

APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE NEUMÁTICOS USADOS EN LA INDUSTRIA CEMENTERA EUROPEA

DRA. CLAUDE LOREA

DIRECTORA TÉCNICA DE CEMBUREAU

DR. WILLEM VAN LOO

DIRECTOR DEL EU PUBLIC AFFAIRS DE CEMBUREAU

HEIDELBERG CEMENT

Los neumáticos usados, clasificados como material no peligroso, se usan como combustible alternativo en los hornos de cemento. En los países europeos se ahorra una cantidad equivalente a más de 550 Kt del total de neumáticos usados enteros y troceados, la misma cantidad de combustibles fósiles como carbón de alta calidad. Por lo tanto, se evitan las repercusiones potenciales de la combustión al aire libre y del vertido de cenizas o del vertido directo de los neumáticos. Los neumáticos se introducen en diferentes puntos del proceso dependiendo del tipo de horno. El contenido de hierro de los neumáticos se gestiona modificando la composición de la materia prima y el porcentaje de sustitución. En este proceso, el alto valor calórico de los neumáticos, aportado por los cauchos naturales y sintéticos, se aprovecha sin repercusión significativa alguna en las emisiones al aire. Los elementos químicos de la ceniza se incorporan a las estructuras minerales y no tienen repercusión negativa alguna en la calidad del clínker.

1. Introducción

El cemento es un mineral en polvo molido finamente que, cuando se mezcla con agua, forma una pasta que fragua y se endurece. Después del endurecimiento, conserva

su consistencia y estabilidad, incluso bajo el agua. Este endurecimiento hidráulico se debe principalmente a la formación de hidratos de silicato de calcio, que son el resultado de la reacción entre el agua y los componentes del cemento.

La producción de cemento consume inherentemente grandes cantidades de materias primas y de energía. Por ejemplo, una planta de cemento vía seca necesita unas 1.600.000 toneladas de materias primas y 150.000 toneladas de combustibles (en equivalente a carbón de alta calidad) para producir anualmente 1 Mt de clínker de cemento Portland. Por ejemplo, en la UE a 25, y en Suiza, Noruega y países candidatos (Bulgaria, Rumania y Turquía), se consumieron en el año 2002 375 Mt de materias primas y 30 Mt de combustibles para producir 267 Mt de cemento.

Durante muchos años, la Industria Cementera Europea ha venido sustituyendo crecientemente estos recursos no renovables por materias primas y combustibles alternativos. En las diferentes etapas del proceso se pueden introducir diferentes tipos de materias primas y de combustibles alternativos, y aprovecharlos en el proceso de producción de clínker y cemento. Éstos son un medio importante en la industria del cemento para el ahorro de recursos naturales y la reducción del impacto medioambiental de la explotación de canteras y del procesado de emisiones.

Los neumáticos se introducen también como combustible alternativo en la producción de clínker para aprovechar su energía térmica. Se admite que este uso es una solución medioambiental válida y neutral en comparación con la opción del vertido (1,2). Siendo el enterramiento la opción menos atractiva debido principalmente a la lixiviación resultante a largo plazo de metales con un grado de ecotoxicidad relativamente alto (2), sólo se sugiere cuando no es posible aplicar otras soluciones como el reciclado del material o cuando no se puede aplicar el aprovechamiento energético (1). Además, el quemado incontrolado (frecuentemente incompleto) al aire libre puede emitir niveles de monóxido de carbono, hidrocarburos aromáticos mono y policíclicos potencialmente peligrosos en el penacho del humo, causando daños a la flora y a la fauna (1). Por esta razón, la Unión Europea adoptó, dentro del marco de la Directiva (1999/31/CE) una prohibición general de verter neumáticos enteros desde 2003 y troceados hacia 2006.

Este artículo describe brevemente la producción de cemento y los diferentes aspectos del uso de neumáticos como combustible alternativo sobre la base de la experiencia en la Industria Cementera Europea.

2. Producción de cemento

2.1. Proceso de Fabricación

El clínker de cemento se produce en hornos rotatorios principalmente con procesado en seco que consume considerablemente menos energía térmica que el proceso húmedo. Durante el proceso de producción, que se puede dividir en varios subprocesos, los recursos minerales naturales se transforman mineralógicamente en clínker utilizando energía de combustibles fósiles y después en diferentes cementos. Estos subprocesos son: extracción de materias primas (voladura o excavación, carga y transporte), preparación de las materias primas (machacado, almacenamiento, mezclado y molido), transformación mineralógica u operaciones de horno (operaciones y preparación del combustible y cocción del clínker, enfriamiento y almacenamiento, y preparación del cemento (mezclado, molido, almacenamiento, envasado y expedición).

La transformación mineralógica o proceso de producción de clínker en hornos rotatorios, que consume la mayor parte de la energía utilizada, comienza con la descomposición térmica del carbonato cálcico (CaCO_3) a unos 900°C que libera dióxido de carbono (CO_2). En la fase de clinkerización a alta temperatura (típicamente $1400 - 1500^\circ\text{C}$), el óxido de calcio reacciona con el sílice, la alúmina y el hierro para formar silicatos, aluminatos y ferritos de calcio que están presentes en los minerales clinkerizados. A continuación se muele el clínker junto con sulfato cálcico y otras adiciones para producir diferentes tipos de cemento.

2.2. Materias Primas Naturales y Combustibles Fósiles

El clínker de cemento portland ordinario se produce a partir de una mezcla de minerales naturales como piedra caliza / marga / arcilla / pizarra, que aportan los principales componentes químicos de los minerales del clínker (óxidos de calcio, silicio, aluminio y hierro).

La producción de clínker se sitúa cerca de, o incluso integrada con, el lugar de extracción del mineral. Con el fin de reducir el impacto medioambiental del transporte de manera

económica, las plantas de cemento se sitúan frecuentemente cerca de roca carbonatada, que constituye hasta más del 80% de la materia prima utilizada en la mezcla de crudo. En Europa se encuentran normalmente grandes depósitos de estos minerales industriales. El acceso a los mismos y su extracción se está haciendo crecientemente más difíciles debido a las restricciones medioambientales, que son consecuencia de la falta de una gestión territorial que equilibrase en el desarrollo industrial y urbano sostenibles en el pasado.

Se pueden usar varios combustibles fósiles para obtener la energía térmica necesaria en el proceso de fabricación. Los principales combustibles fósiles utilizados en la cocción en el horno de cemento son carbón pulverizado (hulla y lignito), petcoque, gasóleo y gas natural. El coste impide normalmente el uso del gas natural o del gasóleo, no obstante, la selección de combustibles depende totalmente de la situación local (3).

2.3. Materias Primas y Combustibles Alternativos

Se pueden introducir en los subprocesos varios tipos de materias primas alternativas de varias maneras y aprovecharlas para la producción de clínker. Por ejemplo, en 2001 se ha usado aproximadamente un 12% de materiales alternativos esencialmente en la producción de cemento, y se ahorraron 35 Mt de recursos minerales naturales.

Las cenizas volantes, la escoria y varios residuos minerales que contienen los principales componentes del cemento (CaO , Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , SO_3), se pueden reciclar en la producción de clínker. Se pueden añadir residuos minerales sin contenido orgánico en la preparación de la materia prima (catalizadores usados, piratas, bauxitas...). Los residuos minerales contaminados con contenidos orgánicos se introducen con el combustible sólido llevándolo directamente a la zona de cocción y/o calcinación (suelos contaminados, lodos de depuradora de aguas residuales, tierras de filtración, tierras diatomizadas, residuos de producción, lodos de papelera y destintado de papel, tortas de filtro..)

Los materiales naturales cementicios y los subproductos industriales (piedra caliza, puzolana, cenizas volantes, escoria de alto horno, humo de sílice, esquistos calcinados) se pue-

den moler con el clínker para producir diferentes cementos de acuerdo con la Norma Europea EN -197, que entró en vigor en los Estados Miembros a partir de abril de 2002.

En los procesos de mineralización o de producción de clínker, se puede sustituir una parte del combustible fósil por combustibles alternativos, recuperados de diferentes corrientes de residuos seleccionadas. Los combustibles alternativos frecuentemente son preparados y mezclados fuera de la planta de cemento por empresas especializadas en instalaciones diseñadas especialmente para este fin. Las plantas de cemento facilitan los sistemas de almacenamiento y alimentación.

Las condiciones en el sistema de horno, como altas temperaturas ($> 1200^\circ\text{C}$), tiempos de permanencia prolongados, gran inercia térmica y ambiente alcalino, crean un potencial considerable para la destrucción de sustancias orgánicas y hacen posible una amplia variedad de combustibles opcionales menos costosos. Los neumáticos usados, el aceite, disolventes, plásticos, lodos de papelera o de depuradora de aguas residuales, harina animal y serrín impregnado son los principales combustibles alternativos usados actualmente en la Industria Cementera Europea. En 2001, el 12% de los combustibles fósiles tradicionales fueron sustituidos por combustibles alternativos, lo que equivale a 3,3 Mt de carbón.

Esta sustitución, regulada dentro del marco de la Directiva de Incineración de Residuos (2000/76/EC), es también una herramienta importante para una gestión de residuos sostenible. En este proceso, además de la energía térmica, también se aprovecha el contenido material de los combustibles alternativos. Por ejemplo, en el caso de los neumáticos usados, el caucho se consume totalmente como combustible, y el resto de los elementos químicos del refuerzo de acero, como hierro y cinc, se incorporan a la estructura de los minerales del clínker.

3. Combustibles alternativos de neumáticos

Cada año se generan en Europa unos 200 millones de unidades de neumáticos usados, o unos 2,6 Mt; y hay que gestionar 2 Mt de neumáticos al final de su vida útil para su reciclado y aprovechamiento (4). Una parte de los neumáticos enteros o

troceados se usa como combustible alternativo sustituyendo combustibles fósiles tradicionales en hornos de cemento.

De acuerdo con información estadística accesible de la UE, la cantidad de neumáticos usados en hornos de cemento para su aprovechamiento energético en 1997, fue de 410 kt o aproximadamente el 16% de los neumáticos usados en total. Como consecuencia del continuo incremento desde 2001, cada año más de 550 kt de neumáticos enteros y troceados (23%) sustituyen una cantidad igual de carbón de alta calidad. Hacia 2006, con la plena aplicación de la directiva que regula el vertido de residuos (1999/31/EC) y la que regula los vehículos al final de su vida útil (2000/53/EC) podría producirse otro incremento similar.

Esta práctica, aplicada en la Industria Cementera Europea desde hace muchos años, ahorrar combustibles fósiles no renovables y contribuir a la gestión sostenible de residuos consumiendo todos los componentes del neumático. En general, la decisión de usar los neumáticos enteros o troceados depende de varios factores, incluso del tipo de horno, de las restricciones del proceso, los problemas del mercado, precios, espacio de almacenamiento disponible en la planta, etc.

Las propiedades generales de los neumáticos usados y los aspectos técnicos, ambientales y de seguridad e higiene de su uso como combustible alternativo, recopilados por la Industria Cementera, se relacionan a continuación.

3.1. Propiedades Generales de los Neumáticos

Los neumáticos de automóvil se fabrican usando las siguientes materias primas (5,6): Caucho (45 - 48%), negro de humo (22%), Hierro (15 - 25%), textiles (0 - 5%), aditivos que facilitan la combinación y la vulcanización (5 - 8%), óxido de cinc (1 - 2%) y azufre (1 %).

Los neumáticos tienen, en todo el mundo, las mismas características inherentes, como las características químicas y físicas, no biodegradabilidad, no toxicidad, peso, forma, elasticidad, etc. Muchos de los aspectos pueden ser beneficiosos durante su duración en servicio y pueden crear problemas en su gestión después de su uso por el usuario, tales como su recogida, almacenamiento y eliminación (6).

El neumático está clasificado como residuo no peligroso por la Convención de Basilea, y no está presente en lista alguna de materiales peligrosos de acuerdo con la legislación de la UE. Su valor calórico neto es el mismo que el del carbón (Tabla 1) y aproximadamente equivalente a 0,7 toneladas de fuelóleo. Las variaciones del valor calórico y del contenido de ceniza están asociadas normalmente con el porcentaje de acero en los neumáticos. La humedad puede variar también dependiendo de las condiciones de almacenamiento.

Tabla 1.- Algunas características del combustible derivado de neumáticos y del carbón. (6)

Parámetros	Neumático usado	Carbón
Contenido energético (MJ/t)	25 - 30	25 - 30
Humedad (%)	3 - 5	5 - 20
Ceniza (%)	15 - 20	10 - 15
Carbono (%)	60 - 70	
Azufre (%)	1 - 2	0,3 - 2
Nitrógeno (%)	0,3 - 0,5	
Cloro (%)	0,2	
Densidad por unidad de volumen	300 - 600	300 - 500

3.2. Aspectos del proceso

Los neumáticos usados se pueden distribuir desde centros de recogida mediante camiones con remolque, y almacenarse parcialmente en las plantas de cemento. El embalado de la totalidad de los neumáticos es una solución eficiente para los costes de transporte y la reducción del área de almacenamiento, pero exige que el proveedor esté equipado con prensa de embalado. El almacenamiento de grandes cantidades de neumáticos enteros puede ser problemático debido a la gran necesidad de espacio, mientras que los neumáticos troceados tienen una densidad por unidad de volumen mayor, por lo que necesitan menos espacio de almacenamiento.

Los neumáticos enteros o troceados se manipulan mediante sistemas semiautomáticos o totalmente automáticos. Las plantas equipadas con varias líneas de cocción pue-

den tener un sistema de manipulación común para descargar, almacenar y extraer los neumáticos del lugar de almacenamiento. Sin embargo, los sistemas de carga y alimentación tienen que ser independientes para cada horno. Con el fin de evitar el riesgo de obstrucción a causa de los alambres de hierro, puede ser necesario la reducción de su tamaño y el equipamiento con dispositivos de alimentación especiales como válvulas de clapeta.

Por ser la composición química de los neumáticos relativamente homogénea, los controles de calidad se realizan principalmente sobre la base del tamaño. Los neumáticos enteros se controlan para evitar no conformidades que puedan dañar los sistemas de manipulación o adherirse a la válvula de clapeta al entrar en el horno. El tamaño de los fragmentos de los neumáticos troceados se controla para minimizar el riesgo de aglomeración y para asegurar una buena combustión. Los fragmentos pueden ser de hasta 4 centímetros de pequeños o mucho más grandes, hasta un 1/16 de los neumáticos enteros.

Dependiendo del tipo de sistema de horno, los neumáticos se pueden introducir de varias maneras: Hacia dentro de la mitad del horno en hornos largos, sobre la parrilla de Lepol en caso de procesos semisecos o semihúmedos, en el extremo posterior o conducto elevador del precalentador o dentro del precalciner o en fragmentos a través del quemador principal (consulte detalles en 7). El punto de introducción debe asegurar la combustión completa de los neumáticos. En algunos casos hay que instalar cañones de aire comprimido para eliminar pegaduras que se puedan generar por la volatilización del azufre y del cloro.

Desde el punto de vista del proceso, los neumáticos por su homogeneidad, alto valor calórico y relativamente poco contenido de azufre y cloro, son buenos combustibles alternativos para la producción de clínker. Dependiendo del tipo de sistema de horno, los combustibles alternativos pueden sustituir los combustibles fósiles hasta en un 25% sin mayores problemas importantes asociados con el proceso de cocción del clínker y con la calidad (8). En general, un buen control de las condiciones de oxidación y la regularidad de la velocidad de alimentación son los parámetros operativos principales que aseguran la combustión eficaz de los neumáticos y

que previenen la obstrucción de la entrada del horno. No obstante, se deben tener en cuenta los puntos siguientes en el procesamiento de neumáticos usados (7,8).

Al introducir neumáticos troceados por el extremo anterior de los hornos, se deben evitar condiciones reductoras que puedan tener un efecto negativo en la calidad del clínker.

Debido a su gran tamaño, la combustión completa de neumáticos enteros requiere un tiempo de residencia relativamente largo. Esto puede producir condiciones reductoras con una disminución de la calidad del clínker y con un aumento de la costra que requiera mayor frecuencia de la limpieza periódica.

La combustión del neumático entero puede ser un factor limitativo en plantas con azufre altamente pirítico en la mezcla de materias primas a causa de los problemas de pegaduras, limitaciones del tiro de aire y desconexiones del electrofiltro.

A altos porcentajes de sustitución, el contenido de hierro de los neumáticos puede afectar a la relación Al/Fe o mineralogía del clínker. Lo que podría hacer necesaria, en consecuencia, una corrección de la química del crudo.

Debido a sus posibles repercusiones sobre las necesidades de tiempo de fraguado, el alto contenido de cinc de los neumáticos puede limitar el porcentaje de sustitución dependiendo del contenido de cinc en las materias primas.

A altos porcentajes de sustitución (>20%), puede ocurrir una pérdida en la capacidad producción neta en hornos con precalentador.

3.3. Aspectos Medioambientales

Los aspectos medioambientales potenciales relacionados con la producción de clínker son las emisiones de CO₂, CO, NO_x, SO_x, polvo, compuestos orgánicos volátiles y metales. Estos están relacionados con la descarbonación de piedra caliza y/o la combustión del combustible. Los niveles de emisión de los hornos de cemento dependen en buena medida de la naturaleza de las materias primas, de los combustibles, y de la edad y diseño de la planta, y también de los requisitos

Tabla 2.- Emisiones medidas de la combustión de prueba de neumáticos en un horno de cemento en el Reino Unido (9)

Contaminante	Combustibles fósiles (carbón y coque)	Combustibles fósiles y 15% de neumáticos
Partículas mg / m ³	60	60
mg / m ³ de NO _x	1180	800
mg / m ³ de SO _x	500	500
mg / m ³ de CO _x	985	948
mg / m ³ de cloro y flúor	1,13	1,0
mg / m ³ de VOC	129	68
ng / m ³ de dioxinas	0,12	0,03

fijados por la autoridad competente. Los detalles relativos a este aspecto se pueden consultar en los documentos de referencia (3).

La experiencia demuestra que los neumáticos usados pueden sustituir combustibles fósiles, como carbón o petróleo, sin incremento significativo alguno en las emisiones (Tabla 2), y que las buenas prácticas en la combustión y la operación adecuada de sistemas de control de emisiones efectivos fueron esenciales para mantener las emisiones en la chimenea en el mismo nivel comparado con el nivel de emisiones usando combustibles fósiles. Las conclusiones principales de estas experiencias de sustitución son las que se resumen a continuación (7,8,9,10):

No tiene lugar un cambio significativo alguno en las emisiones de dióxido de carbono, polvo y metales pesados.

Como consecuencia del bajo contenido de nitrógeno de los neumáticos y de los efectos de la combustión escalonada, en muchos casos se puede lograr una reducción considerable en emisiones de NO_x. Es necesario un cuidado especial para mantener la condición de combustión completa necesaria para evitar aumentos potenciales en emisiones de carbono orgánico volátil y de monóxido de carbono (asociados con las desconexiones de los filtros electrostáticos).

3.4. Aspecto de Seguridad e Higiene

Aunque los neumáticos no arden espontáneamente hay que adoptar precauciones especiales al almacenar y manipu-

lar neumáticos. Los apilamientos se deberían almacenar lo suficientemente lejos unos de otros para prevenir la dispersión de un incendio potencial y el tamaño de la pila se debería mantener por debajo de las dimensiones de seguridad establecidas.

Se deberían evitar llamas no contenidas, chispas y puntos calientes en el área de almacenamiento. Los sistemas de manipulación deben estar diseñados para permitir el control del fuego (detectores de temperatura / fuego; cámaras, extintores de incendios automáticos y procedimiento de emergencia, etc). Debido a la dificultad de la extinción de los incendios de neumáticos, se debe añadir una pila de arena a la estación contra incendios de agua estándar.

Los equipos de protección personal, tales como casco, zapatos y gafas de seguridad son obligatorios y se deberían usar guantes de cuero al manipular neumáticos y neumáticos troceados manualmente.

En determinadas condiciones climáticas, en concreto en regiones tropicales y subtropicales, los vertederos y la acumulación de neumáticos usados pueden convertirse en criaderos de insectos, como mosquitos, que pueden transmitir enfermedades a los humanos (1). Con el fin de evitar estos riesgos para la salud, en ese caso, los neumáticos se deberían almacenar en un lugar cerrado, durante poco tiempo, protegidos de la lluvia o embalados, de manera que quede poco espacio para que el agua quede retenida en los neumáticos.

4. Conclusiones

Los neumáticos usados son un buen combustible alternativo para hornos de cemento, y producen beneficios al ahorrar combustibles fósiles, al permitir soluciones válidas medioambientalmente para la gestión de neumáticos fuera de uso, y al reducir el impacto medioambiental general de la fabricación de cemento.

Cuando se usan en los porcentajes y condiciones adecuados, los neumáticos usados no plantean problema especial alguno en cuanto al mantenimiento de un procesado estable del clínker. A medida que se puede hacer uso de una mayor flexibilidad en los sistemas de alimentación en diferentes hornos, el uso de los neumáticos no afecta significativamente ni las emisiones de contaminantes ni la calidad del cemento.

Esta aplicación de los neumáticos usados podría incrementarse en la UE a 25 en los próximos años con la entrada en vigor de las Directivas que regulan la gestión de neumáticos usados y los vehículos fuera de uso. Esto requerirá una infraestructura de recogida y transporte regional para asegurar una cantidad regular de recepción, y la inversión en almacenamiento en las plantas de cemento y en sistemas de manipulación y alimentación. También serán necesarias medidas para evitar la combustión incontrolada (al aire libre o en sistemas sin control de emisiones), y el desarrollo de normas analíticas para cauchos naturales y sintéticos.



1) UNEP: Technical Guidelines on the identification and management of used tyres. Basel Convention Series No. 00/03, 1999.

2) SPRIENSMA, R. et al. Life cycle análisis of an average European car tyre. Pré Consultant B. V., The Netherlands, 2001.

3) CALLEJA I. et al. Promoting environmental technologies: Sectoral análisis, barriers and measures. IPTS, the european Comisión DG JRC, 2004, 311 p.

4) BLIC. End-off-life tyres. 2004, www.blic.be/public/activities/ftelts.htm

5) IVM. Tyre recycling in Europe: open borders in the waste hierarchy. EPCEM report 1998.

6) SCHULMAN, V.L. Tyre recycling after 2000: status and options. ETRA, 2000.

7) ROSENHOJ, J. A. The cement kiln: the optimal solution for waste tyre burning. International Cement Review, mayo 1993. Páginas 30 - 36.

8) SMITH, I. Co-utilisation of coal and other fuels in cement kilns. IEA Clean Coal Centre. Reino Unido, 2003, página 63.

9) WOLFENDEN, L. Tyres in the environment. Report of the Environment Agency, Reino Unido, 1998.

10) DAMES y MOORE. Analysis of emissions test results and residual by-products from facilities using tyres as a fuel supplement. California Integrated Waste Management Board, Report No. IWM-C5064, 1997