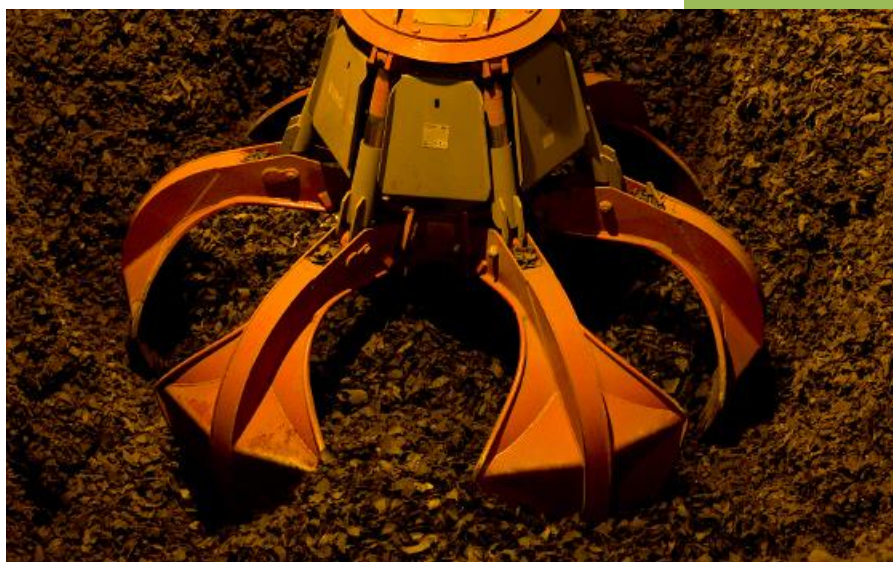




SIGNUS

Estudio del coproceso/coincineración en la valorización del NFVU en cementeras



Con la participación de:



Con la colaboración de:



julio 2017

Índice

1. ANTECEDENTES	4
2. OBJETIVOS	5
3. DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS DE CLÍNKER	5
4. RESULTADOS DEL CONTENIDO EN METALES DE LAS MUESTRAS DE CLÍNKER	5
5. TRATAMIENTO DE DATOS	7
6. COPROCESO/COINCINERACIÓN del NFVU. AHORRO DE MATERIAS PRIMAS	9
6.1. Balance de masas	9
6.2. Incorporación de compuestos principales o estequiométricos	12
6.2.1. Incorporación del acero procedente del NFVU en el clínker	13
6.2.2. Incorporación de compuestos principales o estequiométricos (Al, Ca, Fe y Si) procedentes del NFVU en el clínker	13
6.3. Incorporación de compuestos minoritarios procedentes del NFVU al clínker	15
6.4. Resumen datos de sustitución de materias primas	17
6.5. Datos de referencia a nivel europeo	17
7. CONCLUSIONES	18
ANEXO 1	19
ANEXO 2	20

Nota: A lo largo del informe se utiliza indistintamente el término coproceso denominación utilizada por la “Guidelines on the interpretation of key provisions of Directive 2008/98/EC on waste Not legally binding” y el término coincineración denominación utilizada en el “Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos 2016-2022 (PEMAR)”.

1. ANTECEDENTES

Tal y como se describió en el informe “*Estudio del coproceso en la valorización de neumáticos fuera de uso en cementeras*” (ver Anexo 1) en España existe una demanda con respecto al uso de neumáticos al final de su vida útil (en adelante NFVU) en diversos procesos industriales tales como la fabricación de clínker para el cemento o en acerías de arco eléctrico.

En concreto, en el proceso de fabricación del clínker (componente principal del cemento que le otorga unas propiedades físico-químicas y mecánicas) el NFVU se usa como combustible sólido recuperado. Las mejoras que aporta frente al combustible sólido de origen fósil tradicional son principalmente un mayor poder calorífico y una aportación de sílices y derivados férricos al clínker obtenido.

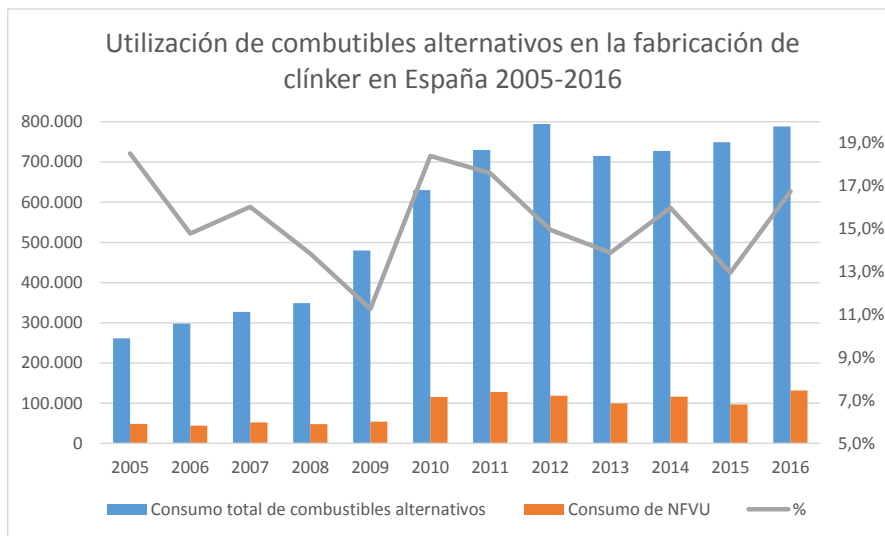


Figura 1. Consumo de combustibles sólidos recuperado¹

Para poder cuantificar la contribución de masas que la utilización de los NFVU's aporta al porcentaje elemental del clínker, se llevó a cabo una caracterización de las cenizas de ocho muestras representativas de NFVU's muestreados por toda la geografía española obteniendo las siguientes conclusiones (Anexo I):

- Un 24,66% (m/m) del peso total del NFVU sometidos a proceso de combustión a una temperatura de 815°C (tal como establece la norma UNE 32004), se transforman en cenizas que posteriormente se incorporarán al clínker.
- De ese 24,66%, el 8,27% se corresponde con la fracción inorgánica (óxidos de los metales como el calcio, el silicio o el aluminio por los que está formado el NFVU) y un 16,39% es acero procedente de la estructura del neumático.

¹ Fuente: “Reciclado y Valorización de Residuos en la Industria Cementera en España” CEMA, actualizado con datos Oficemen 2016.

2. OBJETIVOS

El objetivo del presente informe técnico es la caracterización de muestras representativas de clínker fabricado a partir de combustibles fósiles y combustibles sólidos recuperados (NFVUs) y analizar las posibles diferencias.

Además, se determinará mediante un balance de masas el porcentaje de sustitución de materias primas en el clínker producido con NFVU.

3. DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS DE CLÍNKER

El Laboratorio de Combustibles y Petroquímica de la Fundación Gómez Pardo dependiente de la Universidad Politécnica de Madrid, ha llevado a cabo la caracterización de la fracción metálica de una muestra representativa de clínker obtenido en varias cementeras, haciendo especial distinción en si dicho clínker fue fabricado usando NFVU's como combustible o por si al contrario, el clínker fue fabricado usando únicamente combustibles de origen fósil (informe recogido en el Anexo 2).

En la siguiente tabla se muestra la procedencia de las muestras de clínker tomadas para este estudio:

Cementera	Procedencia geográfica	Observaciones
Cementera 1	Galicia	Sin NFVU's
Cementera 2	Cataluña	Sin NFVU's
Cementera 3	Comunidad Valenciana	Con NFVU's
Cementera 4	Andalucía	Con NFVU's

Tabla 1. Muestra representativa del estudio

La selección de dichas muestras fue llevada a cabo por SIGNUS ECOVALOR con la colaboración de OFICEMEN. Las muestras de clínker de Andalucía y Comunidad Valenciana fueron obtenidas con el uso de NFVU's como combustible mientras que las muestras de Galicia y de Cataluña fueron obtenidas sin una carga de NFVU's como combustible durante el proceso de fabricación.

4. RESULTADOS DEL CONTENIDO EN METALES DE LAS MUESTRAS DE CLÍNKER

A continuación, se muestra una tabla resumen con los resultados obtenidos al analizar las muestras de los diferentes clínker digeridas por ICP-OES. El resultado se muestra como la media aritmética de los valores obtenidos en las tres alícuotas de cada muestra de clínker analizadas.

	Cementera 1	Cementera 2	Cementera 3	Cementera 4
Metal	% (m/m)			
	Sin NFVU's	Sin NFVU's	Con NFVU's	Con NFVU's
Aluminio	2,60	2,49	2,80	2,78
Arsénico	0	0	0	0
Bario	0,23	0,19	0,18	0,07
Calcio	10,99	10,84	10,66	10,20
Cadmio	0	0	0	0
Cromo	0,01	0,00	0,01	0,01
Cobalto	0	0	0	0
Cobre	0,01	0,00	0,00	0,02
Hierro	1,58	1,63	1,88	2,19
Mercurio	0	0	0	0
Potasio	1,09	1,18	0,85	0,93
Litio	0	0	0	0
Magnesio	0,70	0,94	0,99	0,63
Manganeso	0,04	0,04	0,04	0,03
Molibdeno	0	0	0	0
Sodio	0,25	0,17	0,21	0,11
Níquel	0	0	0	0
Fósforo	0,11	0,09	0,05	0,04
Plomo	0	0	0	0
Antimonio	0	0	0	0
Selenio	0	0	0	0
Silicio	12,15	10,05	10,13	8,56
Estroncio	0,04	0,03	0,04	0,02
Titanio	0,13	0,12	0,16	0,15
Vanadio	0,01	0,02	0,01	0,01
Bismuto	0	0	0	0
Berilio	0	0	0	0
Zinc	0,02	0,01	0,04	0,08

Tabla 2. Resultados de contenido en metales

El análisis de los datos obtenidos indica que no existen diferencias significativas entre la composición de los clínker fabricados con NFVU's como combustible y los fabricados con combustibles de origen fósil.

5. TRATAMIENTO DE DATOS

En la siguiente tabla se muestran los valores medios obtenidos de las muestras de clínker con y sin NFVU. Además se indica la desviación estándar entre los mismos.

Metal	valores medios cenizas clínker % (m/m)		Desviación estándar
	Sin NFVU's	Con NFVU's	
Aluminio	2,55	2,79	0,17
Arsénico	0	0	0,00
Bario	0,21	0,13	0,06
Calcio	10,92	10,43	0,34
Cadmio	0	0	0,00
Cromo	0,00	0,01	0,00
Cobalto	0	0	0,00
Cobre	0,01	0,01	0,00
Hierro	1,61	2,04	0,30
Mercurio	0	0	0,00
Potasio	1,14	0,89	0,17
Litio	0	0	0,00
Magnesio	0,82	0,81	0,01
Manganeso	0,04	0,04	0,00
Molibdeno	0	0	0,00
Sodio	0,21	0,16	0,04
Níquel	0	0	0,00
Fósforo	0,10	0,04	0,04
Plomo	0	0	0,00
Antimonio	0	0	0,00
Selenio	0	0	0,00
Silicio	11,10	9,35	1,24
Estroncio	0,04	0,03	0,01
Titanio	0,13	0,16	0,02
Vanadio	0,02	0,01	0,00
Bismuto	0	0	0,00
Berilio	0	0	0,00
Zinc	0,01	0,06	0,04

Tabla 3. Resultados medios de contenido en metales

Todos los metales que se detectan en el clínker fabricado sin neumático aparecen en el clínker fabricado con neumático con una desviación entre 0 y 1,24, siendo la mayor desviación detectada para el Calcio, Hierro y Silicio. En la siguiente figura se puede ver de una forma más gráfica la comparativa entre la composición de un clínker fabricado con y sin NFVU's.

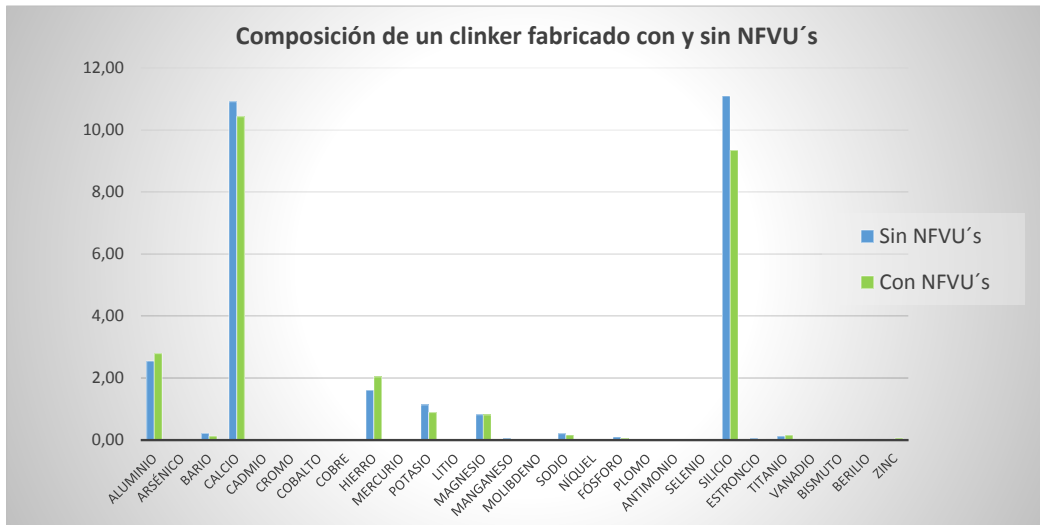


Figura 2. Composición media de metales de un clínker fabricado con y sin NFVU's

Como se puede observar hay dos elementos, el aluminio y el hierro, que destacan en el clínker con NFVU's si se compara con el clínker sin NFVU's. Esto coincide con la información que aporta el diagrama ternario CaO, SiO₂ y Al₂O₃+Fe₂O₃ que se muestra a continuación:

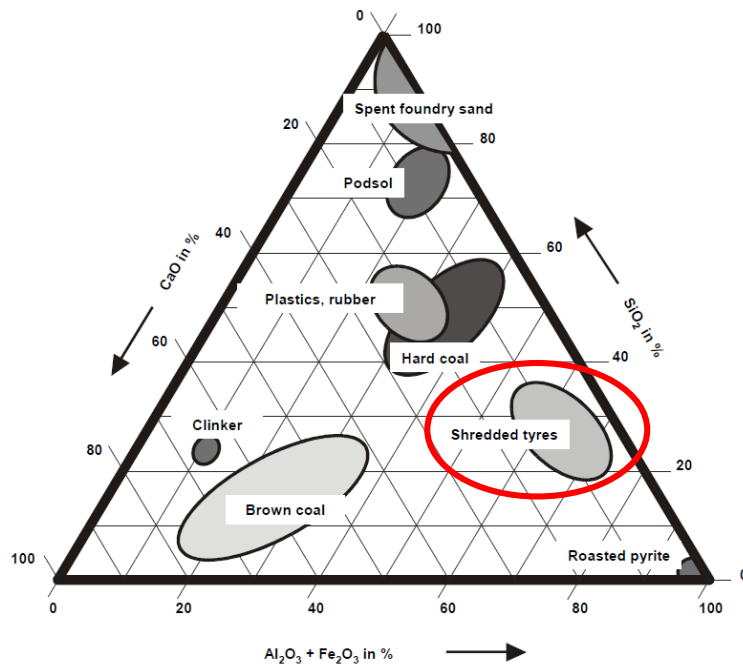


Figura 3. Diagrama ternario CaO, SiO₂ y Al₂O₃+Fe₂O₃ para el Clínker y otros compuestos (Fuente: Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide, 2013)

Como se puede observar las cenizas de todos los combustibles y en particular el NFVU contribuyen a la composición final del clínker.

Del diagrama ternario se extrae la composición media de las cenizas del NFVU y del clínker:

Composiciones medias	Clínker	NFVU
CaO	65%	10%
Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	10%	60%
SiO ₂	25%	30%

Tabla 4. Composición media del clínker y del NFVU

Estos datos justificarían ese ligero incremento en la composición del Aluminio (Al) y del Hierro (Fe) que se observa en la Figura 2, pero que no afecta a las parámetros de calidad del clínker.

Si volvemos a la Figura 2, donde se comparan las composiciones de un clínker con y sin NFVU, se puede observar que éstas son muy similares. Por tanto, no existen diferencias significativas entre la composición de los clínker fabricados con NFVU's como combustible y los fabricados con combustibles de origen fósil. Estando las pequeñas diferencias existentes dentro de los márgenes permitidos en las características del clínker para cumplir con las prestaciones exigidas en la norma armonizada europea "UNE-EN 197-1 "Composición especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.

6. COPROCESO/COINCINERACIÓN del NFVU. AHORRO DE MATERIAS PRIMAS

6.1. Balance de masas

La química básica del proceso de la fabricación del cemento empieza con la descomposición del carbonato cálcico (CaCO₃) a unos 900°C dando óxido cálcico (CaO, cal) y liberando dióxido de carbono (CO₂). 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 °C) con sílice, alúmina y óxido de hierro para formar los silicatos, aluminatos y ferritos de calcio que componen el clínker. Posteriormente, el clínker se muele conjuntamente con yeso y otras adiciones para producir el cemento².

Las fuentes naturales como la caliza, la marga o la pizarra constituyen la principal fuente de carbonato cálcico. La sílice, el óxido de hierro o la alúmina se encuentran en diversos minerales como arena, pizarra, arcilla y minerales de hierro. También se pueden emplear subproductos y residuos como sustitutivos parciales de las materias primas naturales.

La siguiente figura muestra un diagrama simplificado del proceso de fabricación de clínker y cemento Portland:

² "Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España de fabricación de cemento, 2004".

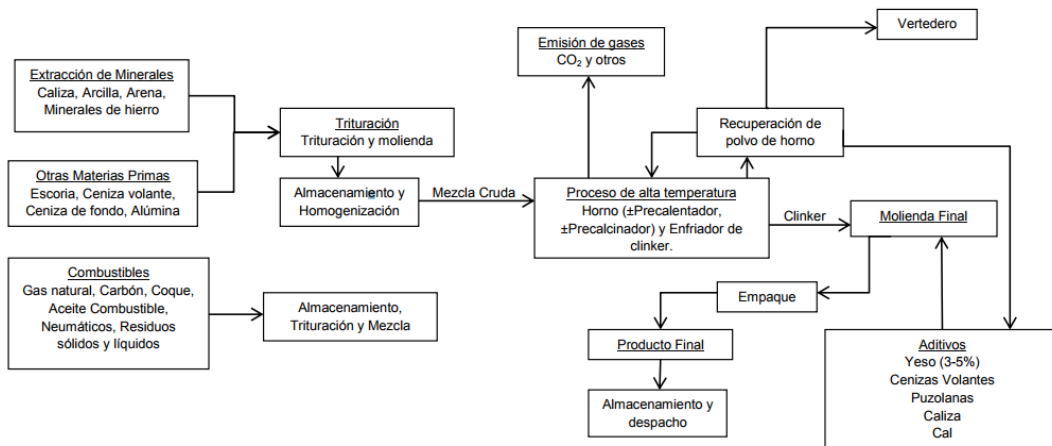


Figura 4. Diagrama de bloques del proceso de fabricación del clínker y cemento Portland

Por otro lado, además de las materias primas es necesario el empleo de diversos combustibles para proporcionar la energía térmica requerida por el proceso. Los principales combustibles empleados en la industria cementera española son coque de petróleo y carbón. Los principales constituyentes de las cenizas de estos combustibles son compuestos de sílice y alúmina que se combinan con las materias primas formando parte del clínker³.

Las altas temperaturas y los largos tiempos de residencia de los gases en el horno, implican un considerable potencial para la destrucción de los compuestos orgánicos. Esto permite emplear como combustibles de sustitución, residuos de otros procesos. El empleo de combustibles sólidos recuperados es una práctica asentada en la mayoría de los países desarrollados desde hace más de treinta años.

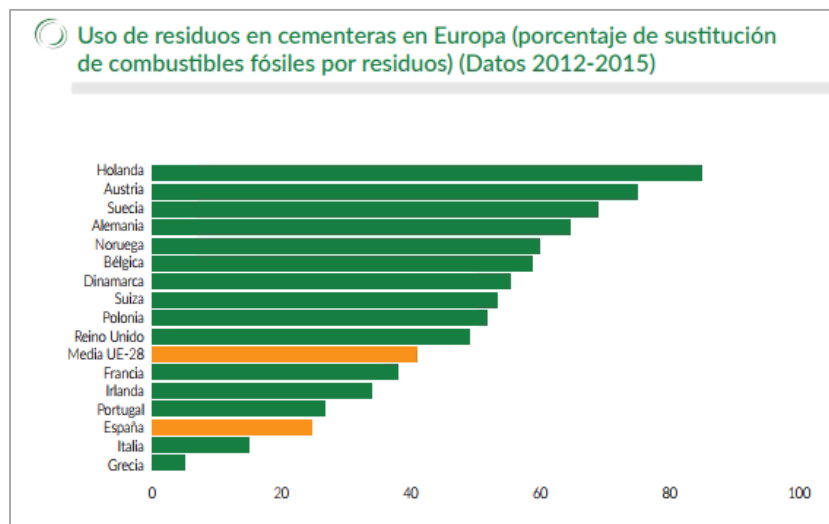


Figura 5. Consumo de combustibles sólidos recuperados en cementeras en Europa⁴

³ Fuente: “Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España de fabricación de cemento, 2004”

⁴ Fuente: Datos de asociaciones de fabricantes de cemento de países comunitarios y Cembureau

La utilización de NFVU como combustible sólido recuperado tiene dos funciones, por un lado, la energía liberada en su combustión se aprovecha en el proceso de fabricación de clínker, y por otro lado, los minerales que contienen sus cenizas contribuyen a formar parte de los compuestos de clínker. En este caso, además de la valorización energética, la materia prima contenida en el residuo se recicla en el clínker.

A continuación, se determina el ahorro de materias primas al utilizar el NFVU como combustible sólido recuperado.

Según datos del sector por cada tonelada de clínker fabricado se consumen 850 Kcal⁵.

Así mismo, el ratio de transformación másica de material introducido en el horno respecto a la cantidad de masa que sale convertida en clínker es de 0,637⁵. Es decir se necesitan 1,57 t de materias primas (minerales) para conseguir 1,00 t de clínker.

Teniendo en cuenta un valor medio de poder calorífico del NFVU de 28 MJ/Kg⁶se necesitan aproximadamente 120 Kg de NFVU para aportar las 850 Kcal que necesita la producción de 1 t de clínker. Estos 120 Kg aportan unas cenizas del 24,66% de la cantidad de NFVU aportada, valor obtenido en el proyecto "*Estudio del coproceso en la valorización de neumáticos fuera de uso en cementeras*" del 2015 (ver Anexo I).

Tal como se ha comentado anteriormente la totalidad de las cenizas del NFVU se incorporan en la masa del clínker, por tanto, teniendo en cuenta ese porcentaje (24,66%), resulta que 29,6 Kg de cada tonelada de clínker final en el que se ha utilizado NFVU proceden de esos NFVUs (sus cenizas), lo que supone un 2,96% del clínker producido. Esto indica que la utilización de 120 Kg de NFVU como combustible sólido recuperado en cementeras supone una reducción de 46,5 Kg en el aporte de las otras materias primas para conseguir la misma cantidad de clínker (1 tonelada), lo que supone el 2,96% de reducción de la cantidad total empleada inicialmente (desde 1.570 Kg hasta 1.523 Kg).

A continuación, se muestra un diagrama de bloques indicando el balance de masas del proceso de fabricación de una tonelada de clínker con y sin NFVU:

⁵ Fuente: "Guía de Mejores Técnicas Disponibles den España de fabricación de cemento, 2004"

⁶ Fuente: "Using used tyres as an alternative source of fuel. Reference values and characterization protocols" Aliapur (2009).

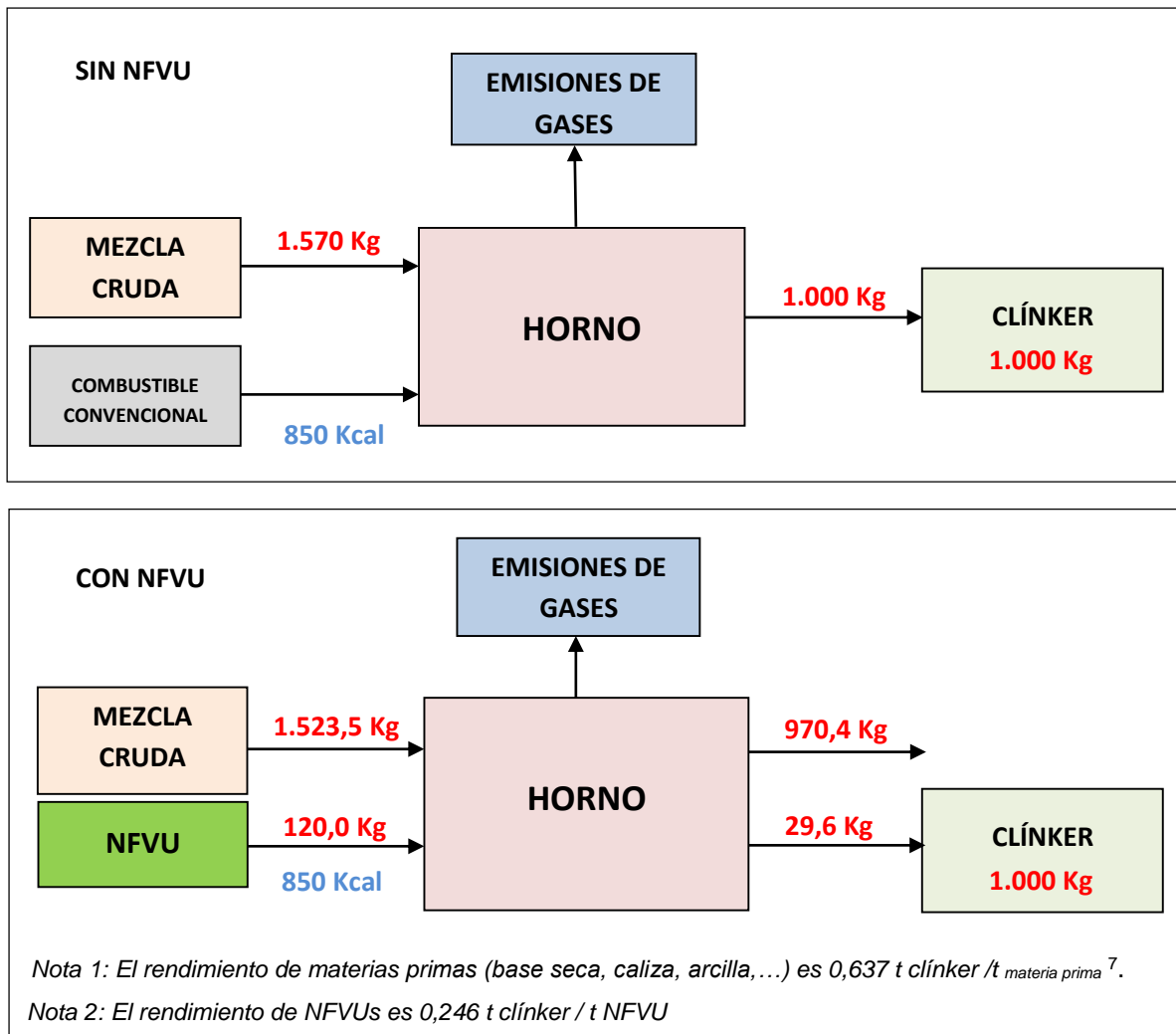


Figura 6. Diagrama de bloques del proceso de fabricación del clínker con y sin NFVU

6.2. Incorporación de compuestos principales o estequiométricos

La composición química del clínker de cemento portland contiene aproximadamente un 62-67 % CaO, 18-24 % SiO₂, 4-8 % Al₂O₃ y 1.5-4.5 % Fe₂O₃ ⁷, siendo el óxido mayoritario el CaO, disminuyendo después en el orden SiO₂-Al₂O₃- Fe₂O₃. Esto indica que los componentes de las materias primas deben de ser predominantemente calcáreos con cantidades sucesivas más pequeñas de constituyentes silíceas, aluminosas y ferruginosas.

El óxido mayoritario (CaO) se obtiene normalmente de la caliza (CaCO₃), que puede representar, dependiendo de su calidad, sobre el 75-80 % en peso de las materias primas. Aunque la caliza, en general, contiene también cantidades de los otros óxidos del sistema cuaternario mencionado, no los tiene en las proporciones deseadas, por lo que es necesaria una segunda materia prima para ajustar la proporción adecuada de óxidos. Esta segunda materia prima usualmente son las arcillas o las margas. Finalmente, es necesario la adición de algunos elementos correctores, principalmente, el hierro⁸.

⁷ Fuente: "Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España de fabricación de cemento, 2004"

⁸ Fuente: Oficemen

6.2.1. Incorporación del acero procedente del NFVU en el clínker

Como se ha comentado en el apartado 6.1, para la fabricación de una tonelada de clínker se necesitan 120 Kg. Teniendo en cuenta que la fracción acero del NFVU es de 16,39%, se está incorporando por cada tonelada de clínker una cantidad de hierro de 19,67 Kg procedente del neumático que representa el 1,97% de la composición del clínker. Esto supone un ahorro de materias primas ya que esa cantidad de hierro sustituye a la limonita ($\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$), mineral comúnmente utilizado como corrector férrico en la formulación del crudo.

Por tanto el 16,39% del NFVU correspondiente al acero que contiene el neumático se incorpora en el clínker sustituyendo a las materias primas que actúan como corrector férrico, como por ejemplo la limonita.

6.2.2. Incorporación de compuestos principales o estequiométricos (Al, Ca, Fe y Si) procedentes del NFVU en el clínker

Los cuatro compuestos principales o estequiométricos del clínker que forman parte de su composición son Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 y SiO_2 . En este apartado se determinará el porcentaje de estos óxidos que aporta el NFVU de estos compuestos esenciales del clínker.

Las cenizas del NFVU además de contener una fracción acero (16,39% en peso respecto del NFVU) también contienen una fracción inorgánica (8,27% en peso respecto del NFVU) que se incorpora en el clínker. En el primer estudio anteriormente mencionado (ver Anexo 1) se analizaron las composiciones de los metales contenidos en esta fracción inorgánica de las cenizas de ocho muestras representativas del territorio nacional de NFVU. La siguiente tabla muestra el contenido medio de los metales analizados:

METAL	Concentración (% m/m) Fracción inorgánica de las cenizas del NFVU	METAL	Concentración (% m/m) Fracción inorgánica de las cenizas del NFVU
Aluminio	0,72	Molibdeno	nd
Arsénico	nd	Sodio	0,37
Bario	0,11	Niquel	nd
Calcio	3,13	Fósforo	0,16
Cadmio	nd	Plomo	nd
Cobalto	0,14	Antimonio	nd
Cromo	nd	Selenio	nd
Cobre	0,09	Silicio	2,97
Hierro	2,52	Estroncio	0,01
Mercurio	0,03	Titanio	0,23
Potasio	0,62	Vanadio	nd
Litio	nd	Bismuto	nd
Magnesio	0,55	Berilio	nd
Manganeso	0,02	Zinc	12,32

Tabla 5. Composición de metales en la fracción inorgánica de las cenizas del NFVU

Para determinar el porcentaje que representan los óxidos de los cuatro elementos principales o estequiométricos de la composición de clínker que se corresponden con el Al, Ca, Fe y Si, se toma como referencia la norma UNE-EN 15920 "Biocombustibles sólidos. Determinación de elementos mayoritarios". Los coeficientes utilizados por los que hay que multiplicar cada concentración de metal para obtener la concentración de sus respectivos óxidos se muestran en la Tabla 6:

Metal	Óxido del metal	Coefficiente
Aluminio	Al ₂ O ₃	1,89
Calcio	CaO	1,40
Hierro	Fe ₂ O ₃	1,43
Silicio	SiO ₂	2,14

Tabla 6. Coeficientes de óxido de metal

(Fuente: norma UNE-EN 15920 "Biocombustibles sólidos. Determinación de elementos mayoritarios")

La siguiente tabla muestran los datos para determinar el porcentaje de óxidos de los metales que contienen la fracción inorgánica de las cenizas del NFVU:

METAL	Concentración (m/m) de la fracción inorgánica de cenizas del NFVU	Óxido	Coefficiente óxidos	Equivalencia en óxidos (m/m)	Concentración de óxidos (% m/m) de la fracción inorgánica de cenizas del NFVU
Aluminio	0,72	Al ₂ O ₃	1,89	1,36	3,89%
Bario	0,11	BaO	1,12	0,12	0,3%
Calcio	3,13	CaO	1,40	4,38	12,54%
Cobalto	0,14	CoO	1,27	0,18	0,51%
Cobre	0,09	Cu ₂ O	2,25	0,20	0,56%
Hierro	2,52	Fe ₂ O ₃	1,43	3,61	10,32%
Mercurio	0,03	HgO	1,08	0,03	0,08%
Potasio	0,62	K ₂ O	1,20	0,74	2,11%
Magnesio	0,55	MgO	1,66	0,92	2,63%
Manganeso	0,02	MnO ₂	1,58	0,03	0,08%
Sodio	0,37	Na ₂ O	1,35	0,50	1,44%
Fósforo	0,16	P ₂ O ₅	4,58	0,75	2,15%
Silicio	2,97	SiO ₂	2,14	6,35	18,17%
Estroncio	0,01	SrO	1,18	0,01	0,0%
Titanio	0,23	TiO ₂	1,67	0,38	1,09%
Zinc	12,32	ZnO	1,25	15,40	44,06%

Tabla 7. Coeficientes de óxido de metal

A continuación, se extraen los datos únicamente de los cuatro elementos principales o estequiométricos de la composición del clínker.

Óxidos principales	Composición de la fracción inorgánica de cenizas de NFVU (% m/m)
Al ₂ O ₃	3,89%
CaO	12,54%
Fe ₂ O ₃	10,32%
SiO ₂	18,17%
Total	44,92%

Tabla 8. Composición de los óxidos principales que contiene la fracción inorgánica de las cenizas del NFVU

El resultado indica que la suma de los óxidos principales o estequiométricos que componen el clínker se encuentran en la fracción inorgánica del NFVU en un porcentaje del 44,92% en peso. Teniendo en cuenta que esta fracción representa el 8,27% del total del neumático, resulta que el 3,72% del NFVU que se utiliza en la fabricación de clínker, se incorpora en el mismo sustituyendo a óxidos principales o estequiométricos que contienen las materias primas.

A partir de estos datos, resulta que por cada tonelada de clínker producida se incorpora una cantidad de compuestos principales o estequiométricos de 4,46 Kg procedente del NFVU que representa el 0,45% de la composición del clínker. Esto supone un ahorro de materias primas como la caliza que contiene el calcio u otro tipo de minerales, como por ejemplo la arena, pizarra o arcilla que contienen la sílice, el óxido de hierro y la alúmina.

6.3. Incorporación de compuestos minoritarios procedentes del NFVU al clínker

Por otro lado, si observamos los metales que contienen las materias primas vemos que, al igual que la fracción inorgánica del NFVU, contienen elementos que no son los principales o mayoritarios en la composición del clínker (Al, Ca, Fe y Si) pero que sí que forman parte de las materias primas del proceso y que se incorporan también en el clínker. En la siguiente tabla se muestran estos datos:

Metal	Arcilla y Argilita	Caliza, marga y pizarra	Mezcla Cruda	¿Están presentes en la fracción inorgánica de las cenizas del NFVU?
	mg/ Kg (base seca)			
Antimonio	n.d.	1 - 3	< 3	No detectado
Arsénico	13-23	0.2 -20	1 - 20	No detectado
Berilio	2 - 4	0,05 - 2	0,1 - 2,5	No detectado
Cadmio	0,02 -0,03	0,04 - 0,7	0,004 - 1	No detectado
Cobalto	10 - 20	0,5 - 5	3 - 10	si
Cromo	20 - 109	1,2 - 21	10 - 40	No detectado
Cobre	n.d.	3 - 12	6 - 60	si
Mercurio	0,02 - 0,15	< 0,01 - 0,13	0,01 -0,5	si
Manganeso	n.d.	< 250	100 - 360	si
Níquel	11 - 70	1,5 - 21	10 - 35	No detectado
Selenio	n.d.	1 - 10	< 10	No detectado
Talio	0,7 - 1,6	0,05 - 1,6	0,11 - 3	No detectado
Vanadio	98 - 170	4 - 80	20 - 102	No detectado
Zinc	59 - 115	10 - 40	20 - 47	si

Tabla 9. Composición de metales minoritarios en las materias primas y en la mezcla cruda⁹

La mayoría de estos metales también forman parte de la composición de la fracción inorgánica de las cenizas, por tanto, si estos metales forman parte de la materia prima (caliza, arcilla, pizarra, etc.), también se tendrían que considerar, de la misma forma, que los metales que contienen la fracción inorgánica del NFVU, formen parte de la materia prima sustituyendo a la misma. Como ya se ha comentado anteriormente, hay una sustitución de materia prima que se incorpora en el clínker de la misma forma que se incorporan los elementos minoritarios procedentes de las materias primas principales (caliza, arcilla, pizarra, etc.).

Es importante resaltar, que en la formulación del “crudo” (mezcla de minerales), para la fabricación del clínker, se llevan al límite las impurezas contenidas en el mismo, sin perder las prestaciones y siempre cumpliendo la normativa europea UNE-EN 197-1. De esta forma se reduce la huella ecológica en la producción de las materias primas iniciales, reduciendo el costo energético de su “purificación” y contribuyendo a los conceptos de economía circular evitando generar desechos que no puedan utilizarse, razones por las que se pueden utilizar otras materias primas en la fabricación de clínker procedentes de otros residuos (lodos biológicos, harinas animales, biomasa vegetal, pinturas).

⁹ Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide, 2013.

6.4. Resumen datos de sustitución de materias primas

En la siguiente tabla se resumen los datos correspondientes a la sustitución de materias primas cuando se utiliza NFVU en la fabricación de clínker:

Materiales encontrados en las cenizas del NFVU	Porcentaje en peso respecto del NFVU	Materia prima a la que sustituye
Acero	16,39%	Limonita
Compuestos mayoritarios	3,72%	Caliza, arcilla, arena y pizarra
Compuestos minoritarios	4,55%	Compuestos minoritarios de materias primas
Total cenizas del NFVU	24,66%	

Tabla 10. Desglose de la incorporación del NFVU en el clínker

6.5. Datos de referencia a nivel europeo

En Europa también se han llevado a cabo estudios para determinar la fracción inorgánica del NFVU y así valorar la contribución al reciclado o coproceso cuando se someten a operaciones de tratamiento de coincineración.

País	Estudio realizado por	Fracción inorgánica del NFVU % en peso			
		Mix de mercado	NFVU turismo	NFVU camión	Granulado de caucho
Alemania	VdZ	-	-	28,00%	-
España	SIGNUS –TNU	24,66%	-	-	-
Francia	Aliapur	23,87%	22,85%	26,25%	-
Grecia	Ecoelastika	-	22,86%	-	-
Portugal	AVE/Valorpneu (febrero, 2015)	22,50%	19,00%	29,00%	3,00%

Tabla 11. Datos de fracción inorgánica obtenidos en otros estudios europeos

Como se puede observar los valores de fracción inorgánica del NFVU obtenidos en los distintos estudios son muy similares, las variaciones observadas están en función del mix de mercado de cada uno de los países, en donde los porcentajes de neumático de camión/neumático de turismo es diferente en cada caso, afectando al porcentaje total de cenizas de las muestras.

En el caso de Portugal, la tasa de valorización energética queda reducida desde el 1 de Enero del 2015 por la Agência Portuguesa do Ambiente (APA) un 22,5%, cuando se utiliza NFVU como combustible en las cementeras, debido a la fracción que se incorpora al producto final¹⁰.

¹⁰ "Diário da República, 1.ª série – N.º252 – 31 de dezembro de 2014"

7. CONCLUSIONES

- En el estudio preliminar (Anexo 1) se determina que el 24,66% del NFVU utilizado como combustible sólido recuperado en la fabricación de clínker se incorpora en masa al producto final, siendo el 16,39% acero y 8,27% óxidos minerales.
- No existen diferencias significativas entre la composición del clínker fabricado con NFVU's como combustible y el fabricado con combustibles de origen fósil, las ligeras diferencias, están dentro de los márgenes establecidos en la norma armonizada europea de referencia.
- El balance de masas del proceso de fabricación del clínker cuando se utiliza NFVU como combustible indica que 29,6 Kg de NFVU se incorporan en 1 tonelada de clínker, representando el 2,96% de su composición final.
- El 16,39% del NFVU correspondiente al acero que contiene el neumático se incorpora en el clínker sustituyendo a las materias primas que actúan como corrector férrico, como por ejemplo la limonita.
- El 3,72% del NFVU que se utiliza en la fabricación de clínker se incorpora en el mismo sustituyendo a los óxidos principales o estequiométricos que contienen las materias primas y por tanto, se reduce el aporte de materias primas como la caliza que contiene el calcio u otro tipo de minerales, como por ejemplo la arena, pizarra o arcilla que contienen la sílice, el óxido de hierro y la alúmina.
- Los metales minoritarios encontrados en la fracción inorgánica de los NFVU incorporados ya se encuentran presentes en las materias primas principales (caliza, arcilla, pizarra, etc) utilizadas en la fabricación del clínker y en su composición final.
- Es importante resaltar, que en la formulación del "crudo" para la fabricación del clínker se llevan al límite las impurezas contenidas en el mismo, sin perder las prestaciones y siempre cumpliendo la normativa europea UNE-EN 197-1, reducir la huella ecológica del proceso y así potenciar la sostenibilidad del proceso incorporando los conceptos de economía circular.
- La fracción inorgánica procedente de la utilización de NFVU's (24,66% del total) se incorpora en el clínker sustituyendo una cantidad de 46,5 Kg de las materias primas necesarias para producir 1 tonelada de clínker, lo que equivale a una sustitución del 2,96% de las materias primas para producir la misma cantidad de clínker sin NFVUs.

ANEXO 1

ESTUDIO DEL COPROCESO EN LA VALORIZACIÓN DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO EN CEMENTERAS

EVALUACIÓN DE LA FRACCIÓN MATERIAL INCORPORADA AL
CLÍNKER

PI0022-15

10/03/2015

ANEXO 2

INFORME DE RESULTADOS NºPI-0191-15

“CARACTERIZACIÓN DEL CLÍNKER CON Y SIN NFVU”

PI0191-15

15/12/2015
