

Separata

Valoración de la mejora de la huella de carbono y el uso de energía en la tecnología refractaria por expertos independientes.

Tecnología de procesos de cero emisiones netas

vdz

Informe técnico de VDZ gmbH, Düsseldorf, Alemania
Julio 2023



Editor:
Refratechnik Cement GmbH,
Göttingen

Todos los derechos reservados. Las reproducciones de todo tipo, incluidos los extractos, están sujetos a la autorización por parte del editor.

Valoración de la mejora de la huella de carbono y el uso de energía en la tecnología refractaria por expertos independientes.

Informe técnico

A-2022/0921



Tecnología de procesos de cero emisiones netas

VDZ Technology gGmbH

P. O. Box 30 10 63
40410 Düsseldorf

Toulouser Allee 71
40476 Düsseldorf

T +49 (0)211 45 78 0
F +49 (0)211 45 78 296

info@vdz-online.de
www.vdz-online.de

Registro Mercantil: Dusseldorf
Juzgado: Dusseldorf
HRB-N.º 66898

Administrador VDZ e.V.:
Schneider

Directores gerentes:
Dr. Volker Hoenig
Dr. Christoph Müller

Queda prohibida la reproducción total o parcial de este informe por fotocopia, escaneado, microfilm u otros medios, así como su incorporación a cualquier sistema de recuperación de información sin el permiso por escrito de VDZ Technology gGmbH. Ni la empresa VDZ Technology gGmbH ni los autores de este informe serán responsables de lucro cesante ni de otros daños comerciales, incluidos, entre otros, daños especiales, incidentales, consecuentes o de otro tipo.

**Valoración de la mejora de la huella de carbono y el uso de energía
en la tecnología refractaria refractario por expertos independientes**

Cliente:	Refratechnik Cement GmbH, Göttingen
Fecha de encargo:	27.10.2022
Número de encargo del cliente:	4500350459
Nuestro número de encargo:	A-2022/0921
Directora de proyecto:	p.d. Dr. Kristina Fleiger
Responsable:	p.o. M.Sc. Dario Joschko
Departamento:	Tecnología de procesos de cero emisiones netas
Fecha de envío:	25.07.2023
Actualización:	27.05.2024
Comprende:	17 páginas

Índice

1. Introducción	6
2. Definición de la base de simulación	8
2.1 Concepto de revestimiento para condiciones de servicio convencional de horno	8
2.2 Concepto de revestimiento para un servicio de horno bajo condiciones exigentes (AF/AR)	10
3. Estudio de simulación y valoración.	12
3.1 Comparación de servicios de horno	13
3.2 Valoración del potencial de ahorro de CO ₂ y energía	18
4. Resumen	20

1. Introducción

En la industria del cemento, los materiales refractarios se usan para proteger los componentes de acero que están expuestos a ataques térmicos, mecánicos y químicos. Existen productos refractarios específicos adaptados a los requisitos concretos de cada grupo de la planta para casi todos los entornos en las plantas de cemento. Un entorno en el que esta circunstancia se cumple particularmente es el horno rotatorio, donde el revestimiento refractario se adapta a los requisitos específicos de las distintas áreas del horno.

Hasta ahora, el objetivo central para estos materiales refractarios se ha caracterizado por alcanzar la vida útil con el rendimiento requerido según el plan operativo de la planta con el menor consumo específico de refractario. Aparte de esta función central, se va perfilando un objetivo adicional: La eficiencia energética del proceso condicionada por el revestimiento refractario.

La industria global del cemento y del hormigón ha emprendido una transición hacia las cero emisiones netas de CO₂, que representa la mayor transformación jamás emprendida en este sector. Para alcanzar la neutralidad de carbono en 2050, se deberá trabajar con varias herramientas a lo largo de toda la cadena de valor de la producción de cemento y hormigón. El incremento de la eficiencia energética en el proceso de cocción de clínker es un requisito previo en todos los esfuerzos ambiciosos de reducción de CO₂, a pesar de que una cantidad considerable de emisiones de CO₂ deberá reducirse mediante tecnologías de captura y almacenamiento/uso de carbono (CCUS por sus siglas en inglés).

La mejora de la tecnología de los hornos durante las últimas décadas ha conducido a un progreso significativo de la eficiencia energética en el proceso de cocción de clínker. En la actualidad, el potencial de mejora se ha agotado en gran medida, por lo que la reducción exigida por la política apenas es posible, ni siquiera en los supuestos más exigentes. Por lo tanto, para seguir obteniendo avances con los pequeños potenciales restantes, se requieren unos gastos de inversión muy elevados.

El revestimiento refractario no solamente protege los componentes, sino que influye también en las pérdidas de calor que mayoritariamente se producen a través de las paredes del horno, por lo que es importante para la eficiencia energética global del servicio. Ante este trasfondo, Refratechnik Cement GmbH ha desarrollado el nuevo concepto de revestimiento refractario denominado ES (Energy and **E**mission **S**aving). En este proceso, varias calidades de ladrillos influyen positivamente sobre el consumo de energía del proceso de cocción de clínker, reduciendo significativamente el coeficiente de transferencia de calor. Por lo tanto, la optimización del revestimiento refractario puede reducir el consumo de combustible, especialmente en el quemador principal, y con ello también las emisiones de CO₂, lo que ayuda de una forma importante a alcanzar la neutralidad de carbono en 2050.

Además, el concepto ES puede reducir las emisiones / el consumo de energía en los 3 alcances del estándar GHG de la compañía que emite el informe (producción de clínker de cemento), tal y como muestra el **gráfico 1-1**.

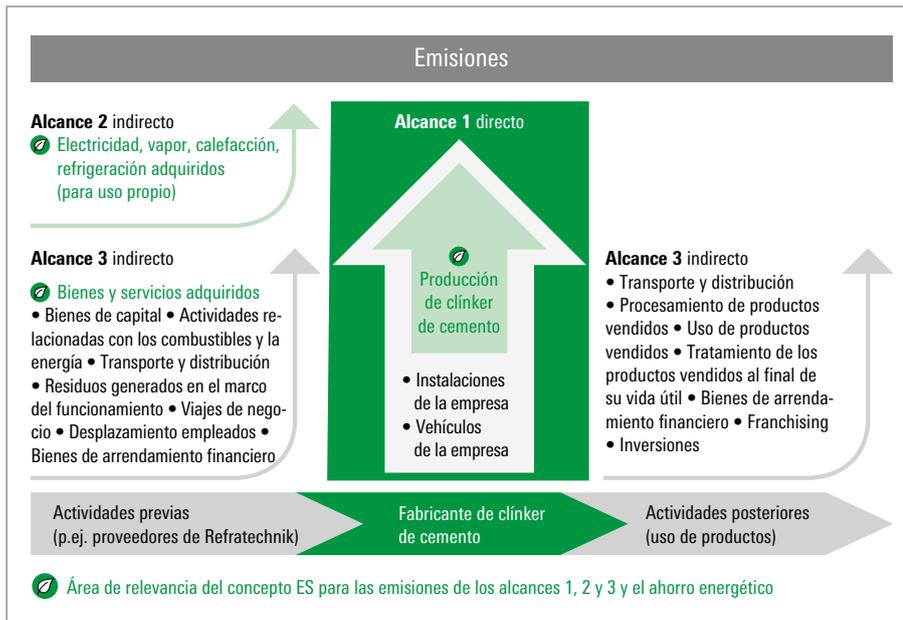


Gráfico 1-1: Alcances de las emisiones según el estándar del protocolo GHG

El instituto de investigación de la industria del cemento (VDZ) recibió el encargo de valorar la eficiencia y un posible efecto positivo de nuevos conceptos de revestimientos refractarios para hornos mediante el uso de un modelo matemático. Los nuevos conceptos de revestimiento refractario se compararán con los modelos de revestimiento de referencia que representan el actual estado de la técnica para así determinar el potencial de ahorro de energía y reducción de CO₂. Este estudio se basa en la evaluación de un nuevo producto refractario (informe técnico A 2015/0657 ALMAG® ES de 2015).

2. Definición de la base de simulación

La base del estudio de simulación es un horno de última generación con una capacidad de producción de $5,000 \text{ t}_{\text{clinker}}/\text{d}$ (véase **Tabla 2-1**). La tasa de sustitución de combustibles alternativos seleccionada fue del 25 % que corresponde a una planta representativa a escala mundial.

Especificaciones	
Capacidad de producción	$5.000 \text{ t}_{\text{clinker}}/\text{d}$
Planta de cemento	Pre calentador de un ramal con 5 etapas, calcinador en línea con tubería de aire terciario, horno rotatorio, enfriador de parilla
Dimensiones del horno	Largo 75 m, \emptyset sin revestimiento 5 m, relación L/D de 15, grosor medio de la virola 28 mm
Mezcla de combustible	75 % (RST*) polvo de carbón, 25 % (RST*) mezcla de combustibles alternativos (fluff, harina animal, lodos de depuradora deshidratados mecánicamente)

RST*: Ratio de sustitución térmica

Tabla 2-1: Definición de las especificaciones del horno; Simulación del proceso

Mientras el horno se calienta con polvo de carbón, el calcinador se calienta con una combinación de polvo de carbón y una mezcla de combustibles alternativos (fluff, harina animal, lodos de depuradora deshidratados mecánicamente) .

El revestimiento del horno por tipos de ladrillos y zonas se instaló de acuerdo con las especificaciones proporcionadas por Refratechnik Cement GmbH y corresponde al estado actual de la técnica (revestimiento instalación de horno). En los siguientes capítulos se describirán por separado los conceptos refractarios ES para un servicio convencional de horno y un servicio de alta demanda (con cargas especialmente altas de álcalis)

2.1 Concepto de revestimiento para condiciones de servicio convencional de horno

En el concepto de revestimiento de referencia para el servicio convencional de un horno, se instalan ladrillos de chamota KRONEX® 30 y ladrillos de alto contenido en alúmina KRONEX® 60 en la zona de calcinación y de seguridad. En las zonas más demandadas a nivel termoquímico y las zonas de cocción se usan calidades básicas como TOPMAG® AF y PERILEX® CF.

En el concepto de revestimiento optimizado, las zonas de calcinación y seguridad están revestidas con los ladrillos más aislantes KRONEX® 30 ES y KRONEX® 60 ES. En las zonas de transición y cocción se instalan ladrillos de calidad básica TOPMAG® A1 ES (véase **Gráfico 2-1**).

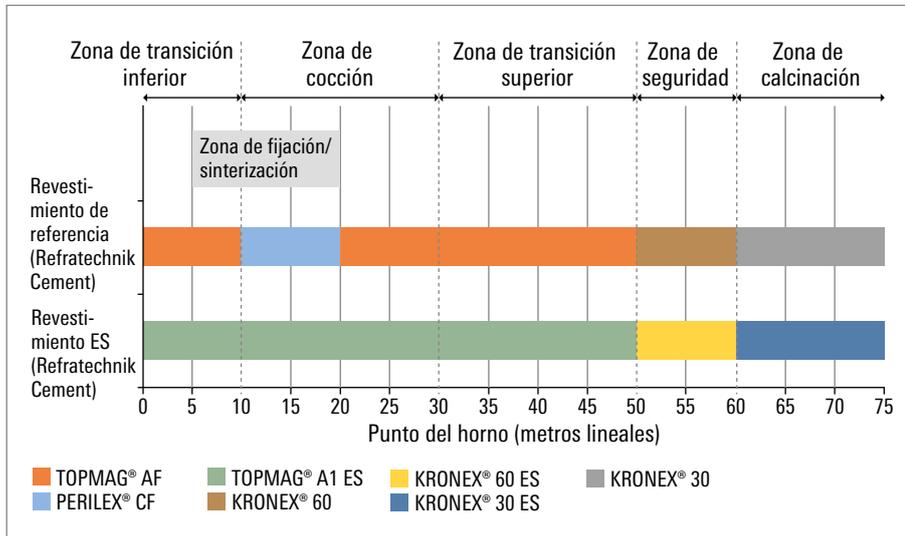


Gráfico 2-1: Conceptos de revestimiento de referencia y revestimiento ES; servicio convencional de horno

El revestimiento de las zonas de horno fuera del horno rotatorio, como el del precalentador, del calcinador y del enfriador permanecen inalteradas durante la simulación. Los coeficientes de transferencia de calor de las distintas calidades de ladrillo refractario fueron proporcionados por Refratechnik Cement GmbH (véase **Gráfico 2-2**).

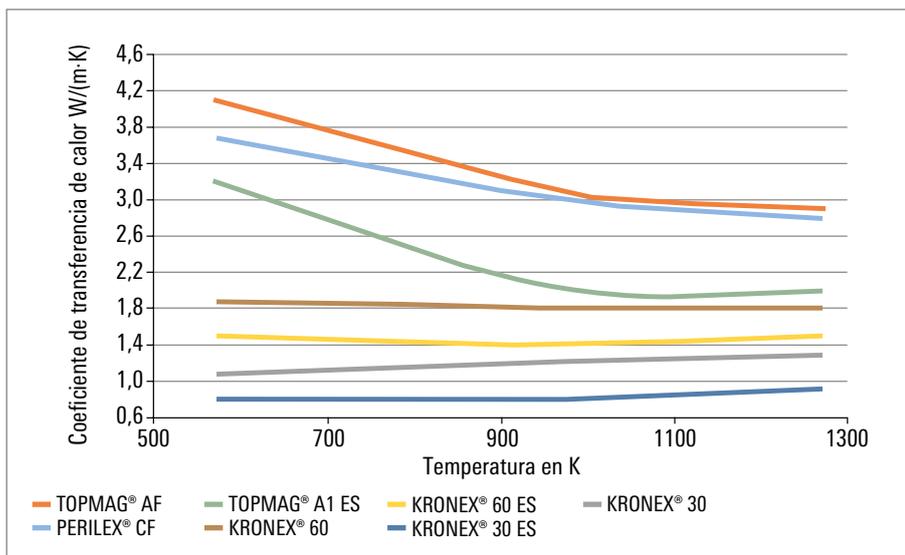


Gráfico 2-2: Coeficientes de transferencia de calor de materiales refractarios, concepto convencional, Refratechnik Cement GmbH

La comparación muestra que los productos KRONEX® de chamota y alto contenido en alúmina muestran un coeficiente de transferencia de calor más bajo que los productos básicos. Dado que las calidades de ladrillos de alúmina no se instalan en zonas del horno con elevadas cargas termoquímicas, se usan los ladrillos básicos TOPMAG® AF y PERILEX® CF en las zonas de transición y de cocción. Por este motivo, el concepto de revestimiento ES introduce el TOPMAG® A1 ES en las zonas básicas y los ladrillos KRONEX® 60 ES y KRONEX® 30 ES en las zonas de seguridad y calcinación. Estas calidades de ladrillos muestran un coeficiente de transferencia de calor mucho más bajo que los ladrillos convencionales, lo que proporciona una gran ventaja para el objetivo del ahorro de energía así como la reducción de CO₂ y más allá.

2.2 Concepto de revestimiento para un servicio de horno bajo condiciones exigentes (AF/AR)

Para las condiciones exigentes de servicio del horno, se optó por un concepto de revestimiento optimizado a nivel mecánico y alcalino, incluyendo calidades de ladrillos con alto contenido de alúmina de la serie KRONAL® AR en las zonas de calcinación y de seguridad. En las zonas de transición y cocción se instalaron calidades de ladrillos básicos como ALMAG® AF y REFRAMAG® AF.

En el concepto de revestimiento optimizado ES AR, el revestimiento de las zonas de seguridad y calcinación se ejecuta con KRONAL® 50 AR ES, KRONAL® 60 AR ES y KRONEX® 30 ES. Las calidades básicas de ladrillos en las zonas de transición y la zona de cocción también están revestidas con el ladrillo optimizado ALMAG® A1 ES (véase **Gráfico 2-3**).

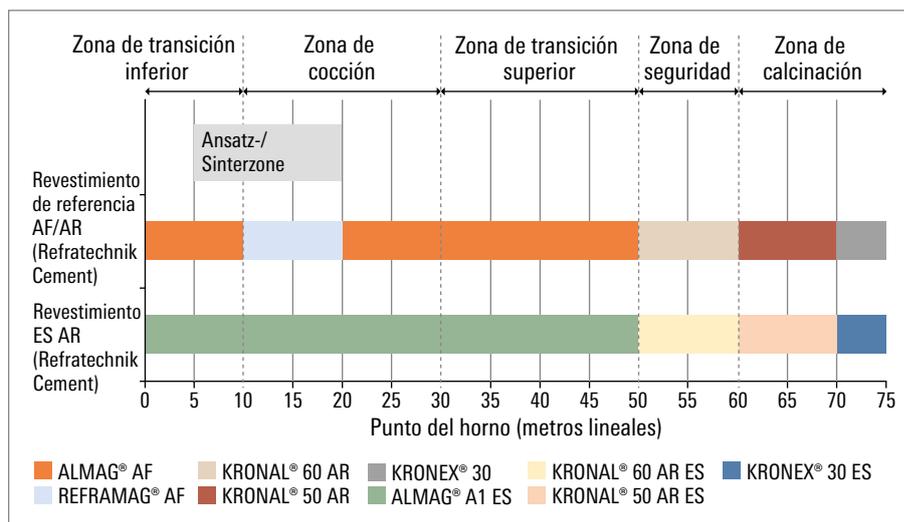


Gráfico 2-3: Revestimiento de referencia AF/AR y revestimiento ES AR; condiciones exigentes de servicio de horno

Los coeficientes de transferencia de calor para los ladrillos refractarios se muestran en el **Gráfico 2-4**. De acuerdo con la finalidad del desarrollo, los ladrillos ES muestran un coeficiente de transferencia de calor más bajo que sus correspondientes referentes en su respectiva zona de aplicación.

La periferia fuera del horno rotatorio (precalentador, calcinador, enfriador) se queda inalterada como en el concepto de revestimiento convencional.

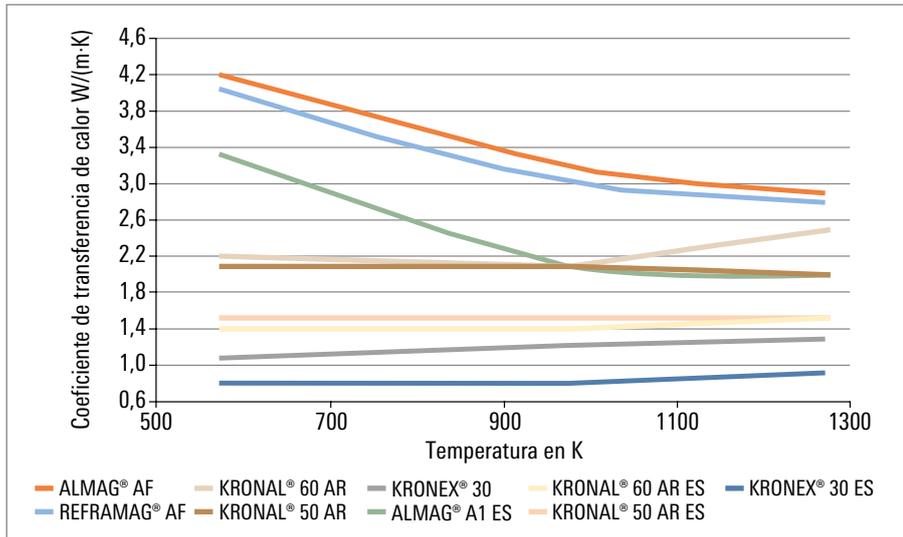


Gráfico 2-4: Coeficientes de transferencia de calor de materiales refractarios, concepto exigente, Refratechnik Cement GmbH

Además de la menor conductividad térmica y la reducción del consumo de energía térmica así como de las emisiones de CO₂ relacionadas, el peso del revestimiento refractario (proporcionado por Refratechnik Cement GmbH) influirá positivamente en las respectivas emisiones de la demanda de energía y electricidad relativa (**Tabla 2-2**).

Parámetro	Revestimiento condiciones convencionales de horno	Revestimiento condiciones convencionales de horno con ES	Revestimiento condiciones exigentes de horno AF/AR	Revestimiento condiciones exigentes de horno ES/AR
Peso revestimiento (total horno) en t	696.709	628.558	704.040	648.561
Ahorro en t	–	68.151	–	55.479
Ahorro en %	–	9,78	–	7,88

Tabla 2-2: Reducción del peso del revestimiento en el concepto de revestimiento ES para condiciones convencionales y exigentes de horno proporcionados por Refratechnik Cement GmbH; longitud horno: 75 m, diámetro horno: 5 m

3. Estudio de simulación y valoración

Se usó un modelo validado de un proyecto previo (informe A-2015/0657) para realizar una serie de diferentes simulaciones:

- Revestimiento de referencia para el servicio convencional de horno como descrito en la sección 2.1
- Revestimiento energéticamente optimizado (ES) para el servicio convencional del horno como descrito en la sección 2.1
- Revestimiento de referencia para el servicio exigente de horno como descrito en la sección 2.2
- Revestimiento energéticamente optimizado (ES) para el servicio exigente del horno como descrito en la sección 2.2

Los parámetros de simulación se han adaptado para ajustarse a valores objetivo similares, como la temperatura de calcinación y sinterización, las concentraciones de oxígeno y la calidad del clínker (cal libre, contenido de C_3S). El cambio de los parámetros de influencia así como los ahorros en el consumo de energía y, por tanto, las emisiones de CO_2 se comentarán más adelante en este capítulo.

3.1 Comparación de servicios de horno

Los distintos coeficientes de transferencia de calor de las calidades de ladrillos influyen en el balance de calor en el horno y derivan en una reducción de la entrada de calor para generar perfiles de temperatura similares (véase **Gráfico 3-1** y **Gráfico 3-2**) del flujo de material y de gas y la superficie máxima interior del horno (que prácticamente se enfría mediante el flujo de materiales y costra). En resumen, ambos conceptos, ES y ES AR, requieren respectivamente una menor cantidad de combustible que los conceptos de revestimiento de referencia. Esta afirmación vale tanto para el servicio convencional (**Tabla 3-1**) como para el exigente (**Tabla 3-2**). Dado que se usa menos combustible en el quemador principal, la distribución del combustible cambia ligeramente a favor del quemador del calcinador.

Parámetro	Unidad	Revestimiento de referencia	Revestimiento ES
RTI* en el quemador principal	%	40	39
RTI* en el calcinador	%	60	61
Aire secundario	Nm ³ /h	51.150	49.150
Aire terciario	Nm ³ /h	120.900	117.500
Gas de escape precalentador (seco)	Nm ³ /h	251.161	245.845
Combustible: alternativo	t/h	8,7	8,7
Combustible: carbón	t/h	17,4	16,9
Clínker	t/h	208,7	208,7

RTI*: Potencia térmica nominal

Tabla 3-1: Servicio convencional del horno: Distribución de combustible y parámetros de proceso

Parameter	Einheit	Referencia Revestimiento AF/AR	Revestimiento ES AR (optimizado mec./álcali)
RTI* en el quemador principal	%	40	39
RTI* en el calcinador	%	60	61
Aire secundario	Nm ³ /h	51.150	49.550
Aire terciario	Nm ³ /h	120.900	116.500
Gas de escape precalentador (seco)	Nm ³ /h	251.169	245.228
Combustible: alternativo	t/h	8,7	8,7
Combustible: carbón	t/h	17,4	17,0
Clínker	t/h	208,7	208,7

RTI*: Potencia térmica nominal

Tabla 3-2: Servicio exigente del horno: Distribución de combustible y parámetros de proceso

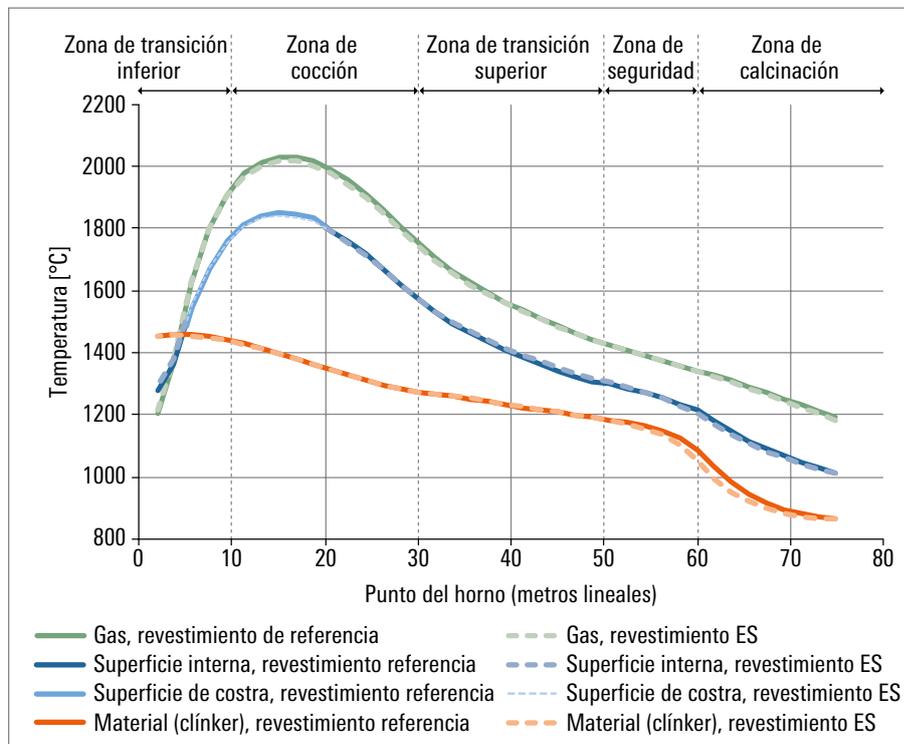


Gráfico 3-1: Perfiles de temperatura a lo largo del horno; servicio convencional del horno (lizquierda: salida horno 0 m, derecha: entrada horno 75 m)

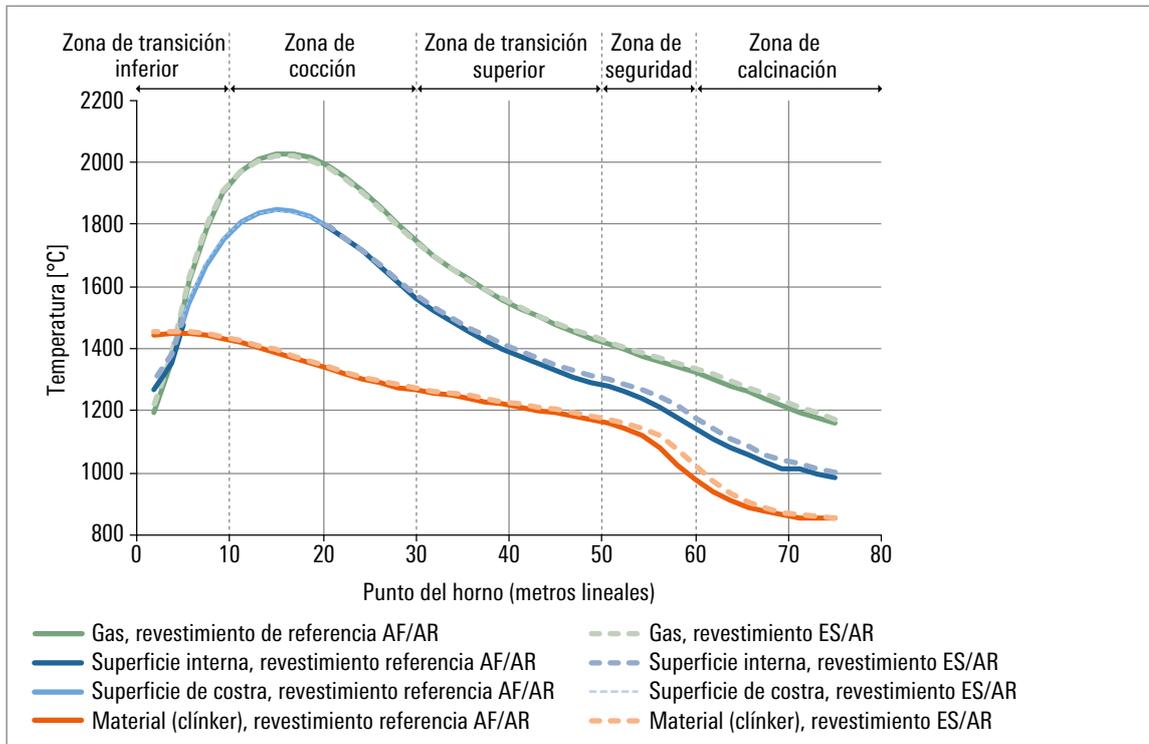


Gráfico 3-2: Perfiles de temperatura a lo largo del horno; servicio exigente del horno (izquierda: salida horno 0 m, derecha: entrada horno 75 m)

Dado que la composición de la harina cruda se mantuvo constante en todas las simulaciones, también la composición del clinker resultante era constante. Una reducida entrada de ceniza puede explicar desviaciones muy leves.

A pesar de que los perfiles en el horno siguen las mismas tendencias, las temperaturas de la virola son considerablemente distintas entre ellas. El concepto de revestimiento ES para el servicio convencional del horno (**Gráfico 3-3**) muestra una reducción significativa de la temperatura de la pared en comparación con el concepto de revestimiento de referencia en todas las zonas del horno, especialmente en la zona de calcinación y la zona superior de transición así como la zona de cocción. El desarrollo paralelo de ambas curvas coincide con los gradientes de temperatura internos. El cambio de TOPMAG® AF y PERILEX® CF a TOPMAG® A1 ES así como el cambio de las calidades de alúmina a KRONEX® 60 ES y KRONEX® 30 ES conllevan temperaturas más bajas de la virola del horno y, por tanto, una menor pérdida de calor.

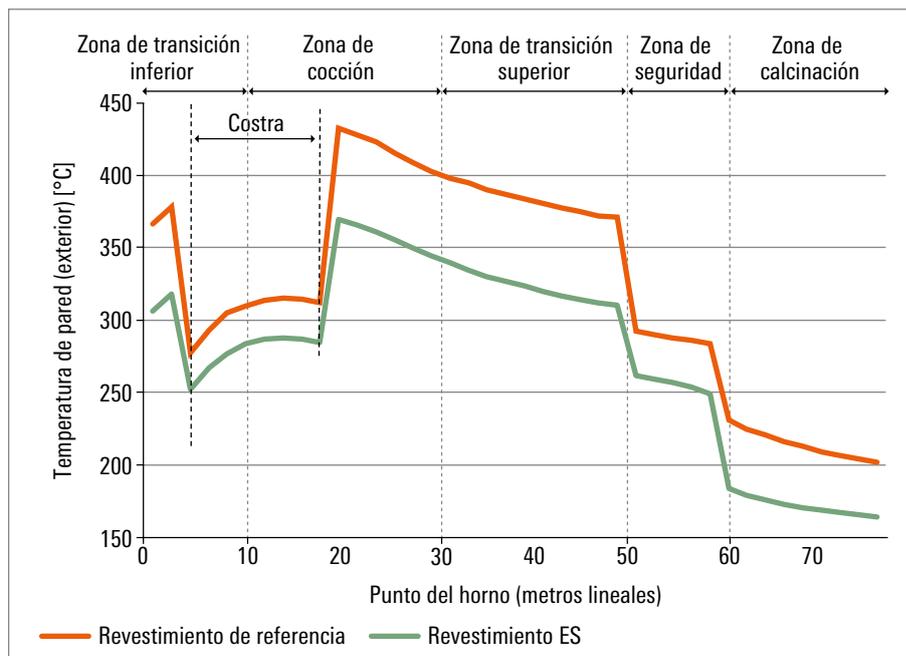


Gráfico 3-3: Perfiles de temperatura a lo largo del horno; servicio convencional del horno (izquierda: salida horno 0 m, derecha: entrada horno 75 m)

El mismo resultado se puede apreciar en la comparación de las temperaturas de la virola del horno entre el concepto de revestimiento ES AR y el concepto de revestimiento de referencia AF/AR para servicio exigente (**Gráfico 3-4**). La temperatura de la virola del concepto de revestimiento ES AR es más baja en todas las zonas del horno, especialmente en la zona de seguridad donde el ladrillo KRONAL® 60 AR ha sido reemplazado por el KRONAL® 60 AR ES, optimizado a nivel mecánico y alcalino, así como en las zonas de cocción y transición en las que se instala la calidad de ladrillo básico ALMAG® A1 ES en lugar de ALMAG® AF.

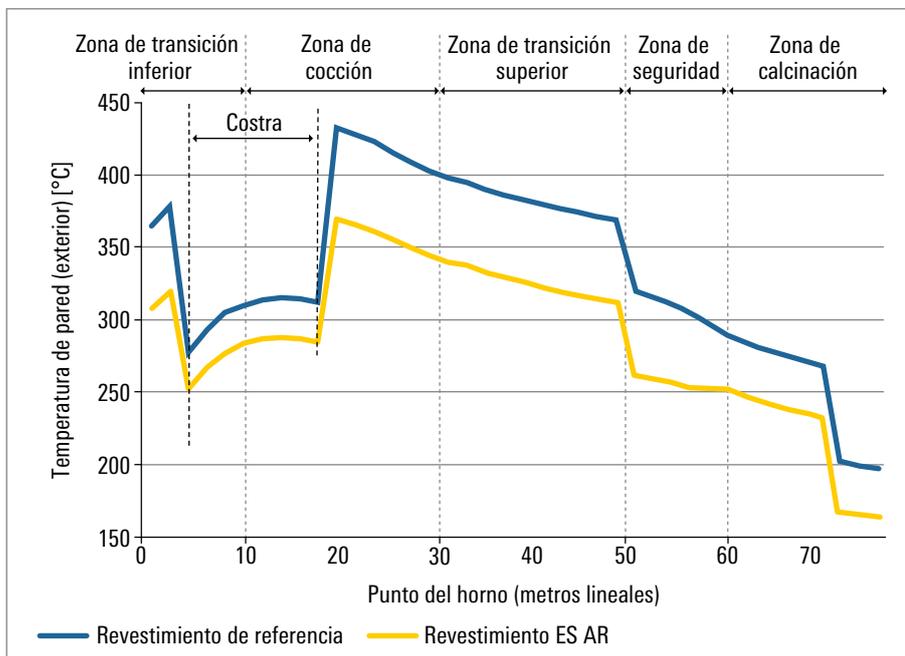


Gráfico 3-4: Perfiles de temperatura a lo largo del horno; servicio exigente del horno (izquierda: salida horno 0 m, derecha: entrada horno 75 m)

El perfil de la temperatura del gas se ajustó para garantizar la formación de fases de clínker. La transferencia de calor al material y a la superficie de la pared (que, en determinados segmentos, incluye también la costra) se calculó correspondientemente.

En la zona inferior de transición y cocción se definió un tramo de costra como referencia. Esta zona cubre la superficie interna del horno en el área entre los metros 10 y 20 del horno (zona de cocción). Por eso, la temperatura de la superficie corresponde a la temperatura de la parte superior de la costra y no a la de los ladrillos refractarios. El grosor de la costra es de 15 cm, un grosor suficiente para que la temperatura de los ladrillos refractarios en esta zona se sitúe por debajo de 1800 °C. No se calculó la formación de costra delante y detrás de la zona definida, lo que se refleja en un fuerte aumento de la temperatura de la virola del horno. En realidad, por lo tanto, se supondría la formación de una fina costra, que atenuaría el pico visible de la temperatura de la virola del horno. Además, las simulaciones no consideran los efectos de enfriamiento producidos por los ventiladores eléctricos, el viento y la propia rotación del horno rotativo.

3.2 Valoración del potencial de ahorro de CO₂ y energía

Los balances de energía resultantes de todos los escenarios de conceptos de revestimiento se muestran en la **Tabla 3-3** y **Tabla 3-4**. Los cambios en los volúmenes de aire de escape del precalentador y del enfriador se deben al cambio de la cantidad de combustible y al cambio de los volúmenes del flujo de aire terciario/secundario.

Entalpía [kJ/kg clínker]	Unidad	Revestimiento referencia	Revestimiento ES
Input			
Harina cruda	kJ/kg clínker	86,3	86,3
Combustible	kJ/kg clínker	18,7	18,4
Aire primario	kJ/kg clínker	1,9	1,9
Aire de refrigeración	kJ/kg clínker	33,2	33,2
Aire falso	kJ/kg clínker	0,8	0,8
Reacción entalpía de combustibles	kJ/kg clínker	2.992,2	2.937,7
Total input	kJ/kg clínker	3.133,0	3.077,9
Output			
Gas escape + polvo precalentador	kJ/kg clínker	695,8	665,9
Clínker + polvo de clínker	kJ/kg clínker	82,8	83,1
Aire escape enfriador	kJ/kg clínker	333,1	356,0
Pérdidas pared precalentador	kJ/kg clínker	18,8	18,4
Pérdidas pared calcinador + tubería conducto de aire terciario	kJ/kg clínker	92,4	93,3
Pérdidas pared horno	kJ/kg clínker	202,1	151,4
Pérdidas pared enfriador	kJ/kg clínker	11,8	11,7
Reacción entalpía alimentación material de coacción del horno	kJ/kg clínker	1695,7	1696,6
Total output	kJ/kg clínker	3.133,0	3.077,9
Demanda específica de energía	kJ/kg clínker	3.011	2.956
Total ahorro (quemador horno + quemador calcinador)	%	–	1,8 %
Ahorro en quemador horno	%	–	4,6 %
Pérdidas pared, total	kJ/s	18,856	15,931
Ahorro	%	-	15,5
Pérdidas pared, horno	kJ/s	11,721	8774
Ahorro	%	-	25,1
Emisiones de CO ₂	tCO ₂ /t _{cli}	0,8194	0,8143
Ahorro	tCO ₂ /t _{cli}	-	0,0051
	%	–	0,63 %

Tabla 3-3: Balances de energía; Servicio convencional del horno

Entalpía [kJ/kg clínker]	Unidad	Revestimiento referencia AF/AR	Revestimiento ES AR
Input			
Harina cruda	kJ/kg clínker	86,3	86,3
Combustible	kJ/kg clínker	18,7	18,4
Aire primario	kJ/kg clínker	1,9	1,9
Aire de refrigeración	kJ/kg clínker	33,2	33,2
Aire falso	kJ/kg clínker	0,8	0,8
Reacción entalpía de combustibles	kJ/kg clínker	2.992,5	2.946,4
Total input	kJ/kg clínker	3.133,3	3.087,0
Output			
Gas escape + polvo precalentador	kJ/kg clínker	690,5	664,1
Clínker + polvo de clínker	kJ/kg clínker	82,4	83,4
Aire escape enfriador	kJ/kg clínker	330,5	359,9
Pérdidas pared precalentador	kJ/kg clínker	18,6	18,4
Pérdidas pared calcinador + tubería conducto de aire terciario	kJ/kg clínker	91,8	93,5
Pérdidas pared, horno	kJ/kg clínker	212,7	159,7
Pérdidas pared enfriador	kJ/kg clínker	11,7	11,8
Reacción entalpía alimentación material de cocción del horno	kJ/kg clínker	1.695,3	1.696,3
Total output	kJ/kg clínker	3.133,3	3.087,0
Demanda específica de energía	kJ/kg clínker	3.011	2.965
Total ahorro (quemador horno + quemador calcinador)	%	-	1,5 %
Ahorro en quemador horno	%	-	3,8 %
Pérdidas pared, total	kJ/s	19.406	16.426
Ahorro	%	-	15,4 %
Pérdidas pared, horno	kJ/s	12.331	9.256
Ahorro	%	-	24,9 %
Emisiones de CO ₂	tCO ₂ /t _{cli}	0,8196	0,8152
Ahorro	tCO ₂ /t _{cli}	-	0,0044
	%	-	0,54 %

Tabla 3-4: Balances de energía; Servicio exigente del horno

Las pérdidas de calor por las paredes del horno pudieron reducirse en un 25% en ambos diseños de revestimiento optimizado. Como consecuencia, los ahorros potenciales de la demanda de energía específica total acumulan hasta el 1,8% en el servicio convencional de horno y el 1,5% en el servicio exigente. Estos ahorros de energía se producen exclusivamente en el horno. Teniendo en cuenta el ahorro de la demanda de energía por separado en el quemador del horno, se puede ahorrar el 4,6% de energía térmica en el quemador en el servicio convencional y el 3,8% en el servicio exigente.

4. Resumen

El revestimiento refractario en hornos rotatorios de clínker no solamente protege los componentes de la instalación, sino que también influye en las pérdidas de calor por la pared. Ante esta situación, Refratechnik Cement GmbH, Göttingen, ha desarrollado un nuevo concepto de revestimiento refractario con el fin de ahorrar energía reduciendo las pérdidas de calor por las paredes y, por tanto, reduciendo también las emisiones. El concepto incluye ladrillos con un desarrollo avanzado para cada zona de aplicación y distintas condiciones de servicio del horno. Esta valoración independiente sobre la base de un modelo matemático del proceso de cocción de clínker muestra que el revestimiento refractario del concepto ES (servicio convencional de horno) y el revestimiento ES/AR (servicio exigente de horno) tienen un efecto positivo sobre las pérdidas globales de calor por las paredes, el potencial de reducción de combustibles fósiles así como posibles reducciones de las emisiones de CO₂. Estos efectos positivos se derivan de la transición de los diseños de referencia para las condiciones de operación repetitivas, convencional y exigente, al respectivo diseño del revestimiento optimizado ES.

La entrada de energía térmica se redujo principalmente en el quemador principal del horno mediante la reducción de la cantidad de combustible fósil (carbón). Como el ahorro de la entrada de combustible de hasta 430 kg/h se concentra en el quemador principal, incluso una reducción de la entrada de energía térmica en el quemador del horno del 3,8-4,6 % se traducirá en una reducción apreciable en el control del horno. Además, el uso de combustibles fósiles sigue centrado en el quemador principal debido a la necesidad de altas temperaturas en la zona de sinterización. Incluso si la tasa de sustitución térmica por combustibles alternativos (con biomasa) pudiese incrementarse, la optimización térmica del revestimiento refractario del horno ofrece un gran potencial para la reducción de las emisiones netas de CO₂.

Basándonos en un servicio de 330 días al año, la implementación de las calidades de ladrillos ES, que se usan en los dos conceptos de revestimiento optimizados, conllevará un ahorro anual según **Tabla 4-1** y **Tabla 4-2**. Asimismo, el ahorro de carbón permite reducir las emisiones de CO₂ basadas en combustibles.

KPI	Revestimiento de referencia	Revestimiento ES Servicio convencional del horno	Ahorro
Combustible carbón	17,36 t/h 137.507 t/a	16,93 t/h 134.078 t/a	0,43 t/h 3.429 t/a
Demanda específica de energía	3.011 kJ/kg _{clinker}	2.956 kJ/kg _{clinker}	Total 1,8% En el quemador del horno 4,6%
Emisiones totales de CO ₂ procedentes de la materia prima y del combustible	1.352.016 t _{CO2} /a	1.343.580 t _{CO2} /a	8.436 t _{CO2} /a 0,63 %
Emisiones totales de CO ₂ procedentes del combustible: combustible en el calcinador y el quemador del horno	461.726 t _{CO2} /a	453.050 t _{CO2} /a	1,88 %
Emisiones totales de CO ₂ procedentes del combustible: combustible en el quemador del horno	186.009 t _{CO2} /a	177.333 t _{CO2} /a	4,66 %

Tabla 4-1: Resumen del ahorro de energía, carbón y CO₂; Servicio convencional del horno

KPI	Revestimiento de referencia	Revestimiento ES/AR Servicio exigente del horno:	Ahorro
Combustible carbón	17,36 t/h 137.507 t/a	17,00 t/h 134.632 t/a	0,36 t/h 2.875 t/a
Demanda específica de energía	3.011 kJ/kg _{clinker}	2.965 kJ/kg _{clinker}	Total 1,5% En el quemador del horno 3,8%
Emisiones totales de CO ₂ procedentes de la materia prima y del combustible	1.352.417 t _{CO2} /a	1.345.086 t _{CO2} /a	7.331 t _{CO2} /a 0,54 %
Emisiones totales de CO ₂ procedentes del combustible: combustible en el calcinador y el quemador del horno	461.726 t _{CO2} /a	454.453 t _{CO2} /a	1,58 %
Emisiones totales de CO ₂ procedentes del combustible: combustible en el quemador del horno	186.009 t _{CO2} /a	178.735 t _{CO2} /a	3,91 %

Tabla 4-2: Resumen del ahorro de energía, carbón y CO₂; Servicio exigente del horno

El estudio de simulación muestra que, usando las calidades de ladrillos ES, se puede obtener una reducción anual de 3.429 t de carbón y 8.436 t de CO₂ (alcance 1 del fabricante de clínker de cemento) en el servicio convencional del horno en comparación con el revestimiento de referencia proporcionado por Refratechnik Cement GmbH. En un servicio de horno bajo condiciones exigentes, el revestimiento ES AR permite un ahorro anual de 2.875 t de carbón y 7.331 t de CO₂ en comparación con el diseño de referencia AF/AR.

El ahorro calculado del 8-10 % de peso del revestimiento refractario puede contribuir positivamente a la reducción de emisiones del alcance 3 aguas arriba del fabricante de clínker de cemento y puede reducir la demanda de electricidad y su impacto en el alcance 2 del fabricante de clínker de cemento. Este punto no era objeto de la evaluación y se analizará en una valoración aparte.

Al adaptar el concepto de revestimiento ES o ES/AR a un horno, el aumento de la eficiencia energética puede parecer infravalorado sobre el papel. Aplicando el concepto a varias líneas de hornos, esta medida podría contribuir a la disminución global del uso de combustibles fósiles y de las respectivas emisiones de CO₂. Como los revestimientos refractarios en hornos rotatorios son materiales de desgaste y, por tanto, reemplazados regularmente, el concepto de ladrillos ES puede aplicarse en el mantenimiento previsto y no comporta gastos de inversión significativos adicionales.

Es ampliamente conocido que la neutralidad de carbono solo puede conseguirse mediante tecnologías CCUS (Carbon Capture Utilization and Storage). Su aplicación está relacionada con elevados gastos de capital, pero sobre todo de explotación. Evitar la generación de CO₂ – aunque sea en menor medida, como ocurre con medidas como el concepto de ladrillo refractario ES – podría ayudar a reducir el consumo de energía, las emisiones de CO₂ y los gastos adicionales de la producción de clínker en el futuro.

VDZ Technology gGmbH
Tecnología de procesos de cero emisiones netas

p.d. Dr. Kristina Fleiger p.o. M.Sc. Dario Joschko

Previa solicitud, se facilitará más información sobre, por ejemplo, instrumentos, métodos, incertidumbres u otras características de la medición. Todas las muestras se eliminarán tres meses después de la fecha de este informe técnico, si el cliente no se opone.

Refratechnik Cement GmbH
Rudolf-Winkel-Strasse 1
37079 Göttingen
Alemania

 +49 551 6941 0