternativa	5.8.1. SUSTITUCIÓN DEL COMBUSTIBLE POR RESIDUOS
Actuación	Actuación: Prevención en origen de la contaminación. Sustitución de combustible.
Etapas / Operación	Preparación del combustible.
Problemática medioambiental	Generación de emisiones de CO ₂ .
Beneficios ambientales de la alternativa	Reducción de las emisiones de CO ₂ .
Descripción	La emisión de CO ₂ proveniente de la combustión por kg de clínker es directamente proporcional al contenido en carbono por unidad de energía del combustible. Por tanto, la sustitución de un combustible por otro de menor contenido en carbono por unidad de energía, conlleva una disminución de las emisiones de CO ₂ . Asimismo, el uso de residuos de determinadas industrias (residuos de destilación, disolventes no halogenados, determinados aceites) peligrosos y no peligrosos, conlleva una disminución de las emisiones de CO ₂ por tener factores de emisión de GEI inferiores a si se incineraran o vertiesen. En el caso de la biomasa, el coeficiente de emisión es cero.

Procedimiento	Sustitución de combustibles por residuos con bajos coeficientes de emisión de CO ₂ .
Comentarios	La reducción del CO ₂ proveniente de la combustión, es sólo una parte de las emisiones de CO ₂ . La sustitución por biomasa conlleva una disminución de emisiones de GEI ya que el coeficiente de emisión es cero y la sustitución por residuos no biomasa no reduce las emisiones del sector cementero pero reduce las emisiones del país al evitar el tratamiento de los residuos en vertedero o incineradora..
Aspectos económicos	Los aspectos económicos relativos a esta medida son los asociados al coste de sustitución del combustible, los cuales son tan variables como los son los precios locales de los combustibles.

5.9. ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA LA REDUCCIÓN DE OLORES

Los olores químicos que se pueden desprender por chimenea en una planta de cemento se deben principalmente al SO₂, y en un nivel menor, al NH₃ y compuestos orgánicos; todos con un umbral de detección del 50-100 %, con un rango desde 100 ppt a 10 ppm.

En cuanto a las emisiones de olores difusos, se deben principalmente a la descarga de combustible y emplazamientos de almacenaje, por lo que se requiere un manejo adecuado de las operaciones de descarga y almacenamiento.

Se puede utilizar el término “control” de olores para referirse a procesos que hacen que un olor determinado sea más aceptable para la gente. Normalmente se consigue mediante una reducción de la intensidad del olor.

Por lo que respecta a la operación de una planta de cemento, la reducción de la intensidad del olor viene acompañada de una eliminación de odorantes en el gas, vapor e incluso mediante una disminución de partículas.

La identificación del olor de un odorante viene determinada por dos parámetros:

- Detección del umbral de olor: Definida como la concentración de odorante a la cual éste es detectado.
- Índice de olor: Tiene en cuenta también la evaporación como un ratio entre la presión de vapor y el 100 % del umbral de detección como odorante.

En general tanto los gases como los vapores son olorosos. Los gases prácticamente inodoros son: O₂, N₂, H₂, H₂O, CO, CO₂, CH₄, NO, así como los gases nobles.

Los olores también pueden asociarse con partículas que transporta el aire, puesto que algunas partículas pueden estimular el sentido del olfato, tanto porque ellas mismas sean volátiles como porque desprendan un odorante volátil.

5.10. TERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA EL CONTROL DE LAS EMISIONES DE RUIDO

Cada vez más, la reducción del ruido está siendo un aspecto importante a tener en cuenta en una planta de cemento. Este aspecto lleva asociado una cierta controversia, quizás no tanto por el requerimiento de alta tecnología para reducción de ruido en las plantas existentes, sino por los altos costes de inversión y dificultades para llevar a cabo las modificaciones necesarias.

A diferencia de las emisiones de partículas en el aire, la evaluación del ruido en el medio ambiente depende mucho de las inmediaciones vecinales a la planta. Así, por tanto, para la aplicación de las

medidas de reducción se debe tener en cuenta el impacto que provoca el ruido en las áreas residenciales cercanas a la ubicación de la planta.

En la práctica, y en la mayoría de los casos, las mejores técnicas de reducción del ruido pueden llevarse a cabo en plantas nuevas. Esto señala la relevancia de buenos diseños acústicos, desde un estudio preliminar del lay-out de la planta, hasta una correcta elección de la maquinaria: la reducción más efectiva del ruido se lleva a cabo en superficie.

En plantas existentes, las soluciones dependen de la disponibilidad de espacio, condiciones de las estructuras previas e incluso consideraciones arquitectónicas.

Tanto el flujo de aire, como la maquinaria, como el ruido procedente de los edificios, son las principales fuentes de emisión de ruido en superficie.

5.10.1. Ruido generado por el flujo de aire

Generalmente, el aire que fluye en un conducto, tubería o chimenea, genera un ruido, cuyo nivel de sonido depende de la sección transversal, flujo y velocidad.

Velocidades de flujo mayores de 15-20 m/s generan por sí mismas un ruido que debe ser reducido. La instalación de silenciadores es una de las únicas técnicas disponibles para la reducción del ruido generado por el flujo de aire.

Los silenciadores se deben instalar cuanto más cerca posible a la superficie que genera el ruido, y tan lejos como sea posible de la salida de éste, teniendo en consideración el mantenimiento de la velocidad del aire tras el dispositivo de reducción.

Los silenciadores pueden ser de tres tipos:

- Recubrimiento simple de los conductos con materiales de insonorización como la lana de roca o lana de vidrio.
- Silenciadores reflectores paralelos.
- Silenciadores impelentes.

Los silenciadores usados para la entrada y salida de los compresores se diseñan normalmente por los suministradores de la maquinaria.

Los recubrimientos simples con materiales de insonorización sirven para muchos propósitos, y causan caídas de presión muy bajas, pero requieren, para una eficiencia de reducción de 1-2 dB/m, de su instalación sobre grandes longitudes.

Los silenciadores reflectores paralelos se utilizan en conductos con variaciones de flujos de hasta 250.000 m³/h, y presentan una eficiencia de reducción de 10-15 dB/m; pero para variaciones de flujo superiores puede causar grandes caídas de presión (40-60 mmWG).

Para variaciones de flujo altas se prefieren silenciadores impelentes (serie de cámaras de expansión alineadas con aislantes acústicos), debido a la eficiencia de reducción y la poca caída de presión (máx. 20 mmWG), no obstante, éstos presentan costes de inversión mayores.

Las medidas primarias de control del ruido en superficie, como una buena calibración de la entrada y salida de los conductos para reducir la velocidad, o modificación de la maquinaria existente (por ejemplo, ventiladores con álabes aerodinámicos a bajas revoluciones por minuto), pueden ser tan sólo moderadamente efectivas.

5.10.2. Ruido generado por la maquinaria

Como maquinaria se entiende cualquier equipo del proceso susceptible de generar ruido, trituradores, molinos, etc. así como los ventiladores, motores y compresores.

El ruido puede, en algunos casos, ser reducido primariamente mediante la elección de maquinaria menos ruidosa. Los compresores normalmente están acoplados a una caja insonorizada, diseñada específicamente por los suministradores.

En otros casos el ruido puede ser reducido mediante el aislamiento de la maquinaria con materiales adecuados, o cerrando la máquina en el interior de una caja a prueba de sonidos. De cualquier manera, es necesario proporcionar un dispositivo seguro de enfriamiento, que debe ser a su vez insonorizado, con tal de disipar el calor.

Los materiales de aislamiento utilizados son lana de roca de varias capas (hasta 120 kg/m³), fibra de vidrio (hasta 80 kg/m³) o revestimientos de madera (hasta 120 mm).

5.10.3. Ruido procedente de los edificios

Cuando las medidas de aislamiento, mencionadas anteriormente, no son posibles, debido a la disponibilidad de espacio, o al lay-out de la planta, o no funcionan suficientemente bien, la única solución es cerrar la maquinaria en un edificio o crear muros cortina para reducir la propagación del sonido. También en estos casos puede ser necesaria la instalación de dispositivos de enfriamiento, que deben estar a su vez insonorizados, con tal de disipar el calor.

Se pueden usar muchos tipos de materiales para construir muros cortinas evitando siempre la transmisión de vibraciones desde la maquinaria al suelo o desde la estructura hacia el edificio. Si esto ocurre, la fachada puede actuar como un altavoz, generando niveles de sonido de baja frecuencia, pero con un nivel de potencia alto, teniendo en cuenta la superficie total de vibración.

La eficiencia del muro cortina depende proporcionalmente de su masa específica (kg/m³) y frecuencia de sonido. Esta eficiencia parece ser más alta, para altas frecuencias.

Algunos materiales para la construcción de muros cortina, entre otros, son:

- Bloques de hormigón o ladrillos huecos: Debido a su rigidez, proporciona una mejor reducción de ruido con una finura de más de 200 mm (150 kg/m²).

Hormigón prefabricado: Por la misma razón, la finura debe ser mayor a 80 mm (175 g/m²).

5.11. ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA EL CONTROL DE LAS VIBRACIONES

En los últimos años han ido surgiendo problemas de vibraciones asociados con estructuras que son más delicadas y complicadas, y de maquinarias que son más rápidas y complejas. Estos problemas van emparejados con una demanda de menores costes e incremento de eficiencias.

La intensidad de las vibraciones se mide como velocidad (m/s) o aceleración (m/s²).

Hoy en día tan sólo unos pocos países presentan limitaciones en cuanto a vibraciones de estructuras, o máximas vibraciones molestas para las personas. Además, la transmisión de las vibraciones hacia los suelos o estructuras de edificios industriales también es una fuente potencial de generación de ruido.

Algunos ejemplos de equipos de una planta que causan vibraciones son los molinos de rodillos o el silo de clinker.

5.11.1. Vibración del molino de rodillos

Cualquier máquina caracterizada por altas velocidades de rotación y fatiga es una fuente potencial de generación de vibraciones. Para evitar dichas vibraciones se deben llevar a cabo buenas prácticas ambientales, como la instalación de dichas máquinas en soportes antivibraciones y cimentaciones de hormigón. Si estas medidas no funcionan correctamente es necesario hacer mayores inversiones, para aislar las cimentaciones de las máquinas y evitar así transmisiones de vibraciones al resto de la estructura.

5.11.2. Vibración en los silos de clínker

Las vibraciones en los silos de clínker no son muy frecuentes, y son evitables, o reducidas mediante correctas evaluaciones de la estructura, control de la calidad del clínker y temperatura, así como mediante una buena distribución y número de tolvas de extracción.

5.12. ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA EL CONTROL DE RESIDUOS

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

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

- Caracterización de los residuos para determinar su peligrosidad.
- Estudio del origen de los residuos y de las posibilidades de evitar o reducir su generación.
- Realizar una selección y segregación en origen de los residuos.
- Fomentar el reciclado y la reutilización de los residuos no peligrosos en la propia fábrica o entregarlos a gestores que realicen estas prácticas.

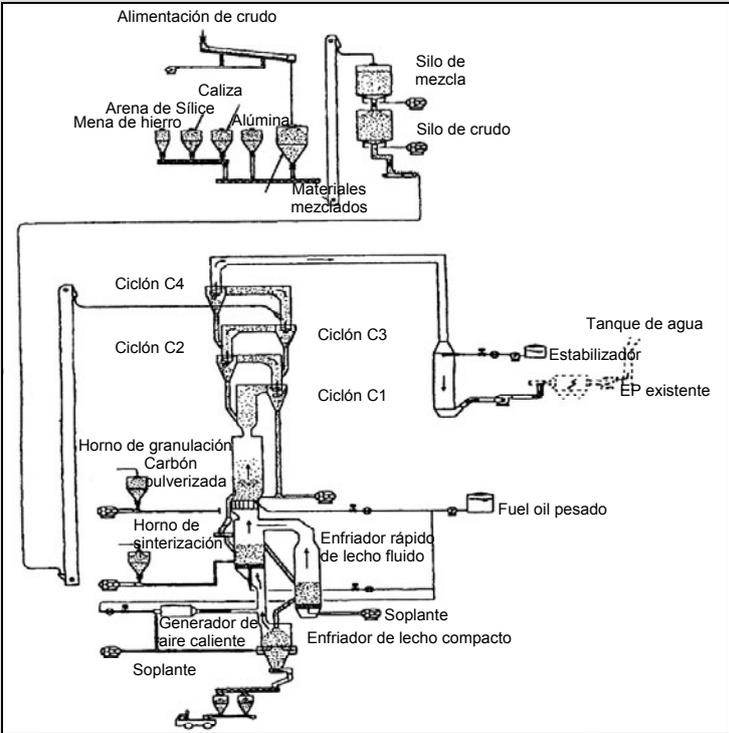
proteger los sistemas de almacenamiento y manipulación de residuos peligrosos, de forma que se minimice el riesgo de contaminación accidental de suelos y aguas.

5.13. TÉCNICAS EMERGENTES

Se consideran técnicas emergentes aquellas que todavía no están asimiladas por el mercado e incluso están en fase de investigación o en pruebas, por lo que su desarrollo no es definitivo y se desconocen algunos parámetros económicos y técnicos.

Algunas de las técnicas emergentes son las siguientes, las cuales se describen más adelante en formato ficha:

- **Tecnologías de prevención de origen:** aquellas que consisten en cambios tecnológicos, son medidas preventivas.
 - **Tecnología de fabricación del clínker en lecho fluidizado**
 - **Combustión por etapas combinada con reducción no-catalítica selectiva (SNCR)**
- **Tecnologías finales:** aquellas que actúan una vez se haya producido el daño (contaminación), son medidas correctivas.
 - Reducción catalítica selectiva (SCR).

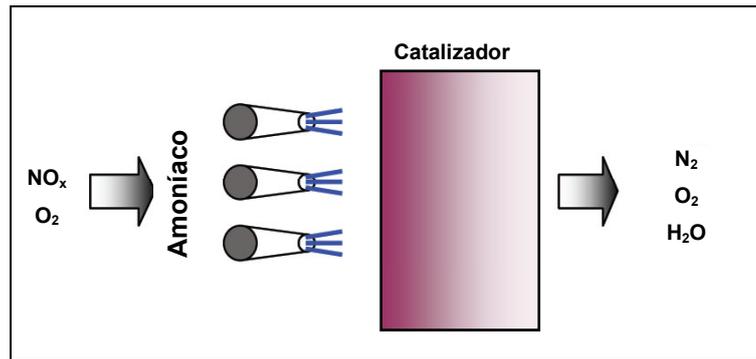
Alternativa	5.13.1. TECNOLOGÍA DE FABRICACIÓN DEL CLÍNKER EN LECHO FLUIDIZADO
Actuación	Actuación: Tratamiento en origen. Modificación del proceso.
Etapa del proceso	Cocción del clínker.
Problemática medioambiental	Generación de SO ₂ , NO _x . Consumo elevado de energía.
Beneficios ambientales de la alternativa	La tecnología de fabricación del clínker en lecho fluidizado permite reducir en un 10-12 % las emisiones de SO ₂ debidas a la combustión respecto a las emisiones de SO ₂ del horno rotativo. Se estima que el nivel de emisión de NO _x será de 380 mg/m ³ o inferior.
Descripción	<p>La tecnología de cocción en horno de lecho fluido es un proyecto subvencionado por el Ministerio de Comercio Internacional e Industria del Japón desde 1986.</p> <p>Entre 1989 y 1995 estuvo en funcionamiento una planta piloto con una capacidad de 20 t clínker/día, en la fábrica de Toshigi de Sumitomo Osaka Cement Co. Ltd. A finales de 1995 se construyó una planta piloto de 200 t clínker/día.</p> <p>La figura siguiente muestra la configuración del sistema de horno en lecho fluido de la planta piloto de 20 t clínker/día. El sistema consta de un precalentador de suspensión, un horno de granulación en lecho fluidizado, un horno de sinterización en lecho fluido, un enfriador de enfriamiento rápido en lecho fluido y un enfriador de lecho compacto.</p>  <p>Fuente: Asociación de Cemento Japonesa, 1996.</p> <p>Figura 5.13.1. Horno por lecho fluido.</p>

Procedimiento	El precalentador de suspensión es un precalentador convencional de cuatro etapas de ciclones que precalienta el crudo. El horno de granulación granula el crudo en gránulos de cerca de 1,5 - 2,5 mm de diámetro a una temperatura de 1.300 °C. En el horno de sinterización se completa la clinkerización de los gránulos a una temperatura de 1.400 °C El enfriador rápido de lecho fluido enfría rápidamente el clínker de cemento desde 1.400 °C a 1.000 °C. Y finalmente, el clínker de cemento se enfría a aproximadamente 100 °C en el enfriador de lecho compacto.
Comentarios	El clínker de cemento producido en el horno de lecho fluido es de una calidad similar al clínker producido en horno rotatorio. La emisión de NO _x es 115-190 mg/Nm ³ cuando se emplea fuelóleo pesado y de 440-515 mg/Nm ³ cuando se emplea como combustible carbón pulverizado (emisiones referidas al 10% de O ₂). Los estudios de viabilidad de una planta de 3.000 t clínker/día consideran que el consumo energético podría ser un 10-12 % menor que el correspondiente a un horno rotatorio con precalentador de ciclones y enfriador de parrilla, por lo tanto las emisiones del SO ₂ de combustión se podrían reducir en un 10-12 % [Cembureau, 1997].
Aspectos económicos	En resumen, las ventajas que presentaría el desarrollo del sistema de lecho fluidizado en los hornos de cemento en cuanto a aspectos económicos serían: <ul style="list-style-type: none"> • Reducción del consumo energético un 10-12 %. • Reducción del 30 % los costes de construcción. • Reducción del 30 % el área de instalación.

Alternativa	5.13.2. COMBUSTIÓN POR ETAPAS COMBINADA CON REDUCCIÓN NO-CATALÍTICA SELECTIVA (SNCR)
Actuación	Actuación: Tratamiento en origen. Modificación del proceso.
Etapas del proceso	Cocción del clínker.
Problemática medioambiental	Generación de emisiones de NO _x a la atmósfera.
Beneficios ambientales de la alternativa	La eficacia de reducción de NO _x puede alcanzar valores entre el 30 y el 80 %, mayor cuanto más alta sea la relación molar NH ₃ /NO ₂ . También se ha observado que cuando se utilizan relaciones molares superiores a la unidad se produce un incremento significativo en las emisiones de amoníaco a la atmósfera.
Descripción	Esta técnica consiste en la combinación en serie de un precalcinador con combustión por etapas y la adición de compuestos amoniacales para reducir los óxidos de nitrógeno.
Procedimiento	Las pruebas realizadas en los últimos años parecen indicar que la inyección de amoníaco debe realizarse relativamente alejada de la cámara de combustión para que la eficiencia de la reducción no se vea mermada por la competencia que se establece entre las reacciones de combustión y de reducción de NO _x .
Comentarios	Otros efectos observados son el incremento de las emisiones de CO, el incremento del consumo energético y la merma en la capacidad de producción por la incorporación de volúmenes de gases que deben circular por la torre de ciclones.

Aspectos económicos	El coste total será aproximadamente aquel que resulte de la suma de los costes de cada uno de los procesos combinados [Cembureau, 1997].
---------------------	--

Alternativa	5.13.3. REDUCCIÓN CATALÍTICA SELECTIVA (SCR)
Actuación	Actuación: Tratamiento final.
Etapas del proceso	Cocción del clínker.
Problemática medioambiental	Generación de emisiones de NO _x a la atmósfera.
Beneficios ambientales de la alternativa	<p>Este proceso permite alcanzar eficacias de reducción hasta un 85 - 95 %.</p> <p>La reducción catalítica selectiva (SCR) con amoníaco surge como la mejor tecnología disponible en la actualidad para la disminución de los niveles de NO_x en efluentes gaseosos de fuentes fijas.</p> <p>Esta técnica tiene un potencial de reducción alto no sólo de NO_x sino también de COV's, CO y dioxinas</p>
Descripción	<p>La SCR está aplicada satisfactoriamente en otras industrias. En la industria del cemento, no existe todavía ni una sola instalación SCR a escala industrial. Las características del gas de salida del horno de cemento hacen que se requiera la adaptación de la SCR existente para otras industrias específicamente para la industria del cemento.</p> <p>Los estudios y pruebas piloto consideran dos opciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tratamiento de gases previo a desempolvamiento (alta carga de partículas), • tratamiento posterior a desempolvamiento (baja carga de partículas). <p>Este último precisa recalentar los gases después del filtro de desempolvamiento, lo que implica un gasto energético adicional.</p> <p>Se han realizado experimentos en plantas piloto para tratamiento de fracciones relativamente pequeñas de gas (3 %) en Austria, Alemania, Italia y Suecia. Los niveles de emisión de NO_x se situaron en el rango 100-200 mg/Nm³. [Informe MTD España]</p>
Procedimiento	<p>En este proceso, el amoníaco, normalmente diluido con el aire o con el vapor de agua, se inyecta corriente debajo de la unidad de combustión mediante un sistema de rejilla en la corriente de gases calientes. La mezcla de gases y el reactivo pasa a través de un lecho de catalizador donde se llevan a cabo las reacciones de reducción catalítica del NO_x en presencia de oxígeno.</p> <p>Las reacciones principales son:</p> $4\text{NH}_3 + 4\text{NO} + \text{O}_2 \longrightarrow 4\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ $4\text{NH}_3 + 2\text{NO}_2 + \text{O}_2 \longrightarrow 3\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$



Fuente: M.J. Bradley & Associates

Figura 5.13.2. Esquema del proceso SCR.

El rango óptimo de temperaturas para estas reacciones catalíticas suele estar entre 300-400 °C. [NO_x . EPA]

La temperatura, la cantidad del agente reductor, el diseño de la rejilla de inyección del amoníaco y la actividad del catalizador son los factores principales que determinan la eficiencia de remoción real.

Los escapes de NH_3 en SCR son inferiores a los que se pueden dar en un sistema SCNR para una alta eficiencia de reducción. Si son significativas las cantidades de amoníaco emitidas por las materias primas, el SCR utiliza estas emisiones para reducir el NO_x en la reacción catalítica y de esta manera se reduce la cantidad de amoníaco emitido.

Si se dan escapes de amoníaco, éste puede reaccionar con el SO_2 y otros componentes de los gases de salida del horno dando lugar a la formación de aerosoles [Cembureau, 1997].

Comentarios

Una de las cuestiones críticas a resolver para garantizar la viabilidad técnica y económica del sistema es la abrasión del catalizador, la cual ha sido de carácter severo en algunas de las pruebas realizadas.

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

El uso del catalizador resulta en dos ventajas principales del proceso de la SCR sobre la SNCR: eficiencia de control de NO_x más alta y reacciones dentro de un rango más amplio y más bajo. Los beneficios se acompañan por un incremento significativo en los costos de capital y de operación.

Aspectos económicos

De los dos posibles sistemas de SCR sólo se ha tenido en cuenta el de tratamiento de gases previo a desempolvamiento (alta carga de partículas) porque los costes de inversión y operativos y el consumo de calor es mucho menor que para el tratamiento posterior a desempolvamiento (baja carga de partículas) [Cembureau, 1997].

Los costes totales de esta técnica emergente se han evaluado entre 2 y 4 €/t clínker, con un coste de inversión de entre 5 y 10 M. €. [Informe MTD España]. Estos costes incluyen la unidad de reducción catalítica selectiva, el tanque de almacenamiento de amoníaco, el sistema de inyección del amoníaco y el precalentador necesario para que los gases se encuentren en el rango óptimo de temperatura para que se realice la reducción.

6. CASOS PRÁCTICOS

En el presente capítulo se proporcionan ejemplos tanto de alternativas de prevención en origen de la contaminación como de tratamiento finalista. Cada uno de los ejemplos se muestra en forma de ficha. En ella se resume la alternativa llevada a cabo por una empresa determinada en base a sus objetivos, tanto medioambientales como económicos, se describen los resultados obtenidos tras la aplicación de la medida y se proporcionan datos económicos de dicha aplicación.

La información mostrada en las fichas se ha obtenido principalmente de publicaciones bibliográficas. Cabe decir, que la información mostrada en los apartados de valoración económica, resultados y ahorros obtenidos es orientativa.

Las implantaciones de las alternativas de prevención en origen de la contaminación y los tratamientos finalistas han permitido a las empresas obtener tanto mejoras ambientales como productivas. Se considera que la puesta en práctica de las alternativas descritas en el capítulo 6 del presente Manual, representa, en la mayoría de los casos, un éxito tanto a nivel de la contaminación, como a nivel económico, como de mejora de la calidad del producto.

Caso práctico 1	6.1.1. INSTALACIÓN DE MOLINO DE RODILLOS HORIZONTAL
País	ITALIA.
Tipo de planta	Planta de molienda de clínker.
Problemática medioambiental	Bajo Aprovechamiento de la energía. Emisión de CO ₂ .
Objetivo	Prevención en origen. Reducción de la generación de emisiones a la atmósfera y aprovechamiento energético
Antecedentes	La planta de contaba hasta septiembre de 1993 con un molino de bolas de circuito abierto y un molino de bolas de circuito cerrado. Toda la etapa de molienda poseía una capacidad aproximada de 480 kt/año.
Medida aplicada	<p>En el año 1993 se instaló un molino horizontal de rodillos de 400 kW. Se trataba de una nueva tecnología que se iba a probar a escala industrial.</p> <p>El nuevo molino horizontal de rodillos (Horomill 2200) posee una capacidad de 220 kt/año de molienda de cemento. Este tipo de molienda permite ahorrar un 40 % de energía respecto al consumo de un molino convencional de bolas. La ventilación se puede realizar con aire fresco, o bien con aire caliente para el secado de las materias primas.</p> <p>La mejora consistió en la instalación, en un nuevo circuito cerrado, de un molino de rodillos horizontal que opera con múltiples compresiones. Este sistema utiliza menos presión que la que se emplea en una prensa de rodillos y posee dispositivos internos que aseguran el avance del material y su posterior trituración, garantizando su reducción hasta la granulometría deseada.</p> <p>Las características principales del molino de rodillos son:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Menor consumo de energía, similar al de la prensa de rodillos.

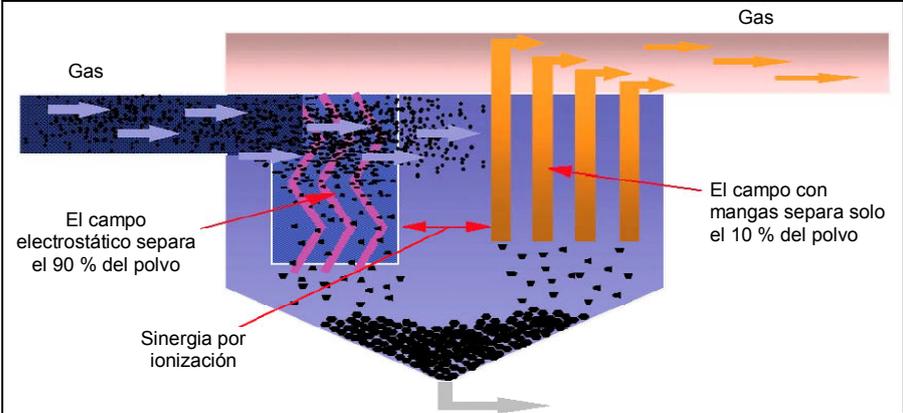
	<ul style="list-style-type: none"> • Un procedimiento de molienda similar al del molino de bolas que permita obtener el mismo producto final. • Una fiabilidad y una vida útil similar al del molino de bolas. 						
<p>Resultados obtenidos</p>	<p>Se detectaron problemas relacionados con la resistencia de los recubrimientos de los rodillos, pero fueron solventados.</p> <p>El molino opera de manera muy estable y posee unos niveles de vibración bajos. Además está dotado de un sistema automático de control integrado y dado que posee una rápida respuesta a los cambios de entradas, tiene un buen comportamiento durante operación normal. Asimismo, esto implica tiempos de acondicionamiento cortos, lo que conlleva un ahorro energético ya que se reduce el tiempo improductivo de la máquina.</p> <p>En cuanto al nivel de ruido se observaron algunos problemas debido a los engranajes reductores. Se ha concluido que para futuros molinos se debe utilizar engranajes de tipo helicoidal y 1000 rpm como máximo, para así alcanzar unos niveles de ruido de 80 dB, bastante inferiores a los niveles de ruido alcanzados por los molinos de bolas.</p> <p>Los ahorros energéticos esperados de 35-41 % para la molienda del cemento fueron alcanzados fácilmente y sin problemas, mientras que la molienda de la materia prima supuso únicamente un ahorro energético de 35 % frente al 50 % esperado. Esto se debe al sobredimensionamiento de algunos componentes de la planta, y generalmente por no haber sido diseñado el molino específicamente para la molienda de la materia prima.</p> <p>Resumen de resultados:</p> <table border="1" data-bbox="448 1070 1370 1263"> <thead> <tr> <th></th> <th>Ahorro energético (%) (*)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Molienda de cemento</td> <td>35-41</td> </tr> <tr> <td>Molienda de materia prima</td> <td>35</td> </tr> </tbody> </table> <p>(*) Con respecto al consumo de un molino de bolas.</p> <p>La calidad del producto que se obtuvo fue la misma o incluso superior a la que se obtiene mediante un molino de bolas. El cemento producido con el nuevo molino horizontal de rodillos para una misma finura posee mayor resistencia que el generado con los molinos de bolas.</p>		Ahorro energético (%) (*)	Molienda de cemento	35-41	Molienda de materia prima	35
	Ahorro energético (%) (*)						
Molienda de cemento	35-41						
Molienda de materia prima	35						
<p>Aspectos económicos</p>	<p>Se requirió una inversión de 3,5 millones de \$ para la instalación del Horomill pequeño a escala industrial. (*)</p> <p>(*) Esta planta, en 2002, instaló un nuevo equipo de molienda horizontal de rodillos (modelo 3800) con una capacidad de 600.000 t/año, con la que se esperaba una reducción de los costes de energía de 10 kWh/t de cemento y una disminución en las gestiones de mantenimiento.</p>						

Fuente: wbcasd, 2002 y European Commission's "Energy".

Caso práctico 2	6.1.2. CIRCUITO CERRADO DEL AGUA DE REFRIGERACIÓN
País	FRANCIA.
Tipo de planta	Integrada.
Problemática medioambiental	Elevado consumo del agua de refrigeración. Riesgo de contaminación por vertidos al río.
Objetivo	Prevención en origen. Disminuir el consumo de agua y por tanto los vertidos al río.
Antecedentes	<p>La planta en cuestión se encuentra situada en el centro-este de Francia, entre el Canal de Bourgogne (Burgundy Canal) y el río Armançon.</p> <p>El consumo de agua de la planta se debía principalmente al uso para la refrigeración de las instalaciones.</p> <p>Originalmente la planta fue diseñada con un sistema de refrigeración de circuito abierto, lo que significaba que el agua se usaba para enfriar los equipos, se trataba en un tanque de sedimentación y en un separador de grasas y finalmente se vertía al río Armançon.</p>
Medida aplicada	<p>En Enero de 2000, se decidió instalar un sistema de agua de refrigeración de circuito cerrado. El proyecto supuso el acondicionamiento de algunos tanques que se encontraban en desuso para emplearlos como tanques de almacenamiento de agua, la instalación de una estación de bombeo y una torre de refrigeración.</p> <p>De esta manera, actualmente el agua de refrigeración es recogida y recirculada a la torre de enfriamiento donde se enfría por ventilación con aire ambiente. Después, el agua fría es bombeada de nuevo al circuito de refrigeración.</p>
Resultados obtenidos	Con este proyecto se consiguió un ahorro en el consumo de agua del 75 % y por tanto la reducción de la descarga de contaminación asociada a los vertidos al río Armançon.
Aspectos económicos	Costes de Inversión de la medida aplicada: 415.000 €

Fuente: Lafarge

Caso práctico 3	6.1.3. INSTALACIÓN DE FILTRO HÍBRIDO
País	ESPAÑA.
Tipo de planta	Integrada.
Problemática medioambiental	Elevada emisión de partículas.
Objetivo	Tratamiento Final. Disminuir las emisiones de partículas con el fin de cumplir la futura legislación.
Antecedentes	La cementera cuenta con una capacidad de 1.850 t/d. En 1999 decide, sustituir el electrofiltro del horno existente por un sistema de filtro híbrido ya que los niveles de emisión implicaban sobrepasar los límites de la futura legislación.

	<p>Cabe destacar que la disposición concentrada de las diferentes instalaciones de la planta, confiere muchas ventajas desde el punto de vista operativo, pero dificulta las posibles modificaciones.</p>						
<p>Medida aplicada</p>	<p>Junto con el objetivo de disminuir las emisiones de partículas, se pretendía tener la posibilidad de acondicionar los gases del filtro con aire o agua, ya que la fábrica se encuentra en una zona semidesértica.</p> <p>Esta transformación, como consecuencia de la elevada demanda de cemento, debía realizarse dentro de la parada larga del horno para el cambio de refractario.</p> <p>Además, el nuevo proyecto debía prever la ampliación de la producción del horno a 2.400 t/d.</p> <p>La medida implantada implica la ampliación de la carcasa del electrofiltro existente para instalar los filtros manga, teniendo en cuenta la ampliación de la producción del horno. El medio filtrante elegido fue GORE-SUPERFLEX debido a que soporta un mayor número de ciclos de limpieza que los convencionales. Se instalaron 2.542 mangas, con una superficie activa de 7.779 m².</p>  <p>Figura 6.1.1. Esquema de funcionamiento de un filtro híbrido.</p>						
<p>Resultados obtenidos</p>	<p>Un año después de la instalación del filtro híbrido, quedó demostrada la eficiencia de la tecnología para el desempolvado de los gases. Las emisiones en todo momento son inferiores a 8 mg/Nm³.</p> <table border="1" data-bbox="453 1406 1369 1599"> <thead> <tr> <th></th> <th>Emisiones de partículas (mg/m³)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Antes de la medida</td> <td>60-75</td> </tr> <tr> <td>Después de la medida</td> <td><8</td> </tr> </tbody> </table> <p>La caída de presión resultante fue de 6,5 mbar, incluso por debajo del valor garantizado por el fabricante de 7,5 mbar.</p> <p>Tras la aplicación de esta medida se comprobó la posibilidad de reemplazar completamente el agua de refrigeración por aire fresco sin experimentar restricciones de proceso con combustibles convencionales.</p> <p>Durante las pocas paradas del campo electrostático por disparos de CO, el campo de mangas funcionó sin problemas, es decir, sin aumento excesivo de caída de presión y sobre todo sin aumento de las emisiones de polvo.</p>		Emisiones de partículas (mg/m ³)	Antes de la medida	60-75	Después de la medida	<8
	Emisiones de partículas (mg/m ³)						
Antes de la medida	60-75						
Después de la medida	<8						
<p>Aspectos económicos</p>	<p>Se han estimado unos costes inferiores a 3 millones de €.</p>						

Fuente: Cemento y Hormigón, mayo 2004.

Caso práctico 4	6.1.4. INSTALACIÓN DE CICLONES							
País	TURQUÍA.							
Tipo de planta	Integrada.							
Problemática medioambiental	Emisión de partículas.							
Objetivo	Tratamiento Finalista. Disminuir la emisión de partículas.							
Antecedentes	<p>Esta planta fue instalada en 1911 con una capacidad de 20 mil toneladas. Posteriormente fue mejorada en 1923 alcanzando una capacidad de producción de 40 mil toneladas.</p> <p>Durante la fabricación del cemento, las materias primas (caliza y arcilla) se calientan en un horno rotatorio provocando una emisión de gases cargados de polvo. Los gases pasan a través de varios precipitadores electrostáticos antes de ser emitidos a la atmósfera. Uno de los cuatro precipitadores de los que disponía la planta no permitía alcanzar un nivel aceptable de reducción de partículas.</p>							
Medida aplicada	Para mejorar la eficiencia de los precipitadores electrostáticos, se instaló un separador ciclónico de gran alcance, localizado en la cabeza de la unidad de desempolvamiento. De tal manera que éste retira las partículas más gruesas, por lo que llega una menor cantidad de partículas a los precipitadores, lo que garantiza una mayor eficiencia de estos.							
Resultados obtenidos	<p>En la siguiente tabla se compara la emisión de partículas antes y después de instalar los ciclones. Como se puede observar se han reducido en un 72 %.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Emisiones de partículas (mg/m³)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Antes de la medida</td> <td>180</td> </tr> <tr> <td>Después de la medida</td> <td>50</td> </tr> </tbody> </table> <p>Con esta reducción, las emisiones de partículas se encuentran por debajo de la regulación local.</p>			Emisiones de partículas (mg/m ³)	Antes de la medida	180	Después de la medida	50
	Emisiones de partículas (mg/m ³)							
Antes de la medida	180							
Después de la medida	50							
Aspectos económicos	Costes de Inversión de la medida aplicada: 620.000 €							

Fuente: Lafarge

Caso práctico 5	6.1.5. INSTALACIÓN DE FILTROS DE MANGAS	
País	BOSNIA Y HERZEGOVINA.	
Tipo de planta	Integrada.	
Problemática medioambiental	Emisión de partículas.	
Objetivo	Tratamiento Finalista. Disminuir la emisión de partículas.	

<p>Antecedentes</p>	<p>El sistema de filtración existente, precipitadores electrostáticos (EP), no ha llegado a alcanzar su máximo rendimiento desde que se instaló hace 30 años. Las altas concentraciones de CO en los gases de salida del horno (picos de CO) y las frecuentes interrupciones en el suministro de energía provocan la parada de los EP, lo que supone unas emisiones muy altas de partículas varias veces al día.</p> <p>Esta problemática provocó un aumento en la sensibilización de la población y duras discusiones con las autoridades locales, lo que terminó en una parada en la producción en el año 2000.</p>						
<p>Medida aplicada</p>	<p>La compañía decidió realizar una gran inversión en esta con el fin de modernizar sus instalaciones. Uno de los mayores proyectos de esta inversión fue la mejora del sistema de filtración de la planta, realizada en 2002.</p> <p>Se decidió reemplazar los EP existentes y los separadores ciclónicos del enfriador de clínker por filtros de mangas. Esta nueva tecnología reduciría las emisiones en el 96 %.</p> <p>Además, el sistema de desempolvamiento conlleva una serie de cambios asociados. El gas residual del enfriador es ahora dirigido a la torre de precalentamiento donde se mezcla con el aire residual que llega directamente del horno y de la molienda de materias primas. Otra opción es enviar el gas residual frío de nuevo a la molienda de materias primas. Posteriormente el gas se hace pasar a través del nuevo filtro antes de ser emitido a la atmósfera.</p> <p>Este sistema es innovador en cuanto al aprovechamiento de los gases residuales del enfriador para otros fines y limpieza la mezcla de gases en un filtro común es un sistema</p>						
<p>Resultados obtenidos</p>	<p>Los filtros de mangas funcionaron satisfactoriamente, según lo esperado por la planta.</p> <p>Resultados obtenidos:</p> <table border="1" data-bbox="448 1283 1370 1476"> <thead> <tr> <th></th> <th>Emisiones de partículas (mg/m³)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Antes de la medida</td> <td>150</td> </tr> <tr> <td>Después de la medida</td> <td><25</td> </tr> </tbody> </table> <p>Las medidas de emisión de partículas indicaron que se alcanzaban valores incluso por debajo de los garantizados.</p> <p>Esta disminución provocó una considerable mejora en la calidad del aire, creándose una imagen muy positiva de la planta de cemento para la población y para las autoridades gubernamentales.</p> <p>Otros beneficios fueron:</p> <p>La mayor eficiencia del sistema productivo.</p> <p>La reducción del consumo de combustible debido a la recirculación de los gases calientes.</p> <p>Disminución del ruido.</p>		Emisiones de partículas (mg/m ³)	Antes de la medida	150	Después de la medida	<25
	Emisiones de partículas (mg/m ³)						
Antes de la medida	150						
Después de la medida	<25						
<p>Aspectos económicos</p>	<p>Los costes de Inversión del sistema de filtración fueron alrededor de 9 millones de €.</p>						

Fuente: HeidelbergCement

Caso práctico 6	6.1.6. IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE CONTROL DE PROCESO
País	ESPAÑA.
Tipo de planta	Integrada.
Problemática medioambiental	Pérdida de energía. Emisiones de contaminantes atmosféricos.
Objetivo	Prevención en origen. Aumentar la eficiencia del sistema de producción. Evitar emisiones atmosféricas contaminantes.
Antecedentes	Esta planta de cemento se instaló en 1967 ampliándose posteriormente en dos ocasiones. Actualmente cuenta con una capacidad de producción efectiva de 1.800.000 t/año. El sistema de fabricación es vía seca y el combustible utilizado es coque de petróleo. La fábrica está constituida por 3 hornos de producción de clínker (hornos con precalentador y precalcinador de 4, 5 y 6 etapas de ciclones), tres molinos de crudo, dos molinos de carbón y tres molinos de cemento (molinos de bolas con circuito cerrado).
Medida aplicada	En el año 2000, la compañía realizó inversiones para actualizar las instalaciones y se implementó un sistema de control de proceso que facilita la obtención y manejo de información, lográndose la optimización del proceso de producción y la reducción de la desviación estándar de alimentación de los hornos. El incremento en la estabilidad del proceso y el aumento de los rendimientos energéticos de los hornos de la planta, ha llevado a la reducción de la emisión específica de CO ₂ en la producción del clínker.
Resultados obtenidos	Reducción de 16.000 toneladas de CO ₂ en el año 2000. Reducción de 18 kcal/kg de clínker en el consumo calorífico medio de la planta. Se tiene mayor estabilidad operativa en los hornos aumentando tanto la eficiencia como la utilización.
Aspectos económicos	Costes de Inversión de esta medida son despreciables. Los beneficios económicos durante el año 2000 fueron de 165.000 \$

Fuente: CEMEX

Caso práctico 7	6.1.7. IMPLEMENTACION DE PROGRAMA DE MANTENIMIENTO
País	EGIPTO.
Tipo de planta	Integrada.
Problemática medioambiental	Pérdida de energía. Emisiones de contaminantes atmosféricos.
Objetivo	Prevención en origen. Aumentar la eficiencia del sistema de producción. Evitar emisiones atmosféricas contaminantes.
Antecedentes	En 1994, la compañía decidió introducir los conceptos de una producción limpia en esta planta. Basándose en estudios previos realizados en la planta, decidieron centrarse en la operación del horno de cemento.

	<p>Los registros de producción y los datos de laboratorio se usaron para determinar las cantidades de entrada y salida durante un período de un año y para realizar el balance de masas para la operación del horno.</p> <p>Este balance demostró que existía un desajuste de 136 toneladas de materia prima por día, lo que indicaba un potencial de reducción de emisiones y residuos.</p>
Medida aplicada	<p>La medida implementada no consistió en la aplicación de una nueva tecnología, sino en una nueva planificación del programa de mantenimiento.</p> <p>Se aumentó el mantenimiento preventivo y se realizaron pequeños cambios para asegurar una operación continua y un mayor ajuste de los elementos metálicos, para así minimizar pérdidas a lo largo de todo el proceso.</p> <p>Se formuló un programa de mantenimiento y su aplicación fue controlada más exhaustivamente.</p>
Resultados obtenidos	<p>Se calculó que tras la medida se emitieron 3.600 toneladas menos de partículas en el primer año, reduciendo la contaminación del medioambiente más cercano.</p>
Aspectos económicos	<p>Costes de Inversión de esta medida son despreciables.</p> <p>Los ahorros anuales que se obtuvieron fueron de 132.000 \$ (ahorro de 12 toneladas de consumo de materia prima al día).</p>

Fuente: UNIDO

7. GLOSARIO

adición – *addition / additive* – material que se muele junto con un cemento hidráulico o se mezcla en cantidades limitadas con el mismo, ya sea como "adición de proceso" para facilitar la fabricación o manipulación del cemento o como "adición funcional" para modificar las propiedades del producto acabado.

aditivo acelerador – *accelerating admixture* - ingrediente que provoca un aumento de la velocidad de hidratación del cemento hidráulico, y por lo tanto acorta el tiempo de fraguado, o aumenta la velocidad de desarrollo de la resistencia, o ambos.

agente – *agent* - término general que se aplica a un material que se puede utilizar ya sea como aditivo para el cemento o como ingrediente del hormigón, por ejemplo, un agente incorporador de aire.

aglomerantes – *binders* - materiales cementantes, ya sea cementos hidratados o productos de cemento o cal y materiales silíceos reactivos; los tipos de cemento y las condiciones de curado determinan el tipo general de aglomerante formado; también se denomina así a los materiales tales como el asfalto, las resinas y otros materiales que forman la matriz de los hormigones, morteros y lechadas arenosas.

álcali – *alkali* - sales de metales alcalinos, principalmente sodio y potasio; específicamente el sodio y potasio que se da en los componentes del hormigón y mortero, que en los análisis químicos normalmente se expresan como los óxidos Na_2O y K_2O .

alita – *alite* - nombre empleado por Tornebohm (1897) para identificar el tricalcio silicato con pequeñas cantidades de MgO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 otros óxidos; es un componente principal del clínker de cemento portland.

alúmina – *alumina* - óxido de aluminio (Al_2O_3).

aluminato tricálcico – *tricalcium aluminate* - compuesto cuya composición química es $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ y se abrevia C3A.

aluminoferrito tetracálcico – *tetracalcium aluminoferrite* compuesto de la serie de los aluminoferritos cuya composición es $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$ (que se abrevia C4AF) que generalmente se asume es el aluminoferrito presente cuando se hacen los cálculos para los compuestos a partir de los resultados del análisis químico del cemento portland.

bauxita – *bauxite* - roca compuesta principalmente por óxidos de aluminio anhidros; el principal mineral de aluminio; materia prima para la fabricación de cemento de aluminato de calcio.

belita – *belite* - nombre empleado por Tornebohm (1897) para identificar una forma del componente del clínker de cemento portland que en su forma pura ahora se conoce como dicalcio silicato ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$).

cal – *lime* - específicamente óxido de calcio (CaO); en general, término que se aplica a las diferentes formas físicas y químicas de la cal viva, cal hidratada y cal hidráulica hidratada.

cal libre – *free lime* - óxido de calcio (CaO), como en el clínker y el cemento, que no se ha combinado con SiO_2 , Al_2O_3 ni Fe_2O_3 durante el proceso de calcinado, generalmente debido a un calcinado incompleto, trituración insuficiente de la mezcla cruda o presencia de cantidades mínimas de inhibidores.

calcinar – *calcine* - alterar una composición o estado físico calentando por debajo de la temperatura de fusión.

calcita – *calcite* - mineral que tiene la composición carbonato de calcio (CaCO_3) y una estructura cristalina específica; componente principal de la caliza, la tiza y el mármol; se usa como uno de los componentes principales en la fabricación de cemento portland.

caliza – *limestone* - roca sedimentaria compuesta fundamentalmente de carbonato de calcio.

carbonatación – *carbonation* - reacción entre dióxido de carbono y un hidróxido o un óxido para formar un carbonato, especialmente en una pasta de cemento, mortero u hormigón; reacción con compuestos de calcio para producir carbonato de calcio.

cemento – *cement* – (ver cemento hidráulico - hydraulic cement).

cemento a granel – *bulk cement* - cemento que se transporta y entrega a granel (generalmente en vehículos especialmente diseñados) y no en bolsas.

cemento asfáltico – *asphalt cement* – asfalto fluidificado o no fluidificado especialmente preparado en cuanto a su calidad y consistencia para ser usado directamente en la fabricación de pavimentos bituminosos, y que tiene una penetración a 25 °C (77 °F) de entre 5 y 300, bajo una carga de 100 g aplicada durante 5 s.

cemento blanco – *white cement* – cemento portland que se hidrata formando una pasta blanca; se fabrica a partir de materia prima de bajo contenido de hierro cuyo clínker se calcina con una llama reductora.

cemento de aluminato de calcio – *calciumaluminum cement* (también *aluminum cement*, *aluminous cement*) - producto que se obtiene pulverizando clínker compuesto fundamentalmente por aluminatos de calcio hidráulicos producidos durante la fusión o sinterización de una mezcla adecuadamente dosificada de materiales aluminosos y calcáreos; en el Reino Unido se lo denomina high-alumina cement.

cemento hidráulico – *hydraulic cement* - cemento que fragua y endurece por interacción química con el agua y es capaz de hacerlo bajo el agua.

cemento hidrófobo – *hydrophobic cement* - cemento no hidratado tratado de manera de reducir su tendencia a absorber humedad.

cemento compuesto – *blended cement* – cemento hidráulico que consiste esencialmente en una mezcla íntima y uniforme de escoria granulada y cal hidratada; o una mezcla íntima y uniforme de cemento portland y escoria granulada, cemento portland y puzolana o cemento portland de escoria de alto horno y puzolana; se produce moliendo conjuntamente el clínker de cemento Portland con los demás materiales, mezclando el cemento portland con los demás materiales, o bien combinando la molienda conjunta y el mezclado.

cemento natural – *natural cement* – cemento hidráulico que se produce calcinando una caliza arcillosa a una temperatura por debajo del punto de sinterización y luego moliendo el producto calcinado para obtener un polvo fino.

cemento normal – *normal cement* – cemento portland para usos generales; en Estados Unidos se lo denomina Tipo I. cemento pegajoso – *sticky cement* – cemento acabado que desarrolla una fluidez baja o nula durante o después de su almacenamiento en silos, o después de ser transportado en recipientes a granel, vagones de tolva, etc.; este fenómeno se puede deber a: (a) trabazón de las partículas; (b) compactación mecánica; (c) atracción electrostática entre partículas. (Ver también fraguado en almacenamiento - *warehouse set*).

cemento portland – *portland cement* – cemento hidráulico que se produce pulverizando clínker de cemento portland y que generalmente contiene sulfato de calcio.

cemento portland con escoria de alto horno – *portland blast-furnace slag cement* - cemento hidráulico que consiste en una mezcla finamente molida de clínker de cemento portland y escoria de alto horno granulada, o bien una mezcla íntima y uniforme de cemento portland y escoria de alto horno finamente granulada en la cual la cantidad de escoria está dentro de límites especificados.

cemento portland modificado – *modified portland cement* - cemento portland que tiene un calor de hidratación moderado; a partir de 1960 este término fue reemplazado por "cemento Tipo II".

cemento portland normal – *ordinary portland cement* - término que se usa en el Reino Unido y otros países para designar el equivalente del cemento portland normal o cemento Tipo I de los estadounidenses; en inglés frecuentemente se utilizan las siglas OPC.

cemento portland puzolánico – *portlandpozzolan cement* - cemento hidráulico que consiste en una mezcla íntima y uniforme de cemento portland o cemento portland con escoria de alto horno y puzolana fina, producido moliendo juntamente clínker de cemento portland y puzolana, mezclando cemento portland o cemento portland con escoria de alto horno y puzolana finamente dividida o mediante una combinación de molienda conjunta y mezclado, en el cual la puzolana está dentro de límites especificados.

cemento supersulfatado – *supersulfated cement* - cemento hidráulico que se fabrica moliendo íntimamente una mezcla de escoria de alto horno granulada, sulfato de calcio y una pequeña cantidad de cal, cemento o clínker de cemento; se lo llama así porque su contenido de sulfato equivalente es mayor que el del cemento portland con escoria de alto horno.

clínker – *clínker (ocasionalmente breeze)* - producto de un horno parcialmente fundido que se muele para fabricar cemento; también otros materiales vitrificados o calcinados.

dolomita – *dolomite* - mineral que posee una estructura cristalina específica y consiste en carbonato de calcio y carbonato de magnesio en cantidades químicamente equivalentes – 54,27 y 45,73 por ciento, respectivamente; roca cuyo componente principal es dolomita.

escoria de alto horno – *blast-furnace slag* - producto no metálico, compuesto fundamentalmente por silicatos y aluminio-silicatos de calcio y otras bases, que se produce simultáneamente con la fusión del mineral de hierro en un alto horno.

- 1.- *escoria enfriada al aire (air-cooled blastfurnace slag)* es el material que resulta de la solidificación de la escoria fundida bajo condiciones atmosféricas; el enfriamiento subsiguiente se puede acelerar aplicando agua a la superficie solidificada.
- 2.- *escoria expandida (expanded blastfurnace slag)* es el material celular liviano que se obtiene mediante el procesamiento controlado de la escoria fundida con agua, o con agua y otros agentes, tales como vapor o aire comprimido, o ambos.
- 3.- *escoria granulada (granulated blastfurnace slag)* es el material granular, vidrioso, que se forma cuando la escoria fundida se enfría rápidamente, como por inmersión en agua.

fundido – *melt* - porción de la masa de materia prima que se funde durante el quemado de clínker de cemento, la calcinación de agregados livianos o la expansión de escorias de alto horno.

horno de cemento – *cement kiln* - horno en el cual la mezcla cruda se seca y dosifica, se calcina y se quema para obtener clínker a temperaturas comprendidas entre 2.600 y 3.000 °F (1.420 a 1.650 °C); puede ser de tipo giratorio, de cubilote, de lecho fluido o de parrilla móvil; el combustible puede ser carbón, petróleo o gas.

índice de actividad puzolánica – *pozzolanicactivity index* - índice que mide la actividad puzolánica en base a la resistencia de mezclas cementicias que contienen cemento hidráulico con y sin la puzolana, o que contienen la puzolana y cal.

ingrediente retardador – *retarding admixture* - ingrediente que provoca una disminución de la velocidad de hidratación del cemento hidráulico y prolonga el tiempo de fraguado.

molienda final – *finish grinding* – trituración final del clínker para obtener cemento, generalmente con adición de sulfato de calcio en forma de yeso o anhidrita.

molino de bolas – *ball mill / tube mill* – molino giratorio horizontal, cilíndrico, en el cual se utilizan bolas como agente de molienda.

molino de rodillos – *roller mill* – molino horizontal o vertical, en el cual se muele la materia prima mediante la presión que ejercen unos rodillos giratorios.

NSP- *New suspensión preheater*- precalentador de ciclones con precalcinador.

pasta – *slurry* - mezcla de agua y cualquier material insoluble finamente dividido, tal como cemento portland, escoria o arcilla, en suspensión.

PC – *precalciner* – precalcinador.

periclasa – *periclase* - mineral cristalino, MgO, cuyo equivalente puede estar presente en el clínker de cemento portland, el cemento portland y otros materiales tales como las escorias de horno Siemens Martín y ciertos refractarios básicos.

pizarra – *slate* - roca metamórfica de grano fino que posee fisilidad bien desarrollada (clivaje esquistoso) generalmente no paralela a los planos de estratificación de la roca.

puzolana – *pozzolan* - material silíceo o silíceo y aluminoso que en sí mismo posee escaso valor cementicio pero que, en forma finamente dividida y en presencia de humedad, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio a temperaturas habituales formando compuestos que poseen propiedades cementicias.

puzolana natural – *natural pozzolan* – material natural sin procesar o calcinado que tiene propiedades puzolánicas (por ejemplo, ceniza volcánica o pumicita, chert opalino y esquistos, tufa y algunas tierras diatomáceas).

puzolánico – *pozzolanic* - propio de una puzolana o relacionado con una puzolana.

roca calcárea para fabricación de cemento – *cement rock* - caliza natural impura que contiene los ingredientes para la fabricación del cemento portland aproximadamente en las proporciones requeridas.

SF y NSF – *suspensión furnace / new suspensión furnace* – Horno en suspensión / nuevo horno en suspensión. Son dos versiones sucesivas que se diferencian por la posición de los quemadores e introducción de la materia en el hogar.

silicato dicálcico– *dicalcium silicate* – compuesto cuya composición es $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, abreviada C2S; una de sus formas impuras (belita) se da en el clínker de cemento portland.

silicato tricálcico – *tricalcium silicate* - compuesto cuya composición química es $3\text{CaO}\cdot\text{Si}_2\text{O}_3$ y se abrevia C3S; una de sus formas impuras es un componente principal del cemento portland.

SP – *Suspension preheater* - precalentador de ciclones.

yeso – *gypsum* - mineral cuya composición es sulfato de calcio dihidratado ($\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

8. BIBLIOGRAFÍA

Estudio y resultados de la participación del Sector Cementero Español en el Inventario Nacional de Dioxinas y Furanos (2000-2003). Año 2005

Stacker and reclaimers systems. FLSmith. Materials Handling. Año 2005.

The Global Cement Report (6ª Edición). Año 2005.

Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Final Draft 2005. IPCC The Intergovernmental Panel on Climate Change. Año 2005.

Industrial Competitiveness under the European Union Emissions Trading Scheme. IEA. International Energy Agency. Febrero 2005.

Directrices sobre Mejores Técnicas Disponibles y orientación provisoria sobre Mejores Prácticas Ambientales según el Artículo 5 y el Anexo C del Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes [Borrador]. Diciembre 2004.

Energy Efficiency Improvement Opportunities for Cement Making. An ENERGY STAR Guide for Energy and Plant Managers. Enero 2004

Projet de substitution dans le ciment d'une partie de clinker par les cendres volantes des centrales thermiques. Cement Industry Federation. Enero 2004.

Hendrik G. van Oss and Amy C. Padovani. Cement Manufacture and the Environment. Año 2003.

Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España de fabricación de cemento. Ministerio de Medio Ambiente. Año 2003.

Energy consumption and CO₂ emissions from the world cement industry. Institute for prospective Technological studies. Junio 2003.

Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology (4th Edition). Vol 5. Año 2002.

Reference Document on Best Available Techniques in the Cement and Lime Manufacturing Industries. Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC). [BREF, 2001]. Diciembre 2001.

Environmental Impact Assessment Guidelines for Cement Manufacturing Plants. Egyptian Environmental Affairs Agency EEAA. Febrero 2001.

Experience with the OK Roller Miller. IFC International Finance Corporation. World Bank Group. Asian cement and construction materials magazine. Año 2000.

Fours de cimenterie. Ateliers de cuisson du clinker. Año 2000.

NO_x Control Technologies for the Cement Industry. Final Report. Septiembre 2000.

Evaluating Clean Development Mechanism Projects in the Cement Industry Using a Process-Step Benchmarking Approach. Julio 2000.

Emission Reduction of Greenhouse Gases from the Cement Industry by C.A. Hendriks¹, E Worrell², D. de Jager¹, K. Blok¹, and P. Riemer³ ¹ECOFYS, P.O Box 8408, NL-3503 RK Utrecht, the Netherlands ²Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, USA ³IEA Greenhouse Gas R&D Programme, Cheltenham, UK. Año 1998.

Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment, The Netherlands Dutch Notes on BAT for the Production of Cement Clinker. Año 1997.

Marchal, G. "Industrial Experience with Clinker Grinding in the Horomill" Proc.1997 IEEE/PCA Cement Industry Technical Conference XXXIX Conference Record, Institute of Electrical and Electronics Engineers: New Jersey. Año1997.

Buzzi, S., 1997. "Die Horomill® - Eine Neue Mühle für die Feinzerkleinerung," ZKG International 3 50 pp.127-138. Año 1997.

Cement and Lime Manufacturing Industries 101 [Int.Cem.Rev, Oct/97] British Cement Association Prevention and abatement of NOx emissions International Cement Review, p. 51-59. Octubre1997.

W. Billhardt, K. Kuhlmann, W. Ruhland, M. Schneider, H. Xeller. Current state of NOx abatement in the cement industry. ZKG International, Volume 49, No. 10, p. 545-560. Año 1996.

Jaccard, M.K.& Associates and Willis Energy Services Ltd. Industrial Energy End-Use Analysis and Conservation Potential in Six Major Industries in Canada. Report prepared for Natural Resources Canada, Ottawa, Canada. Año1996.

Worrell, E., R. Smit, D. Phylipsen, K. Blok, F. van der Vleuten and J. Jansen. International Comparison of Energy Efficiency Improvement in the Cement Industry, Proceedings ACEEE 1995 Summer Study on Energy Efficiency in Industry (Volume II). Año 1995.

Vleuten, F.P. van der. "Cement in Development: Energy and Environment" Netherlands Energy Research Foundation, Petten, The Netherlands. Año 1994.

Buzzi, S. and G. Sassone. "Optimization of Clinker Cooler Operation," Proc. VDZ Kongress 1993: "Verfahrenstechnik der Zementherstellung" Bauverlag, Wiesbaden, Germany (pp.296-304). Año 1993.

Holderbank Consulting. "Present and Future Energy Use of Energy in the Cement and Concrete Industries in Canada," CANMET, Ottawa, Ontario, Canada. Año1993.

D. Kupper, L. Brentrup – Krupp Polysius, Germany. SNCR technology for NOx reduction in the cement industry... World Cement. Marzo 1992.

COWIconsult, March Consulting Group and MAIN, 1993. "Energy Technology in the Cement Industrial Sector", Report prepared for CEC - DG-XVII, Brussels. Abril 1992.

Birch, E. "Energy Savings in Cement Kiln Systems" Energy Efficiency in the Cement Industry (Ed. J. Sirchis), London, England: Elsevier Applied Science (pp.118-128). Año1990.

Parkes, F.F. "Energy Saving by Utilisation of High Efficiency Classifier for Grinding and Cooling of Cement on Two Mills at Castle Cement (Ribblesdale) Limited, Clitheroe, Lancashire, UK" Energy Efficiency in the Cement Industry (Ed. J. Sirchis), London, England: Elsevier Applied Science. Año 1990.

The Rotary Cement Kiln, Chemical Publishing Company. Año 1986.

CEMBUREAU (Asociación Europea del Cemento)

Activity Report 2004 - Rapport d'Activité. Año 2004

World Cement Directory. Año2002.

"Best Available Techniques" for the Cement Industry. Mazo 2000.

Environmental Benefits of using Alternative Fuels in Cement Production - A Life-Cycle Approach. Febrero 1999.

Climate Change, Cement and the EU. Julio 1998.

Informe Cembureau, 1997. A contribution from the European Cement Industry to the exchange of information and preparation of the IPPC BAT Reference Document for the cement industry.

Alternative Fuels in Cement Manufacture - Technical and Environmental Review. Abril 1997.

Cemento Hormigón (Revista Técnica)

Aprovechamiento energético de neumáticos usados en la industria cementera europea. Septiembre 2005.

Reducción de las emisiones de NO_x en la industria. Diciembre 2004.

Instalación para recuperación de polvos de electrofiltro de bypass de cloro mediante dilución y filtro prensa. Septiembre 2004.

Transformación del electrofiltro de horno a filtro híbrido en Gádor. Mayo 2004.

Experiencia de la industria del cemento francesa en el uso de combustibles alternativos. Abril 2004.

Evaluación de las tecnologías para la monitorización en continuo de partículas en chimenea. Marzo 2004.

Estado de la Producción más Limpia en los países del Plan de Acción para el Mediterráneo. Centro de Actividad Regional para la Producción más Limpia CAR/PL. Enero 2004.

Experiencias de funcionamiento industrial y optimización de diseño de quemador utilizando quemadores Rotaflam de bajo NO_x en hornos de cemento para combustión de petcoke. Noviembre 2003.

Control de la emisión de SO₂ en hornos de cemento. Septiembre 2003.

Nueva tecnología para el control de emisiones: determinación de la composición de las partículas emitidas en la producción de clínker. Junio 2003.

Tramitación de la autorización ambiental de la fábrica de Alcanar y cantera adyacente. Mayo 2003.

Primera evaluación de las emisiones de PCDD/FS a la atmósfera procedentes de la fabricación de cemento en España. Noviembre 2002.

Prevención y control integrados de la contaminación y mejores técnicas disponibles (II). Septiembre 2002.

Prevención y control integrados de la contaminación y mejores técnicas disponibles (I). Julio 2002.

Evaluación de la situación ambiental de la producción de clínker mediante la aplicación del análisis del ciclo de vida. Mayo 2002.

Cemento y Desarrollo Sostenible. Enero 2002.

Eliminación de NO_x con el proceso SNCR en instalaciones de horno con combustión escalonada. Enero. 2002.

WBCSD The World Business Council for Sustainable Development

- The Cement CO₂ Protocol: CO₂ Accounting and Reporting Standard for the Cement Industry. Julio 2005.

- The Cement Sustainability Initiative: Progress report. Junio 2005.
- Toward a Sustainable Cement Industry. Marzo 2002.

CDIAC (Carbon Dioxide Information Analysis Center)

- Fiscal Year 2003 Annual Report
- FY Annual Reports for CDIAC and the WDC for Atmospheric Trace Gases (1997 - 2003)
- National Cement Production Estimates: 1950 – 2002.

LBNL Lawrence Berkeley National Laboratory

Energy Efficiency Improvement Opportunities for Cement Making An ENERGY STAR Guide for Energy and Plant Managers. Ernst Worrell and Christina Galitsky Environmental Energy Technologies Division Sponsored by the U.S. Environmental Protection Agency January 2004.

Evaluating Clean Development Mechanism Projects in the Cement Industry Using a Process-Step Benchmarking Approach Michael Ruth, Ernst Worrell, and Lynn Price Environmental Energy Technologies Division, July 2000.

UNIDO (United Nations Industrial Development Organization)

Output of a Seminar on Energy Conservation in Cement Industry. United Nations Industrial Development Organization. (UNIDO). Año 1994.

Capacity-building for private sector development in Africa by Richard M. Kennedy.

Private Sector Development Branch Investment Promotion and Institutional Capacity Building Division

PÁGINAS WEB

AITEC – Associazione Italiana Tecnico Economica del Cemento. www.aitecweb.com

American Concrete Institute. www.aci-int.org

CAR/PL. Centro de Actividad Regional para la Producción Limpia. www.cema-sa.org

CEEBIC Central Eastern Europe Business Information Center. www.mac.doc.gov/ceebic.

Ciment Català. www.ciment-catala.org

European Commission's "Energy". http://europa.eu.int/comm/energy/index_en.html

Hellenic Cement Industry Association. www.hcia.gr

Oficemen – Agrupación de Fabricantes de Cemento de España. www.oficemen.com

SFIC – Syndicat Français de l'Industrie Cimentière. www.infociments.fr

TÇMB – Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği www.tcma.org.tr

EAN

ion



**Centro de Actividad Regional
para la Producción Limpia (CAR/PL)**

Dr. Roux, 80 – 08017 Barcelona (España)

Tel.: + 34 93 553 87 90 – Fax: + 34 93 553 87 95

E-mail: cleanpro@cprac.org

<http://www.cprac.org>



Impreso sobre papel 100 % reciclado libre de cloro