

SECADO CONTROLADO DE REFRACTARIOS:

UNA ETAPA CRÍTICA PARA PREVENIR FALLAS Y MEJORAR LA DISPONIBILIDAD DE EQUIPOS TÉRMICOS

(Gentileza Hotwork Internacional South America SA, Autor: Martín Donadío)

RESUMEN

El secado del refractario es una etapa crítica en la puesta en marcha de hornos, cucharas, canales de moldeo y otros equipos térmicos. Aunque suele considerarse preliminar, condiciona la seguridad, la vida útil del revestimiento y la disponibilidad productiva.

Este trabajo explica por qué el secado controlado es imprescindible y compara las metodologías disponibles según el equipo, el diseño refractario, la curva térmica y los riesgos operativos.

1.INTRODUCCION

Los refractarios monolíticos contienen agregados, finos, ligantes, aditivos y agua de colocación. Tras la instalación requieren curado y luego secado controlado, etapas que determinan el desarrollo de resistencia y la evacuación de humedad.

La calidad final también depende del primer calentamiento. Una curva prescripta pierde eficacia cuando la temperatura real se aparta de las rampas y mesetas, especialmente por calentamientos localizados o inestabilidad a baja potencia.

La comparación entre quemadores de proceso y sistemas convectivos considera control de temperatura, evacuación de humedad, uniformidad térmica y condiciones operativas.

2.- CURADO, SECADO Y ESTADO DEL AGUA

2.1 Curado y desarrollo de resistencia

El curado precede al secado en materiales ligados hidráulicamente. Durante esta etapa se forman fases hidratadas y se desarrolla la resistencia necesaria para soportar el primer calentamiento; un curado insuficiente deja una matriz frágil.

Los ligantes de aluminato de calcio, alúmina hidratable, fosfatos y otros sistemas presentan transformaciones diferentes. Por ello, el programa debe seguir las recomendaciones del fabricante.

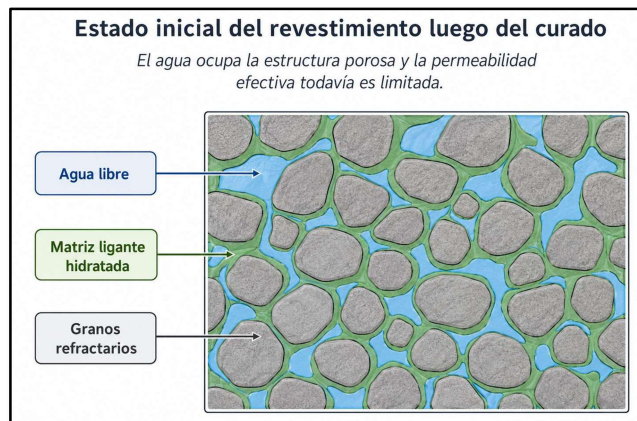


Figura 1. Estado inicial del revestimiento luego del curado. Esquema conceptual del sistema poroso, con identificación de agua libre, matriz ligante hidratada y granos refractarios.

2.2 Agua libre y agua asociada a fases hidratadas

Luego del curado permanece agua en la estructura porosa. Al comenzar el secado, el agua libre se evapora; el vapor migra hacia la cara caliente y el líquido puede desplazarse hacia zonas más frías. A mayor temperatura se libera agua asociada a fases hidratadas.

Los colables pueden incorporar una fracción significativa de agua de mezcla. En revestimientos de gran masa, esa humedad debe migrar, evaporarse y abandonar el sistema sin comprometer el material.

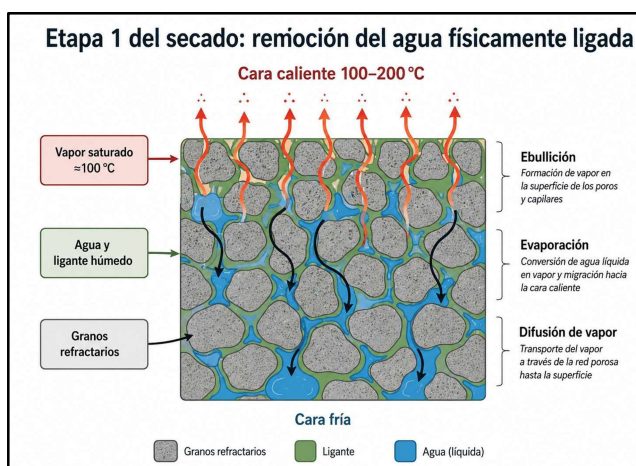


Figura 2. Remoción inicial del agua físicamente ligada. Migración de vapor hacia la cara caliente y desplazamiento de agua líquida hacia zonas relativamente más frías.

3. ¿QUÉ MÉTODO DE SECADO ES EL ADECUADO PARA EXTRAER EL AGUA Y LA HUMEDAD?

El método adecuado debe combinar temperatura controlada, circulación de gases y vías efectivas de escape. Así se limita el gradiente térmico y se evita que la generación de vapor supere la capacidad de evacuación del material.

La selección debe considerar los mecanismos de daño, la distribución del calor y la capacidad de los quemadores para operar establemente en los rangos bajos de la curva.

3.1 Transferencia de calor y control

Una llama localizada puede sobrecalentar un sector mientras otros permanecen fríos. Una distribución convectiva bien diseñada reduce gradientes y mejora la uniformidad; por eso deben evaluarse la fuente de calor y la circulación interna.

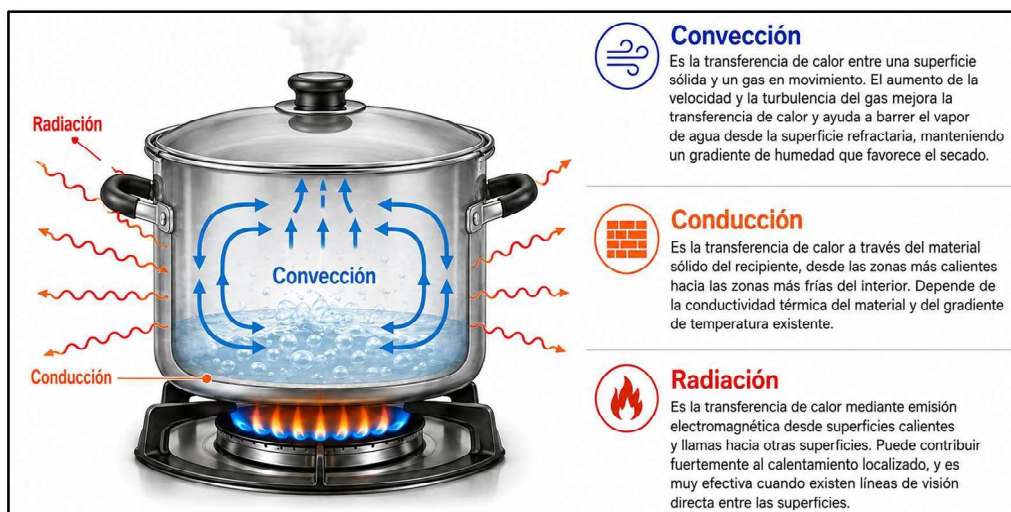
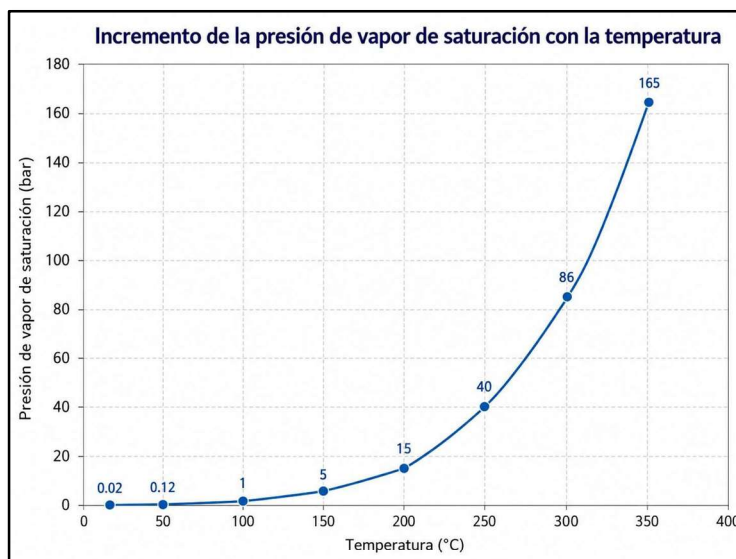


Figura 3. Mecanismos de transferencia de calor durante el secado. La conducción, la convección y la radiación actúan simultáneamente, aunque la circulación convectiva resulta esencial para distribuir el calor y remover humedad.

3.2 Mecanismos de daño durante el secado

3.2.1 Presión de poro, permeabilidad y frente de secado

Durante el calentamiento coinciden transferencia de calor, migración de agua, evaporación, flujo de vapor y transformaciones del ligante. La presión interna aumenta cuando el vapor se genera más rápido de lo que puede escapar por la estructura porosa.



*Figura 4.
Incremento de la
presión de vapor
de saturación con
la temperatura.*

La presión de vapor de saturación aumenta de forma no lineal con la temperatura. La Figura 4 no representa la presión efectiva dentro del refractario, pero ilustra el potencial del fenómeno cuando el vapor queda confinado.

3.2.2 Consecuencias sobre el revestimiento

Si la presión de poro y las tensiones térmicas superan la resistencia del material pueden aparecer microfisuras, delaminación, descascaramiento o desprendimiento explosivo. Aun sin falla inmediata, la microfisuración acelera erosión, infiltración y desgaste.

El riesgo aumenta con gran espesor, baja permeabilidad, exceso de agua, curado deficiente, ventilación insuficiente, calentamiento unilateral y diferencias entre superficie e interior.

3.3 Quemadores de proceso

Los quemadores de proceso responden a las necesidades productivas. Pueden usarse para secado cuando ofrecen modulación, llama adecuada, buena distribución e instrumentación representativa; estas condiciones deben verificarse.

Las principales limitaciones se presentan cuando el caudal de aire y la potencia se reducen simultáneamente, el quemador trabaja próximo a su límite mínimo de estabilidad o la llama incide de forma directa sobre el revestimiento. En estas condiciones pueden generarse puntos calientes, oscilaciones en la combustión y mediciones que no reflejen adecuadamente el comportamiento térmico del sistema.

3.4 Sistema convectivo

El sistema convectivo utiliza convección forzada: una corriente de gas caliente, controlada y de alto caudal. Su principal ventaja es mantener una intensa circulación aun a baja temperatura, cuando el control es más sensible.

La velocidad del gas mejora el intercambio térmico, reduce zonas estancadas y conduce la humedad hacia las salidas. En geometrías complejas se emplean varios puntos de inyección y termopares para balancear la distribución.

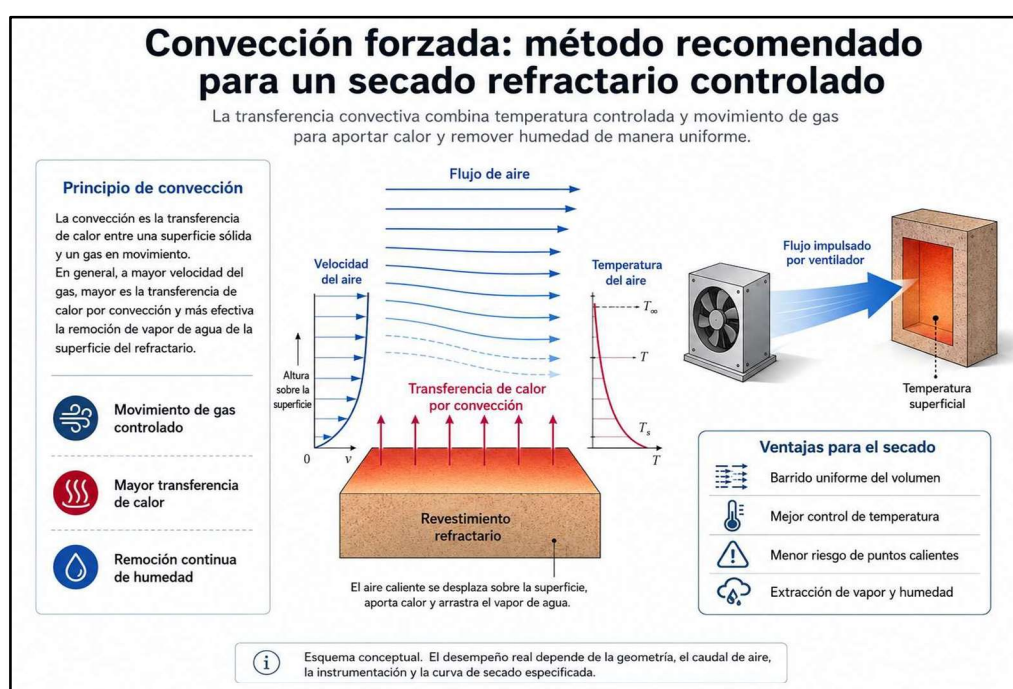


Figura 5. Sistema convectivo aplicado al secado refractario. La convección forzada y el movimiento de gases sobre la superficie mejoran la transferencia de calor y favorecen la remoción continua de humedad y vapor.

Tras remover la humedad, el calentamiento gradual favorece las transformaciones del ligante y una sinterización homogénea, consolidando la matriz sin imponer diferencias excesivas entre superficie e interior.

El sistema convectivo tampoco garantiza por sí solo uniformidad: la ubicación de inyecciones y escapes, la estanqueidad, el balance de caudales y los termopares siguen siendo decisivos.

4. CASO PRÁCTICO: EXTENSIÓN DE LA VIDA ÚTIL DEL REVESTIMIENTO EN HORNO ROTATIVO GRATE-KILN

En una importante empresa sueca dedicada a la producción de pellets de mineral de hierro, el proceso de endurecimiento térmico se llevaba adelante mediante hornos rotativos integrados en una línea tipo Grate-Kiln,

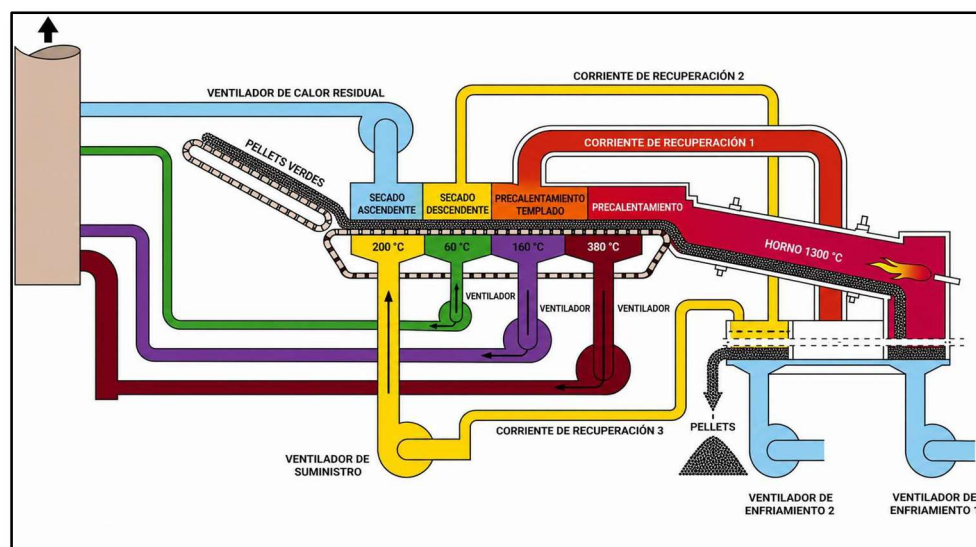


Figura 6. Esquema general del proceso Grate-Kiln. Los pellets verdes atraviesan las etapas de secado, precalentamiento, induración en el horno rotativo y enfriamiento, con recuperación y recirculación de gases calientes.

Para el revestimiento refractario del horno rotativo, se esperaba una vida útil del orden de dos años. Sin embargo, en la práctica, el cliente se veía obligado a detener la operación luego de aproximadamente seis meses para realizar reparaciones sobre los ladrillos refractarios.

Frente a esta situación, se evaluaron distintas hipótesis y se implementaron acciones correctivas. En primer lugar, se reemplazó al proveedor del material refractario, pero el problema persistió. Posteriormente, se cambió también al proveedor encargado de la instalación del revestimiento, sin obtener mejoras significativas. En consecuencia, quedó en evidencia que ni la calidad del material ni la calidad de la instalación explicaban por sí solas la falla prematura.

El factor que se mantenía constante era el método de calentamiento inicial. El secado y calentamiento del revestimiento se realizaban utilizando el propio quemador de proceso del horno, consistente en una lanza alimentada con combustible líquido. Para intentar seguir la curva de calentamiento, el sistema

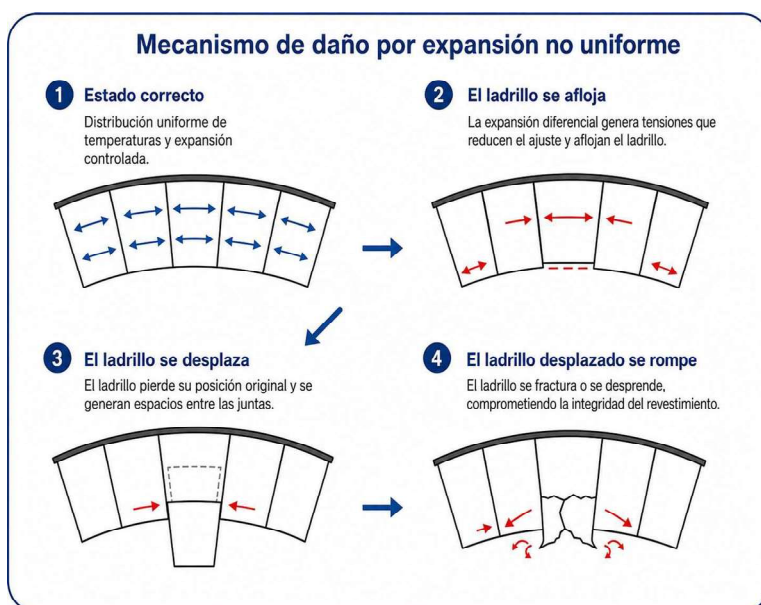
operaba mediante una lógica de encendido y apagado (on/off), incrementando progresivamente la temperatura.

Sin embargo, el comportamiento real del sistema difería sustancialmente de la curva teórica. Durante la evaluación se detectó que, en la primera sección del horno, y especialmente en la parte superior, se alcanzaban rápidamente temperaturas cercanas a 900 °C. Es decir, mientras el promedio térmico del sistema todavía indicaba una etapa inicial del calentamiento, ya existían zonas sometidas a sobretemperaturas severas.

Este calentamiento localizado producía una expansión descontrolada y no uniforme de los ladrillos refractarios, generando tensiones excesivas, pérdida de ajuste, desplazamientos y roturas prematuras. Como resultado, el daño observado no respondía a una deficiencia intrínseca del refractario, sino a la forma en que el calor era aportado durante el primer calentamiento.

A partir de este diagnóstico, se programó un servicio de secado y calentamiento controlado mediante sistema convectivo, con un costo aproximado de USD 150.000.

La propuesta consistió en reemplazar el aporte térmico directo y localizado del quemador de proceso por una circulación controlada de gases calientes, capaz de distribuir el calor de forma más uniforme, limitar los gradientes térmicos y acompañar la expansión del revestimiento de manera gradual y controlada.



*Figura 7.
Mecanismo de
daño por
expansión
no uniforme.
La expansión
diferencial reduce
el ajuste de los
ladrillos, favorece
su desplazamiento y
puede culminar
en fractura o
desprendimiento.*

El impacto económico del servicio resultaba claramente favorable: considerando el valor de producción involucrado y el costo asociado a una parada prematura, el retorno de la inversión (ROI) equivalía a apenas 15 minutos de operación.

Tras la implementación del sistema convectivo, el revestimiento refractario logró alcanzar la vida útil esperada de dos años, eliminando las reparaciones prematuras que anteriormente debían realizarse a los seis meses.

5.- CONCLUSIONES

El secado controlado preserva la integridad del revestimiento. Su eficacia depende de cómo se aporta y distribuye el calor y de cómo se evacúan agua y vapor, no solo de la temperatura final.

1. El riesgo principal aparece cuando el vapor se genera más rápido de lo que puede migrar y escapar; por eso deben respetarse rampas, mesetas y recomendaciones del fabricante.
2. La uniformidad térmica es tan importante como la temperatura: puntos calientes y gradientes pueden producir microfisuración, delaminación o desprendimientos.
3. Los quemadores de proceso solo son aptos si demuestran modulación, estabilidad a baja temperatura, circulación suficiente e instrumentación representativa.
4. El sistema convectivo combina alto movimiento de gases con temperatura controlada, mejora el intercambio y favorece la extracción continua de humedad.
5. Un diseño correcto reduce puntos calientes, mejora el seguimiento de la curva y homogeneiza la respuesta entre mediciones.
6. La ingeniería de aplicación —inyecciones, salidas, caudales, cierres y termopares— es decisiva.
7. Al limitar daños tempranos, el secado mejora la seguridad, la confiabilidad y la vida útil; además favorece transformaciones del ligante y sinterizaciones homogéneas.

En síntesis, el método adecuado debe controlar simultáneamente temperatura, distribución térmica y circulación de gases. Cuando los quemadores de proceso no aseguran esas condiciones, el sistema convectivo es la alternativa más robusta para un secado completo, uniforme y controlado.

REFERENCIAS

1. *Material técnico interno utilizado como antecedente comparativo para secado y calentamiento refractario, Hotwok International – Egnach, Suiza 2026.*
2. *HarbisonWalker International. Curing and Dryout of Refractories. Technical guidance, 2020.*
3. *HarbisonWalker International. Curing and Dryout General Guidelines – Field Use – One Sided Dryout. Technical schedule and safety notes, rev. 2013.*