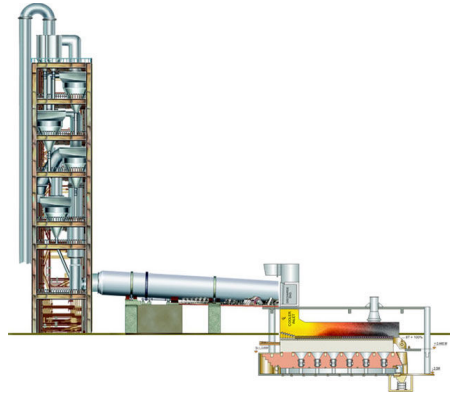


# EL HORNO CEMENTERO DEL SIGLO XXI



**El horno cementero ha evolucionado más en los últimos 20 años que en todo el resto de su historia, respondiendo a las exigencias de optimización de costos operativos, aprovechando la apertura tecnológica propiciada por los modernos sistemas de comunicación y preparándose para cumplir el rol que le ha sido reservado como incinerador de basura del futuro.**

**El futuro ha llegado y el horno cementero del Siglo XXI está preparado para asumir el reto de constituir la solución ecológica de muchos efluentes contaminantes y peligrosos, favoreciendo al mismo tiempo sus costos energéticos.**

**Las complicaciones creadas artificialmente por la tecnología desarrollada por los fabricantes de equipo para favorecer sus intereses ha sido totalmente superada y todo ha quedado definido en términos técnicos claros y precisos, en el siglo de la simplificación tecnológica.**

**En este artículo definimos la tecnología que debe aplicarse en cualquier sistema de producción de clínker, sin ningún tipo de influencia comercial y con la claridad de conceptos que resulta apropiada para que los ingenieros y técnicos de plantas cementeras nos entiendan, participando activamente es esta revolución del horno cementero hacia su optimización funcional, energética y ecológica.**

Para facilitar nuevos proyectos con menores costos de inversión y mayores niveles de productividad y eficiencia energética, así como la adecuación de las plantas cementeras existentes al modelo propuesto, hemos seleccionado 10 parámetros que nos permiten caracterizar el sistema de producción de clínker del siglo XXI :

## 1. CRUDO DE ALIMENTACIÓN

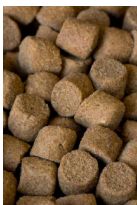


Las características fisicoquímicas del crudo ya no deben introducir problemas al proceso; siempre existirá tiempo suficiente y justificación económica para eliminarlos en las operaciones precedentes, para disponer de un crudo de alimentación teóricamente perfecto en cuanto a composición química y análisis granulométrico.

Respecto a componentes químicos principales, los módulos químicos obedecerán a los criterios tradicionales vinculados a los tipos de clínker producidos, el adecuado desarrollo de los procesos de nodulización-clinkerización y la estabilidad de la costra protectora del refractario en la zona crítica del horno. En cuanto a componentes secundarios, respetando al magnesio, el quinto elemento, el módulo de sulfatos - álcalis, tendrá que mantenerse entre 0.8 y 1.2; dentro de estos límites siempre resultará posible evitar la formación de pegaduras que ocasionen atoros en los ciclones y anillos en el horno, regulando adecuadamente las condiciones operativas. Los cloruros no resultan aceptable en un nivel mayor al 0.01%, debiendo si es necesario “lavar” el crudo si resultase necesario.

En cuanto a la distribución granulométrica, controlada con granulómetros Laser, deben mantener una composición con menos de 10% de partículas menores a 5 micras y un 20% máximo de partículas mayores a 75 micras (equivalentes a residuo en malla 200 ASTM).

## 2. PELLETIZACIÓN DEL POLVO RECUPERADO



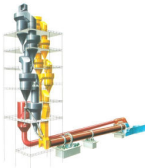
Las partículas menores a 5 micras no pueden ser retenidas por separadores estáticos, por lo cual forman un círculo vicioso entre la última etapa de cicloneo del precalentador y el filtro. Resulta relativamente fácil eliminar esta condición y sus graves consecuencias sobre la capacidad de producción del sistema, la relación crudo – clínker y las posibilidades de cumplir los niveles de control ambiental en cuanto a particulado. El Polvo recuperado no debe recircularse al precalentador sino conducirse a un sistema de pelletización que permita consolidarlo en pequeños pellets de tamaño y características adecuadas para introducirse

por la cámara de enlace, integrándose al material en proceso que también formará nódulos en la zona correspondiente del horno, mientras los pellets terminan de descarboxarse, antes de clinkerizarse todo el conjunto.

Los sistemas de pelletización por extrusión y compactación, utilizando una pequeña cantidad de Fuel Oil como aglutinante, nos han producido los mejores resultados.

La explicación de porque no se ha implementado una mejora tan importante y simple solamente se explica por la conveniencia del círculo vicioso mencionado para los intereses de los fabricantes de filtros y precalentadores con mayor número de etapas.

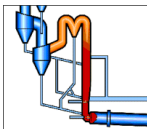
### **3. PRECALENTADOR EN SUSPENSIÓN DE GASES**



La eliminación del círculo vicioso formado por el polvo del filtro permite concebir un trabajo eficiente de precalentadores de 4 etapas de intercambio térmico, con una primera etapa formada por ciclones gemelos y cámara de precalcificación. Existen varios arreglos de diseño y dimensionamiento de precalentadores, pero todos se basan en propiciar el mayor tiempo de contacto entre los gases calientes circulando con el polvo crudo en suspensión. El quinto ciclón ya no resulta necesario y el sexto nunca se ha justificado.

El control de las curvas de presión (tiro) y temperatura permitirá un efectivo desarrollo del intercambio térmico previsto en el diseño. El material debe ingresar a la cámara de precalcificación a 800°C para asegurar una descarboxación instantánea.

### **4. CÁMARA DE PRECALCIFICACIÓN**



El formidable concepto de la precalcificación permite hacer coincidir en el espacio adecuado la simbiosis perfecta entre la combustión exotérmica y calcificación fuertemente endotérmica. Al conseguir que las partículas de crudo se mantengan en suspensión en el interior de la llama, todo el calor liberado se insume en la descarboxación, por lo cual resultarán de fundamental importancia los puntos de llegada al reactor del combustible, el aire terciario y el polvo crudo procedente de la descarga del tercer ciclón.

La eficiencia de este proceso dependerá del diseño del reactor y de la adecuada operación de la mecánica de fluidos en el precalcinador; para asegurar el nivel de descarbonatación que permita aliviar el trabajo del horno (95%), asegurando la máxima productividad y estabilidad operativa se instalan los alargamientos del ducto que conduce los gases y material hacia el cuarto ciclón (cuellos de ganso y cisne según la dimensión), pero con un adecuado manejo de la dinámica de fluidos en el reactor, disponiendo de los combustibles más adecuados (gas natural) no resultan necesarios, considerando que en el último ciclón también se dispone de tiempo de reacción antes de que se separen gases y material, ascendiendo los primeros por el tubo de inmersión y cayendo el material hacia el interior del horno. Todos los ciclones deben tener tubo de inmersión y placas de distribución del crudo en la corriente de gases.

Todos los sistemas de producción de Clínter deben disponer de cámaras de precalcinación.

## 5. EL HORNO CEMENTERO



La precalcinación permite al horno cumplir las operaciones y procesos que le corresponden con diseños más adecuados y la mayor eficiencia. En los primeros hornos largos de vía húmeda se realizaban todas las operaciones y procesos de fabricación : secado, calentamiento, transporte, descarbonatación, nosulización, clinkerización y enfriamiento, resultando muy ineficiente para algunos, por ser un pésimo intercambiador de calor.

En el Horno del Siglo XXI casi exclusivamente se desarrollan el calentamiento para formación de la fase líquida que permita la nodulización, la clinkerización en el interior de los nódulos y el enfriamiento del clínter para solidificar la fase líquida y consolidar la calidad del clínter producido.

Desde los hornos super largos se llegó a los hornos super cortos, pero ambos extremos son malos; el horno actual debe ser suficientemente largo para asegurar que se produzca la nodulización antes de la clinkerización. La zona de enfriamiento dependerá de la posición del quemador y adecuada forma de llama.

Resulta necesario destacar la importancia del diseño del Cabezal del Horno sobre la estabilidad del sistema. En este punto se debe producir un equilibrio vectorial entre la fuerza que induce al aire de enfriamiento hacia el interior del horno y la que los intenta eliminar por la chimenea del enfriador como aire excedente. El correcto diseño del cabezal debe permitir efectuar esta regulación, manteniendo siempre estable la presión mínima necesaria para poner a disposición del aire primario del quemador, la disponibilidad de suficiente aire secundario para suministrar el oxígeno requerido para la combustión.

## 6. QUEMADOR PRINCIPAL



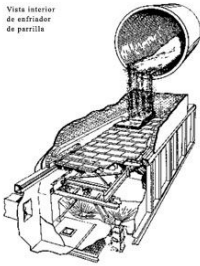
La evolución del diseño del quemador principal ha sufrido muchos cambios desde los iniciales simples tubos que inyectaban carbón transportado por suficiente aire para la combustión desde la molienda directa, hasta sufrir diferentes modificaciones orientadas a proporcionar mayor potencia térmica con cada vez menor proporción de aire primario en sucesivas generaciones de quemadores, siempre problemáticos e ineficientes. Estas condiciones resultaban muy complicadas para la estabilidad operativa y fatales para los refractarios y toda la instalación, representando problemas operativos para el sistema pero grandes negocios para los fabricantes de ladrillos, virolas y proveedores de sistemas para sobrellevar y reparar sus consecuencias.

En realidad siempre se ha necesitado un solo tipo de llama en cualquier tipo de horno. La más corta y caliente que resulte posible sin dañar el refractario, permitiendo que se produzca la nodulización del material antes de clinkerizar. La forma cónica de la llama obligaba a soltarla (quitarle potencia) para evitar el impacto sobre la costra, alargándola hacia el interior del horno, produciendo un alargamiento de la zona de clinkerización y dando lugar al clínker polvoso y formación de grandes cristales difíciles de moler y lentos para hidratarse en el cemento final.

La llama cónica hueca, permitiendo que la llama forme un soplete, cerrándose en lugar de abrirse e hinchándose en lugar de ancharse ha resuelto todos los problemas y eliminado todos los factores de peligro. Al poder concentrar mayor calor en la zona crítica y mantener un adecuado control sobre la forma más conveniente para disponer de una llama potente, caliente y eficiente, además de permitir la nodulización adecuada en el horno favorece la transferencia de calor por radiación, alarga la vida de costra y refractario hasta niveles asintóticos. Las ventajas de disponer de una llama cónica hueca en el horno cementero resulta tan importante que una instalación sin esta condición no podría sobrevivir.

Al haber llegado a este punto en cuanto a características de la llama el diseño de quemadores no se complica, sino por el contrario se simplifica totalmente, habiendo llegado a definir con suficiente claridad solamente dos parámetros que permiten establecer diseños adecuados: Potencia Específica en Newtons/Gcal y Swirl (fuerza rotacional) en porcentaje. Todos los quemadores, de cualquier marca y procedencia, se basan en los mismos principios de funcionamiento y criterios de diseño.

## 7. ENFRIADOR DE PARRILLA



El proceso de clinkerización se produce a temperaturas cercanas a los 1300°C y en el interior del horno solamente debe producirse el enfriamiento suficiente para solidificar la fase líquida, por lo cual el material abandona el horno a unos 1200°C, debiendo enfriarse por tres razones fundamentales: recuperar el calor sensible contenido en el clinker, consolidar la calidad final del producto y proteger los sistemas de transporte y manipuleo posterior del clinker hasta convertirse en cemento.

La evolución del diseño de enfriadores también ha formado una larga historia, pasando por los tubulares, los enfriadores de satélites, y diferentes modelos de parrillas con diversas variaciones de los sistemas de accionamiento y control operativo.

La simplificación de los conceptos de la combustión que ha producido la Teoría Inorgánica de la Combustión y la conclusión final de la evolución de llamas y quemadores en la llama cónica hueca, han determinado condiciones de composición granulométrica en el clinker producido que permiten asegurar que siempre resultará conveniente utilizar un enfriador de parrilla, disponiendo de diferentes modelos que permiten efectuar la máxima recuperación de calor, consolidar la calidad del clinker con un enfriamiento violento y proteger los equipos de transporte, entregando el material en condiciones de ser tomado con la mano sin quemarse (60 °C), lo que disminuye las inversiones en materiales y dispositivos/ mecanismos de seguridad.

## 8. COMBUSTIBLES ALTERNOS EN EL QUEMADOR PRINCIPAL



La simplificación del diseño del quemador y la formación de llama cónica hueca favorecen totalmente la incorporación de combustibles líquidos o pulverizados alternos, permitiendo al horno cementero cumplir su rol de incinerador de residuos combustibles. En este sentido la combustión no representa un factor de contaminación ambiental sino todo lo contrario; no es el problema sino la solución.

Todos los materiales combustibles conformados principalmente por carbono e hidrógeno, siempre se disocian antes de reaccionar en forma individual con el oxígeno, formando  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ ; los materiales orgánicos tóxicos y peligrosos, al combustionar se convertirán en estos mismos componentes inertes, produciendo calor útil y eliminando totalmente sus características tóxicas o peligrosas, pudiendo persistir las provenientes de otros componentes presentes, tales como cloruros, arsénico, cianuro, fluor, etc.

Los combustibles alternos pueden incorporarse en el flujo de fuel oil o atomizarse en forma individual o combinada con otros combustibles. El horno cementero puede absorber una gran proporción de impurezas, pero se debe evitar la introducción al horno de elementos demasiado volátiles, tales como los cloruros, que se volatilicen en la zona crítica y se depositen en las zonas frías del sistema, formando ciclos que resultan fatales para el desarrollo del proceso y las condiciones operativas del sistema.

Los aceites y residuos industriales que tengan cloruros en su composición deben procesarse en lavadoras centrífugas que los eliminarán aprovechando su solubilidad en agua.

## 9. COMBUSTIBLES ALTERNOS EN EL HORNO



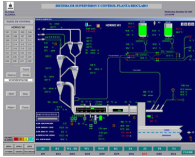
En sistemas provistos de precalcinación se puede introducir en el horno, por la cámara de enlace preferiblemente, materiales sólidos combustibles que se quemen progresivamente al avanzar con el material en proceso, con impurezas que puedan ser incorporadas al clínker sin afectar sus características o eliminadas con los gases si resultan volatilizables sin que vuelvan a condensarse o sublimizarse antes de abandonar el sistema,

Un caso típico que demuestra la capacidad del horno cementero para cumplir el papel de incinerador de basura, es precisamente su capacidad para aprovechar residuos urbanos, debidamente acondicionados. La basura urbana está conformada por una tercera parte de materiales orgánicos combustibles, una tercera parte de agua, el análisis químico del resto podría sorprendernos por ser precisamente Calcio, Sílice, Alúmina y Fierro, los 4 componentes principales del cemento, pero ello no es una afortunada casualidad sino una condición perfectamente explicable por que tales elementos son precisamente los más comunes en la naturaleza, después del oxígeno, hidrógeno y nitrógeno, que también están presentes en los combustibles y el aire.

Todos los combustibles que puedan atomizarse deben introducirse por el quemador principal; los materiales que se introduzcan en formas más voluminosas por la cámara de enlace deben también procesarse para facilitar su combustión, eliminación o incorporación al clínker. Se debe evitar confundir la función de incinerador de basura del horno con considerarlo un basurero; la diferencia la establece el hecho de que la utilización de materiales alternos y residuos combustibles en los hornos no debe afectar

significativamente el proceso, la calidad del clínker producido y los niveles de limpieza de emisiones a la atmósfera.

## 10. AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL OPERATIVO



Los sistemas de control automatizado operativo inteligente siempre han procurado eliminar la operación manual de los parámetros del sistema, pero aún en los sistemas más eficientes han fracasado, debido principalmente a la dependencia de un número demasiado alto de parámetros operativos variables que deben regularse de acuerdo a objetivos establecidos.

La interdependencia mutua entre estos parámetros variables y entre asociaciones de ellos, determina niveles de complejidad operativo que requieren de análisis racional y criterio para tomar decisiones y efectuar cambios. La simplificación que permiten alcanzar en el siglo XXI los puntos tratados en los puntos precedentes, permitirán favorecer totalmente los objetivos de automatización y aplicación de sistemas inteligentes, al reducir radicalmente los parámetros variables y sus rangos de variación.

El Horno cementero del Siglo XXI ya podría ser operado por un robot, si aplicamos la tecnología recomendada, basada en la simplificación necesaria, conveniente y adecuada; aunque parezca contradictorio, el factor de mayor importancia para lograrlo será el nivel de tecnificación del personal responsable de su funcionamiento y control operativo.

**El horno cementero del siglo XXI se orienta hacia la perfección. Se han eliminado todos los tabúes y descorrido todos los velos que limitaban el acceso a la tecnología, mostrando en forma clara, precisa y directa los equipos que se debe tener y la forma en que se debe operar para conseguir la optimización integral del sistema, incorporando combustibles alternos y residuos tóxicos, cumpliendo su rol de incinerador de basura del futuro, sin que ello signifique convertirlo en un basurero.**