

HORMIGONES REFRACTARIOS: SECADO, CALENTAMIENTO, CURADO Y ENFRIAMIENTO

Ricardo Inoriza
Ingeniero Técnico Industrial
Karrena, revestimientos
refractarios

Recibido: 26/9/05

Aceptado: 25/10/05

Resumen

El secado, calentamiento, curado y enfriamiento de hormigones refractarios es una operación delicada y a la cual no se le presta la necesaria atención. La escasa literatura técnica publicada sobre revestimientos refractarios, presenta asimismo, muy escasa profundización sobre este tema.

Sin embargo, el incumplimiento de un protocolo correcto de secado y calentamiento puede llegar a dañar gravemente e incluso destruir por completo, el revestimiento y por lo tanto a la unidad de la que forma parte.

Palabras clave: Refractarios, secado, fraguado, capilaridad.

Abstract

The dry out, heating up and cooling down of refractory castables is a delicate operation which no necessary attention is paid. The scant published technical literature about refractory linings has, likewise, very scant studies in depth about the subject.

However, the non compliance of a dry out and heating up proper convention may damage in a serious way and even destroy completely both the lining and the unit.

Key words: Refractory, dry out, setting, capilarity.

Introducción

Con relativa frecuencia se oye hablar de secados y calentamientos aplicados a los revestimientos refractarios de los hornos industriales. Y, con no menos frecuencia, saltan a la palestra una serie de malentendidos, desafortunadamente, ya habituales. Preguntas como las que se plantean seguidamente no son extrañas. Por ejemplo, si no es necesario secar un revestimiento refractario construido con la-

drillos, ¿por qué aplicar una curva de calentamiento? Y, si sólo se ha reparado una parte reducida del horno con hormigones, ¿es necesario aplicar una curva de secado al conjunto de la instalación?

Trataremos de explicar algunos de los fenómenos que se producen en los procesos citados así como de sentar una serie de conceptos básicos que ayuden al técnico en su toma de decisiones.

Importancia de los procesos

Partamos de la base de que los procesos mencionados en el título son absolutamente necesarios para el endurecimiento de los hormigones refractarios instalados en las diferentes partes del horno. Además, es fundamental que estos procesos sean llevados a cabo de forma estricta y siguiendo las pautas indicadas por el diseñador del revestimiento o, en su defecto, del suministrador / fabricante de los materiales refractarios del revestimiento.

De hecho, estos procesos son tan importantes que, si no son llevados a cabo de la forma adecuada, no sólo dan lugar a que los hormigones no alcancen la necesaria resistencia mecánica, sino que incluso aparezcan grietas, reventones, explosiones o incluso la propia destrucción del revestimiento y, por ende, del horno.

En revestimientos de mampostería no se producen los procesos de endurecimiento ya que los ladrillos ya han los han experimentado en su fabrica-



Fotografía de un pequeño horno construido de forma monolítica

ción, aunque sí es necesario seguir determinadas curvas de calentamiento para permitir el fraguado químico de los morteros que unen los ladrillos, los cambios alotrópicos de ciertos materiales y el necesario acople del revestimiento absorbiendo dicho proceso las juntas de dilatación que el diseñador ha calculado para este propósito.

¿Qué es el secado?

Todos los revestimientos refractarios que contengan humedad, tanto nuevos como reparados, deben ser sometidos a un proceso de secado que sirve, en definitiva, para eliminar el agua empleada en el amasado del hormigón y no eliminada en la reacción química de fraguado hidráulico. El proceso de secado normalmente continúa con el calentamiento y curado, operaciones en las cuales el hormigón experimenta su segundo endurecimiento o sintetizado.

Primer punto a tener en cuenta: un hormigón refractario tiene su primer endurecimiento tras el fraguado hidráulico al igual que un hormigón de obra civil y un segundo endurecimiento de mayor amplitud al alcanzar cierta temperatura.

Análisis del proceso de secado

Al analizar el proceso de secado, primero debemos analizar dónde puede estar situada el agua en un revestimiento. Principalmente se puede encontrar en los siguientes lugares:

- Agua en los poros de los materiales.
- Agua de capilaridad en los materiales.
- Agua como proceso de la hidratación del material.
- Agua como resultado del proceso químico producido en el hormigón.

A la vista de lo anterior, debemos tener en cuenta que un hormigón refractario convencional o aislante, tras su fraguado hidráulico, tiene una gran cantidad de agua que necesita ser eliminada. Esta eliminación se debe ha-

cer correctamente. Pensemos por un momento que el vapor, incontrolado, puede alcanzar presiones elevadísimas y producir, por explosión, la destrucción del revestimiento.

El proceso de secado lleva dos partes:

- Formación de vapor de agua.
- Eliminación controlada del vapor de agua. Esta eliminación se produce básicamente por ventilación y por evaporación.

Cuando se aplica calor al revestimiento refractario, la temperatura del agua sube y, poco a poco, en un proceso lento pero seguido, el agua se va eliminando. Este proceso depende de la temperatura del revestimiento.

A la temperatura de vaporización, el vapor se encuentra con líquido formándose el denominado vapor saturado. Si, cuando se alcanza la temperatura de saturación, se sigue aportando calor, la vaporización continúa, siempre a temperatura constante. El vapor saturado pasa por diferentes estados, perdiendo el agua de la fase acuosa. Una vez que se pierde todo el líquido, tendremos vapor saturado seco. Si seguimos aportando calor, el vapor se sigue calentando y tendremos el vapor sobrecalentado.

En todo este proceso hay aumentos muy considerables de volumen. A presión normal, el volumen de vapor por kilogramo de agua es de 1.725 cm³. Ahora bien, si asumimos que el volumen de poros o intersticial es constante, el aumento de presión es considerable.

Como un revestimiento monolítico puede estudiarse, por simplificación, como un cuerpo poroso y capilar, es necesario entender primeramente el proceso de capilaridad.

Capilaridad

Un cuerpo seco, poroso y capilar tiene la propiedad de absorber el agua como si fuera una esponja.

Cuanto más estrecho sea el conducto capilar, mejor se absorberá el líquido. El fenómeno es producido por la tensión superficial del líquido que es mayor que el producido por la fuerza de **Van der Waals**, siendo ésta, la fuerza de atracción producida entre las moléculas del líquido. El líquido,

asciende por el tubo capilar hasta que las fuerzas actuantes, incluida la gravitatoria, se igualan.

Un hormigón refractario se comporta de forma capilar. Los poros se encuentran conectados entre sí y, asimismo se conectan con espacios interiores de mayor tamaño. Todo ello es a escala reducida y con las consiguientes variaciones dependiendo de la permeabilidad de cada hormigón

Cuando comenzamos a aplicar calor al revestimiento refractario, el agua contenida en los poros comienza a volatilizarse y a aspirar el agua de los conductos capilares en los cuales está contenida. Poco a poco el proceso se va ralentizando.

Presión de vapor

Aunque la presión de vapor en un revestimiento refractario con un contenido alto de humedad es prácticamente igual a la presión de vapor saturado, en ciertos revestimientos refractarios como, por ejemplo, los conformados por hormigones bajos en cemento, la presión del vapor es inferior a la presión de vapor saturado. Ello es debido a que entran en juego las fuerzas capilares además de la temperatura. Todo ello significa que la deshumidificación llevará más tiempo.

Calentamiento y curado

Una vez que el hormigón está seco, comienzan los procesos de calentamiento y curado entendiendo éstos como el seguimiento de una curva de temperatura hasta conseguir el segundo y definitivo endurecimiento del

hormigón. A este segundo endurecimiento se le denomina sinterizado.

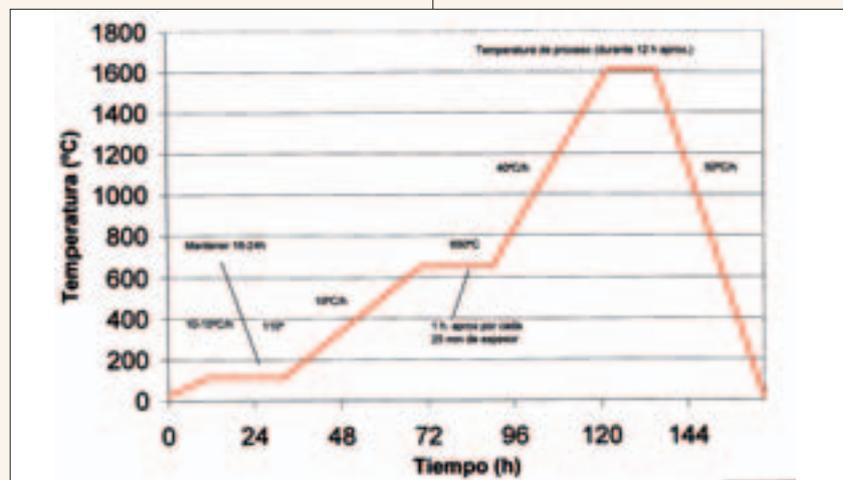
Estrés térmico

Como ya se ha indicado, un revestimiento de mampostería no debe ser secado pero sí sometido a un proceso de calentamiento no exento de problemas. Conviene por lo tanto en este punto realizar una pequeña reflexión sobre el comportamiento de un revestimiento ante los esfuerzos de carácter térmico.

Se define el estrés térmico como el cúmulo de esfuerzos producidos por efecto de la aplicación de calor. Podemos clasificarlos en tres grandes bloques. Cualquiera de ellos o una combinación puede suceder durante el secado, calentamiento o enfriamiento:

- Estrés interno en una sección determinada: Viene producido porque la distribución de la temperatura no es lineal. Desaparece en gran medida en las paredes planas cuando se alcanza un estado estacionario. En las paredes curvas no desaparece con un estado estacionario debido a la geometría de la misma. Por otra parte, la transmisión de la temperatura no es igual en el sentido longitudinal que en el transversal.

- Estrés por compresión: Viene producido como resultado de la falta de posibilidad de expansión de la pared o de zonas de la pared, por ejemplo, por un mal cálculo de la junta de dilatación y/o por la no suficiente absorción mecánica del propio material. Incluso en estado estacionario permanece presente.



Curva de secado

CARACTERÍSTICAS FÍSICO QUÍMICAS DE HORMIGONES TIPO HORAS DE SECADO

CARACTERÍSTICAS	Hormigón denso Convencional	Hormigón Tixotrópico	Hormigón Plástico	Hormigón Aislante	Hormigón aislante Autocolable
Temperatura máxima, °C	1.350	1.650	1.700	1.000	1.200
Materia prima	Chamota	Corindón	Bauxita	Vermiculita	Bauxita
Instalación	Vertido y vibrado	Vertido y vibrado	Apisonado	Vertido	Vertido
Enlace	Hidráulico	Hidráulico	Cerámico	Hidráulico	Agregados ligeros
Agua de amasado (l/100/kg)	12	5	no	70	35
Densidad (kg/dm ³)	1,95	2,85	2,5	0,8	1,2
Tamaño del grano (mm)	6	7	7	5	7
Resistencia a la compresión (N/mm ²) a 110 °C	60	125	12	1	10
Resistencia a la compresión (N/mm ²) a 1000 °C	35	138	22	2	8
Conductividad térmica a 500 °C (W/mK)	0,7	2,39	1,65	0,19	0,37
Tiempo de espera previo al calentamiento (h)	24	24	Ninguno	24	24
Gradiente térmico (°C/h) *	10	7	15	10	5

* Estos valores son medios para hormigones tipo y por lo tanto no deben tomarse como una especificación. Los incrementos de temperaturas corresponden al tramo existente tras una primera parada a 120 °C
Los gradientes dependerán asimismo del espesor del revestimiento y si este consta de una capa o es multicapa.
En cualquier caso este punto debe ser siempre indicado por el fabricante.

- Estrés producido por el vapor: Es el producido por el vapor de agua. Si el material no tiene la suficiente capacidad de evaporación, puede destruir el revestimiento y es peligroso si se añade a los dos anteriores.

Para evitarlo se deben seguir escrupulosamente las normas y curvas de secado y/o calentamiento facilitadas por el diseñador. Asimismo se puede aumentar físicamente la permeabilidad del revestimiento. En las masas plásticas se pueden efectuar orificios y en los hormigones vertidos se añaden fibras orgánicas que al fundirse con el calor dejan los espacios suficientes, para que el vapor pueda circular.

En cualquiera de los tres casos pueden aparecer en el revestimiento los siguientes signos:

- Fisuras individuales visibles cuando se emplean velocidades de calentamiento / enfriamiento excesivamente rápidos.

- Fisuras individuales invisibles inapreciables al ojo humano y/o interiores. Aparecen cuando se excede levemente la velocidad de calentamiento / enfriamiento.

- Fisuras múltiples que aparecen tras múltiples calentamientos / enfriamientos. A las primeras fisuras de poca profundidad se van añadiendo otras hasta llegar al revestimiento aislante y, por lo tanto, producen la destrucción del propio revestimiento.

Normas para un secado correcto

A continuación se reseñan una serie de normas para realizar correctamente un secado:

- Antes de iniciar el proceso de secado, se debe esperar al menos 24 horas tras el fraguado de los hormigones.

- Se debe tener en cuenta que la reacción de fraguado de los hormigones es una reacción exotérmica, calor de hidratación es más o menos elevado según la calidad del hormigón. En ciertos hormigones, se debe mantener (bien por riego o con paños húmedos) la humedad del material al menos durante 12 horas. De no hacerlo así, el agua se evaporará y el proceso quedará incompleto.

- Seguir a rajatabla la curva de secado del fabricante.

- Aunque antiguamente así se hacía, principalmente por la falta de medios, en la actualidad no es recomendable calentar la instalación con leña ya que no se alcanzan las temperaturas necesarias. No es posible controlar la llama, se producen zonas muertas y la madera rezuma compuestos químicos que pueden atacar a algún tipo de revestimiento refractario.

- Disponer tanto de un buen sistema de lectura y registro de temperaturas como de un buen equipo de regulación de temperatura. Los operarios deben disponer de la suficiente experiencia para establecer la correcta situación de los termopares.

- No es conveniente emplear el sistema de combustión de la unidad

sino quemadores específicos de secado. Estos mecheros tiene la posibilidad de regular combustible y comburente con muchísima mayor fiabilidad y exactitud que los quemadores convencionales de los que consta el horno y que están diseñados bajo un punto de vista de equilibrio energético. Por otra parte, los quemadores de secado tienen mayor capacidad de generación de caudal de aire caliente.

- Evitar *zonas muertas*, es decir, zonas en las cuales no llegue el suficiente aire caliente y por lo tanto que se produzcan diferencias apreciables de temperatura entre las diferentes partes del horno. Se debe actuar con los mecheros de forma consecuyente y aplicar siempre la curva al punto mas caliente ya que, de aplicarla al frío, puede haber peligro de explosión.

- Prestar atención especial al momento en que se enciende el sistema de combustión de la unidad ya que la temperatura puede subir bruscamente.

- Cuando existan dos capas de hormigones, hay que tener en cuenta que la curva debe ser aumentada.

- Y, por último (y lo más importante), **jamás se debe tratar de ganar el tiempo perdido durante la reparación del horno acortando el tiempo del secado/calentamiento**. Es un error común que se acentúa con la confianza. Como mínimo, puede dar lugar a la aparición de grietas y, de una manera no poco improbable, a la destrucción del revestimiento. ■