

Universidad de **Cádiz**

Proyectos de fin de carrera de **Ingeniería Química**

Facultad: CIENCIAS

Titulación: INGENIERÍA QUÍMICA

Titulo: Dimensionamiento de un horno rotatorio para la producción de clinker de cemento Portland

Autora: Myriam RAMAYO RAMOS

Fecha: Febrero 2008





El presente proyecto tiene como objetivo abordar el dimensionamiento de un horno rotatorio para la producción de clinker de cemento Portland mediante vía seca. Éste será alimentado con una corriente de crudo de 3700 T/día, previamente calentada por un conjunto formado por un intercambiador de ciclones y un precalcinador.

El horno rotatorio empleado para la producción de clinker de cemento Portland, como unidad central del proceso, no se encuentra aislado, sino que se encuentra interconectado dentro del engranaje de operaciones básicas y unidades existentes en una planta de producción de cemento Portland.

La alimentación del horno rotatorio hasta llegar a este punto, ha sufrido una serie de transformaciones físicas, químicas y térmicas que serán cruciales en la etapa de cocción dentro del horno rotatorio, y de cuya eficacia dependerá el buen funcionamiento del mismo.

El horno rotatorio, objeto de dimensionamiento en este proyecto, se encuentra sujeto a las condiciones de operación siguientes:

El crudo procedente del molino a 70° C pasa a un intercambiador de ciclones de cuatro etapas donde es calentado mediante los gases de combustión generados en el horno rotatorio que se encuentran a 340° C.

Una vez que el material ha pasado por la última etapa del intercambiador de ciclones, se introduce en un precalcinador antes de constituir la alimentación del horno rotatorio. En este precalcinador, el material crudo es descarbonatado y calcinado casi en su totalidad mediante corriente cruzada con los gases del horno a 1500° C.

Posteriormente, el crudo descarbonatado llega al tubo del horno rotatorio donde se alcanzan las temperaturas lo suficientemente elevadas como para que se lleven a cabo las reacciones de sinterización responsables de la formación del clinker. En el horno rotatorio, el material alcanza la temperatura de 1450° C y los gases de combustión una temperatura de 2000° C

---

Finalmente, el clinker es enfriado en un enfriador de parrilla utilizando una corriente de aire de 22° C, hasta que la temperatura de éste desciende hasta unos 140° C.

Hace ahora más de cien años, se puso en funcionamiento el primer horno rotatorio fiable para la cocción del clinker, un acontecimiento que sin duda revolucionó la fabricación de cemento. El horno rotativo o rotatorio para la cocción de cemento fue inventado en 1884 por el inglés *Frederik Ransome*, y perfeccionado posteriormente EE.UU. por *Thomas Edison* en 1903. *Ransome* patentó su invención, primero en Inglaterra, patente inglesa nº 5442 del 2 de mayo de 1885 con el título: “*Perfeccionamiento en la industria del cemento*”.

El horno rotatorio revolucionó de tal modo la industria del cemento que puede considerarse la invención más importante en fabricación desde la introducción de los molinos de bolas. Además es uno de los tipos más importantes de los hornos de proceso porque es probablemente el más empleado por las más diversas industrias.

En la fabricación de cemento, la cal, la dolomita y la magnesia, se emplean centenares de estos hornos. Otros muchos se utilizan para deshidratar, tostar o calcinar materiales como bauxita, alúmina, minerales de hierro, cromita y fosfatos. También se utilizan para calcinar litopón y pigmentos de titanio, para regenerar adsorbentes, para producir sulfuros de bario y sodio, para descomponer el sulfato ferroso y para desfluorar los fosfatos naturales. Actualmente el clinker de cemento da el mayor tonelaje de los materiales tratados en hornos rotatorios, constituyendo la parte central del proceso en sí.

Además de ser empleados para las operaciones a elevada temperatura que se acaban de indicar, también se utilizan como secadores a temperaturas bajas en muchas otras industrias. Y aunque el diseño de un horno rotatorio es algo laborioso, su aplicación resulta útil en aquellos procesos en los que se requiere tiempos de residencia relativamente largos, un calentamiento directo o una operación continua por la escala del proceso.

---

Una razón para su intensa aplicación es su adaptabilidad a las operaciones continuas; pueden construirse para capacidades muy pequeñas o muy grandes. Por otro lado, cualquier tamaño dado tiene una flexibilidad considerable cuando está equipado para poder variar la capacidad, la temperatura y el periodo de tratamiento térmico.

Es uno de los pocos tipos de hornos de proceso sobre los cuales han intentado estudios desde el punto de vista de la ingeniería química.

---

## ÍNDICE DE LA MEMORIA DESCRIPTIVA

<b>CAPÍTULO I. OBJETO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO</b>	pág.1.
1. OBJETO DEL PROYECTO	pág.1.
2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	pág.1.
<b>CAPÍTULO II. GENERALIDADES</b>	pág.4.
1. CLINKER Y CEMENTO PORTLAND. DEFINICIONES	pág.4.
2. EL CEMENTO PORTLAND EN LA HISTORIA	pág.4.
<b>CAPÍTULO III. MATERIAS PRIMAS EN LA ELABORACIÓN DEL CLINKER DEL CEMENTO PORTLAND</b>	pág.6.
1. MATERIA PRIMA IDEAL	pág.6.
1.1. COMPONENTE CALCÁREO	pág.6.
1.1.1. CALIZA	pág.6.
1.1.2. CRETA	pág.7.
1.1.3. MARGA	pág.7.
1.2. COMPONENTE ARCILLOSO	pág.8.
2. MATERIALES SECUNDARIOS EN LA FORMULACIÓN DEL CRUDO: COMPONENTES CORRECTORES	pág.8.
3. SELECCIÓN DE MATERIAS PRIMAS	pág.10.
3.1. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS	pág.10.
3.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	pág.10.
3.3. CARACTERÍSTICAS ECONÓMICAS	pág.11.
<b>CAPÍTULO IV. QUÍMICA DESCRIPTIVA DEL CEMENTO PORTLAND</b>	pág.12.
1. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL CEMENTO PORTLAND	pág.12.
1.1. COMPONENTES PRINCIPALES	pág.12.
1.2. COMPONENTES SECUNDARIOS	pág.15.
2. REACCIONES EN LA COCCIÓN DEL CLINKER DE CEMENTO PORTLAND	pág.17.
2.1. IMPORTANCIA DE LA FASE LÍQUIDA	pág.21.
2.2. PROCESOS QUÍMICOS, MINERALÓGICOS Y FÍSICOS EN LA COCCIÓN DE CEMENTO	pág.23.

---

<b>CAPÍTULO V. VIABILIDAD TECNOLÓGICA DEL PROCESO</b>	pág.28.
1. VÍAS DE PRODUCCIÓN	pág.28.
1.1. PROCESO VÍA SECA	pág.28.
1.2. PROCESO VÍA HÚMEDA	pág.29.
1.3. VÍA SEMISECA Y VÍA SEMIHÚMEDA	pág.31.
2. ELECCIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN	pág.33.
2.1. NATURALEZA DE LAS MATERIAS PRIMAS	pág.33.
2.2. CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS	pág.34.
2.3. FUENTES DE ENERGÍA	pág.34.
2.4. COMPARATIVA ENTRE AMBAS VÍAS	pág.36.
<b>CAPÍTULO VI. PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND</b>	pág.40
1. EXTRACCIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS Y TRITURACIÓN	pág.40.
2. DOSIFICACIÓN Y PREHOMOGENEIZACIÓN	pág.44.
3. SECADO Y MOLIENDA DEL CRUDO	pág.48.
4. HOMOGENEIZACIÓN	pág.51.
5. FABRICACIÓN DEL CLINKER: CALENTAMIENTO, COCCIÓN DEL CRUDO Y ENFRIAMIENTO DEL MISMO	pág.54.
5.1. CALENTAMIENTO DEL CRUDO	pág.54.
5.2. COCCIÓN DEL CRUDO	pág.55.
5.3. ENFRIAMIENTO DEL CLINKER	pág.56.
6. MOLIENDA Y ENSILADO	pág.58.
<b>CAPÍTULO VII. HORNO ROTATORIO. UNIDAD CENTRAL DEL PROCESO CEMENTERO</b>	pág.60.
1. PRIMER HORNO ROTATORIO	pág.60.
2. PARTES DEL HORNO ROTATORIO	pág.62.
2.1. CUERPO DEL HORNO	pág.63.
2.1.1. CARCASA	pág.63.
2.1.1.1. Refrigeración de la carcasa metálica del horno rotatorio	pág.64.
2.1.2. REVESTIMIENTO REFRACTARIO	pág.65.
2.1.2.1. Características del revestimiento interno del horno	pág.66.
2.1.2.2. Formación de costra protectora	pág.69.

---

2.1.2.3. Colocación de revestimiento refractario	pág.72.
2.1.3. SELECCIÓN DE MATERIALES Y ESPESORES	pág.74.
2.1.3.1. Elección del material refractario	pág.75.
2.1.3.2. Elección del material de la carcasa	pág.76.
2.2. SISTEMA DE GIRO Y APOYO	pág.76.
2.3. CARGA Y DESCARGA	pág.78.
2.4. QUEMADOR	pág.79.
2.5. DISPOSITIVOS DE ESTANQUEIDAD	pág.80.
2.6. OTROS DISPOSITIVOS	pág.84.
3. TIPOS DE HORNOS ROTATORIOS	pág.85.
3.1. HORNOS ROTATORIOS VÍA HÚMEDA	pág.85.
3.1.1. GENERALIDADES	pág.85.
3.1.2. DISPOSITIVOS PARA LA ELIMINACIÓN DE AGUA EN LAS PASTAS	pág.86.
3.1.3. DISPOSITIVOS INTERNOS EN HORNOS PARA VÍA HÚMEDA	pág.90.
3.1.3.1. Precalentadores de pasta	pág.90.
3.1.3.2. Secadores de pasta	pág.91.
3.1.4. DISPOSITIVOS EXTERNOS PARA HORNOS VÍA HÚMEDA	pág.92.
3.2. HORNOS ROTATORIOS VÍA SECA	pág.93.
3.2.1. DISPOSITIVOS INTERNOS DE CERÁMICA	pág.94.
3.2.2. LADRILLOS Y LISTONES ELEVADORES DE MATERIAL EN EL HORNO	pág.95.
3.2.3. DISPOSITIVOS DE RECUPERACIÓN DE CALOR A LA SALIDA DEL HORNO	pág.96.
3.2.3.1. Horno Lepol	pág.96.
3.2.3.2. Horno Humboldt	pág.98.
4. EVOLUCIÓN DEL HORNO ROTATORIO	pág.100.
5. TIPOS DE CILINDROS PARA HORNOS ROTATORIOS	pág.101.
6. TRANSMISIÓN DE CALOR EN HORNOS ROTATORIOS	pág.103.
7. BALANCE DE ENERGÍA GLOBAL EN EL HORNO	pág.105.
8. ZONAS EN LOS HORNOS ROTATORIOS	pág.106.
9. DILATACIÓN TÉRMICA DEL HORNO	pág.108.
10. CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE	pág.109.

---

<b>CAPÍTULO VIII. EQUIPOS EN CONTACTO DIRECTO CON EL HORNO ROTATORIO</b>	pág.111.
1. INTERCAMBIADORES DE CALOR	pág.111.
1.1. INTERCAMBIADOR DE CALOR HUMBOLDT	pág.111.
1.2. INTERCAMBIADOR DE CALOR DOPOL DE POLYSIUS	pág.112.
1.3. INTERCAMBIADOR DE CALOR MIAG	pág.113.
1.4. INTERCAMBIADOR DE CALOR KRUPP	pág.114.
1.5. INTERCAMBIADOR CON PRECALCINADOR	pág.115.
2. ENFRIADORES	pág.117.
2.1. ENFRIADOR DE TAMBOR ROTATORIO	pág.117.
2.2. ENFRIADOR PLANETARIO	pág.118.
2.3. ENFRIADOR DE PARRILLA	pág.118.
2.4. ENFRIADOR DE CUBA VERTICAL	pág.120.
<b>CAPÍTULO IX. ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES</b>	pág.120.
1. GENERALIDADES	pág.121.
2. CONSUMO INTENSIVO DE ENERGÍA	pág.122.
2.1. VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUOS EN EL PROCESO DE FABRICACIÓN DE CEMENTO PORTLAND	pág.123.
2.1.1. CONDICIONES TERMOQUÍMICAS DE LOS HORNOS DE CLINKER	pág.123.
2.1.2. RESIDUOS UTILIZADOS COMO COMBUSTIBLES	pág.128.
3. EMISIONES	pág.132.
3.1. CONTROL Y SEGUIMIENTO	pág.133.
3.2. CORRECCIÓN DE LAS EMISIONES	pág.135.
4. IMPACTOS POTENCIALES NEGATIVOS. MEDIDAS DE ATENUACIÓN	pág.136.
5. MARCO NORMATIVO	pág.142.
6. CAMBIO CLIMÁTICO Y LA PRODUCCIÓN DE CEMENTO	pág.145.
<b>CAPÍTULO X. SEGURIDAD, HIGIENE Y SALUD LABORAL</b>	pág.146.
1. MARCO LEGAL	pág.146.
2. RIESGOS PROFESIONALES	pág.147.
<b>ANEXO DE LA MEMORIA DESCRIPTIVA</b>	

---

# CAPÍTULO I.

## OBJETO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

### 1. OBJETO DEL PROYECTO

El presente proyecto tiene como objetivo abordar el dimensionamiento de un horno rotatorio para la producción de clinker de cemento Portland mediante vía seca. Éste será alimentado con una corriente de crudo de 3700 T/día, previamente calentada por un conjunto formado por un intercambiador de ciclones y un precalcinador.

### 2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

El horno rotatorio empleado para la producción de clinker de cemento Portland, como unidad central del proceso, no se encuentra aislado, sino que se encuentra interconectado dentro del engranaje de operaciones básicas y unidades existentes en una planta de producción de cemento Portland.

La alimentación del horno rotatorio hasta llegar a este punto, ha sufrido una serie de transformaciones físicas, químicas y térmicas que serán cruciales en la etapa de cocción dentro del horno rotatorio, y de cuya eficacia dependerá el buen funcionamiento del mismo.

El horno rotatorio, objeto de dimensionamiento en este proyecto, se encuentra sujeto a las condiciones de operación mostradas en la Fig1:

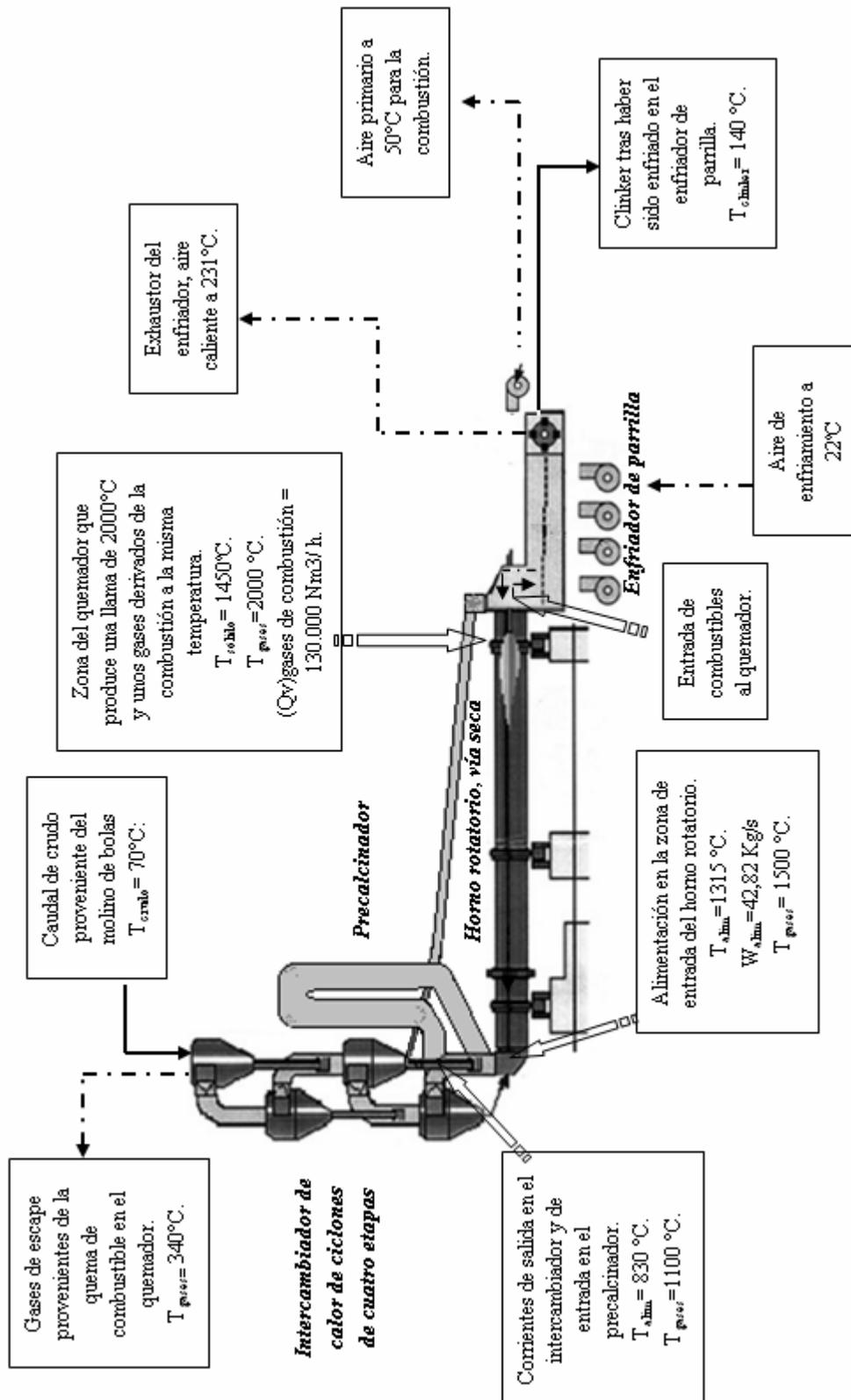


Fig1. Condiciones de operación a las que se encuentra sujeto el horno rotatorio.

El crudo procedente del molino a 70° C pasa a un intercambiador de ciclones de cuatro etapas donde es calentado mediante los gases de combustión generados en el horno rotatorio que se encuentran a 340° C.

Una vez que el material ha pasado por la última etapa del intercambiador de ciclones, se introduce en un precalcinador antes de constituir la alimentación del horno rotatorio. En este precalcinador, el material crudo es descarbonatado y calcinado casi en su totalidad mediante corriente cruzada con los gases del horno a 1500° C.

Posteriormente, el crudo descarbonatado llega al tubo del horno rotatorio donde se alcanzan las temperaturas lo suficientemente elevadas como para que se lleven a cabo las reacciones de sinterización responsables de la formación del clinker. En el horno rotatorio, el material alcanza la temperatura de 1450° C y los gases de combustión una temperatura de 2000° C.

Finalmente, el clinker es enfriado en un enfriador de parrilla utilizando una corriente de aire de 22° C, hasta que la temperatura de éste desciende hasta unos 140° C.

## CAPÍTULO II. GENERALIDADES

### 1. CLINKER Y CEMENTO PORTLAND. DEFINICIONES.

La palabra cemento, tan ampliamente difundida, se aplica a todo tipo de producto o mezcla de ellos que presenten propiedades adhesivas. En esta definición se incluyen, por tanto, los compuestos siliciosos, aluminosos y magnesianos, las resinas sintéticas, etc...

De un modo más concreto y de acuerdo con la *Norma UNE-EN 197-1:2000*, “*el cemento es un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico finamente molido que, amasado con agua, forma una pasta que fragua y endurece en virtud de reacciones y procesos de hidratación y que una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad aún bajo el agua*”. (Calleja Carrete J. 2002 [10]).

El *cemento Portland* es un tipo de cemento que se obtiene de la cocción en *horno rotatorio* de una mezcla íntima de caliza y arcilla hasta la sinterización (en la que parte del material se encuentra en estado líquido), obteniéndose un producto intermedio denominado *clinker*, y que comprende finalmente la mezcla y molienda de este producto intermedio con otras adiciones y la aportación de *yeso* como regulador de fraguado.

### 2. EL CEMENTO PORTLAND EN LA HISTORIA

El cemento conocido como *Portland* se patentó en 1824 por *Joseph Aspdin* como un material pulverulento que amasado con agua y arena se endurecía formando un conglomerante parecido a las calizas de la isla de Portland, a las que debe su nombre por su aspecto gris verdoso. Hasta entonces se utilizaba otros cementos derivados de los morteros romanos. Probablemente el material patentado por Aspdin era una cal

hidráulica debido, entre otras cosas, a las bajas temperaturas empleadas en la cocción, por eso puede decirse que el cemento Portland, tal como hoy lo conocemos, fue producido en 1845 por Isaac C. Jonson al moler finamente los nódulos cocidos que quedaban a la salida del horno de Aspdin. Con esta idea mejoró las dosificaciones y aumentó las temperaturas de cocción hasta lograr la sinterización de la mezcla. A partir de dicha fecha, el cemento Portland desplazó progresivamente a los cementos tradicionales y a otros aglomerantes hidráulicos. A finales del siglo XIX el hormigón fabricado con cemento Portland ya se había convertido en un material de construcción de amplia aplicación en Europa.

El cemento Portland, es el conglomerante hidráulico de mayor importancia a pesar de que se le conoce desde hace poco más de cien años. Su producción mundial supera los 1.600 millones de toneladas al año, que da una producción mundial de hormigón/ ser humano y año tal, que sólo de agua se consume una cantidad mayor en el mundo. (Vian A., Ocón J. 1979 [3]).

## **CAPÍTULO III**

### **MATERIAS PRIMAS EN LA ELABORACIÓN DEL CLINKER DE CEMENTO PORTLAND**

#### **1. MATERIA PRIMA IDEAL**

La materia prima ideal para la fabricación de cemento Portland, sería una roca que en su estado natural poseyese la composición química necesaria para obtener el clinker de cemento Portland, pero ésta se encuentra raramente.

Como materia prima de partida se utilizan sustancias minerales que contienen los componentes principales del cemento: cal, sílice, alúmina y óxido férrico. Estos componentes, raramente se encuentran en las proporciones deseadas en una sola sustancia, por tanto, la mayoría de las veces se ha de elegir la mezcla de un componente rico en cal (componente calcáreo) con otro pobre en cal pero que contiene más alúmina y óxidos de hierro (componente arcilloso).

Por ello, las dos materias primas principales son los materiales calizos (ricos en carbonato cálcico) y los materiales arcillosos (ricos en silicatos de aluminio hidratados).

##### **1.1. COMPONENTE CALCÁREO**

Tres son las fuentes de carbonato cálcico utilizadas en la obtención de cemento: la caliza, la creta y la marga.

###### **1.1.1. CALIZA**

Las calizas consisten principalmente en carbonato cálcico, el cual abunda en la naturaleza. Para fabricar el cemento Portland es adecuado el procedente de todas las formaciones geológicas. Las formas más puras de la caliza son el aspato calizo (calcita) y el aragonito. Una variedad de aspato calizo de grano macroscópico es el mármol,

aunque la utilización de éste como portador de  $\text{CaCO}_3$  sería antieconómica en la fabricación de cemento. La caliza posee, por lo general, una estructura cristalina de grano fino y su dureza viene determinada por su edad geológica. Solamente los yacimientos de caliza muy pura son de color blanco, ya que usualmente, la caliza contiene otros materiales pertenecientes a sustancias arcillosas o a minerales de hierro que influyen en su color.

### **1.1.2. CRETA**

En oposición a la caliza, la creta posee una estructura suelta, térrea, esta propiedad califica a la creta de un modo especial para la fabricación del cemento por vía húmeda. Como la extracción de la creta no exige explosivos, ni tampoco se ha de triturar, el coste de este componente disminuye de modo considerable la fabricación de cemento.

En algunos yacimientos el contenido en carbonato cálcico de la creta llega al 98-99% con trazas de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{MgCO}_3$ .

### **1.1.3. MARGA**

A las calizas que van acompañadas de sílice y de productos arcillosos, así como de óxido de hierro, se les llama *margas*. Las margas son un excelente material para la fabricación de cemento, puesto que presentan material calcáreo y arcilloso en estado homogéneo y son muy abundantes en la naturaleza. Las margas forman el paso de transición desde las calizas a las arcillas.

Según la relación entre material calcáreo y arcilloso en la marga se puede distinguir:

- Caliza pura: > 95% de  $\text{CaCO}_3$ .
- Caliza margosa: de 90 a 95% de  $\text{CaCO}_3$ .
- Marga calcárea: de 75 a 90% de  $\text{CaCO}_3$ .
- Marga: de 40 a 75% de  $\text{CaCO}_3$ .
- Marga arcillosa: de 10 a 40% de  $\text{CaCO}_3$ .
- Arcilla margosa: de 5 a 10% de  $\text{CaCO}_3$ .

- Arcilla: < 5% de  $\text{CaCO}_3$ .

La dureza de la marga es menor que la de la caliza, cuanto más elevada es su concentración en material arcilloso, tanto menos dura se presenta. El color de la marga depende del material arcilloso que contiene y varía desde el amarillo hasta el gris oscuro. Las margas calcáreas, cuya composición coincide con el crudo del cemento Portland hallan aplicación en la fabricación del llamado “cemento natural”.

## 1.2. COMPONENTE ARCILLOSO

La segunda materia prima importante para la fabricación del clinker de cemento Portland es la arcilla. Las arcillas en esencia, son productos de meteorización de silicatos de los metales alcalinos y alcalinotérreos, en particular de los feldspatos y las micas. La parte principal de las arcillas está formada por silicatos de aluminio hidratados. Los constituyentes más esenciales de las arcillas son los minerales arcillosos: Ilita, Caolín, Halloysita y Montmorillonita. La composición química de las arcillas varía desde aquellas que se aproximan a los minerales puros de la arcilla hasta las que contienen agregados de hidróxido de hierro, sulfuro de hierro, arena, carbonato cálcico, etc.

La arcilla sin impurezas es blanca, siendo el hidróxido de hierro el componente colorante más frecuente de las mismas.

## 2. MATERIALES SECUNDARIOS EN LA FORMULACIÓN DEL CRUDO: COMPONENTES CORRECTORES.

Cuando no es posible alcanzar la composición química deseada para el crudo con las materias primas disponibles, es necesario añadir pequeñas cantidades de otras materias primas de corrección. Estos “correctores” deben contener concentraciones relativamente altas de los óxidos particularmente precisos para lograr aquella

composición química deseada, que son los que faltan en el crudo, pero no deben introducir proporciones porcentuales apreciables de óxidos perjudiciales para el proceso o para el propio cemento.

Históricamente se han venido utilizando como correctores de la composición del crudo:

- materiales calizos de alta pureza, como correctores de óxido de calcio,
- arena, que proporciona la sílice que se necesita para reforzar la proporción de silicatos,
- bauxita, para aumentar la cantidad de fundentes,
- cenizas de pirita, (obtenidas como subproducto de la tostación de pirita en el proceso de obtención de hierro), como corrector de óxido de hierro aumentando la proporción de fundentes sin los daños que puede producir una alta dosis de alúmina.

También son susceptibles de sustituir o complementar a las anteriores, residuos o subproductos de otras industrias que se reciclan utilizándolos en la preparación del crudo, dentro de estos residuos o subproductos cabe destacar:

- lodos de papelera, por su alto contenido en carbonato cálcico provenientes del tratamiento de pasta de papel,
- arenas de fundición, por su alto contenido en óxido de silicio,
- residuos de demolición de naturaleza cálcica o silícica (la industria cementera española recicló más de 700.000 toneladas de estos residuos el año 2.000, evitando así que estos materiales se destinaran a vertederos),
- en definitiva, cualquier material formado mayoritariamente por los componentes principales del cemento con las limitaciones expresadas anteriormente.

### **3. SELECCIÓN DE MATERIAS PRIMAS**

A la hora de seleccionar una materia prima deben tenerse en cuenta ciertas características en la misma:

#### **3.1. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS**

El yacimiento tendrá los componentes químicos adecuados con relación a otra u otras materias primas que se usarán en combinación con las procedentes de aquél, para producir la composición correcta de un cemento Portland. Por ello deben vigilarse periódicamente tanto la cantera de caliza como la de arcilla o de margas. Conviene hacer un estudio de muestras en diferentes estratos, y en puntos de cada uno de ellos en número tal que puedan tomarse valores medios. Son interesantes las distintas circunstancias de cada muestra, en especial el insoluble en ácidos o residuo insoluble y el contenido en magnesia. El residuo insoluble señala el porcentaje de cemento que tratado con un ácido, según un modelo normalizado, queda sin disolver en él. Parte del residuo insoluble corresponde al clinker y está integrado por porciones de materias primas que por su naturaleza, condición física, o cocción defectuosa, no han podido combinarse en la clinkerización (como la sílice libre) y otra parte, corresponde al yeso u otras adiciones no nocivas. El residuo insoluble puede indicar una posible adulteración del cemento. La magnesia también es muy nociva porque puede originar grietas en los cementos y por ello las normas limitan su contenido en los mismos. Con estos datos pueden darse, las órdenes de explotación y acceso de materiales a fábrica.

#### **3.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS**

Las propiedades físicas deben ser tales que permitan el aprovechamiento a bajo precio, entre ellas se incluyen:

- Fácil explotación en cantera.
- Facilidad de machaqueo y molienda.

- Baja retención de humedad.
- Temperaturas de reacción bajas.
- Uniformidad en calidad y composición.
- Facilidad en la homogeneización.

### **3.3. CARACTERÍSTICA ECONÓMICAS**

Situación relativa de cantera, facilidades de transporte, bajo coste de manejo en fábrica, etc. Al establecer una nueva industria debe hacerse una cubicación del yacimiento mediante sondeos, para comprobar su composición y posible tiempo de explotación. Los gastos de primer establecimiento son tan elevados que justifican el estudio a fondo de estos aspectos. (Duda W. H. 1977 [1]. Soria F. 1980 [2]).

## CAPÍTULO IV QUÍMICA DESCRIPTIVA DEL CEMENTO PORTLAND

### 1. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL CEMENTO PORTLAND

El cemento es un producto básico en la construcción, que se obtiene a base de procesar los minerales adecuados que extraídos de cantera, se preparan, muelen y se introducen en unos hornos donde se producen las reacciones químicas necesarias para su transformación en un producto intermedio denominado *clinker*.

Este producto intermedio, tras haber sido enfriado, se mezcla y muele finamente con otros productos como yeso y otras adiciones para obtener finalmente el tipo de cemento deseado. De esta forma, se obtienen los distintos tipos de cemento, en función de la adición aplicada y su contenido en clinker.

Todas las adiciones existentes junto con el clinker, aislada o conjuntamente, según el caso, pueden ser *componentes principales* de los cementos si forman parte de los mismos en proporciones altas, superiores al 5%; y también, y asimismo aislada o conjuntamente, pueden ser *componentes minoritarios o secundarios* si su proporción es igual o inferior a 5%.

En el cemento Portland, exento de adiciones, podemos diferenciar unos *componentes principales* que son los que forman parte del clinker que se encuentra presente en el cemento Portland en un 95-100%, y unos *componentes minoritarios o secundarios*, como aquellos que aparecen en el cemento Portland en pequeñas cantidades, aunque no por esta razón carecen de vital importancia.

#### 1.1. COMPONENTES PRINCIPALES

Prácticamente, el 95% del clinker está formado por óxidos de cal, sílice, aluminio y hierro. El resto lo forman óxidos que proceden de las impurezas y entre los cuales están

los de magnesio, sodio, potasio, titanio, azufre, fósforo y manganeso, aunque la presencia de éstos depende de la materia prima utilizada y de los correctores aplicados. Los principales óxidos que se encuentran presentes en el cemento Portland figuran en la siguiente tabla:

Componente	% en el cemento Portland
Cal (CaO)	58-67
Sílice (SiO <sub>2</sub> )	16-26
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4-8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2-5
Magnesia (MgO)	1-5
Álcalis (N <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O)	0-1
SO <sub>3</sub>	0.1-2.5
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0-1.5
Mn <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0-3
TiO <sub>2</sub>	0-0.5
Pérdida al rojo	0.5-3

*Tabla 1. Principales óxidos presentes en el cemento Portland. (Fernández Cánovas M.1993 [12]).*

Los cuatro primeros óxidos, llamados óxidos principales, son los responsables de la formación, mediante las reacciones de clinkerización, de los constituyentes principales o activos del clinker en la etapa de cocción del crudo. Estos constituyentes principales o activos del clinker, que pueden verse en la Tabla 2, están formados por la combinación de dos o más óxidos principales y son los que confieren a los cementos sus propiedades técnicas características. *Le Chatelier* fue el primero en definirlos.

Nombre	Composición	Forma abreviada	Nombre del mineral
<i>Silicato tricálcico</i>	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	<b><math>C_3S</math></b>	Alita
<i>Silicato bicálcico</i>	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	<b><math>C_2S</math></b>	Belita
<i>Aluminato tricálcico</i>	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	<b><math>C_3A</math></b>	-
<i>Ferritoaluminato tretacálcico</i>	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	<b><math>C_4AF</math></b>	Celita

Tabla 2. Principales constituyentes del clinker. (Fernández Cánovas M. 1993 [12]).

Los minerales del clinker no son una combinación pura, sino fases de cristales mixtos que contienen los componentes de otras fases en pequeñas cantidades, así como las restantes sustancias químicas que acompañan al clinker y que son incapaces de formar fases autónomas.

De los componentes principales, los silicatos suman del 60 al 80% de la totalidad de ellos y son los responsables de las resistencias mecánicas del cemento. En general, estos silicatos no se encuentran puros en el clinker sino conteniendo pequeñas cantidades de alúmina, magnesia y otros óxidos; debido a esto, a los silicatos y demás componentes se le suele denominar por su nombre mineral: *alita*, *belita* y *celita* dados en la tabla anterior.

El *silicato tricálcico* o *alita*, se puede considerar como componente decisivo del clinker, confiere altas resistencias iniciales al cemento; prácticamente, en una semana desarrolla sus resistencias y después presenta una elevación muy lenta. El calor de hidratación que libera en su reacción con el agua es elevado cifrándose en 120 cal/g.

El *silicato bicálcico* o *belita*, da lugar a pocas resistencias en los primeros días, pero luego las va desarrollando progresivamente hasta alcanzar al silicato tricálcico. El desarrollo de calor a que da lugar en su hidratación es más bajo que el proporcionado por el silicato tricálcico, y de sólo 60 cal/g.

El *aluminato tricálcico* por sí solo contribuye poco a las resistencias pero, en presencia de los silicatos desarrolla unas resistencias iniciales buenas, aunque no está clara su forma de participar en las resistencias y endurecimiento del cemento, creyéndose que actúa como catalizador de la reacción de los silicatos. Su fraguado es rapidísimo al tomar contacto con el agua, desprendiendo una gran cantidad de calor: 207 cal/g. Para retardar su gran actividad se emplea el yeso que actúa como regulador de fraguado. Hay que tener también presente que, los clínkeres que poseen un contenido alto de aluminato tricálcico dan lugar a pastas endurecidas, morteros u hormigones, muy sensibles frente al ataque de sulfatos y otros agresivos.

El *ferrito aluminato tetracálcico* o *celita*, apenas si tiene contribución en la resistencia de los cementos. Su hidratación es rápida aunque menor que el aluminato y produce un desprendimiento de calor de 100 cal/g. El hierro que forma la celita tiene una gran importancia como fundente en el horno y es responsable del color gris verdoso de los cementos Portland, normalmente en éstos se encuentra en una proporción de un 3% y si su contenido se reduce al 0.5% o menos, se obtiene el cemento Portland blanco.

## **1.2. COMPONENTES SECUNDARIOS**

El término *secundarios* dado a estos componentes, se refiere a la pequeña cantidad en que aparecen en el análisis del cemento; sin embargo, no por esto dejan de tener una gran importancia por los efectos negativos a que pueden dar lugar.

Junto a las resistencias mecánicas, la estabilidad de volumen y la durabilidad, son las características más importantes a exigir en los cementos. Los cuatro componentes principales, anteriormente indicados, no dan lugar a inestabilidad después de hidratados ya que su volumen al reaccionar con el agua es inferior a la suma de los constituyentes anhidros y del agua precisa para la hidratación de los mismos.

Por el contrario, la cal y la magnesia libres, cristalizadas al hidratarse sin disolución previa, dan productos pulverulentos con marcada expansión y con los consiguientes efectos indeseables sobre los morteros u hormigones.

La *cal libre* es un constituyente frecuente en el cemento Portland, siendo su presencia en el mismo debida a un defecto de fabricación atribuible a muy diversas causas. La hidratación de la cal libre es expansiva, pudiendo dar lugar a fisuras superficiales en el hormigón e incluso el debilitamiento y destrucción del mismo.

La *magnesia*, al igual que la cal libre, es también expansiva aunque a más largo plazo que ésta. Está combinada hasta un 2% en las fases principales del clinker, más allá de esta cifra aparece como periclasa. Debido a que la magnesia es muy nociva, las normas limitan su contenido en los cementos. La magnesia más peligrosa es la se encuentra cristalizada en forma de periclasa, ya que cuando ésta se hidrata la reacción discurre muy lentamente cuando las restantes reacciones de endurecimiento ya han concluido, el aumento de volumen que experimenta puede hacer saltar la estructura de la roca de cemento y originar grietas. La magnesia procede de las calizas que poseen  $MgCO_3$ , las escorias de alto horno a veces, contienen cantidades fuertes de  $MgO$ .

Los *álcalis* :  $K_2O + Na_2O$ , provienen de las materias primas y en general, de las arcillas, margas y de las cenizas de carbón quemado en el horno, influyendo negativamente en la durabilidad de los morteros u hormigones dando lugar a compuestos expansivos que perjudican la adherencia entre los áridos y la pasta y que incluso pueden destruir al propio horno. Además de este efecto pernicioso que pueden ocasionar, los álcalis solubles pueden ser peligrosos por aumentar la retracción hidráulica, acelerar el fraguado del cemento y poder corroer determinados vidrios puestos en contacto con el hormigón.

El  $SO_3$  de los cementos procede del yeso que tiene por finalidad regular el fraguado. Si la proporción de yeso es la óptima, el cemento tendrá buenas cualidades resistentes, de estabilidad y de durabilidad. La cantidad de yeso a emplear en la fabricación del cemento, será tanto mayor, cuanto mayor sea la cantidad de aluminato tricálcico, puesto que su misión es la de fijar a éste en forma de sulfoaluminato que, si bien es expansivo, en este caso no ejerce una función perjudicial debido a que este efecto se produce durante el fraguado del cemento, es decir, cuando éste está en estado plástico. Un

exceso de  $\text{SO}_3$ , al estar el cemento sobredosificado en yeso, da lugar a los inconvenientes antes citados, de aquí que las normas limiten su contenido. Un contenido alto, da lugar a cementos expansivos, merma sus resistencias y crea graves problemas en los hormigones fabricados con ellos.

La *pérdida a fuego* que se obtiene al calentar un cemento a una temperatura comprendida entre  $900^\circ$  y  $1.000^\circ$  C, corresponde en parte al agua del yeso empleado como retardador del fraguado, a posibles impurezas de naturaleza arcillosa que acompañen al yeso y, en parte, al propio clinker que finamente molido es sensible a la humedad y al anhídrido carbónico del aire que hace que se meteorice con facilidad. Durante la meteorización la cal libre se hidrata y carbonata, con lo cual aumenta la estabilidad del cemento, pero si la meteorización es prolongada se afectan las constantes hidráulicas de mayor saturación en cal, debilitándose por tanto, el cemento y en consecuencia produciéndose una disminución de las resistencias mecánicas del mismo. Una pérdida al fuego alta puede ser debida a una adición caliza.

El *residuo insoluble* señala el porcentaje de cemento que tratado con un ácido, según un método normalizado, queda sin disolver en él. Parte del residuo insoluble corresponde al clinker y está integrado por porciones de materias primas que por su naturaleza, condición física, o cocción defectuosa no han podido combinarse en la clinkerización y parte, al yeso u otras adiciones no nocivas. El residuo insoluble puede indicar una posible adulteración del cemento. (Duda W. H. 1977 [1], Fernández Cánovas M. 1993 [12]).

## **2. REACCIONES EN LA COCCIÓN DEL CLINKER DE CEMENTO PORTLAND**

Las propiedades fundamentales de los cementos son sus resistencias mecánicas (compresión, tracción, flexión), pero hay otras propiedades que facilitan o dificultan la conservación o aplicación de estos conglomerantes, como son la resistencia química (al agua del mar, a la selenitosa, a las aguas carbónicas), la velocidad de reacción con el

agua (hidratación), que es previa a su aplicación, y el calor desprendido en la hidratación, que si es elevado puede hacer difícil las construcciones de hormigón en grandes masas. Desde estos puntos de vista, los distintos constituyentes se manifiestan de esta forma:

	<i>S3C</i>	<i>S2C</i>	<i>AF4C</i>	<i>A3C</i>
<i>Velocidad de hidratación</i>	grande	pequeña	grande	instantánea
<i>Calor de hidratación</i>	grande	pequeño	pequeño	grande
<i>Resistencias mecánicas</i>	grandes prontas	grandes diferidas	escasa	escasa
<i>Resistencia Química</i>	aceptable	buena	buena	malísima

*Tabla 3. Características de los constituyentes del clinker. (A.Vian, J.Ocón, 1979 [3])*

Según esto, si lo que más importa del cemento, como material de construcción es su resistencia mecánica, los constituyentes deseables serían el S3C y S2C. Un producto a base sólo de silicatos de calcio supone utilizar SiO<sub>2</sub> y CaO (arena y caliza) como materias primas; pero su reacción se lograría muy difícilmente con los medios actuales, por su escasa fusibilidad y por la lentitud de las reacciones entre sólidos.

La base de la fabricación del cemento Portland es, por tanto, conseguir una combinación de la cal con la sílice para formar el silicato tricálcico (3CaO·SiO<sub>2</sub>) que constituye el silicato más rico en la cal que es posible obtener. La enérgica reacción del silicato tricálcico con el agua indica que se trata de un compuesto muy inestable. En efecto, su fabricación empleando componentes puros (CaO y SiO<sub>2</sub>) presenta dificultad aún en el laboratorio ya que a la temperatura de unos 1250° C esta combinación no puede efectuarse en absoluto; una mezcla de cal y sílice sometida a la temperatura indicada producirá sólo silicato bicálcico (2CaO·SiO<sub>2</sub>) y cal viva (CaO). Mediante un calentamiento ulterior, se produce gradualmente la formación de silicato tricálcico.

Este proceso se desarrolla como *reacción en fase sólida* lenta y parcialmente, ya que si se intenta conseguir la fusión de la mezcla (hacia unos 2240° C) el silicato tricálcico se descompone nuevamente en silicato bicálcico y cal viva al sobrepasar los 1900° C.

Así pues, para producir el compuesto puro, es necesario recurrir a la *reacción en fase sólida*, en la cual se somete la mezcla de los componentes, cal calcinada y sílice, a una temperatura comprendida entre los límites de estabilidad del silicato tricálcico (1250-1900° C) y durante el tiempo necesario hasta “agotar la reacción”; después se procede a un nuevo ciclo de molienda, mezclado y cocción, repitiendo este procedimiento hasta que cada partícula de cal haya tenido realmente la posibilidad de encontrar otra de sílice, de tal modo que sin tener que recurrir a la fusión se obtenga la formación de silicato tricálcico. Aunque un procedimiento de laboratorio como este nos permita un cemento compuesto de S3C y S2C a partir de cal y sílice, la velocidad de reacción entre los óxidos es tan baja que la producción de cemento a gran escala se hace impracticable.

La cocción perfecta, en condiciones comerciales, depende a su vez, no sólo de la composición química del crudo, sino también de las características físico-químicas de sus componentes. Así, un crudo compuesto de carbonato cálcico, arena (sílice) y bauxita presenta dificultades en su tratamiento industrial que no aparece en una mezcla de caliza y arcilla de la misma composición debido a la mayor actividad del componente arcilloso con relación a la sílice libre.

Sin embargo, es posible obtener un cemento a escala industrial, si a la mezcla de cal y sílice se la agrega otro componente cuya fusión se realice dentro de los límites de temperatura en el que pueda existir el silicato tricálcico, la cal y la sílice puedan reunirse dentro de la fase líquida así constituida, y combinarse y cristalizar formando el silicato tricálcico.

La existencia de componentes secundarios no mejora las propiedades del cemento, pero su presencia en la cocción permite obtener un producto comercialmente asequible. Los componentes particularmente apropiados para producir esta fase líquida, son la alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y el óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), materiales que en la naturaleza acompañan ya a la sílice tanto en la marga caliza como en la arcilla y son llamados *fundentes*.

Tales sustancias van mezclando la cal y la sílice, combinándolas en su seno.

La mezcla de cantidades apropiadas de cal, sílice, alúmina y óxido férrico, calcinada hasta la sinterización y enfriada posteriormente, se convierte en fragmentos de coloración oscura, compactos, duros como piedras: el clinker de cemento Portland.

En síntesis, la cocción consiste en una serie de reacciones entre sólidos finamente divididos, seguidos de una formación de fase líquida que actúa como medio de reacción y acelera el desarrollo de los nuevos componentes. Las reacciones en estado sólido son muy lentas, siendo principalmente un gran obstáculo la difusión de materiales que intervienen en aquellas. El llegar a conseguir una combinación total dependerá, por tanto, no sólo de la composición del crudo (con lo que podrían deducirse las posibles reacciones), sino también del estado físico-químico de sus componentes, de la temperatura y del tiempo; en síntesis: de la cinetoquímica de las reacciones.

Por lo tanto, la fabricación del cemento Portland se efectúa a partir de una mezcla de caliza y arcilla, que produce por cocción, cantidades considerables de silicato tricálcico.

La formación de fase líquida, se realiza sólo en extensión suficiente para producir la rápida formación de silicato tricálcico. Debe evitarse una extensión mayor de la fase citada, pues causaría *aglomerados* demasiado grandes e incrustaciones sobre el revestimiento refractario del horno aumentando la resistencia del clinker a su posterior molturación. Sobre todo debe evitarse en absoluto que la mezcla cruda contenga una cantidad mayor de cal de la que en las condiciones técnicas del caso pueda combinarse de acuerdo con los porcentajes disponibles de los óxidos de carácter ácido: de silicio, aluminio o hierro. Esto es así debido a que la cal libre contenida en el cemento Portland se encuentra confinada dentro de una estructura mineral compacta, procedente de una fusión endurecida posteriormente, y ni siquiera después de moler el clinker queda la cal libre en condiciones más accesibles al agua de apagado. La cal libre tiene una velocidad de hidratación baja, de manera que el aumento de volumen producido cuando se hidratan las partículas de cal libre se presenta cuando ya el proceso de endurecimiento

del cemento se encuentra adelantado por lo que cuando solidifica se encuentra en una matriz fraguada de cemento, generando tensiones que son el origen de las grietas y motiva el debilitamiento o la desintegración de la estructura (ya endurecida). Este efecto se designa como “expansión por cal libre” en el cemento Portland.

En la fabricación del cemento Portland este requisito indispensable de evitar la presencia de cal libre en el producto calcinado, se contrapone a la tendencia de obtener un cemento rico en silicato tricálcico. Esto requiere una determinación muy exacta del contenido de cal. En efecto, en la técnica de fabricación de cemento Portland, el contenido de carbonato cálcico en la mezcla cruda suele regularse con una precisión del 0,1 %. (Vian A. Ocón J. 1979 [3] / Soria. F. 1980 [2]).

## **2.1. IMPORTANCIA DE LA FASE LÍQUIDA**

Puesto que la clinkerización depende de la formación de la fase líquida y en ésta se desarrollan los principales componentes del clinker, tiene mucha importancia la temperatura en la que aparece y la velocidad y viscosidad con que se desarrolla.

La temperatura más baja encontrada en mezclas normales parece ser de unos 1280°C. La cantidad formada a temperaturas superiores, su viscosidad, tensión superficial y composición, dependen en gran parte de los componentes secundarios del crudo; esto hace que la temperatura óptima de clinkerización de las distintas mezclas varíe de unas a otras.

El contenido óptimo de la fase líquida oscila desde un mínimo necesario para producir un producto coherente y bien cocido, a un máximo en el que se producen adherencias, anillos u otros pegamentos peligrosos. En un clinker normal oscila entre un 25% y un 30% e incluso más.

Si la cantidad de la fase líquida de una mezcla dada crece muy lentamente con la temperatura, el intervalo de clinkerización en el horno será amplio y la marcha de los materiales muy regular; en caso contrario es muy crítica la zona de clinkerización y bastante delicada la conducción del horno.

En la formación de la fase líquida se ha deducido que puede calcularse, con bastante precisión, la cantidad de líquido formado en un crudo comercial a una temperatura determinada por las siguientes fórmulas dadas por Lea:

$\text{Porcentaje de la fase líquida a } 1338^{\circ} \text{ C} = 6.1y + a + b$ $\text{Porcentaje de la fase líquida a } 1400^{\circ} \text{ C} = 2.95x + 2.2y + a + b$ $\text{Porcentaje de la fase líquida a } 1450^{\circ} \text{ C} = 3.0x + 2.25y + a + b$
---

donde  $x$ ,  $y$ , y  $b$  representan los contenidos de alúmina, óxido de hierro y álcalis, respectivamente en el clinker expresados en porcentajes, y  $a$  expresa el porcentaje en magnesio. Estas fórmulas son aplicables sólo a crudos incluidos en la zona de los cementos Portland, siendo de señalar la ausencia de sílice y cal, aunque indirectamente incluya su suma, puesto que altera las cantidades de los otros componentes. Para estas fórmulas se observará el lento desarrollo de la proporción de la fase líquida a partir de  $1400^{\circ} \text{ C}$ , afectándose más bien las propiedades de dicha fase.

Para clínkeres con una relación en peso  $A/F < 1.38$ , la primera de las fórmulas se sustituye por la siguiente:

$\text{Porcentaje de la fase líquida a } 1338^{\circ} \text{ C} = 8.5x - 5.22y + a + b$
---

La fase líquida necesaria para la formación del silicato tricálcico la componen principalmente los siguientes óxidos:

- Alúmina.
- Óxido férrico.
- Álcalis y compuestos menos importantes.
- Parte de la magnesia.

(Duda. W. H. 1977 [1] / Fernández Cánovas M. 1993 [12])

## 2.2. PROCESOS QUÍMICOS, MINERALÓGICOS Y FÍSICOS EN LA COCCIÓN DEL CEMENTO

Para fabricar el clinker de cemento Portland a partir del material crudo, es preciso calcinar éste hasta una temperatura de 1450 °C, alcanzando así la sinterización o clinkerización. El proceso de cocción exige una atmósfera oxidante dentro del horno, ya que en caso contrario se obtiene un clinker de color pardo, en lugar de verde grisáceo, y el cemento resultante presenta un fraguado más rápido y resistencias más bajas.

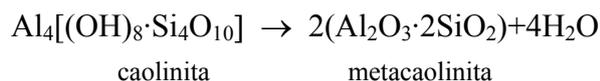
Durante el calentamiento del crudo, y particularmente a la temperatura de cocción tienen ya lugar importantes procesos físico-químicos tales como la deshidratación de los minerales de arcilla, la descomposición de los carbonatos (descarbonatación o expulsión del CO<sub>2</sub>) reacciones en estado sólido y reacciones con participación de una fase líquida o fundida, así como una serie de cristalizaciones.

Estos procesos se ven afectados sustancialmente, no sólo por factores químicos del crudo (composición química) sino también por factores mineralógicos (composición mineralógica) y por factores físicos (finura, homogeneidad) y otros. El transcurso completo de estas reacciones juega un papel decisivo en la calidad del cemento resultante. En la Tabla 4 se muestra una visión del conjunto de las transformaciones que se producen en el crudo de cemento durante la cocción, las cuales son descritas a continuación:

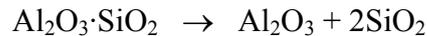
- Secado: el agua libre presente como humedad en el crudo, se desprende en un intervalo de temperaturas que alcanza hasta unos 200° C.
- Deshidratación de los minerales de arcilla; a temperaturas comprendidas entre 100° C y 400° C aproximadamente, los minerales de arcilla ceden su agua adsorbida, incluida el agua interlaminar. A temperaturas superiores entre 400 y 700° C, se desprende también el agua combinada químicamente en forma de grupos hidroxilo (deshidratación), como sucede, por ejemplo, en la deshidratación de la caolinita:

PUNTO DEL PROCESO	T° C	PROCESO	TRANSFORMACIONES QUÍMICAS MÁS IMPORTANTES
<b>TORRE DE INTERCAMBIO DE CALOR</b>	<200	Secado. Eliminación del agua libre.	
	100-400	Eliminación del agua adsorbida.	
	400-750	Descomposición de la arcilla con formación de metacaolinita.	$Al_4[(OH)_8 \cdot Si_4O_{10}] \rightarrow 2(Al_2O_3 \cdot 2SiO_2) + 4H_2O$
<b>HORNO ROTATORIO</b>	600-900	Descomposición de la metacaolinita y otros componentes con formación de una mezcla de óxidos reactivos.	$Al_2O_3 \cdot SiO_2 \rightarrow Al_2O_3 + 2SiO_2$
	600-1000	Descomposición de la caliza con formación de CS y CA y formación de CO <sub>2</sub> .	$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$ $3CaO + 2SiO_2 + Al_2O_3 \rightarrow 2(CaO \cdot SiO_2) + CaO \cdot Al_2O_3$
	800-1300	Fijación de la cal por CS (silicato cálcico) y CA (aluminato cálcico) con formación de C <sub>4</sub> AF (aluminoferrito tetracálcico) y C <sub>3</sub> A (silicato tricálcico).	$CaO \cdot 2SiO_2 + CaO \rightarrow 2CaO \cdot SiO_2$ $2CaO + SiO_2 \rightarrow 2CaO \cdot SiO_2$ $CaO \cdot Al_2O_3 + 2CaO \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3$ $CaO \cdot Al_2O_3 + 3CaO + Fe_2O_3 \rightarrow 4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$
	1250-1450	Nueva fijación de cal por C <sub>2</sub> S (silicato bicálcico) con formación de C <sub>3</sub> S en presencia de fase líquida.	$2CaO \cdot SiO_2 + CaO \rightarrow 3CaO \cdot SiO_2$

*Tabla 4. Transformaciones en la cocción del crudo. (Cemento Hormigón, 2005 [19]).*



El metacaolín se descompone parcialmente a las temperaturas señaladas, pero también y más a temperaturas crecientes hasta unos 900° C, dando lugar a mezclas de óxidos reactivos, según la ecuación de la reacción:



Las combinaciones de hierro usualmente presentes en las arcillas quedan en forma de óxidos.

En la deshidratación de la arcilla influyen diversos factores tales como el tipo de materiales arcillosos, la naturaleza y cantidad de impurezas, el tamaño de las partículas, el grado de cristalización de las arcillas, la atmósfera gaseosa, y otros.

- Descomposición de los carbonatos: el carbonato cálcico contenido en el crudo se descompone (disociación, descarbonatación y calcinación) a temperaturas teóricamente iguales o superiores a 896° C según la ecuación:



Carbonato cálcico	Cal (óxido de calcio)	Dióxido de carbono
-------------------	-----------------------	--------------------

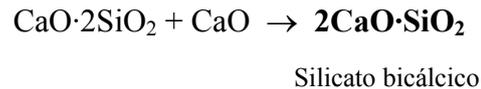
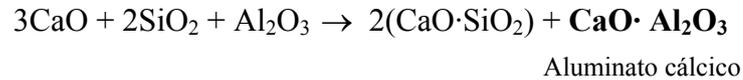
En la práctica, la disociación comienza entre 500 y 600° C, ello es debido a procesos químicos entre el CaO que se forma y las adiciones de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, por las cuales se originan por ejemplo y en primer lugar: CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (CA), 12CaO·7Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (C<sub>12</sub>A<sub>7</sub>), CaO·SiO<sub>2</sub> (CS), 2CaO·SiO<sub>2</sub> (C<sub>2</sub>S), por reacción en estado sólido. El contenido de cal libre CaO es , por lo tanto, escaso por debajo de 800° C (menor del 2% en masa), aumentando hasta alrededor del 20% a temperaturas mayores.

La disociación térmica del MgCO<sub>3</sub> de mucha menor importancia en la fabricación del cemento Portland, y la formación de sulfatos transcurre de forma análoga, pero a temperaturas más bajas:

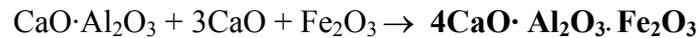


- Reacciones entre fases sólidas: entre 550 y 600° comienzan a producirse reacciones entre sólidos, en los que se combinan los productos de la descomposición del carbonato cálcico con los de la arcilla, formándose primero y preferentemente

compuestos de menor contenido en cal como el *aluminato cálcico* (CA) y el *silicato bicálcico* (C<sub>2</sub>S), de acuerdo con las reacciones siguientes:



La formación de aluminato tricálcico  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  (C<sub>3</sub>A) y del aluminoferrito tetracálcico  $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$  (C<sub>4</sub>AF). También presentes en el clinker del cemento Portland, comienza aproximadamente a unos 800° C, tales reacciones se muestran a continuación:



De los constituyentes normales y principales del clinker, se han formado hasta ahora tres de ellos:

- ❑ Aluminoferrito tetracálcico
- ❑ Aluminato tricálcico
- ❑ Silicato bicálcico.

De una manera más intuitiva podemos abarcar la formación de estos constituyentes de la siguiente forma:

- a) cada mol de óxido de hierro (considerado como Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) toma otro mol de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y cuatro moles de CaO para dar  $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ , aluminoferrito tetracálcico.

- b<sub>1</sub>) si la proporción molar  $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{Fe}_2\text{O}_3$  es superior a la unidad (que es lo frecuente) la alúmina sobrante se combina en la relación 1:3 con CaO para dar  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ , aluminato tricálcico.
- b<sub>2</sub>) si la proporción molar  $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{Fe}_2\text{O}_3$  es inferior a la unidad, el trióxido de hierro sobrante toma dos moles de CaO para dar  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{CaO}$ , ferrito dicálcico.
- c) una vez cubierta la saturación de cal por los óxidos de hierro y de la alúmina, el  $\text{SiO}_2$  toma la cal necesaria para formar  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ , silicato bicálcico.

Solamente queda por mostrar la formación del último constituyente principal del clinker: el silicato tricálcico que como hemos señalado anteriormente, para su formación es necesario la existencia de una fase líquida a una temperatura adecuada en el seno de la cual la formación del silicato tricálcico es factible mediante la fijación de cal por el silicato bicálcico:



## CAPÍTULO V VIABILIDAD TECNOLÓGICA DEL PROCESO

### 1. VÍAS DE PRODUCCIÓN

En la industria del cemento, todos los pasos involucrados en la fabricación de este conglomerante han sufrido profundas modificaciones en las últimas décadas: la preparación de las materias primas es más cuidadosa, la molienda más profunda, la homogeneización más perfecta, la cocción a mayor temperatura, y el control de laboratorio y fábrica, muy severos en todas las fases de su preparación.

En la fabricación del cemento Portland se siguen básicamente dos métodos o vías de producción, denominadas “*vía seca*” y “*vía húmeda*”.

Ambas vías sólo difieren en la primera fase de la fabricación, es decir, en el pretratamiento de las materias primas, formada generalmente por una mezcla de piedra caliza y arcilla en una proporción aproximada de 4:1; de manera que una vez que éstas son introducidas en el horno para su cocción, de aquí en adelante, las fases son idénticas en ambos casos.

#### 1.1. PROCESO VÍA SECA

En el proceso por vía seca tanto la molienda como el mezclado se realizan con materiales secos, alimentándose el horno con una mezcla total pulverizada y homogénea de composición definida. Como en la vía seca la humedad del crudo impone limitaciones a la molienda, es necesario proceder a un secado previo del crudo. Por lo tanto, como medida previa, las materias primas una vez trituradas han de sufrir un secado simultáneo o no con la molienda; en todo caso, dichos materiales sufren esta preparación independientemente hasta llegar al molino.

Más tarde, y por medios de mecanismos adecuados, se alimentan los molinos con las materias primas que introducidas simultáneamente y convenientemente dosificadas, compondrán el futuro crudo del cemento.

El crudo procedente de los molinos se transporta a los silos de homogeneización donde, bien por circulación, bien por agitación, o bien por ambas cosas a la vez, se llega a obtener un producto homogéneo y de la composición requerida para obtener un cemento dado.

Luego, se pasa este crudo al horno a través de los dispositivos de preparación adecuados que disponen el material para la cocción. Estos dispositivos pueden alimentar el crudo, bien en polvo seco o bien en forma de nódulos esféricos, de forma que la humedad de la alimentación a la llegada del horno o al sistema de precalentamiento es inferior al 1%.

En la vía seca la alimentación al horno se realiza mediante una torre de ciclones de varias etapas (generalmente de 4 a 6) para realizar un intercambio de calor en el cual se calienta el crudo por contacto con los gases procedentes del horno rotatorio. A veces se instala una cámara de combustión tras el intercambiador de ciclones donde se quema parte del combustible (que puede llegar a ser el 60% del total), llamada *precalcinador*, de manera que se consigue que el proceso de descarbonatación de la caliza (calcinación) quede casi completado antes de su entrada al horno.

## **1.2. PROCESO VÍA HÚMEDA**

En el proceso por vía húmeda, la materia prima se muele con adición de agua hasta formar un lodo que contiene de un 30-40% de agua. Dentro de la vía húmeda, la marcha del proceso difiere algo, según la naturaleza de las materias primas. Originalmente se aplicaba a materiales de molturación fácil, sin embargo, se ha extendido hasta los casos donde se emplean las calizas más duras:

- Materiales blandos; cuando, tanto la materia prima caliza como la arcillosa sean fácilmente desleíbles en agua, la preparación de crudos después de una trituración previa se simplifica notablemente. Los materiales, caliza y arcilla, se vierten en cantidades reguladas sobre el vaso del desleidor, donde a su vez se agrega el agua suficiente para formar una pasta espesa. El vaso del desleidor suele ser un cilindro de 7-10 m de diámetro y 1,5 m de profundidad, sobre su centro existe un pilar de ladrillo u hormigón que soporta el árbol vertical movido por un sistema piñón-

corona y llevando consigo un armazón horizontal metálico, en el que se suspenden mediante cadenas, unos rastrillos provistos con púas de acero. El movimiento de los rastrillos produce el desleimiento de los terrones, y la mezcla pasa a ser una pasta de consistencia cremosa. La pasta ya preparada pasa a los silos de homogeneización, desde los cuales y previo los análisis convenientes, se vierte en las proporciones fijadas sobre el depósito de pasta preparada para la cocción del horno.

- Mezcla de materiales blandos y duros; el caso más normal es que uno de los componentes sea duro o semiduro y el otro blando. En este caso, el primero de los componentes se incorpora directamente al molino y el segundo se desmenuza como en el caso anterior y se adiciona al molino en forma de pasta.
- Materiales duros; cuando ninguna de las dos materias primas son fácilmente desleíbles, la primera fase de su preparación hasta los dosificadores del molino es similar a la vía seca, salvo el secado. Este procedimiento es muy normal si se emplean escorias o puzolanas como sustancia de naturaleza arcillosa. Los componentes se alimentan en su forma sólida al molino y, simultáneamente, se adiciona agua requerida para formar la pasta.

Una vez que la pasta se encuentra en los vasos de corrección se conserva su homogeneidad tanto por agitación mecánica como neumática. El ajuste final de composición para llegar al depósito de pasta preparada, se hace por mezcla del material de dos vasos dosificados en exceso y defecto de cal, respectivamente, en las proporciones requeridas para dar la composición deseada.

Como ya se ha mencionado, el agua en la pasta oscila en torno a un 30-40% y en algunos casos extremos llega a sobrepasar el 50%, esto depende de la composición de la materia prima, y singularmente del componente arcilloso que presenta una plasticidad variable. En la vía húmeda, siempre interesa producir una pasta con el porcentaje más bajo posible de agua, a fin de reducir el consumo de combustible en el horno para provocar la evaporación de ésta. Este valor mínimo viene limitado por la necesidad de

transporte desde la salida del molino hasta su alimentación al horno, entre los que pueden citarse el transporte por bombas en tuberías, el elevador de cangilones y las canalizaciones abiertas. En la técnica moderna se ha estudiado mucho las posibilidades de reducir la cantidad de agua de la pasta de crudo, tanto durante la molienda como antes de su alimentación al horno. En el primer caso, por adición de ciertas sales en pequeña cantidad, y en el segundo empleando filtros de discos o tambor recubiertos con tejido y espesadores (el empleo de filtros es capaz de reducir la pasta a una torta con un 20-25% de agua).

### **1.3. VÍA SEMISECA Y SEMIHÚMEDA**

Los dos métodos o vías de producción señalados anteriormente se desglosan en otras dos nuevas variantes: la “*vía semiseca*” y la “*vía semihúmeda*”.

En el proceso vía semiseca la materia se peletiza en pequeños nódulos con una adición de agua del 10 al 15%. Presenta como ventaja que los nódulos se descarbonatan parcialmente en la parilla previa a la cocción por lo que no es necesario acudir a hornos largos para una producción dada, la obtención de un clinker de granulometría muy uniforme y la admisión de materias primas con alto contenido en álcalis, que afectan no sólo a la calidad del clinker sino que pueden provocar alteraciones en el proceso como perturbar las condiciones de tiro y dificultar la marcha del horno)). Y sus inconvenientes radican en su alto coste de mantenimiento y su consumo energético relativamente elevado, ya que se requiere una adición de calor para secar el crudo antes de proceder a su molienda.

En el proceso vía semihúmeda, la humedad de la pasta puede llegar a ser de un 20%. La pasta es filtrada y a continuación es granulada por extrusión de manera que antes de alimentar el horno se seca en una parilla. Las ventajas más importantes que presenta son la buena dosificación en la alimentación al horno, que los gases abandonan la parilla a baja temperatura y que no se necesita calor en la molienda del crudo, además de poder

trabajar con crudos de elevado contenido en álcalis (ya que podrían reducirse por lavado).

En el siguiente esquema indicativo, se muestra las diferencias en cuanto a la preparación de las materias primas existentes entre los distintos tipos de vías de producción:

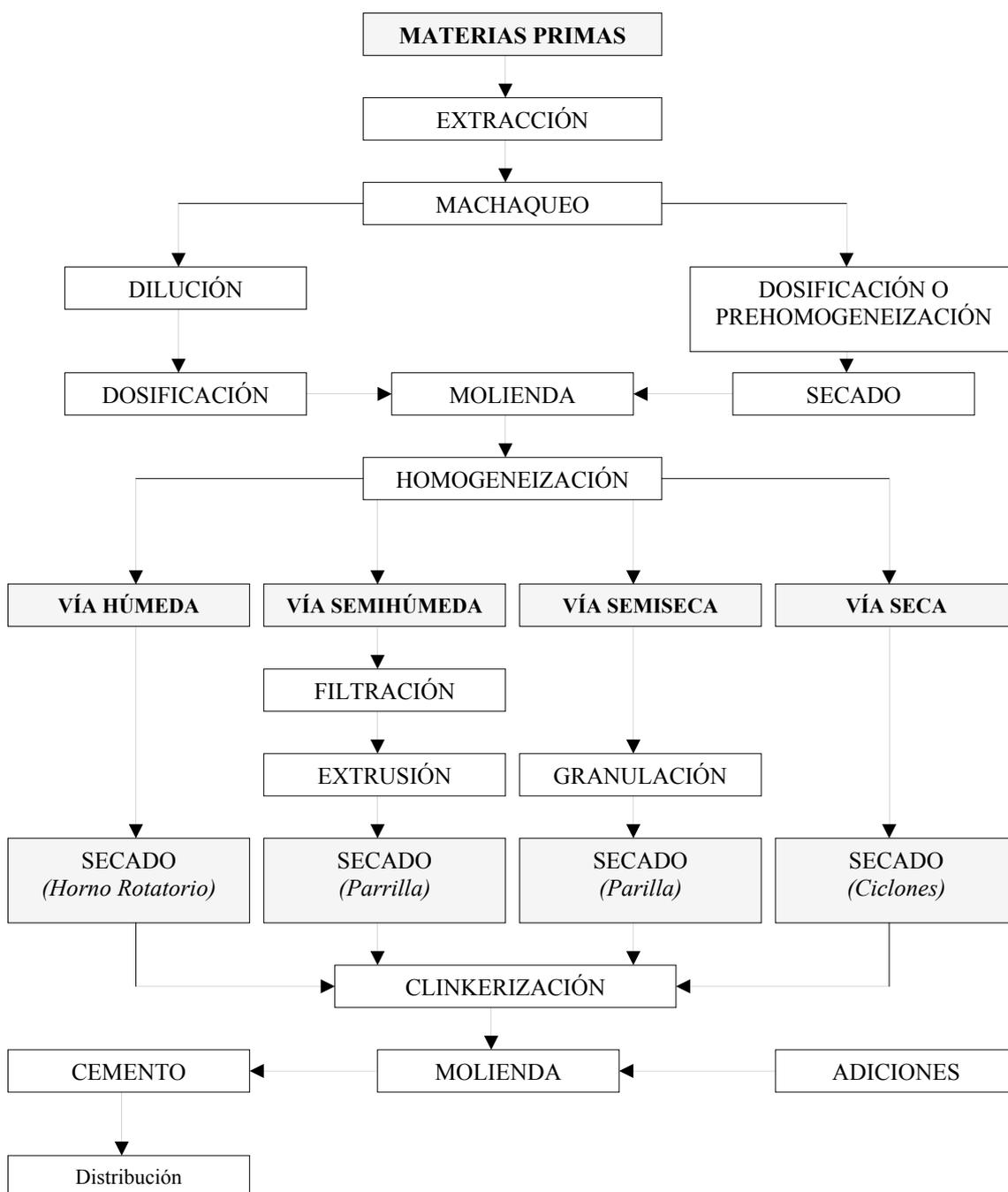


Fig1. Diagrama de flujo para los distintos tipos de vías

## 2. ELECCIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN

No existen reglas generales válidas para elegir una u otra vía, y no se dispone de un método único para la evaluación comparativa de los dos métodos o vías de producción. No es posible, por tanto, demostrar inequívocamente la supremacía de uno sobre otro en cuanto a la calidad del clinker.

En un principio, se sostenía el punto de vista de que el clinker del horno por vía húmeda, debido a la mejor homogeneización de las materias primas componentes del crudo en forma de pasta, era más regular y poseía mejor calidad. Sin embargo, los métodos y dispositivos actuales hacen posible la fabricación de crudos por vía seca con el mismo grado de uniformidad que las pastas elaboradas por vía húmeda. En la calidad del clinker no existe diferencia por tanto.

La tecnología del proceso a elegir depende fundamentalmente del origen de las materias primas, el tipo de caliza y arcilla y el contenido en agua (desde el 3% para calizas puras hasta el 20% para algunas margas), además de las condiciones climatológicas y de las fuentes de energía que son factores decisivos.

### 2.1. NATURALEZA DE LAS MATERIAS PRIMAS

Para ciertas materias primas blandas tales como la creta, es casi obligada la vía húmeda incluso en climas bastante secos. Su alto contenido de humedad y su estructura esponjosa impiden un secado perfecto. Y si a ello añadimos la existencia de impurezas que solo pueden separarse económicamente por lavado, y las dificultades de molienda, aún llevando la desecación a un grado límite, queda plenamente justificada la vía húmeda.

La vía húmeda se recomienda cuando se trata de materias primas que contienen gran cantidad de guijarros o piedras difíciles de romper, pero fácilmente separables por desleimiento con agua. Sin embargo, para aquellos materiales componentes de un futuro crudo que presenten composiciones extremas y durezas incompatibles, es inviable el

método húmedo. Lo mismo podemos decir de ciertas margas finas estructuralmente y con tendencia a la formación de coloides, que exigen proporciones de agua prohibitivas (hasta el 60%) para preparar una pasta de viscosidad normal, en estos casos la vía seca es el procedimiento más coherente.

## **2.2. CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS**

En conexión con el apartado anterior, el clima influye notoriamente en las condiciones de explotación de canteras y en las de preparación. Parece clara la posición de la vía seca donde además de los materiales propicios, se presenta un clima seco y cálido. En climas húmedos, sin embargo, limitará sus pretensiones a materiales de naturaleza compacta y resistentes a lluvias continuadas o a yacimientos de explotación subterránea obligada. Además, un clima húmedo constituye una amenaza constante para los trabajos exteriores de cantera, a pesar de la mecanización que se emplea hoy en día, influye mucho la naturaleza de las materias primas, y en todo caso es necesaria la existencia de un “stock” importante en fábrica. La vía húmeda por el contrario, se defiende con facilidad en todos los climas y conserva su viabilidad sin que el coeficiente de utilización de sus máquinas y en consecuencia la rentabilidad, se debiliten. Solo se encontrará limitada por aquellas zonas en las que la escasez de agua puedan significar la búsqueda de otras fuentes de agua, como pueden ser las subterráneas cuya extracción puede resultar costosa (teniendo en cuenta que debe considerarse como necesario  $1\text{m}^3/\text{T}$  de clinker producido).

## **2.3. FUENTES DE ENERGÍA**

Los consumos de energía en las operaciones básicas realizadas en la fabricación de clinker de cemento Portland, pueden desglosarse atendiendo a su naturaleza térmica o eléctrica. La energía térmica se consume prácticamente en su totalidad en el horno. La energía eléctrica resulta más difícil de estimar dependiendo más de las circunstancias de la instalación que del proceso seguido.

La bibliografía especializada acepta como consumo medio 100Kwh/T de cemento, que se consume casi exclusivamente en el accionamiento de motores, variando con el tipo de cemento fabricado. La distribución porcentual de la energía eléctrica consumida es aproximadamente la siguiente:

<b>Operación Básica</b>	<b>% de energía eléctrica consumida</b>
Preparación de las materias primas	3%
Preparación y molienda del crudo	32%
Homogeneización y conjunto del horno	21%
Molienda del cemento y acabado	41%
Servicios generales y auxiliares	2%
Iluminación	1%

*Tabla 1. Energía eléctrica consumida en cada etapa. F. Soria, 1980*

Independientemente del proceso de fabricación adoptado y del tipo de combustible utilizado para la fabricación del clinker, desde el punto de vista energético interesa considerar aquellas operaciones en las que se consume prácticamente la totalidad de la energía térmica y que son el secado, clinkerización y cocción.

Algunas operaciones presentan un consumo muy reducido en sí mismas respecto al consumo global de la instalación, pero tienen una incidencia notable en el consumo de otras operaciones, como ocurre con la homogeneización del crudo para la alimentación al horno, de cuya eficiencia depende la marcha regular del horno en buena parte. A continuación se refleja el reparto en los consumos de energía térmica para cada proceso de fabricación empleado.

Pto. de consumo	Vía Seca (%)	Vía Húmeda(%)
Secado y Molienda del crudo	0.2	-
Conjunto del horno	99.5	99
Calderas y servicios auxiliares	0.3	1

*Tabla 2. Consumo de energía térmica. F. Soria, 1980*

#### 2.4. COMPARATIVA ENTRA AMBAS VÍAS

La diferencia principal entre ambas vías de producción de clinker de cemento Portland, es la forma en la que el crudo es pretratado antes de su cocción. Mientras que en la vía seca el crudo es finamente molido hasta constituir una mezcla pulverizada, en la vía húmeda, el horno se alimenta con una pasta que contiene de un 30-40% de agua. Esta agua debe eliminarse en la fase de secado para su posterior cocción.

La fase de secado en vía húmeda, se realiza en el primer tramo del propio horno, esto se traduce en que el horno necesita de una zona adicional para efectuar la deshidratación, de forma que para una determinada producción, sean considerablemente más largos que en el proceso por vía seca.

Evaporar el agua que contiene la alimentación requiere, además de la cantidad de calor necesaria para la clinkerización, un aporte adicional de calor para eliminar el agua contenida en las materias primas. Esto se traduce en un aumento en el volumen de los gases residuales, que además de la repercusión provocada en el medio ambiente da lugar a un *desaprovechamiento* de la energía que contienen, debido a que en la vía húmeda, las materias primas no precisan de secado, y por lo tanto, el aprovechamiento del calor de los gases de escape no tiene sentido. No obstante, el precio actual de los combustibles ha puesto fuera de competencia la utilización de esta vía.

También cabe destacar que debido a la naturaleza cremosa del crudo en vía húmeda, la capacidad de silos para su almacenamiento se convierte en un 20% mayor con respecto al volumen necesitado por la vía seca, que utiliza una corriente de sólido seco en todo momento.

En la vía seca, el crudo también necesita de un secado y por lo tanto, de un aporte de calor. Aunque en este caso el secado se realiza en contracorriente con unos gases obtenidos en el propio proceso que pueden tener diversas procedencias. Generalmente los gases de escape del horno realizan este secado, recuperando el calor de éstos

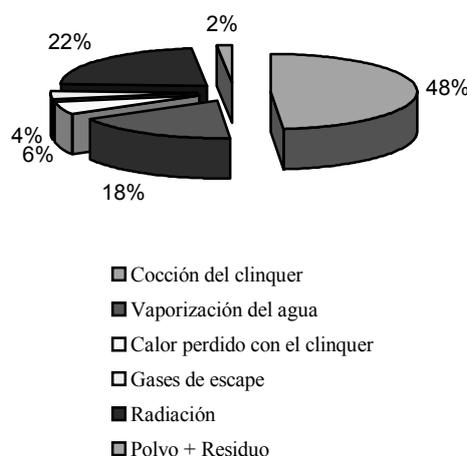
mediante un intercambiador de calor de ciclones. Además el calor arrastrado por el clinker es recuperado parcialmente por los gases del enfriador pudiendo ser utilizado también en el secado de las materias primas.

El aspecto negativo de la vía seca, es la colección de polvo asociado al proceso. Hoy día, este aspecto no constituye ningún problema debido a la regulación legislativa por parte de las autoridades y al empleo de filtros electrostáticos de gran eficacia

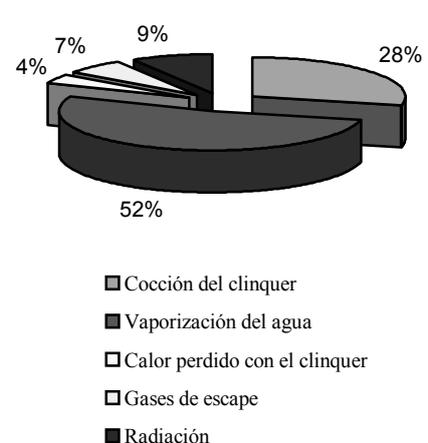
Todo esto hace que el rendimiento térmico de la vía seca sea el más elevado y su consumo específico el más reducido alcanzándose en algunos casos menos de las 800 Kcal/Kg de clinker frente a las 1.250-1.400 Kcal/ Kg de clinker del procedimiento por vía húmeda.

La energías puestas en juego en cada vía puede verse en la figura 2. En la vía húmeda, más de un 50% de la energía puesta en juego es empleada en evaporar el agua de la pasta, mientras que en la vía seca, la energía se aplica casi totalmente en el proceso de clinkerización.

*Energías puestas en juego en Vía Seca*



*Energías puestas en juego en Vía Húmeda*



*Fig 2. Energías puestas en juego en Vía seca y Húmeda.*

Si a todo esto sumamos, que la calidad del clinker obtenido en una y otra vía son idénticas, *la vía seca se convierte en la vía candidata más coherente y económica.*

La situación actual de la Industria Cementera en España es la inclinación por el método seco mediante un sistema horno rotatorio-intercambiador-enfriador. A veces, también se incorpora un precalcinador (que permite hornos rotatorios más cortos) en lugar del método húmedo (o semihúmedo) que sólo ha quedado supeditado a aquellas situaciones donde el clima es adverso y la materia prima posee una característica especial que impide llevar a cabo la vía seca, como la cercanía a una fuente de agua, etc.

La Tabla 3 muestra las distintas plantas de fabricación de cemento en toda España y la vía de fabricación que utilizan.

<b>Ciudad</b>	<b>Tipo de HORNO</b>
Aboño	Húmedo
Alcalá de Guadaíra	Seco
Alcanar	Seco
Arrigorriaga	Seco
Buñol	Semiseco
Carbomeras	Seco
Castillejo	Seco
Córdoba	Seco
Gádor	Seco
Jerez de la Frontera	Seco
La Robla	Húmedo
Lemona	Seco
Lloseta	Seco
Lorca	Seco
Mataporquera	Seco
Monjos de Penedés	Seco
Montcada	Seco
Morata de Jalón	Seco
Morata de Tajuña	Seco
Niebla	Semiseco

Olazagutia	Seco
Oural	Seco
Puertote Sagunto	Seco
San Felú de Ilobregat	Seco
San Sebastián	Seco
San Vicenç dels Horts	Seco
San Vicenç dels Raspeiq	Semiseco
Toral de los Vados	Seco
Torre de las Palomas	Seco
Torredonjimeno	Seco
Tudela Veguín	Húmedo
Vallcarca	Semiseco
Venta de baños	Seco
Vilanova i la Geltrú	Seco
Villaluenga de la Sagra	Seco
Yeles	Seco

*Tabla 3. Plantas cementeras españolas y tipo de horno instalado.*

La gran mayoría de las cementeras españolas utilizan la vía seca, las que utilizan la vía húmeda se encuentran actualmente sujetas a un cambio de tecnología hacia una transformación en vía seca. (Soria F. 1980 [2] / CER, 2001 [16]).

## CAPÍTULO VI PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND

Las distintas operaciones básicas de las que consta el proceso de fabricación del cemento Portland son las siguientes:

- ❑ Extracción de las materias primas y trituración.
- ❑ Dosificación y Prehomogeneización.
- ❑ Secado y Molienda del crudo.
- ❑ Homogeneización.
- ❑ Fabricación del *clinker*: calentamiento, cocción del crudo y enfriamiento del mismo.
- ❑ Molienda y Ensilado.

En el Plano 1, se muestra cada una de las operaciones básicas de las que consta el proceso de fabricación de cemento Portland, para una mejor comprensión de la relación entre las distintas etapas y su ubicación en el proceso productivo.

### 1. EXTRACCIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS Y TRITURACIÓN

El proceso de fabricación del cemento comienza con la obtención de las materias primas necesarias para conseguir la composición deseada de óxidos metálicos para la producción de clinker. Por su naturaleza, la industria está integrada a sus yacimientos que normalmente suelen ser propiedad de la fábrica y que se encuentran en las proximidades de la misma constituyendo una reserva que garantiza el normal aprovisionamiento de ésta durante su vida útil, aún considerando futuras ampliaciones.

Las materias primas esenciales, caliza y arcilla, son extraídas de las canteras mediante explotaciones a cielo abierto por voladura, taqueo, por troceo o arranque de piedra

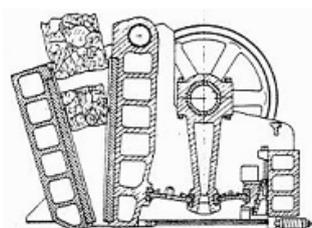
utilizando máquinas especializadas que reducen apreciablemente el esfuerzo físico y aumentan con ello la productividad. Los métodos de explotación de materias primas quedan subordinados a factores tales como: situación de estratos en relación con el nivel natural, dureza de materiales, espesor de capas, presencia de manto vegetal, etc. A diferencia de antaño, ahora es posible recurrir a programas informatizados para planificar la explotación de los yacimientos; estos medios permiten realizar, junto a los conocimientos estadísticos sobre la composición química de las rocas en cantera, una simplificación inteligente de la explotación y respetuosa con los recursos que en ciertos casos ayuda a conseguir una homogeneización de la materia prima.

El material así extraído es cargado mediante palas de gran capacidad que depositan las rocas en camiones para su transporte hasta la planta de trituración situada en cantera o en la propia fábrica, donde las materias primas sufren la primera reducción de tamaño con el objetivo de mejorar los tratamientos posteriores. En primer término, es necesario un transporte hasta la tolva de alimentación del triturador, que normalmente se instala a pie de fábrica. Dicho transporte se lleva a cabo por vehículos especialmente preparados y de gran tonelaje que se cargan por cucharas metálicas, cintas transportadoras o volquetes. La descarga sobre la tolva es por gravedad y la salida hacia la máquina se regula por dispositivos que permitan una alimentación uniforme y tranquila.

Las distintas condiciones y necesidades de cada fábrica han hecho posible la aparición en el mercado de un gran variedad de máquinas trituradoras capaces de adaptarse a las condiciones de cada una de ellas. El trabajo bien aprovechado de estas máquinas, ya sea en una o varias fases, economiza considerablemente el proceso posterior de molienda que hoy en día es el más caro en la fabricación del cemento Portland debido a su bajo rendimiento. Por ello, el grado de avance a alcanzar en la trituración viene marcado por un equilibrio entre los costes por abrasión de la máquina (normalmente de elevada inversión) y la consiguiente disminución de los costes energéticos en la posterior molienda. Dentro de las máquinas trituradoras podemos diferenciar dos grandes grupos:

- Máquinas trituradoras por aplicación de presión:

- a) *Trituradora de mandíbulas*; probablemente es la máquina de trituración más antigua en su empleo. El uso de la trituradora de mandíbulas está ampliamente extendido en la industria del cemento por su construcción relativamente sencilla y porque se fabrica en unidades de gran tamaño. Es muy adecuada para grandes bloques y materiales duros, secos y cristalinos, produce un tamaño de salida muy uniforme y la mayoría de las veces se utiliza como trituradora preliminar. El desmenuzamiento del material de alimentación se desarrolla entre dos mandíbulas de las que una es fija y la otra la mueve la presión ejercida por palancas acodadas. Las mandíbulas están revestidas con blindajes de perfil dentado en acero templado y el marco de la máquina es de acero fundido.



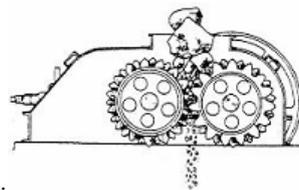
*Fig. 1. Trituradora de mandíbulas*

- b) *Trituradora giratoria o de cono*; los trituradores de cono también llamados trituradores giratorios, desmenuzan el material entre un anillo de trituración estacionario cónico y otro cono triturador que realiza un movimiento circular alrededor de un eje vertical apoyado por la parte inferior del cono rotatorio y dispuesto excéntricamente al cono estacionario. En este caso, la trituración se realiza por presión y también parcialmente por flexión.



*Fig. 2. Sección de una trituradora de cono y acción rompedora de la misma*

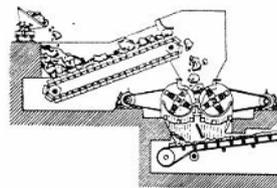
- c) *Trituradoras de rodillos*; el desmenuzamiento en las trituradoras de rodillos se basa en que se consigue situar el material que se ha de tratar entre dos cilindros rotatorios que trituran el material por la presión que éstos ejercen sobre él. El tamaño de grano final depende de la distancia entre ambos cilindros y dependiendo del material a tratar, la superficie de los cilindros trituradores puede ser lisa, con nervaduras o estar provista de dentado. Son máquinas indicadas para la trituración de arcilla, greda o materiales similares blandos.



*Fig. 3. Trituradora de rodillos*

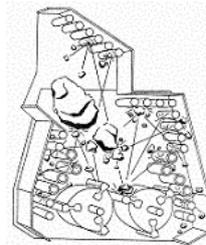
- Máquinas trituradoras por choque:

- a) *Trituradora de martillos*; las trituradoras de martillo están ampliamente extendidas en la industria del cemento, se utilizan para triturar calizas duras y de dureza media e incluso para triturar margas, puede aplicarse como máquina de primera y segunda fase en la trituración y se construyen con uno o dos juegos de martillos. Produce más finos a su salida que las anteriores y es muy indicada para preparar la alimentación de los molinos.



*Fig. 4. Trituradora de martillos de dos rotos*

- b) *Trituradora de impacto o choque*; en el desmenuzamiento por choque el material es lanzado a gran velocidad hacia unas placas estacionarias para choque y se estrella contra ellas. El desmenuzamiento también se realiza por percusión a cargo de los listones del rotor sobre el material, así como por choques recíprocos de trozos del material de trituración, aunque el componente predominante de trabajo de trituración es la acción del choque contra las placas. El desmenuzamiento del material se realiza de acuerdo con los planos de exfoliación del material, por consiguiente, sólo se puede aplicar la trituración por choque a materiales pétreos quebradizos de dureza media, puesto que los materiales plásticos no se rompen mediante choque. Las trituradoras por impacto o choque consisten en uno o dos rotores provistos de listones para el lanzamiento del material comunicando de esta forma gran velocidad al mismo.



*Fig. 5. Trituradora de impacto de dos rotores con carcasa*

## 2. DOSIFICACIÓN Y PREHOMOGENEIZACIÓN

Mientras que las fábricas de cemento elaboraban cantidades de materias primas relativamente pequeñas y el principal o principales componentes mostraban considerables oscilaciones en su contenido en  $\text{CaCO}_3$ , era posible reducir en alguna medida las dispersiones mediante extracción selectiva de los materiales de la cantera.

Con capacidades de producción crecientes en las fábricas de cemento, la selección en canteras se mostró antieconómica y surgió la necesidad de considerar la operación de *prehomogeneización*. Esta operación consiste en realizar una regularización, es decir, un mezclado de las materias primas.

La mayoría de las veces sólo se somete a prehomogeneización el componente principal de crudo para cemento, es decir, la caliza. En múltiples casos los componentes arcillosos y margosos son químicamente homogéneos aunque hay fábricas de cemento que se ven obligadas a someterlos también a homogeneización. Otros componentes del crudo, tales como el cuarzo o minerales de hierro, son casi siempre homogéneos y no requieren prehomogeneización alguna y si se utilizan en las fábricas de cemento escorias de alto horno granuladas, es asimismo ventajoso someterlas a prehomogeneización.

La prehomogeneización se puede dividir en dos grupos:

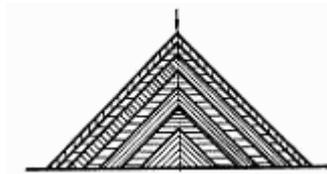
- *Prehomogeneización conjunta de las materias primas componentes:* en la que se exige una composición química equilibrada y por lo tanto, la dosificación de los componentes se realiza antes de llevarlo al *lecho de mezcla*.
- *Prehomogeneización particular de los componentes individualizados:* es el método más empleado en la industria del cemento para regularizar la composición, en éste método los componentes prehomogeneizados individualmente se aportan al proceso de acuerdo con la composición química calculada para la composición del crudo, y se llevan al molino mediante dispositivos del tipo de recipientes alimentadores o de básculas dosificadoras. El análisis químico del material que sale del molino proporciona información acerca de las correcciones que eventualmente se hayan de realizar.

Para la formación de lechos de mezcla, son adecuados materiales desmenuzados con tamaño de hasta 25 mm. La calidad del lecho de mezcla viene determinada por el tipo de material y el modo de realizar el apilamiento. La formación de lechos de mezcla se suele practicar a lo largo de un eje longitudinal, mientras que el vaciado se realiza transversalmente. Cuando el espacio supone un problema se procede a formar pilas en forma circular, aunque las primeras son un 30-40% más baratas que las circulares.

En el apilamiento para lechos de mezcla se aplican los siguientes métodos:

▪ Realización de apilamientos longitudinales

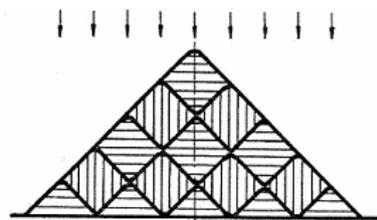
- a) *Realización con estructura a dos aguas, como un tejado (método Chevron);* la formación más usual de apilamiento longitudinal es la que tiene una estructura de cubierta a dos aguas. El material se apila en capas sobre la longitud total del lecho de mezcla, tal y como está representado en la siguiente figura:



*Fig. 6. Estructura a dos aguas de un lecho de mezcla (Método Chevron)*

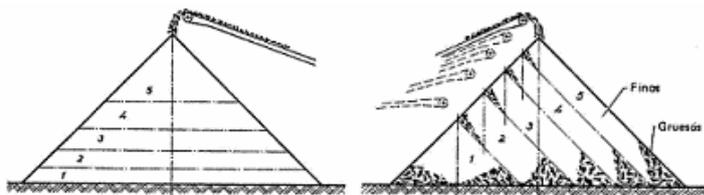
En la formación del apilamiento las capas individuales quedan dispuestas unas encima de otras en forma de cubierta a dos aguas. El apilamiento es sencillo puesto que a lo largo del lecho sólo se utiliza un punto de descarga. Se ha de regular la velocidad del dispositivo depositador para conseguir el espesor de capa deseado.

- b) *Formación por filas (o método Windrow);* en este tipo de formación de lechos de mezcla, las capas de material están dispuestas en filas, unas a continuación de las otras y por filas superpuestas; con tal disposición se dan pocas posibilidades a la segregación de partículas y cuanto mayor es el número de filas menor es la diferencia granulométrica.



*Fig. 7. Estructura por filas de un lecho de mezcla.*

- c) Para formar lechos de mezclas, existen una serie de métodos distintos a los citados, se muestran a continuación los más importantes:



*Fig. 8. Lechos de mezcla mediante formación de superficies y mediante formación de franjas longitudinales.*

- *Realización de apilamientos en anillo.*

La formación de un lecho de mezcla en anillo se realiza mediante una cinta transportadora oscilante montada en el centro de apilamiento en anillo. La sección del apilamiento en anillo para lechos de mezcla debe ser triangular o trapecial. En este caso los métodos de formación que se utilizan son los de *Chevron*, *Windrow* y el de las *capas horizontales*.

La recogida de los materiales apilados se realiza mediante dos dispositivos: rascador y noria de cangilones. Esta recogida de materiales en los lechos de mezcla se practica de modo frontal, por rebanadas, de forma que cada una de estas corresponde cualitativamente al promedio del lecho de mezcla.

El horno debe recibir una alimentación químicamente homogénea, esto se consigue mediante el control de la correcta dosificación de las materias primas que forman la alimentación al molino de crudo.

La operación de *dosificación* se realiza en función del tipo de prehomogeneización llevada a cabo. Si se lleva a cabo una prehomogeneización conjunta de las materias primas componentes, la dosificación se realiza antes de llevarlos al lecho de mezcla añadiendo a

éste los componentes correctores oportunos. Sin embargo, cuando se prehomogeneiza particularmente cada uno de los componentes, la dosificación tiene lugar tras el mezclado de las materias primas por separado aportando la cantidad de materia prima adecuada para la obtención de un crudo de composición química óptima que constituirá la alimentación en el proceso siguiente: la molienda.

En la dosificación de las materias primas, ya sea previa o ulterior a la prehomogeneización, a la hora de determinar las proporciones adecuadas de cada componente en la mezcla, conviene conocer la composición química de cada uno de éstos y comprobar si sus “*módulos silícico y de fundentes*” se encuentran dentro de los límites normales. El cálculo de la composición del crudo que tiene por objeto determinar las relaciones de las cantidades de materia prima que hay que aportar, para dar al clinker obtenido tras la cocción, la composición química y mineralógica deseada, puede realizarse mediante diferentes métodos de cálculo, desde los más sencillos a los más complejos, dependiendo de la experiencia dentro de la industria y del tiempo disponible para llevar a efecto la mezcla, también dependerá del número de materias primas que se va a utilizar. Entre los distintos métodos de cálculo existentes podemos nombrar: “*método de cálculo cruzado*”, “*método de cálculo según el módulo hidráulico*” y el “*método de cálculo a partir del grado de saturación de la cal*”.

Las materias primas se dosifican de manera controlada con báscula y se introducen de forma conjunta a los molinos. La proporción relativa de cada componente se ajusta de manera automática en base a los resultados de los análisis efectuados por analizadores de rayos X.

### **3. SECADO Y MOLIENDA DEL CRUDO**

La finalidad de la molienda es reducir el tamaño de las partículas del crudo para que las reacciones químicas de cocción en el horno puedan realizarse de forma adecuada. La molienda de las materias primas se efectuará en seco o en húmedo dependiendo del proceso empleado en la fabricación del clinker.

En el caso de la vía seca, la humedad del crudo impone limitaciones técnicas en la molienda y es por ello necesario proceder a un secado previo del crudo. Sólo los materiales secos pueden molerse finamente; un producto húmedo se almohadilla en los molinos, se mueve mal en los transportes y su homogeneización es imperfecta.

La vía húmeda presenta la ventaja de que la pasta obtenida permite mejores homogeneizaciones, aunque sea a costa de la evaporación del agua que contiene en el horno, con el correspondiente gasto de combustible que al precio actual del mismo, hace prohibitiva la utilización de este tipo de vía.

El proceso de secado consistente en la separación del agua libre puede hacerse por *métodos mecánicos* o por *métodos térmicos*.

Entre los primeros se encuentran el prensado, la centrifugación y el filtrado por vacío. De ellos, sólo el último presenta algún interés en la industria del cemento en la reducción de agua en las pastas crudas de vía húmeda para su alimentación al horno.

Los métodos térmicos son los de aplicación normal en esta industria. Consisten en introducir calor en el sistema y separar la humedad mediante cambio de fase al estado vapor, de forma que la acción continuada del calor mantiene la vaporización y el desplazamiento del equilibrio líquido-vapor hasta esta segunda fase.

La cantidad de calor necesario en la desecación depende de la naturaleza de las materias primas y del grado de humedad de éstas requerido a la entrada y a la salida del sistema. La humedad a la entrada del secadero oscila entre el 5-25 %, y a la salida entre 0.5-2 %.

El secado necesita unos gases que pueden tener diversas procedencias. En los sistemas vía seca, generalmente los gases de escape del horno realizan el secado, bien en su totalidad, bien apoyados por gases procedentes de un hogar auxiliar cuando la humedad del crudo lo hace necesario.

Las unidades más corrientes en el proceso de secado de la materias primas son los *tambores de secado* y los *molinos secaderos*:

- ☑ *Tambores de secado*. El tambor de secado (también llamado secaderos rotatorios), consiste en un cilindro metálico de chapa soldada que gira sobre cojinetes apropiados teniendo una leve inclinación en relación con la horizontal. Los sólidos que se introducen por un extremo del cilindro se desplazan a lo largo de él debido a la rotación, el efecto de la carga y la pendiente del cilindro, y se descargan por el otro extremo como producto acabado. Los tambores de secado se clasifican como directos o indirectos cuando se atiende al mecanismo de transmisión de calor.
- a) En los tambores de secado directos, el calor se aplica o elimina de los sólidos por intercambio directo entre éstos y el gas circulante realizado por convección principalmente.
  - b) En los indirectos, el medio de calentamiento no tiene un contacto físico con los sólidos y se separa de ellos por medio de un tubo o una pared metálica, realizándose la transmisión de calor en este caso, por radiación y convección.

Los secaderos de tambor también pueden clasificarse en dependientes o independientes, atendiendo a la procedencia de los gases utilizados en el proceso de secado. Si éstos son los procedentes del escape de gases del horno rotatorio, se dice que son dependientes. Si por el contrario, los gases provienen de un hogar auxiliar ajeno al proceso, se dice que son independientes.

- ☑ *Molinos secaderos*. En las modernas instalaciones, lo usual es que el secado y la molienda de las materias primas se lleven a cabo de forma simultánea. El secado se realiza entonces, durante el proceso de desmenuzamiento por lo que se establece un intercambio térmico más fácil, ya que en los secaderos de tambor no siempre se elimina la totalidad del agua capilar contenida en las trazas de mayor tamaño. Entre los tipos de molinos secaderos más importantes podemos citar el *Molino Doppelrotator* de la firma *Polysius*, donde la materia prima húmeda entra conjuntamente con la corriente de gases calientes a una cámara de secado previo

donde se produce un secado intensivo, y luego el material pasa a una segunda cámara de molienda grosera.

#### 4. HOMOGENEIZACIÓN

Una vez que el material ha sufrido la etapa de molienda, ya sea en forma de polvo o de pasta, pasa a los silos de homogeneización.

En vía húmeda, la pasta procedente del molino se bombea hacia unos vasos cilíndricos de forma cónica provistos de una serie de entradas para la admisión de aire comprimido, con lo que se asegura la homogeneización del silo en pocos minutos.

Mediante vía seca, el polvo se transporta a una serie de depósitos cilíndricos verticales donde la mezcla pulverulenta es homogeneizada mediante agitación neumática por inyección de aire a presión y temperatura adecuada. El elemento básico de la mezcla en seco por vía neumática, lo constituyen las cajas de dispersión de aire, con que se dotan los fondos de los silos. El componente principal de las cajas de dispersión de aire son las placas cerámicas porosas a través de las cuales el aire se impulsa a presión sobre el crudo y engendra en su seno finísimas corrientes de aire, con lo cual el crudo pasa a un estado de *pseudolíquido*. Estos elementos para la aireación son semipermeables, es decir, el aire penetra a través de las placas hacia arriba, mientras que, suspendido el acceso de aire, el polvo no puede caer hacia abajo a través de las placas.

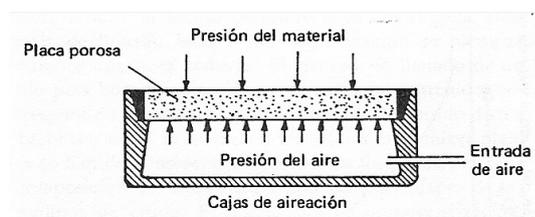


Fig. 9. Caja de dispersión de aire

Entre los procesos de homogeneización más importantes cabe destacar:

- ☑ Proceso *Fuller*. Este proceso también es conocido como sistema por cuadrantes. En este caso las cajas de dispersión de los fondos de silos están reunidas en cuadrantes, de los cuáles, cada uno de la serie actúa como cuadrante de la mezcla según cierta secuencia, mientras que los otros tres lo hacen como cuadrantes de aireación. La aportación total de aire la suministran dos compresores, uno para el aire de mezcla y el otro para el de aireación. Mediante este método se crea una columna de material muy aireado, de pequeña densidad, por encima del cuadrante de mezcla. El material sobre los cuadrantes de aireación, más denso, penetra de modo constante en la columna de material dispuesta sobre el cuadrante de mezcla y desplaza al material ligero hacia arriba, con lo cual se establece una circulación vertical y permanente del material.
  
- ☑ *Sistema de homogeneización Polysius*. Este procedimiento consiste en dividir el fondo del silo en sectores de forma que se airean simultáneamente, dos sectores diametralmente opuestos y un campo circular en el centro del fondo del silo (sectores 1,3,5). El campo 5 está constantemente aireado, durante este tiempo al resto de los sectores no se les inyecta aire comprimido. Tras un intervalo de tiempo preestablecido se conectan los sectores 2 y 4. Este sistema está subdividido en 9 campos de aireación que pueden alimentarse con diferentes cantidades de aire.

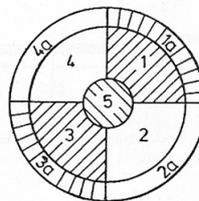


Fig. 10. Fondo de silo en método Polysius

- ☑ Proceso *Geiser*. Este sistema funciona de modo parecido al de *Polysius* aunque en este caso, el fondo está dividido en cinco anillos circulares, como se representa en la figura 12. Las franjas pares e impares forman dos grupos, de forma que a ambos se les airea alternativa y automáticamente. De esta forma, la mitad del silo permanece siempre activa. La aireación alternada genera un desplazamiento constante del material contenido en el silo y por ello, se produce la homogeneización.

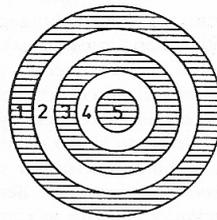


Fig. 11. Fondo de silo en método *Geiser*.

Hasta la etapa de homogeneización, comprende el pretratamiento de las materias primas antes de ser introducidas en el horno rotatorio, que constituye la unidad central en el proceso de producción de clinker de cemento Portland. De una forma más intuitiva, podemos ver cada una de las operaciones descritas anteriormente en la figura 12:

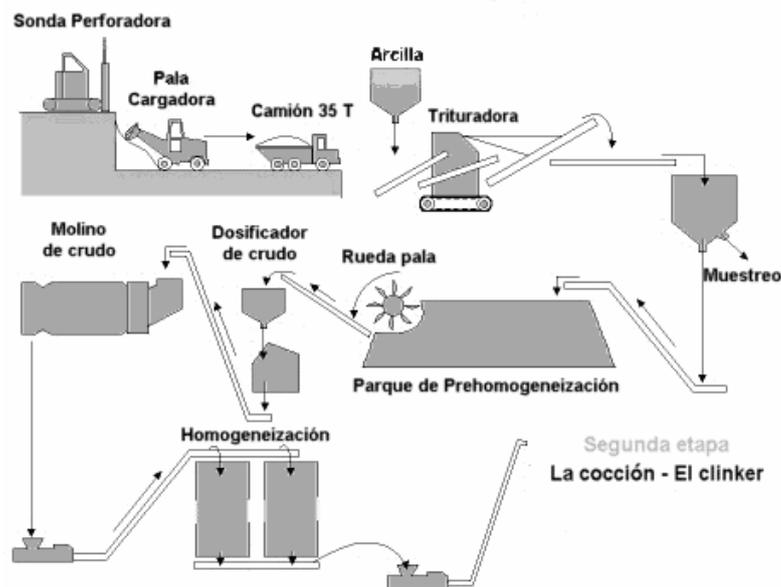


Fig. 12. Pretratamiento de las materias primas hasta la etapa de cocción

## 5. FABRICACIÓN DEL *CLINKER*: CALENTAMIENTO, COCCIÓN DEL CRUDO Y ENFRIAMIENTO DEL MISMO.

### 5.1. CALENTAMIENTO DEL CRUDO.

Muy tempranamente se advirtió que el calor que escapa a la salida del horno rotatorio, además de aprovecharse para la preparación del crudo, podía utilizarse con mayor provecho en el precalentamiento del material de alimentación. Con esta finalidad, la zona de entrada del horno se ha equipado con una diversidad de mecanismos internos como cadenas, dispositivos interiores de acero, material cerámico... que actúan como intercambiadores de calor, facilitando un mayor área de contacto entre el material crudo y los gases calientes.

Si el horno se alimenta mediante una alimentación seca, estos dispositivos interiores levantarán una gran cantidad de polvo, que será arrastrado con los gases de combustión hacia la entrada del horno. Este polvo, puede recuperarse parcialmente mediante un ciclón con un simple intercambiador de calor. A partir de este principio, los intercambiadores de calor han evolucionado hasta sus formas más sofisticadas con el fin de mejorar el rendimiento térmico de la cocción.

Los intercambiadores de calor, se sitúan en el exterior del horno junto a su extremo de alimentación, por donde salen los gases calientes que a su paso por el precalentador, transmiten su calor a la alimentación.

Puesto que una parte considerable del proceso térmico en el horno rotatorio, se lleva a cabo fuera de él, es decir, en el precalentador, el horno por consiguiente, podrá ser de menor longitud.

Entre los intercambiadores de calor más importantes podemos destacar el intercambiador de ciclones *Humboldt*, el intercambiador de calor *Dopol de Polysius*, el intercambiador de calor *Miag*, el intercambiador *Krupp a contracorriente* y los *intercambiadores con precalcinador*.

## 5.2. COCCIÓN DEL CRUDO

La cocción del crudo tiene lugar en el *horno rotatorio*, unidad central del proceso de producción de cemento, donde se dan las reacciones de sinterización necesarias para la obtención del clinker de cemento portland.

El horno rotatorio consiste en un tubo cilíndrico de acero revestido interiormente de material refractario, con una longitud que oscila entre 60-170 m y un diámetro de 1.8-7.5 m. Los hornos rotatorios suelen tener una inclinación con respecto al plano horizontal de 2-5 % y giran a una velocidad de hasta 180 rev/h.

En el extremo situado a nivel más bajo, se encuentra el mechero o quemador, y por el otro extremo, situado a nivel más alto, se introduce el crudo seco si el proceso es por vía seca, o bien la pasta, si es por vía húmeda.

Los hornos para vía húmeda, presentan una longitud mayor que los hornos para vía seca, debido a que han de disponer de una zona adicional para el secado del crudo donde se evapora el agua contenida en la pasta. A este secado contribuyen determinados dispositivos que permiten un mayor contacto de los gases calientes con aquella.

Por efecto de la inclinación y rotación del horno, el crudo se mueve lentamente y en contracorriente con los gases de combustión generados en el quemador, hacia el extremo donde está situado el mechero y la boca de descarga, en su desplazamiento va adquiriendo cada vez más temperatura a la vez que se van produciendo una serie de transformaciones físicas y químicas en el crudo.

A una temperatura aproximada de 1250° C-1290°C se inicia la formación progresiva de fase líquida, en el seno de la cual, la cal y la sílice se combinan y cristalizan, de forma que a la temperatura de 1450°C o temperatura de sinterización, la cal y la sílice combinadas en fase líquida reaccionan formando el *silicato tricálcico*, que es el constituyente más importante del clinker y el que le confiere sus altas resistencias mecánicas, es decir, se llevan a cabo las reacciones químicas necesarias para la obtención del *clinker de cemento Portland*.

Una vez que el material pasa por debajo del cuello de la llama, entra en la llamada zona de enfriamiento dentro del horno, donde el material es enfriado hasta una temperatura de 1000° C mediante el aire entrante procedente del enfriador.

Como se ha mencionado anteriormente, atendiendo a la vía empleada para la obtención de cemento, los hornos se dividen en dos tipos: *hornos vía seca* y *hornos vía húmeda*. Esta distinción condiciona los distintos dispositivos con que se ha equipado el interior del horno para facilitar un mayor área de contacto entre el material crudo y los gases calientes. Entre estos dispositivos podemos destacar las cadenas de cortinas y de guirnaldas y los precalentadores de pasta para *hornos vía húmeda*, y los dispositivos internos de cerámica y listones elevadores de material en *hornos vía seca*.



*Fig. 13. Imagen de un horno rotatorio.*

### **5.3. ENFRIAMIENTO DEL CLINKER.**

Rebasada la fase de sinterización y enfriamiento en el horno, es necesario proceder a un enfriamiento del clinker fuera de éste. Dos son las razones que justifican el enfriamiento del clinker:

- Recuperación de calor, el aire frío inyectado para el enfriamiento del clinker se calienta hasta alcanzar una temperatura de 350-600° C, y es retornado al horno como aire secundario de combustión. Si la cantidad de aire producido sobrepasa estas necesidades, el resto puede emplearse en el secado del carbón.

- Mejora en las propiedades del producto.
  - El enfriamiento debe ser rápido para evitar que determinados óxidos formados por impurezas del crudo cristalicen.
  - Llevar el clinker a una temperatura apta para su adecuada manipulación y almacenamiento.

Entre los enfriadores más importantes pueden citarse: el *enfriador de tambor rotatorio*, el *enfriador planetario* y el *enfriador de parrilla*.

De una forma más intuitiva, podemos ver cada una de las operaciones descritas anteriormente en la figura 14:

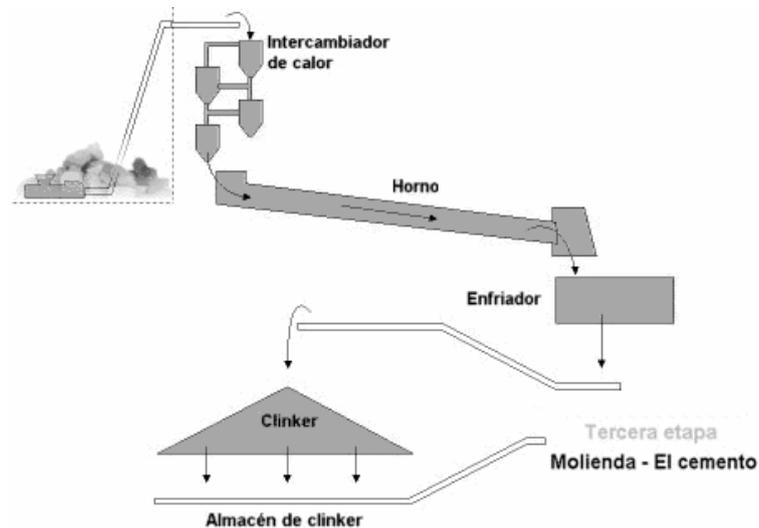


Fig. 14. Calentamiento, cocción del crudo y enfriamiento del mismo

## **6. MOLIENDA Y ENSILADO.**

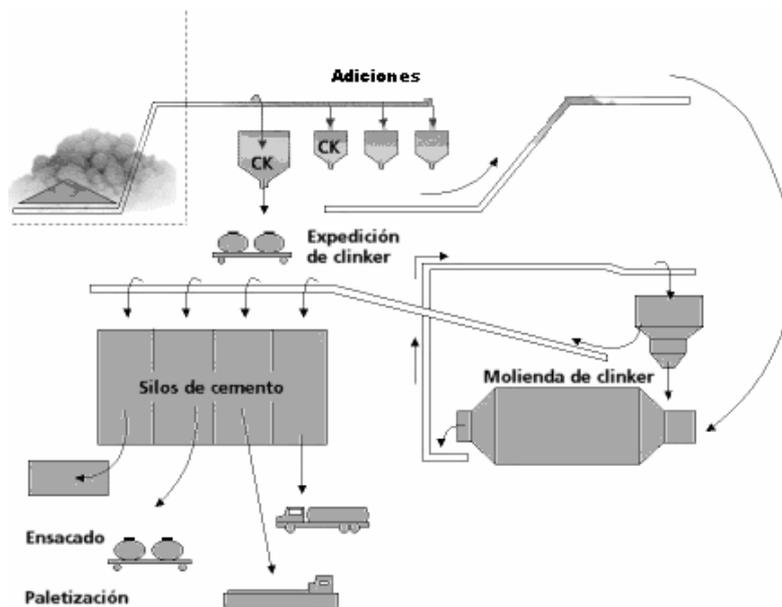
Una vez enfriado, el clinker se almacena en unos silos y posteriormente se muele conjuntamente con una adición de yeso o sulfato cálcico deshidratado, en proporción del 3-5 %, que actúa como retardador del fraguado.

A veces, a estos componentes se añaden aditivos, que son productos que en pequeñas dosis, inferiores al 1% en masa, se pueden utilizar eventualmente para facilitar el proceso de fabricación de cemento (coadyuvantes de la molienda del clinker) o para aportar al cemento o a sus derivados (morteros y hormigones) algún comportamiento específico como pueda ser actuar como inclusores de aire.

Los aditivos no deben perjudicar las propiedades y el comportamiento de los morteros y hormigones frescos o endurecidos, ni debe provocar, acelerar o facilitar la corrosión de la armadura del hormigón armado.

El material obtenido en esta molienda es el cemento Portland, sin embargo, en esta última fase de molienda del clinker se pueden introducir otros constituyentes tales como filler calizos, escoria de alto horno, puzolanas, cenizas volantes, a fin de obtener cementos Portland con características especiales.

Después de la molienda el cemento se enfría y se expende en sacos 35 kg. según normativa.



*Fig. 15. Molienda y ensilado.*

(Duda W. H. 1977 [1] / Soria F. 1980 [2] )

## CAPÍTULO VII

### HORNO ROTATORIO. UNIDAD CENTRAL DEL PROCESO CEMENTERO

#### 1. PRIMER HORNO ROTATORIO

Hace ahora más de cien años, se puso en funcionamiento el primer horno rotatorio fiable para la cocción del clinker, un acontecimiento que sin duda revolucionó la fabricación de cemento. El horno rotativo o rotatorio para la cocción de cemento fue inventado en 1884 por el inglés *Frederik Ransome*, y perfeccionado posteriormente EE.UU. por *Thomas Edison* en 1903. *Ransome* patentó su invención, primero en Inglaterra, patente inglesa nº 5442 del 2 de mayo de 1885 con el título: “*Perfeccionamiento en la industria del cemento*”. En figura 1 se reproduce el dibujo del horno anexo a la patente *Ransome*:

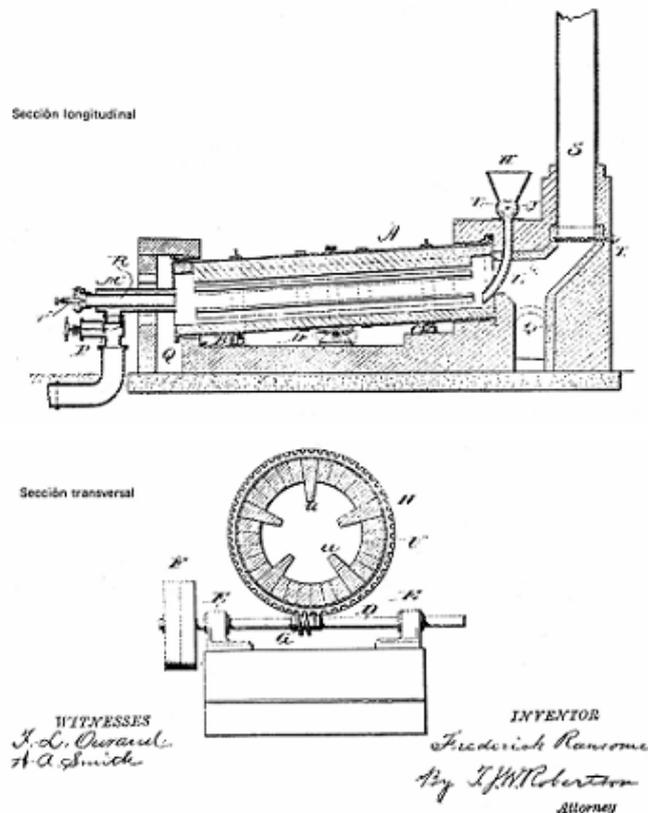


Fig 1. Sección transversal y longitudinal del dibujo del horno anexo a la patente *Ransome*. (W.H. Duda, 1977 [1]).

El horno rotatorio revolucionó de tal modo la industria del cemento que puede considerarse la invención más importante en fabricación desde la introducción de los molinos de bolas. Además es uno de los tipos más importantes de los hornos de proceso porque es probablemente el más empleado por las más diversas industrias.

En la fabricación de cemento, la cal, la dolomita y la magnesia, se emplean centenares de estos hornos. Otros muchos se utilizan para deshidratar, tostar o calcinar materiales como bauxita, alúmina, minerales de hierro, cromita y fosfatos. También se utilizan para calcinar litopón y pigmentos de titanio, para regenerar adsorbentes, para producir sulfuros de bario y sodio, para descomponer el sulfato ferroso y para desfluorar los fosfatos naturales. Actualmente el clinker de cemento da el mayor tonelaje de los materiales tratados en hornos rotatorios, constituyendo la parte central del proceso en sí.

Además de ser empleados para las operaciones a elevada temperatura que se acaban de indicar, también se utilizan como secadores a temperaturas bajas en muchas otras industrias. Y aunque el diseño de un horno rotatorio es algo laborioso, su aplicación resulta útil en aquellos procesos en los que se requiere tiempos de residencia relativamente largos, un calentamiento directo o una operación continua por la escala del proceso.

Una razón para su intensa aplicación es su adaptabilidad a las operaciones continuas; pueden construirse para capacidades muy pequeñas o muy grandes. Por otro lado, cualquier tamaño dado tiene una flexibilidad considerable cuando está equipado para poder variar la capacidad, la temperatura y el periodo de tratamiento térmico.

Es uno de los pocos tipos de hornos de proceso sobre los cuales han intentado estudios desde el punto de vista de la ingeniería química.

## 2. PARTES DEL HORNO ROTATORIO.

El horno rotatorio está formado por un cilindro de acero ligeramente inclinado sobre el plano horizontal, que gira alrededor de su eje central permitiendo así la circulación del material en su interior en la dirección axial. Durante la marcha, el horno describe un movimiento de rotación lento, de 0.3 a 3 r.p.m, según su diámetro e inclinación, y el material se alimenta de un modo continuo por su extremo superior en forma de pasta, nódulos húmedos o polvo seco. Este material sufrirá un calentamiento a elevada temperatura en el interior del horno debido a la marcha en contracorriente con unos gases obtenidos en la quema de determinados combustibles que cederán, poco a poco, su calor al crudo. (Soria F. 1980 [2])

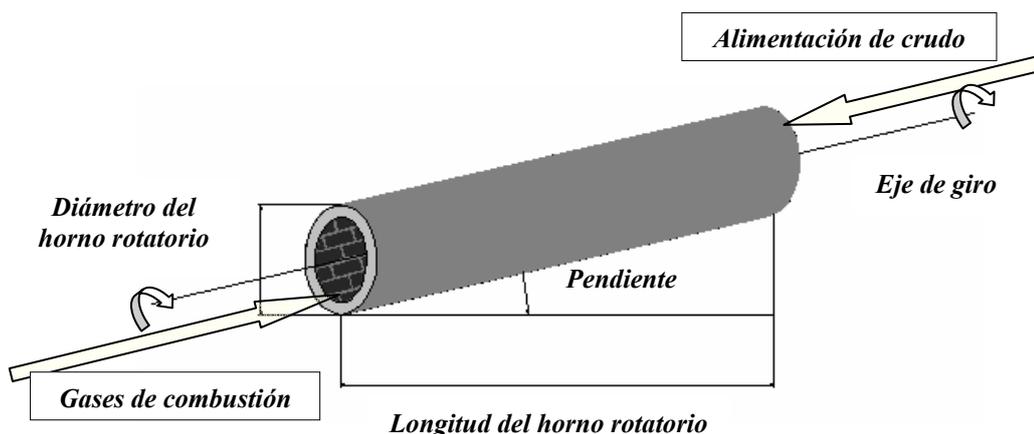


Fig 2. Partes del horno rotatorio

Las dimensiones del primer horno rotatorio patentado por *Ransome* para cemento eran de 1.80-2,0 m de diámetro y una longitud de unos 20-25 m, con caudales de 30-50 t/día. Estas dimensiones han ido aumentando de forma gradual, deteniéndose durante cierto tiempo en un tamaño máximo de 4×150. En años recientes se han instalado unidades mucho mayores para la producción de cemento, llegando a dimensiones de 1,80-7.5 m de diámetro y 60-170 m de longitud.

## 2.1 CUERPO DEL HORNO

La parte principal del horno la constituye el cuerpo, que está formado por la *carcasa* de acero y por el *refractario* que ocupa toda la superficie interna de la propia virola y que soportará las elevadas temperaturas de operación. (Colina F. G, Caballero I. y Costa J.2002 [13])

### 2.1.1. CARCASA

La carcasa de los hornos rotatorios modernos se construyen mediante la unión soldada de virolas de acero al 1 % en carbono de gran anchura y espesor, este espesor es variable dependiendo de la temperatura de la zona del horno.

El control de la temperatura de la carcasa es muy importante en el proceso de cocción, por ello, normalmente en las cementeras, la temperatura de la carcasa externa de un horno rotatorio es controlada desde la sala de control, mediante anillos colectores de termopar colocados a lo largo de toda la longitud del mismo, para indicar y registrar las temperaturas internas. Un aumento de la temperatura en una zona concreta en la carcasa externa del horno puede ser sinónimo de pérdida de pared de ladrillo refractario en esa zona, que se traduce en un aumento de las pérdidas de calor al exterior. Asimismo, la carcasa debe estar bien refrigerada con los dispositivos pertinentes bien por agua o bien por aire.

La carcasa se encuentra revestida interiormente en parte o en toda su superficie, con ladrillos refractarios para evitar el sobrecalentamiento del acero, que traería como consecuencia su debilitamiento. Ocasionalmente, se utilizan en el interior del horno dos revestimientos, siendo el que queda adherido a la carcasa de ladrillo aislante. El aislamiento no suele utilizarse con mucha frecuencia en el exterior de la carcasa debiéndose tomar precauciones para no sobrecalentarla debido a este confinamiento.

En un horno rotatorio recubierto interiormente en su extremo frío, es importante el perfecto sellado entre el revestimiento y la carcasa de acero, ya que pueden producirse pérdidas de

líquido que pasen a través del revestimiento a la envoltura en la utilización de alimentaciones mojadas.

### 2.1.1.1. REFRIGERACIÓN DE LA CARCASA METÁLICA DEL HORNO ROTATORIO

Experiencias efectuadas en la industria del cemento han mostrado que la refrigeración de la chapa del horno correspondiente a la zona de sinterización, influye de modo positivo en la duración del refractario, hasta el orden de 1.5-2 veces la correspondiente al trabajo sin refrigeración de la chapa.

Sin refrigeración en la chapa, se forma sobre el revestimiento refractario una fina capa de la fase fluida del clinker, de baja viscosidad que no da lugar a la formación de costra protectora de clinker. Por el enfriamiento de la chapa, también se enfría el forro refractario y la fina capa fundida de la fase líquida del clinker, al llegar al refractario frío, hace que su viscosidad se eleve y crea con ello las condiciones favorables para la formación de costra. Variando la cantidad de agua fría es posible controlar el espesor de esta costra protectora.

La refrigeración por agua no produce ningún aumento de pérdida de calor por la chapa del horno en la zona de sinterización, por el contrario, se ha afirmado que disminuye la pérdida por radiación debido a la zona aislante formada por la costra.

Prácticamente, la refrigeración de la envoltura de chapa en la zona de sinterización se realiza tal como se representa en la figura 3.

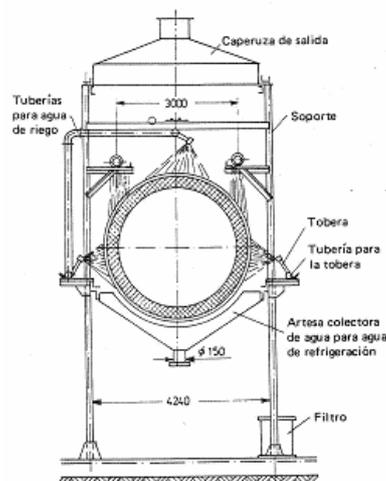


Fig 3. Refrigeración de la chapa del horno.

El dispositivo de refrigeración consiste en dos tuberías para riego de 150 mm de diámetro cada una. A lo largo de su longitud total tienen dos filas de agujeros para riego, de 4 mm de diámetro dispuestas de 30 en 30 mm. La canalización para el riego está subdividida en ocho secciones, cada una con alimentación individual de agua. En los extremos de las tuberías los agujeros están más distanciados entre sí para extender así la curva de temperaturas. Además de las tuberías para riego figuran otras tres tuberías para proyectar agua finamente dispersada. Después de poner en marcha en horno, se inicia la refrigeración de modo paulatino, conectando por tramos la alimentación de agua a las tuberías que la proyectan dispersada, y así impedir un enfriamiento brusco. Luego se ponen en funcionamiento las tuberías de riego, y según las necesidades se mantiene o cesa la dispersión fina.

La refrigeración mediante aire se realiza mediante motoventiladores, el número puede ser variable dependiendo de la longitud del horno, incrementándose el número de éstos conforme nos acercamos a la zona de sinterización del mismo, donde la carcasa alcanza las temperaturas más altas. (Duda W. H. 1977 [1])

### **2.1.2. REVESTIMIENTO REFRACTARIO**

No solo el horno rotatorio necesita de un revestimiento de material refractario en su interior, sino que, dentro de una planta de obtención de cemento, todos los sectores donde existan altas temperaturas y se muevan materiales o gases muy calientes requieren este revestimiento refractario; hornos en sus diversas zonas, descargas de clinker, enfriadores, colectores de polvo, calderas de recuperación, hogares auxiliares, chimeneas, etc.

El tiempo de actividad del horno depende, en primer lugar, de la calidad del revestimiento, por ello, se prescinde de su alto precio y se adquieren las mejores calidades del material para revestir el horno a fin de lograr un dilatado periodo de explotación. Las finalidades del revestimiento refractario del horno rotatorio son:

- Proteger a la envolvente de chapa del horno de las altas temperaturas de las llamas y del material en proceso de reacción.

- Rebajar las pérdidas de calor hacia el ambiente por radiación y convección de la chapa del horno.

No todas las zonas de un horno rotatorio se encuentran revestidas con el mismo material, así en la zona de secado y precalentamiento debe preverse una gran resistencia a la abrasión y por lo tanto, ladrillos duros y densos. En la zona de calcinación, aparte de la abrasión son de prever una fuerte acción corrosiva de la cal y un posible desconchamiento provocado por choques térmicos. En la zona de clinkerización, hay que tener en cuenta la resistencia a la corrosión química del clinker, la resistencia al choque térmico (paradas, marchas y movimientos de la llama) y a la abrasión. Finalmente, en la zona de enfriamiento debe emplearse un material resistente al desgaste por abrasión y al desconchamiento, lo mismo que ocurre con la descarga al enfriador.

El ladrillo más extendido en la industria cementera es el *silicoaluminoso*, con porcentaje de alúmina variable de 30-70% más utilizado para revestir la zona fría del horno rotatorio. Le siguen en importancia los *magnesianos*, tanto en forma de óxido (magnesita), como espinelas (cromo-magnesita) más utilizados para revestir las zonas calientes del horno.

En ocasiones, se fabrican piezas refractarias con el propio clinker aglomerado con cemento y se emplean en los extremos del horno, hormigones refractarios a base de cemento aluminoso como aglomerante y como árido materiales refractarios machacados. (Soria F. 1980 [2])

#### 2.1.2.1. CARACTERÍSTICAS DEL REVESTIMIENTO INTERNO DEL HORNO

Los requisitos que el forro refractario del horno ha de cubrir corresponden a las propiedades siguientes:

- Resistencia mecánica.
- Poder refractario bajo presión.

- Estabilidad ante los cambios de temperatura.
  - Capacidad de resistencia química.
  - Dilatación por el calor o estabilidad de volumen.
  - Conductividad térmica y espesor de refractario.
  - Resistencia al rozamiento.
- 
- Resistencia mecánica; los valores exigidos de resistencia mecánica para los ladrillos de refractario con alto contenido en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  es de 350-500  $\text{Kg/cm}^2$ , y para los ladrillos de dolomita o magnesita 500-700  $\text{Kg/cm}^2$ . Se puede determinar fácilmente en frío la resistencia mecánica de los ladrillos refractarios y es un punto de partida para el comportamiento de los ladrillos a la temperatura de trabajo del horno. Se ha de tener presente la estabilidad de la envolvente de chapa del horno y sus deformaciones durante la explotación. La deformación máxima, es decir, la desviación de la forma circular del cilindro de chapa, se presenta en la proximidad de los aros de rodadura y apoyo del horno. La deformación radial, llamada *ovalidad*, es decir, la diferencia de longitud entre el diámetro vertical y el horizontal de la sección del horno durante el giro puede llegar hasta el 0.3% del diámetro. Si el forro refractario no es capaz de absorber esta compresión y descompresión cíclicas, éstas pueden llegar a destruirlo.
  
  - Poder refractario bajo presión; la estabilidad frente a la carga térmica bajo presión se mide por la temperatura a la que el material refractario comienza a reblandecerse bajo una presión de 2  $\text{Kg/cm}^2$ . Una mayor estabilidad de la carga térmica bajo presión no es, en absoluto, un indicio de buen comportamiento pues pueden aparecer dificultades para la formación de costra protectora.
  
  - Estabilidad ante los cambios de temperatura; durante una vuelta del horno, que de modo normal dura un minuto, el revestimiento refractario del horno queda expuesto una vez a la acción de la alta temperatura de los gases del horno, y otra a la del material en reacción que está más frío. Las variaciones periódicas de temperatura de la superficie del ladrillo son del orden de los 400 grados. A la capacidad de soportar estos cambios tan reiterados de temperatura se designa como *resistencia ante los cambios de*

*temperatura*. El ensayo de la estabilidad ante los cambios de temperatura se realiza calentando el ladrillo a 950° C y seguidamente enfriándolo en agua fría durante 3 minutos, procedimiento que se repetirá hasta que se haya producido una pérdida de peso del 50%. Los ladrillos de alto contenido en alúmina han de soportar de 15-25 ciclos, los de magnesita de 5-15 ciclos.

- Capacidad de resistencia química; cuando la carga de sólido a cocer presenta alto contenido en CaO (65%) ofrece un carácter fuertemente básico. A las altas temperaturas de la zona de sinterización, el material presenta una actividad química muy intensa frente al revestimiento del horno. En esta zona el material contiene del orden del 20-25% de fase fundida, lo que eleva aún más la reactividad frente al ladrillo. La agresión química por el material en la zona de sinterización afecta a casi todos los materiales refractarios, excepto aquellos que tienen carácter básico como la dolomita y la magnesita y son por ello inmunes a la reacción química del clinker.
- Dilatación por el calor o estabilidad de volumen; a pesar de que la chapa del cilindro envolvente del horno tiene un coeficiente de dilatación más alto que el del forro, la dilatación lineal es menor. Esto ocurre porque normalmente la temperatura de la chapa no rebasa los 280-365 ° C mientras que la media del revestimiento refractario es de 800-900° C. En la zona de sinterización, la cara interna puede llegar hasta unos 1350-1400°C y pueden producirse fuertes compresiones que conduzcan al desconchamiento de la cara superior del ladrillo.
- Conductividad térmica y espesor de refractario; la conductividad térmica es un factor decisivo en la pérdida de calor por la piel del horno. Para la mayoría de los refractarios la conductividad térmica crece con la temperatura, pero en la magnesita y la dolomita ocurre lo contrario. La conductividad térmica depende, en gran parte, de la porosidad del material refractario. La chapa del horno tiene un coeficiente de conductividad  $\lambda=40$  Kcal/mh°C, si la conductividad del forro refractario es demasiado elevada se produce entonces una mayor elevación de la temperatura de la chapa, con mayores pérdidas de calor. Por otro lado una conductividad baja dificulta la formación de costra protectora. Junto con la conductividad térmica tiene gran

importancia el espesor del revestimiento refractario. Los espesores recomendados en función del diámetro del horno son los siguientes:

Diámetro del horno rotatorio, m	Espesor del ladrillo, mm
Hasta 3.60	180
3.60 - 4.20	200
4.20 – 5.20	230
Más de 5.20	250

*Tabla 1. Espesores recomendados de refractario en función del diámetro. W. H. Duda.1977.*

Por un lado, mayor espesor del revestimiento disminuye el volumen útil del horno y con ello su caudal; por otro, sin embargo, el mayor espesor eleva la economía térmica del horno puesto que rebaja las pérdidas por radiación.

- Resistencia al rozamiento: el material que resbala sobre el revestido refractario durante la rotación del horno produce rozamiento sobre los ladrillos. La resistencia al rozamiento también depende de la resistencia a la compresión del ladrillo refractario. La resistencia al rozamiento se mide en  $\text{cm}^3$  por  $\text{cm}^2$  de la superficie expuesta al rozamiento. Los ladrillos refractarios de magnesita y de dolomita con alto contenido de alúmina han de ofrecer una resistencia al rozamiento no superior a  $0.2 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ . Los ladrillos refractarios con una resistencia al rozamiento mayor a  $0.25 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$  no se han de utilizar para revestir el horno rotatorio.

#### 2.1.2.2. FORMACIÓN DE COSTRA PROTECTORA

Una circunstancia de gran importancia en el buen funcionamiento de los hornos y en la estabilidad del revestimiento refractario es la tendencia del clinker a adherirse a la pared del ladrillo singularmente en la zona de clinkerización. El ideal es la formación rápida de

esta “*camisa de cocción*” y en ella intervienen, fundamentalmente, las composiciones químico mineralógicas de crudo y refractario y la temperatura de trabajo.

La marcha posterior del horno exige un gran cuidado en conservar y mejorar este revestimiento, bien modificando la composición del crudo, bien modificando la finura del carbón. En la puesta en marcha, el contenido en cal del crudo debe ser bajo especialmente en mezclas que en la sinterización produzcan un bajo porcentaje de fase líquida. Si además se añade algún fundente y el carbón se muele muy fino desde los primeros momentos, es posible hacer un revestimiento de 10 cm en 10-24 horas.

Si la refrigeración del horno es muy pronunciada, el espesor de costra crece, aunque en unas condiciones de trabajo normales los espesores de la costra y del refractario varían con el tiempo. En los primeros días de instalación, el ladrillo se desgasta rápidamente lo que facilita el crecimiento gradual de la incrustación hasta el momento de su renovación. Esta es la causa por la cual no es necesario el empleo de espesores de refractario superiores a 15-17 cm.

En la marcha de un horno de cemento pueden producirse crecimientos localizados e insospechados de la costra protectora que pueden provocar perturbaciones en la marcha de los materiales e incluso la parada definitiva del horno. Estos desarrollos de costra se denominan anillos por su forma y son un inconveniente que provoca una sensible disminución de la producción y un desgaste prematuro del revestimiento refractario al provocar la destrucción de aquellos. De un modo general, podemos distinguir tres tipos de anillos:

- Anillos de cenizas, próximos a la descarga del horno,
- Anillos de clinker, de 6 a 20 m de la descarga,
- Anillos de pasta, próximos al extremo de alimentación del horno.

Para darnos cuenta de la complejidad de este fenómeno tan pernicioso en los hornos de cemento, se señalan algunas de las múltiples causas a que se atribuye su formación:

- ❑ Cambio de las características del combustible.
- ❑ Variaciones en el volumen de alimentación de crudos, en la composición de los mismos o en su finura.
- ❑ Explotación intermitente del horno.
- ❑ Exceso o defecto de temperatura en el horno que da lugar a una fusión o a pegaduras.
- ❑ Instalación de refractarios inadecuados o deterioros de los mismos, o de las juntas de unión.
- ❑ Variación en la velocidad de giro del horno.
- ❑ Horno mal dimensionado en su relación longitud/diámetro.
- ❑ Elemento humano, falta de vigilancia del horno y de los instrumentos de control.

Una vez formados, no hay más remedio que eliminarlos o tratar de disminuirlos hasta su desaparición. Entre los procedimientos que se emplean podemos citar, entre otros los siguientes:

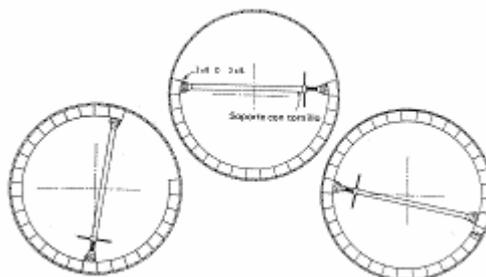
- ❑ Desviando el quemador, aproximándolo hacia el anillo y volviéndolo a colocar en su sitio repetidas veces.
  - ❑ Fundiendo el anillo con combustible y alta temperatura.
  - ❑ Empleando alternativamente, condiciones fuertemente oxidantes o reductoras en periodos relativamente cortos.
  - ❑ Parando el horno a intervalos, procurando enfriar y agrietar el anillo hasta producir su rotura.
  - ❑ Perforando y rascando con largas barras refrigeradas por agua empleando chorros de aire comprimido, vapor de agua o simplemente agua.
  - ❑ Mediante adición de arena al crudo reduciendo de esa forma el porcentaje de fase líquida y elevando la temperatura de clinkerización.
  - ❑ Enfriando completamente el horno y eliminando el anillo manualmente.
- (Soria F. 1980 [2])

### 2.1.2.3. COLOCACIÓN DEL REVESTIMIENTO REFRACTARIO

La colocación del revestimiento refractario en el horno se realiza primordialmente según tres modalidades:

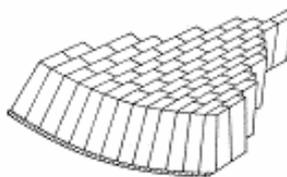
#### CON MORTERO

La colocación del refractario con mortero en el horno rotatorio se realiza utilizando morteros especiales, y es el procedimiento más usado. Después de haber colocado los ladrillos en el semicírculo inferior del horno sobre mortero, hasta la línea media horizontal del horno, se asegura por presión sobre la chapa del horno mediante husillos, después de lo cual es girado el horno  $90^\circ$  dos veces para disponer el ladrillo restante sobre el otro semicírculo tal como se representa en la figura 4:



*Fig 4. Colocación del vestido refractario con mortero.*

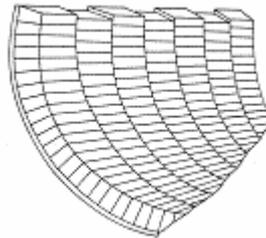
Utilizando mortero, la colocación del revestido del horno se hace enlazándolo longitudinalmente:



*Fig. 5. Colocación longitudinal del refractario.*

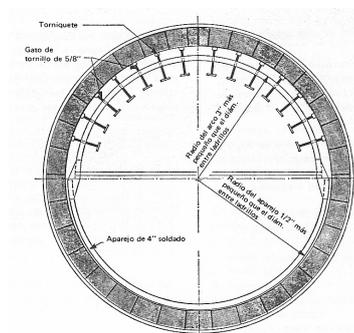
☒ A HUESO O EN SECO

Mediante este método, la colocación del ladrillo se hace individualmente por anillos completos paralelos a la circunferencia del horno con la ventaja de que no es necesario girar el horno rotatorio para realizarla.



*Fig. 6. Colocación de refractario A hueso o en seco.*

Para la colocación a hueso se utiliza un andamio de cierre, en forma de arco de semicírculo provisto de tornillos como muestra la Figura 7:



*Fig. 7. Colocación de refractario a hueso o en seco*

La colocación del refractario a hueso se realiza por anillos, después de poner las correspondientes al semicírculo inferior, de cada anillo, se sitúa sobre ellos el andamio en arco, sobre el que después se realiza la colocación de la mitad superior del anillo. Cada uno de los ladrillos de esta parte superior hasta poner el que cierra el anillo, se sujeta sobre la chapa mediante tornillos.

☒ MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE PEGAMENTO.

En los hornos de gran diámetro, no resulta fácil manejar el andamio ni es segura la sujeción con tornillos, además existe la posibilidad de deformar la chapa del horno. Por ello se ideó el procedimiento para revestir hornos de gran diámetro por pegamento sin la ayuda de dispositivos adicionales. En este procedimiento se utilizan pegamentos de gran poder adhesivo que fijan ladrillos refractarios a la chapa del horno. El pegamento usual es una resina artificial modificada (epiclorhidrina y difenilpropano) cuyo poder adhesivo sobrepasa la resistencia a la tracción de los ladrillos. La colocación se realiza poniendo series de ladrillos en franjas preparadas y ladrillos sueltos dispuestos entre aquellos. Sólo se pega a la chapa el 25-30% de los ladrillos refractarios, véase la figura 8. (Duda W. H. 1977 [1])

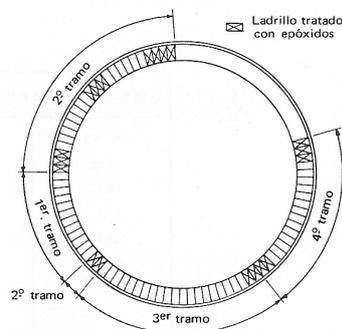


Fig. 8. Colocación de refractario mediante pegamentos

### 2.1.3. SELECCIÓN DE MATERIALES Y ESPESORES

El cuerpo del horno rotatorio está formado por la carcasa ó virola de acero y por el revestimiento refractario, que ocupa toda la superficie interna de la propia virola y que soportará las elevadas temperaturas de operación.

De cara al cálculo en este proyecto y para resolver el modelo matemático planteado en el *apartado 2 del capítulo II de la Memoria de Cálculo*, necesitamos conocer el valor de todas las variables presentes en las ecuaciones diferenciales que componen el modelo. Entre ellas, variables relacionadas con el refractario y con la carcasa del horno. Para el conocimiento de éstas últimas, se necesita por tanto, definir los materiales que componen el horno rotatorio objeto de dimensionamiento en este proyecto, es decir, el tipo de refractario, en el revestimiento interno del horno y el tipo de acero, en la carcasa del mismo.

### **2.1.3.1. ELECCIÓN DEL MATERIAL REFRACTARIO**

En la elección del tipo de material refractario en este proyecto, ha tenido bastante peso la pronunciación del fabricante *POLYSIUS* del grupo *ThyssenKrupp*, que afirma que el tipo de ladrillos refractarios más utilizado en la construcción de hornos rotatorios para la fabricación de cemento, es el refractario de magnesia-espinela.

Por lo tanto, de cara al dimensionamiento en este proyecto, se ha decidido que la clase de refractario para conformar el revestimiento de éste, será del tipo *magnesia-espinela ALMAG AF* de la marca *Refratechnik*, cuyas características técnicas pueden verse en las páginas 1 y 2 del *Anexo de la Memoria Descriptiva*.

Con respecto al espesor de este revestimiento, atenderemos a la *Tabla 1 del apartado 2.1.2.1. Características del revestimiento interno del horno, en este Capítulo*, donde aparecen los espesores recomendados de ladrillo refractario a utilizar en el revestimiento del horno en función del diámetro del mismo. Como se verá en el apartado *3.2.1.1 Longitud de capa plana, del Capítulo III de la Memoria de Cálculo*, el diámetro impuesto para el horno rotatorio es de 4,4 m, luego haciendo uso de esta tabla obtendremos el espesor de revestimiento refractario considerado en este proyecto, que será de 230 mm.

### 2.1.3.2. ELECCIÓN DEL MATERIAL DE LA CARCASA

Del mismo modo que en la elección del tipo de refractario, en la elección del tipo de acero en la carcasa del horno, se ha seguido las recomendaciones del fabricante *POLYSIUS*, que recomienda la utilización de acero al 1% en carbono con un espesor de 0,06 m.

## 2.2. SISTEMA DE GIRO Y APOYO

La rotación del horno rotatorio alrededor de su eje se consigue mediante un *engranaje circunferencial o de banda* consistente en una serie de rodillos que permiten la rotación en torno a su eje axial y que comunica a la envoltura del horno velocidades periféricas del orden de 0.40 m/s. Es decir, para transmitir movimiento de rotación, el horno posee un anillo dentado unido al cuerpo del mismo a través de eslabones móviles que son impulsados por un sistema *motor-piñón-corona*.

El último avance con respecto al sistema de giro, es que el cilindro se aloje en aros dentados sobre rodillos basculantes, es decir, rodillos que se adaptan automáticamente de forma óptima, y sean accionados directamente en la estación de rodillos correspondiente, prescindiendo de esta forma del engranaje *piñón-corona*.

El horno se encuentra soportado por unos *anillos circunferenciales* llamados *aros de rodadura o anillos de asiento*. El número de aros de rodadura depende obviamente de la relación existente entre el diámetro y longitud del horno, de forma que si esta relación es inferior a 15, el horno estaría soportado por dos apoyos o aros de rodadura, y si es superior a 15, el horno estaría soportado por tres apoyos. Se impide su deslizamiento hacia abajo porque una cara vertical de uno de los anillos hace contacto con rodillos verticales fijos.

Los anillos de asiento son de acero forjado o fundido, y en raras ocasiones de acero para herramientas. Los cojinetes principales son de manguito y normalmente se construyen de bronce.

Los *cojinetes antifricción* se utilizan a menudo en hornos muy pequeños pero nunca en las unidades de gran tamaño. Sin embargo, los cojinetes que van sobre los ejes del piñón son casi siempre del tipo antifricción. El engranaje es helicoidal o recto, normalmente la lubricación de los engranajes es del tipo de aspersion automática.

El equipo que se impulsa eléctricamente, debe estar provisto de unidades motrices o fuentes de potencia auxiliares. Las unidades motrices individuales se utilizan de hasta 190 KW, los hornos que requieren más de esta potencia se pueden equipar con unidades motrices dobles, es decir, dos piñones propulsores y dos motores que mueven un engranaje de giro. De esta manera, la carga de potencia se divide en dos mecanismos propulsores por separado que se combinan en un solo engranaje.

Los *motores de impulsión* deben ser del tipo de par de alto arranque y seleccionarse para 1.33 veces la máxima velocidad de rotación. Para hornos con dos o tres diámetros distintos, la potencia de freno para los varios diámetros se debe calcular por separado y luego sumarse. Se deben suministrar unidades motrices auxiliares para mantener la rotación de la carcasa en caso de algún fallo de energía. Estas unidades motrices son casi siempre motores de gasolina o diesel. El sistema de giro del horno debe cuidarse minuciosamente ya que la pérdida de rotación en el horno conduciendo en su interior un lecho pesado de partículas calientes, generara cierto hundimiento o flexión del cilindro debido al enfriamiento no uniforme.

En la Figura 9 se muestran los componentes que forman parte del sistema de giro del horno rotatorio. (Perry J. 1992 [4] / Polysius 2007 [19])

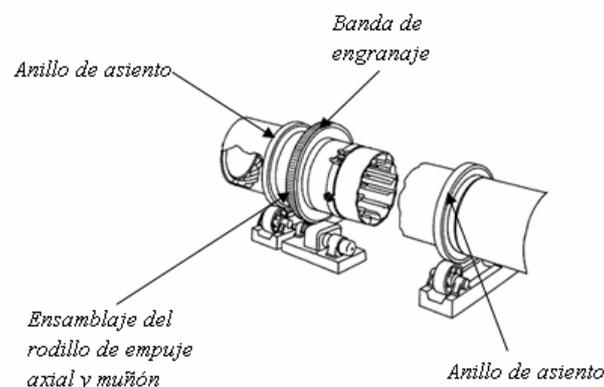


Fig. 9. Sistema de giro del horno rotatorio.

### 2.3. CARGA Y DESCARGA.

La alimentación se introduce por el extremo superior del horno mediante diversos procedimientos, como vertedores inclinados, transportadores de tornillo sin fin suspendidos, tuberías de lechada en el caso de vía húmeda, etc.... La carga desciende por el horno durante la rotación alimentada de forma continua, su contenido de humedad dependerá del proceso de producción empleado, siendo levantada por el arrastre del costado ascendente y volviendo después a caer siguiendo así una trayectoria en zig-zag mientras desciende por gravedad. Normalmente el material de alimentación sólo cubre del 10-12% de la sección interior del horno.

En ocasiones, se colocan dentro del horno resaltes anulares de material refractario llamados anillos de estancamiento, para lograr mayor profundidad de la capa de material en uno o varios puntos cambiando así el modelo de flujo.

El producto caliente se descarga desde el extremo inferior del horno hacia tanques de enfriamiento, hacia transportadores o dispositivos de enfriamiento que pueden o no recuperar su contenido calorífico. Estos dispositivos de enfriamiento y de recuperación calorífica incluyen parrillas inclinadas de movimiento lento, parrillas de agitación, etc. En el horno rotatorio para cemento el extremo de descarga se diseña para el enfriamiento por aire.

Generalmente, es necesario emplear algún procedimiento en el extremo superior del horno para recoger el material de alimentación que se derrama o vierte. Esto ocurre por sobrecargar el horno más allá de su capacidad normal, por ser insuficiente su pendiente, porque su velocidad de rotación es demasiado lenta o por no introducir la alimentación suficientemente dentro del horno. También se proporcionan sistemas de alimentación especiales para introducir el polvo recogido o, en algunos casos, un componente de la alimentación a través de la carcasa en algún punto o puntos intermedios. (Perry J. 1992 [4])

## 2.4. QUEMADOR

El quemador proporciona la energía para conseguir la temperatura necesaria en el tratamiento de las materias primas mediante la quema de determinados combustibles que pueden ser sólidos pulverulentos, líquidos o gaseosos. Esta combustión producida en el quemador genera una llama que se propaga una cierta longitud dentro del horno y unos gases calientes responsables del calentamiento, cocción y sinterización del crudo a una temperatura de 1450 °C.

La llama generada puede tener de 10-20 m de longitud y un diámetro de 1-2 m aproximadamente. La llama, que es regulable en el quemador, es tanto más óptima cuanto más intensa y corta sea, aunque esta forma obligaría a que fuera también más ancha y podría ocasionar problemas de quema de material sólido o fusión de costra protectora, por ello, en cuanto a la geometría de la llama debe llegarse a un compromiso entre ambos factores.

El quemador se sitúa en la parte inferior del horno donde se quema el combustible por medio de un mechero que atraviesa el cabezal de cierre del horno, produciéndose la combustión dentro del mismo. Existen diferentes diseños de quemadores que varían tanto en su capacidad como en el tipo de combustible a quemar: carbón, fuel-oil o gas natural o la geometría de la llama que genera. El mechero del horno rotatorio puede estar dispuesto paralelamente al eje del horno o también paralelamente al plano de la plataforma de servicio del hornero. En esta última posición el mechero está inclinado respecto al eje del horno hacia el material, lo que no siempre ofrece los mejores resultados para la combustión, puesto que las llamas chocan con el material. En cuanto a la posición del mechero, éste está situado en el centro de la sección del horno, sin embargo, también hay modificaciones en ese aspecto. Siguiendo este punto de vista particularmente en los hornos de gran diámetro el mechero queda más próximo al material pero dispuesto paralelamente al eje del horno, con lo que se evita la inclinación del mechero hacia el material y la quema directa del mismo.

Normalmente, la caja del extremo de descarga suele consistir en una caperuza fija o movable por la cual penetra en el horno la tubería de combustible. En algunas ocasiones se mezcla un combustible sólido con la carga y se quema al tiempo que se desplaza por el horno.

El horno y la cámara de combustión tienen casi siempre extremos abiertos que coinciden entre sí de forma que la pequeña separación entre ambos se cierra con un sello corredizo o bien se encierra en una cámara especial para la introducción de aire secundario de combustión. A veces, se admite también aire secundario por aberturas tubulares distribuidas a lo largo del horno conjuntamente con una combustión retrasada, de forma que el horno trabaja a presión negativa.

Los gases calientes generados en la combustión salen, por lo general, del horno para pasar por cámaras de polvo y humos con el fin de evitar la contaminación atmosférica. (Duda W. H. 1977 [1])

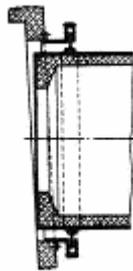
## 2.5. DISPOSITIVOS DE ESTANQUEIDAD

Para asegurar el perfecto funcionamiento del horno rotatorio, debe asegurarse su estanqueidad, por ello, el horno precisa de un sistema de *cierres* que confieren estanqueidad al mismo. La misión de estos cierres fundamentalmente es evitar la entrada de aire frío al sistema, que provocaría una gran pérdida de calor y que rebajaría la temperatura de los gases de combustión que son los responsables de la cesión de calor a la masa sólida para su calentamiento. Aunque a veces, también se utilizan cierres que actúan como sello de sólidos como el *cabezal de alimentación*, que se sitúa en el extremo de la alimentación del horno para sellarlo. Este cierre en forma de anillo, retiene el ladrillo del extremo y desempeña una labor de estancamiento del reflujos de sólidos.

Para evitar el acceso de aire del ambiente al horno rotatorio, se disponen en sus dos extremos dispositivos para cierre estanco en las uniones con otras secciones del proceso.

Existen numerosos tipos de cierres: los bloques de grafito, refrigeración con aire frío, cierres estanco, sellos neumáticos...

Los *sellos neumáticos* eficaces son esenciales para el funcionamiento controlado y económico de los hornos; reducen la admisión de aire al exterior, y ciertos tipos evitan por completo y con gran eficacia la entrada de aire. El tipo más simple de sello neumático es el de anillo flotante de sección T que se monta sobre un cojín de desgaste alrededor del extremo de alimentación del horno, y que queda libre para deslizarse siguiendo la expansión de la cubierta del horno. La red de anillo T se confina dentro de placas circulares de retención. En la Fig. 10 se ilustra el tipo más simple de sello neumático.



*Fig. 10. Sello neumático simple.*

La infiltración de aire por este tipo de sellos es casi siempre menor al 10%; para reducir aún más la infiltración de aire se utilizan *sellos flotantes* tipo anillo de cierre hidráulico presurizado con gas inerte o gases de chimenea.

Para evitar el acceso de aire del ambiente al horno rotatorio y asegurar su estanqueidad, también se emplean en sus dos extremos dispositivos para *cierre estanco* en las uniones con otras secciones de proceso. La depresión en el extremo caliente del horno es de unos 2-3 mm de columna de agua y en el extremo frío de 25-30 mm de columna de agua.

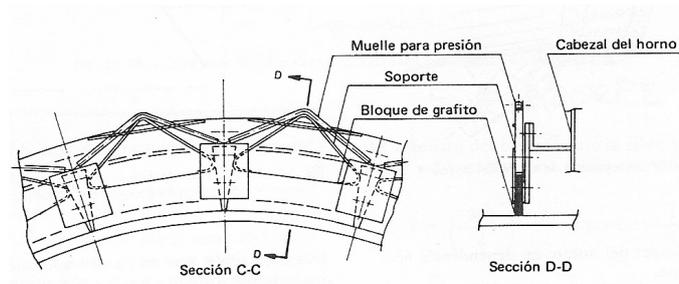
El cierre estanco en el extremo frío tiene por objeto:

- a) Evitar el aumento de cantidad de gases de salida del horno, debido a la introducción de aire exterior. La aspiración de ese aire supone mayor energía invertida en el exhaustor del horno.
- b) En el caso de los hornos por vía húmeda con gases de salida a temperaturas relativamente reducidas, el aire del ambiente puede significar que aquellas desciendan hasta el punto de rocío, con lo que se produciría condensación de los gases de salida en las canalizaciones del filtro electrostático.
- c) En los hornos dotados con calderas de vapor mantenidas con calor residual del horno, la entrada de aire del ambiente produce el descenso de la temperatura de los gases de salida y con ello menor capacidad de producción de vapor.

En el extremo caliente del horno, el aire falso ocasiona el desplazamiento del aire secundario caliente procedente del enfriador. La presencia de aire ambiente implica su calefacción hasta la temperatura de final de los gases, lo que conlleva pérdidas de calor.

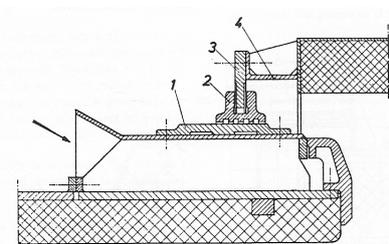
Existen un gran número de modelos de cierres estancos construidos por las distintas empresas fabricantes de máquinas para la industria del cemento, por ello, sólo se citarán algunos de ellos. El *cierre estanco de grafito (Graphite block producto de Fuller Company)* se compone de veinticuatro bloques de grafito dispuestos en la periferia del horno; las dimensiones de cada bloque son, aproximadamente, de 25×150×460 mm, según el diámetro del horno. Cada uno de esos bloques de grafito se coloca en su puesto mediante un anillo de ajuste y con cuñas y placas también de cuña. Se mantienen unitariamente en contacto con la chapa del horno con dos muelles de acero inoxidable, que permiten las variaciones de posición requeridas por las eventuales deformaciones de la chapa. Los muelles son ajustables para conseguir la total utilización de los bloques de grafito. El contacto de éstos con la envolvente de chapa del horno impide de modo casi total, la entrada de aire exterior. Las propiedades lubricantes del grafito hacen posible la acomodación de los bloques a la periferia del horno, así como a los desplazamientos del

horno en sentido longitudinal, debidos a posibles dilataciones o contracciones de aquél. En la Figura 11 se representa esquemáticamente la estanqueidad lograda por los bloques:



*Fig. 11. Cierre estanco por bloques de grafito.*

En la Figura 12, se muestra un *cierre de horno con refrigeración por aire frío*, de la boquilla de salida sometida a solicitaciones de alta temperatura.



1. *Cilindro de apoyo.*
2. *Anillo de cierre estanco.*
3. *Anillo para desgaste.*
4. *Anillo para suspensión.*

*Fig. 12. Cierre estanco del extremo caliente del horno con refrigeración por aire.*

El cierre estanco está fijado sobre un cilindro para refrigeración, dispuesto sobre la chapa del horno. Se inyecta aire frío en el espacio delimitado por el cilindro de refrigeración y la chapa del horno (donde se encuentra la flecha). La representación en perspectiva, de la Figura 13, ilustra la descripción.

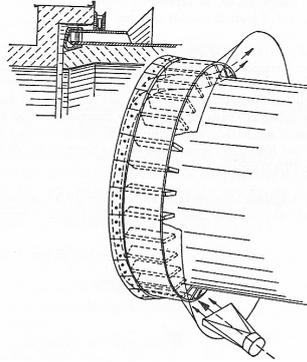


Fig. 13. Refrigeración de extremo de salida del horno.

Los *cierres de laberinto* también son muy utilizados, su empleo se reduce casi para el extremo caliente. Este tipo de cierre podemos verlo representado esquemáticamente en la siguiente figura:

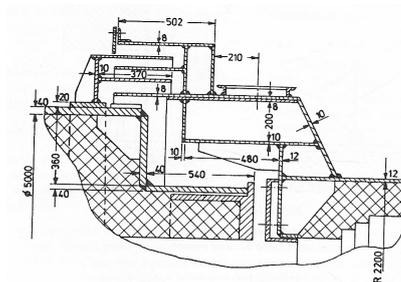


Fig. 14. Cierres de laberinto

(Duda W. H. 1977 [1] / Perry J. 1992 [4])

## 2.6. OTROS DISPOSITIVOS

El horno rotatorio precisa de una serie de equipos auxiliares para asegurar su perfecto funcionamiento, entre ellos cabe destacar las *bombas de engrase*, necesarias para el buen funcionamiento de los rodillos en los anillos de asiento del horno; *ventiladores*, para la refrigeración en la zona de salida del horno y su unión con el cabezal de cierre que a la vez contribuyen a disminuir el aire falso. También son necesarios los *ventiladores* para la

entrada de aire primario necesario para la combustión en el quemador, aire de enfriamiento (inyectado en el enfriador para el enfriamiento del clinker), aire secundario (aire caliente que entra en el horno a través del enfriador una vez calentado el clinker) y aire central (extraído del techo del enfriador si es necesario una mayor cantidad de aire para el calentamiento de materias primas). Los *Motoventiladores*, son equipos auxiliares necesarios para la refrigeración de la carcasa del horno mediante aire, que produce un enfriamiento indirecto del refractario en esa zona facilitando el control de la costra protectora. Y las *unidades motrices auxiliares*, para mantener la rotación de la carcasa en caso de algún fallo de energía. (Colina F. G, Caballero I. y Costa J. 2002 [13])

### **3. TIPOS DE HORNOS ROTATORIOS**

El horno rotatorio, es el equipo que más encarece el coste de una fábrica de producción de cemento portland. El estudio de las distintas posibilidades de economía en la marcha del mismo, ha dado lugar a un número considerable de patentes en el diseño y funcionamiento de los muchos mecanismos y variables que definen la cocción del cemento en hornos rotatorios.

Dos son los factores que más se han estudiado para mejorar el rendimiento de los hornos rotatorios: la economía del combustible y la capacidad de producción. Bajo esta doble influencia las instalaciones de vía húmeda, se han orientado hacia la construcción de hornos cada vez más largos; y los de vía seca, hacia hornos con gran recuperación de calor dentro del propio proceso de fabricación.

#### **3.1. HORNOS ROTATORIOS VÍA HÚMEDA.**

##### **3.1.1. GENERALIDADES.**

Estos hornos se caracterizan por su gran simplicidad, realizándose todas las fases de la cocción en la misma unidad; secado, precalentamiento, cocción, clinkerización y enfriamiento. La zona que presenta más interés, por ser específica de la vía húmeda, es la

de secado de la pasta. Esta fase motiva un elevado consumo de combustible, que es el punto débil de este tipo de fabricación. Con este fin, se han creado varios artificios destinados a aumentar la superficie de la pasta y a crear un contacto más íntimo entre ella y los gases calientes.

La dependencia entre el consumo específico de calor y el contenido de agua de la pasta de crudo se ilustra en la Figura 15, donde puede observarse que el factor de consumo de calor es directamente proporcional al porcentaje de agua en la pasta. Así por ejemplo, un horno alimentado de pasta con un 38% de agua muestra un consumo específico de calor de 1500 Kcal/ Kg de clinker. Si el contenido de agua se hubiera rebajado a un 36%, el consumo específico de calor habría descendido también a  $1500 \times 0.95$  (factor de consumo de calor)= 1425 Kcal/Kg de clinker e, inversamente, la elevación del contenido de agua de un 38% a un 41% implicaría un aumento de consumo específico de calor de hasta  $1500 \times 1.08$  (factor de consumo de calor)=1620 Kcal/Kg de clinker. (Duda W. H. 1977 [1])

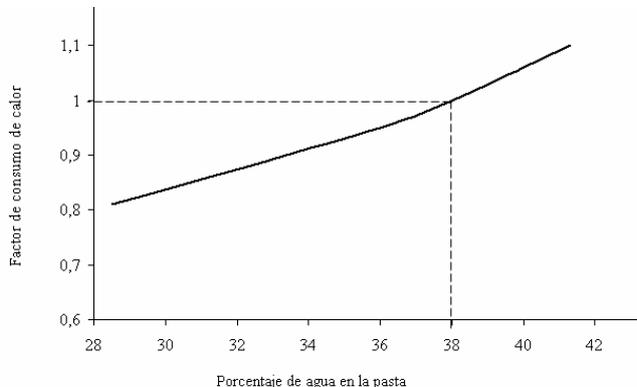


Fig. 15. Factor de consumo de calor en función del contenido de agua en la pasta. W.H.Duda, 1977 [1]

### 3.1.2. DISPOSITIVOS PARA LA ELIMINACIÓN DE AGUAS EN LAS PASTAS

La disminución de agua en las pastas de crudo para la vía húmeda se realiza mediante los siguientes procedimientos:

- *Químicamente, por adición de fluidificantes.* La pasta de crudo es una mezcla heterogénea de agua y materiales sólidos, en la cual éstos se hallan formando una dispersión de partículas muy finas. La función de los *fluidificantes* añadidos a la pasta es rebajar su contenido de agua pero manteniendo el mismo valor para la viscosidad. Los dos grandes grupos de fluidificantes de pasta son los electrolitos alcalinos como el silicato sódico, el hidróxido sódico y el carbonato sódico, y las sustancias superficialmente activas como derivados de la lignina, ácidos húmicos y melazas.
- *Mecánicamente, mediante filtros adecuados de tambor o de discos o cadenas.* El tratamiento mecánico de los *filtros prensas* es el método más eficaz a la hora de eliminar la humedad de una pasta pero no puede aplicarse por ser un método discontinuo, y no permite su aplicación en grandes volúmenes de producción como es la del cemento. Entre los filtros de marcha continua son de posible aplicación, el de *tambor* y el de *discos* los cuales se utilizan en la industria del cemento trabajando por vacío.

También se utilizan otros dispositivos en la eliminación de agua de la pasta de crudo como las *cadenas* en el interior del horno. Tanto los hornos rotatorios para vía húmeda como para vía seca están dotados de diferentes sistemas de cadenas. El único objetivo de los sistemas de cadenas en los hornos de vía seca es el intercambio térmico entre gas y material seco, mientras que en el horno rotatorio para vía húmeda añaden a la evaporación del agua, el transporte del material y evitan la formación de los anillos. En sí, las cadenas no son dispositivos de eliminación de agua, pero debido a aspectos de tipo mecánico que estos dispositivos cumplen simultaneados con la evaporación de agua, hace que se les incluya en el grupo de los dispositivos de eliminación de agua. Las cadenas en el interior del horno se disponen en los primeros 12-15 metros del tubo del horno en los cuales el secado se realiza por transmisión directa del material a la atmósfera gaseosa por exposición del material a dicha atmósfera, y por flujo directo de los gases calientes sobre el lecho de pasta en el espacio formado por debajo de las cadenas suspendidas. Con este sistema se reduce la temperatura de los gases de salida de 400° c a 150° C y aún menos.

Con respecto a este dispositivo podemos diferenciar dos tipos distintos:

- *Cadenas en cortina*; éstas penden por uno de sus extremos, su longitud ha de tener, aproximadamente el 0.7 del diámetro libre del horno como se indica en la Figura 30. La distancia entre los puntos de suspensión de dos cadenas, contada según la circunferencia, es del orden de 30 cm. Para cortinas poco densas se elige la distancia de 40-45 cm. La distancia entre cada dos cortinas es del mismo orden de magnitud y los anillos de suspensión generan superficies perpendiculares al eje del horno.
  
- *Cadenas de guirnaldas*; se han de colgar a una distancia de incluso  $0.4 \cdot D$  (diámetro libre) véase figura siguiente Las cadenas de guirnaldas penden colgadas por ambos extremos cuyos puntos de fijación describen una hélice que forma con el eje longitudinal del horno un ángulo de  $45-60^\circ$ .

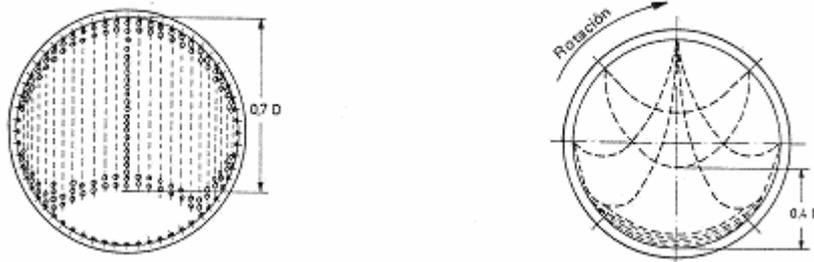


Fig. 16. Cadenas de cortinas y cadenas de guirnaldas respectivamente.

En hornos rotatorios para vía seca, las cadenas se encuentran siempre en forma de cortina, donde la zona de cadenas está dividida en grupos separados por una o dos zonas de cadenas para los siguientes fines:

- ✓ Igualar la temperatura de los gases del horno.
- ✓ Servir de área estabilizadora del transporte del material.
- ✓ Depositar el polvo del horno.
- ✓ Facilitar la instalación de termoelementos.

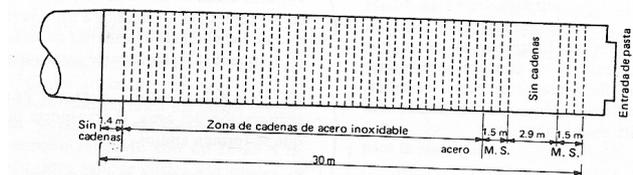


Fig. 17. Zona de cadenas de un horno vía seca (diámetro 5.3 m).

En los hornos rotatorios para vía húmeda es común la combinación de cadenas en cortinas y en guirnalda. Las cadenas de guirnalda transportan mejor el material en el horno que las cadenas que penden libremente, lo cual es de suma importancia en los hornos para vía húmeda. Sin embargo, el montaje de las cadenas que penden libremente es más sencillo y rápido que el de las cadenas de guirnalda.

Es una regla práctica, que 1500 m de cadena instalada rebajan la temperatura de los gases a la salida en  $110^{\circ}\text{C}$ . las cadenas de guirnalda ofrecen una acción 1.5 veces superior a las cadenas de cortina para la misma densidad de instalación de ambas, es decir, que las cadenas de guirnalda evaporan un 50% más de agua por unidad de tiempo que las instaladas en cortina.

Dado que en los hornos para vía seca no hay trabajo de secado, la temperatura de los gases a la salida es de unos  $400^{\circ}\text{C}$  frente a los  $200^{\circ}\text{C}$  de los gases a la salida de los hornos para vía húmeda con cadenas bien instaladas.

El material de que están constituidas las cadenas depende de la temperatura de trabajo, así para temperaturas inferiores a  $530^{\circ}\text{C}$  las cadenas son de acero tratado térmicamente resistentes a la abrasión. Para temperaturas superiores desaparece su dureza, y entre  $530\text{-}640^{\circ}\text{C}$  se puede emplear acero templado inoxidable con alto contenido en cromo. Para temperaturas entre  $640\text{-}800^{\circ}\text{C}$  se recomienda el acero inoxidable con 18 Cr y 8 Ni y en la zona de temperatura superior a  $970^{\circ}\text{C}$  se recomienda que las cadenas sean de acero aleado con alto contenido en cromo y

níquel, aunque los aceros aleados con elevado contenido de níquel no se utilizan (por encima de un 20%) debido a su sensibilidad por el azufre y en la atmósfera reductora del horno, el gas sulfhídrico ataca fuertemente a las cadenas.

### 3.1.3. DISPOSITIVOS INTERNOS EN HORNOS PARA VÍA HÚMEDA.

Prescindiendo de las cadenas los dispositivos internos de los hornos para vía húmeda se clasifican en precalentadores de pasta y secadores de pasta.

#### 3.1.3.1. PRECALENTADORES DE PASTA

Los precalentadores de pasta se instalan en la zona anterior a la zona de cadenas, presentan la ventaja de estar instalados en el propio tubo del horno lo que le confiere hermeticidad y la consecuente reducción de polvo. El precalentador más utilizado es el fabricado por *F.L Smidth* representado en la siguiente figura:

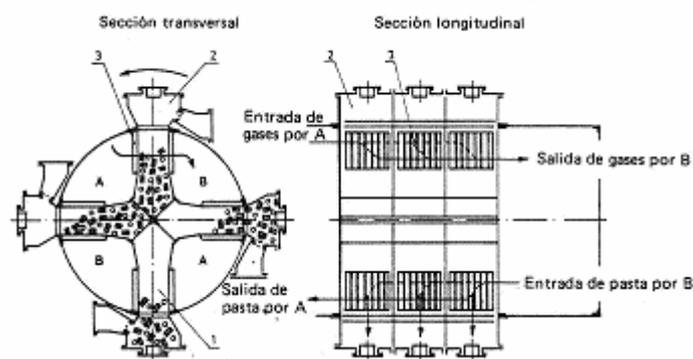
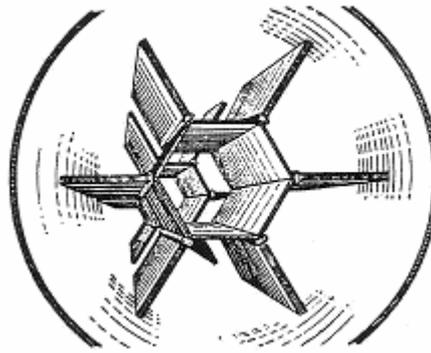


Fig. 18. *Precalentador F.L Smidth*

Las crucetas de acero dividen la sección del horno en cuatro cámaras. A cada dos de éstas, diametralmente opuestas, se las designa por A y por B. Las cámaras A, vistas desde la entrada de pasta, están obturadas por paredes de acero, mientras que las cámaras B están cerradas por el lado opuesto. La pasta que entra en el horno fluye a través de la cámara B al espacio interior de la cruceta en el que se hallan los cuerpos dispersores de la pasta. Durante el giro del horno se eleva la pasta tomada por el recipiente dispuesto junto a la chapa del horno. Después de media vuelta del horno fluye la pasta en las cámaras, de las cuales vuelve a salir al horno en la zona de las cadenas. Los gases calientes del horno entran en el precalentador por las cámaras A y por el emparrillado en las cámaras B de las cuales, después de atravesar una sección corta de longitud del horno, lo abandonan ya enfriados. Los gases barren el precalentador a contracorriente y calientan de modo instantáneo la pasta. Además la pasta se calienta por contacto con las paredes del calcinador y con los cuerpos dispersores. El calcinador *F. L. Smidth* lleva la pasta desde 10-15 ° C hasta 55-65 ° C. simultáneamente este precalentador de pasta sirve como filtro de polvo ya que éste se deposita sobre la pasta y permanece con ella en aquel.

### 3.1.3.2. SECADORES DE PASTA

Sin contar con las cadenas, que hacen perder entre el 6-8 % de agua a la pasta, muchas veces se instalan a continuación de la zona de cadenas, secadores de pasta especiales que eliminan el agua residual de la pasta previamente desecada y al mismo tiempo calientan el crudo. El secador de pasta más importante es el llamado intercambiador de calor tipo celda representado en la siguiente figura, que divide la sección del horno en siete cámaras para conseguir un mejor intercambio térmico entre los gases y la pasta. El intercambiador tipo celda se instala en dos tramos de 4.5 m de largo cada uno, resulta más caro que los dispositivos internos cerámicos pero producen menores pérdidas de presión.



*Fig. 19. Representación del intercambiador tipo celda.*

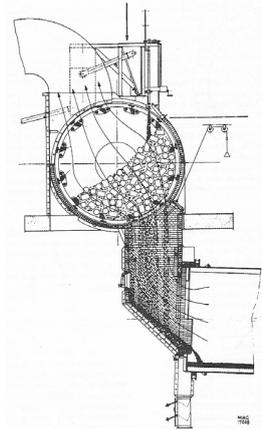
#### **3.1.4. DISPOSITIVOS EXTERNOS PARA HORNOS VÍA HÚMEDA.**

El “*calcinador de la Miag*” es un dispositivo que realiza fuera del horno el precalentamiento o el presecado de la pasta. Instalado a la entrada del tubo del horno, consiste en un tambor cilíndrico de gran diámetro que gira horizontalmente sobre su eje. El tambor descansa sobre dos fuertes gorriones y se arrastra por uno de sus extremos sincronizado con el alimentador de la pasta.

La pared del tambor consta de dos fondos atirantados sólidamente entre sí por espárragos de acero. Sobre estos espárragos se disponen varillas según la generatriz, de modo que resulte un enrejado cilíndrico. En el interior del ladrillo hay una carga de cuerpos metálicos huecos, de gran parecido a los *anillos Rasching* empleados en la industria química, que actúan de intercambiadores de calor.

La pasta vierte a través de unas toberas que abren y cierran, alternativamente, para salvar el paso de los travesaños, comunicando con el horno en su parte inferior por un vertedero inclinado, lugar de donde sale la pasta seca y caliente. Mientras que los humos atraviesan el lecho de los intercambiadores en contracorriente, saliendo hacia la chimenea por la parte superior del calcinador. Debido al lento movimiento del tambor se produce una variación permanente en los múltiples canales derivados, muy estrechos por la presencia de los cuerpos de relleno, esto produce un intensivo intercambio entre los gases y la pasta.

Los gases abandonan el calcinador a 125 ° C, debido al frotamiento de los cuerpos de relleno entre sí, la pasta se subdivide y queda reducida a la forma de gránulos los cuales caen al horno a través de las aberturas de la parrilla con una humedad residual de 10-12 %.



*Fig. 20. Secadero calcinador de pasta en sección transversal..*

### 3.2. HORNOS ROTATORIOS VÍA SECA.

El primer horno largo para vía seca fue ideado en los Estados Unidos, requerían poco personal a su servicio y presentaban poca tendencia a perturbaciones. Tales hornos, de unos 140-160 m de largo en su origen, no tenían ningún dispositivo interno para intercambio de calor, lo cual comportaba que los gases a la salida del horno alcanzaran temperaturas de unos 700-750 °C. Estas temperaturas debían rebajarse mediante la inyección de agua nebulizada a los gases residuales del horno antes de que éstos llegaran al filtro electroestático, así que con la intención de aprovechar la temperatura de estos gases calientes y de mejorar la economía térmica, a los hornos largos para vía seca se les dotó de un abanico de dispositivos tales como cadenas dispuestas en su interior, dispositivos internos metálicos en forma de cruz, intercambiadores de calor contruidos con material cerámico y dispositivos de recuperación de calor en el exterior del horno con la única intención de aprovechar la energía calorífica contenida en los gases residuales.

### 3.2.1. DISPOSITIVOS INTERNOS DE CERÁMICA.

Los dispositivos internos contruidos con material cerámico se instalan en secciones de 4-5 m de largo. Es corriente disponer tres secciones separadas entre sí unos 3-4 m, las secciones contiguas se sitúan con giro de 60 °C entre sí. Para estos intercambiadores térmicos de material cerámico se emplea *chamota* de alta refractariedad con un contenido de alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) del 70-75 %

En la Figura 35 se ha representado un intercambiador de calor interno, el cual divide la sección transversal del horno en tres sectores. A este tipo de dispositivos internos cerámicos se les denomina “*puente Dietze*”.

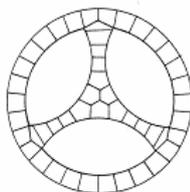


Fig. 21. Dispositivo interno de cerámica “*Puente Dietze*”

En la figura siguiente se muestra un dispositivo intercambiador cerámico que divide la sección en cuatro sectores o cuadrantes. A este tipo de intercambiador, de cerámica se le denomina “*puente Azbe*”.

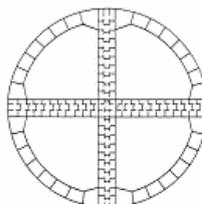


Fig. 22. Dispositivo interno de cerámica “*Puente Azbe*”

La misión principal de estos dispositivos internos es que tanto el material como los gases, quedan divididos en tres o cuatro corrientes parciales, para lograr con ello un contacto más amplio y un mejor intercambio térmico entre gases y material. Igualmente, con esta disposición se produce una intensiva transmisión de calor del material cerámico al material contenido en el horno y a través de la eficaz remoción del material, gracias a los

dispositivos internos, se consigue que las capas de material más caliente cedan calor a las más frías. El removido insuficiente de material en el horno puede ocasionar la elevación del contenido de cal libre en el clinker de hasta el 2 % y aun superior, así como elevadas pérdidas al rojo.

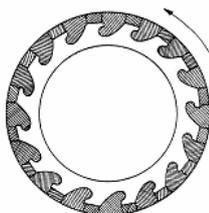
El empleo de dispositivos internos de cerámica elevan la capacidad de caudal del horno rotatorio en el intervalo del 8-12%, simultaneado con un descenso equivalente del consumo específico de calor. La temperatura de los gases residuales se rebaja en unos 80-100 °C.

Los intercambiadores de calor cerámicos se instalan para mayor eficacia en la zona del horno en la que los gases tienen una temperatura de 1000-1200 °C, pues allí la diferencia de temperatura entre gases y material es máxima y, por tanto resulta muy apropiada para un intenso intercambio térmico.

Sin embargo, los intercambiadores de calor internos del horno rotatorio, tanto cerámicos como metálicos, engendran altas caídas de presión, lo que supone un alto consumo de energía eléctrica en el exhaustor para los gases del horno.

### **3.2.2. LADRILLOS Y LISTONES ELEVADORES DE MATERIAL EN EL HORNO.**

Mediante la elevación del material en el horno con listones metálicos y ladrillos o piezas de material cerámico, las partículas individuales del material quedan expuestas directamente a la acción de los gases y por ello se acelera el intercambio térmico basándose en que, por ello, también se comunica a la vena gaseosa un movimiento turbulento.



*Fig. 23. Ladrillos elevadores de material del horno.*

Con el empleo de ladrillos o listones elevadores en hornos rotatorios cortos para vía seca se ha comprobado un descenso de temperatura de los gases residuales de 600 a 500°C, elevación del caudal del horno en un 12 % y un descenso del consumo de calor del 20%. Como los ladrillos elevadores cerámicos muestran tendencia al desconchamiento, para estos fines son más adecuados los listones elevadores metálicos.

### **3.2.3. DISPOSITIVOS DE RECUPERACIÓN DE CALOR A LA SALIDA DEL HORNO.**

La industria cementera, desde que apareció el horno rotatorio para vía seca y empezó a evolucionar mediante la instalación de determinados dispositivos que fomentaban la recuperación de calor, se ha centrado principalmente en el ahorro de combustible, esto motivó la aparición de dos instalaciones típicas, las más económicas en consumo de combustible: el *horno Lepol* y el *horno Humboldt*.

#### **3.2.3.1. HORNO LEPOL**

La invención del horno Lepol en el año 1928 comportó especialmente en Europa un importante avance en el proceso de producción de cemento por vía seca, en relación a la economía térmica del proceso. El nombre Lepol está compuesto por la primera sílaba del apellido del inventor *Otto Lellep* y la primera del nombre de la casa *Polysius* que adquirió la patente y ha impulsado el desarrollo de este sistema. El éxito del horno Lepol estriba en la disminución drástica del combustible necesario en cuantía superior al 50 % que supone un descenso de consumo específico de calor de 800 Kcal/Kg de clinker.

En el proceso, se coloca delante de un horno corto una parrilla móvil. Sobre la parrilla se dispone una capa de 15-20 cm de espesor constituidas por formas preparadas con material crudo granulado mediante la adición de agua en un granulador generalmente de plato. A través de esta capa y de la parrilla pasan los gases del horno a temperaturas del orden de 1000 °C saliendo como gases finales a una temperatura de 100 °C. Estos gases finales

contienen poco polvo gracias a la acción filtrante implicada en el paso de los gases a través de los gránulos y se encuentran a baja temperatura por su contenido de vapor de agua procedente del agua de humectación de los gránulos, lo cual los hace muy adecuados para su tratamiento en los filtros electrostáticos. En la Figura 37 se muestra un esquema de horno Lepol con circulación sencilla de gases y en la Figura 38 un horno Lepol con circulación doble de gases.

En la circulación sencilla, tal y como se describe en la figura, los gases del horno atraviesan la capa de gránulos de arriba abajo a cerca de 1000 °C y después, por aspiración, se les impulsa a la instalación de deposición de polvo. Para evitar que los gránulos estallen por la elevada tensión del vapor producido en su seno, en la cámara de secado se aspira aire frío. Esto ocasiona pérdidas de calor y aumento de gases finales para tratar.

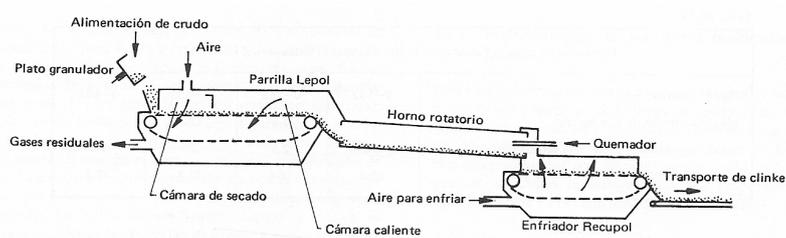


Fig. 24. Horno Lepol con circulación sencilla de gases.

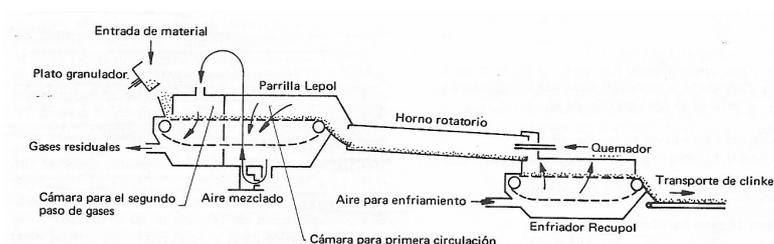


Fig. 25. Horno Lepol con circulación de gases doble.

Por consiguiente, en el desarrollo ulterior del sistema, ya no se introduce aire frío alguno. Los gases residuales del horno a unos 1000 °C, atraviesan por vez primera la capa de gránulos de la cámara, que cabe considerar como de recuperación inicial. Después se depuran de polvo en una instalación conectada dentro del sistema y a unos 400 °C se envían a la cámara de recuperación final (de secado) y en ella atraviesan la capa de

gránulos por segunda vez. En esta modalidad del horno Lepol, la cantidad de gases finales a 100 °C es considerablemente menor.

En el horno Lepol se distinguen pues, dos fases en la cocción, una por encima de 1000 °C en la que la transmisión de calor se realiza principalmente por radiación (tubo del horno) y otra por debajo de 1000 °C, en la que la transmisión más fuerte es por convección (parrilla Lepol). Las principales ventajas del horno Lepol son:

- ☑ La temperatura de salida de los gases es baja.
- ☑ El contenido en polvo de los gases es también bajo.
- ☑ El horno es más corto y se producen pérdidas por radiación.
- ☑ El clinker puede resultar más poroso y fácil de molturar.

Su principal desventaja es el disponer de una parrilla con elementos metálicos móviles a temperatura elevada.

### **3.2.3.2. HORNO HUMBOLDT**

En los sistemas de recuperación para vía seca empleados hasta el momento, el crudo entraba en el horno en forma de gránulos con un contenido en agua que oscilaba entre un 12-14 %, lo que representaba un consumo adicional de combustible de unas 190 Kcal/Kg de clinker, una instalación especial de preparación y una fuente de dificultades para ciertos crudos no muy aptos para granular y permitir una marcha correcta en la instalación.

En el sistema de instalación Humboldt el crudo se introduce en forma de polvo y, a igualdad de consumo de combustible por unidad de clinker producida, la temperatura de los gases de escape se eleva de 90 °C (gránulos) a 375 °C (polvo) lo que permite utilizar éstos para el secado de materias primas consiguiendo una mayor reducción en el consumo calorífico total de la instalación.

El fundamento del intercambiador de calor Humboldt consiste en que el material pulverulento se encuentra, un cierto tiempo, en suspensión en un ambiente gaseoso que circula en contracorriente.

Las principales ventajas del horno Humboldt son las siguientes:

- ☑ Reducción notable del consumo calorífico en la cocción del clinker.
- ☑ Posibilidad de aprovechamiento de los gases de escape en la desecación de materias primas.
- ☑ Poder aprovechar cualquier materia prima sea granulable o no.
- ☑ Tratarse de un sistema estático, el cual no requiere conservación.
- ☑ Poder trabajar sin intercambiador, en caso de urgencia o avería en el aspirador principal.
- ☑ Reducción considerable en la superficie ocupada por la instalación a igualdad de producción con otras instalaciones.
- ☑ Aumento de producción por m<sup>3</sup> ce horno (25-50 %).

Si hacemos una comparación entre ambos sistemas el horno Humboldt, a igualdad de condiciones, presenta una recuperación de calor ligeramente inferior que el horno Lepol, consume más energía que éste y la descarbonatación del crudo es menor en el intercambiador que en la parrilla. Además en el horno Humboldt no hay secado, por que los gases de escape son más calientes, pero sin embargo, permiten su aprovechamiento en otras secciones de la fábrica igualando el rendimiento térmico con el Lepol. (Vián A. y Ocón J. 1979 [3] / Duda W. H. 1977 [1])

#### 4. EVOLUCIÓN DEL HORNO ROTATORIO.

Hace cien años, la fabricación del cemento se realizaba casi exclusivamente por vía húmeda. El cilindro se ocupaba del secado de la pasta de crudo, de su calentamiento, de la calcinación y de la sinterización.

Con la aparición del método de preparación del crudo por vía seca pudo prescindirse del proceso de evaporación del agua en el tubo rotatorio, lo que permitió aumentar la carga del tubo, reducir las dimensiones de este para una misma producción y la disminución de energía térmica necesaria.

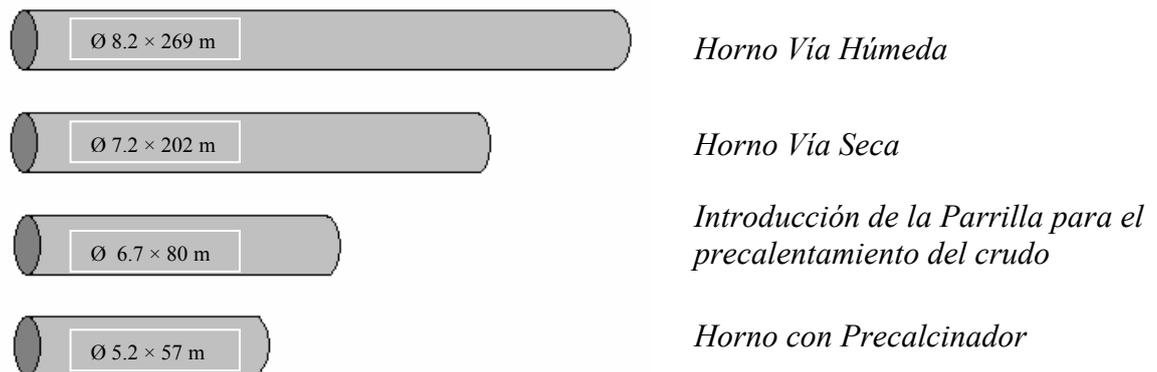
Incorporando diversas piezas de metal o de cerámica en el interior del tubo se intentó mejorar el intercambio térmico entre el gas y la harina. El primer resultado satisfactorio en el intento de conseguir mayores capacidades y menores consumos térmicos se logra por *Polysius* en 1928 con la utilización de la *parrilla Lepol* para el precalentamiento del crudo. Con este sistema el proceso de calentamiento del crudo se separa del tubo rotatorio y se efectúa en una parrilla procesionaria colocada delante del horno. La parrilla se alimenta con gránulos compuestos por crudo y agua y agregado aglutinante en caso necesario. Los gases calientes del horno circulaban a través del lecho de gránulos, primero en una dirección, posteriormente en dos sentidos, es decir, en contracorriente cruzada, con lo que se consiguió un importante descenso en el consumo de calor y en los gases de escape.

Esta separación del proceso de calentamiento previo realizado antes en el interior del horno rotatorio, permitió volver a reducir el volumen del horno, el coste del mismo y como consecuencia de la reutilización de los gases, una reducción del coste de combustible.

Con la aparición del intercambiador de ciclones (en un primer momento de cuatro etapas) se consiguió simplificar las máquinas utilizadas para el precalentamiento del crudo, reduciéndolos a un sistema estático que trajo consigo un nuevo aumento de las capacidades del horno.

Por último, la instalación de un *precalcinator* entre el intercambiador de ciclones y el horno permitió duplicar la carga volumétrica del cilindro rotatorio, siendo esta técnica la tendencia actual en la elaboración del clinker de cemento portland. En el proceso de precalcinación la descomposición de la caliza (descarbonatación) se produce fuera del horno mediante una cámara de combustión donde se quema parte del combustible

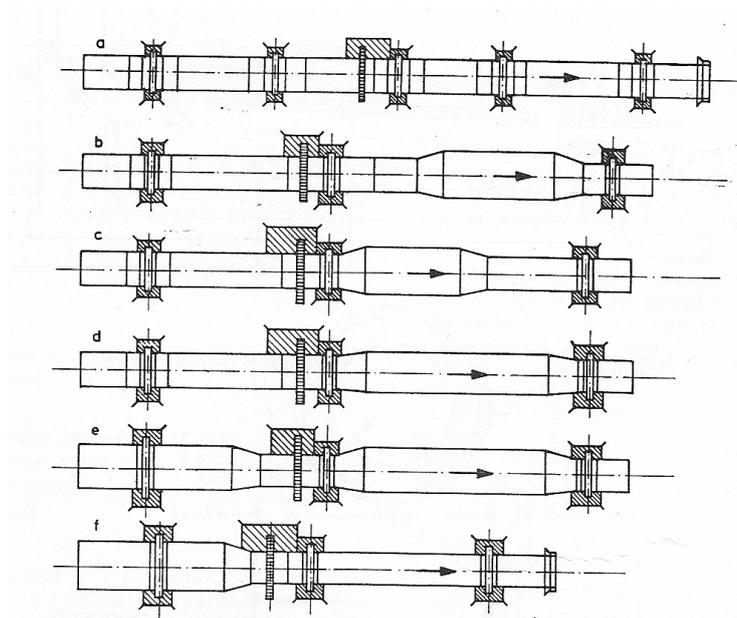
La evolución en el volumen de los hornos rotatorios de cemento portland desde sus inicios puede verse en la siguiente figura, en la que puede observarse como la capacidad del horno va disminuyendo desde el horno vía húmeda hasta el horno con precalcinador para un mismo caudal de producción de 5000 t/d. (Cemento Hormigón, 1999 [25])



*Fig. 26. Evolución histórica en el volumen del horno rotatorio.*

## 5. TIPOS DE CILINDROS PARA HORNOS ROTATORIOS.

Como ya se apuntó anteriormente, los hornos rotatorios no siempre son de diámetro único sino que pueden tener más de un diámetro. Los tipos principales de cilindros para hornos rotatorios pueden verse en la siguiente figura:



*Fig. 27. Principales tipos de cilindros para horno rotatorio;*

*a. horno rotatorio con diámetro unitario.*

*b. horno rotatorio con zona de sinterización ensanchada.*

*c. horno rotatorio con zona de calcinación ensanchada.*

*d. horno rotatorio con zonas de sinterización y de calcinación ensanchadas.*

*e. horno rotatorio con zonas de desecación, calcinación y sinterización ensanchadas (vía húmeda).*

*f. horno rotatorio con zonas de desecación o precalificación ensanchadas (horno largo vía seca o vía húmeda).*

La ampliación de las distintas zonas tiene por objeto prolongar el tiempo de permanencia del material en ese tramo correspondiente según el caso, a la zona de sinterización, calcinación, desecación o combinaciones de estas, con el correspondiente descenso de velocidad en los gases y así mejorar la transmisión de calor hacia el material.

Sin embargo, en estas zonas se producen diferentes tiempos de paso del material a lo largo del horno, que generan desplazamientos irregulares de éste influyendo desfavorablemente en la explotación del horno.

En la transmisión de las secciones ampliadas hacia las que no lo han sido, se producen retenciones del material que producen rozamientos y producen polvo. La realización de las

piezas de transmisión son más caras que las de las virolas cilíndricas. El vestido del material refractario de las zonas de transmisión es complicado, costoso en el trabajo humano y exige configuraciones especiales para los ladrillos.

Una forma especialmente desfavorable, presenta estrechada la zona de salida del horno. Tal solución únicamente conduce a un enfriamiento parcial del clinker en el horno y a la rápida inutilización del revestimiento refractario en esa sección.

Tanto la experiencia práctica como las consideraciones teóricas han llevado a la conclusión de que la forma más favorable para el horno es aquella en que se han suprimido las ampliaciones o estrechamientos de la sección. Los hornos rotatorios dotados con intercambiadores de calor muestran en todas sus partes, sección unitaria. (Duda W. H. 1977 [1])

## **6. TRANSMISIÓN DE CALOR EN HORNOS ROTATORIOS**

En los hornos rotatorios, el material no se dispersa por la corriente de aire (en tal caso, la transmisión de calor entre el gas y el material sólido sería mucho mayor), sino que se retiene en la parte inferior del cilindro. Por ello, la utilización de dispositivos en el interior del horno con el fin de favorecer esta transmisión de calor entre el gas y la carga cobra vital importancia en la etapa de calentamiento y cocción del clinker. Con el propósito de mejorar este rendimiento térmico se emplean diversos métodos tales como los dispositivos internos de cerámica, cadenas, dispositivos metálicos, ladrillos y listones elevadores de material en el horno, aspas, etc., que sumado al movimiento de rotación del horno favorece el área de intercambio y por tanto, la transmisión de calor.

La principal fuente de transmisión de calor dentro del horno se debe a la *radiación* desde la llama y los gases calientes. Esta radiación es directa a la superficie de la carga y a las paredes del horno. El horno está lleno de material en una pequeña fracción de su volumen (aproximadamente un 13%), por consiguiente, la mayor parte del calor se cede a las paredes del horno y una reducida fracción, al material directamente. Desde las paredes se

transmite nuevamente a la carga por reirradiación al mismo tiempo que por *conducción* en el contacto durante la rotación. Sólo una pequeña cantidad de calor se transmite directamente por *convección* a la carga y a las paredes.

La mayor parte de la transmisión de calor se realiza por radiación, pero la radiación de los cuerpos sólidos no puede aplicarse a la radiación de la llama. La radiación de la llama no cubre la totalidad del espectro térmico, los gases mono y biatómicos como el nitrógeno y el oxígeno, son totalmente transparentes en el tramo infrarrojo y su radiación térmica es nula. Por tanto, la presencia de estos gases en la llama es inerte. Por el contrario, los gases con mayor número de átomos como el H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> tienen una radiación térmica de consideración ya que presentan bandas de absorción en el infrarrojo.

En los gases, la dependencia de la radiación con la temperatura es distinta que para los sólidos. Para el CO<sub>2</sub> es la potencia de T<sup>3.5</sup> y para el vapor de agua, T<sup>3</sup>, en lugar de T<sup>4</sup> según la ley de Stefan-Boltzmann.

Por consiguiente, las fracciones activas, a efectos de la radiación, en la llama de polvo de carbón son:

- ☑ El contenido de CO en los gases de la llama.
- ☑ El contenido de HO en los gases de la llama.
- ☑ El contenido de polvo en suspensión en los gases de la llama.

Y por ello, para favorecer la transmisión de calor por los gases en la zona de sinterización, se requiere:

- ☑ Elevación de la temperatura de la llama.
- ☑ Elevación de la concentración de CO<sub>2</sub> y del H<sub>2</sub>O.
- ☑ Llevar al máximo el diámetro del horno.

(Cemento Hormigón, 2005 [22] / Duda W. H. 1977 [1])

## 7. BALANCE DE ENERGÍA GLOBAL EN EL HORNO

La energía liberada por la combustión en la llama  $Q_{comb}$ , fluye fuera del horno con los gases de escape  $\Delta H_{gas}$  y mediante radiación y convección hacia las paredes del horno y directamente sobre la carga, mientras una pequeña parte se pierde por radiación en la dirección axial de la alimentación y las tuberías de los gases de escape  $Q_{rad,1}$ ,  $Q_{rad,2}$ . Además, la carga de sólidos  $\Delta H_{alim}$  absorbe energía del gas por radiación y convección  $Q_{rad}$ ,  $Q_{conv}$  existiendo una pérdida de calor hacia los alrededores  $Q_{perdido}$ .

Cada uno de los términos individuales integrados en el balance de energía global, quedaría como sigue: (Mastorakos E., Massias A., Tsakiroglou C.D., Goussis D.A., Burganos U.N, 1998 [17])

- $Q_{comb} = \Delta H_{gas} - Q_{rad} - Q_{conv} - Q_{rad,1} - Q_{rad,2}$
- $Q_{rad} + Q_{conv} = \Delta H_{alim} + Q_{perdido}$

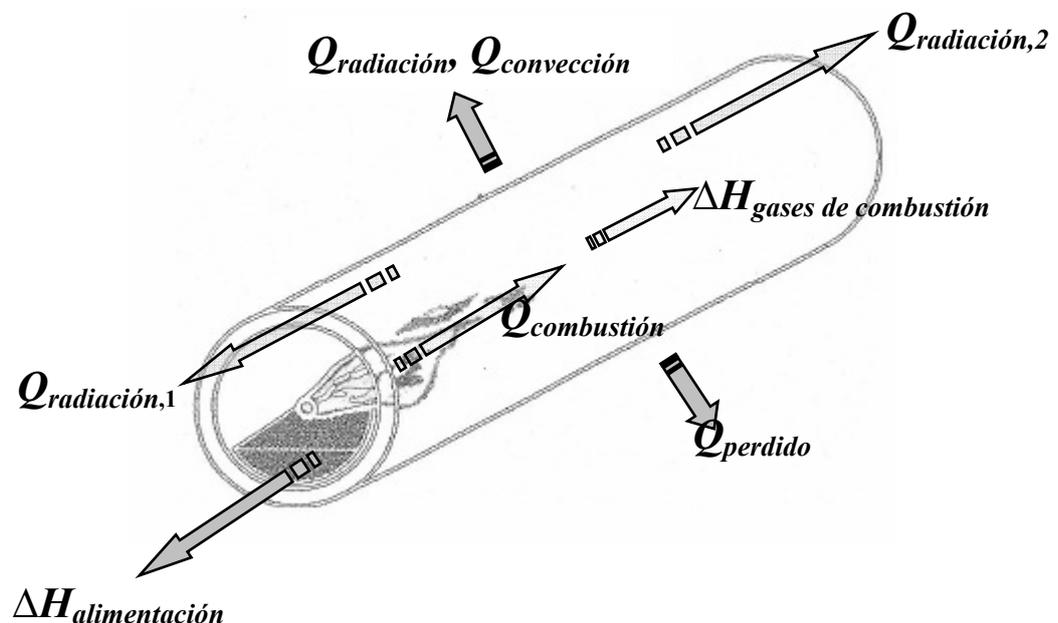


Fig. 28. Flujos de energía puestos en juego en un horno rotatorio.

## 8. ZONAS EN LOS HORNOS ROTATORIOS

En un horno rotatorio, la marcha de las reacciones que tienen lugar entre los componentes del crudo y que definen la distribución de calor, es análoga, en correspondencia con los procesos químicos que tienen lugar a una *zona de secado*, si existe (sólo en los hornos vía húmeda), sigue la de *precalentamiento*, *calcinación*, continuando la de *sinterización* o *clinkerización* (zona de más alta temperatura) concluyendo con la de *enfriamiento*. La extensión de cada una de estas zonas puede observarse en la Tabla 2, donde las longitudes de cada zona están expresadas en porcentajes de la longitud total del horno.

Zona	% de longitud del horno
Zona de secado	33
Zona de precalentamiento	14
Zona de calcinación	25
Zona de cocción	20
Zona de enfriamiento	8

*Tabla 2 . % de longitud del horno de las distintas zonas de un horno rotatorio. (F. Soria, 1980 [2])*

En general, un horno de alimentación seca tendrá tres zonas de calentamiento y uno de alimentación húmeda tendrá cuatro zonas. Estas zonas del horno no se pueden delimitar con exactitud porque las temperaturas de los gases, del material y de las caras internas del horno son difíciles de determinar y las reacciones que se desarrollan en ellas se superponen parcialmente o discurren paralelamente.

La zona de secado es la zona más larga extendiéndose un 33% de la longitud del horno. En esta zona la alimentación pasa de una temperatura de 210°C a una temperatura de 670°C. Esta zona, situada en el extremo de la alimentación en la cual es expulsada la humedad del crudo, solo tiene cabida en hornos para vía húmeda. En los hornos para vía seca la etapa de secado se realiza fuera del horno donde los gases de combustión de salida del horno

realizan esta fase de secado mediante diversos dispositivos de intercambio de calor para elevar el rendimiento térmico del proceso.

La zona de precalentamiento es prácticamente la mitad de la zona anterior, sólo ocupa un 14% de la longitud del horno, en esta zona la carga se calienta hasta unos 850°C.

En la zona de calcinación de 25% de extensión del horno la temperatura de la carga asciende a la temperatura de reacción prácticamente, a partir de esta temperatura en la zona de cocción, sinterización o clinkerización se dan lugar las reacciones de clinkerización responsables de la formación de los constituyentes principales del clinker. Esta zona ocupa un 20% de la longitud total del horno.

Y por último, la zona de enfriamiento que es la más corta, donde parte del aire de enfriamiento entra en el horno disminuyendo la temperatura de la carga de 1000 °C hasta unos 1400 °C-1300 °C o incluso menos dependiendo, claro está, de la temperatura de los gases de enfriamiento.

La introducción moderna de precalcinadores entre el intercambiador de calor y el horno rotatorio vía seca, elimina del horno algunas de las zonas mencionadas anteriormente, como la zona de precalentamiento y la zona de calcinación, etapas que se producen fuera del horno, en el precalcinador. En este último, el sólido es prácticamente calcinado en su totalidad favoreciendo así la utilización de hornos rotatorios más pequeños con el consecuente ahorro energético que supone.

## 9. DILATACIÓN TÉRMICA DEL HORNO

La longitud y la periferia del horno son mayores cuando está funcionando que en frío, circunstancia que se ha de tener en cuenta para evitar que mientras funciona se deteriore el centrado de los aros y los rodillos de rodadura, así como el funcionamiento de los dispositivos de cierre, para estanqueidad de los extremos del horno. Para calcular la dilatación longitudinal, se elige como punto de partida la sección transversal del horno que presente la temperatura más alta que se medirá en la chapa. Desde aquella en dirección hacia ambos extremos del horno, la dilatación disminuye de modo regular. La dilatación lineal que sufre cada extremo se calcula como sigue (W. H. Duda, 1977 [1]):

$$A_1 = \alpha \left( \frac{t_1 + t_2}{2} - t \right) \times l_1$$

$$A_2 = \alpha \left( \frac{t_1 + t_2}{2} - t \right) \times l_2$$

Donde:

$A_1$ : alargamiento experimentado en el tramo 1.

$A_2$ : alargamiento experimentado en el tramo 2.

$\alpha$ : coeficiente de dilatación lineal del acero= 0.000012.

$t_1$ : temperatura más alta de la periferia ( $T_{\text{máx}}$ )

$t_2$ : temperatura en los extremos del horno.

$l_1$  y  $l_2$ : distancias de los extremos correspondientes a  $t_2$  al punto de temperatura más alta

$t$ : temperatura ambiente de 20° C.

## 10. CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE.

La construcción del horno rotatorio requiere cimentaciones sólidas adecuadas a su tamaño y peso. El esqueleto principal del horno, deberá insertarse en las cimentaciones de forma que soporte el peso de la mampostería y lo reparta tan uniformemente como sea posible.

El peso total del horno rotatorio descansará sobre dos o tres apoyos atendiendo a la relación entre el diámetro y la longitud del mismo. Si esta relación sobrepasa el valor de 15, el horno se apoyará o descansará sobre tres apoyos, de lo contrario, si la relación es inferior a este valor, el horno será soportado mediante dos apoyos únicamente, siendo más que suficiente para soportar el peso del mismo. Cada apoyo del horno es una estación de rodillos que alberga un aro de rodadura o anillo de asiento, que como su propio nombre indica, sirve para el asiento del cilindro del horno mediante una fijación dentada.

Debido a que la relación entre el diámetro del horno rotatorio y la longitud total obtenida de los cálculos realizados en este proyecto es de  $67/4.4 = 15.23$ , el horno descansará sobre tres estaciones de rodillos con sus correspondientes aros de rodadura. Esta condición de apoyo del horno condicionará el accionamiento del mismo.

La carcasa del horno se construye mediante la unión soldada de virolas de acero de 60 mm de espesor y 3000 mm de anchura, excepto las virolas correspondientes a las zonas de entrada y salida del horno y las virolas de refuerzo que son las virolas donde se apoyan los aros de rodadura, que suelen ser más pequeñas, de unos 1500 mm. Todas las virolas que componen el cilindro metálico del horno suelen ser del mismo diámetro, aunque de forma excepcional, la última virola correspondiente a la zona de entrada en el cabezal del horno puede ser más pequeña.

La colocación del revestimiento refractario en el interior de la carcasa del horno y la obra de mampostería, deben realizarse con el mayor cuidado para evitar su desmoronamiento, realizando la unión de los ladrillos con cementos refractarios adecuados. Deberán

conocerse al detalle, por tanto, las limitaciones de los ladrillos y las precauciones recomendadas para calentamiento, operación y enfriamiento del mismo. (Polysius, 2007 [19])

## CAPÍTULO VIII EQUIPOS EN CONTACTO DIRECTO CON EL HORNO ROTATORIO

Los equipos en contacto directo con el horno rotatorio y de los que depende la eficacia del mismo son:

- Intercambiadores de calor.
- Enfriadores.

### 1. INTERCAMBIADORES DE CALOR

Entre los intercambiadores de calor más importantes cabe destacar el *intercambiador Humboldt*, el intercambiador de calor *Dopol de Polysius*, intercambiador de calor *Miag*, intercambiador de calor *Krupp en contracorriente* y los *intercambiadores con precalcinador*.

#### 1.1. INTERCAMBIADOR DE CALOR HUMBOLDT.

En los hornos *Humboldt* con intercambiador el proceso se dividió en dos fases: se acortó significativamente el tubo de cocción convencional, y tanto la precalificación como la descarbonatación parcial del crudo, se asignaron al intercambiador.

El intercambiador de ciclones consiste en cuatro ciclones dispuestos uno encima del otro. Para lograr una mejor separación, el último tramo situado más alto, está dispuesto como ciclón doble. Los ciclones están conectados entre sí por tuberías ascendentes de sección cuadrada, pero la tubería superior es de sección circular.

Cada ciclón y su tubería forman un tramo del intercambiador. Las tuberías de salida del polvo de los ciclones desembocan en las tuberías de gases ascendentes del tramo situado debajo. La tubería de salida del polvo del último tramo desemboca en el horno.

La parte más importante de la transmisión de calor se realiza en los tubos ascendentes, un 80 %, mientras que en los ciclones sólo se transmite un 20 %.

En el intercambiador de calor Humboldt, una partícula tarda alrededor de 25 segundos en pasar por el intercambiador de 4 ciclones. Durante este tiempo, el crudo se calienta desde 50° C a 800° C, mientras que los gases ascendentes se enfrían desde 1100° C a 330° C.

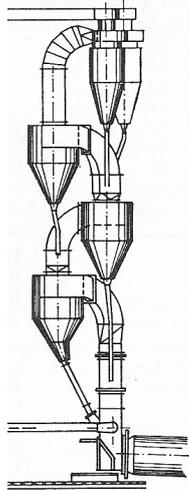


Fig. 1. Intercambiador de calor Humboldt..

## 1.2. INTERCAMBIADOR DE CALOR DOPOL DE POLYSIUS.

El intercambiador de calor *Dopol* es uno de los tipos de intercambiador por suspensión del crudo en los gases del horno construido por Polysius. La denominación *Dopol* está formada por las sílabas iniciales de las palabreas *Doppelstrom* (corriente doble) y *Polysius*. En el intercambiador *Dopol*, los tramos 1°, 3° y 4° consisten en ciclones dobles dispuestos en paralelo. El 2° tramo llamado recinto turbulento, está incluido como elemento único y trabaja a contracorriente. Las tuberías del tramo inferior tienen sección elíptica para evitar la formación de adherencias. La división de la vena gaseosa en dos líneas, permite establecer ciclones dobles de forma que las dos corrientes del material se reúnen en el recinto turbulento y allí son sometidas a movimientos turbulentos.

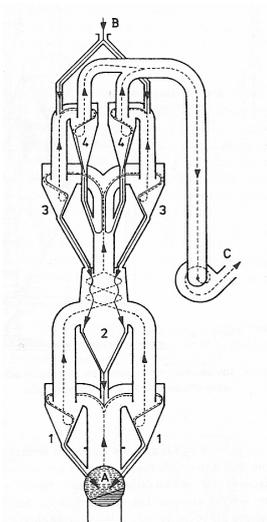


Fig. 2. Intercambiador de calor Dopol.

A: horno rotatorio

B: entrada de crudo

C: gas residual a desempolvado

4: tramo IV, dos ciclones en paralelo con intercambio y flujos en el mismo sentido

3 : tramo III, igual que el tramo IV

2: tramo II, llamado recinto turbulento con intercambio de calor a contracorriente

1: tramo I, igual que el tramo IV.

### 1.3. INTERCAMBIADOR DE CALOR MIAG

El intercambiador de calor *Miag* consiste en tres ciclones dobles que trabajan con corrientes del mismo sentido y de un recinto turbulento cónico que lo hace a contracorriente.

El crudo accede por su peso al intercambiador en la corriente de gases entre el 1º y 2º tramo. La corriente gaseosa capta primero las partículas de crudo y después las acelera y calienta. El exhaustor aspira el gas residual, mientras que el crudo se incorpora al flujo de gases, repitiéndose el proceso. El recinto turbulento cónico, toma el crudo del segundo tramo y lo envía rápidamente por las tuberías al tercer ciclón. Después de la separación de los gases, el crudo regresa al recinto turbulento a través de dos tubos de caída, desde donde por las tuberías para gases vuelve parcialmente a los ciclones terceros. Se establece así un circuito de crudo cuya carga se eleva hasta un valor de saturación. En el momento en el que se ha rebasado la capacidad de suspensión de los gases para el crudo, se forman nubes de polvo, que se depositan cada vez más profundamente en el cono turbulento y caen hacia abajo en sentido contrario al de la corriente gaseosa. Finalmente el crudo accede al horno a lo largo de un resbaladero.

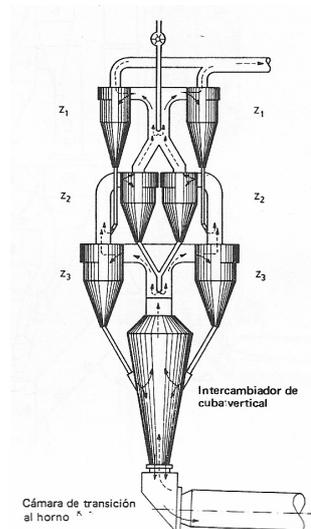


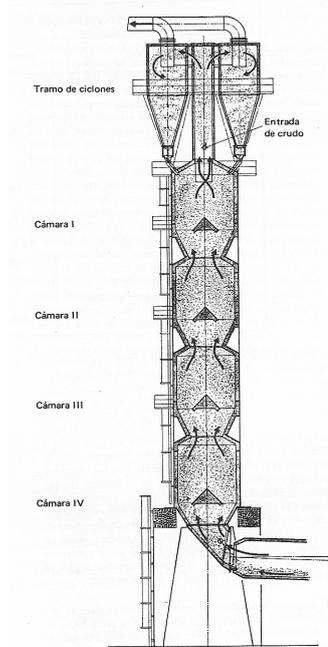
Fig. 3. Intercambiador de calor Miag.

#### 1.4. INTERCAMBIADOR DE CALOR KRUPP

El intercambiador construido por *Krupp* es un intercambiador que funciona totalmente a contracorriente excepto el tramo superior que a efectos de separación de polvo está constituido por ciclones.

El *intercambiador Krupp* consiste en un tramo superior compuesto por dos ciclones con tuberías ascendentes y en un cilindro vertical autosoportado. Estrechamientos tipos tobera dividen el cilindro en cuatro cámaras. Por encima de cada estrechamiento está dispuesto un dispositivo cónico que genera una distribución regular de polvo que va cayendo. De este modo el intercambiador trabaja con cinco tramos. El material entra en el sistema por el compartimiento situado entre la cámara más alta del cilindro y el tramo de ciclones y allí lo toma la corriente gaseosa, precalentado y separado en los ciclones, a través de sus tubos de caída, pasa a la primera cámara del cilindro vertical desde la que va cayendo de cámara en cámara, a contracorriente de los gases hasta que desde la última accede al horno, dispuesto a continuación.

En cada una de las cámaras del intercambiador se mantiene momentáneamente el crudo en suspensión hasta sobresaturación en polvo gracias al estrechamiento. Lo que favorece su permanencia en el intercambiador. Este proceso se repite cuatro veces.



*Fig. 4. Intercambiador de calor Krupp.*

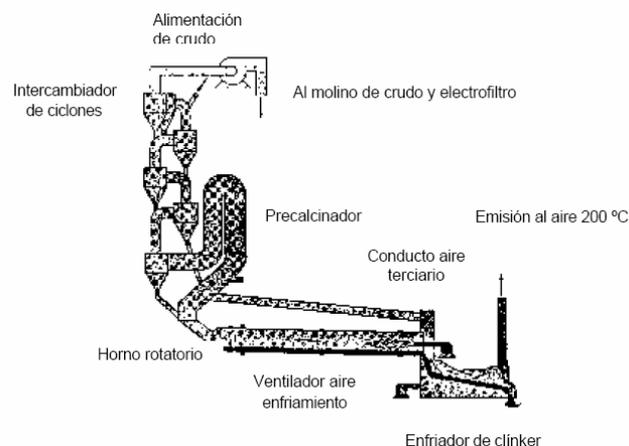
## 1.5. INTERCAMBIADOR CON PRECALCINADOR

Son intercambiadores en los que la calcinación del crudo tiene lugar aparte en una llamada cámara de calcinación instantánea, mientras que la sinterización se realiza en un horno relativamente corto y con la correspondiente corta permanencia en él.

Según el proceso convencional, en el intercambiador de calor se descarbonata el crudo, de modo poco significativo (10-15 %) y aproximadamente la mitad de la longitud del horno rotatorio, conectado a continuación del intercambiador, se aplica a la calcinación, la otra mitad se destina a la sinterización.

Realmente, se parte de la idea de que el horno rotatorio sólo ejerce como intercambiador económico en la zona de sinterización, donde la transmisión de calor se realiza por radiación. No es económica la transmisión de calor en las zonas frías del horno, es decir en la zona de descarbonatación. La transmisión térmica de la descarbonatación puede resultar económica si se realiza en el seno de la suspensión de las partículas de polvo en los gases. Los intercambiadores con precalcinador resuelven este problema con la cámara de calcinación, donde el crudo queda calcinado en un 90 % y ya, en este estado pasa al horno. De este modo el horno se llevaría el 40% del calor total, el resto se destina a la alimentación de la cámara de precalcinación rápida.

En el proceso de precalcinación, la combustión de combustible necesario para una amplia calcinación del crudo en el intercambiador se realiza en la canalización de enlace entre el horno rotatorio y el intercambiador y el aire necesario para la combustión se aspira a lo largo del horno. Este proceso elimina las tuberías adicionales para el transporte del aire, con todos los problemas inherentes y se adapta a todos los tipos de enfriador de clinker. En la figura 5 se muestra la conexión de un horno rotatorio con el enfriador y con un intercambiador de calor de cuatro etapas con precalcinador.



*Fig. 5. Proceso de precalcinación.*

(Duda W. H. 1977 [1] / Soria F. 1980 [2] / Cemento Hormigón, 2005 [21])

## 2. ENFRIADORES

El crudo caliente a la salida del horno, se trata seguidamente en los enfriadores de clinker. La característica común que tienen todos los enfriadores es el flujo directo de aire de enfriamiento, a contracorriente o transversalmente a través del clinker, recuperando el calor del aire así calentado, como aire secundario para la combustión en el horno.

El agua es un medio de enfriamiento directo del clinker, usada sólo en la fabricación de tipos especiales de clinker o como postenfriado después del enfriamiento con aire.

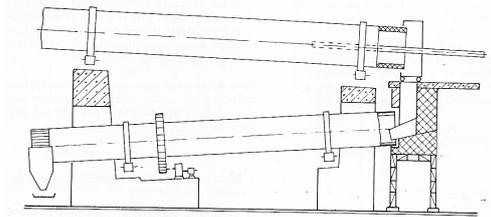
Entre los principales enfriadores de clinker cabe destacar los *enfriadores rotativos*, los *enfriadores planetarios*, los *enfriadores de parrilla* y los *enfriadores verticales*.

### 2.1. ENFRIADOR DE TAMBOR ROTATORIO

El enfriador de tambor rotatorio es el más antiguo de los enfriadores de clinker. Consiste en un tubo rotatorio instalado a continuación del horno, la mayoría de las veces en dirección opuesta. Paletas elevadoras o listones elevadores elevan al clinker y después lo dejan caer, con lo cual entra en contacto íntimo con el aire de enfriamiento, aumentando el rendimiento del enfriador.

Por la depresión creada en el horno rotatorio se aspira aire frío por el extremo abierto del enfriador de tambor, aire que recorre el tambor en dirección normal a la dirección de clinker en su interior.

Al llegar a la entrada del horno, el aire frío alcanza temperaturas entre 400° C y 750° C. El clinker abandona el horno, a temperatura entre los 1300-1350° C y sale del enfriador a temperaturas del orden de 150-300° C.

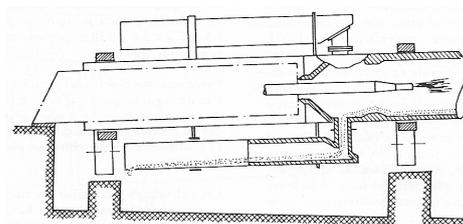


*Fig. 6. Enfriador de tambor rotatorio*

## 2.2. ENFRIADOR PLANETARIO

El enfriador planetario consiste en varios tubos situados en la periferia del extremo más caliente del horno, dispuestos en forma de corona y constituyendo un aparte integrante del horno. Los enfriadores planetarios se mueven conjuntamente con el horno, sin tener accionamiento propio. Los tubos enfriadores individuales están revestidos, hasta un 25 %, por material refractario. El resto de su longitud va provisto con cadenas o dispositivos elevadores.

El clinker corre a través de las aberturas practicadas en la envolvente del horno para entrar en los tubos enfriadores. El enfriamiento se realiza a contracorriente. La totalidad del aire enfriador llega al horno como aire secundario de combustión.



*Fig.7. Enfriador planetario.*

## 2.3. ENFRIADOR DE PARRILLA

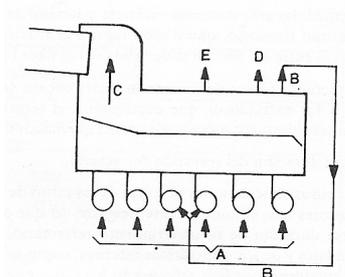
La parrilla consiste en una correa o cadena sin fin formada por elementos sueltos. Durante el proceso de enfriamiento, el clinker permanece sobre las placas de la parrilla móvil.

El enfriamiento se efectúa en dos zonas. En la zona primaria se sopla aire por pulsaciones, por debajo del lecho del clinker, a través de las rendijas de las placas de la parrilla, resultando una poderosa acción enfriadora. Al mismo tiempo, esta aireación contribuye a la distribución uniforme del clinker a todo lo ancho de la parrilla, quedando las partículas mayores debajo y las finas encima del lecho. Una presión menor de aire se aplica en la zona de enfriamiento secundario, para que el clinker se asiente y permanezca en reposo.

Un quebrantador de martillos desmenuza los trozos de clinker de mayor tamaño al caer a la parrilla móvil esparciéndola para su mejor enfriamiento.

Este tipo de enfriador permite el control exacto de la temperatura del aire y la temperatura del clinker y tiene muy pocas pérdidas de calor por radiación y convección, es posible un rápido enfriamiento inicial del clinker, lo que es de gran importancia para la formación del silicato tricálcico, y hace posible que al entrar en el enfriador, el clinker tenga una temperatura del orden de 1360-1400° C, con lo que el rendimiento térmico del enfriador se eleva un 72-75 %. Utilizando un exceso de aire de enfriamiento puede enfriarse el clinker hasta por debajo de los 65° C, lo cual permite la molienda inmediata del clinker.

A diferencia de los enfriadores planetarios y de tambor rotatorio, en los cuales el enfriamiento del clinker se realiza casi exclusivamente con una corriente transversal, en el enfriador de parrilla se efectúa en esa dirección y a contracorriente.

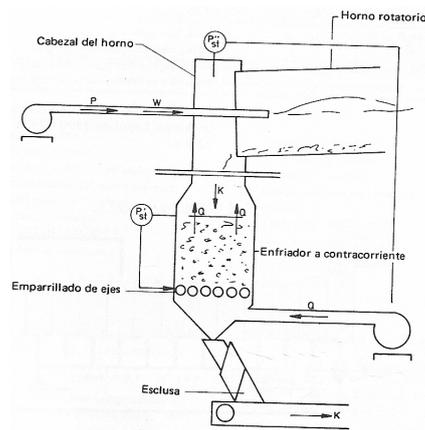


- A=aire frío, del ambiente exterior*
- B=aire de circulación*
- C=aire secundario*
- D=aire residual (a la chimenea)*
- E=aire central (para desecación de materias primas)*

*Fig. 8. Esquema enfriador de parrilla.*

## 2.4. ENFRIADOR DE CUBA VERTICAL

El enfriador de cuba consiste en una cámara de forma de cuba vertical, revestida de material refractario dotada con parrillas de barras, tolva de extracción y esclusa de tres cámaras estancas de aire. La parte superior de la cuba tiene un diámetro más pequeño para elevar la velocidad del aire en esta sección y crear con ello efecto de lecho fluidizado. Como consecuencia de esto, en la parte superior de la cuba el material se comporta como un fluido y se alcanza una distribución regular del clinker que llega al horno, sobre la sección total del enfriador en aquella zona.



*Fig.9. Esquema enfriador de cuba vertical*

(Duda W. H. 1977 [1] / Soria F. 1980 [2] / Cemento Hormigón 2005 [23])

## CAPÍTULO IX. ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES

### 1. GENERALIDADES

La industria cementera, como todas las actividades humanas, produce un impacto sobre el medio ambiente, que a lo largo de los años se ha ido reduciendo, tanto en las canteras de las que se extraen las materias primas como en las propias instalaciones fabriles. Los principales efectos medioambientales están ligados al consumo de energía y a las emisiones.

Por ello, a lo largo del tiempo, la industria cementera ha reducido los consumos de combustibles y de electricidad y ha disminuido las emisiones, fundamentalmente de polvo, en todas las etapas del proceso, hasta el punto de que las asociaciones empresariales han firmado con las autoridades *acuerdos voluntarios* reduciendo los límites legales de emisiones a la atmósfera.

El proceso de fabricación de cemento está asociado a los siguientes efectos ambientales:

- 1) La explotación de canteras supone un impacto medioambiental derivado de la ocupación de espacios (impacto visual) y de las actividades realizadas durante la explotación (voladuras, trituración, transporte).
- 2) La manipulación, almacenamiento y procesado de materiales en forma pulverulenta está asociada a la emisión de partículas, aspecto que ha sido el de mayor impacto histórico de las fábricas de cemento.
- 3) La cocción en el horno, que da lugar a emisiones de gases de combustión a la atmósfera, óxidos de nitrógeno y de azufre principalmente.

Aunque las plantas de cemento pueden tener impactos ambientales positivos, en lo que se relaciona con el manejo de los desechos. La tecnología y el proceso son muy apropiados para la reutilización o destrucción de una variedad de materiales residuales, incluyendo algunos desperdicios peligrosos. Asimismo, el polvo del horno que no se puede reciclar

en la planta sirve para tratar los suelos, neutralizar los efluentes ácidos de las minas, estabilizar los desechos peligrosos o como relleno para el asfalto.

La cuestión que se plantea ante la utilización de determinados residuos como sustitutos de los combustibles tradicionales y de las materias primas, es como se verá afectado el entorno y las condiciones medioambientales en las inmediaciones de las fábricas. La utilización de residuos como materias primas de sustitución o como combustibles alternativos no produce efectos apreciables sobre el proceso ni sobre el medio ambiente, siempre que respeten las adecuadas especificaciones de aceptación y las condiciones de operación sean las correctas. Las materias primas no deben estar contaminadas con sustancias indeseables como materia orgánica y los combustibles han de tener limitado el contenido en determinados elementos como cloro y metales pesados para garantizar la estabilidad del proceso y limitar los posibles efectos ambientales.

En el proceso cementero no se producen residuos líquidos ni sólidos, pues incluso los sistemas de alimentación por vía húmeda evaporan toda el agua que se introduce con el crudo. El polvo que se recoge en los sistemas de filtración de gases (electrofiltros, filtros de mangas,...) se reincorpora al proceso en el lugar más adecuado. Luego los elementos introducidos por medio de los residuos o salen en el producto final o con las emisiones a la atmósfera.

El producto final está muy controlado y existe una serie de límites establecidos para determinados elementos, con el fin de que la calidad del producto no se vea afectada. Por ello las plantas cementeras, realizan un análisis del producto obtenido para garantizar la calidad, además de todos los análisis de emisiones en las chimeneas, obligados por las normativas. (Club español de residuos, 2001 [16])

## **2. CONSUMO INTENSIVO DE ENERGÍA**

El proceso de fabricación de cemento se basa en una serie de transformaciones mineralógicas por las que se da al producto su propiedad de endurecer cuando se mezcla con agua. Estas transformaciones son procesos de cocción y molienda, que

requieren cantidades de energía térmica (combustibles) y eléctrica tan importantes que suman alrededor del 2% de la energía primaria consumida en España.

La energía térmica se consume prácticamente en su totalidad en el horno rotatorio, suministrándose esta energía mediante distintos combustibles fósiles.

El consumo de energía eléctrica se realiza principalmente en las operaciones de molienda, tanto de las materias primas antes de su cocción, como del clinker y las adiciones para obtener el cemento Portland. Entre ambas operaciones suponen aproximadamente el 75% de la electricidad consumida en la fábrica, el otro 25% se emplea en el transporte de materiales, impulsión de gases y desempolvado de los mismos (electrofiltros). El consumo total se sitúa aproximadamente entre 90 y 120 kwh/t de cemento, dependiendo de la tecnología utilizada y el tipo de cemento fabricado.

Por esta razón en la mayoría de las plantas se trabaja de manera que se optimicen las instalaciones (moliendo de noche, por ejemplo) en función de los costes de producción.

Según esto, los costes energéticos de combustible y energía eléctrica representan entre un 30 y un 40% de los costes de fabricación, por lo que la reducción del consumo de energía y la diversificación de las fuentes energéticas se convierte en un asunto de máxima importancia para la competitividad de las empresas cementeras.

## **2.1. VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUOS EN EL PROCESO DE FABRICACIÓN DE CEMENTO PORTLAND.**

### **2.1.1.CONDICIONES TERMOQUÍMICAS DE LOS HORNOS DE CLÍNKER**

Aunque en los últimos cien años se ha realizado un continuo progreso en la modernización de la industria cementera, mejorando la eficiencia energética de los hornos y desarrollando nuevos tipos como puede observarse en la Tabla 1, (incluso en las últimas dos décadas se ha reducido el consumo de energía para fabricar una tonelada

de cemento aproximadamente en un 30%), esta reducción se encuentra en una fase asintótica, es decir, que en el futuro ya no habrá apenas margen de maniobra para seguir reduciendo. Por esta razón se ha buscado utilizar la flexibilidad de los hornos de esta industria para sustituir los combustibles tradicionales por otros procedentes de residuos o subproductos.

Tipo de horno	Año	Eficiencia (Kcal/Kg.clinker)	CO <sub>2</sub> combustión (Kg/T clinker)
Hornos de flecha	1880	3.000	1.900
Primeros hornos rotativos	1900	2.500	1.583
Primeros hornos vía húmeda	1940	1.500	950
Hornos vía húmeda modernos	1955	1.300	823
Hornos largos vía seca	1970	1.050	665
Hornos con precalentamiento	1975	850	538
Hornos con precalcinador	1980	800	507
Precalcinador con 40% combustible	1995	750	380
Precalcinador con 60% combustible	2000	725	298

*Tabla 1. Evolución histórica de la eficiencia de los hornos de clinker. (Cemento y Hormigón N° 802.1999 [25])*

Dependiendo de la tecnología empleada, la combustión en el horno de clinker puede realizarse en una o en dos zonas:

- ✦ En el mechero principal que tienen todos los hornos rotatorios, situado en la parte más baja del horno, en él la llama alcanza temperaturas entorno a 2.000 °C y los gases de combustión se mantienen a esta temperatura durante un tiempo superior a 5 segundos en atmósfera oxidante.

- ✦ En la zona donde se produce la descarbonatación de la caliza (calcinación) donde la combustión se realiza a unos  $1.200^{\circ}\text{C}$ , y los gases se mantienen durante unos 3 segundos a más de  $850^{\circ}\text{C}$ .

La segunda zona de combustión varía según el tipo de horno utilizado en el proceso:

- ✦ Los más modernos disponen de una cámara de combustión (precalcinador) situada en la parte inferior de la torre de ciclones, en la que se utiliza como comburente el aire caliente proveniente del enfriador de clínker. En el caso de no disponer del aporte de este aire terciario, la combustión se realiza con exceso de oxígeno del quemador principal del horno.
- ✦ En los hornos vía seca sin precalcinador y los de vía semiseca y semihúmeda, puede realizarse esa segunda combustión en el primer tramo del horno rotatorio.
- ✦ En los hornos de vía húmeda o en los largos, se puede realizar una combustión con combustibles alternativos en una zona idónea de temperatura, mediante un sistema de alimentación llamado “Mid Kiln”, en el que un sistema de compuertas permite alimentar de combustible en cada vuelta de rotación del horno.

Sistema	Tiempo de retención a $> 1.200^{\circ}\text{C}$ (seg)	Temperatura llama ( $^{\circ}\text{C}$ )
Húmedo	$>11$	1.950-2.300
Seco	$>5.4$	2.150
Semihúmedo/semiseco	$>6.7$	1.930-2000

Tabla 2. Condiciones de combustión en las diferentes vías tecnológicas. (Duda W. H. 1977 [1]).

Ante estas condiciones térmicas de los hornos de clinker y las demás características del proceso del cemento, en muchos países se optó por utilizar determinados residuos y subproductos como sustitutos de parte de los combustibles fósiles tradicionales, permitiendo reducir el coste de fabricación del cemento y realizar una labor de apoyo en la gestión de residuo

Teniendo en cuenta que los parámetros necesarios para una adecuada destrucción de los residuos incinerables son:

- ☒ Preparación del residuo y dosificación adecuada.
- ☒ Temperatura de los gases de combustión superior a 850 °C (1.100 °C cuando son residuos halogenados).
- ☒ Tiempo de residencia de los gases a dicha temperatura durante más de 2 segundos.
- ☒ Concentración de oxígeno suficiente para la completa oxidación de los residuos incinerados.
- ☒ Una turbulencia tal que permita una mezcla eficaz con el aire de combustión.
- ☒ Unos niveles de depuración que permitan cumplir los límites impuestos de emisión de contaminantes.

Los hornos de clinker cumplen a la perfección todos estos parámetros, incluso tienen una serie de características que les permiten mejorar sobradamente algunos de ellos:

- ☒ Trabajan en una atmósfera oxidante y a muy altas temperaturas (superiores a 1.450 °C para materiales y a 2.000 °C para la llama, con un exceso de oxígeno del 2-3%).
- ☒ Tienen una alta inercia térmica (evita los riesgos de las bajas temperaturas durante periodos de tiempo cortos).
- ☒ Ambiente alcalino (lo que permite neutralizar ciertos contaminantes).
- ☒ Un largo período de contacto entre los gases de combustión y los componentes alcalinos (mejora la eficiencia de depuración de contaminantes).

- ☒ Retención de partículas y cenizas (con lo que no se generan residuos secundarios).

En una combustión tradicional se obtienen CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O como productos principales de las reacciones de oxidación de los hidrocarburos, sin embargo en el proceso cementero, debido a la alta temperatura del horno, se oxida el nitrógeno del aire empleado en la combustión, emitiendo niveles de NO<sub>x</sub> del orden de 500-2.000 mg/Nm<sup>3</sup>, fundamentalmente son NO y NO<sub>2</sub> (> 90 % NO , < 10 % NO<sub>2</sub>).

Adicionalmente, también se genera una mayor cantidad de CO<sub>2</sub> como consecuencia de la descarbonatación. La composición típica de los gases de salida del horno y los contaminantes presentes en ellos, es la mostrada en la Tabla 3, donde se dan unos rangos amplios, no solamente por las diferencias técnicas de los hornos, sino también por las diferentes características de las materias primas.

<b>Composición de los gases</b>	<b>%</b>
Nitrógeno	45-67
Dióxido de carbono	11-29
Oxígeno	3-10
Otros (incluidos contaminantes)	<1
<b>Concentración contaminantes</b>	<b>mg/Nm<sup>3</sup></b>
Polvo	20-200
NO <sub>x</sub>	500-2.000
SO <sub>2</sub>	5-2.500
TOC	10-100
CO	200-2.000
Fluoruros	<5
Cloruros	<25
Dioxinas y furanos	<0.1 (mg/Nm <sup>3</sup> )
<b>Metales pesados</b>	
Grupo I: Hg, Cd, Tl	<0.1
Grupo II: As, Co, Ni, Se, Te	<0.1
Grupo III: Sb, Pb, Cr, Cu, Mn, V, Sn, Zn	<0.3

*Tabla 3. Composición típica de los gases de salida y los contaminantes presentes en ellos. (Cuadernos del CER, 2001 [16])*

Con las condiciones de combustión de los hornos de clínker y demás instalaciones del proceso cementero, los compuestos orgánicos contenidos en los residuos o subproductos destinados a sustituir parte de sus combustibles tradicionales, se oxidarán formando mayoritariamente  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  y liberando energía que será aprovechada para el proceso de fabricación de clínker.

Otros compuestos que pueden estar presentes en los combustibles de sustitución (o en los tradicionales y en las materias primas) se comportarán de distinta manera según su naturaleza. Así el cloro y el azufre podrán formar gases ácidos como el cloruro de hidrógeno y el óxido de azufre. Estos gases, debido al ambiente alcalino, se neutralizarán y se absorberán por la materia prima. De esta forma las sales inorgánicas (cloruros alcalinos y sulfatos) que se forman se incorporan al clínker, ya que el 99% de esos cloruros alcalinos se volatilizan a  $1.400\text{ }^\circ\text{C}$  y comienzan a condensar a  $800\text{ }^\circ\text{C}$ .

### **2.1.2. RESIDUOS UTILIZADOS COMO COMBUSTIBLES**

Existe una gran variedad de combustibles que pueden ser utilizados en el proceso de producción de cemento, aunque históricamente ha sido el carbón el más empleado para la alimentación de los hornos de clínker, en la actualidad se aprecia un aumento en el consumo de coque de petróleo y de los combustibles alternativos o de sustitución, tanto líquidos como sólidos.

Los combustibles alternativos tanto líquidos como sólidos utilizados en una cementera pueden verse en al Tabla 4:

COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS LÍQUIDOS ( de baja toxicidad)
Aceite usado Lodos aceitosos Residuos de refinería /fondos de destilación Subproductos de alquitrán Alquitranes ácidos Lodos ácidos Residuos de la fabricación de pinturas y disolventes... / lodos de pintura Residuos de la industria química Residuos de de hidrocarburos/ hidrocarburos con lodos Lejías negras y aguas residuales industriales Parafinas

*Tabla 4. Combustibles alternativos líquidos utilizados en la producción de cemento.*

COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS SÓLIDOS		
DE FÁCIL MOLIENDA	DE MEDIANA O DIFÍCIL MOLIENDA	
	GRAN TAMAÑO	PEQUEÑO TAMAÑO
Rechazos de minas de carbón Lignitos de baja calidad Residuos de carbón Residuos de carbón vegetal Cenizas de alto contenido en carbono Grafitos Harinas cárnicas y de hueso	Neumáticos Revestimiento de baterías Rechazos domésticos Pellets de CDR Residuos de automóvil Corteza Astillas de madera Piñas Residuos del aceite de palmera Caparazones de coco Aceitunas prensadas Turba Restos de calderas (aluminio)	Cáscara de arroz Paja Serrín Tierras de batán Restos finos de CDR Polvo de grafito Goma y caucho molido Resinas de intercambio iónico

*Tabla 5. Combustibles alternativos sólidos utilizados en la producción de cemento.*

Resulta frecuente entre las instalaciones que valorizan residuos, el hecho de agruparlos y clasificarlos según su tipología. Para ello se establecen una serie de familias que permiten en todo momento identificar de forma rápida la naturaleza de éstos, su poder calorífico y otros aspectos de interés. A pesar de no existir una clasificación estándar, la siguiente representa un ejemplo significativo:

- Aceites usados y residuos aceitosos
- Disolventes
- Líquidos y pastosos orgánicos combustibles
- Neumáticos usados
- Residuos de plástico
- Residuos de papel
- Residuos agrícolas
- Lodos de depuración
- Líquidos de bajo poder calorífico
- Harinas de animales
- Otros

Para que un residuo sea considerado interesante para su utilización como combustible alternativo ha de tener una ventaja económica respecto a éstos y además ha de reunir las características propias de un buen combustible, esto es:

- suficiente poder calorífico
- ausencia de interferencias en las características del producto
- ausencia de emisiones contaminantes.

A la hora de utilizar un determinado combustible alternativo, no sólo es de vital importancia para su selección la composición química de éste y el poder calorífico que posea, sino que existen otros muchos aspectos que también deberán ser valorados. Así por ejemplo, el suministro de residuos al horno ha de producirse de manera continua,

para lo cual es necesaria la previsión de espacios (abiertos o cerrados), silos o tanques para el almacenamiento de los residuos. Éstos pueden encontrarse en la propia instalación o fuera de ella, en cuyo caso será preciso transportarlos de forma segura y controlada.

Asimismo, con frecuencia es necesario un acondicionamiento previo del residuo, ya sea mediante trituración o corte para el caso de sólidos o mediante procesos de mezcla y homogeneización para el caso de líquidos, con el fin de adecuarlos a las condiciones de almacenamiento, manipulación y combustión de la fábrica de cemento. Igualmente, esto puede llevarse a cabo dentro de la propia planta o en instalaciones específicas. Entre los residuos que necesitan un acondicionamiento en Centros de Preparación de Combustible externos a las cementeras están las plantas de preparación de CDR (Combustible Derivado de Residuos). El CDR procedente de los residuos municipales es un combustible que también puede sustituir a los combustibles tradicionales en las cementeras. (Cuadernos del CER, 2001 [16])

### 3. EMISIONES

La Directiva IPPC<sup>1</sup> incluye una relación indicativa de las principales sustancias que contaminan el aire, repercuten en la salud del hombre y deben ser tomadas en consideración. Las más relevantes de éstas para el caso de la fabricación del cemento serían:

- Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>)
- Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)
- Partículas
- Ácido clorhídrico (ClH)
- Ácido fluorhídrico (FH)
- Metales y sus compuestos.
- Monóxido de carbono (CO)
- Compuestos orgánicos volátiles (COVs)
- Dibenzodioxinas policloradas (PCDD)
- Dibenzofuranos (PCDF).

Las principales emisiones de la producción de cemento son liberadas a la atmósfera desde los sistemas del horno rotatorio. Éstas derivan de las reacciones fisicoquímicas que implican las transformaciones de la materia primera y la combustión de los materiales utilizados como combustibles.

<sup>1</sup> Directiva 96/61/CE del Consejo de 24 de septiembre de 1996 relativa a la Prevención y al Control Integrados de la Contaminación. La transposición de esta directiva se realiza mediante un R.D que ha sido aprobado en el pleno de las Cortes en su sesión del 13/6/02.

### **3.1. CONTROL Y SEGUIMIENTO**

Los rangos de emisión de los hornos cementeros dependen, por un lado, de la naturaleza de las materias primeras utilizadas, de los combustibles, de la edad y diseño de la planta y de la adaptación tecnológica de ésta. Por otro lado, y en muchos casos de forma determinante, por los requerimientos legales.

En este sentido tomando como referencia tanto la Directiva 2000/76/CE sobre incineración de residuos, como el documento de referencia para las MTD para la industria del cemento, sintetizamos en la Tabla 6 los mecanismos y controles exigibles a una industria cementera, especialmente si pretende coincinerar residuos.

En cualquier caso, como se ha expuesto, las emisiones de contaminantes resulta lo suficientemente compleja y controvertida como para que no deba establecerse ningún patrón o evaluación mínimamente rigurosa partiendo de una información parcial o con escasa fiabilidad. Como contrapartida, la realidad de partida sobre el control y seguimiento de las instalaciones cementeras se concreta en una medición anual de unos escasos parámetros (partículas totales, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>) y unos informes rutinarios para cumplimentar la laxa normativa vigente.

<b>PARÁMETROS A MEDIR</b>	
Partículas totales. Partículas < 10µ. Partículas < 2.5 µ Sustancias orgánicas en estado gaseoso y de vapor expresados en carbono orgánico total (COT). Cloruro de hidrógeno (HCl). Fluoruro de hidrógeno (HF). Monóxido de carbono (CO) Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ) Óxidos de nitrógeno, expresados como dióxidos de nitrógeno (NO <sub>2</sub> ) Cadmio y sus compuestos, expresados en Talio (Tl) Mercurio y sus compuestos, expresados en /Hg) Antimonio y sus compuestos, expresados en (Sb)	Arsénico y sus compuestos, expresados en arsénico (As) Plomo y sus compuestos, expresados en plomo (Pb) Cromo y sus compuestos, expresados en cromo (Cr) Cobalto y sus compuestos, expresados en cobalto (Co) Cobre y sus compuestos, expresados en cobre (Cu) Manganeso y sus compuestos, expresados en (Mn) Níquel y sus compuestos, expresados en níquel (Ni) Vanadio y sus compuestos, expresados en vanadio (V) Dioxinas Furanos BTX (benceno, tolueno, xileno) PAH PCB
<b>MEDIDAS EN CONTINUO</b>	
Partículas totales Sustancias orgánicas en estado gaseoso y de vapor expresadas en carbono orgánico total (COT). Cloruro de hidrógeno (HCl) Fluoruro de hidrógeno (HF). Monóxido de carbono (CO) Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ). Óxidos de nitrógeno, expresados como dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> ).	
<b>CONTROLES EN CONTINUO DEL PROCESO</b>	
Temperatura del horno (junto a pared interior). Concentración de oxígeno. Presión de los gases de escape. Temperatura de los gases. Contenido de vapor de agua de los gases.	
<b>LUGARES DE CONTROL DE MEDICIÓN DE CONTAMINANTES</b>	
Chimeneas. Cemento (clinker). Refractarios del horno. Ambiente interior de fábrica (partículas y COV)	

*Tabla 6. Control y seguimiento de las emisiones. (CER N°3, 2001 [16])*

### **3.2 CORRECCIÓN DE LAS EMISIONES**

Como primer elemento dentro de la corrección de las emisiones, encontramos que existen unas técnicas genéricas que se centran en la optimización del proceso productivo. Esta optimización presupone el mantenimiento, e incluso la mejora, de las calidades del cemento, por lo que la propia empresa resulta especialmente interesada en ello.

Con todo, estas medidas primarias no parecen resultar suficientes para una adecuada corrección de las emisiones, por ello, las normativas para la protección del medio ambiente son cada vez más estrictas, imponiéndose valores límite para la emisión de contaminantes cada vez más bajos. Ya que las medidas primarias para la reducción de emisiones, por sí mismas, no producen disminuciones suficientes, es necesario aplicar sistemas de limpieza adicionales que aseguren unas emisiones inferiores a los valores establecidos. Las opciones que se enuncian para el tratamiento de gases en el documento de referencia para las MTD:

- Reducción selectiva no catalítica (SNCR de sus siglas en inglés).
- Reducción selectiva catalítica (SCR de sus siglas en inglés).
- Depuración en seco.
- Depuración en húmedo.
- Precipitadores electrostáticos (electrofiltros, EP de sus siglas en inglés).
- Filtros de mangas.
- Filtros de carbón activo.

Tanto los electrofiltros (EP) como los filtros de mangas presentan hoy día unos rendimientos semejantes para la retención de partículas. Sin embargo, ninguno de los dos tipos de filtros mencionados presenta las altas eficiencias necesarias para la retención de contaminantes orgánicos y los metales más volátiles, que sí parecen presentar los filtros de carbón activo.

En síntesis puede plantearse que una opción eficiente podría ser, para el tratamiento final de gases, una combinación de filtro de mangas y carbón activado. De la información disponible se deduce que el conjunto de plantas cementeras no están operando con la información mínima necesaria, ni con las mejores opciones posibles para la reducción de los metales más volátiles y los contaminantes orgánicos.

#### 4. IMPACTOS POTENCIALES NEGATIVOS . MEDIDAS DE ATENUACIÓN

Los posibles impactos negativos, tanto directos como indirectos, que puede producir la actividad de una planta cementera sobre el medio ambiente y las medidas de atenuación más adecuadas, son las siguientes:

<b>Impactos Potenciales Negativos Directos</b>	<b>Medidas de Atenuación</b>
I. Ubicación de la planta en o cerca de los hábitat sensibles como esteros, humedales y arrecifes de coral.	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Ubicar la planta en un área industrial, a fin de reducir o concentrar la carga sobre los servicios ambientales locales y facilitar el monitoreo de los efluentes.</li><li>▪ Integrar la participación de las agencias de los recursos naturales en el proceso de la selección del sitio, a fin de estudiar las alternativas.</li></ul>
II. Ubicación cerca de los ríos que causa su eventual degradación	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ El proceso de la selección del sitio debe examinar las alternativas que reducen los efectos ambientales y no excluyan el uso beneficioso de la extensión de agua.</li><li>▪ Las plantas que reduzcan descargas líquidas, no deben ubicarse en ningún río que no tenga la capacidad adecuada para absorber los desechos.</li></ul>

<p>III. La ubicación puede causar serios problemas de contaminación atmosférica en el área local.</p>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Ubicarla en un área que no esté sujeta a “atrapamiento” de los contaminantes, y donde los vientos predominantes se dirijan hacia las áreas relativamente despobladas.</li></ul>
<p>IV. La ubicación puede agravar los problemas que se relacionan con los desechos sólidos en el área.</p>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ La selección del sitio debe evaluar la ubicación según los siguientes lineamientos:<ul style="list-style-type: none"><li>❑ El lote debe ser de un tamaño suficiente que permita eliminar los desechos en el sitio.</li><li>❑ La planta debe estar cerca de un depósito para la eliminación de desechos.</li><li>❑ La ubicación debe ser conveniente para que los contratistas públicos privados puedan recolectar y transportar los desechos sólidos al sitio donde serán eliminados definitivamente.</li></ul></li></ul>
<p>V. Contaminación hídrica debido a los efluentes y el agua de enfriamiento o el escurrimiento de las pilas de desechos.</p>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ El análisis de laboratorio de los efluentes debe incluir los Sólidos Totales Disueltos, los Sólidos Totales Suspendidos, las sales, la alcalinidad, el potasio, los sulfatos y el monitoreo in-situ del PH y la temperatura.</li><li>▪ Para todas las plantas:<ul style="list-style-type: none"><li>❑ No debe haber ninguna descarga de agua de enfriamiento. Si no es factible reciclarla, se puede descargar el agua de enfriamiento, siempre que la temperatura del agua que la recibe no suba más de 3°C.</li><li>❑ No debe haber ninguna descarga del agua de lavado, ni los derrames del tanque de la lechada.<ul style="list-style-type: none"><li>○ Mantener el pH del efluente entre 6.0 y 9.0</li></ul></li></ul></li></ul>

	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Plantas que no realizan lixiviación.<ul style="list-style-type: none"><li>○ Sólidos Totales Suspendidos &lt; 5 g/T de producto</li><li>○ Sólidos Totales disueltos, su concentración no debe ser mayor que la del agua que ingresa a la planta.</li></ul></li><li>▪ Plantas que realizan lixiviación<ul style="list-style-type: none"><li>○ Sólidos Totales Suspendidos &lt; 150 g/T de producto</li><li>○ Sólidos Totales Disueltos &lt; 1.5 kg/T de producto.</li></ul></li><li>▪ Pilas de acopio de materiales<ul style="list-style-type: none"><li>○ Reducir al mínimo la cantidad de lluvia que se filtra por los montones y se escurra de manera incontrolada.</li><li>○ Revestir las áreas de almacenamiento.</li></ul></li><li>▪ Lavado de equipos, caminos y otros.<ul style="list-style-type: none"><li>○ &lt; 150 g/T de producto durante el lavado de los equipos o durante los períodos de lluvia.</li><li>○ Los procedimientos de limpieza de la planta deberán reflejar el nivel deseado de mitigación.</li></ul></li></ul>
<p>VI. Emisión de partículas a la atmósfera provenientes de todas las operaciones de la planta: trituración, manejo de materiales, hornos, enfriadores de escoria.</p>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Controlar las partículas con filtros recolectores de tela.</li><li>▪ Controlar las emisiones de partículas del horno con recolectores precipitadores electrostáticos de polvo, y emplear acondicionamiento con agua en las operaciones secas del proceso.</li><li>▪ Controlar las partículas de la siguiente manera:<ul style="list-style-type: none"><li>○ del horno, 150 g/tonelada de materia prima;</li><li>○ del enfriador de escoria, 50 g/tonelada de escoria.</li></ul></li></ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ a nivel de la tierra fuera del perímetro de la planta, 80 <math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math></li> <li>○ descarga de la chimenea, 100 <math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>.</li> </ul>
<p>VII. Emisión de partículas de las fuentes que se encuentran a nivel de la tierra (partículas de polvo fugitivo), caminos, pilas.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Las medidas de control incluyen:             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ tratamiento de los caminos</li> <li>○ rocío de agua en las pilas</li> <li>○ uso de una aspiradora industrial</li> </ul> </li> </ul>
<p>VIII. Emisión por el horno de SO<sub>2</sub>, gaseoso hacia la atmósfera, proveniente de la quema de los combustibles.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Controlar con la acción natural de limpieza, que hacen los materiales alcalinos, mejorada mediante el uso de los hornos de precalentamiento, y los gases de escape, para secar la materia prima durante la molienda.</li> <li>▪ Si se analiza la materia prima durante la etapa de factibilidad del proyecto, se puede determinar su contenido de azufre; de esta manera se puede diseñar correctamente los equipos que controlan las emisiones.</li> <li>▪ Dentro de la cerca de la planta             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Media aritmético anual: 100 <math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>;</li> <li>○ Valor tope durante 24 horas 1000 <math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>;</li> </ul> </li> <li>▪ Fuera del perímetro de la planta             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Media aritmético anual: 100 <math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>;</li> <li>○ Valor tope durante 24 horas 500 <math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>;</li> </ul> </li> </ul>
<p>IX. Emisión por el horno de NO<sub>x</sub>, gaseoso hacia la atmósfera, proveniente de la quema de los combustibles.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reducir el NO<sub>x</sub> mediante el uso de carbón y hornos precalentadores/precalcinadores.</li> <li>▪ Se debe controlar cuidadosamente el uso del material vegetal o los desechos químicos de otras industrias locales, porque estos combustibles pueden aumentar las emisiones atmosféricas de NO<sub>x</sub>.</li> </ul>

<p>X.Desarrollo secundario inducido, incluyendo la mayor demanda sobre la infraestructura.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ De ser posible, efectúe la puesta en marcha en un momento en que el viento no esté soplando hacia las áreas pobladas, o ecológicamente frágiles.</li> </ul>
<p>XI.Cambios en los modelos demográficos y alteración de los valores y sistemas socioculturales.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Diseñar el precipitador con cámaras paralelas a fin de utilizar una parte del equipo cuando la otra esté en reparación.</li> <li>▪ Exigir la paralización del horno si el precipitador está completamente fuera de servicio.</li> </ul>
<p>XII.La quema de los desechos y aceites peligrosos como combustibles suplementarios, puede emitir la atmósfera a los contaminantes tóxicos de la combustión incompleta, y metales como plomo.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ No obstante, los estudios han demostrado que la mayoría de materiales orgánicos se destruyen con una eficiencia del 99.99 por ciento y que el polvo del cemento absorbe los metales, los mismos que se acumulan luego en el sistema que controla la contaminación atmosférica.</li> <li>▪ La incidencia de los accidentes es mayor que lo normal debido al nivel de experiencia de los trabajadores.</li> <li>▪ Se debe tener cuidado y asegurarse que, (a) los desechos y aceites peligrosos se analicen antes de aprobarlos para incineración, y (b) que se mantenga la eficiencia de combustión del horno.</li> <li>▪ Introducir los desechos en el extremo “caliente” del horno</li> <li>▪ Diseñar los procedimientos de manejo de los desechos peligrosos y los planes de contingencia.</li> </ul>
<p align="center"><b>Impactos Potenciales Negativos Directos</b></p>	<p align="center"><b>Medidas de Atenuación</b></p>
<p>XIII.Los efectos ocupacionales para la salud de los trabajadores debido al polvo fugitivo, el manejo de los materiales u otras operaciones del proceso.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ La instalación debe implementar un Programa de Seguridad y Salud que incluya lo siguiente:</li> <li>▪ Identificar, evaluar, monitorear y controlar los peligros para la seguridad y la salud con un nivel específico de detalle.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ considerar los peligros para la salud y seguridad de los trabajadores.</li> <li>▪ proponer los procedimientos necesarios para proteger a los empleados.</li> <li>▪ dar capacitación de seguridad.</li> </ul>
<p>XIV. Se complica el problema de la eliminación de los desechos sólidos en la región debido a la falta de almacenamiento en el sitio;</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Planificar las áreas adecuadas para la eliminación en el sitio, o emplear el polvo del horno u otros subproductos como material de relleno local, luego de verificar si el líquido lixiviado tiene características peligrosas.</li> <li>▪ Utilizar el polvo del horno para tratar el suelo, neutralizar el ácido o estabilizar los desechos peligrosos.</li> </ul>
<p>XV. Se alteran los modelos de tránsito, se crea ruido y congestión, y se producen peligros para los peatones debido al uso de camiones pesados para transportar la materia prima, el combustible o el cemento hacia la planta o fuera de ella.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ La selección del sitio puede atenuar algunos de estos problemas.</li> <li>▪ Se deben preparar estudios especiales del sector de transporte durante el estudio de factibilidad del proyecto para seleccionar las mejores rutas y reducir los impactos.</li> <li>▪ Reglamentar a los transportistas y diseñar planes de contingencia de emergencia para reducir el riesgo de accidentes durante el transporte de los combustibles residuales.</li> </ul>
<p>XVI. Al explotar la piedra caliza localmente para suministrarla a la planta de cemento, puede crear conflictos con otras industrias, como la vivienda y construcción, que dependen de recursos similares, además, puede agravar la erosión/sedimentación de los ríos, si las operaciones se realizan de manera incontrolada o sin restricciones.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Planificar el uso de la piedra caliza, tomando en cuenta su disponibilidad e imponer restricciones sobre el trabajo realizado en la cantera.</li> <li>▪ Coordinar con la agencia responsable, un estudio de las opciones de rescate una vez que la instalación salga del servicio.</li> <li>▪ Planificar la restauración de la mina de piedra caliza.</li> </ul>

*Tabla 7. Impactos ambientales y medidas de atenuación.*

## 5. MARCO NORMATIVO

Con relación al medio ambiente la normativa básica comúnmente aceptada para las actividades cementeras se concreta en el *RAMINP* (Decreto 2414/1961, de 30 de noviembre, que aprueba el reglamento de actividades molestas, insalubres, nocivas y peligrosas) y la *normativa estatal sobre protección del ambiente atmosférico* (Decreto 833/1975, de 6 de febrero, por el que se desarrolla la ley 38/1972, de 22 de diciembre, de protección del ambiente atmosférico (BOE núm.96, de 22.04.75)). En este marco la reglamentación de las emisiones resulta muy escasa y desfasada.

Hoy por hoy, la referencia legal más clara es la Directiva 96/61/CE conocida como *Directiva IPPC*, relativa a la prevención y al control integrado de la contaminación en la Unión Europea. Tiene como objetivo garantizar un elevado grado de protección del medio ambiente en relación con los efectos ambientales de plantas industriales, entre las que se incluyen las fábricas de cemento.

La directiva establece un marco procedimental que obligará a las industrias cementeras, entre otras, a la obtención de una “Autorización Ambiental” que establecerá las condiciones de funcionamiento de acuerdo con los criterios contemplados en la misma.

Esta directiva introduce el concepto de “Mejores Tecnologías Disponibles” (*MTD*) y una lista indicativa de contaminantes a controlar, cuyas emisiones habrán de establecerse en función de estas *MTD* y de los parámetros de calidad del aire de la zona afectada (ver Tabla 8), estos valores límites de emisión integrados serán fijados por cada estado miembro, considerando:

- las características técnicas de la planta,
- su localización geográfica y
- las condiciones medioambientales del entorno y
- las mejoras técnicas disponibles (económicamente viables).

Valores de emisión posibles partiendo de la aplicación de MTD		
Parámetros	Rango (mg/m <sup>3</sup> )	Valor guía
Partículas	10-50	25 mg/m <sup>3</sup>
Óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> )	200-500	250 mg/m <sup>3</sup>
Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	50-300	50 mg/m <sup>3</sup>
Dioxinas	-	0.1 ng/m <sup>3</sup> N

*Tabla 8. Valores de emisión posibles partiendo de la aplicación de MTD. (CER N°3 2001 [16])*

La directiva 2000/76/CE sobre incineración de residuos establece el límite de emisión para las dioxinas en 0,1 ng/m<sup>3</sup> N. Dicho valor es aceptado de forma común como referente para las emisiones de procesos de combustión. El documento de referencia para las MDT del cemento así lo acepta de forma explícita.

El propósito de esta directiva es prevenir, reducir y controlar la contaminación del aire, del agua y del suelo de forma que no se dañe la salud humana o la calidad del medio ambiente ayudando a las autoridades ambientales competentes de los Estados Miembros a establecer los requisitos de funcionamiento de las plantas industriales, en concreto:

- las sustancias cuya emisión debe controlarse,
- su forma de control, y
- los valores límite de emisión (VLE).

Para el caso de la industria del cemento, ya existe un documento de referencia que define y describe estas mejores tecnologías, es el documento BREF (Best Available Techniques Reference document) para las industrias del cemento y de la cal, publicado en marzo de 2000, que es el documento de referencia que recoge de modo general las MTD en la industria del cemento europea.

En cuanto a las *actividades de coincineración de residuos*, existe una directiva no transpuesta que incluye de forma explícita la regulación de esta actividad de coincineración de residuos en las cementeras, la Directiva 2000/76/CE del parlamento europeo y del consejo de 4 de diciembre de 2000, en la cual se indican los límites que deben cumplir las emisiones a la atmósfera en las cementeras que utilizan combustibles alternativos en sus instalaciones (ver Tabla 9).

Contaminantes	Concentración (mg/m <sup>3</sup> )
Partículas totales	30
HCl	10
HF	1
NO <sub>x</sub>	800
Cd + Tl	500
Hg	0.05
Sb + As + Pb + Cr + Co + Cu + Mn + Ni + V	0.5
Dioxinas y furanos	0.1 <sup>(1)</sup>
<sup>(1)</sup> Unidades: ng /m <sup>3</sup> .	
Contaminantes	Concentración (mg/m <sup>3</sup> )
SO <sub>2</sub>	50
COT (carbono orgánico total).	10

*Tabla 9 . Disposiciones especiales para los hornos de cemento en que se coincineren residuos. (CER N°3 2001 [16])*

## 6. CAMBIO CLIMÁTICO Y LA PRODUCCIÓN DE CEMENTO

El cemento es un componente básico en las economías emergentes, el cemento es el cohesionador del progreso, elemento fundamental para la construcción de edificios y carreteras.

Pero fabricar cemento, supone polucionar en forma de emisiones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ); las cementeras producen el 5% de las emisiones globales de dióxido de carbono, la causa principal del calentamiento global, es decir, de la corriente hoy en boga, no aceptada en absoluto por muchos científicos de reputación universal. A todo esto se le suma la realidad de que, el cemento no puede reciclarse; cada nuevo edificio y carretera necesita cemento nuevo.

El cemento tiene un problema básico: la reacción química que lo produce libera grandes cantidades de  $\text{CO}_2$ . El 60% de las emisiones causadas por la producción de cemento son debidas únicamente a esta reacción química. El resto de emisiones viene del fuel usado en la combustión para producirlo, a pesar de que tales emisiones se pueden mitigar con el uso de tecnologías verdes.

La industria del cemento conoce el dilema, se encuentra en la inmediatez del debate del calentamiento global, pero el mundo necesita el material para escuelas, hospitales y viviendas. La industria cementera sufre el efecto de la pescadilla que se muerde la cola; la reducción posible de emisiones de  $\text{CO}_2$  es absorbida por el incremento necesario de la producción.

Se han invertido millones de euros en programas ecológicos, en colaboración con la industria cementera para dirigir los retos del desarrollo sostenible. El *reto*, está en bajar un 7% adicional el  $\text{CO}_2$  del nivel actual para el 2010, aunque la industria cementera reconoce, la enorme dificultad en bajar esta cifra.

## CAPÍTULO X. SEGURIDAD, HIGIENE Y SALUD LABORAL.

### 1. MARCO LEGAL

Las disposiciones legales más importantes en la evolución de la Seguridad e Higiene en España son las siguientes:

- 1986: RD. Por el que implanta la obligatoriedad de la inclusión de un estudio de Seguridad e Higiene en el Trabajo en los proyectos de edificación y obras públicas.
- 1995: Ley 31/1995 de 8 de noviembre de Prevención de riesgos laborales.
- 1997: RD. 39/1997 de 17 de enero (modificado RD. 780/98). Reglamento de los servicios de prevención.
- 1997: reglamentos específicos que han transpuesto Directivas europeas sobre salud y seguridad en el trabajo:
  - RD 485/1997 de 14 de abril sobre señalización.
  - RD 486/1997 de 14 de abril de lugares de trabajo.
  - RD 487/1997 de 14 de abril de manejo de cargas.
  - RD 488/1997 de 14 de abril sobre pantallas de visualización.
  - RD 662/1997 de 12 de mayo de agentes biológicos.
  - RD 665/1997 de 12 de mayo de agentes cancerígenos
  - RD 773/1997 de 30 de mayo de equipos de protección individual.
  - RD 1215/1997 de 18 de julio de equipos de trabajo.
  - RD 1627/1997 de 24 de octubre de obras de construcción.

Entre la legislación vigente más significativa de carácter general (abarca toda o gran parte del campo de la seguridad e higiene) puede destacarse:

- Ordenanza general de seguridad e higiene (con rango legal de orden).
- Ley de prevención de riesgos laborales.
- Disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo.
- Constitución española.
- El instrumento de ratificación de la carta social europea.
- Ley del estatuto de los trabajadores.
- Ley general de la seguridad social.

Las modernas corrientes de seguridad y salud laboral basan su actuación en:

- Prevención de riesgos: evitar que se produzca el accidente.
- Diseñar equipos y medios de trabajo que sean intrínsecamente seguros.
- Colaboración entre todas las partes de una industria para lograr una seguridad eficaz.

Este enfoque se engloba en lo que se denomina seguridad integrada. En él se asigna la función de seguridad a todas las personas que forman la estructura organizativa de la empresa. El principio básico de la seguridad integrada es: *“se es responsable directo de todo aquello sobre lo que se tiene obligación, autoridad y competencia, por razón del puesto de trabajo”*.

## **2. RIESGOS PROFESIONALES**

Durante el proceso de fabricación del cemento el trabajador está expuesto a diversos tipos de riesgos que varían en función de la tarea desempeñada. Así, en las canteras donde se extraen las materias primas para la fabricación del cemento, el trabajador está expuesto no sólo al polvo que se produce durante el barrenado y machacado, sino también a explosiones, avalanchas de rocas y tierra, ruido y una serie de peligros potenciales.

Por el contrario, durante el proceso de fabricación, el peligro principal es el **polvo**, cuya concentración máxima permisible en el aire no debe superar los límites que se señalan en la Tabla 1 (Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo, 1998 [11])

<b>Polvo de cemento.</b>	
Concentración máxima permisible	mg/m <sup>3</sup>
Polvo de cemento sin sílice libre	6
Polvo de cemento con menos del 10% de sílice libre	5
Polvo de amianto-cemento con más del 10% de amianto	5

*Tabla 1. Concentración máxima permisible en polvo de cemento.*

Se han efectuado medidas de los niveles de polvo en canteras y fábricas de cemento, obteniéndose concentraciones que oscilan de 26 a 114 mg/m<sup>3</sup>.

Las modernas factorías que emplean sistema húmedo, en poco tiempo consiguen reducir estos valores, con niveles de polvo que no superan los 15- 20 mg/m<sup>3</sup>. Gracias al empleo de filtros electrostáticos, se consigue también que la contaminación del aire en los alrededores de estas fábricas se sitúe entre 5-10% de los antiguos valores de contaminación.

Otros riesgos que existen en las fábricas del cemento son las altas temperaturas ambientales (especialmente cerca de las puertas de los hornos), calor radiante y altos niveles de ruido (120 dB) en la proximidad de los molinos de bolas.

Se han encontrado concentraciones de monóxido de carbono que van desde simples indicios hasta 50 ppm, cerca de los hornos de piedra caliza.

Secundariamente a los riesgos anteriormente citados, se producen un determinado grupo de cuadros patológicos muy importantes desde el punto de vista de salud laboral. Entre los principales se encuentran enfermedades del aparato respiratorio, trastornos

digestivos, enfermedades de la piel, enfermedades reumáticas y nerviosas y trastornos de la vista y del oído:

**a) Aparato respiratorio:**

Constituye uno de los órganos diana que más se ve afectada por el cemento, con una patología muy variada como resultado de la inhalación del polvo y de las condiciones macro y micro-climáticas en el ambiente de trabajo.

La enfermedad más frecuente es la bronquitis crónica, generalmente asociada a enfisema. El cemento Portland normal no suele causar silicosis debido a la ausencia de sílice libre. Sin embargo el individuo que trabaja en la producción de cemento está expuesto a gran variedad de materias primas que contienen sílice libre en una proporción variable. Así los cementos ácido-resistentes que se usan para planchas refractarias contienen altos porcentajes de sílice libre y la exposición a ellos conlleva un evidente riesgo de silicosis (enfermedad producida por aspiración de polvo de sílice u otros minerales en gran cantidad).

**b) Trastornos digestivos:**

Se han registrado casos de úlcera gastrointestinal en la industria del cemento. Un examen de 269 trabajadores de una de estas empresas, permitió detectar 13 casos de úlcera (4,8%) y un estudio realizado en fábricas de cemento entre 1962-64 demostró un grado de absentismo por esta enfermedad de 1.48-2.69%.

Experimentalmente se han encontrado úlceras gástricas al alimentar a perros y cobayas con cierta cantidad de polvo de cemento.

**c) Enfermedades reumáticas y nerviosas:**

Generalmente debidas a las grandes variaciones que existen en las condiciones macro y micro-climáticas. Son frecuentes entre otras artritis, reumatismo, espondilitis, trastornos musculares, neuralgias, dorsalgias y radiculitis.

**e) Trastornos del oído y de la vista:**

Se han registrado algunos casos de hipoacusia en los trabajadores de molinos de cemento. La principal enfermedad ocular que se produce es la conjuntivitis.

**f) Enfermedades de la piel:**

Son sin duda el grupo más importante de enfermedades profesionales producidas por el cemento. Según las estadísticas, constituyen aproximadamente más del 25% de todas las enfermedades de la piel de origen profesional.

La clínica es variada y va desde infecciones cutáneas, hasta inclusiones en la piel.

De todas las formas el cuadro clínico más importante es el conocido como dermatosis por el cemento y en esencia se produce por la acción irritante o sensibilizante de las sustancias que contiene el cemento, principalmente el dicromato potásico.

Estas enfermedades se observan con mayor frecuencia entre los usuarios del cemento en general (albañiles) y en los trabajadores que utilizan cemento húmedo en pequeños trabajos domiciliarios de construcción.

Entre los trabajadores de las fábricas de cemento este tipo de patología se observa mucho menos ya que desarrollan su trabajo en condiciones de gran automatización. (Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo, 1989 [11])

Otro riesgo importante relacionado con el medio ambiente del trabajo en un entorno cementero, es el **ruido**.

El ruido es un sonido no deseable. Es la variación de presión, sobre la presión atmosférica, que el oído humano puede detectar. Es una vibración acústica.

La presión acústica es la cantidad de energía acústica por unidad de superficie. El margen de presión capaz de oír una persona oscila entre 20 y 20000N/m. (El decibelio es una unidad adimensional:  $dB = 10 \cdot \log(P^2/P_0^2)$ ).

El RD 1316/1989 “sobre protección de los trabajadores frente a los riesgos derivados de la exposición al ruido durante el trabajo” dice que la evaluación de exposición al ruido ha de hacerse con el Nivel Diario Equivalente, que representa el nivel de un hipotético ruido continuo que tiene la misma energía sonora que el nivel intermitente o variable que se quiere medir.  $L_{eqd} = 10 \cdot \log [1/t \cdot \sum t_i \cdot 10^{L_i/10}]$ .

El ruido puede ser continuo, como el existente en las inmediaciones de un molino de bolas o de un horno rotatorio, en este caso el ruido se mide con sonómetros. El ruido puede ser discontinuo, como el existente en las inmediaciones de una trituradora de mandíbulas, en este caso se mediría con un dosímetro. Y el de impacto, como el existente en las voladuras para extracción de materias primas producidas en una cantera, en este caso el ruido se mide mediante un analizador de impacto.

En cuanto al ruido de fondo y su variación, Si en vez de una fuente sonora hay dos fuentes iguales, el nivel aumenta en 3 dB; en el caso de tres fuentes en 4.77 dB; cuatro fuentes 6 dB y así sucesivamente.

Los efectos que provoca el ruido sobre el organismo son los siguientes:

- Trauma agudo: por una exposición breve a ruidos de alta intensidad. Producen dolor si superan los 120-140 dB y sordera momentánea si superan los 140 dB.
- Sordera profesional: provocada por la exposición a niveles elevados.

En el orden fisiológico, las consecuencias de los ruidos son:

- Acción sobre el aparato circulatorio: aumento de la presión arterial y del ritmo cardiaco.
- Nerviosismo y agresividad.
- Trastornos en la memoria.
- Falta de atención
- En el orden psicológico causa molestias y desagrado.





## ÍNDICE DE LA MEMORIA DE CÁLCULO

<b>CAPÍTULO I. BASES DE PARTIDA</b>	pág.1.
1. CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL HORNO ROTATORIO SUJETO A DIMENSIONAMIENTO	pág.1.
2. ZONAS DEL HORNO ROTATORIO. DEFINICIÓN DE LONGITUD DE CALENTAMIENTO	pág.1.
<b>CAPÍTULO II. BALANCES DE ENERGÍA PARA LA RESOLUCIÓN DEL SISTEMA</b>	pág.4.
1. CONSIDERACIONES REALIZADAS	pág.4.
1.1. CONSIDERACIONES PREVIAS O PREMISAS DE PARTIDA	pág.4.
1.2. CONSIDERACIONES SECUNDARIAS	pág.6.
2. OBTENCIÓN DE LOS PERFILES DE TEMPERATURA DEL SÓLIDO Y LOS GASES DE COMBUSTIÓN	pág.7.
2.1. PERFIL DE TEMPERATURA DEL SÓLIDO CON RESPECTO A LA COORDENADA AXIAL	pág.7.
2.2. PERFIL DE TEMPERATURA DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN CON RESPECTO A LA COORDENADA AXIAL	pág.10.
<b>CAPÍTULO III. DIMENSIONAMIENTO DEL HORNO ROTATORIO</b>	pág.12.
1. MODELO MATEMÁTICO PARA EL CÁLCULO DE LA LONGITUD DE CALENTAMIENTO	pág.12.
2. MÉTODO DE RESOLUCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO	pág.13.
3. CÁLCULOS REALIZADOS EN LA RESOLUCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO	pág.15.
3.1. DEFINICIÓN DE LAS CONDICIONES INICIALES Y FINALES PARA LA RESOLUCIÓN DEL MODELO	pág.15.
3.2. APLICACIÓN DEL MÉTODO RUNGE-KUTTA DE ORDEN IV PARA EL PRIMER INTERVALO, $z=0,1$ m	pág.17.

---

3.2.1. CÁLCULO DE TODAS LAS VARIABLES PARA LA PRIMERA ECUACIÓN DIFERENCIAL EN LA CONDICIÓN INICIAL: PERFIL DE TEMPERATURAS PARA EL SÓLIDO CON RESPECTO A LA COORDENADA Z	pág.17.
3.2.1.1. Longitud de capa plana	pág.17.
3.2.1.2. Caudal másico de sólido	pág.23.
3.2.1.3. Calor específico del sólido	pág.23.
3.2.1.4. Coeficiente de transferencia de calor por convección	pág.25.
3.2.1.4.1. Consideraciones realizadas para el cálculo de hc	pág.26.
3.2.1.4.2. Velocidad de los gases de combustión	pág.28.
3.2.1.4.3. Densidad de los gases de combustión	pág.29.
3.2.1.4.4. Calor específico de los gases de combustión	pág.34.
3.2.1.4.5. Conductividad térmica de los gases de combustión	pág.37.
3.2.1.4.6. Viscosidad de los gases de combustión	pág.40.
3.2.1.4.7. Determinación del coeficiente de transmisión de calor por convección $(hc)_{\text{medio}}$	pág.44.
3.2.1.5. Coeficiente de transferencia de calor por radiación	pág.46.
3.2.1.6. Verificación de las consideraciones realizadas para el cálculo de hc	pág.48.
3.2.2. CÁLCULO DE TODAS LAS VARIABLES PARA LA SEGUNDA ECUACIÓN DIFERENCIAL EN LA CONDICIÓN INICIAL: PERFIL DE TEMPERATURA DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN CON RESPECTO A Z	pág.50.
3.2.2.1. $\left(\frac{dA}{dZ}\right)$	pág.50.
3.2.2.2. Coeficiente Global de transmisión de calor	pág.52.
3.2.2.2.1. Conductividad térmica del refractario	pág.58.
3.2.2.2.1.1. Evaluación de la temperatura del refractario	pág.60.
3.2.2.2.2. Conductividad térmica de la virola de acero envolvente	pág.61.

---

3.2.2.2.1. Evaluación de la temperatura de la virola	pág.63.
3.2.2.2.2. Evaluación de la temperatura de la carcasa externa	pág.63.
3.2.2.2.3. Coeficiente de transmisión de calor por convección	pág.66.
3.2.2.2.4. Coeficiente de transmisión de calor por radiación	pág.66.
3.2.2.2.5. Cálculo del coeficiente U	pág.68.
3.2.2.3. Caudal másico de los gases de combustión	pág.69.
3.2.2.4. Calor específico de los gases de combustión	pág.71.
3.2.3. CÁLCULO DEL ALGORITMO DEL MÉTODO RUNGE-KUTTA EN LA PRIMERA ECUACIÓN DIFERENCIAL PARA EL PRIMER INTERVALO	pág.73.
3.2.3.1. Cálculo de k1 en la condición inicial	pág.74.
3.2.3.2. Cálculo de k2 en la condición inicial	pág.76.
3.2.3.3. Cálculo de k3 en la condición inicial	pág.78.
3.2.3.4. Cálculo de k4 en la condición inicial	pág.80.
3.2.3.5. Cálculo de la temperatura del sólido en $z=0,1m$	pág.82.
3.2.4. CÁLCULO DEL ALGORITMO DEL MÉTODO RUNGE-KUTTA EN LA SEGUNDA ECUACIÓN DIFERENCIAL PARA EL PRIMER INTERVALO	pág.82.
3.2.4.1. Cálculo de k1 en la condición inicial	pág.84.
3.2.4.2. Cálculo de k2 en la condición inicial	pág.86.
3.2.4.3. Cálculo de k3 en la condición inicial	pág.94.
3.2.4.4. Cálculo de k4 en la condición inicial	pág.96.
3.2.4.5. Cálculo de la temperatura de los gases de combustión en $z=0,1 m$	pág.98.
3.3. MÉTODO MATEMÁTICO ITERATIVO	pág.99.
3.3.1. RESULTADOS OBTENIDOS	pág.100.
3.3.1.1. PRIMERA ECUACIÓN DIFERENCIAL	pág.100.
3.3.1.2. SEGUNDA ECUACIÓN DIFERENCIAL	pág.101.

---

3.3.2. CÁLCULO DE LA LONGITUD DE CALENTAMIENTO	pág.102.
3.3.3. CÁLCULO DE LA LONGITUD DE ENFRIAMIENTO	pág.103.
3.3.4. CÁLCULO DE LA LONGITUD TOTAL DEL HORNO ROTATORIO	pág.104.
4. EVOLUCIÓN DE LAS TEMPERATURAS DEL SÓLIDO Y DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN EN EL INTERIOR DEL HORNO ROTATORIO	pág.105.

**ANEXO DE LA MEMORIA DE CÁLCULO**

---

## CAPÍTULO I. BASES DE PARTIDA

### 1. CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL HORNO ROTATORIO SUJETO A DIMENSIONAMIENTO.

Las condiciones de operación del horno rotatorio sujeto a dimensionamiento en este proyecto, son las mencionadas en el *Capítulo I de la Memoria Descriptiva en el apartado 2. Justificación del proyecto.*

### 2. ZONAS DEL HORNO ROTATORIO. DEFINICIÓN DE LONGITUD DE CALENTAMIENTO.

En un horno rotatorio que opera mediante vía seca, pueden diferenciarse cuatro zonas distintas en el interior del mismo: una zona de precalentamiento, una zona de calcinación, una zona de sinterización o clinkerización concluyendo con una zona de enfriamiento, como se mencionó en el *Capítulo VII de la Memoria Descriptiva en el apartado 8, Zonas en los hornos rotatorios.*

De cara al cálculo, en este proyecto se diferencian en el horno dos zonas:

- **Una zona de calentamiento**, en la que el sólido es calentado gradualmente por los gases de combustión en contracorriente. Esta zona comprende desde la alimentación del horno hasta el inicio de la llama cuya longitud se denominará **“longitud de calentamiento”**.
- **Una zona de enfriamiento**; donde el sólido es enfriado por el aire que entra del enfriador. Esta zona comprende desde el inicio de la llama hasta el extremo final

del horno, se denominará a la longitud de esta zona: “longitud de enfriamiento”.

Estas zonas pueden observarse en la Fig.1:



Fig1. Zonas en el horno rotatorio de cara al cálculo.

El comportamiento de las curvas de temperatura del sólido y de los gases de combustión en ambas zonas del interior del horno, puede observarse en la Fig 2.

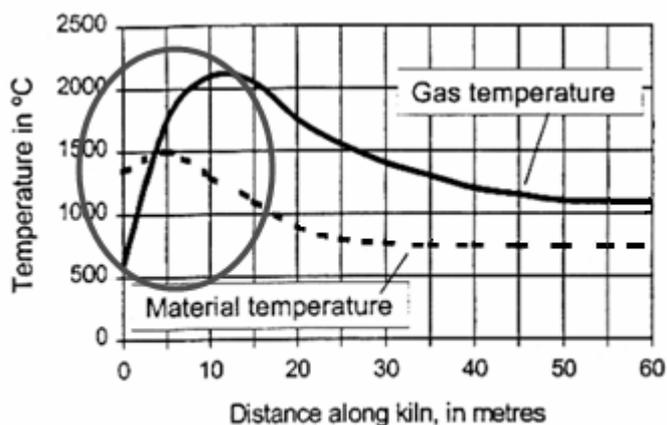


Fig 2. Comportamiento de las curvas de temperatura del sólido y de los gases de combustión con la longitud del horno. (Gráfica facilitada por Holcim).

En la zona de calentamiento, si observamos el comportamiento de la curva de los gases de combustión, presenta un punto de inflexión que alcanza un valor máximo a unos 2150 °C, que se correspondería con la zona de la llama en el quemador, que es el punto

del horno donde se alcanzan las temperaturas más altas. Desde el inicio de la llama hasta la entrada del horno, la temperatura de los gases de combustión va disminuyendo gradualmente debido a la transmisión de calor desde los gases al sólido.

La curva correspondiente al sólido, alcanza su valor máximo a una temperatura de entre 1450-1500 °C, temperatura a la que se dan las reacciones de clinkerización. Desde la zona de entrada del horno hasta el inicio de la llama, la temperatura del sólido va aumentando progresivamente debido al flujo de calor recibido por los gases de combustión.

En la zona de enfriamiento (rodeada en la gráfica con un círculo), el material pasa por debajo del “*cueillo negro de la llama*” en esta zona, las curvas de temperatura del sólido y de los gases de combustión decrecen bruscamente como puede observarse en la Fig 2, debido a que parte del aire del enfriador entra en el horno rotatorio disminuyendo la temperatura del sólido de 1450 °C hasta unos 1000-1300°C.

La ***longitud de calentamiento*** se calculará mediante el modelo matemático descrito en el *Capítulo III de la Memoria de Cálculo*. Este modelo tiene en cuenta los flujos de calor en el interior del horno y el calentamiento del sólido por los gases de combustión de forma gradual, desde la alimentación hasta el inicio de la llama.

La ***longitud de enfriamiento*** por el contrario, no se encuentra dentro del alcance del modelo. En este tramo, el sólido es enfriado por aire externo y los mecanismos de transmisión de calor a los que está sujeto el comportamiento del sólido son de otra índole.

La longitud de enfriamiento será calculada haciendo uso de la Figura 2.

## CAPÍTULO II. BALANCES DE ENERGÍA PARA LA RESOLUCIÓN DEL SISTEMA

### 1. CONSIDERACIONES REALIZADAS

#### 1.1. CONSIDERACIONES PREVIAS O PREMISAS DE PARTIDA

En los hornos rotatorios, la marcha de las reacciones que tienen lugar entre los componentes del crudo y que define la distribución de calor, es análoga en correspondencia, con los procesos químicos que tienen lugar a: una zona de secado (para hornos vía húmeda), una zona de precalentamiento, una zona de calcinación, una zona de sinterización o clinkerización concluyendo con una zona de enfriamiento.

Los flujos de transmisión de calor son distintos en cada zona y también difieren en intensidad los factores que afectan a dichos flujos, aunque de cara al dimensionamiento del equipo, no se harán distinciones entre las distintas zonas del horno, sino que se tomará el horno en sí como una única zona de calentamiento, donde la temperatura para los gases de combustión va disminuyendo progresivamente desde el quemador hasta la zona de entrada del horno, y aumentando progresivamente para la carga de sólido en sentido inverso.

A la hora de establecer los balances de energías puestas en juego en el sistema, se realizan dos consideraciones previas o premisas de partida:

- ✓ ***PRIMERA CONSIDERACIÓN:*** Se considera que el sólido sólo recibe energía de los gases de combustión mediante convección y radiación.

El sólido recibe calor dentro del horno por varias fuentes, sin embargo, en esta primera consideración sólo tenemos en cuenta una de ellas, los gases

calientes derivados de la combustión en el quemador. Se ha despreciado por tanto, la cantidad de calor que llega al sólido desde el refractario mediante *reirradiación* directa de las paredes y mediante *conducción* al entrar en contacto con las paredes de refractario.

✓ ***SEGUNDA CONSIDERACIÓN:*** Se considera que la energía cedida por el gas únicamente tiene dos destinos:

-el propio sólido,

- y las pérdidas que se producen a través de las paredes.

Es decir, el calor que poseen los gases de combustión, se emplea en calentar el sólido y parte se pierde inevitablemente a través de las paredes de refractario. (Colina F. G., Caballero I. y Costa J. 2002 [13]).

Los flujos de calor considerados en el interior del horno rotatorio o energías puestas en juego, se muestran a continuación en la Fig.1.

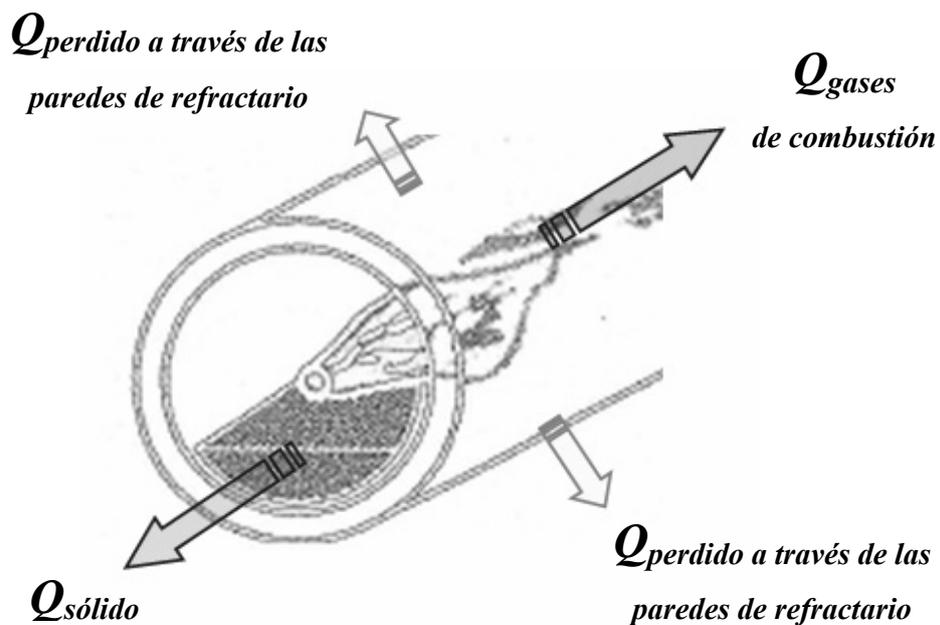
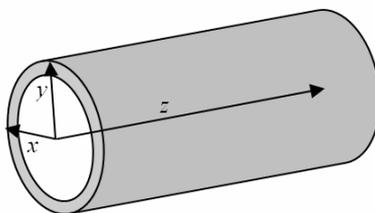


Fig1. Energías puestas en juego en el interior del horno rotatorio.

## 1.2. CONSIDERACIONES SECUNDARIAS

En la resolución de los balances de energía se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones:

- a) Los flujos de calor en el interior del horno rotatorio se transmiten en “*estado estacionario*”.
- b) Aunque la temperatura en el interior del horno rotatorio presenta perfiles axiales y radiales, se considera que la *variación de la temperatura sólo se da en la coordenada z*, es decir, que la temperatura en el sistema solo varía a lo largo de la coordenada axial (con la longitud del horno).



- c) Se considera que el modelo de circulación del sólido en el interior del horno rotatorio es mediante “*capa plana*”, para que sea cuantificable el área de intercambio de calor. Es el modelo más conservador, ya que se considera que el sólido se desplaza a través del horno en forma de capa plana (flujo en pistón), por lo que el área de contacto siempre será mayor en la realidad debido al carácter rotatorio del horno, que garantiza un cierto grado de mezcla en su interior y por lo tanto, hace que el área de contacto sea superior.

(Colina F. G, Caballero I. y Costa J. 2002 [13]).

## 2. OBTENCIÓN DE LOS PERFILES DE TEMPERATURA DEL SÓLIDO Y LOS GASES DE COMBUSTIÓN.

### 2.1. PERFIL DE TEMPERATURA DEL SÓLIDO CON RESPECTO A LA COORDENADA AXIAL.

La primera consideración apuntaba que el sólido sólo recibe energía de los gases de combustión mediante convección y radiación, luego el balance de energía para el sólido puede escribirse de la siguiente forma:

$$W_s \cdot C_{p_s} \cdot dT_s = h_c \cdot dA_s \cdot (T_g - T_s) + h_r \cdot dA_s \cdot (T_g - T_s)$$

- $W_s \cdot C_{p_s} \cdot dT_s$  ; flujo de energía recibida por el sólido de los gases de combustión a través de los mecanismos de *transmisión de calor de convección y radiación*. Donde:
  - $W_s$  ; es el caudal másico de sólido en kg/s.
  - $C_{p_s}$  ; es el calor específico a presión constante del sólido, en J/kg·K.
  - $dT_s$  ; diferencial de temperatura del sólido, en K.
  
- $h_c \cdot dA_s \cdot (T_g - T_s)$  ; flujo de calor por *convección* cedido al sólido por los gases de combustión. Donde:
  - $h_c$  ; es el coeficiente de transmisión de calor por convección, en W/m<sup>2</sup>K.

- $dA_s$ ; diferencial de área del sólido a través del cual se da la transferencia de calor entre el sólido y los gases de combustión, en  $m^2$ .
  - $(T_g - T_s)$ ; diferencia de temperaturas entre la temperatura de los gases de combustión y la temperatura del sólido, y fuerza impulsora de la transmisión de calor por convección.
- $h_r \cdot dA_s \cdot (T_g - T_s)$  ; flujo de calor por *radiación* cedido al sólido por los gases de combustión. Donde :
    - $h_r$  ; es el coeficiente de transmisión de calor por radiación , en  $W/m^2K$ .
    - $dA_s$ ; diferencial de área del sólido a través del cual se da la transferencia de calor entre el sólido y los gases, en  $m^2$ .
    - $(T_g - T_s)$ ; diferencia entre la temperatura de los gases de combustión y la temperatura del sólido, y fuerza impulsora de la transmisión de calor por radiación.

Reordenando variables y despejando en la ecuación:

$$W_s \cdot C_{p_s} \cdot dT_s = h_c \cdot dA_s \cdot (T_g - T_s) + h_r \cdot dA_s \cdot (T_g - T_s)$$

$$W_s \cdot C_{p_s} \cdot dT_s = dA_s \cdot (h_c + h_r) \cdot (T_g - T_s)$$

$dA_s$  ; área ficticia del sólido a través de la cual intercambia calor con los gases de combustión en el supuesto de capa plana. Se expresa  $dA_s$  de forma que dependa de la longitud de capa plana “m” y de la coordenada axial “z”, coordenada en la cual se ha considerado que se transmite el calor en el sistema.

Si se realiza un corte longitudinal al cilindro del horno, la capa de material sólido tendría la forma que muestra la Vista A:

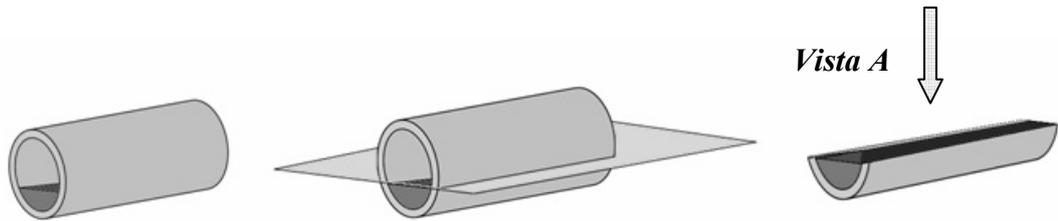
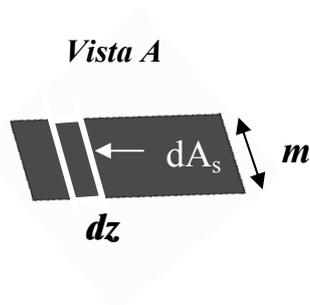


Fig2. Corte longitudinal al horno rotatorio y vista de capa plana.



Luego:

$$dA_s = m \cdot dz$$

Introduciendo el valor de  $dA_s$  en la expresión:

$$W_s \cdot C_{p_s} \cdot dT_s = m \cdot dz \cdot (h_c + h_r) \cdot (T_g - T_s)$$
$$dT_s / dz = ((h_c + h_r) \cdot m \cdot (T_g - T_s)) / W_s \cdot C_{p_s}$$

Se obtiene el perfil de temperaturas del sólido con respecto a la coordenada axial  $z$ .

$$\frac{dT_s}{dz} = \frac{(h_c + h_r) \cdot m \cdot (T_g - T_s)}{W_s \cdot C_{p_s}}$$

(Colina F. G, Caballero I. y Costa J. 2002 [13])

## 2.2. PERFIL DE TEMPERATURA DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN CON RESPECTO A LA COORDENADA AXIAL

En la segunda consideración se tenía en cuenta que la energía cedida por el gas únicamente tiene dos destinos, el propio sólido y las pérdidas que se producen a través de las paredes, es decir:

$$W_g \cdot C_{p_g} \cdot dT_g = W_s \cdot C_{p_s} \cdot dT_s + dA \cdot U \cdot (T_p - T_{ext})$$

- $W_g \cdot C_{p_g} \cdot dT_g$ ; flujo de calor cedido por los gases de combustión. Donde:
  - $W_g$ ; caudal másico de los gases de combustión, en kg/s.
  - $C_{p_g}$ ; calor específico a presión constante de los gases de combustión, en J/kg·K
  - $dT_g$ ; diferencial de temperatura de los gases de combustión, en K.
  
- $W_s \cdot C_{p_s} \cdot dT_s$ ; flujo de calor de los gases de combustión empleado en calentar el sólido, del perfil de temperaturas del sólido (apartado 2.1) obtenemos que:
$$W_s \cdot C_{p_s} \cdot dT_s = m \cdot dz \cdot (h_c + h_r) \cdot (T_g - T_s)$$
  
- $dA \cdot U \cdot (T_p - T_{ext})$ ; flujo de calor de los gases de combustión perdido a través de las paredes del horno rotatorio. Donde:
  - $dA$ ; diferencial de área a través del cual se da la pérdida de calor a través de las paredes.
  - $U$ ; coeficiente global de transmisión de calor o coeficiente global de pérdidas de calor por las paredes, en W/m<sup>2</sup>K.

- $(T_p - T_{ext})$ ; diferencia entre la temperatura de la pared interna del horno (refractario) y la temperatura externa del sistema, y fuerza impulsora de la transmisión de calor a través de las paredes.

Reordenando variables y despejando en la ecuación:

$$W_g \cdot C_{p_g} \cdot dT_g = m \cdot dz \cdot (h_c + h_r) \cdot (T_g - T_s) + dA \cdot U \cdot (T_p - T_{ext})$$

$$W_g \cdot C_{p_g} \cdot dT_g - dA \cdot U \cdot (T_p - T_{ext}) = m \cdot dz \cdot (h_c + h_r) \cdot (T_g - T_s)$$

$$\frac{W_g \cdot C_{p_g} \cdot dT_g - dA \cdot U \cdot (T_p - T_{ext})}{dz} = m \cdot (h_c + h_r) \cdot (T_g - T_s)$$

$$\frac{W_g \cdot C_{p_g} \cdot dT_g}{dz} - \frac{dA \cdot U \cdot (T_p - T_{ext})}{dz} = m \cdot (h_c + h_r) \cdot (T_g - T_s)$$

$$\frac{W_g \cdot C_{p_g} \cdot dT_g}{dz} = (h_c + h_r) \cdot m \cdot (T_g - T_s) + \left( \frac{dA}{dz} \right) \cdot U \cdot (T_p - T_{ext})$$

Se obtiene el perfil de temperaturas de los gases de combustión con respecto a la coordenada axial z.

$$\frac{dT_g}{dz} = \frac{(h_c + h_r) \cdot m \cdot (T_g - T_s) + (dA/dz) \cdot U \cdot (T_p - T_{ext})}{W_g \cdot C_{p_g}}$$

(Colina F. G, Caballero I. y Costa J. 2002 [13]).

## CAPÍTULO III. DIMENSIONAMIENTO DEL HORNO ROTATORIO

### 1. MODELO MATEMÁTICO PARA EL CÁLCULO DE LA LONGITUD DE CALENTAMIENTO

Los balances de energía formulados en el capítulo anterior dan lugar a dos ecuaciones diferenciales de primer orden, que muestran el comportamiento de las temperaturas del sólido y de los gases de combustión con respecto a la longitud del horno. En cada diferencial de  $z$ , en cada intervalo, las temperaturas tanto del sólido como de los gases de combustión, los calores específicos a presión constante del sólido y gas, los coeficientes de transmisión de calor  $hc$  y  $hr$ , el coeficiente global de transmisión de calor  $U$ ...etc son distintos, porque sus valores dependen de la temperatura.

El modelo matemático planteado no tiene por tanto, solución analítica, y necesita de un método iterativo de resolución numérica. El método elegido para resolver este conjunto de ecuaciones diferenciales de primer orden es el *Método de Runge-Kutta de orden IV*, utilizando un paso de integración de 0,1 m y recalculando los valores de todas las variables dependientes de la temperatura en cada intervalo.

Para la resolución del modelo, partiremos del extremo del horno donde se sitúa el quemador y donde los valores de temperatura son conocidos tanto para el gas, que se encuentra a la temperatura de la llama, como para el sólido, que en el quemador se encuentra a la temperatura de reacción.

## 2. MÉTODO DE RESOLUCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

Una ecuación de primer orden es por definición de la forma:  $F(x,y, dy/dx)=0$  , o lo que es lo mismo  $\left(\frac{dy}{dx}\right) = f(x,y)$ .

Se desea calcular un solución  $y(x)$  que satisfaga simultáneamente la ecuación anterior y una condición inicial determinada. En general, es imposible obtener la solución analítica de  $y(x)$ , por el contrario, se divide el intervalo  $[a, b]$  de la variable dependiente  $x$  en que se desea la solución en subintervalos o *pasos*.

El verdadero valor de la solución  $y(x)$  se aproxima  $n+1$  valores equidistantes de  $x$ , ( $x_0, x_1, \dots$ ) de forma que  $h$ , *la longitud del intervalo o paso*, viene dada por:  $h = \frac{b-a}{n}$  .

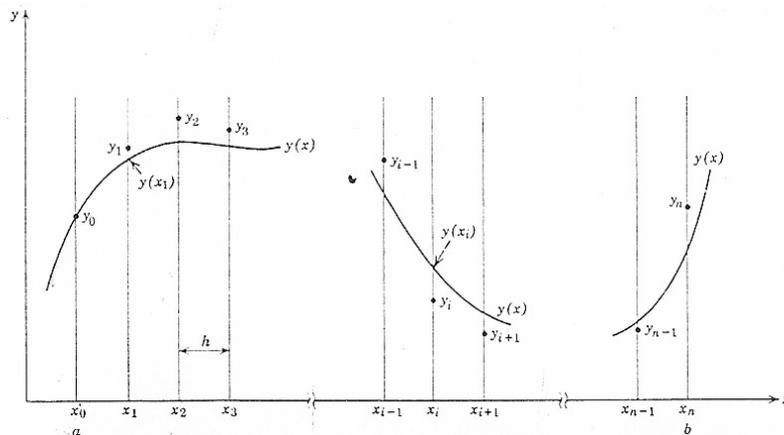


Fig1. Solución numérica de las ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden. (Carnaham Brice, 1979 [5])

Sea  $y(x_i)$  el valor de la solución exacta de  $y(x)$  en el punto base  $x_i$ , y al mismo tiempo  $y_i$  el valor de la aproximación calculada en el mismo punto, de forma que:  $y_i = y(x_i)$ .

El valor exacto de la derivada  $dy/dx$  en los puntos base será aproximado por el valor  $f(x_i, y_i)$ , o en la forma abreviada  $f_i$ , de forma que  $f_i = f(x_i, y_i) = f(x_i, y(x_i))$ .

El método de *Runge-Kutta* para resolución de ecuaciones diferenciales de primer orden, utiliza algoritmos de paso sencillo que incluyen solo cálculos de derivadas de primer orden y que producen resultados equivalentes en exactitud a las fórmulas de Taylor de orden superior.

Las aproximaciones de cuarto orden, requieren el cálculo de  $f(x,y)$  en cuatro puntos de  $x$  en el intervalo  $x_i \leq x \leq x_{i+1}$ . El método de *Runge-Kutta* utiliza el algoritmo de la forma:

$$y_{i+1} = y_i + h \cdot \Phi(x_i, y_i, h).$$

En esta expresión  $\Phi$ , llamada función incremento, es sencillamente una aproximación de  $f(x,y)$  en el intervalo  $x_i \leq x \leq x_{i+1}$ , convenientemente elegida.

Todas las fórmulas de cuarto orden para *Runge-Kutta* son de la forma

$$y_{i+1} = y_i + h \cdot (ak_1 + bk_2 + ck_3 + dk_4)$$

donde  $k_1, k_2, k_3$ , y  $k_4$  son valores aproximados de la derivada calculados en el intervalo  $x_i \leq x \leq x_{i+1}$ .

El algoritmo atribuido a *Kutta* es el siguiente:

$$\begin{aligned} y_{i+1} &= y_i + \frac{h}{6} \cdot (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \\ k_1 &= f(x_i, y_i) \\ k_2 &= f(x_i + 1/2 \cdot h, y_i + 1/2 h \cdot k_1) \\ k_3 &= f(x_i + 1/2 \cdot h, y_i + 1/2 h \cdot k_2) \\ k_4 &= f(x_i + h, y_i + h \cdot k_3) \end{aligned}$$

(Carnaham Brice, 1979 [5])

### 3. CÁLCULOS REALIZADOS EN LA RESOLUCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO.

#### 3.1. DEFINICIÓN DE LAS CONDICIONES INICIALES Y FINALES PARA LA RESOLUCIÓN DEL MODELO.

Para iniciar este método iterativo necesitamos una “*condición inicial*” donde sepamos el valor de todas las variables,  $T_s$ ,  $T_g$  y  $z$ ; y en consecuencia, el valor de las demás variables que dependen de  $T_s$ ,  $T_g$  y  $z$ . **Por ello, para la resolución del modelo, se partirá del extremo del horno donde se sitúa el quemador en  $z=0$  m y donde  $T_s$  y  $T_g$  son conocidas.**

**En el quemador, los gases se encuentran a la temperatura de la llama que alcanza los 2000 °C, y el sólido se encuentra a la temperatura de reacción o clinkerización de 1450 °C.**

Se establecerá un *paso de integración* (intervalo de integración) de 0,1m en el que el método *Runge-Kutta* dará los nuevos valores de  $T_s$  y  $T_g$ , y en consecuencia, el valor de todas las demás variables que dependen de éstas, resolviendo el sistema mediante un cálculo progresivo de las temperaturas en todos los intervalos. **El punto final de este método iterativo, se alcanzará cuando la temperatura del sólido alcance la temperatura de la entrada del horno que es de 1315° C.**

La condición inicial y final del método por tanto, atienden a las condiciones de operación en la entrada y zona de inicio de la llama del horno rotatorio, que son la que se muestran en la Fig.2.

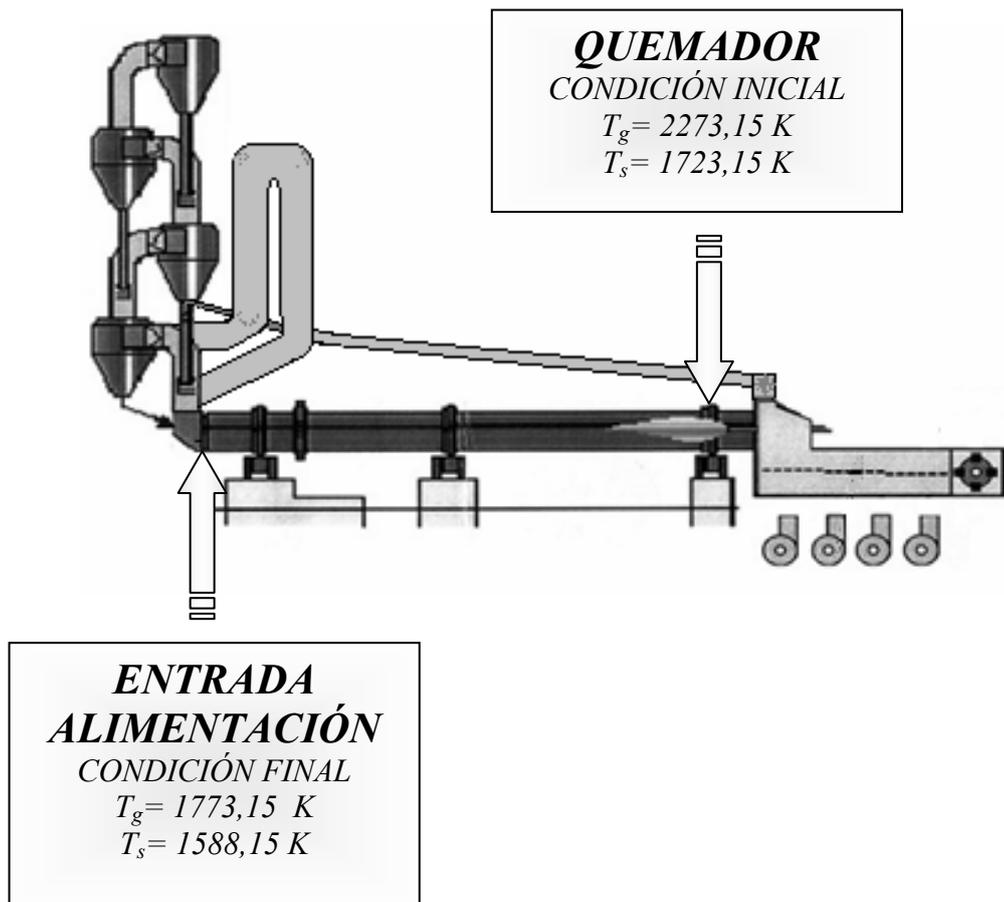


Fig.2. Condiciones inicial y final en el método de Runge- Kutta de orden IV.

### 3.2. APLICACIÓN DEL MÉTODO RUNGE-KUTTA DE ORDEN IV PARA EL PRIMER INTERVALO, $z=0,1$ m.

#### 3.2.1. CÁLCULO DE TODAS LAS VARIABLES PARA LA PRIMERA ECUACIÓN DIFERENCIAL EN LA *CONDICIÓN INICIAL*: PERFIL DE TEMPERATURAS PARA EL SÓLIDO CON RESPECTO A LA COORDENADA **Z**.

$$\frac{dT_s}{dz} = \frac{(h_c + h_r) \cdot m \cdot (T_g - T_s)}{W_s \cdot C_{ps}}$$

##### 3.2.1.1. ***m***, LONGITUD DE CAPA PLANA

Para un determinado valor de diámetro del horno se podrá calcular la longitud de la capa plana mediante la relación trigonométrica mostrada en la Fig.3.

La consideración de capa plana no es real, ya que el movimiento rotatorio del horno y el movimiento en zig-zag que sufre la carga dentro del mismo, hace que la superficie de contacto de la masa de sólido con los gases de combustión sea mayor que esta consideración. Por ello, se corregirá esta medida de valor de capa plana, incrementándola en un 30 % para tener en cuenta el grado de mezcla del sólido que hace aumentar el área de intercambio. (Colina F. G, Caballero I. y Costa J, 2002 [13])

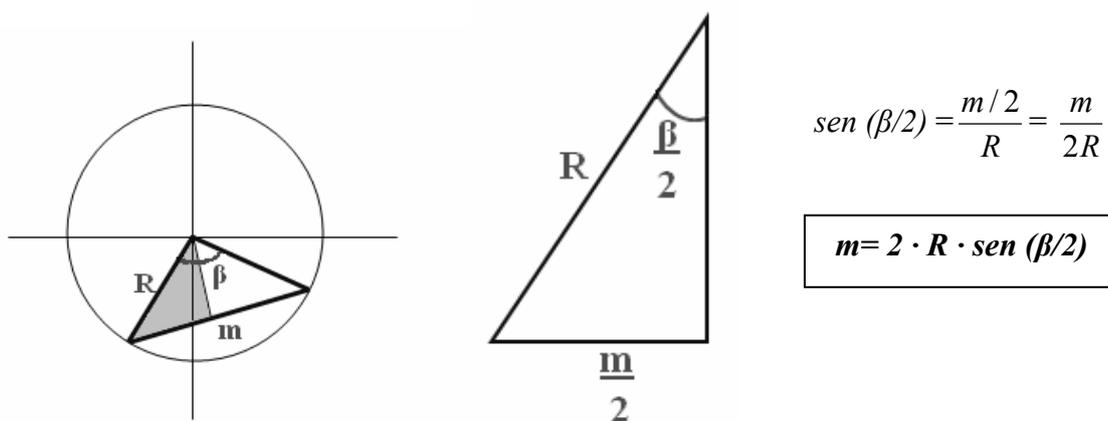


Fig 3. Esquema básico en el interior del horno en el supuesto de capa plana.

$\beta$ : ángulo superior del triángulo formado por la capa plana y la prolongación del radio del horno en grados. Para saber el valor de este ángulo, es necesario saber el grado de llenado del horno, que a su vez depende de la pendiente del mismo.

La pendiente del horno se encuentra relacionada con el diámetro del mismo como puede verse en la Tabla 1: (Colina F. G, Caballero I. y Costa J, 2002 [13])

Diámetro (m)	Pendiente del horno (%)
< 2,8 m	5
2,8 -3,4 m	4
>3,4 m	3

Tabla 1. Relación entre la pendiente y el diámetro de un horno rotatorio.

Es necesario imponer por tanto, el valor del diámetro del horno para poder realizar el cálculo de la longitud de capa plana: **El valor impuesto del diámetro del horno rotatorio es de 4,4 m.**

De esta forma y haciendo uso de la tabla anterior, a un diámetro de 4,4 m le corresponde una pendiente del 3 %.

La pendiente del horno se encuentra relacionada con el grado de llenado del mismo como puede observarse en la Tabla 2: (Colina F. G, Caballero I. y Costa J, 2002 [13])

Pendiente del horno (%)	Grado de llenado correspondiente (%)
4,5	9
4,0	10
3,5	11
3,0	12
2,5	13

*Tabla 2. Relación entre la pendiente del horno y el grado de llenado.*

Haciendo uso de esta tabla, para una pendiente del 3%, el grado de llenado correspondiente es del 12%.

Como se ha apuntado anteriormente, para obtener  $\beta$  se necesita conocer el grado de llenado del horno, ya que se encuentran directamente relacionadas como puede observarse en la Tabla 3: (Duda W. H. 1977 [1])

ángulo central	Llenado del horno (%)
110°	15,65
105°	13,75
100°	12,10

95°	10,70
90°	9,09
85°	7,75
80°	6,52
75°	5,40
70°	4,50

*Tabla 3. Relación entre el ángulo central y el grado de llenado del horno.*

Para obtener el ángulo correspondiente al grado de llenado del horno del 12 %, interpolamos entre los valores proporcionados por la Tabla 3:

$$\begin{array}{lcl}
 100^\circ & \longrightarrow & 12,10 \% \\
 x & \longrightarrow & 12 \% \\
 95^\circ & \longrightarrow & 10,70 \%
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{lcl}
 (100 - x) & \longrightarrow & (12,10-12) \\
 (x - 95) & \longrightarrow & (12-10,70)
 \end{array}$$

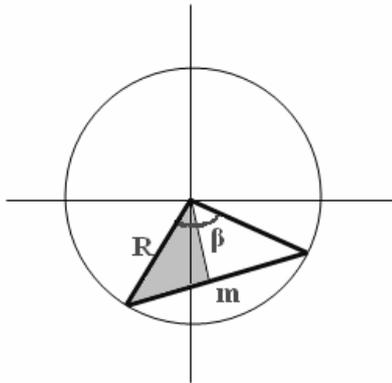
$$(x - 95) \cdot 0,10 = (100 - x) \cdot 1,3$$

$$0,10 x - 9,5 = 130 - 1,3 x$$

$$0,10 x + 1,3 x = 130 + 9,5$$

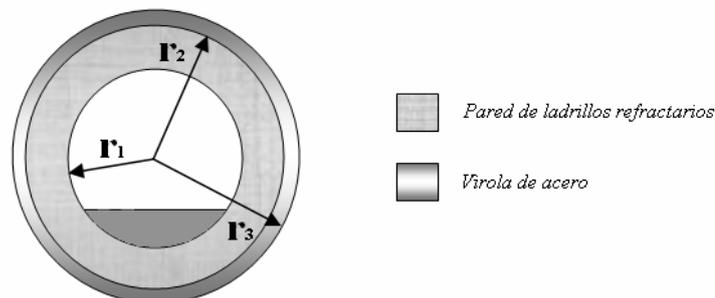
$$1,4 x = 139,5 ; \quad x = \frac{139,5}{1,4} = 99,64^\circ ; \quad \boxed{\beta = 99,64^\circ}$$

Una vez calculado el valor de  $\beta$ , sólo se necesita el valor de R para el cálculo de m, longitud de capa plana:  $m = 2 \cdot R \cdot \text{sen}(\beta/2) = 2 \cdot R \cdot \text{sen}(99,64/2)$



**R**, es el radio interno del horno, el correspondiente hasta la pared del refractario interno o  $\Gamma_1$ .

Un horno rotatorio se encuentra formado por la virola de acero, que no es más que un cilindro ligeramente inclinado (un 3% en este caso) y el revestimiento refractario, que es la cubierta interna de esta virola formada por una pared de ladrillos refractarios aislantes que minimizan las pérdidas de calor al exterior. Luego, si se diera un corte transversal al horno, los distintos diámetros que se encontrarían serían los que ilustra la Fig.4.



*Fig 4. Distintos radios en el interior del horno rotatorio.*

Para poder establecer cada uno de los radios en el interior del horno, se necesita imponer los espesores de la virola de acero y de la pared de refractario, éstos se encuentran definidos en los apartados 2.1.3.1 y 2.1.3.2. del capítulo VII de la Memoria Descriptiva, de forma que:

- ✓ **Espesor de la virola: 60 mm = 0,06 m.**
- ✓ **Espesor de la pared de refractario: 230 mm = 0,23 m.**

Teniendo en cuenta que el valor del diámetro externo del horno, impuesto anteriormente, es de 4,4 m:

$$D_{\text{int}} = D_{\text{ext}} - (2 \cdot \text{espesor ref}) - (2 \cdot \text{espesor virola}) = 4,4 - (2 \cdot 0,23) - (2 \cdot 0,06) = 3,82 \text{ m.}$$

$$D_{\text{int}} = 3,82 \text{ m} ; R_{\text{int}} = R = r_1 = 1,91 \text{ m.}$$

Sabiendo  $r_1$  puede definirse  $r_2$  y  $r_3$ .

$$r_1 = 1,91 \text{ m.}$$

$$r_2 = 1,91 + 0,23 = 2,14 \text{ m}$$

$$r_3 = 2,14 + 0,06 = 2,2 \text{ m}$$

Luego, la longitud de capa plana  $m$  sería:

$$m = 2 \cdot R \cdot \text{sen}(\beta/2) = 2 \cdot R \cdot \text{sen}(99,64/2) = 2 \cdot 1,91 \cdot \text{sen}(99,64/2) = 2,914 \text{ m.}$$

Incrementando en un 30 % el valor de la longitud de capa plana para tener en cuenta el grado de mezcla del sólido y por tanto, el área de intercambio real, se obtiene: (Colina F. G, Caballero I. y Costa J, 2002 [13])

$$m + 0,3m = 2,914 + 0,3 \cdot 2,914 = 3,788 \text{ m.}$$

**Longitud de capa plana,  $m = 3,788 \text{ m}$**

### 3.2.1.2. $W_{sól}$ , CAUDAL MÁSSICO DE SÓLIDO

El horno rotatorio es alimentado mediante una corriente de crudo de  $(W_{sól})_{entrada} = 3700$  t/día.

$$3700 \frac{t}{día} \times \frac{1000 \text{ kg}}{1 t} \times \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} \times \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}} = 42,824 \text{ kg/s}$$

$$W_{sól} = 42,824 \text{ kg/s}$$

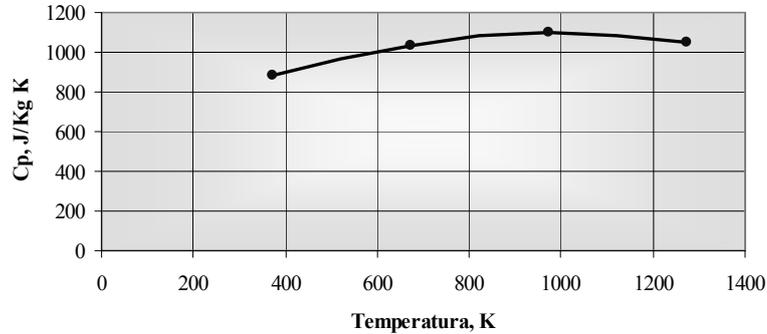
### 3.2.1.3. $Cp_{sól}$ , CALOR ESPECÍFICO DEL SÓLIDO

El calor específico del sólido es una variable que depende de la temperatura del sólido, de forma que en cada intervalo tendrá un valor distinto condicionado por la temperatura del sólido en esa zona. Para obtener esta expresión dependiente de la temperatura, representamos gráficamente los valores experimentales facilitados por *Holcim* que se muestran en la Tabla 4:

Temperatura	Cp crudo (sólido) en J/kg K
100 °C = 373,15 K	880
400 °C = 673,15 K	1030
700 °C = 973,15 K	1100
1000 °C = 1273,15 K	1050

Tabla 4. Datos experimentales del Cp del crudo a distintas temperaturas.

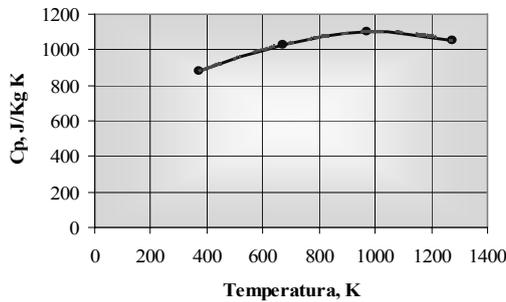
**Representación de Cp sólido frente a la temperatura.**



*Fig 5. Representación gráfica de los valores experimentales del calor específico del sólido frente a T.*

Una vez representados los valores experimentales agregamos la línea de tendencia más adecuada.

**Representación de Cp sólido frente a la temperatura.**



—●— Representación de datos experimentales de Cp us T.

--- Línea de tendencia polinómica de grado 3, cuya expresión es :

$$y = -2 \cdot 10^{-7} \cdot x^3 + 5 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 + 0,6516 x + 642,14 ; \quad R^2 = 1$$

*Fig6. Representación gráfica de Cp frente a T y línea de tendencia más adecuada*

Luego, la expresión de Cp<sub>sólido</sub> dependiente de la temperatura es la siguiente:

$$Cp_{sólido} = -2 \cdot 10^{-7} \cdot T_{sól}^3 + 5 \cdot 10^{-5} \cdot T_{sól}^2 + 0,6516 T + 642,14$$

El valor de  $C_{p\text{sólido}}$  en la *condición inicial* es:

$$C_{p\text{sólido}} = -2 \cdot 10^{-7} \cdot 1723,15^3 + 5 \cdot 10^{-5} \cdot 1723,15^2 + 0,6516 \times 1723,15 + 642,14 = 890,115 \text{ J/kgK}$$

$$C_{p\text{sólido}} = 890,115 \text{ J/kgK}$$

#### 3.2.1.4. $h_c$ , COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN

Para la obtención del coeficiente de transferencia de calor por convección se utilizará la ecuación que recomienda *Nusselt* para el cálculo de la transferencia de calor en flujo turbulento completamente desarrollado en tubos lisos: (Colina F. G, Caballero I. y Costa J. 2002 [1])

$$(Nu)_d = 0,036 (Re)_d^{0,8} \cdot (Pr)^{1/3}$$

$$\text{Número de Nusselt } (Nu) = \frac{h_c \cdot D}{k}$$

$$\text{Número de Reynolds } (Re) = \frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu}$$

$$\text{Número de Prandtl } (Pr) = \frac{\mu \cdot Cp}{k}$$

$$(Nu)_d = 0,036 \left( \frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu} \right)^{0,8} \cdot \left( \frac{\mu \cdot Cp}{k} \right)^{1/3}$$

Se necesita conocer los valores de  $D$ ,  $v$ ,  $\rho$ ,  $\mu$ ,  $C_p$  y  $k$ .

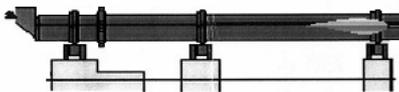
### 3.2.1.4.1. CONSIDERACIONES REALIZADAS PARA EL CÁLCULO DE $h_c$

La temperatura de los gases de combustión varía desde 1500 °C a la entrada del horno rotatorio, hasta 2000 °C a la salida del mismo, es decir, oscila en un intervalo de temperatura de 500 °C. En este intervalo de temperatura las variables  $\rho$ ,  $\mu$ ,  $C_p$  y  $k$  no varían de forma significativa, es por ello que en este proyecto, se ha optado por el cálculo de un *(hc)medio*.

La transmisión de calor desde los gases de combustión hacia el crudo en el interior del horno, está dominada por el mecanismo de la radiación debido a las altas temperaturas a las que se realiza el proceso; por consiguiente, el error que conlleva la consideración de un *(hc)medio* constante, no será significativo.

Realmente, el coeficiente de transmisión de calor por convección tendrá un valor distinto en cada zona del horno condicionado por la temperatura del gas en esa zona; pero se ha realizado la consideración de un  $h_c \ll h_r$ , y se calculará un *(hc)medio* a una  $T_{promedio}$  del sistema que será una media entre la  $T_{ent}$  y  $T_{sal}$  de los gases de combustión en el horno rotatorio.

$$T_{salida \text{ gases de combustión}} = 1500 \text{ °C} = 1773,15 \text{ K}$$



$$T_{entrada \text{ gases de combustión}} = 2000 \text{ °C} = 2273,15 \text{ K}$$

$$T_{promedio \text{ para los gases}} = \frac{2273,15 + 1773,15}{2} = 2023,15 \text{ K}$$

Todas las variables necesarias para el cálculo del coeficiente de transmisión de calor por convección se evaluarán a la  $T_{\text{promedio para los gases}}$  de 2023,15 K de la siguiente forma:

- ✓  $v$ ; velocidad de los gases de combustión, se calculará a partir del dato de caudal volumétrico de los gases de combustión a la entrada del horno.
- ✓  $\rho$ ,  $C_p$ ,  $k$ ; densidad, calor específico y conductividad térmica de los gases de combustión, se evaluarán a partir de valores tabulados a la  $T_{\text{promedio}}$  utilizando la regla de las mezclas.

Se necesita primeramente, conocer la composición de los gases generados en la combustión, que ha sido tomada directamente del exhaustor del horno de Holcim y que es la siguiente:

<b>27 % <math>CO_2</math></b>
<b>6 % <math>O_2</math></b>
<b>67 % <math>N_2</math></b>

Teniendo en cuenta esta composición en los gases de combustión, las variables  $\rho$ ,  $C_p$ ,  $k$  pueden calcularse haciendo uso de la regla de las mezclas de la siguiente forma:

Densidad:	
$\rho_{\text{mezcla}} = 0,27 \cdot \rho_{CO_2} + 0,06 \cdot \rho_{O_2} + 0,67 \cdot \rho_{N_2}$	<i>(ecuación1)</i>
Calor específico:	
$C_{p_{\text{mezcla}}} = 0,27 \cdot C_{p_{CO_2}} + 0,06 \cdot C_{p_{O_2}} + 0,67 \cdot C_{p_{N_2}}$	<i>(ecuación2)</i>
Conductividad térmica:	
$k_{\text{mezcla}} = 0,27 \cdot k_{CO_2} + 0,06 \cdot k_{O_2} + 0,67 \cdot k_{N_2}$	<i>(ecuación3)</i>

**Tabla 5. Expresiones para  $\rho$ ,  $C_p$ ,  $k$  haciendo uso de la regla de las mezclas**

- ✓ Por último  $\mu$ ; viscosidad de los gases de combustión, se calculará mediante el método de estimación de *Herning y Zipperer*, que estima la viscosidad de la mezcla en función de la composición de cada uno de los gases presentes en ella, la viscosidad de cada componente y el peso molecular de cada uno de ellos. (Reid Robert, Sherwood Thomas K. 1977 [7])

#### 3.2.1.4.2. $v$ , VELOCIDAD DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN

Para calcular la velocidad de los gases de combustión utilizaremos el valor de caudal volumétrico de gases de combustión a la entrada del horno:  $(Q_v)_{\text{gases de combustión}} = 130.000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ .

Relacionando el caudal volumétrico con la velocidad lineal de los gases:  $Q_v = v \cdot s$ ; donde “ $Q_v$ ” es el caudal volumétrico de los gases en  $\text{m}^3/\text{s}$ , “ $v$ ” es la velocidad lineal de los gases en  $\text{m/s}$  y “ $s$ ” es la sección transversal de paso de los gases en el interior del horno rotatorio en  $\text{m}^2$ .

$$s = \pi \cdot (r_{\text{int}})^2 = \pi \cdot (1,91)^2 = 11,46 \text{ m}^2; v = \frac{Q_v}{s} = \frac{130,000 \text{ Nm}^3/\text{h}}{11,46 \text{ m}^2} = 11343,80 \text{ m/h}$$

$$v = 11343,80 \frac{\text{m}}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}} = 3,15 \text{ m/s}$$

**$v = 3,15 \text{ m/s}$**

### 3.2.1.4.3. $\rho$ , DENSIDAD DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN

Para evaluar la  $\rho_{mezcla}$  a la  $T_{promedio}$  se toman valores tabulados de densidad a distintas temperaturas para cada uno de los componentes de la mezcla de gases, es decir, para  $CO_2$ ,  $O_2$  y  $N_2$ , para obtener una correlación de la densidad con la temperatura que permita calcular la densidad de cada uno de ellos a la  $T_{promedio}$  de 2023,15 K.

#### Cálculo de la $\rho_{CO_2}$ a la $T_{promedio}$

Para calcular  $\rho_{CO_2}$  a la  $T_{promedio}$  se toman datos tabulados de densidad para el  $CO_2$  a distintas temperaturas: (Mills A. F. 1995 [6])

T,(K)	$\rho_{CO_2}$ (kg/m <sup>3</sup> )
250	2,150
300	1,788
400	1,341
500	1,073
600	0,894
800	0,671
1000	0,537
1500	0,358
2000	0,268

*Tabla 6. Datos tabulados de la densidad del  $CO_2$  a distintas temperaturas.*

Se procederá a representarlos gráficamente, agregar la línea de tendencia más adecuada y obtener una correlación para la densidad con respecto a la temperatura que permita calcular la  $\rho_{CO_2}$  a la temperatura de 2023,15 K .

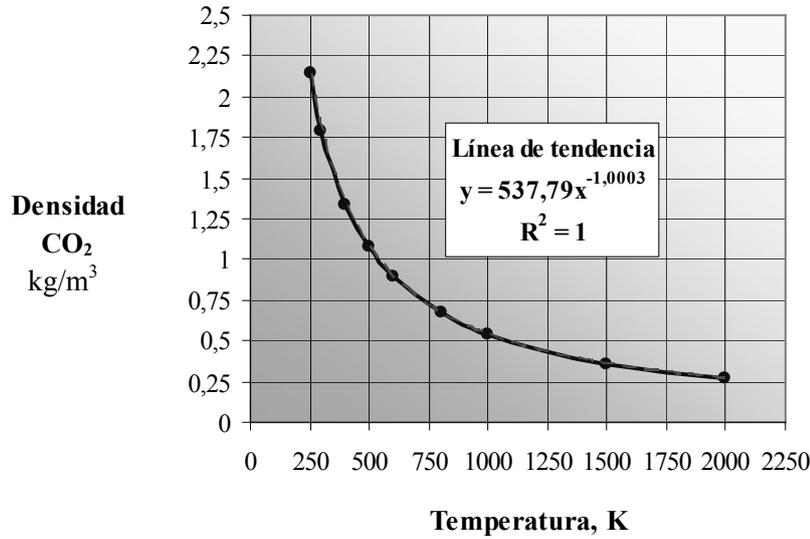


Fig 7. Representación de los datos tabulados en tabla 6 y línea de tendencia.

—•— Representación gráfica de datos tabulados.

- - - Línea de tendencia.

La  $\rho_{CO_2}$  a la temperatura de 2023,15 K será por tanto:

$$\rho_{CO_2} = 537,79 \times (2023,15)^{-1,0003} = 0,265 \text{ kg/m}^3.$$

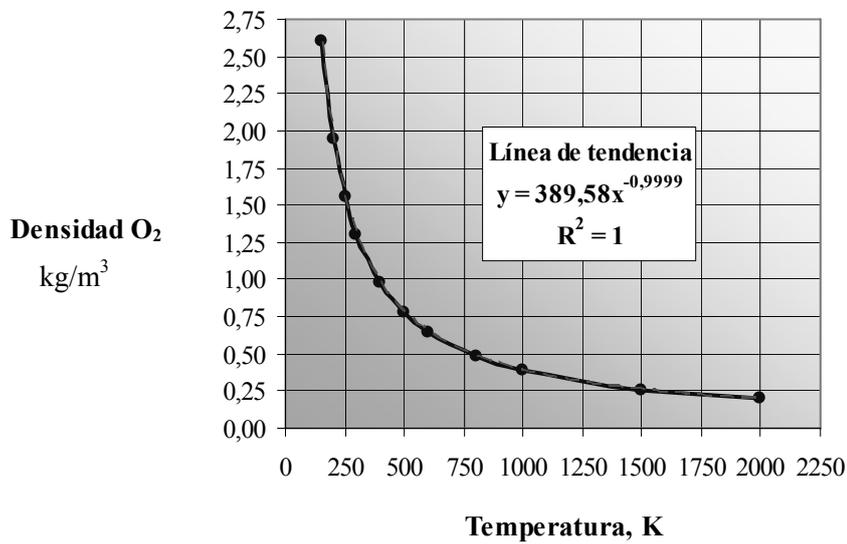
### Cálculo de la $\rho_{O_2}$ a la $T_{\text{promedio}}$

Para calcular  $\rho_{O_2}$  a la  $T_{\text{promedio}}$  se toman datos tabulados de densidad para el O<sub>2</sub> a distintas temperaturas: (Mills A. F. 1995 [6])

T,(K)	$\rho_{O_2}$ (kg/m <sup>3</sup> )
150	2,600
200	1,949
250	1,559
300	1,299
400	0,975
500	0,780
600	0,650
800	0,487
1000	0,390
1500	0,260
2000	0,195

*Tabla 7. Datos tabulados de la densidad del O<sub>2</sub> a distintas temperaturas.*

Procediendo del mismo modo que en el apartado anterior representando gráficamente los datos y agregando la línea de tendencia más adecuada:



*Fig. 8. Representación de los datos tabulados en tabla 7 y línea de tendencia.*

- Representación gráfica de datos tabulados.
- - - Línea de tendencia.

La  $\rho_{O_2}$  a la temperatura de 2023,15 K será por tanto:

$$\rho_{O_2} = 389,58 \times (2023,15)^{-0,9999} = 0,192 \text{ kg/m}^3.$$

Cálculo de la  $\rho_{N_2}$  a la  $T_{\text{promedio}}$

Para calcular  $\rho_{N_2}$  a la  $T_{\text{promedio}}$  se toman datos tabulados de densidad para el  $N_2$  a distintas temperaturas: (Mills A. F. 1995 [6])

T,(K)	$\rho_{N_2}$ (kg/m <sup>3</sup> )
150	2,276
200	1,707
250	1,366
300	1,138
400	0,854
500	0,683
600	0,569
800	0,427
1000	0,341
1500	0,228
2000	0,171

Tabla 8. Datos tabulados de la densidad del  $N_2$  a distintas temperaturas.

Procediendo del mismo modo que en el apartado anterior representando gráficamente los datos y agregando la línea de tendencia más adecuada:

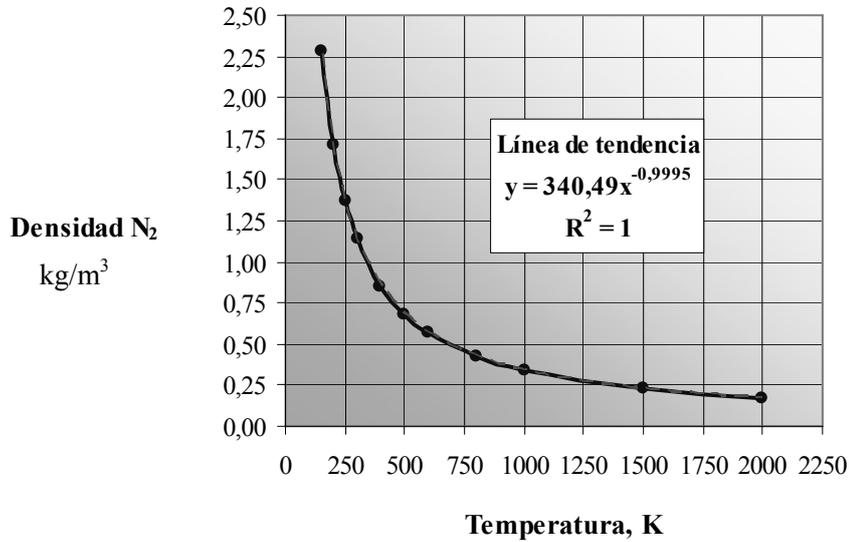


Fig.9. Representación de los datos tabulados en tabla 8 y línea de tendencia.

- Representación gráfica de datos tabulados.
- - - Línea de tendencia.

La  $\rho_{N_2}$  a la temperatura de 2023,15 K será por tanto:

$$\rho_{N_2} = 340,49 \times (2023,15)^{-0,9995} = 0,168 \text{ kg/m}^3.$$

La densidad de la mezcla de gases de combustión a la  $T_{\text{promedio}}$  utilizando la *regla de las mezclas* (ver ecuación 1 pág 27), es por tanto:

$$(\rho_{\text{mezcla}})_{T_{\text{promedio}}} = 0,27 \cdot \rho_{CO_2} + 0,06 \cdot \rho_{O_2} + 0,67 \cdot \rho_{N_2} = 0,27 \times 0,265 + 0,06 \times 0,192 + 0,67 \times 0,168 = 0,200 \text{ kg/m}^3$$

$$(\rho_{\text{mezcla}}) = 0,200 \text{ kg/m}^3$$

#### 3.2.1.4.4. $C_p$ , CALOR ESPECÍFICO DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN

Para evaluar  $C_p$  a la  $T_{\text{promedio}}$  se toman valores tabulados de  $C_p$  a distintas temperaturas para cada uno de los componentes de la mezcla de gases, es decir, para  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  y  $\text{N}_2$ , y se procede a la extrapolación del valor de  $C_p$  de cada uno de ellos a la  $T_{\text{promedio}}$ .

#### Cálculo de la $C_{p\text{CO}_2}$ a la $T_{\text{promedio}}$

Para calcular  $C_{p\text{CO}_2}$  a la  $T_{\text{promedio}}$  se toman datos tabulados de calor específico para el  $\text{CO}_2$  a las temperaturas más cercanas a ésta y se procede a la extrapolación analítica de los datos tabulados: (Mills A. F. 1995 [6])

Temperatura, (K)	$C_{p\text{CO}_2}$ (J/kgK)
1500	1329
2000	1371

$$(C_{p\text{CO}_2})_{1500 \text{ K}} \rightarrow 1329 \text{ J/kgK}$$

$$(C_{p\text{CO}_2})_{2000 \text{ K}} \rightarrow 1371 \text{ J/kgK}$$

$$(C_{p\text{CO}_2})_{2023,15 \text{ K}} \rightarrow x$$

$$(2000 - 1500) \rightarrow (1371 - 1329)$$

$$(2023,15 - 2000) \rightarrow (x - 1371)$$

$$(500) \rightarrow (42)$$

$$(23,15) \rightarrow (x - 1371)$$

$$972 = 500(x - 1371) = 500x - 685500$$

$$x = 686472/500 = 1372,944 \text{ J/kgK}$$

$$(C_{p\text{CO}_2})_{2023,15 \text{ K}} = 1372,944 \text{ J/kgK}$$

Cálculo de la  $C_{pO_2}$  a la  $T_{promedio}$

Del mismo modo que en el apartado anterior, para calcular  $C_{pO_2}$  a la  $T_{promedio}$  se toman datos tabulados de calor específico para el  $O_2$  a las temperaturas más cercanas a la  $T_{promedio}$ : (Mills A. F. 1995 [6])

Temperatura, (K)	$C_{pO_2}$ (J/kgK)
1500	1140
2000	1180

Y se procede a la extrapolación analítica de los datos tabulados:

$$(C_{pO_2})_{1500\text{ K}} \rightarrow 1140\text{ J/kgK}$$

$$(C_{pO_2})_{2000\text{ K}} \rightarrow 1180\text{ J/kgK}$$

$$(C_{pO_2})_{2023,15\text{ K}} \rightarrow x$$

$$(2000 - 1500) \rightarrow (1180 - 1140)$$

$$(2023,15 - 2000) \rightarrow (x - 1180)$$

$$(500) \rightarrow (40)$$

$$(23,15) \rightarrow (x - 1180)$$

$$926 = 500(x - 1371) = 500x - 590000$$

$$x = 6590926/500 = 1181,852\text{ J/kgK}$$

$$(C_{pO_2})_{2023,15\text{ K}} = 1181,852\text{ J/kgK}$$

Cálculo de la  $C_{p_{N_2}}$  a la  $T_{promedio}$

Para calcular  $C_{p_{N_2}}$  a la  $T_{promedio}$  se procede del mismo modo que en los apartados anteriores:

Temperatura, (K)	$C_{p_{N_2}}$ (J/kgK)
1500	1244
2000	1287

$$(C_{p_{O_2}})_{1500\text{ K}} \rightarrow 1244\text{ J/kgK}$$

$$(C_{p_{O_2}})_{2000\text{ K}} \rightarrow 1287\text{ J/kgK}$$

$$(C_{p_{O_2}})_{2023,15\text{ K}} \rightarrow x$$

$$(2000 - 1500) \rightarrow (1287 - 1244)$$

$$(2023,15 - 2000) \rightarrow (x - 1287)$$

$$(500) \rightarrow (43)$$

$$(23,15) \rightarrow (x - 1287)$$

$$995,45 = 500(x - 1287) = 500x - 643500$$

$$x = 6590926/500 = 1288,990\text{ J/kgK}$$

$$(C_{p_{O_2}})_{2023,15\text{ K}} = 1288,990\text{ J/kgK}$$

El calor específico a presión constante de la mezcla de gases de combustión a la  $T_{promedio}$  utilizando la *regla de las mezclas* (ver ecuación 2 pág 27), es por tanto:

$$C_{p_{mezcla}} = 0,27 \cdot C_{p_{CO_2}} + 0,06 \cdot C_{p_{O_2}} + 0,67 \cdot C_{p_{N_2}} = 0,27 \times 1372,944 + 0,06 \times 1181,852 + 0,67 \times 1288,990 = 1305,229\text{ J/kgK}$$

$$(C_{p_{mezcla}}) = 1305,229\text{ J/kgK}$$

### 3.2.1.4.5. $k$ , CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN

Para evaluar  $k$  a la  $T_{\text{promedio}}$  se toman valores tabulados de  $k$  a distintas temperaturas para cada uno de los componentes de la mezcla de gases, es decir, para  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  y  $\text{N}_2$ , y se procede a la extrapolación del valor de  $k$  para cada uno de ellos a la  $T_{\text{promedio}}$ .

#### Cálculo de la $k_{\text{CO}_2}$ a la $T_{\text{promedio}}$

Para calcular  $k_{\text{CO}_2}$  a la  $T_{\text{promedio}}$  se toman datos tabulados de calor específico para el  $\text{CO}_2$  a las temperaturas más cercanas a la  $T_{\text{promedio}}$ : (Mills A. F. 1995 [6])

Temperatura, (K)	$k_{\text{CO}_2}$ (W/mK)
1500	0,094
2000	0,117

$$(k_{\text{CO}_2})_{1500 \text{ K}} \rightarrow 0,094 \text{ W/mK}$$

$$(k_{\text{CO}_2})_{2000 \text{ K}} \rightarrow 0,117 \text{ W/mK}$$

$$(k_{\text{CO}_2})_{2023,15 \text{ K}} \rightarrow x$$

$$(2000 - 1500) \rightarrow (0,117 - 0,094)$$

$$(2023,15 - 2000) \rightarrow (x - 0,117)$$

$$(500) \rightarrow (0,023)$$

$$(23,15) \rightarrow (x - 0,117)$$

$$0,534 = 500(x - 0,117) = 500x - 58,8$$

$$x = 59,334/500 = 0,118 \text{ W/mK}$$

$$(k_{\text{CO}_2})_{2023,15 \text{ K}} = 0,118 \text{ W/mK}$$

Cálculo de la  $k_{O_2}$  a la  $T_{promedio}$

Para calcular  $k_{O_2}$  a la  $T_{promedio}$  se procede de la misma forma que en el apartado anterior:  
(Mills A. F. 1995 [6])

Temperatura, (K)	$k_{O_2}$ (W/mK)
1500	0,101
2000	0,126

$$(k_{O_2})_{1500\text{ K}} \rightarrow 0,101\text{ W/mK}$$

$$(k_{O_2})_{2000\text{ K}} \rightarrow 0,126\text{ W/mK}$$

$$(k_{O_2})_{2023,15\text{ K}} \rightarrow x$$

$$(2000 - 1500) \rightarrow (0,126 - 0,101)$$

$$(2023,15 - 2000) \rightarrow (x - 0,126)$$

$$(500) \rightarrow (0,025)$$

$$(23,15) \rightarrow (x - 0,126)$$

$$0,578 = 500(x - 0,126) = 500x - 563$$

$$x = 63,578 / 500 = 0,127\text{ W/mK}$$

$$(k_{O_2})_{2023,15\text{ K}} = 0,127\text{ W/mK}$$

Cálculo de la  $k_{N_2}$  a la  $T_{promedio}$

Para calcular  $k_{N_2}$  a la  $T_{promedio}$  se procede de la misma forma que en apartado anterior:  
(Mills A. F. 1995 [6])

Temperatura, (K)	$k_{N_2}$ (W/mK)
1500	0,091
2000	0,114

$$(k_{N_2})_{1500\text{ K}} \rightarrow 0,091\text{ W/mK}$$

$$(k_{N_2})_{2000\text{ K}} \rightarrow 0,114\text{ W/mK}$$

$$(k_{N_2})_{2023,15\text{ K}} \rightarrow x$$

$$(2000 - 1500) \rightarrow (0,114 - 0,091)$$

$$(2023,15 - 2000) \rightarrow (x - 0,114)$$

$$(500) \rightarrow (0,023)$$

$$(23,15) \rightarrow (x - 0,114)$$

$$0,532 = 500(x - 0,114) = 500x - 57$$

$$x = 57,532/500 = 0,115\text{ W/mK}$$

$$(k_{O_2})_{2023,15\text{ K}} = 0,115\text{ W/mK}$$

La conductividad de la mezcla de gases de combustión a la  $T_{promedio}$  utilizando la *regla de las mezclas* (ver ecuación 3 pág 27), es por tanto:

$$k_{mezcla} = 0,27 \cdot k_{CO_2} + 0,06 \cdot k_{O_2} + 0,67 \cdot k_{N_2} = 0,27 \times 0,118 + 0,06 \times 0,127 + 0,67 \times 0,115 = 0,116\text{ W/mK.}$$

$$(k_{mezcla}) = 0,116\text{ W/mK}$$

### 3.2.1.4.6. $\mu$ , VISCOSIDAD DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN

La viscosidad de una mezcla de gases no puede calcularse atendiendo a su composición utilizando la regla de las mezclas, ya que representaría errores considerables. La  $\mu_{mezcla}$  a la  $T_{promedio}$  del sistema se calculará haciendo uso del método de estimación de *Herning & Zipperer*, que estima la viscosidad de la mezcla en función de la composición de cada uno de los gases presentes en ella, la viscosidad de cada componente y el peso molecular de cada uno de ellos y que constituye una regla simple y exacta excepto para mezclas ricas en hidrógeno. Su expresión es la siguiente: (Reid Robert, Sherwood Thomas K. 1977 [7])

$$\mu_{mezcla} = \frac{\sum_{i=1} y_i \cdot \mu_i \cdot (M_i)^{0,5}}{\sum_{i=1} y_i \cdot (M_i)^{0,5}}$$

Donde :

- $y_i$ ; composición de cada uno de los gases presentes en la mezcla.
- $\mu_i$ ; viscosidad del componente  $i$ .
- $M_i$ ; peso molecular del componente  $i$ .

Para evaluar la  $\mu_{mezcla}$  a la  $T_{promedio}$  son necesarias las viscosidades del  $CO_2$ ,  $O_2$  y  $N_2$  a dicha temperatura, para ello se toman datos tabulados de cada uno de los componentes a las temperaturas más cercanas a la temperatura promedio y se extrapola el dato de  $\mu$  a la temperatura requerida.

Cálculo de la  $\mu_{CO_2}$  a la  $T_{promedio}$

Datos tabulados de viscosidad para el  $CO_2$  a las temperaturas más cercanas a la  $T_{promedio}$ :  
(Mills A. F. 1995 [6])

Temperatura, (K)	$\mu_{CO_2}$ (kg/ms)
1500	$51,5 \cdot 10^{-6}$
2000	$61,9 \cdot 10^{-6}$

$$(\mu_{CO_2})_{1500\text{ K}} \rightarrow 51,5 \cdot 10^{-6} \text{ kg/ms}$$

$$(\mu_{CO_2})_{2000\text{ K}} \rightarrow 61,9 \cdot 10^{-6} \text{ kg/ms}$$

$$(\mu_{CO_2})_{2023,15\text{ K}} \rightarrow x$$

$$(2000 - 1500) \rightarrow (61,9 \cdot 10^{-6} - 51,5 \cdot 10^{-6})$$

$$(2023,15 - 2000) \rightarrow (x - 61,9 \cdot 10^{-6})$$

$$(500) \rightarrow (10,4 \cdot 10^{-6})$$

$$(23,15) \rightarrow (x - 61,9 \cdot 10^{-6})$$

$$2,407 \cdot 10^{-4} = 500 (x - 61,9 \cdot 10^{-6}) = 500x - 0,030$$

$$x = 0,031/500 = 62,381 \cdot 10^{-6} \text{ kg/ms}$$

$$(\mu_{CO_2})_{2023,15\text{ K}} = 62,381 \cdot 10^{-6} \text{ kg/ms}$$

Cálculo de la  $\mu_{O_2}$  a la  $T_{\text{promedio}}$

Datos tabulados de viscosidad para el  $O_2$  a las temperaturas más cercanas a la  $T_{\text{promedio}}$  :

(Mills A. F. 1995 [6])

Temperatura, (K)	$\mu_{O_2}$ (kg/ms)
1500	$62,1 \cdot 10^{-6}$
2000	$74,9 \cdot 10^{-6}$

$$(\mu_{O_2})_{1500\text{ K}} \rightarrow 62,1 \cdot 10^{-6} \text{ kg/ms}$$

$$(\mu_{O_2})_{2000\text{ K}} \rightarrow 74,9 \cdot 10^{-6} \text{ kg/ms}$$

$$(\mu_{O_2})_{2023,15\text{ K}} \rightarrow x$$

$$(2000 - 1500) \rightarrow (74,9 \cdot 10^{-6} - 62,1 \cdot 10^{-6})$$

$$(2023,15 - 2000) \rightarrow (x - 74,9 \cdot 10^{-6})$$

$$(500) \rightarrow (12,8 \cdot 10^{-6})$$

$$(23,15) \rightarrow (x - 74,9 \cdot 10^{-6})$$

$$2,963 \cdot 10^{-4} = 500 (x - 74,9 \cdot 10^{-6}) = 500x - 0,037$$

$$x = 0,037/500 = 75,492 \cdot 10^{-6} \text{ kg/ms}$$

$$(\mu_{O_2})_{2023,15\text{ K}} = 75,492 \cdot 10^{-6} \text{ kg/ms}$$

Cálculo de la  $\mu_{N_2}$  a la  $T_{\text{promedio}}$

Datos tabulados de viscosidad para el  $N_2$  a las temperaturas más cercanas a la  $T_{\text{promedio}}$  :  
(Mills A. F. 1995 [6])

Temperatura, (K)	$\mu_{N_2}$ (kg/ms)
1500	$51,5 \cdot 10^{-6}$
2000	$61,9 \cdot 10^{-6}$

$$(\mu_{CO_2})_{1500\text{ K}} \rightarrow 51,5 \cdot 10^{-6} \text{ kg/ms}$$

$$(\mu_{CO_2})_{2000\text{ K}} \rightarrow 61,9 \cdot 10^{-6} \text{ kg/ms}$$

$$(\mu_{CO_2})_{2023,15\text{ K}} \rightarrow x$$

$$(2000 -1500) \rightarrow (61,9 \cdot 10^{-6} - 51,5 \cdot 10^{-6})$$

$$(2023,15-2000) \rightarrow (x - 61,9 \cdot 10^{-6})$$

$$(500) \rightarrow (10,4 \cdot 10^{-6})$$

$$(23,15) \rightarrow (x - 61,9 \cdot 10^{-6})$$

$$2,407 \cdot 10^{-4} = 500 (x - 61,9 \cdot 10^{-6}) = 500x - 0,030$$

$$x = 0,031/500 = 62,381 \cdot 10^{-6} \text{ kg/ms}$$

$$(\mu_{N_2})_{2023,15 \text{ K}} = 62,381 \cdot 10^{-6} \text{ kg/ms}$$

Sabiendo la viscosidad para cada uno de los componentes de la mezcla de gases, la composición de cada uno de ellos en la mezcla (0,27% de CO<sub>2</sub>, 0,06% de O<sub>2</sub> y 0,67% de N<sub>2</sub>) y los pesos moleculares de los mismos ( P<sub>M</sub>(CO<sub>2</sub>) = 44 gr/mol, P<sub>M</sub>(O<sub>2</sub>) = 32 gr/mol y P<sub>M</sub>(N<sub>2</sub>) = 28 gr/mol ) puede calcularse la  $\mu_{mezcla}$  a la T<sub>promedio</sub> utilizando el método de estimación de *Herning & Zipperer*:

$$\begin{aligned} \mu_{mezcla} &= \frac{\sum_{i=1} y_i \cdot \mu_i \cdot (M_i)^{0,5}}{\sum_{i=1} y_i \cdot (M_i)^{0,5}} = \\ &= \frac{0,27 \cdot \mu_{CO_2} \cdot (44)^{0,5} + 0,06 \cdot \mu_{O_2} \cdot (32)^{0,5} + 0,67 \cdot \mu_{N_2} \cdot (28)^{0,5}}{0,27 \cdot (44)^{0,5} + 0,06 \cdot (32)^{0,5} + 0,67 \cdot (28)^{0,5}} = \\ &= \frac{0,27 \times 62,381 \cdot 10^{-6} \times (44)^{0,5} + 0,06 \times 75,492 \cdot 10^{-6} \times (32)^{0,5} + 0,67 \times 62,381 \cdot 10^{-6} \times (28)^{0,5}}{0,27 \cdot (44)^{0,5} + 0,06 \cdot (32)^{0,5} + 0,67 \cdot (28)^{0,5}} = \\ &= \frac{3,585 \cdot 10^{-4}}{5,675} = 63,166 \cdot 10^{-6} \text{ kg/ms} \end{aligned}$$

$$(\mu_{mezcla}) = 63,166 \cdot 10^{-6} \text{ kg/ms}$$

### 3.2.1.4.7. DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN DE CALOR POR CONVECCIÓN $(hc)_{medio}$

Una vez estimadas todas las variables necesarias para el cálculo del coeficiente de transmisión de calor por convección  $(hc)_{medio}$ , se utiliza la relación de *Nusselt* para flujo turbulento en tubos lisos (Colina F. G, Caballero I. y Costa J. 2002 [1]):

$$(Nu)_d = 0,036 (Re)_d^{0,8} \cdot (Pr)^{1/3}.$$

Donde:

$$(Nu) = \frac{hc \cdot D}{k}$$
$$(Re) = \frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu}$$
$$(Pr) = \frac{\mu \cdot Cp}{k}$$

Sustituyendo los números adimensionales de *Nusselt*, *Reynolds* y *Prandtl*:

$$\frac{hc \cdot D}{k} = 0,036 \cdot \left( \frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu} \right)^{0,8} \cdot \left( \frac{\mu \cdot Cp}{k} \right)^{1/3}$$

Despejando  $hc$ :

$$(hc)_{medio} = \frac{0,036 \cdot \left( \frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu} \right)^{0,8} \cdot \left( \frac{\mu \cdot Cp}{k} \right)^{1/3} \cdot k}{D}$$

Donde:

- $D = D_{int} = 2 \cdot R_{int} = 2 \cdot 1,91 = 3,82 \text{ m}$
- $v = 3,15 \text{ m/s}$
- $\rho_{mezcla} = 0,200 \text{ kg/m}^3$
- $C_{p_{mezcla}} = 1305,229 \text{ J/kgK}$
- $k_{mezcla} = 0,116 \text{ W/mK}$
- $(\mu_{mezcla}) = 63,166 \cdot 10^{-6} \text{ kg/ms}$
- $(Re)^{0,8} = \left( \frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu} \right)^{0,8} = \left( \frac{3,82 \text{ m} \cdot 3,15 \text{ m/s} \cdot 0,200 \text{ kg/m}^3}{63,166 \cdot 10^{-6} \text{ kg/ms}} \right)^{0,8} = 4628,361$
- $(Pr)^{1/3} = \left( \frac{\mu \cdot C_p}{k} \right)^{1/3} = \left( \frac{63,166 \cdot 10^{-6} \text{ kg/ms} \cdot 1305,229 \text{ J/kgK}}{0,116 \text{ W/mK}} \right)^{1/3} = 0,8908$

Sustituyendo todos los valores:

$$(hc)_{medio} = \frac{0,036 \cdot \left( \frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu} \right)^{0,8} \cdot \left( \frac{\mu \cdot C_p}{k} \right)^{1/3} \cdot k}{D} =$$
$$= \frac{0,036 \times 4628,361 \times 0,890 \times 0,116 \text{ W/mK}}{3,82 \text{ m}} = 4,526 \text{ W/m}^2\text{K}$$

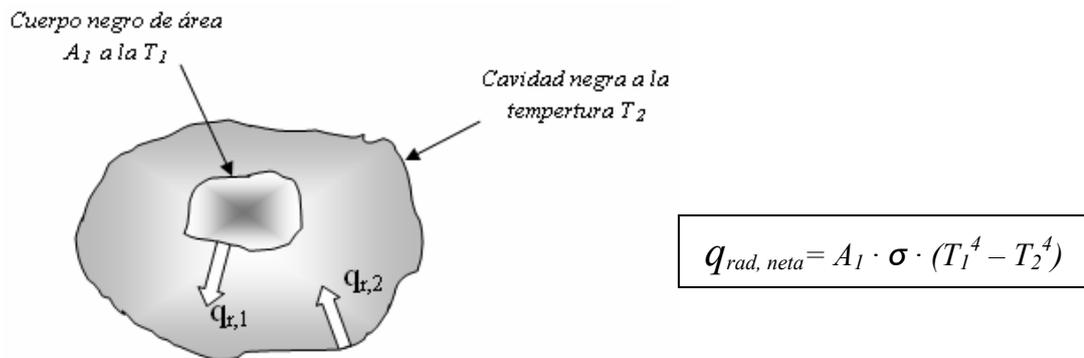
$$(hc)_{medio} = 4,526 \text{ W/m}^2\text{K}$$

### 3.2.1.5. $h_r$ , COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACIÓN

Para el cálculo del coeficiente de transmisión por radiación utilizaremos la expresión que resulta de la *hipótesis de intercambio de calor por radiación entre cuerpos negros*. (Colina F. G, Caballero I. y Costa J. 2002 [1])

La transferencia neta de calor radiante entre dos cuerpos cualesquiera depende de la diferencia de temperatura superficial de los dos cuerpos entre los que ocurre el intercambio calorífico.

Si el cuerpo negro irradia en un espacio cerrado que es negro también, es decir, que absorbe toda la energía radiante que incide en él, la velocidad neta de transferencia de calor radiante está dada por (Holman J. P. 1990 [8]):



Donde:

- $A_1$ ; es el área del cuerpo negro.
- $\sigma$ ; es la constante dimensional de Stefan-Boltzmann cuyo valor es  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ .
- $T_1$  y  $T_2$ ; son las temperaturas de ambos cuerpos.

En ingeniería, debido a que la radiación se combina con otros modos de transferencia de calor, suele definirse, análogamente al mecanismo de transferencia de calor por convección (y por consiguiente, al coeficiente de transferencia de calor por convección  $hc$ ), un coeficiente de transferencia de calor por radiación “ $hr$ ”, de forma que el calor transferido por radiación se escribe como:

$$q_{rad} = hr \cdot A_f \cdot (T_1 - T_2)$$

Donde el coeficiente de transferencia por radiación  $hr$  tiene la forma:

$$h_r = \sigma \cdot \frac{(T_1^4 - T_2^4)}{(T_1 - T_2)}$$

donde las unidades de  $hr$  son  $W/m^2 K$ .

Realizando la consideración de que el intercambio de calor radiativo entre los gases de combustión y el sólido es semejante al intercambio de calor entre cuerpos negros, se calculará el coeficiente de transmisión de calor por radiación desde los gases al sólido según la expresión:

$$hr = \sigma \cdot \frac{(T_{gas}^4 - T_{sólido}^4)}{(T_{gas} - T_{sólido})}$$

Donde:

- $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2 K^4$
  - $T_{gas} = 2273,15 K$ .
  - $T_{sólido} = 1723,15 K$ .
- { Las temperaturas de los gases de combustión y del sólido son las correspondientes a las existentes en el quemador, es decir,  $T_{gas}$  y  $T_{sólido}$  en la *CONDICIÓN INICIAL*.

Sustituyendo todas las variables:

$$hr = \sigma \cdot \frac{(T_{\text{gas}}^4 - T_{\text{sólido}}^4)}{(T_{\text{gas}} - T_{\text{sólido}})} = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4 \times \frac{[(2273,15)^4 - (1723,15)^4] \text{ K}^4}{(2273,15 - 1723,15) \text{ K}} =$$
$$= 1843,641 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$(hr) = 1843,641 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

De cara al cálculo, la expresión de  $hr$  dependiente de la temperatura es la siguiente:

$$hr = \frac{5,67 \cdot 10^{-8} (T_{\text{gas}}^4 - T_{\text{sól}}^4)}{(T_{\text{gas}} - T_{\text{sól}})}$$

### 3.2.1.6. VERIFICACIÓN DE LAS CONSIDERACIONES REALIZADAS PARA EL CÁLCULO DE $hc$

En el apartado 3.2.1.4.1 de este capítulo, se realizó la consideración de un  $(hc)_{\text{medio}}$  debido a que el rango de temperaturas en el que oscilaban los gases de combustión no hacía variar de forma significativa las variables que dependían de la temperatura y por lo tanto, este  $(hc)_{\text{medio}}$ .

Además, debido a que la transmisión de calor en el interior del horno se encuentra dominada por el mecanismo de radiación, debido a las altas temperaturas a la que se realiza el proceso,  $hc \ll hr$ , y por lo tanto la consideración de un  $(hc)_{\text{medio}}$  a la  $T_{\text{promedio}}$  del sistema no tendrá un error considerable.

Una vez calculado los coeficientes de transmisión de calor por convección  $hc$  y por radiación  $hr$ , puede decirse que:

$$(hc) \ll (hr) \quad ; \quad 4,526 \text{ W/m}^2\text{K} \ll 1843,641 \text{ W/m}^2\text{K}.$$

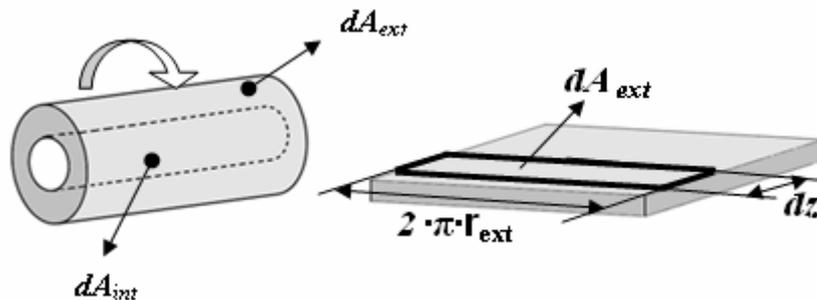
El coeficiente de transmisión de calor por convección  $hc$  es mucho más pequeño que el coeficiente de transmisión de calor por radiación  $hr$ , luego la consideración de un  $(hc)_{\text{medio}}$  a la  $T_{\text{promedio}}$  del sistema no tendrá un error significativo.

**3.2.2. CÁLCULO DE TODAS LAS VARIABLES PARA LA SEGUNDA ECUACIÓN DIFERENCIAL EN LA *CONDICIÓN INICIAL*: PERFIL DE TEMPERATURAS DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN CON RESPECTO A Z.**

$$\frac{dT_g}{dz} = \frac{(h_c + h_r) \cdot m \cdot (T_g - T_s) + (dA/dz) \cdot U \cdot (T_p - T_{ext})}{W_g \cdot C_{pg}}$$

3.2.2.1.  $\left(\frac{dA}{dz}\right)$

A la hora de estimar el coeficiente global de transmisión de calor U en el caso de configuración cilíndrica, puede definirse un  $U_{int}$  o un  $U_{ext}$  dependiendo del área al que esté referido. En este proyecto se establecerá un  $U_{ext}$  (que es lo más usual), luego dA es un diferencial de área externa.



*Fig 10. Definición de diferencial de área externo sobre la carcasa del horno.*

Tal y como puede observarse en la Fig 10:

$$(dA_{ext}) = 2 \cdot \pi \cdot r_{ext} \cdot dz$$

$$\left( \frac{dA_{\text{ext}}}{dz} \right) = 2 \cdot \pi \cdot r_{\text{ext}}$$

El radio externo del horno rotatorio ya fue definido en el apartado 3.2.1.1. (ver Fig 4.)  
donde  $r_{\text{ext}} = r_3 = 2,2$  m, luego:

$$\left( \frac{dA_{\text{ext}}}{dz} \right) = 2 \cdot \pi \cdot 2,2 = 13,823 \text{ m}$$

$$\left( \frac{dA_{\text{ext}}}{dz} \right) = 13,823 \text{ m}$$

### 3.2.2.2. $U$ , COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSMISIÓN DE CALOR

Cuando la transmisión de calor se da a través de una pared constituida por capas múltiples, el flujo calorífico suele expresarse en función del “*Coficiente Global de transmisión de calor,  $U$* ”. El producto resultante de este coeficiente multiplicado por la superficie y por la diferencia total de temperatura, nos da el flujo de calor transmitido a través de la configuración (Chapman Alan J. 1990 [9]), de forma que:

$$Q_{total} = U \cdot A \cdot (\Delta T)_{total}$$

Donde las unidades de  $U$  son las de una conductancia,  $W/m^2K$ .

**El Coeficiente Global de transmisión de calor o Coeficiente Global de Pérdidas de calor por las paredes, puede estimarse teniendo en cuenta que todo el calor que llega a las paredes pasa por conducción a través del refractario y la virola de acero, y que al llegar al límite de ésta, se transmite por convección y radiación hacia el ambiente. Es decir:**

$$Q_{\text{conducción a través del refractario}} = Q_{\text{conducción a través de la virola}} = Q_{\text{convección hacia el ambiente}} + Q_{\text{radiación hacia el ambiente}}$$

Si se tiene en cuenta la geometría cilíndrica del horno rotatorio y se realiza un corte transversal al mismo, puede verse que la pared del horno está formada por dos capas de material: **refractario** y **virola de acero**.

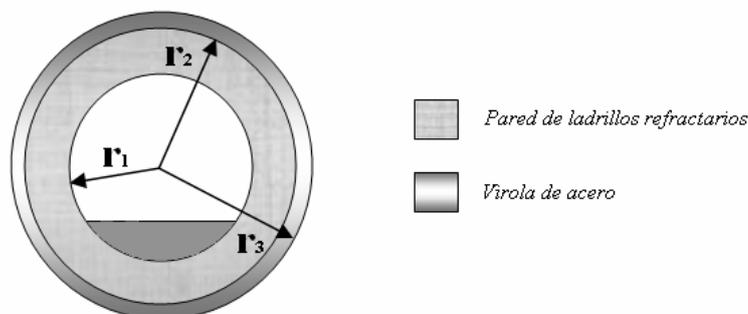


Fig 11. Distintos radios en el interior del horno rotario.

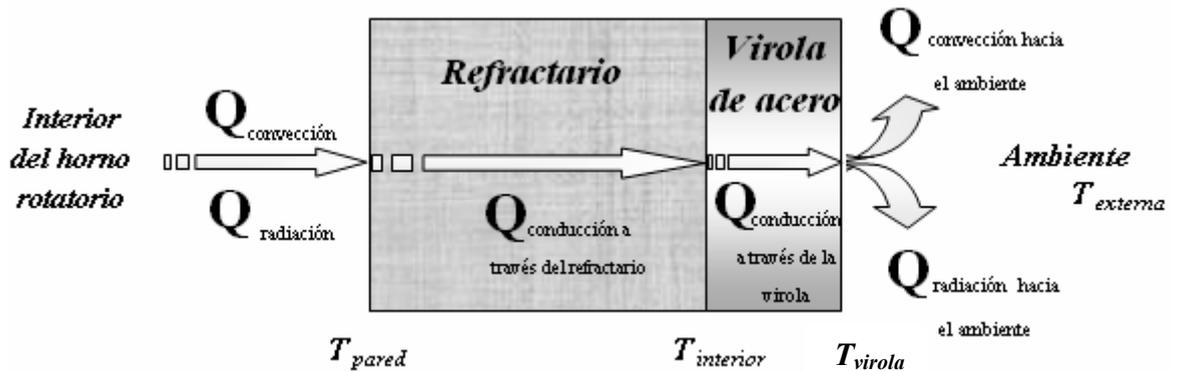


Fig 12 .Flujos de calor a través de las distintas capas que forman la pared del horno rotatorio.

La principal fuente de transmisión de calor en el interior del horno es la *radiación de las llamas y gases calientes*. Esto ocurre de forma directa, tanto en la superficie del crudo como en las paredes del horno; sólo una pequeña cantidad de calor se transmite por *convección* de los gases calientes hacia las paredes.

Debido a que el *mecanismo de transmisión de calor por radiación* cobra especial importancia a temperaturas elevadas como en este caso, donde los gases alcanzan los 2000 °C, el *flujo de calor transmitido por convección* puede despreciarse frente al *flujo de calor transmitido por radiación*, que es el mecanismo dominante en la transferencia de calor en el interior del horno.

Esta transmisión de calor hacia las paredes se debe a la diferencia de temperatura entre los gases calientes y la pared interna, que es la fuerza impulsora del mecanismo de transmisión de calor.

- ☑ El flujo de calor por conducción que atraviesa la pared de ladrillos refractarios haciendo uso de la ley de Fourier para geometría cilíndrica puede expresarse de la siguiente forma (Perry J. 1992 [4]):

$$Q_{\text{conducción a través del refractario}} = \frac{(T_{\text{pared}} - T_{\text{int}})}{\frac{\ln(r_2 / r_1)}{2 \cdot \pi \cdot k_{\text{ref}} \cdot L}}$$

- ☑ De forma análoga, el flujo de calor a través de la virola de acero:

$$Q_{\text{conducción a través de la virola}} = \frac{(T_{\text{int}} - T_{\text{virola}})}{\frac{\ln(r_3 / r_2)}{2 \cdot \pi \cdot k_{\text{virola}} \cdot L}}$$

- ☑ El flujo de calor por convección transmitido hacia los alrededores viene dado por la ley de enfriamiento de Newton, en coordenadas cilíndricas (Perry J. 1992 [4]):

$$Q_{\text{convección hacia el exterior}} = hc \cdot A \cdot (T_{\text{virola}} - T_{\text{exterior}}) = \frac{T_{\text{virola}} - T_{\text{exterior}}}{\frac{1}{h_c \cdot A}}$$

- ☑ Y finalmente, al flujo de calor por radiación cedido a los alrededores (desde la carcasa de acero hacia el ambiente) o pérdidas de calor por radiación en coordenadas cilíndricas (Perry J. 1992 [4]):

$$Q_{\text{radiación hacia el exterior}} = \sigma \cdot A_{\text{rad}} \cdot F_{12} \cdot (T_{\text{virola}}^4 - T_{\text{exterior}}^4) = \frac{T_{\text{virola}} - T_{\text{exterior}}}{\frac{1}{h_r \cdot A_r}}$$

Donde:

- $hr = \frac{\sigma \cdot (T_{virola}^4 - T_{exterior}^4)}{(T_{virola} - T_{exterior})}$
- $F_{12}$ ; es la fracción irradiada. En este caso la carcasa del horno emite calor hacia el infinito, luego  $F_{12} = 1$ .

En la transmisión de calor desde la carcasa del horno hacia los alrededores se da una combinación de los mecanismos de radiación y convección.

Sustituyendo en la expresión:

$$Q_{\text{conducción a través del refractario}} = Q_{\text{conducción a través de la virola}} = Q_{\text{convección hacia el ambiente}} + Q_{\text{radiación hacia el ambiente}} = Q \quad \text{Ecuación 4.}$$

$$\frac{(T_{pared} - T_{int})}{\frac{Ln(r_2 / r_1)}{2 \cdot \pi \cdot k_{ref} \cdot L}} = \frac{(T_{int} - T_{virola})}{\frac{Ln(r_3 / r_2)}{2 \cdot \pi \cdot k_{virola} \cdot L}} = \frac{T_{virola} - T_{exterior}}{\frac{1}{h_r \cdot A_r}} + \frac{T_{virola} - T_{exterior}}{\frac{1}{h_r \cdot A_r}}$$

El flujo de calor total desde la  $T_{pared}$  hasta la  $T_{exterior}$  puede calcularse de la siguiente forma:

$$Q_{cond\ ref} \cdot \left( \frac{Ln(r_2 / r_1)}{2 \cdot \pi \cdot k_{ref} \cdot L} \right) = (T_p - T_{int})$$

+

$$Q_{cond\ virola} \cdot \left( \frac{Ln(r_3 / r_2)}{2 \cdot \pi \cdot k_{virola} \cdot L} \right) = (T_{int} - T_{virola})$$

$$(Q_{conv} + Q_{rad}) \cdot \left( \frac{1}{(h_c + h_r) \cdot A} \right) = (T_{virola} - T_{exterior})$$

$$Q_{cond\ ref} \cdot \left( \frac{Ln(r_2/r_1)}{2 \cdot \pi \cdot k_{ref} \cdot L} \right) + Q_{cond\ virola} \cdot \left( \frac{Ln(r_3/r_2)}{2 \cdot \pi \cdot k_{virola} \cdot L} \right) + (Q_{conv} + Q_{rad}) \cdot \left( \frac{1}{(h_c + h_r) \cdot A} \right) = (T_{pared} - T_{exterior})$$

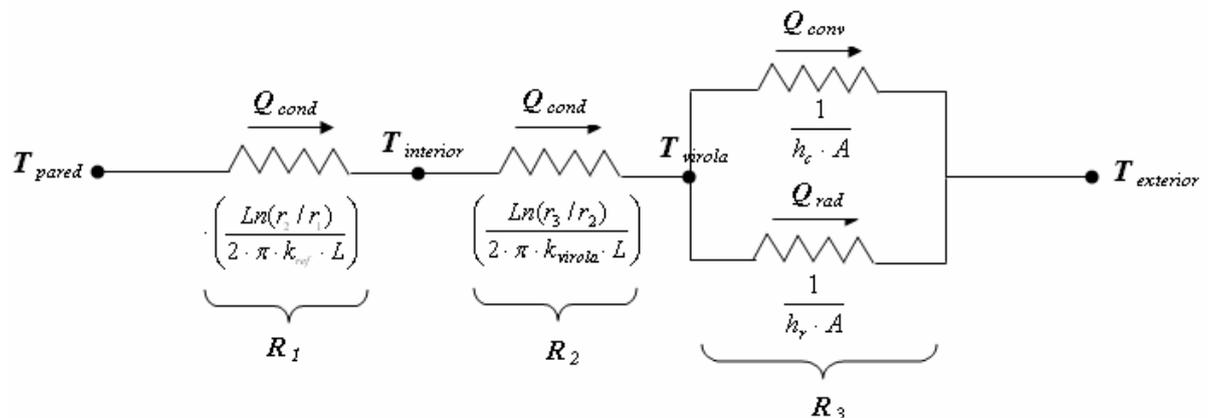
Teniendo en cuenta la igualdad de la *Ecuación 4* podemos decir :

$$Q \cdot \left[ \left( \frac{Ln(r_2/r_1)}{2 \cdot \pi \cdot k_{ref} \cdot L} \right) + \left( \frac{Ln(r_3/r_2)}{2 \cdot \pi \cdot k_{virola} \cdot L} \right) + \left( \frac{1}{(h_c + h_r) \cdot A} \right) \right] = (T_{pared} - T_{exterior})$$

Luego, el flujo de calor total desde la  $T_{pared}$  hasta la  $T_{exterior}$  sería:

$$Q = \left( \frac{(T_{pared} - T_{exterior})}{\left( \frac{Ln(r_2/r_1)}{2 \cdot \pi \cdot k_{ref} \cdot L} \right) + \left( \frac{Ln(r_3/r_2)}{2 \cdot \pi \cdot k_{virola} \cdot L} \right) + \left( \frac{1}{(h_c + h_r) \cdot A} \right)} \right)$$

Realizando una analogía con la **Ley de Ohm**, el proceso de transferencia de calor se puede representar por el circuito de resistencias siguientes (Chapman Alan J. 1990 [9]):



Donde la  $R_{TOTAL} = R_1 + R_2 + R_3$ .

Utilizando el concepto de la resistencia equivalente o total de las redes eléctricas introducido anteriormente, la conductancia total  $U$  está relacionada con la resistencia total entre los puntos en los que se aplica el potencial total:

$$U = \frac{I}{R_{TOTAL} \cdot A}$$

Es decir:

$$\begin{aligned}
 U &= \frac{I}{\left[ \left( \frac{\text{Ln}(r_2/r_1)}{2 \cdot \pi \cdot k_{ref} \cdot L} \right) + \left( \frac{\text{Ln}(r_3/r_2)}{2 \cdot \pi \cdot k_{virola} \cdot L} \right) + \left( \frac{1}{(h_c + h_r) \cdot A} \right) \right]} \cdot 2\pi r \\
 &= \frac{I}{\left[ \frac{r \cdot \text{Ln}(r_2/r_1)}{k_{ref}} + \frac{r \cdot \text{Ln}(r_3/r_2)}{k_{virola}} + \frac{r}{(h_c + h_r) \cdot r_3} \right]}
 \end{aligned}$$

En el caso de geometría cilíndrica, el coeficiente global de transmisión de calor depende de cuál de las superficies (interior o exterior) es empleada para definir la relación  $Q = U \cdot A \cdot \Delta T$ . Aunque el producto  $U \cdot A$  es siempre el mismo, suele ser costumbre emplear el correspondiente a la superficie externa definiendo el llamado "**coeficiente global exterior de transmisión calorífica**". Por lo tanto, expresando el coeficiente  $U$  en función del área externa:

$$\begin{aligned}
 U &= \frac{I}{\left[ \frac{r_3 \cdot \text{Ln}(r_2/r_1)}{k_{ref}} + \frac{r_3 \cdot \text{Ln}(r_3/r_2)}{k_{virola}} + \frac{r_3}{(h_c + h_r) \cdot r_3} \right]} \\
 &= \frac{I}{\left[ \frac{r_3 \cdot \text{Ln}(r_2/r_1)}{k_{ref}} + \frac{r_3 \cdot \text{Ln}(r_3/r_2)}{k_{virola}} + \frac{1}{(h_c + h_r)} \right]}
 \end{aligned}$$

El valor de  $U$ , va a depender de los valores de  $k_{ref}$ ,  $k_{virola}$ ,  $hc$  y  $hr$ , que a su vez dependen de la temperatura de los gases y del sólido determinadas en cada  $dz$ . Por consiguiente, se define el valor de estas variables en la *condición inicial* ( $z=0$  m) para saber el valor de  $U$  en el punto de partida del método matemático.

### 3.2.2.2.1. $k_{ref}$ CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DEL REFRACTARIO

La conductividad térmica de un cuerpo depende de la temperatura, luego para saber la conductividad del refractario en cada  $dz$  y por lo tanto, a cada  $T_{ref}$ , es necesaria una expresión de la conductividad térmica dependiente de la misma.

Para obtener esta correlación se tomarán los valores de conductividad térmica del refractario a distintas temperaturas que proporciona la ficha técnica del refractario seleccionado en el apartado 2.1.3.1. del capítulo VII de la Memoria Descriptiva (ver además página 1 y 2 del Anexo de la Memoria Descriptiva) .Estos datos se muestran en la Tabla 9:

Temperatura, K	Conductividad térmica refractario $k_{ref}$ , (W/mK)
573,15	4,2
973,15	3,2
1273,15	2,9

**Tabla 9. Datos de conductividad térmica del refractario a algunas temperaturas.**

Representando gráficamente los datos de conductividad térmica del refractario frente a la temperatura:

Representación gráfica de  $k_{ref}$  frente a T

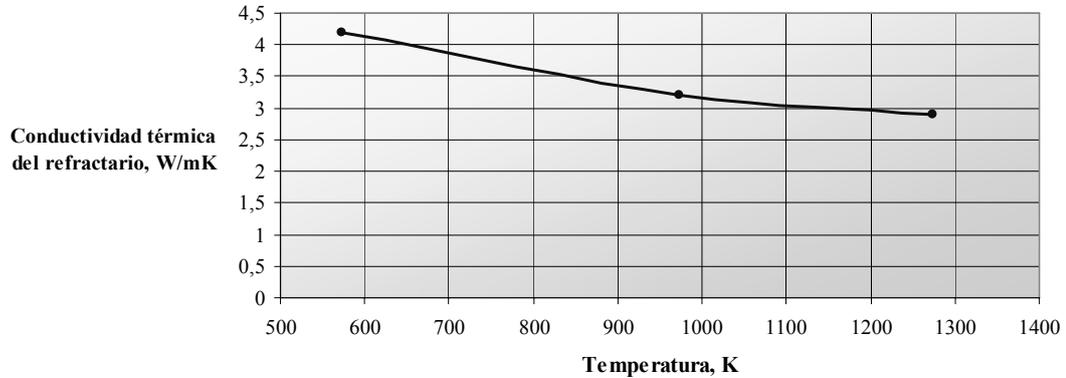


Fig 13. Representación gráfica de los valores de  $k_{ref}$  frente a T.

A la hora de agregar la línea de tendencia más afín a la representación gráfica de la Fig 13 debe tenerse en cuenta el comportamiento real de la conductividad térmica de un sólido con la temperatura. La línea de tendencia más afín a la curva representada es una función polinómica de orden 2 cuya expresión es  $y = 2 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 - 0,0058 \cdot x + 6,8281$  y cuyo  $R^2 = 1$ .

Sin embargo, la conductividad térmica de un sólido no se comporta en la realidad como esta función (que decrece hasta llegar a su punto de inflexión y crece a partir de éste) ya que decrece progresivamente al aumentar la temperatura, por lo tanto, la función lineal, aunque no es la que más se ajusta a los datos, es la más adecuada. (Mills A. F. 1995 [6])

Agregando la línea de tendencia más adecuada:

Representación gráfica de  $k_{ref}$  frente a T

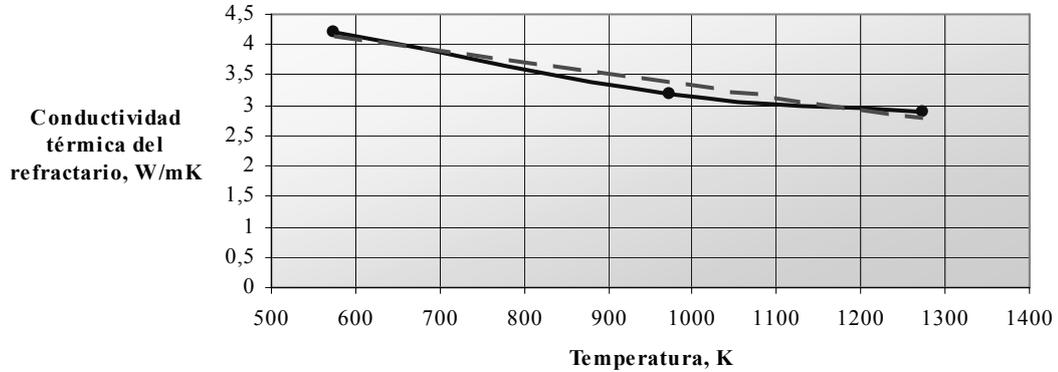


Fig 14. Representación gráfica de los valores de  $k_{ref}$  frente a T y línea de tendencia más adecuada

— Representación gráfica de los datos de  $k_{ref}$  frente a la temperatura

--- Línea de tendencia recta, cuya expresión es la siguiente:

$$y = -0,0019 \cdot x + 5,2114$$

$$R^2 = 0,9528$$

La  $k_{ref}$  depende de la temperatura a la que se encuentra de la siguiente forma:

$$k_{refractorio} = -0,0019 \cdot T_{ref} + 5,2114 \text{ W/mK}$$

### 3.2.2.2.1.1. Evaluación de la temperatura del refractario, $T_{ref}$ .

Para conocer el valor de la conductividad térmica del refractario es necesario saber en cada punto de la pared interna de ladrillos refractarios, desde el quemador (condición inicial) hasta la zona de alimentación del crudo (condición final), la temperatura del mismo.

**La temperatura en la pared interna puede calcularse suponiendo que es la media de la temperatura del sólido y la temperatura del gas.** (Colina F. G, caballero I. y Costa J. 2002 [13])

Por lo tanto, en la *condición inicial* (o inicio de la llama):

$$T_{\text{refractario}} = \frac{T_{\text{sólido}} + T_{\text{gases}}}{2} = \frac{1723,15 + 2273,15}{2} = 1998,15 \text{ K}$$

A esta temperatura, la  $k_{\text{ref}}$ :

$$k_{\text{ref}} = -0,0019 \times 1998,15 + 5,2114 = 1,414 \text{ W/mk}$$

$$k_{\text{refractario}} = 1,414 \text{ W/mK}$$

### 3.2.2.2.2. $k_{\text{virolas}}$ CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LA VIROLA DE ACERO ENVOLVENTE

La conductividad térmica de los metales es directamente proporcional a la temperatura absoluta. Usualmente es posible representar la conductividad térmica con la temperatura de un metal mediante una relación lineal de la forma (Chapman Alan J. 1990 [9]):

$$K = K_0 (1 + bT) \quad \text{Donde;}$$

- $K_0$ ; es la conductividad térmica del metal a  $T=0$  °C.
- $b$ ; es una constante que puede calcularse sabiendo  $K_0$  y el valor  $K$  a una temperatura cualquiera.

Para calcular el valor de la constante “b” tomamos el valor de la conductividad térmica a 0° C y a 400° C para acero al carbono al 1%:

Temperatura, °K	Conductividad térmica, W/m°C
0	43
400	36

Tabla 10. Datos de conductividad térmica del acero al carbono al 1% a distintas temperaturas.

Sustituyendo los datos en la expresión anterior:

$$36 = 43 (1+b \cdot 673,15)$$

$$36 = 43 + 43 \times 673,15 \cdot b$$

$$36 = 43 + 28945,45 \cdot b$$

$$b = \frac{(36 - 43)}{28945,45} = -2,418 \cdot 10^{-4}$$

$b = -2,418 \cdot 10^{-4}$
----------------------------

Luego, la expresión de la conductividad térmica de la virola dependiente de la temperatura será:

$$k_{\text{virola}} = 43 (1 - 2,418 \cdot 10^{-4} \cdot T_{\text{virola}}) \quad \text{W/mK}$$

Para conocer el valor de la  $k_{\text{virola}}$ , es necesario conocer la  $T_{\text{virola}}$ .

#### 3.2.2.2.1. Evaluación de la temperatura de la virola, $T_{virola}$

Para conocer el valor de la conductividad térmica de la virola de acero es necesario saber en cada punto de la pared interna de la virola de acero, desde el quemador (condición inicial) hasta la zona de alimentación del crudo (condición final), la temperatura de la misma.

**La temperatura en la pared interna de la virola puede calcularse suponiendo que es una media de la temperatura del refractario (calculado en el apartado anterior) y la temperatura externa de la carcasa.** (Colina F. G, caballero I. y Costa J. 2002 [13])

$$T_{virola} = \frac{T_{refractario} + T_{carcasa\ externa}}{2}$$

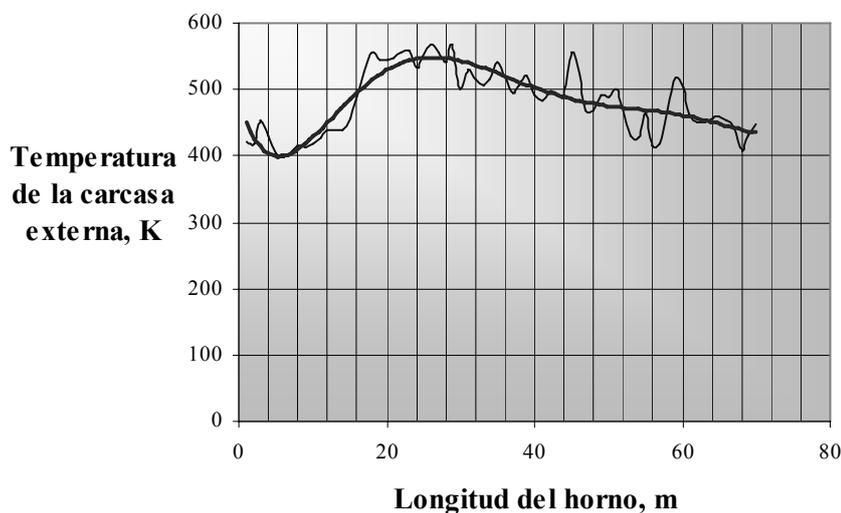
Es decir, para definir en cada punto la temperatura de la virola, es necesario conocer que valor toma la temperatura de la virola en su zona más externa.

#### 3.2.2.2.2. Evaluación de la temperatura de la carcasa externa, $T_{carcasa}$ .

Normalmente en las cementeras, la temperatura de la carcasa externa de un horno rotatorio es controlada desde la sala de control, mediante termopares colocados a lo largo de toda la longitud del mismo. Un aumento de la temperatura en una zona concreta en la carcasa externa del horno puede ser sinónimo de pérdida de pared de ladrillo refractario en esa zona, que se traduce en un aumento de las pérdidas de calor al exterior.

Para saber a que temperatura se encuentra la carcasa del horno rotatorio en cada punto de éste, utilizaremos los datos de temperatura de la carcasa externa a cada metro del horno rotatorio facilitados por la empresa Holcim de sus propias pruebas experimentales, que pueden observarse en la *Tabla 11 del “Anexo de la Memoria de Cálculo”*. Representando gráficamente estos datos, obtenemos la gráfica que se ilustra en la figura 15:

**Representación gráfica de la temperatura de la carcasa externa del horno rotatorio de Holcim con la longitud**



*Fig 15. Representación gráfica de los datos de la Tabla 11 y línea de tendencia*

- Representación gráfica de los datos de la Tabla 11
- Línea de tendencia

El primer tramo de la gráfica hasta el punto de máxima temperatura, se corresponde con la zona de enfriamiento del horno, el resto de la gráfica representa la zona de calentamiento.

Debido a que el modelo matemático propuesto en este proyecto sólo abarca los extremos de la zona de calentamiento (*Ver Capítulo 1, apartado 2. Zonas del horno rotatorio. Definición de longitud de calentamiento*), se utilizará la parte de la gráfica correspondiente a esta zona, cuya línea de tendencia puede verse en la Fig 16:

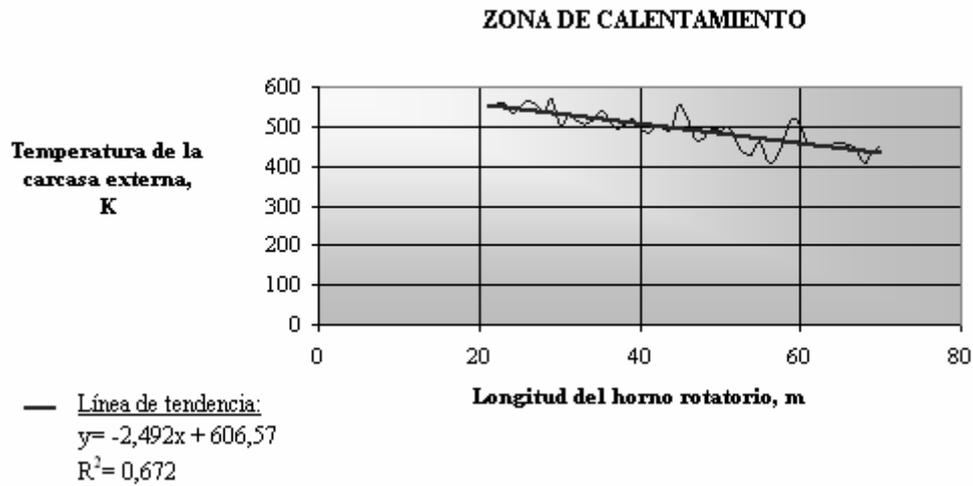


Fig 16.

Por lo tanto, la  $T_{\text{carcasa}}$  en cada punto del horno puede calcularse mediante la expresión:

$$T_{\text{carcasa}} = -2,492 \cdot z + 606,57 \text{ K}$$

En la *condición inicial* (inicio de la llama) donde  $z = 0$ , la  $T_{\text{carcasa}} = 606,57 \text{ K}$ .

Conocido el valor de  $T_{\text{carcasa}}$  puede calcularse el valor de  $T_{\text{virola}}$  :

$$T_{\text{virola}} = \frac{T_{\text{refractario}} + T_{\text{carcasa externa}}}{2} = \frac{1998,15 + 606,57}{2} = 1302,360 \text{ K.}$$

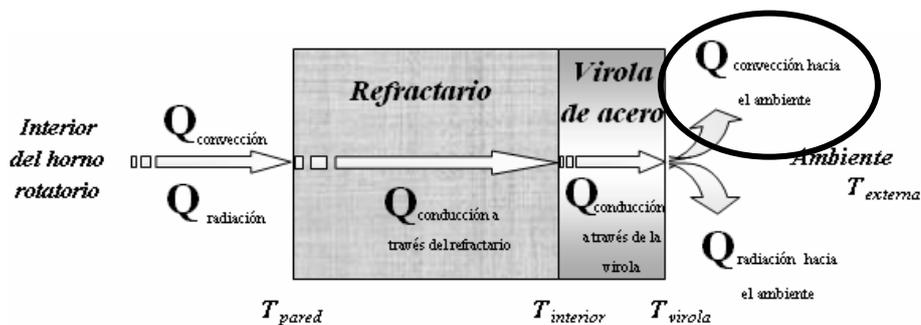
Del mismo modo, conocida la  $T_{\text{virola}}$  puede calcularse la  $k_{\text{virola}}$ :

$$k_{\text{virola}} = 43 (1 - 2,41 \cdot 10^{-4} \cdot T_{\text{virola}}) = 43 (1 - 2,41 \cdot 10^{-4} \cdot 1302,36) = 29,458 \text{ W/mK}$$

### 3.2.2.2.3. $h_c$ , COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN DE CALOR POR CONVECCIÓN

Para calcular el coeficiente de calor por convección desde la superficie externa del horno hacia los alrededores, utilizaremos la expresión para el cálculo del coeficiente de convección natural cuando se producen pérdidas de calor desde una superficie cilíndrica a medios circundantes (Colina F.G, Caballero I. y Costa J. 2002 [13]):

$$hc = 7,4 \cdot D_{\text{ext}}^{-0,25} \cdot (T_{\text{carcasa}} - T_{\infty})$$



- $D_{\text{ext}} = 2 \times r_{\text{ext}} = 2 \times r_3 = 2 \times 2,2 = 4,4 \text{ m.}$
- $T_{\infty} = 25^{\circ} \text{ C} = 298,15^{\circ} \text{ C.}$

$$hc = 7,4 \times (4,4)^{-0,25} \times (606,57 - 298,15) = 21,410 \text{ W/m}^2\text{K.}$$

$$hc = 21,410 \text{ W/m}^2\text{K}$$

### 3.2.2.2.4. $h_r$ , COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN DE CALOR POR RADIACIÓN

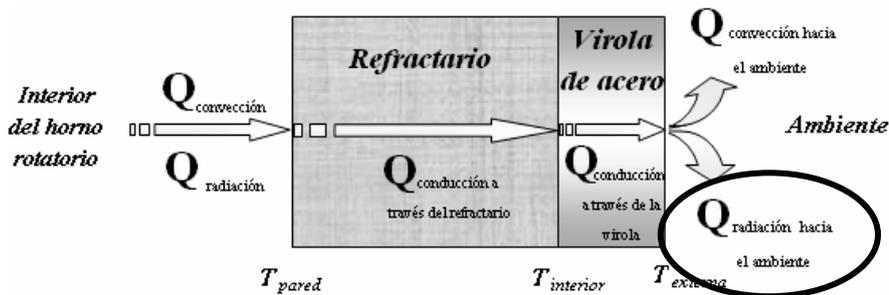
Si ninguno de los cuerpos entre los que se da un intercambio de calor por radiación es un radiador perfecto, y si ambos guardan una relación geométrica entre sí, la

transferencia de calor neta por radiación entre ellos puede escribirse como (Holman J.P. 1998 [8]):

$$Q_r = A \cdot F_{12} \cdot \sigma (T^4_{carcasa} - T^4_{\infty})$$

Donde:

- $A$ ; es el área a través de la cual se da el intercambio radiativo, en este caso el área externa del horno.
- $F_{12}$ ; es la fracción de la energía irradiada por el cuerpo 1 que es absorbida por el cuerpo 2. En este caso el horno cede calor a los alrededores (infinito) luego  $F_{12}=1$ .
- $\sigma$ ; es la constante dimensional de Stefan-Boltzmann cuyo valor es  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ .



De forma análoga a la convección puede escribirse la ecuación anterior como:

$$Q_r = A \cdot F_{12} \cdot \sigma (T^4_{carcasa} - T^4_{\infty}) = A \cdot hr \cdot (T_{carcasa} - T_{\infty})$$

$$\sigma (T^4_{carcasa} - T^4_{\infty}) = hr \cdot (T_{carcasa} - T_{\infty})$$

$$hr = \sigma \cdot \frac{(T^4_{carcasa} - T^4_{\infty})}{(T_{carcasa} - T_{\infty})}$$

- $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$
- $T_{\text{carcasas}} = 606,57 \text{ K}$ .
- $T_{\infty} = 298,15 \text{ K}$

Sustituyendo los datos:

$$hr = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{(606,57)^4 - (298,15)^4}{(606,57 - 298,15)} = 23,433 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$hr = 23,433 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

### 3.2.2.2.5. CÁLCULO DEL COEFICIENTE U

Una vez definidos los valores de  $k_{ref}$ ,  $k_{virola}$ ,  $h_c$  y  $h_r$  en la *condición inicial*, podemos calcular el valor de  $U$  en el punto de partida del método matemático.

$$U = \frac{1}{\left[ \frac{r_3 \cdot \text{Ln}(r_2/r_1)}{k_{ref}} + \frac{r_3 \cdot \text{Ln}(r_3/r_2)}{k_{virola}} + \frac{1}{(h_c + h_r)} \right]}$$

Calculamos cada una de las resistencias térmicas:

- $\frac{r_3 \cdot \text{Ln}(r_2/r_1)}{k_{ref}} = \frac{2,2 \times \text{Ln}(2,14/1,91)}{1,414} = 0,176 \text{ m}^2 \text{ K/W}$

- $\frac{r_3 \cdot \text{Ln}(r_3/r_2)}{k_{virola}} = \frac{2,2 \times \text{Ln}(2,2 / 2,14)}{29,458} = 0,002 \text{ m}^2 \text{ K/W}$

- $\frac{1}{(h_c + h_r)} = \frac{1}{(21,410 + 23,433)} = 0,022 \text{ m}^2 \text{ K/W}$

Sustituyendo los valores en la expresión:

$$U = \frac{1}{(0,176 + 0,002 + 0,022)} = 4,974 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$U = 4,974 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

### 3.2.2.3. $W_g$ , CAUDAL MÁSIICO DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN

Para calcular el caudal másico de los gases de combustión en la condición inicial, utilizaremos el valor de caudal volumétrico de los gases generados de la combustión en el quemador.  $(Q_v)_{\text{gases de combustión}} = 130.000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ .

$$Q_v = 130.000 \text{ Nm}^3/\text{h} \times \frac{1\text{h}}{3600\text{s}} = 36,11 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$W_g = Q_v \cdot \rho$$

Para calcular el caudal másico de los gases de combustión es necesario conocer el valor de la densidad de los gases de combustión. La densidad de los gases de combustión depende de la temperatura, luego el caudal másico de los gases también lo hará.

Se necesita, por tanto, una correlación de la densidad con la temperatura para cada uno de los componentes de los gases de combustión. Como se mencionó en el apartado 3.2.1.4.1. *Consideraciones realizadas para el cálculo de hc*, la composición volumétrica de los gases de combustión es la siguiente:

27 % $CO_2$
6 % $O_2$
67 % $N_2$

Para conocer las correlaciones de la densidad del  $CO_2$ ,  $O_2$  y  $N_2$  con la temperatura, se representa gráficamente datos tabulados de densidad con la temperatura para cada uno de ellos. Se agrega la línea de tendencia más adecuada y se obtiene la expresión de esta línea de tendencia. Estos cálculos ya han sido realizados en el apartado 3.2.1.4.3. *Densidad de los gases de combustión.*

Las expresiones obtenidas pueden verse en la Tabla 11:

Componente de los gases de combustión	Expresión resultante	$R^2$
$CO_2$	$y = 537,79 \cdot x^{-1,0003}$	1
$O_2$	$y = 340,49 \cdot x^{-0,9995}$	1
$N_2$	$y = 389,58 \cdot x^{-0,9999}$	1

*Tabla 11. Correlaciones de la densidad de los gases de combustión con la temperatura.*

La densidad de los gases de combustión, teniendo en cuenta la composición de cada uno de ellos y la regla de las mezclas (ver tabla 5, ecuación 1 pág. 27) será por tanto:

$$(\rho)_{\text{gases de combustión}} = 0,27 \times (537,79 \cdot T^{-1,0003}) + 0,06 \times 340,49 \cdot T^{-0,9995} + 0,67 \times 389,58 \cdot T^{-0,9999}$$

El caudal másico de los gases de combustión en función de la densidad tendrá la expresión:

$$W_g = 36,11 \times \left[ 0,27 \times (537,79 \cdot T^{-1,0003}) + 0,06 \times 389,58 \cdot T^{-0,9995} + 0,67 \times 340,49 \cdot T^{-0,9999} \right]$$

El valor de  $W_g$  en la *condición inicial*:

$$W_g = 36,11 \times \left[ 0,27 \times (537,79 \cdot 2273,15^{-1,0003}) + 0,06 \times 389,58 \cdot 2273,15^{-0,9995} + 0,67 \times 340,49 \cdot 2273,15^{-0,9999} \right] = 6,316 \text{ kg/s.}$$

**$W_g = 6,316 \text{ kg/s.}$**

#### 3.2.2.4. $C_p$ , CALOR ESPECÍFICO DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN

Para el cálculo de  $C_p$  de los gases, se toman las expresiones tabuladas de  $C_p$  en función de la temperatura para  $CO_2$ ,  $O_2$  y  $N_2$  (Perry J. 1992 [4]):

Componente de los gases de combustión	Expresión tabulada de $C_p$ dependiente de $T$
$CO_2$	$10,34 + 0,00274 \cdot T - 195500/T^2$
$O_2$	$8,27 + 0,000258 \cdot T - 187700/T^2$
$N_2$	$6,50 + 0,00100 \cdot T$

*Tabla 12. Expresiones tabuladas de  $C_p$  en función de la  $T$  para  $CO_2$ ,  $O_2$  y  $N_2$*

Teniendo en cuenta la composición de los gases de combustión, utilizando la regla de las mezclas (ver Tabla 5, ecuación 2 pág. 27) :

$$(Cp)_{\text{gases de combustión}} = 0,27 \times (10,34 + 0,00274 \cdot T - 195500/T^2) + 0,06 \times (8,27 + 0,000258 \cdot T - 187700/T^2) + 0,67 \times (6,50 + 0,00100 \cdot T)$$

El valor de  $(Cp)_g$  en la *condición inicial* será por tanto:

$$(Cp)_{\text{gases de combustión}} = 0,27 \times (10,34 + 0,00274 \cdot 2273,15 - 195500/2273,15^2) + 0,06 \times (8,27 + 0,000258 \cdot 2273,15 - 187700/T^2) + 0,67 \times (6,50 + 0,00100 \cdot 2273,15) = 1370,607 \text{ J/kgK}$$

$$(Cp)_g = 1370,607 \text{ J/kgK}$$

### 3.2.3. CÁLCULO DEL ALGORITMO DEL MÉTODO RUNGE-KUTTA EN LA PRIMERA ECUACIÓN DIFERENCIAL PARA EL PRIMER INTERVALO.

El perfil de temperatura del sólido con respecto a la longitud del horno o primera ecuación diferencial, es la siguiente:

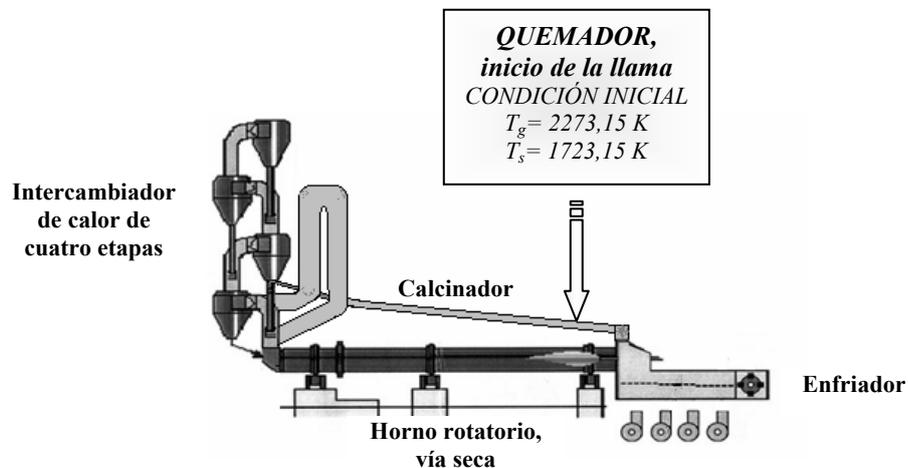
$$\frac{dT_s}{dz} = \frac{(hc + hr) \cdot m \cdot (T_g - T_s)}{W_s \cdot C_{ps}}$$

En la condición inicial se cumple que:

$$T_{\text{sólido}} = T_{\text{reacción de clinkerización}} = 1723,15 \text{ K.}$$

$$T_{\text{gases de combustión}} = 2273,15 \text{ K.}$$

$$z = 0 \text{ m.}$$



Por otra parte, el algoritmo atribuido a *Runge-Kutta* es el siguiente (ver apartado 2. Método de resolución del modelo matemático):

$$y_{i+1} = y_i - \frac{h}{6} \cdot (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

$$k_1 = f(x_i, y_i)$$

$$k_2 = f(x_i + 1/2 \cdot h, y_i - 1/2 h \cdot k_1)$$

$$k_3 = f(x_i + 1/2 \cdot h, y_i - 1/2 h \cdot k_2)$$

$$k_4 = f(x_i + h, y_i - h \cdot k_3)$$

Puede observarse en el algoritmo de Runge-Kutta, la introducción de unos signos negativos a diferencia del algoritmo expuesto en el apartado indicado anteriormente. Esto es debido a que la temperatura del sólido va disminuyendo progresivamente desde el quemador (condición inicial) hasta la zona de alimentación del horno (condición final).

La función sería por tanto:  $f(x_i, y_i) = f(z_i, T_i) = \frac{dT_s}{dz} = \frac{(hc + hr) \cdot m \cdot (T_g - T_s)}{W_s \cdot C_{ps}}$

$$\text{Luego } y_i = \frac{(hc + hr) \cdot m \cdot (T_g - T_s)}{W_s \cdot C_{ps}}$$

Para saber el valor de  $y_{i+1} = Ts_{\text{ól}}_{z=0.1m}$ , calculamos los coeficientes de Kutta:  $k_1, k_2, k_3, y k_4$  ó valores aproximados de la derivada calculados en el intervalo  $0 \leq x \leq 0,1$  m o *condición inicial*.

### 3.2.3.1. CÁLCULO DE $k_1$ EN LA CONDICIÓN INICIAL

Según el algoritmo de Runge-Kutta:

$$k_1 = f(x_i, y_i)$$

$$f(x_i, y_i) = f(z_i, T_i) = \frac{dT_s}{dz} = \frac{(hc + hr) \cdot m \cdot (T_g - T_s)}{W_s \cdot C_{ps}}$$

El valor de todas las variables calculadas en la *condición inicial* en el apartado 3.2.1 "Cálculo de todas las variables para la primera ecuación diferencial: Perfil de temperaturas para el sólido con respecto a la coordenada z" de este proyecto, se muestran en la Tabla 13:

Variable	Valor calculado en la <i>condición inicial</i>
<b>m</b> , capa plana	3,788 m
<b>W<sub>sólido</sub></b> , caudal másico de sólido	42,824 kg/s
<b>Cp<sub>sólido</sub></b> , calor específico del sólido	890,115 J/kgK
<b>hc</b> , coeficiente de transmisión de calor por convección	4,526 W/m <sup>2</sup> K
<b>hr</b> , coeficiente de transmisión de calor por radiación	1843,641 W/m <sup>2</sup> K

*Tabla 13.*

Sustituyendo los valores en la ecuación diferencial:

$$\frac{dT_s}{dz} = \frac{(hc + hr) \cdot m \cdot (T_g - T_s)}{W_s \cdot C_{ps}} = \frac{(4,526 + 1843,641) \times 3,788 \times (2273,15 - 1723,15)}{42,824 \times 890,115} = 101,023 \text{ K/m}$$

Por lo tanto:

$$f(x_i, y_i) = f(z_i, T_i) = \frac{dT_s}{dz} = k_1 = 101,023 \text{ K/m}$$

$k_1 = 101,023 \text{ K/m}$

### 3.2.3.2. CÁLCULO DE $k_2$ EN LA CONDICIÓN INICIAL

Según el algoritmo de Runge-Kutta:

$$k_2 = f(x_i + 1/2 \cdot h, y_i - 1/2 h \cdot k_1)$$

$$\begin{aligned} f(x_i + 1/2 \cdot h, y_i - 1/2 h \cdot k_1) &= f[(z + 1/2 \cdot h), (T_i - 1/2 h \cdot k_1)] = \\ &= \frac{d(T_s - 1/2 h \cdot k_1)}{d(z + 1/2 \cdot h)} = \frac{(hc + hr_{k_2}) \cdot m \cdot (T_g - (T_s - 1/2 h \cdot k_1))}{Ws \cdot Cps_{k_2}} \end{aligned}$$

Calculamos todas las variables a:

$$T_{k_2} = T_{sól} - 1/2 h \cdot k_1 = 1723,15 - 1/2 \times 0,1 \times 101,0231 = 1722,644 \text{ K}$$

$$Z_{k_2} = z + 1/2 \cdot h = 0 + 1/2 \times 0,1 = 0,05 \text{ m}$$

Las variables que varían con la temperatura son  $hr$  y  $Cps$ , ya que  $Ws$  y  $m$  son constantes y  $hc$  es un valor promedio calculado en el apartado 3.2.1.4.7. *Determinación del coeficiente de transmisión de calor por convección  $(hc)_{medio}$* . Se procede a calcular  $hr$  y  $Cps$  a las condiciones de  $k_2$ :

#### Cálculo de $hr_{k_2}$

Como se definió en el apartado 3.2.1.5. *Coficiente de transferencia de calor por radiación*, se calculará  $hr$  como sigue a la  $T_{k_2}$

$$hr = \frac{5,67 \cdot 10^{-8} (T_{gas}^4 - T_{sól,k_2}^4)}{(T_{gas} - T_{sól,k_2})} = \frac{5,67 \cdot 10^{-8} (2273,15 - 1722,644)}{(2273,15 - 1722,644)} = 1844,269 \text{ W/m}^2\text{K}$$

**Cálculo de Cp<sub>k2</sub>**

Como se definió en el apartado 3.2.1.3. *Calor específico del sólido*, se calculará Cp como sigue a la T<sub>k2</sub>:

$$\begin{aligned}
 C_{p_{\text{sólido}}} &= -2 \cdot 10^{-7} \cdot T_{\text{sól},k2}^3 + 5 \cdot 10^{-5} \cdot T_{\text{sól},k2}^2 + 0,6516 T_{\text{sól},k2} + 642,14 = \\
 &= -2 \cdot 10^{-7} \cdot (1722,644)^3 + 5 \cdot 10^{-5} \cdot T(1722,644)^2 + 0,6516 (1722,644) + 642,14 = \\
 &= 890,599 \text{ J/kgK}
 \end{aligned}$$

El valor de todas las variables para el cálculo de k<sub>2</sub> se muestran en la Tabla 14:

Variable	Valor determinado para el cálculo de k <sub>2</sub>
<b>m</b> , capa plana	3,788 m
<b>W<sub>sólido</sub></b> , caudal másico de sólido	42,824 kg/s
<b>Cp<sub>sólido</sub></b> , calor específico del sólido	890,599 J/kgK
<b>hc</b> , coeficiente de transmisión de calor por convección	4,526 W/m <sup>2</sup> K
<b>hr</b> , coeficiente de transmisión de calor por radiación	1844,269 W/m <sup>2</sup> K

*Tabla 14.*

Sustituyendo las variables en la ecuación diferencial definida para T<sub>k2</sub>:

$$\frac{d(T_s - 1/2 h \cdot k_1)}{d(z + 1/2 \cdot h)} = \frac{(hc + hr_{k_2}) \cdot m \cdot (T_g - (T_s - 1/2 h \cdot k_1))}{W_s \cdot C_{ps_{k_2}}} =$$

$$\frac{(4,526 + 1844,269) \times 3,788 \times (2273,15 - 1722,644)}{42,824 \times 890,599} = 101,909 \text{ K/m}$$

***K<sub>2</sub> = 101,909 K/m***

### 3.2.3.3. CÁLCULO DE $k_3$ EN LA CONDICIÓN INICIAL

Según el algoritmo de Runge-Kutta:

$$k_3 = f(x_i + 1/2 \cdot h, y_i - 1/2 h \cdot k_2)$$

$$f(x_i + 1/2 \cdot h, y_i - 1/2 h \cdot k_2) = f[(z + 1/2 \cdot h), (T_i - 1/2 h \cdot k_2)] =$$

$$= \frac{d(T_s - 1/2 h \cdot k_2)}{d(z + 1/2 \cdot h)} = \frac{(hc + hr_{k_3}) \cdot m \cdot (T_g - (T_s - 1/2 h \cdot k_2))}{Ws \cdot Cps_{k_3}}$$

Calculamos todas las variables a:

$$T_{k_3} = T_{s01} - 1/2 h \cdot k_2 = 1722,645 \text{ K}$$

$$Z_{k_3} = z + 1/2 \cdot h = 0 + 1/2 \times 0,1 = 0,05 \text{ m}$$

Las variables que varían con la temperatura son  $hr$  y  $Cps$ , ya que  $Ws$  y  $m$  son constantes y  $hc$  es un valor promedio calculado en el apartado 3.2.1.4.7. *Determinación del coeficiente de transferencia de calor por convección  $(hc)_{medio}$* . Se procede a calcular  $hr$  y  $Cps$  a las condiciones de  $k_3$ :

#### Cálculo de $hr_{k_3}$

Del mismo modo que en el apartado anterior,  $hr$  a la  $T_{k_3}$ :

$$hr = \frac{5,67 \cdot 10^{-8} (T_{gas}^4 - T_{s01,k_3}^4)}{(T_{gas} - T_{s01,k_3})} = \frac{5,67 \cdot 10^{-8} (2273,15 - 1722,645)}{(2273,15 - 1722,645)} = 1844,268 \text{ W/m}^2\text{K}$$

**Cálculo de Cp<sub>k3</sub>**

Del mismo modo que en el apartado anterior, Cp a la T<sub>k3</sub>:

$$\begin{aligned}
 C_{p_{sólido}} &= -2 \cdot 10^{-7} \cdot T_{sól,k3}^3 + 5 \cdot 10^{-5} \cdot T_{sól,k3}^2 + 0,6516 T_{sól,k3} + 642,14 = \\
 &= -2 \cdot 10^{-7} \cdot (1722,645)^3 + 5 \cdot 10^{-5} \cdot T(1722,645)^2 + 0,6516 (1722,645) + 642,14 = \\
 &= 890,598 \text{ J/kgK}
 \end{aligned}$$

El valor de todas las variables para el cálculo de k<sub>3</sub> se muestran en la Tabla 15:

Variable	Valor determinado para el cálculo de k <sub>3</sub>
<b>m</b> , capa plana	3,788 m
<b>W<sub>sólido</sub></b> , caudal másico de sólido	42,824 kg/s
<b>Cp<sub>sólido</sub></b> , calor específico del sólido	890,598 J/KgK
<b>hc</b> , coeficiente de transmisión de calor por convección	4,526 W/m <sup>2</sup> K
<b>hr</b> , coeficiente de transmisión de calor por radiación	1844,268 W/m <sup>2</sup> K

*Tabla 15.*

Sustituyendo las variables en la ecuación diferencial definida para T<sub>k3</sub>:

$$\begin{aligned}
 \frac{d(T_s - 1/2 h \cdot k_2)}{d(z + 1/2 \cdot h)} &= \frac{(hc + hr_3) \cdot m \cdot (T_g - (T_s - 1/2 h \cdot k_2))}{W_s \cdot C_{p_{k3}}} = \\
 \frac{(4,526 + 1844,268) \times 3,788 \times (2273,15 - 1722,645)}{42,824 \times 890,598} &= 100,909 \text{ K/m}
 \end{aligned}$$

***K<sub>3</sub> = 100,909 K/m***

### 3.2.3.4. CÁLCULO DE $k_4$ EN LA CONDICIÓN INICIAL

Según el algoritmo de Runge-Kutta:

$$K_4 = f(x_i + h, y_i - h \cdot k_3)$$

$$\begin{aligned} f(x_i + h, y_i - h \cdot k_3) &= f[(z+h), (T_i - h \cdot k_3)] = \\ &= \frac{d(T_s - h \cdot k_3)}{d(z+h)} = \frac{(hc + hr_{k4}) \cdot m \cdot (T_g - (T_s - h \cdot k_3))}{Ws \cdot Cps_{k4}} \end{aligned}$$

Calculamos todas las variables a:

$$T_{k4} = T_{sól} - h \cdot k_3 = 1722,140 \text{ K}$$

$$Z_{k4} = z + h = 0 + 0,1 = 0,1 \text{ m}$$

Las variables que varían con la temperatura son  $hr$  y  $Cps$ , ya que  $Ws$  y  $m$  son constantes y  $hc$  es un valor promedio calculado en el apartado 3.2.1.4.7. *Determinación del coeficiente de transferencia de calor por convección*. Se procede a calcular  $hr$  y  $Cps$  a las condiciones de  $k_4$ :

#### Cálculo de $hr_{k4}$

Del mismo modo que en la determinación de  $hr$  para  $k_1$ , se determina  $hr$  a la  $T_{k4}$ :

$$hr = \frac{5,67 \cdot 10^{-8} (T_{gas}^4 - T_{sól,k4}^4)}{(T_{gas} - T_{sól,k4})} = \frac{5,67 \cdot 10^{-8} (2273,15 - 1722,140)}{(2273,15 - 1722,140)} = 1844,895 \text{ W/m}^2\text{K}$$

**Cálculo de Cp<sub>k4</sub>**

Del mismo modo que en la determinación de Cp para k1, se determina Cp a la T<sub>k4</sub>:

$$\begin{aligned}
 C_{p_{\text{sólido}}} &= -2 \cdot 10^{-7} \cdot T_{\text{sól},k4}^3 + 5 \cdot 10^{-5} \cdot T_{\text{sól},k4}^2 + 0,6516 T_{\text{sól},k4} + 642,14 = \\
 &= -2 \cdot 10^{-7} \cdot (1722,140)^3 + 5 \cdot 10^{-5} \cdot T(1722,140)^2 + 0,6516 (1722,140) + 642,14 = \\
 &= 891,080 \text{ J/kgK}
 \end{aligned}$$

El valor de todas las variables para el cálculo de k4 se muestran en la Tabla 16:

Variable	Valor determinado para el cálculo de k <sub>4</sub>
<b>m</b> , capa plana	3,788 m
<b>W<sub>sólido</sub></b> , caudal másico de sólido	42,824 kg/s
<b>Cp<sub>sólido</sub></b> , calor específico del sólido	891,080 J/kgK
<b>hc</b> , coeficiente de transmisión de calor por convección	4,526 W/m <sup>2</sup> K
<b>hr</b> , coeficiente de transmisión de calor por radiación	1844,895 W/m <sup>2</sup> K

*Tabla 16.*

Sustituyendo las variables en la ecuación diferencial definida para T<sub>k4</sub>:

$$\frac{d(T_s - 1/2 h \cdot k3)}{d(z + 1/2 \cdot h)} = \frac{(hc + hr_{k4}) \cdot m \cdot (T_g - (T_s - h \cdot k3))}{W_s \cdot C_{p_{k4}}} =$$

$$\frac{(4,526 + 1844,895) \times 3,788 \times (2273,15 - 1722,140)}{42,824 \times 891,080} = 100,796 \text{ K/m}$$

***K<sub>4</sub> = 100,796 K/m***

### 3.2.3.5. CÁLCULO DE LA TEMPERATURA DEL SÓLIDO EN $z=0,1$ m

Una vez calculados los coeficientes de Runge-Kutta:  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ , y  $k_4$  ó valores aproximados de la derivada calculados en el intervalo  $0 \leq x \leq 0,1$  m (*condición inicial*), podemos calcular valor de  $y_{i+1} = T_{z=0,1m}$ :

$$y_{i+1} = y_i - \frac{h}{6} \cdot (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) =$$
$$= 1723,15 - 0,1/6 \times (101,023 + 2 \cdot 100,909 + 2 \cdot 100,909 + 100,796) = 1722,140 \text{ K}$$

$$T_{sól+1} = T_{0,1m} = 1722,140 \text{ K}$$

### 3.2.4 CÁLCULO DEL ALGORITMO DEL MÉTODO RUNGE-KUTTA EN LA SEGUNDA ECUACIÓN DIFERENCIAL PARA EL PRIMER INTERVALO.

El perfil de temperatura de los gases con respecto a la longitud del horno o segunda ecuación diferencial, es la siguiente:

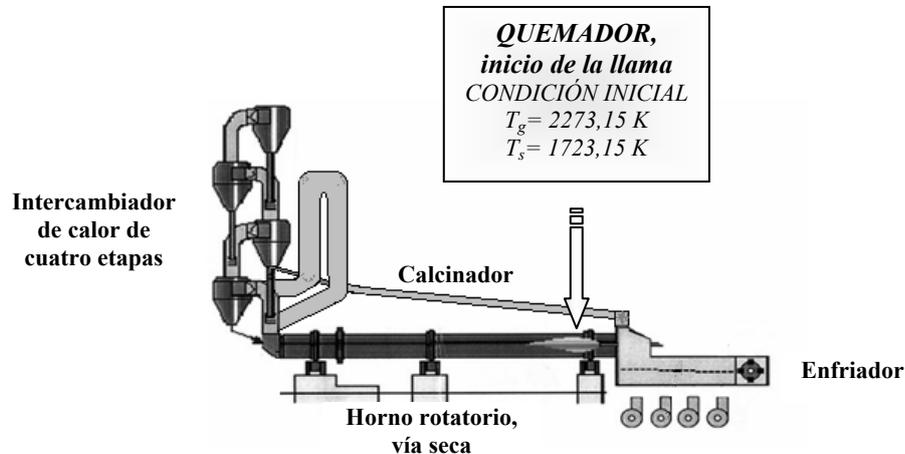
$$\frac{dT_g}{dz} = \frac{(h_c + h_r) \cdot m \cdot (T_g - T_s) + (dA/dz) \cdot U \cdot (T_p - T_{ext})}{W_g \cdot C_{pg}}$$

En la condición inicial se cumple que:

$$T_{\text{sólido}} = T_{\text{reacción de clinkerización}} = 1723,15 \text{ K.}$$

$$T_{\text{gases de combustión}} = 2273,15 \text{ K.}$$

$$z = 0 \text{ m.}$$



Por otra parte, el algoritmo atribuido a *Kutta* es el siguiente ( *ver apartado 2. Método de resolución del modelo matemático*):

$$y_{i+1} = y_i - \frac{h}{6} \cdot (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

$$k_1 = f(x_i, y_i)$$

$$k_2 = f(x_i + 1/2 \cdot h, y_i - 1/2 h \cdot k_1)$$

$$k_3 = f(x_i + 1/2 \cdot h, y_i - 1/2 h \cdot k_2)$$

$$k_4 = f(x_i + h, y_i - h \cdot k_3)$$

Puede observarse en el algoritmo de Runge-Kutta, la introducción de unos signos negativos a diferencia del algoritmo expuesto en el apartado indicado anteriormente. Esto es debido, a que la temperatura de los gases de combustión va disminuyendo progresivamente desde el quemador (condición inicial) hasta la zona de alimentación del horno (condición final).

La función, sería por tanto:  $f(x_i, y_i) = f(z_i, T_i) = \frac{dT_g}{dz} =$

$$\frac{(hc + hr) \cdot m \cdot (T_g - T_s) + (dA/dz) \cdot U \cdot (T_p - T_{ext})}{W_g \cdot C_{pg}}$$

Luego  $y_i = \frac{(hc + hr) \cdot m \cdot (T_g - T_s) + (dA/dz) \cdot U \cdot (T_p - T_{ext})}{W_g \cdot C_{pg}}$

Para saber el valor de  $y_{i+1} = T_{g_{z=0,1m}}$ , calculamos los coeficientes de Kutta:  $k_1, k_2, k_3$ , y  $k_4$  ó valores aproximados de la derivada calculados en el intervalo  $0 \leq x \leq 0,1$  m o *condición inicial*.

### 3.2.4.1. CÁLCULO DE $k_1$ EN LA CONDICIÓN INICIAL

Según el algoritmo de Runge-Kutta:

$$k_1 = f(x_i, y_i)$$

$$f(x_i, y_i) = f(z_i, T_i) = \frac{dT_{g_{kl}}}{dz} = \frac{(hc + hr) \cdot m \cdot (T_{g_{kl}} - T_s) + (dA/dz) \cdot U \cdot (T_p - T_{ext})}{W_g \cdot C_{pg}}$$

El valor de todas las variables calculadas en el apartado 3.2.2 “Cálculo de todas las variables para la segunda ecuación diferencial en la condición inicial: Perfil de temperaturas de los gases de combustión con respecto a la coordenada z” de este proyecto, se muestran en la Tabla 17:

Variable	Valor calculado en la condición inicial
<b>hc</b> , coeficiente de transmisión de calor por convección de los gases calientes al sólido= (hc) <sub>medio</sub> etc.	4,526 W/m <sup>2</sup> K
<b>hr</b> , coeficiente de transmisión de calor por radiación de los gases calientes al sólido.	1843,641 W/m <sup>2</sup> K
$\left[ \frac{dA}{dz} \right]$	13,823 m
<u>Cálculo de U</u>	
<b>T<sub>refractario</sub></b>	1998,15 K
<b>k<sub>refractario</sub></b> , conductividad del refractario	1,414 W/mK
<b>T<sub>carcasa</sub></b>	606,57 K
<b>T<sub>virola</sub></b>	1302,360 K
<b>k<sub>virola</sub></b> , conductividad de la virola	29,458 W/mK
<b>hc</b> , coeficiente de transmisión de calor por convección de la carcasa al ambiente	21,410 W/m <sup>2</sup> K
<b>hr</b> , coeficiente de transmisión de calor por radiación de la carcasa al ambiente	23,433 W/m <sup>2</sup> k
<b>U</b> , coeficiente global de transmisión de calor	4,974 W/m <sup>2</sup> k
<b>W<sub>g</sub></b> , caudal másico de los gases	6,316 kg/s
<b>C<sub>p</sub></b> , calor específico de los gases	1370,607 J/kgK

**Tabla 17.**

Sustituyendo los valores en la ecuación diferencial obtendremos el valor de  $k_1$ :

$$k_1 = \frac{dT_{g_{k1}}}{dz} = \frac{(hc + hr) \cdot m \cdot (T_{g_{k1}} - T_s) + (dA/dz) \cdot U \cdot (T_p - T_{ext})}{W_g \cdot C_{pg}} =$$
$$= \frac{(4,526 + 1843,641) \times 3,788 \times (2273,15 - 1723,15) + 13,823 \times 4,974 \times (1998,15 - 298,15)}{6,316 \times 1370,607} =$$
$$= 458,284 \text{ K/m.}$$

$$K_1 = 458,284 \text{ K/m}$$

### 3.2.4.2. CÁLCULO DE $k_2$ EN LA CONDICIÓN INICIAL

Según el algoritmo de Runge-Kutta:

$$k_2 = f(x_i + 1/2 \cdot h, y_i - 1/2 h \cdot k_1)$$

$$f(x_i + 1/2 \cdot h, y_i - 1/2 h \cdot k_1) = f[(z + 1/2 \cdot h), (T_i - 1/2 h \cdot k_1)] =$$

$$= \frac{dT_{k2}}{dz_{k2}} = \frac{d(T_g - 1/2 h \cdot k_1)}{d(z + 1/2 \cdot h)} = \frac{(hc + hr_{k2}) \cdot m \cdot (T_{g_{k2}} - T_s) + (dA/dz) \cdot U \cdot (T_p - T_{ext})}{W_g \cdot C_{pg}}$$

Calculamos todas las variables a:

$$T_{k2} = T_g - 1/2 h \cdot k_1 = 2273,15 - 1/2 \times 0,1 \times 458,284 = 2270,858 \text{ K}$$

$$Z_{k2} = z + 1/2 \cdot h = 0 + 1/2 \times 0,1 = 0,05 \text{ m}$$

Se calculará el valor de todas las variables que dependen de la temperatura, a la

$T_{gas,k2} = 2270,858 \text{ K}$  y las que dependan de la longitud del horno, a  $z_{k2} = 0,05 \text{ m}$ .

### Cálculo de $hc_{k2}$

El coeficiente de transmisión de calor por convección desde los gases al sólido  $hc$ , se consideró constante calculando un  $(hc)_{\text{medio}}$  a la  $T_{\text{promedio}}$  del sistema (*ver apartado 3.2.1.4.1 Consideraciones realizadas para el cálculo de  $hc$* ):

$$(hc)_{\text{medio}} = 4,526 \text{ W/m}^2\text{K}$$

### Cálculo de $hr_{k2}$

Como se definió en el apartado 3.2.1.5. *Coefficiente de transferencia de calor por radiación*, se calcula el coeficiente de transmisión de calor por radiación desde los gases al sólido  $hr$ , como sigue a la  $T_{k2}$ :

$$\begin{aligned} hr &= \frac{5,67 \cdot 10^{-8} (T_{\text{gas},k2}^4 - T_{\text{sól}}^4)}{(T_{\text{gas},k2} - T_{\text{sól}})} = \frac{5,67 \cdot 10^{-8} (2270,858 - 1723,15)}{(2270,858 - 1723,15)} = \\ &= 1840,226 \text{ W/m}^2\text{K} \end{aligned}$$

### Cálculo de $\left(\frac{dA}{dz}\right)_{k2}$

El valor de  $\left(\frac{dA}{dz}\right)_{k2}$  es constante cuyo valor es 13,823 m, calculado en el apartado 3.2.2.1.

### Cálculo de $T_{\text{refractario},k2}$

La temperatura del refractario, evaluada en el apartado 3.2.2.2.1.1. *Evaluación de la temperatura del refractario*, es estimada como la media entre la  $T_{\text{gas}}$  y la  $T_{\text{sólido}}$ . Calculada a la  $T_{gk2}$ :

$$T_{\text{refractario}} = \frac{T_{\text{sólido}} + T_{\text{gases},k2}}{2} = \frac{1723,15 + 2270,858}{2} = 1997,004 \text{ K}$$

### Cálculo de $k_{\text{refractario},k2}$

A la temperatura del refractario calculada anteriormente, el valor de la conductividad térmica del refractario estimada en el apartado 3.2.2.2.1. *Conductividad térmica del refractario*, a la  $T_{gk2}$  es la siguiente:

$$k_{\text{refractario}} = -0,0019 \cdot T_{\text{ref},k2} + 5,2114 = -0,0019 \times 1997,004 + 5,2114 = 1,417 \text{ W/mK}$$

### Cálculo de $T_{\text{carcasa},k2}$

Como ya se mencionó en el apartado 3.2.2.2.2. *Evaluación de la temperatura de la carcasa externa*, la  $T_{\text{carcasa}}$  puede calcularse con la siguiente expresión:

$$T_{\text{carcasa}} = -2,492 \cdot z + 606,57 \text{ K}$$

Calculada a la  $z_{k2}$ :

$$T_{\text{carcasa},k2} = -2,492 \times 0,05 + 606,57 = 606,445 \text{ K}$$

### Cálculo de $T_{\text{virola},k2}$

La temperatura de la virola de acero puede calcularse de la siguiente forma (*ver apartado 3.2.2.2.1. Evaluación de la temperatura de la virola*):

$$T_{\text{virola}} = \frac{T_{\text{refractario}} + T_{\text{caraca externa}}}{2}$$

La temperatura de la virola evaluada a la  $T_{gk2}$ :

$$T_{\text{virola},k2} = \frac{1997,004 + 606,445}{2} = 1301,724 \text{ K}$$

### Cálculo de $k_{\text{virola},k2}$

La conductividad térmica de la virola de acero puede calcularse con la siguiente expresión obtenida en el apartado 3.2.2.2.2. *Conductividad térmica de la virola de acero envolvente*:

$$k_{\text{virola}} = 43 (1 - 2,418 \cdot 10^{-4} \cdot T_{\text{virola}})$$

Evaluada a la  $T_{gk2}$  introduciendo el valor de  $T_{\text{virola},k2}$ :

$$k_{\text{virola},k2} = 43 (1 - 2,418 \cdot 10^{-4} \cdot T_{\text{virola},k2}) = 43 (1 - 2,418 \cdot 10^{-4} \cdot 1301,724) = 29,465 \text{ W/mK}$$

### Cálculo de coeficiente de transmisión de calor desde la carcasa al ambiente, $h_{c,k2}$

El coeficiente de transmisión de calor desde la carcasa hacia los alrededores puede calcularse con la expresión siguiente (*ver apartado 3.2.2.2.3. Coeficiente de transmisión de calor por convección*):

$$hc = 7,4 \cdot D_{\text{ext}}^{-0,25} \cdot (T_{\text{carcasa}} - T_{\infty})$$

Teniendo en cuenta que :

- $D_{\text{ext}} = 2 \times r_{\text{ext}} = 2 \times r_3 = 2 \times 2,2 = 4,4 \text{ m.}$
- $T_{\infty} = 25^{\circ} \text{ C} = 298,15^{\circ} \text{ C.}$

Evaluated a las condiciones de k2:

$$hc_{k2} = 7,4 \cdot 4,4^{-0,25} \cdot (606,445 - 298,15) = 21,408 \text{ W/m}^2\text{K}$$

#### Cálculo de coeficiente de transmisión de calor desde la carcasa al ambiente, $h_{r,k2}$

El coeficiente de transmisión de calor por radiación desde la carcasa externa hacia los alrededores puede calcularse con la expresión siguiente obtenida en el *apartado 3.2.2.2.4. Coeficiente de transmisión de calor por radiación:*

$$hr = \sigma \cdot \frac{(T_{\text{carcasa}}^4 - T_{\infty}^4)}{(T_{\text{carcasa}} - T_{\infty})}$$

que evaluado para k2:

$$hr_{k2} = \sigma \cdot \frac{(606,445^4 - 298,15^4)}{(606,445 - 298,15)} = 23,442 \text{ W/m}^2\text{K}$$

#### Cálculo de coeficiente global de pérdidas a través de las paredes, $U_{k2}$

Una vez conocido el valor de  $T_{\text{refractario},k2}$ ,  $k_{\text{refractario},k2}$ ,  $T_{\text{carcasa},k2}$ ,  $T_{\text{virola},k2}$ ,  $k_{\text{virola},k2}$ ,  $h_{c,k2}$  y  $h_{r,k2}$ , podemos calcular el valor de U de acuerdo con la expresión obtenida en el *apartado 3.2.2.2. Coeficiente global de transmisión de calor:*

$$U = \frac{1}{\left[ \frac{r_3 \cdot \text{Ln}(r_2/r_1)}{k_{ref}} + \frac{r_3 \cdot \text{Ln}(r_3/r_2)}{k_{virola}} + \frac{1}{(h_c + h_r)} \right]}$$

Calculamos cada una de las resistencias térmicas:

- $\frac{r_3 \cdot \text{Ln}(r_2/r_1)}{k_{ref}} = \frac{2,2 \times \text{Ln}(2,14/1,91)}{1,417} = 0,200 \text{ m}^2\text{K/W}$
- $\frac{r_3 \cdot \text{Ln}(r_3/r_2)}{k_{virola}} = \frac{2,2 \times \text{Ln}(2,2/2,14)}{29,465} = 0,002 \text{ m}^2\text{K/W}$
- $\frac{1}{(h_c + h_r)} = \frac{1}{(21,408 + 23,442)} = 0,022 \text{ m}^2\text{K/W}$

Sustituyendo los valores en la expresión:

$$U = \frac{1}{(0,200 + 0,002 + 0,022)} = 4,448 \text{ W/m}^2\text{K}$$

### Cálculo del caudal másico de los gases, $W_{gk2}$

El caudal másico de los gases puede calcularse con la siguiente expresión obtenida en el apartado 3.2.2.3. *Caudal másico de los gases de combustión:*

$$W_g = 36,11 \times (0,27 \times (537,79 \cdot T^{-1,0003}) + 0,06 \times 389,58 \cdot T^{-0,9995} + 0,67 \times 340,49 \cdot T^{-0,9999})$$

Evaluated at  $T_{gk2}$ :

$$W_g = 36,11 \times (0,27 \times (537,79 \cdot 2270,858^{-1,0003}) + 0,06 \times 389,58 \cdot 2270,858^{-0,9995} + 0,67 \times 340,49 \cdot 2270,858^{-0,9999}) = 6,322 \text{ kg/s.}$$

### Cálculo del calor específico de los gases, $C_{pk2}$

Para obtener el calor específico de los gases utilizaremos la expresión obtenida en el apartado 3.2.2.4. *Calor específico de los gases de combustión:*

$$(C_p)_{\text{gases de combustión}} = 0,27 \times (10,34 + 0,00274 \cdot T - 195500/T^2) + 0,06 \times (8,27 + 0,000258 \cdot T - 187700/T^2) + 0,67 \times (6,50 + 0,00100 \cdot T)$$

Evaluated at  $T_{gk2}$ :

$$(C_p)_{\text{gases de combustión}} = 0,27 \times (10,34 + 0,00274 \cdot 2270,858 - 195500/2270,858^2) + 0,06 \times (8,27 + 0,000258 \cdot 2270,858 - 187700/2270,858^2) + 0,67 \times (6,50 + 0,00100 \cdot 2270,858) = 1370,209 \text{ J/kgK}$$

Todas las variables que han sido calculadas para obtener el valor de  $k_2$ , pueden verse más claramente en la Tabla 18:

Variable	Valor calculado en la condición inicial
<b>hc</b> , coeficiente de transmisión de calor por convección de los gases calientes al sólido= (hc) <sub>medio cte.</sub>	4,526 W/m <sup>2</sup> K
<b>hr</b> , coeficiente de transmisión de calor por radiación de los gases calientes al sólido.	1840,226 W/m <sup>2</sup> K
$\left[ \frac{dA}{dz} \right]$	13,823 m
<u>Cálculo de U</u>	
<b>T<sub>refractario</sub></b>	1997,004 K
<b>k<sub>refractario</sub></b> , conductividad del refractario	1,417 W/mK
<b>T<sub>carcasa</sub></b>	606,445 K
<b>T<sub>virola</sub></b>	1301,724 K
<b>k<sub>virola</sub></b> , conductividad de la virola	29,465 W/mK
<b>hc</b> , coeficiente de transmisión de calor por convección de la carcasa al ambiente	21,408 W/m <sup>2</sup> K
<b>hr</b> , coeficiente de transmisión de calor por radiación de la carcasa al ambiente	23,422 W/m <sup>2</sup> k
<b>U</b> , coeficiente global de transmisión de calor	4,448 W/m <sup>2</sup> k
<b>Wg</b> , caudal másico de los gases	6,322 kg/s
<b>Cp</b> , calor específico de los gases	1370,209 J/kgK

**Tabla 18.**

Sustituyendo los valores en la ecuación diferencial obtendremos el valor de k2:

$$k_2 = \frac{dT_{g_{k_2}}}{dz_{k_2}} = \left| \frac{(hc + hr) \cdot m \cdot (T_{g_{k_2}} - T_s) + (dA/dz) \cdot U \cdot (T_p - T_{ext})}{Wg \cdot Cpg} \right|_{k_2} =$$

$$= \frac{(4,526 + 1840,226) \times 3,788 \times (2270,858 - 1723,15) + 13,823 \times 4,448 \times (1997,004 - 298,15)}{6,322 \times 1370,209} =$$

$$= 453,731 \text{ K/m.}$$

**$K_2 = 453,731 \text{ K/m}$**

### 3.2.4.3. CÁLCULO DE $k_3$ EN LA CONDICIÓN INICIAL

Según el algoritmo de Kutta:

$$K_3 = f(x_i + 1/2 \cdot h, y_i - 1/2 h \cdot k_2)$$

$$f(x_i + 1/2 \cdot h, y_i - 1/2 h \cdot k_2) = f[(z + 1/2 \cdot h), (T_g - 1/2 h \cdot k_2)] =$$

$$= \frac{dT_{k_3}}{dz_{k_3}} = \frac{d(T_g - 1/2 h \cdot k_2)}{d(z + 1/2 \cdot h)} = \left| \frac{(hc + hr) \cdot m \cdot (T_{g_{k_3}} - T_s) + (dA/dz) \cdot U \cdot (T_p - T_{ext})}{Wg \cdot C_{pg}} \right|_{k_3}$$

Calculamos todas las variables a:

$$T_{k_3} = T_g - 1/2 h \cdot k_2 = 2273,15 - 1/2 \times 0,1 \times 453,731 = 2270,881 \text{ K}$$

$$Z_{k_3} = z + 1/2 \cdot h = 0 + 1/2 \times 0,1 = 0,05 \text{ m}$$

Se determinará el valor de todas las variables que dependen de la temperatura, a la  $T_{gas,k_3} = 2270,881 \text{ K}$  y las que dependan de la longitud del horno, a  $z_{k_3} = 0,05 \text{ m}$ .

Para el cálculo de todas las variables de las que depende  $k_3$  se realiza el mismo procedimiento que el utilizado para el cálculo de  $k_2$ . El valor obtenido de todas las variables puede verse en la Tabla 19:

Variable	Valor calculado en la condición inicial
<b>hc</b> , coeficiente de transmisión de calor por convección de los gases calientes al sólido= (hc) <sub>medio cte.</sub>	4,526 W/m <sup>2</sup> K
<b>hr</b> , coeficiente de transmisión de calor por radiación de los gases calientes al sólido.	1840,260 W/m <sup>2</sup> K
$\left[ \frac{dA}{dz} \right]$	13,823 m
<i>Cálculo de U</i>	
<b>T<sub>refractario</sub></b>	1997,015 K
<b>k<sub>refractario</sub></b> , conductividad del refractario	1,417 W/mK
<b>T<sub>carcasa</sub></b>	606,445 K
<b>T<sub>virola</sub></b>	1301,730 K
<b>k<sub>virola</sub></b> , conductividad de la virola	29,465 W/mK
<b>hc</b> , coeficiente de transmisión de calor por convección de la carcasa al ambiente	21,408 W/m <sup>2</sup> K
<b>hr</b> , coeficiente de transmisión de calor por radiación de la carcasa al ambiente	23,422 W/m <sup>2</sup> k
<b>U</b> , coeficiente global de transmisión de calor	4,448 W/m <sup>2</sup> k
<b>Wg</b> , caudal másico de los gases	6,322 kg/s
<b>Cp</b> , calor específico de los gases	1370,213 J/kgK

*Tabla 19.*

Sustituyendo los valores en la ecuación diferencial obtendremos el valor de k3:

$$K3 = \frac{dT_{g_{k3}}}{dz_{k3}} = \left| \frac{(hc + hr) \cdot m \cdot (T_{g_{k3}} - T_s) + (dA/dz) \cdot U \cdot (T_p - T_{ext})}{Wg \cdot Cpg} \right|_{k3} =$$

$$= \frac{(4,526 + 1840,260) \times 3,788 \times (2270,881 - 1723,15) + 13,823 \times 4,448 \times (1997,015 - 298,15)}{6,322 \times 1370,213} =$$

$$= 453,761 \text{ K/m.}$$

$$K_3 = 453,761 \text{ K/m}$$

#### 3.2.4.4. CÁLCULO DE $k_4$ EN LA CONDICIÓN INICIAL

Según el algoritmo de Runge-Kutta:

$$K_4 = f(x_i + h, y_i - h \cdot k_3)$$

$$f(x_i + h, y_i - h \cdot k_3) = f[(z + h), (T_i - h \cdot k_3)] =$$

$$= \frac{dT_{k4}}{dz_{k4}} = \frac{d(T_g - h \cdot k_3)}{d(z + h)} = \left| \frac{(hc + hr) \cdot m \cdot (T_{g_{k4}} - T_s) + (dA/dz) \cdot U \cdot (T_p - T_{ext})}{W_g \cdot C_{pg}} \right|_{k4}$$

Calculamos todas las variables a:

$$T_{k4} = T_g - h \cdot k_3 = 2273,15 - 0,1 \times 453,761 = 2268,612 \text{ K}$$

$$Z_{k4} = z + h = 0 + 0,1 = 0,1 \text{ m}$$

Se calculará el valor de todas las variables que dependen de la temperatura, a la  $T_{gas,k4} = 2268,612 \text{ K}$  y las que dependan de la longitud del horno, a  $z_{k4} = 0,1 \text{ m}$ .

Para el cálculo de todas las variables de las que depende  $k_4$ , se realiza el mismo procedimiento que el utilizado para el cálculo de  $k_2$ .

Todas las variables que han sido calculadas para obtener el valor de  $k_4$ , pueden verse en la Tabla 20:

Variable	Valor calculado en la condición inicial
<b>hc</b> , coeficiente de transmisión de calor por convección de los gases calientes al sólido= $(hc)_{medio}$ cte.	4,526 W/m <sup>2</sup> K
<b>hr</b> , coeficiente de transmisión de calor por radiación de los gases calientes al sólido.	1836,883 W/m <sup>2</sup> K
$\left[ \frac{dA}{dz} \right]$	13,823 m
<i>Cálculo de U</i>	
<b>T<sub>refractario</sub></b>	1995,881 K
<b>k<sub>refractario</sub></b> , conductividad del refractario	1,419 W/mK
<b>T<sub>carcasa</sub></b>	606,320 K
<b>T<sub>virola</sub></b>	1301,100 K
<b>k<sub>virola</sub></b> , conductividad de la virola	29,471 W/mK
<b>hc</b> , coeficiente de transmisión de calor por convección de la carcasa al ambiente	21,405 W/m <sup>2</sup> K
<b>hr</b> , coeficiente de transmisión de calor por radiación de la carcasa al ambiente	23,411 W/m <sup>2</sup> k
<b>U</b> , coeficiente global de transmisión de calor	4,454 W/m <sup>2</sup> k
<b>Wg</b> , caudal másico de los gases	6,328 kg/s
<b>Cp</b> , calor específico de los gases	1369,849 J/kgK

**Tabla 20.**

Sustituyendo los valores en la ecuación diferencial obtendremos el valor de  $k_4$ :

$$K_4 = \frac{dT_{g_{k4}}}{dz_{k4}} = \left| \frac{(hc + hr) \cdot m \cdot (T_{g_{k4}} - T_s) + (dA/dz) \cdot U \cdot (T_p - T_{ext})}{W_g \cdot C_{pg}} \right|_{k4} =$$
$$= \frac{(4,526 + 1836,883) \times 3,788 \times (2268,612 - 1723,15) + 13,823 \times 4,454 \times (1995,881 - 298,15)}{6,328 \times 1369,849} =$$

=458,100 K/m.

$$K_4 = 458,100 \text{ K/m}$$

#### 3.2.4.5. CÁLCULO DE LA TEMPERATURA DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN EN $z=0,1 \text{ m}$

Una vez calculados los coeficientes de Runge-Kutta:  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ , y  $k_4$  ó valores aproximados de la derivada calculados en el intervalo  $0 \leq x \leq 0,1 \text{ m}$  (*condición inicial*), podemos calcular valor de  $y_{i+1} = T_{gases, z=0,1 \text{ m}}$ :

$$y_{i+1} = y_i - \frac{h}{6} \cdot (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) =$$
$$= 2273,15 - 0,1/6 \times (458,284 + 2 \cdot 453,731 + 2 \cdot 453,761 + 458,100) = 2268,597 \text{ K}$$

$$T_{gases +1} = T_{0,1 \text{ m}} = 2268,597 \text{ K}$$

### 3.3. MÉTODO MATEMÁTICO ITERATIVO

El cálculo de los coeficientes de Kutta:  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ , y  $k_4$ ; tanto para la primera ecuación diferencial, que mostraba el comportamiento de la temperatura del sólido con la longitud del horno, como en la segunda, que mostraba de igual modo el comportamiento de los gases de combustión con la longitud del horno, han permitido calcular las temperaturas del sólido y de los gases de combustión en el intervalo posterior, es decir en  $z=0,1$  m.

Estas nuevas  $T_{\text{sólido}}$  y  $T_{\text{gases}}$  constituyen las condiciones de partida del nuevo intervalo, es decir, constituyen la  $T_{\text{sólido}}$  y  $T_{\text{gases}}$  para  $z=0,1$  m con las que recalculemos el valor de ambas en el intervalo próximo.

De este modo, y mediante un método continuo de iteración, se puede proceder para el cálculo de la temperatura del sólido y de los gases para cada uno de los intervalos en que se ha dividido el horno rotatorio: 0,2 m, 0,3 m, 0,4 m... Este procedimiento requiere calcular necesariamente, en cada intervalo, el valor de cada una de las variables dependientes de la temperatura del sólido y de los gases de combustión.

Evidentemente, mostrar la resolución analítica de cada intervalo en este proyecto es inviable. Por ello, para realizar este tedioso cálculo en cada uno de los intervalos, se ha utilizado una *hoja de cálculo*. (*Ver información en soporte informático adjunto a este proyecto*), cuyos resultados se adjuntan en el *Anexo de la Memoria de Cálculo*.

La hoja de cálculo permite, una vez configuradas todas las expresiones, estimaciones y fórmulas para el primer intervalo en la primera fila, iterar para el próximo intervalo, mostrando toda la información en la fila siguiente.

Así sucesivamente, el sistema se va resolviendo introduciendo los valores obtenidos para la  $T_{\text{sólido}}$  y  $T_{\text{gases}}$  de una fila, como premisas de partida para la fila siguiente.



3.3.1.2. SEGUNDA ECUACIÓN DIFERENCIAL.

Del mismo modo que para la primera ecuación diferencial, la última columna junto a k4, encabezada con el título  $(T_{gases})_{i+1}$ , muestra la temperatura de los gases obtenida para el siguiente intervalo. Este valor está vinculado en la celda  $(T_{gases})$  del intervalo posterior:

z comb	$Q_m=Q_v^*p$	K4	$(T_{gases})_{i+1}$
64642	6,32880624	458,10066	2268,597712
12788	6,34137778	452,7165581	2264,0991
58223	6,35385143	447,4375149	2259,653112
00987	6,36622864	442,2606209	2255,258725
41118	6,37851078	437,1830781	2250,914947
78655	6,39069925	432,2021877	2246,620808
13635	6,40279536	427,3158451	2242,375368
46094	6,41480045	422,5200365	2238,177712
76067	6,42671577	417,8138346	2234,026947
03589	6,4385426	413,1941953	2229,922206
28694	6,45028215	408,659454	2225,862643
51416	6,46193562	404,2068223	2221,847436
71786	6,47350419	399,8343849	2217,875782
89837	6,48498901	395,5400989	2213,9469
05599	6,49639119	391,3219803	2210,060029
19104	6,50771185	387,1781221	2206,214475

CONDICIÓN INICIAL			
$T_{sólido}=1450^\circ \text{C}=1723,15 \text{ K}$			
$T_{gases}=2000^\circ \text{C}=2273,15 \text{ K}$			
$z=0 \text{ m}$			
z	$T_g$	$T_s$	hr
0	2273,15	1723,15	1843,64146
0,1	2268,597712	1722,1409	1835,61080
0,2	2264,0991	1721,14373	1827,69948
0,3	2259,653112	1720,158252	1819,90474
0,4	2255,258725	1719,184236	1812,22392
0,5	2250,914947	1718,221461	1804,65441
0,6	2246,620808	1717,269707	1797,19371
0,7	2242,375368	1716,328765	1789,83939
0,8	2238,177712	1715,39843	1782,58908
0,9	2234,026947	1714,478502	1775,44051
1	2229,922206	1713,568786	1768,39144
1,1	2225,862643	1712,669094	1761,43973
1,2	2221,847436	1711,779243	1754,58328
1,3	2217,875782	1710,899052	1747,8200
1,4	2213,9469	1710,028348	1741,14813
1,5	2210,060029	1709,166961	1734,56554

### 3.3.2. CÁLCULO DE LA LONGITUD DE CALENTAMIENTO

La longitud de calentamiento del horno rotatorio se determinará repitiendo el protocolo anterior hasta que se alcance la *condición final* impuesta para el método matemático. Esta *condición final*, se corresponde con la zona de entrada de sólido en el horno, donde la temperatura del sólido es de 1315° C = 1588,15 K. (Ver apartado 3.1 .*Definición de las condiciones iniciales y finales para la resolución del modelo*).

z	T <sub>g</sub>	T <sub>s</sub>	h <sub>r</sub>	C <sub>p</sub> , sólido	kl	T
53,1	1648,703979	1588,810202	962,3581133	1001,492227	5,11531086	1588
53,2	1648,402437	1588,75907	962,0409735	1001,528227	5,09207038	1588
53,3	1648,101851	1588,708171	961,7249811	1001,564059	5,06891421	1588
53,4	1647,802218	1588,657503	961,4101312	1001,599723	5,04584196	1588
53,5	1647,503533	1588,607066	961,0964192	1001,635522	5,02285319	1588
53,6	1647,205794	1588,556859	960,7838403	1001,670551	4,9999475	1588
53,7	1646,908996	1588,50688	960,4723899	1001,705716	4,97712449	1588
53,8	1646,613136	1588,45713	960,1620632	1001,740716	4,95438373	1588
53,9	1646,318212	1588,407607	959,8528558	1001,775552	4,93172484	1588
54	1646,024218	1588,35831	959,544763	1001,810224	4,9091474	1588
54,1	1645,731153	1588,30924	959,2377801	1001,844733	4,88665102	1588
54,2	1645,439011	1588,260394	958,9317969	1001,879242	4,86414727	1588
54,3	1645,147791	1588,211772	958,6258137	1001,913811	4,84164352	1588
54,4	1644,857489	1588,163373	958,3208345	1001,94838	4,81913977	1588
54,5	1644,568101	1588,115197	958,0158553	1001,982949	4,79663602	1588
54,6	1644,279624	1588,067242	957,7108761	1002,017518	4,77413227	1588
54,7	1643,992054	1588,019509	957,4058969	1002,052087	4,75162852	1588
54,8	1643,705389	1587,971995	957,1009177	1002,086656	4,72912477	1588
54,9	1643,419625	1587,924701	956,7959385	1002,121225	4,70662102	1588
55	1643,134759	1587,877625	956,4909593	1002,155794	4,68411727	1588

**CONDICIÓN FINAL**  
**TSÓL= 1315° C= 1588,15 K**  
**z= 54,45 m**

**La longitud de calentamiento del horno rotatorio** sujeto a las condiciones de operación citadas en el *Capítulo I de la Memoria Descriptiva, apartado 2. Justificación del proyecto*, es de 54,45 m  $\approx$  **55 metros**.

### 3.3.3. CÁLCULO DE LA LONGITUD DE ENFRIAMIENTO

La longitud de enfriamiento del horno rotatorio, se calculará haciendo uso de la Fig.2, donde se representan los perfiles de temperatura para el sólido y los gases de combustión en el interior del horno.

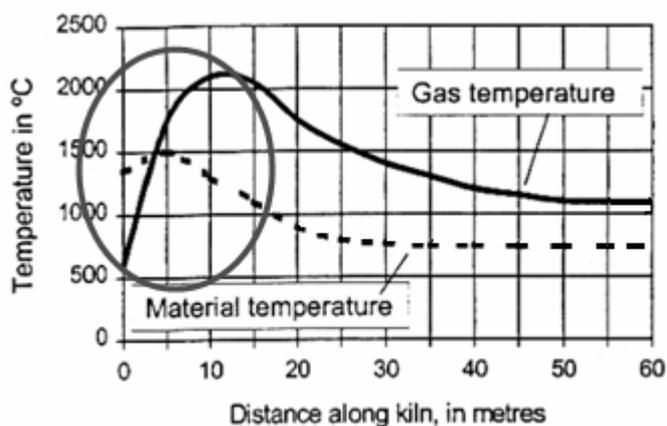


Fig 2. Comportamiento de las curvas de temperatura del sólido y de los gases de combustión con la longitud del horno. (Gráfica facilitada por Holcim).

La zona de enfriamiento (rodeada con un círculo) abarca desde el extremo del horno en contacto con el enfriador, hasta el punto en el que la curva de los gases de combustión alcanza el punto máximo de temperatura (debido a que es la zona del inicio de la llama).

Como puede observarse en la gráfica, la zona de enfriamiento tiene una longitud de unos 12 metros aproximadamente. Por lo tanto, se considera que la **longitud de enfriamiento del horno rotatorio** sujeto a las condiciones de operación citadas en el *Capítulo I de la Memoria Descriptiva, apartado 2. Justificación del proyecto*, es de **12 metros**.

### **3.3.4. CÁLCULO DE LA LONGITUD TOTAL DEL HORNO ROTATORIO**

Una vez conocidas las longitudes correspondientes a las zonas de calentamiento y enfriamiento, puede calcularse la longitud total del horno rotatorio.

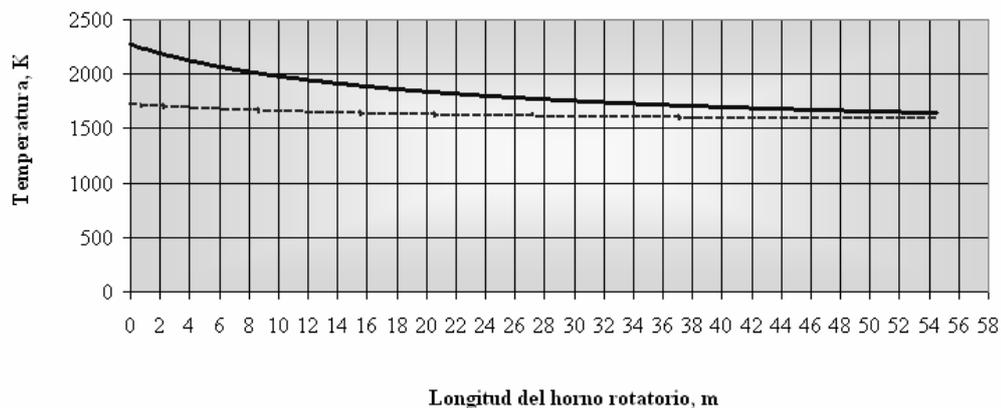
- ✓ **La longitud de calentamiento: 55 metros.**
- ✓ **longitud de enfriamiento: 12 metros.**

**La longitud total del horno rotatorio** sujeto a las condiciones de operación citadas en el *Capítulo I de la Memoria Descriptiva, apartado 2. Justificación del proyecto*, es de **67 metros.**

## 4. EVOLUCIÓN DE LAS TEMPERATURAS DEL SÓLIDO Y DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN EN EL INTERIOR DEL HORNO ROTATORIO

Representando gráficamente los valores obtenidos para la temperatura del sólido y de los gases en cada intervalo con la longitud del horno, puede observarse la evolución de las  $T_{\text{sólido}}$  y  $T_{\text{gases}}$  en el interior del mismo.

Perfiles de temperaturas del sólido y de los gases de combustión a lo largo del horno rotatorio



- Evolución de la  $T_{\text{gases}}$  en el interior del horno rotatorio.
- - - Evolución de la  $T_{\text{sólido}}$  en el interior del horno rotatorio.

El comportamiento de ambas curvas en la zona de calentamiento es similar al comportamiento que muestran dichas curvas en la gráfica de la Fig.2 (ver página 103) en la misma zona.

Es decir, las temperaturas del sólido y de los gases de combustión decrecen progresivamente desde el quemador, donde el sólido se encuentra a  $1450^{\circ}\text{C}$  y los gases se encuentran a la temperatura de la llama de  $2000^{\circ}\text{C}$ , hasta la zona de alimentación del horno, donde el sólido se encuentra a  $1315^{\circ}\text{C}$  y los gases a  $1500^{\circ}\text{C}$ .

Longitud del horno, m	Temperatura de la carcasa, K
1	421,15
2	417,15
3	453,15
4	430,15
5	404,15
6	399,15
7	404,15
8	415,15
9	413,15
10	417,15
11	427,15
12	440,15
13	440,15
14	440,15
15	455,15
16	487,15
17	526,15
18	555,15
19	543,15
20	545,15
21	547,15
22	556,15
23	558,15
24	533,15
25	549,15
26	567,15
27	555,15
28	540,15
29	569,15
30	499,15
31	529,15
32	514,15
33	506,15
34	514,15
35	540,15
36	519,15

37	495,15
38	506,15
39	520,15
40	493,15
41	484,15
42	498,15
43	492,15
44	493,15
45	556,15
46	524,15
47	469,15
48	469,15
49	492,15
50	489,15
51	499,15
52	471,15
53	431,15
54	427,15
55	466,15
56	415,15
57	417,15
58	471,15
59	518,15
60	504,15
61	461,15
62	452,15
63	452,15
64	456,15
65	459,15
66	453,15
67	442,15
68	408,15
69	431,15
70	448,15

*Tabla 11. Temperatura de la carcasa externa a cada metro del horno rotatorio de Holcim.*













































## ÍNDICE DEL PLIEGO DE CONDICIONES GENERALES

<b>CAPÍTULO I. DISPOSICIONES GENERALES</b>	pág.1
1. OBJETO DEL PLIEGO	pág.1.
2. PROYECTO	pág.1.
<b>CAPÍTULO II. ADJUDICACIÓN</b>	pág.3.
1. CONCURSO	pág.3.
2. RETIRADA DE DOCUMENTACIÓN DE CONCURSO	pág.3.
3. CONDICIONES LEGALES QUE DEBE REUNIR EL CONTRATISTA PARA PODER OFERTAR	pág.4.
3.1. CAPACIDAD PARA CONCURRIR	pág.4.
3.2. DOCUMENTACIÓN JUSTIFICATIVA PARA LA ADMISIÓN PREVIA	pág.4.
4. PRESENTACIÓN DE LAS OFERTAS	pág.5.
5. GARANTÍA DE MANTENIMIENTO DE LA OFERTA	pág.7.
6. VALIDEZ DE LAS OFERTAS	pág.9.
7. ACLARACIONES A LOS LICITADORES	pág.9.
8. ALCANCE DE LAS ACLARACIONES	pág.9.
9. CONTRAINDICACIONES Y OMISIONES EN LA DOCUMENTACIÓN	pág.10.
10. PLANOS PROVISIONALES Y DEFINITIVOS	pág.10
11. PRESENTACIONES DEFECTUOSAS DE LAS OFERTAS	pág.11.
12. ADJUDICACIÓN DEL CONCURSO	pág.11.
13. DEVOLUCIÓN DE LA DOCUMENTACIÓN	pág.12.
<b>CAPÍTULO III. EL CONTRATO</b>	pág.13.
1. EL CONTRATO	pág.13.
2. DOCUMENTACIÓN DEL CONTRATO	pág.14.
3. FORMALIZACIÓN DEL CONTRATO	pág.14.
4. GASTOS E IMPUESTOS	pág.14.
5. FIANZAS PROVISIONAL, DEFINITIVA Y FONDO DE GARANTÍA	pág.15.
5.1. FIANZA PROVISIONAL	pág.15.
5.2. FIANZA DEFINITIVA	pág.15.

---

5.3. FONDO DE GARANTÍA	pág.16.
6. APROBACIÓN Y VIGENCIA DEL CONTRATO	pág.16.
7. INCOMPARECENCIA DEL CONTRATISTA	pág.16.
8. CESIÓN DEL CONTRATO	pág.17.
9. ASOCIACIÓN DE CONTRATISTAS	pág.18.
10. SUBCONTRATISTAS	pág.19.
11. RELACIONES ENTRE EL PROMOTOR Y CONTRATISTA Y ENTRE LOS DIVERSOS CONTRATISTAS Y SUBCONTRATISTAS	pág.19.
12. DOMICILIOS Y REPRESENTACIONES	pág.20.
<b>CAPÍTULO IV. OBLIGACIONES DEL CONTRATISTA</b>	pág.22.
1. OBLIGACIONES CONTABLES	pág.22.
2. CUMPLIMIENTO DE LA LEGISLACIÓN LABORAL Y DE SEGURIDAD	pág.22.
3. SEGUROS	pág.23.
4. COBERTURAS A TOMAR	pág.24.
5. OBLIGACIONES EN MATERIA DE SEGURIDAD	pág.24.
6. SUSTITUCIÓN DEL PERSONAL	pág.27.
6.1. A SOLICITUD DEL PROMOTOR	pág.27.
6.1. A SOLICITUD DEL CONTRATISTA	pág.27.
7. RESCISIÓN DEL CONTRATO	pág.28.
<b>CAPÍTULO V. CONDICIONES ECONÓMICAS Y LEGALES</b>	pág.31.
1. GASTOS DE CARÁCTER GENERAL POR CUENTA DEL CONTRATISTA	pág.31.
2. GASTOS DE CARÁCTER GENERAL POR CUENTA DEL PROMOTOR	pág.32.
3. INDEMNIZACIONES POR CUENTA DEL CONTRATISTA	pág.32.
4. PARTIDAS PARA TAREAS ACCESORIAS	pág.32.
5. PARTIDAS ALZADAS	pág.33.
6. REVISIONES DE PRECIOS	pág.33.
7. RÉGIMEN DE INTERVENCIÓN	pág.34.
8. INFORMES	pág.35.
9. REVISIÓN DE INFORMES	pág.36.
10. CERTIFICACIÓN DE LAS PRESTACIONES	pág.36.
11. CONFECCIÓN DE LAS FACTURAS DE PAGO	pág.36.
12. PAGO DE LOS CERTIFICADOS	pág.37.
13. PROPIEDAD INDUSTRIAL, COMERCIAL E INTELECTUAL	pág.37.

---

14. TRIBUNALES	pág.38.
----------------	---------

<b>CAPÍTULO VI DESARROLLO DE LAS TAREAS, CONDICIONES TÉCNICO-ECONÓMICAS</b>	pág.39.
---	---------

1. MODIFICACIONES DEL PROYECTO	pág.39.
2. MODIFICACIONES DE LOS PLANOS	pág.40.
3. EMPLEO DE MATERIALES NUEVOS PERTENECIENTES AL PROMOTOR	pág.41.
4. USO ANTICIPADO DEL EQUIPO O COMPONENTES	pág.41.
5. PLAN DE TRABAJO Y MONTAJE	pág.42.
6. PLAZOS DE EJECUCIÓN	pág.43.
7. RETENCIONES POR RETRASOS DURANTE LA EJECUCIÓN DE TRABAJOS	pág.44.
8. INCUMPLIMIENTO DE LOS PLAZOS Y MULTAS	pág.44.
9. SUPRESIÓN DE LAS MULTAS	pág.45.
10. PROCEDIMIENTO PARA LA APLICACIÓN DE MULTAS	pág.45.
11. PREMIOS Y PRIMAS	pág.46.
12. RETRASOS OCASIONADOS POR EL PROMOTOR	pág.47.
13. DAÑOS Y AMPLIACIÓN DE PLAZO EN CASO DE FUERA MAYOR	pág.47.
14. MEDICIONES DE LAS TAREAS EJECUTADAS	pág.48.
15. CERTIFICACIÓN Y ABONOS DE LAS TAREAS	pág.49.
16. ABONO DE UNIDADES INCOMPLETAS O DEFECTUOSAS	pág.51.
17. INFORME FINAL	pág.52.
18. ACTA DE FINALIZACIÓN DE LAS PRESTACIONES	pág.52.
19. RECEPCIÓN PROVISIONAL DE LOS EQUIPOS	pág.53.
20. PLAZO DE GARANTÍA	pág.54.
21. RECEPCIÓN DEFINITIVA DE LOS EQUIPOS	pág.54.
22. LIQUIDACIÓN	pág.55.

---

## **CAPÍTULO I: DISPOSICIONES GENERALES**

### **1. OBJETO DEL PLIEGO**

El presente Pliego de Condiciones Generales tiene por objeto la ordenación, con carácter general, de las condiciones facultativas y económicas que han de regir en los concursos y contratos destinados a la ejecución de los trabajos del presente proyecto que lleva por título: “Dimensionamiento de un horno rotatorio para la producción de clínker de cemento Portland”.

El Contratista Adjudicatario se compromete a aceptar íntegramente todas y cada una de las cláusulas del presente Pliego de Condiciones Generales, a excepción de aquellas que expresamente queden anuladas o modificadas en el Pliego de Condiciones Particulares.

### **2. PROYECTO**

El Proyecto comprende los siguientes documentos:

- 1) Una Memoria que considerará las necesidades a satisfacer y los factores de carácter general a tener en cuenta.
- 2) Los Planos de conjunto y detalle necesarios para que las tareas queden perfectamente definidas.
- 3) Los diferentes cuadros de precios que conforman el presupuesto.

- 4) El Pliego de Condiciones Particulares, que incluirá la descripción de las tareas, especificaciones de los materiales y elementos constitutivos y normas para la ejecución de las tareas, las condiciones de este Pliego Particular serán preceptivas y prevalecerán sobre las del Pliego General en tanto las modifiquen o contradigan.
  
- 5) Además de los documentos integrantes del Proyecto indicados en el Artículo anterior, y del presente Pliego General, serán preceptivas las Normas Oficiales que se especifiquen en el Pliego de Condiciones Particulares.

## **CAPÍTULO II: ADJUDICACIÓN**

### **1. CONCURSO**

La licitación de la obra se hará por Concurso Restringido, en el que el promotor convocará a las Empresas Contratistas que estime oportuno.

Los concursantes enviarán sus ofertas por triplicado, en sobre cerrado y lacrado, según se indique en la carta de petición de ofertas, a la dirección que indique el Promotor.

No se considerarán válidas las ofertas presentadas que no cumplan los requisitos citados anteriormente, así como los indicados en la Documentación Técnica enviada.

### **2. RETIRADA DE DOCUMENTACIÓN DE CONCURSO**

Los Contratistas, por sí mismos o a través de sus representantes, podrán retirar dicha documentación de las oficinas del Promotor cuando ésta no les hubiese sido enviada previamente.

El Promotor se reserva el derecho de exigir para la retirada de la documentación, un depósito que será reintegrado en su totalidad a los Contratistas que no hubiesen resultado adjudicatarios de la obra, previa devolución de dicha documentación.

### **3. CONDICIONES LEGALES QUE DEBE REUNIR EL CONTRATISTA PARA PODER OFERTAR**

#### **3.1. CAPACIDAD PARA CONCURRIR**

Las personas naturales o jurídicas, nacionales o extranjeras que se hallen en plena posesión de su capacidad jurídica y de obrar.

No obstante, serán de aplicación a las Empresas extranjeras las normas de ordenación de la industria y las que regulen las inversiones de capital extranjero, así como las que dicte el Gobierno sobre concurrencia de dichas empresas, antes de la licitación de estas obras.

#### **3.2. DOCUMENTACIÓN JUSTIFICATIVA PARA LA ADMISIÓN PREVIA**

- 3.2.1.** Documento oficial o testimonio notarial del mismo que acredite la personalidad del solicitante.
- 3.2.2.** Documento notarial justificativo de la representación ostentada por el firmante de la propuesta, así como documento oficial acreditativo de su personalidad.
- 3.2.3.** Documento que justifique haber constituido la fianza provisional en las formas que se determinan en el apartado 2.6. del Pliego de Condiciones Generales.
- 3.2.4.** Documento acreditativo de que el interesado está al corriente en el pago del impuesto industrial en su modalidad de cuota fija o de Licencia Fiscal, (o compromiso, en su caso, de su matriculación en éste, si resultase adjudicatario de las obras).

- 3.2.5.** Documento oficial acreditativo de hallarse al corriente de pago de las cuotas de la Seguridad Social y, concretamente, el de cobertura de riesgo de accidentes de trabajo.

#### **4. PRESENTACIÓN DE LAS OFERTAS**

Las Empresas que oferten en el Concurso presentarán obligatoriamente los siguientes documentos en original y dos copias:

- 4.1.** Cuadro de Precios N° 1, consignando en letra y cifra los precios unitarios asignados a cada tarea cuya definición figura en dicho cuadro. Estos precios deberán incluir el % de Gastos Generales, Beneficio Industrial y el IVA que facturarán independientemente. En caso de no coincidir las cantidades expresadas en letra y cifra, se considerará como válida la primera. En el caso de que existiese discrepancia entre los precios unitarios de los Cuadros de Precios Números 1 y 2, prevalecerá el del Cuadro N° 1.
- 4.2.** Cuadro de Precios N° 2, en el que se especificará claramente el desglose de la forma siguiente:
- 4.2.1.** Mano de obra por categorías, expresando el número de horas invertido por categoría y precio horario.
- 4.2.1.1** Materiales, expresando la cantidad que se precise de cada uno de ellos y su precio unitario.
- 4.1.1.2.** Maquinaria y medios auxiliares, indicando tipo de máquina, número de horas invertido por máquina y precio horario.
- 4.1.1.3.** Transporte, indicando en las unidades que lo precisen el precio por peso y kilómetro.

- 4.1.1.4. Varios y resto de tareas que incluirán las partidas directas no comprendidas en los apartados anteriores.
- 4.1.1.5. Porcentajes de Gastos Generales, Beneficios Industrial e IVA.
- 4.1.2.** Presupuesto de ejecución Material, obtenido al aplicar los precios unitarios a las mediciones del Proyecto. En caso de discrepancia entre los precios aplicados en el Presupuesto y los del Cuadro de Precios N° 1, obligarán los de este último.
- 4.1.3.** Presupuesto Total, obtenido al incrementar el Presupuesto de ejecución Material en sus dos apartados con el % de IVA.
- 4.1.4.** Relación del personal técnico adscrito a la ejecución y organigrama general del mismo durante el desarrollo de las tareas.
- 4.1.5.** Relación de maquinaria adscrita a la obra, expresando tipo de máquina, características técnicas fundamentales, años de uso de la máquina y estado general; asimismo relación de máquinas de nueva adquisición que se asignarán a la obra en de resultar adjudicatario. Cualquier sustitución posterior de la misma debe ser aprobada por el Promotor. Deberá incluirse asimismo un plan de permanencia de toda la maquinaria en obra.
- 4.1.6.** Baremos horarios de mano de obra por categorías y de maquinaria para trabajos por administración. Estos precios horarios incluirán el % de Gastos Generales y Beneficio Industrial y el IVA que facturarán independientemente.

- 4.1.7.** Plan de obra detallado, en el que se desarrollarán en el tiempo los distintos trabajos a ejecutar, haciendo mención de los rendimientos medios a obtener.
- 4.1.8.** Las propuestas económicas y documentación complementaria deberán venir firmadas por el representante legal o apoderado del ofertante quien, a petición del Promotor, deberá probar este extremo con la presentación del correspondiente poder acreditativo.
- 4.1.9.** Además de la documentación reseñada anteriormente y que el Contratista deberá presentar con carácter obligatorio, el Promotor podrá exigir en cada caso, cualquier otro tipo de documentación, como pueden ser referencias, relación de tareas ejecutadas, balances de la sociedad, etc.

## **5. GARANTÍA DE MANTENIMIENTO DE LA OFERTA**

Para afianzar el mantenimiento de la oferta, cada licitador presentará una Garantía. La garantía deberá tener vigencia y validez durante 90 días.

La garantía será constituida a favor del Promotor, en cualquiera de las siguientes formas:

- 5.1.** Dinero en efectivo, mediante depósito en euros en la cuenta que oportunamente indique el Promotor, o mediante la entrega de un certificado de depósito a plazo fijo a noventa (90) días renovables automáticamente, extendido a nombre del Promotor. Los intereses sobre la garantía constituida, en este caso, formarán parte de la misma.
- 5.2.** Fianza bancaria de entidad autorizada por el Banco Central de España, pagadera incondicionalmente al primer requerimiento del Promotor, mediante el

correspondiente documento afianzando al licitador, emitido en carácter de fiador liso y llano y principal pagador con renuncia a los beneficios de división y exclusión y a toda interpelación previa al deudor principal.

**5.3. Póliza de seguro, extendida por entidad aseguradora de reconocida solvencia.**

En el caso de las formas previstas en los numerales 5.2 ó 5.3, el texto de la fianza o del seguro deberá indicar la identificación del presente concurso, el beneficiario del seguro (Promotor) y el plazo de duración, el que en ningún caso será inferior al período de noventa (90) días.

Sin perjuicio de lo anterior, la fianza y/o el seguro se deberán cumplimentar en las condiciones especificadas, incorporando a tal fin en el texto de la póliza, la fórmula expresada en el citado dispositivo normativo.

Las garantías de mantenimiento de oferta deberán ser otorgadas a entera satisfacción del Promotor, que deberá prestar conformidad con el texto, con los documentos que las instrumenten y con las instituciones y personas que las otorguen.

En el caso de que las garantías no hayan sido presentadas o constituidas a satisfacción (y siempre que no se trate de deficiencias insalvables y que constituyan causal de rechazo de la oferta), el Promotor queda facultado para solicitar su sustitución o modificación, inclusive para rechazar al fiador o asegurador presentado. En caso de producirse tal supuesto, y a simple requerimiento del Promotor, el licitador deberá presentar una nueva garantía, dentro del término de setenta y dos (72) horas.

La garantía de mantenimiento de oferta del licitador que no resulte adjudicatario, será devuelta a partir de los diez (10) días posteriores a la notificación de aprobación del contrato, previa presentación de una solicitud por escrito en tal sentido por parte del interesado.

## **6. VALIDEZ DE LAS OFERTAS**

No se considerará válida ninguna oferta que se presente fuera del plazo señalado en la carta de invitación, o anuncio respectivo, o que no conste de todos los documentos que se señalan en el apartado 4.

Los concursantes se obligan a mantener la validez de sus ofertas durante un periodo mínimo de 90 días a partir de la fecha tope de recepción de ofertas, salvo que en la documentación de petición de ofertas se especifique otro plazo.

## **7. ACLARACIONES A LOS LICITADORES**

Antes de transcurrido la mitad del plazo estipulado en las bases del Concurso, los Contratistas participantes podrán solicitar por escrito al Promotor las oportunas aclaraciones, en el caso de encontrar discrepancias, errores u omisiones en los Planos, Pliegos de Condiciones o en otros documentos de Concurso, o si se les presentasen dudas en cuanto a su significado.

El Promotor estudiará las peticiones de aclaración e información recibidas y las contestará mediante una nota que remitirá a todos los presuntos licitadores.

Si la importancia de la consulta así lo aconsejara, el Promotor podrá prorrogar el plazo de presentación de ofertas, comunicándolo así a todos los interesados.

## **8. ALCANCE DE LAS ACLARACIONES**

La totalidad de las aclaraciones emitidas en virtud de lo establecido en el artículo precedente, pasarán a formar parte integrante del pliego. No se admitirán reclamos o acciones de índole alguna fundadas en falta de información.

Por otra parte, el solo retiro del pliego implica la aceptación para que el Promotor modifique y/o introduzca agregados y/o efectúe aclaraciones al contenido de los mismos y/o prorrogue los plazos previstos.

Todas las aclaraciones que emita el Promotor serán numeradas en forma correlativa y ordenadas cronológicamente.

## **9. CONTRAINDICACIONES Y OMISIONES EN LA DOCUMENTACIÓN**

Lo mencionado, tanto en el Pliego de Condiciones Generales, como en el particular de cada tarea y omitido en los Planos, o viceversa, habrá de ser ejecutado como si estuviese expuesto en ambos documentos. En caso de contradicción entre los Planos y alguno de los mencionados Pliegos de Condiciones, prevalecerá lo escrito en estos últimos.

Las omisiones en los Planos y Pliegos de Condiciones o las descripciones erróneas de los detalles de las tareas que deban ser subsanadas para que pueda llevarse a cabo el espíritu o intención expuesto en los Planos y Pliegos de Condiciones o que, por uso y costumbres, deben ser realizados, no solo no exime al Contratista de la obligación de ejecutar estos detalles de obra omitidos o erróneamente descritos sino que, deberán ser ejecutados como si se hubiera sido completa y correctamente especificados en los Planos y Pliegos de Condiciones.

## **10. PLANOS PROVISIONALES Y DEFINITIVOS**

Con el fin de poder acelerar los trámites de licitación y adjudicación de las tareas y consecuente iniciación de las mismas, el Promotor, podrá facilitar a los contratistas, para el estudio de su oferta, documentación con carácter provisional. En tal caso, los planos que figuren en dicha documentación no serán válidos para construcción, sino que únicamente tendrán el carácter de informativos y servirán para formar ideas de los elementos que componen los trabajos, así como para obtener las mediciones aproximadas y permitir el estudio de los precios que sirven de base para el presupuesto de la oferta. Este carácter de planos de información se hará constar expresamente y en ningún caso podrán utilizarse dichos planos para la ejecución de ninguna parte de las tareas.

Los planos definitivos se entregarán al Contratista con antelación suficiente a fin de no retrasar la preparación y ejecución de los trabajos.

## **11. PRESENTACIONES DEFECTUOSAS DE LAS OFERTAS**

Si durante el acto de apertura de las ofertas se observara la no inclusión en los mismos, o el no cumplimiento en forma integral de cualquiera de los requisitos establecidos, se dejará la constancia correspondiente. El o los licitadores que hayan incurrido en tal situación deberán cumplimentar la entrega de la documentación omitida u observada (siempre que la misma no constituya una causa taxativa de rechazo de la oferta), dentro de los dos (2) días hábiles siguientes a la clausura del acto, sin necesidad de notificación previa.

El incumplimiento de este requisito en el plazo establecido, será causa de desestimación de la oferta que incurra en tal situación, no teniéndosela en cuenta a los efectos de la adjudicación.

## **12. ADJUDICACIÓN DEL CONCURSO**

El Promotor procederá a la apertura de las propuestas presentadas por los licitadores y las estudiará en todos sus aspectos. El Promotor tendrá alternativamente la facultad de adjudicar el Concurso a la propuesta más ventajosa, sin atender necesariamente al valor económico de la misma, o declarar desierto el concurso. En este último caso, el Promotor podrá libremente suspender definitivamente la licitación de las obras o abrir un nuevo concurso pudiendo introducir las variaciones que estime oportunas, en cuanto al sistema de licitación y relación de Contratistas ofertantes.

Transcurriendo el plazo indicado en el artículo 9 desde la fecha límite de presentación de oferta, sin que el Promotor, hubiese comunicado la resolución del concurso, podrán los licitadores que lo deseen, proceder a retirar sus ofertas, así como las fianzas depositadas como garantía de las mismas.

La elección del adjudicatario de la obra por parte del Promotor es irrevocable y, en ningún caso, podrá ser impugnada por el resto de los contratistas ofertantes.

El Promotor comunicará al ofertante seleccionado la adjudicación de las obras mediante una carta de intención.

En el plazo máximo de un mes a partir de la fecha de esta carta, el Contratista a simple requerimiento del Promotor se prestará a formalizar en contrato definitivo. En tanto no se firme éste y se constituya la fianza definitiva, el Promotor retendrá la fianza provisional depositada por el Contratista.

### **13. DEVOLUCIÓN DE LA DOCUMENTACIÓN**

Los Planos, Pliegos de Condiciones y demás documentación del concurso, entregado por el Promotor a los concursantes, deberá ser devuelto después de la adjudicación del concurso, excepto por lo que respecta al Adjudicatario, que deberá conservarla sin poder reclamar la cantidad abonada por dicha documentación.

El plazo para devolver la documentación será de 30 días, a partir de la notificación a los concursantes de la adjudicación del concurso y su devolución tendrá lugar en las mismas oficinas de donde fue retirada.

El Promotor, a petición de los concursantes no adjudicatarios, devolverá la documentación correspondiente a las ofertas en un plazo de 30 días, a partir de haberse producido dicha petición.

La no devolución por parte de los contratistas no adjudicatarios de la documentación del concurso dentro del plazo, lleva implícita la pérdida de los derechos de la devolución del depósito correspondiente a la referida documentación, si lo hubiese.

## **CAPÍTULO III: EL CONTRATO**

### **1. EL CONTRATO**

A tenor de lo dispuesto en el apartado 12 del capítulo anterior, el Contratista, dentro de los treinta (30) días siguientes a la comunicación de la adjudicación y a simple requerimiento del Promotor, depositará la fianza definitiva y formalizará el Contrato en el lugar y fecha que se le notifique oficialmente.

El Contrato, tendrá carácter de documento privado, pudiendo ser elevado a público, a instancias de una de las partes, siendo en este caso a cuenta del Contratista los gastos que ello origine.

Una vez depositada la fianza definitiva y firmado el Contrato, el Promotor procederá, a petición del interesado, a devolver la fianza provisional, si la hubiera.

Cuando por causas imputables al Contratista no se pudiera formalizar el Contrato en el plazo previsto, el Promotor podrá proceder a anular la adjudicación, con incautación de la fianza provisional.

A efectos de los plazos de ejecución de las tareas, se considerará como fecha de comienzo de las mismas la de la orden de comienzo de los trabajos. Esta orden se comunicará al Contratista en un plazo no superior a 90 días a partir de la fecha de la firma del Contrato.

El Contrato será firmado por parte del Contratista, por su representante legal o apoderado, quien deberá poder probar este extremo con la presentación del correspondiente poder acreditativo.

## **2. DOCUMENTACIÓN DEL CONTRATO**

Formarán parte integrante del contrato:

- El contrato firmado por las partes.
- El pliego de condiciones.
- Las aclaraciones emitidas por el Promotor durante la fase del Concurso.
- La resolución de adjudicación.
- La oferta adjudicada.

## **3. FORMALIZACIÓN DEL CONTRATO**

Resuelta la adjudicación y notificado formalmente, el Contratista Adjudicatario deberá comparecer ante el promotor dentro de los cinco (5) días hábiles para suscribir el pertinente contrato sin opción a prórroga.

## **4. GASTOS E IMPUESTOS**

Todos los gastos e impuestos de cualquier orden que por disposición del Estado, Provincia o Municipio se deriven del contrato, y estén vigentes en la fecha de la firma del mismo, serán por cuenta del Contratista, con excepción del IVA.

Las modificaciones tributarias establecidas con posterioridad al contrato afectarán al sujeto pasivo directo, sin que las partes puedan repercutirlas entre sí. En ningún caso podrá ser causa de revisión de precios la modificación del sistema tributario vigente a la firma del contrato.

## **5. FIANZAS PROVISIONAL, DEFINITIVA Y FONDO DE GARANTÍA**

### **5.1. FIANZA PROVISIONAL**

La fianza provisional del mantenimiento de las ofertas se constituirá por los contratistas ofertantes por la cantidad que se fije en las bases de licitación. Esta fianza se depositará al tomar parte en el concurso y se hará en efectivo. Por lo que a plazo de mantenimiento, alcance de la fianza y devolución de la misma se refiere, se estará a lo establecido en los apartados 2.6 y 2.11 del presente Pliego General.

### **5.2. FIANZA DEFINITIVA**

A la firma del contrato, el Contratista deberá constituir la fianza definitiva por un importe igual al 5% del Presupuesto Total de Adjudicación.

En cualquier caso el Promotor se reserva el derecho de modificar el anterior porcentaje, estableciendo previamente en las bases del concurso el importe de esta fianza. La fianza se constituirá en efectivo o por Aval Bancario realizable a satisfacción del Promotor. En el caso de que el Aval Bancario sea prestado por varios Bancos, todos ellos quedarán obligados solidariamente con el Promotor y con renuncia expresa a los beneficios de división y exclusión.

El modelo de Aval Bancario será facilitado por el Promotor debiendo ajustarse obligatoriamente el Contratista a dicho modelo. La fianza tendrá carácter de irrevocable desde el momento de la firma del contrato, hasta la liquidación final de los trabajos y será devuelta una vez realizada. Dicha liquidación seguirá a la recepción definitiva de los equipos y componentes, que tendrá lugar una vez transcurrido el plazo de garantía a partir de la fecha de la recepción provisional. Esta fianza inicial responde del cumplimiento de todas las obligaciones del contratista, y quedará a beneficio del Promotor en los casos de abandono del trabajo o de rescisión por causa imputable al Contratista.

### **5.3. FONDO DE GARANTÍA**

Independientemente de esta fianza, el Promotor retendrá el 5% de las certificaciones semanales, que se irán acumulando hasta constituir un fondo de garantía.

Este fondo de garantía responderá de los defectos de ejecución o de la mala calidad de los materiales, suministrados por el Contratista, pudiendo el Promotor realizar con cargo a esta cuenta las reparaciones necesarias, en caso de que el Contratista no ejecutase por su cuenta y cargo dicha reparación.

Este fondo de garantía se devolverá, una vez deducidos los importes a que pudiese dar lugar el párrafo anterior, a la recepción definitiva de las obras.

## **6. APROBACIÓN Y VIGENCIA DEL CONTRATO**

El contrato será aprobado mediante resolución del Promotor, adquiriendo plena validez y eficacia jurídica a partir de su notificación fehaciente al Contratista Adjudicatario, sin perjuicio de la fecha de comienzo efectivo de las prestaciones.

## **7. INCOMPARECENCIA DEL CONTRATISTA**

Si el Contratista Adjudicatario no compareciera a suscribir el contrato, o no constituyera la fianza definitiva del mismo ni cumpliera con las demás obligaciones exigidas dentro del plazo establecido, se dejará sin efecto la adjudicación, notificándolo por escrito a todos los licitadores, y se ejecutará automáticamente la garantía de mantenimiento de oferta. El promotor podrá emitir una nueva resolución de adjudicación, haciendo recaer la misma en la oferta que hubiese quedado en segundo lugar en orden de mérito.

Si el Promotor desistiera de suscribir el contrato, tal situación no creará derecho alguno a favor del Contratista Adjudicatario.

## **8. CESIÓN DEL CONTRATO**

No se admitirá la cesión total del contrato ni la asociación por decisión unilateral del Contratista Adjudicatario con terceros, con posterioridad a la adjudicación o a la firma del contrato, bajo pena de quedar sin efecto aquélla o de rescindir el contrato, según corresponda, y en todos los casos con las consecuencias legales que ello implique.

Solamente podrá admitirse la cesión total del contrato, cuando concurran, a exclusivo criterio del Promotor, causas que lo justifiquen; debiendo en tales casos aprobarlo él mismo mediante resolución.

Si el Promotor autorizase la cesión total del contrato, lo que en tal caso sería hasta completar el plazo contractual, se deberán cumplir los siguientes requisitos:

- 8.1.** El cesionario deberá acreditar todos y cada uno de los requisitos exigidos al cedente, conforme a las disposiciones de la documentación contractual original.
- 8.2.** Se suscribirá un convenio entre el Promotor y el cesionario, con el acuerdo del cedente, por el cual se transfieren todos los derechos y obligaciones emergentes del contrato, manteniendo plena validez todos los documentos del contrato original, incluidos el pliego y todas las modificaciones y condiciones eventualmente acordadas entre las partes con posterioridad a aquél.
- 8.3.** El cesionario deberá cumplimentar la presentación de todos los requisitos establecidos para los licitadores en el momento del llamado a concurso.
- 8.4.** El cesionario deberá constituir las garantías en idénticas condiciones y con iguales características a la garantía de cumplimiento del contrato, según lo especificado en el apartado 5.2.

- 8.5. Subsistirá la responsabilidad solidaria del cedente por todas las obligaciones inherentes al contrato.
- 8.6. El cedente, previo a la cesión, deberá abonar al Promotor un derecho que se denomina "Derecho de Cesión", el que será equivalente al cincuenta por ciento (50%) del valor de la fianza definitiva.

A fin de asegurar la homogeneidad, coherencia, correlación y unidad conceptual de las tareas a ejecutar por el contratista, no se admitirá, bajo ningún concepto, la cesión parcial del contrato.

## **9. ASOCIACIÓN DE CONTRATISTAS**

Si las tareas licitadas se adjudicasen en común a un grupo o asociación de contratistas, la responsabilidad será conjunta y solidaria, en relación al compromiso contraído por el grupo o asociación.

Los componentes del grupo o asociación delegarán en uno de ellos, a todos los efectos, la representación ante el Promotor. Esta delegación se realizará por medio de un representante responsable provisto de poderes, tan amplios como proceda, para actuar ante el Promotor en nombre del grupo o asociación.

La designación de representante, para surtir efecto, deberá ser aceptada y aprobada por el Promotor por escrito.

## **10. SUBCONTRATISTAS**

El Contratista podrá subcontratar o destajar cualquier parte de la ejecución de los trabajos, previa autorización del promotor, para lo cual deberá informar con anterioridad a éste del alcance y condiciones técnico-económicas del Subcontrato mencionado.

El Promotor podrá, en cualquier momento, requerir del Contratista la exclusión de un subcontratista por considerar al mismo incompetente, o que no reúne las necesarias condiciones, debiendo el Contratista tomar las medidas necesarias para la rescisión de este Subcontrato, sin que por ello pueda presentar reclamación alguna al Promotor.

En ningún caso podrá deducirse relación contractual alguna entre los Subcontratistas o destajistas y el Promotor, como consecuencia de la ejecución por aquellos de trabajos parciales correspondientes al Contrato principal, siendo siempre responsable el Contratista ante el Promotor de todas las actividades del Subcontratista y de las obligaciones derivadas del cumplimiento de las condiciones expresadas en este Pliego.

Los trabajos específicos que requieran una determinada especialización y que no estuviesen incluidos en el Presupuesto del Contrato, bien porque aún estando previstos en la Memoria y/o Planos de Concurso, no se hubiese solicitado para ellos oferta económica, bien por que su necesidad surgiese a posteriori durante la ejecución del Contrato, podrán ser adjudicados por el Promotor directamente a la Empresa que libremente elija, debiendo el Contratista prestar las ayudas necesarias para la realización de los mismos.

## **11. RELACIONES ENTRE EL PROMOTOR Y EL CONTRATISTA Y ENTRE LOS DIVERSOS CONTRATISTAS Y SUBCONTRATISTAS**

El Contratista está obligado a suministrar, en todo momento, cualquier información relativa a la realización del contrato, de la que el Promotor juzgue necesario tener conocimiento.

Entre otras razones por la posible incidencia de los trabajos confiados al Contratista, sobre los de otros Contratistas y suministradores.

El Contratista debe ponerse oportunamente en relación con los demás contratistas y suministradores, a medida que estos sean designados por el Promotor, con el fin de adoptar de común acuerdo las medidas pertinentes para asegurar la coordinación de los trabajos, el buen orden de la obra, y la seguridad de los trabajadores.

Cuando varios contratistas y suministradores utilicen las instalaciones generales pertenecientes a uno de ellos, se pondrán de acuerdo sobre su uso suplementario y el reparto de los gastos correspondientes.

El Promotor deberá estar permanentemente informado de los acuerdos tomados al amparo del párrafo anterior, para en el caso de presentarse dificultades o diferencias, tomar la resolución que proceda, o designar el árbitro a quien haya de someterse dichas diferencias.

La decisión del árbitro designado por el Promotor es obligatoria para los interesados. En ningún caso el Promotor deberá encontrarse durante los trabajos, en presencia de una situación de hecho que tuviese lugar por falta de información por parte del Contratista.

Cuando varios contratistas trabajen en la ejecución de las tareas, cada uno de ellos es responsable de los daños y perjuicios de toda clase que pudiera derivarse de su propia actuación.

## **12. DOMICILIOS Y REPRESENTACIONES**

El Contratista está obligado, antes de iniciarse la ejecución de las tareas objeto del contrato, a facilitar un domicilio, dando cuenta al Promotor del lugar de ese domicilio.

Seguidamente a la notificación del contrato, el Promotor comunicará al Contratista su domicilio a efectos de la ejecución del contrato, así como nombre de su representante.

Antes de iniciarse las obras objeto del contrato, el Contratista designará su representante en la ejecución de las tareas y se lo comunicará por escrito al Promotor especificando sus poderes, que deberán ser lo suficientemente amplios para recibir y resolver en consecuencia las comunicaciones y órdenes de la representación del Promotor. En ningún caso constituirá motivo de excusa para el Contratista la ausencia de su representante.

El Contratista está obligado a presentar a la representación del Promotor antes de la iniciación de los trabajos, una relación comprensiva del personal facultativo responsable de la ejecución de las tareas contratadas y a dar cuenta posteriormente de los cambios que en el mismo se efectúen, durante la vigencia del contrato.

La designación del representante del Contratista, así como la del personal facultativo, responsable de la ejecución de las tareas contratadas, requiere la conformidad y aprobación del Promotor quien por motivo fundado podrá exigir al Contratista la remoción de su representante y la de cualquier facultativo responsable.

## **CAPÍTULO IV: OBLIGACIONES DEL CONTRATISTA**

### **1. OBLIGACIONES CONTABLES**

El Contratista deberá llevar y conservar los libros y documentos relativos al contrato y mantenerlos a disposición del Promotor durante toda la vigencia del mismo y hasta los seis (6) meses posteriores a su vencimiento y el de las eventuales prórrogas acordadas.

### **2. CUMPLIMIENTO DE LA LEGISLACIÓN LABORAL Y DE SEGURIDAD**

El Contratista deberá cumplir con todas las leyes laborales, provisionales e impositivas, convenios colectivos de trabajo vigentes, como así también con toda otra disposición que pudiera ser de aplicación a los trabajos que desarrolle.

Deberá mantener al día el pago de los impuestos, del personal empleado (cualquiera sea su nivel o jerarquía), abonar íntegramente los honorarios, salarios y jornales estipulados, ingresando los aportes provisionales y demás cargas sociales que correspondan. Así mismo deberá cumplimentar las reglamentaciones y pagos de aranceles que para la actividad desarrollada pueda corresponder, de acuerdo a la legislación vigente en la materia, a los Consejos o Colegios Profesionales, incluyendo la inscripción de los mismos.

El Contratista deberá dar estricto cumplimiento a lo estipulado por la ley nacional y europea de higiene y seguridad en el trabajo.

Será responsabilidad del Contratista el pago de multas, recargos, intereses, etc., originados por infracciones a las leyes, decretos, ordenanzas, reglamentos y demás normas vigentes,

por las que fuera responsable como consecuencia de su condición de contratista y de empleador.

### **3. SEGUROS**

El Contratista será responsable de cualquier accidente que ocurra al personal profesional, técnico, obrero o administrativo, que realice o inspeccione trabajos para aquél, en el lugar o en tránsito, correspondiéndole en consecuencia, las obligaciones que establecen las leyes nacionales y europeas.

A los efectos precedentemente indicados, el Contratista deberá mantener en vigencia y cancelar a su cargo todos los seguros especificados en el punto siguiente (4.4.).

Se considerará falta grave del Contratista tener sin cobertura cualquiera de los riesgos indicados, por lo que en caso de incumplimiento, el Promotor podrá proceder a la contratación de los seguros con cargo al contratista, independientemente de la aplicación de las sanciones que pudieran corresponder.

El Promotor deberá aprobar las pólizas y la entidad aseguradora ofrecida, previo a que aquéllas entren en vigencia, para lo cual el Contratista deberá someterlas a su consideración, previo a suscribir los contratos de seguros respectivos.

Todas las pólizas deben contener cláusulas de ajuste automático de las sumas aseguradas.

También deberán contener una cláusula por la cual la entidad aseguradora asume el compromiso de no reducir ni alterar las condiciones de cobertura sin consentimiento previo y fehaciente del promotor.

Cuando corresponda, dichas pólizas deberán ser endosadas a favor del promotor.

#### **4. COBERTURAS A TOMAR**

Los seguros que el Contratista deberá tomar a su cargo cubrirán los siguientes riesgos:

##### **4.1. Responsabilidad del contratista como empleador.**

**4.1.1.** Muerte e incapacidad permanente, total o parcial, de todo el personal afectado a los fines del contrato, en un todo de acuerdo a las obligaciones emergentes de la normativa legal vigente.

**4.1.2.** La indemnización prevista en de la Ley de Contrato de Trabajo.

**4.1.3.** Seguro contra terceros afectados por el contratista durante los trabajos.

#### **5. OBLIGACIONES EN MATERIA DE SEGURIDAD**

El Contratista estará obligado al cumplimiento de las disposiciones vigentes en materia laboral, de seguridad social y de seguridad y higiene en el trabajo.

En lo referente a las obligaciones del Contratista en materia de seguridad e higiene en el trabajo, estas quedan detalladas de la forma siguiente:

**5.1.** El Contratista es responsable de las condiciones de seguridad e higiene en los trabajos, estando obligado a adoptar y hacer aplicar, a su costa, las disposiciones vigentes sobre estas materias, en las medidas que dicte la Inspección de Trabajo y demás organismos competentes, así como las normas de seguridad complementarias que correspondan a las características de las obras contratadas.

**5.2.** A tal efecto el Contratista debe establecer un Plan de Seguridad, Higiene y Primeros Auxilios que especifique con claridad las medidas prácticas que, para la consecución de las precedentes prescripciones, estime necesario tomar en la obra. Este Plan debe

precisar las formas de aplicación de las medidas que correspondan a los riesgos de la obra con el objeto de asegurar eficazmente:

- La seguridad de su propio personal, y de terceros.
- La higiene y primeros auxilios a enfermos y accidentados.
- La seguridad de las instalaciones.

El Plan de Seguridad así concebido debe comprender la aplicación de las Normas de Seguridad que el Contratista prescribe a sus empleados cuando realizan trabajos similares a los encomendados al personal del Contratista.

El Plan de Seguridad, Higiene y Primeros Auxilios deberá ser comunicado al Promotor, en el plazo máximo de tres meses a partir de la firma del contrato. El incumplimiento de este plazo puede ser motivo de resolución del contrato.

La adopción de cualquier modificación o aplicación al plan previamente establecido, en razón a la variación de las circunstancias de la obra, deberá ser puesta inmediatamente en conocimiento del Promotor.

**5.3.** Los gastos originados por la adopción de las medidas de seguridad, higiene y primeros auxilios son a cargo del Contratista y se considerarán incluidos en los precios del contrato. Quedan comprendidas en estas medidas, sin que su enumeración las limite:

- a) La formación del personal en sus distintos niveles profesionales en materia de seguridad, higiene y primeros auxilios, así como la información al mismo mediante carteles, avisos o señales de los distintos riesgos que la obra presente.
- b) El mantenimiento del orden, limpieza, comodidad y seguridad en las superficies o lugares de trabajo, así como en los accesos a aquellos.

- c) Las protecciones y dispositivos de seguridad en las instalaciones, aparatos y máquinas, almacenes, etc, incluidas las protecciones contra incendios.
- d) El establecimiento de las medidas encaminadas a la eliminación de factores nocivos, tales como polvos, humos, gases, vapores, ruidos, temperatura, humedad, y aireación e iluminación deficientes...
- e) Suministro de todos los elementos de protección personal necesarios, así como de las instalaciones sanitarias, botiquines, ambulancias, que las circunstancias hagan igualmente necesarias. Además, el Contratista debe proveer de vestuarios, servicios higiénicos, servicio de comedor y menaje, barracones, suministro de agua, etc., que las características de las tareas y la reglamentación determinen.

**5.4.** Si se produjera una Asociación de Contratistas, éstos deberán agruparse en el seno de un Comité de Seguridad, formado por los representantes de los Contratistas, Comité que tendrá por misión coordinar las medidas de seguridad, higiene y primeros auxilios, tanto a nivel individual como colectivo. De esta forma, cada contratista debe designar un representante responsable ante el Comité de Seguridad. Las decisiones adoptadas por el Comité se aplicarán a todas los contratistas, incluso a los que lleguen con posterioridad a la ejecución de las tareas.

Los gastos resultantes de esta organización colectiva se prorratearán mensualmente entre las empresas participantes, proporcionalmente al número de jornales, horas de trabajo de sus trabajadores, o por cualquier otro método establecido de común acuerdo.

El Contratista remitirá al Promotor, con fines de información, copia de cada declaración de accidente que cause baja en el trabajo, inmediatamente después de formalizar la dicha baja.

El incumplimiento de estas obligaciones por parte del Contratista o la infracción de las disposiciones sobre seguridad por parte del personal técnico designado por él, no implicará responsabilidad alguna para el Promotor.

## **6. SUSTITUCIÓN DEL PERSONAL**

### **6.1. A SOLICITUD DEL PROMOTOR**

El Promotor podrá exigir con causa fundada, la sustitución o separación de cualquiera de las personas que integren el equipo. En tales casos, todos los gastos emergentes serán por cuenta del Contratista.

En los casos que, en virtud de lo anterior, corresponda la sustitución de personal, el contratista deberá cumplimentar los requisitos atinentes establecidos en el numeral siguiente.

### **6.2. A SOLICITUD DEL CONTRATISTA**

La sustitución de cualquier persona que integra el equipo profesional sólo podrá ocurrir cuando se produzcan causas debidamente fundadas. La propuesta de sustitución se efectuará por nota dirigida al Promotor, la cual contendrá:

- Curriculum vitae actualizado del nuevo profesional propuesto.
- Actividades específicas a desarrollar.
- Compromiso de participación debidamente firmado por el profesional propuesto
- Cuando corresponda, la pertinente habilitación expedida por el Colegio Profesional correspondiente.
- Efecto que produce la sustitución sobre la ejecución de las tareas.
- Constancia de aceptación del profesional reemplazado de su sustitución.

La incorporación del profesional propuesto a los equipos de trabajo, sólo podrá hacerse efectiva una vez que el Promotor haya otorgado la aprobación correspondiente.

La ocurrencia de las situaciones contempladas en el presente artículo, no podrán dar lugar, bajo ningún concepto, a la disminución del ritmo del cumplimiento de las obligaciones, ni dejar en ningún momento áreas específicas sin cubrir.

## **7. RESCISIÓN DEL CONTRATO**

Cuando a juicio del Promotor el incumplimiento por parte del Contratista de alguna de las cláusulas del Contrato pudiera ocasionar graves trastornos en la ejecución de las tareas, cumplimiento de los plazos, o en el aspecto económico, el Promotor podrá decidir la resolución del Contrato, con las penalidades a que hubiera lugar. Así mismo, podrá proceder la resolución con pérdida de fianza y garantía suplementaria si la hubiera, de producirse alguno de los supuestos siguientes:

- Cuando no se hubiera aportado los medios relacionados en la oferta o su equivalente o capacidad en los plazos previstos incrementados en un 25%, o si el Contratista hubiese sustituido dichos medios en sus elementos principales sin la previa autorización del Promotor.
- Cuando se cumpla el plazo final de las tareas y falte por ejecutar más del 20% de las tareas. La imposición de las multas establecidas por los retrasos sobre dicho plazo, no obligará al Promotor a la prórroga del mismo, siendo potestativo por su parte elegir entre la resolución o la continuidad del Contrato.

Será así mismo causa suficiente para la rescisión, alguno de los hechos siguientes:

- La quiebra, fallecimiento o incapacidad del Contratista. En este caso, el Promotor podrá optar por la resolución del Contrato, o por que se subroguen en el lugar del Contratista los síndicos de la quiebra o sus representantes.
- La disolución, por cualquier causa, de la sociedad, si el Contratista fuera una persona jurídica.

- Si el Contratista es una agrupación temporal de empresas y alguna de las integrantes se encuentra incluida en alguno de los supuestos previstos en alguno de los dos apartados anteriores, el Promotor estará facultado para exigir el cumplimiento de las obligaciones pendientes del Contrato a las restantes empresas que constituyen la agrupación temporal o para acordar la resolución del Contrato. Si el Promotor optara en ese momento por la rescisión, esta no producirá pérdida de la fianza, salvo que concurriera alguna otra causa suficiente para declarar tal pérdida.

Procederá así mismo la rescisión, sin pérdida de fianza por el Contratista, cuando se suspendan las tareas una vez comenzadas, y en todo caso, siempre que por causas ajenas al Contratista, no sea posible dar comienzo a las tareas adjudicadas, en el plazo de 3 meses, a partir de la fecha de adjudicación.

En el caso de que se incurriese en las causas de resolución del Contrato conforme a las cláusulas de este Pliego de Condiciones Generales, o del Particular de las tareas, el Promotor se hará cargo de las obras en la situación en que se encuentren, sin otro requisito que el del levantamiento de un Acta Notarial o simple, si ambas partes prestan su conformidad, que refleje la situación de las tareas, así como de acopios de materiales, maquinaria y medios auxiliares que el Contratista tuviese en ese momento en el emplazamiento de los trabajos. Con este acto del Promotor el Contratista no podrá poner interdicto ni ninguna otra acción judicial, a la que renuncie expresamente.

Siempre y cuando el motivo de la rescisión sea imputable al Contratista, este se obliga a dejar a disposición del Promotor hasta la total terminación de los trabajos, la maquinaria y medios auxiliares existentes en la ejecución de las tareas que el Promotor estime necesario, pudiendo el Contratista retirar los restantes. El Promotor abonará por los medios, instalaciones y máquinas que decida deben continuar en obra, un alquiler igual al estipulado en el baremo para trabajos por administración, pero descontando los porcentajes de gastos generales y beneficio industrial del Contratista.

El Contratista se compromete como obligación subsidiaria de la cláusula anterior, a conservar la propiedad de las instalaciones, medios auxiliares y maquinaria seleccionada por el Promotor o reconocer como obligación preferente frente a terceros, la derivada de dicha condición.

El Promotor comunicará al Contratista, con treinta (30) días de anticipación, la fecha en que desea reintegrar los elementos que venía utilizando, los cuales dejará de devengar interés alguno a partir de su devolución, o a los treinta (30) días de la notificación, si el Contratista no se hubiese hecho cargo de ellos. En todo caso, en la devolución se realizarán siempre por cuenta del Contratista los gastos de su traslado definitivo.

En los contratos rescindidos, se procederá a efectos de garantías, fianzas, etc. a efectuar las recepciones provisionales y definitivas de todos los trabajos ejecutados por el Contratista hasta la fecha de la rescisión.

**CAPÍTULO V: CONDICIONES ECONÓMICAS Y LEGALES**

**1. GASTOS DE CARÁCTER GENERAL POR CUENTA DEL CONTRATISTA**

Se entienden como tales los gastos de cualquier clase ocasionados por los ensayos de materiales que deba realizar por su cuenta el Contratista; oficinas y almacenes pertenecientes al Contratista; equipos necesarios para la evitación de accidentes de cualquier clase; los de protección de materiales y las propias tareas contra todo deterioro, daño o incendio, cumpliendo los reglamentos vigentes; los de limpieza de los espacios interiores y exteriores; los de retirada al fin de las tareas de herramientas, materiales, etc.

Salvo que se indique lo contrario, será de cuenta del Contratista el suministro de la energía eléctrica necesaria para la ejecución de las tareas.

Serán de cuenta del Contratista los gastos ocasionados por la retirada del lugar de ejecución de las tareas, de los materiales rechazados, los de jornales y materiales para las mediciones periódicas para la redacción de certificaciones y los ocasionados por la medición final; los de pruebas, ensayos, reconocimientos y tomas de muestras para la recepción definitiva, del equipo; la corrección de las deficiencias observadas en las pruebas, ensayos, etc., y los gastos derivados de los asientos o averías, accidentes o daños que se produzcan en estas pruebas y la reparación y conservación de las obras durante el plazo de garantía.

Además de los ensayos a los que se refieren los párrafos anteriores de este artículo, serán por cuenta del Contratista los ensayos que realice directamente con los materiales suministrados por sus proveedores antes de su adquisición e incorporación a la obra y que en su momento serán controlados por el Promotor para su aceptación definitiva. Serán asimismo de su cuenta aquellos ensayos que el Contratista realice durante la ejecución de los trabajos, para su propio control.

En los casos de resolución del Contrato, cualquiera que sea la causa que lo motive, serán de cuenta del Contratista los gastos de jornales y materiales ocasionados por la liquidación de las obras y los de las Actas Notariales que sean necesarias levantar, así como los de retirada de los medios auxiliares que no utilice el Promotor o que le devuelva después de utilizados.

## **2. GASTOS DE CARÁCTER GENERAL POR CUENTA DEL PROMOTOR**

Serán por cuenta del Promotor los gastos originados por la inspección de las obras del personal del Promotor o contratados para este fin, la comprobación o revisión de las certificaciones, la toma de muestras y ensayos de laboratorio para la comprobación periódica de calidad de materiales y obras realizadas, salvo los indicados en el apartado 1 y el transporte de los materiales suministrados por el Promotor, hasta el almacén del Contratista, sin incluir su descarga ni los gastos de paralización de vehículos por retrasos en la misma.

## **3. INDEMNIZACIONES POR CUENTA DEL CONTRATISTA**

Será por cuenta del Contratista la reparación de cualquier daño que pueda ocasionar sus instalaciones y construcciones auxiliares en propiedades particulares, los producidos en las demás operaciones realizadas por el Contratista para la ejecución de las tareas.

## **4. PARTIDAS PARA TAREAS ACCESORIAS**

Las cantidades calculadas para tareas accesorias, que por su escasa o nula definición, figuren en el presupuesto con una partida alzada, no se abonará por su cantidad total, salvo que se indique así en el Pliego de Condiciones Particulares.

En consecuencia estas obras accesorias se abonarán a los precios unitarios del Contrato y conforme a las unidades y medidas que se obtengan de los proyectos que se realicen para ellas y de su medición final.

## **5. PARTIDAS ALZADAS**

Las partidas alzadas consignadas en los presupuestos para obras o servicios, y que expresamente así se indique en el Pliego de Condiciones Particulares, se abonarán por su importe una vez realizados totalmente dichos trabajos.

Quedan excluidas de este sistema de abono, las obras accesorias que se liquidarán conforme a lo indicado en el punto anterior, 4.

## **6. REVISIONES DE PRECIOS**

El Promotor adopta para las revisiones de los precios el sistema de fórmulas polinómicas vigentes para las obras del Estado y Organismos Autónomos, establecido por el Decreto-Ley 2/1964 de 4 de febrero (B.O.E. de 6-11-64), especialmente en lo que a su artículo 4º se refiere.

Se establecerán la fórmula o fórmulas polinómicas a emplear, adoptando de entre todas las reseñadas en el Decreto-Ley 3650/1970 de 19 de diciembre (B.O.E. 29-12-70) la que más se ajuste a las características de la obra contratada.

Si estas características así lo aconsejan, el Promotor se reserva el derecho de establecer nuevas fórmulas, modificando los coeficientes o las variables de las mismas.

Para los valores actualizados de las variables que inciden en la fórmula, se tomarán para cada mes los que faciliten el Ministerio de Hacienda una vez publicados en el B.O.E. Los valores iniciales corresponderán a los del mes de la fecha del Contrato.

El índice de revisión mensual se aplicará al importe total de la certificación correspondiente al mes de que se trate, siempre y cuando la tarea realizada durante dicho periodo, lo haya sido dentro del programa de trabajo establecido.

En el caso de que las obras se desarrollen con retraso respecto a dicho programa, las certificaciones mensuales producidas dentro del plazo se revisarán por los correspondientes índices de revisión hasta el mes previsto para la terminación de los trabajos. En este momento, dejarán de actualizarse dicho índice y todas las certificaciones posteriores que puedan producirse, se revisarán con este índice constante.

Los aumentos de presupuesto originados por las revisiones de precios oficiales, no se computarán a efectos de lo establecido en el punto 6.1., "Modificaciones del proyecto".

Si las tareas a realizar fuesen de corta duración, el Promotor podrá prescindir de la cláusula de revisión de precios, debiéndolo hacer constar así expresamente en las bases del Concurso.

## **7. RÉGIMEN DE INTERVENCIÓN**

Cuando el Contratista no de cumplimiento, sea a las obligaciones o disposiciones del Contrato, sea a las órdenes de servicio que les sean dadas por el Promotor, éste le requerirá a cumplir este requisito de órdenes en un plazo determinado, que, salvo en casos de urgencia, no será nunca menor de diez días a partir de la notificación de requerimiento.

Pasado este plazo, si el Contratista no ha ejecutado las disposiciones dadas, el Promotor podrá ordenar a título provisional el establecimiento de un régimen de intervención general o parcial por cuenta del Contratista.

Se procederá, en presencia del Contratista, o habiéndole convocado, a la comprobación de las tareas ejecutadas, de los materiales acopiados así como al inventario descriptivo del material del Contratista, y a la devolución a este de la parte de materiales que no utilizará el Promotor para la terminación de los trabajos.

El Promotor tiene por otra parte la facultad, sea de ordenar la convocatoria de un nuevo concurso, en principio sobre petición de ofertas, por cuenta y riesgo del Contratista incumplidor, sea de ejercitar el derecho de rescisión pura y simple del Contrato, sea de prescribir la continuación de la intervención.

Durante el periodo de régimen de intervención, el Contratista podrá conocer la marcha de los trabajos, sin que pueda, de ninguna manera, entorpecer o dificultar las órdenes del Promotor.

El Contratista podrá, por otra parte, ser liberado del régimen de intervención si justifica su capacidad para volver a hacerse cargo de los trabajos y llevarlos a buen fin.

Los excedentes de gastos que resulten de la intervención o del nuevo contrato serán deducidos de las sumas, que puedan ser debidas al Contratista, sin perjuicios de los derechos a ejercer contra él en caso de ser insuficientes.

Si la intervención o el nuevo contrato supone, por el contrario una disminución de gastos, el Contratista no podrá pretender beneficiarse en ninguna parte de la diferencia, que quedará a favor del Promotor.

## **8. INFORMES**

De cada uno de los informes que se produzcan por parte del Contratista en cumplimiento de sus obligaciones contractuales, así como de la documentación de respaldo anexa a los mismos, se confeccionarán dos ejemplares, redactados en idioma español. Las unidades de medida utilizadas en los informes deberán ser las del Sistema Internacional de Unidades y las hojas a emplear para los informes deberán ser de tamaño DIN A4.

Cada Informe deberá presentarse acompañado de su soporte óptico, en CD-ROM, debidamente identificado y fechado. Para el soporte de textos se utilizará la última versión de Microsoft Word; para plantilla de datos, cálculos y gráficos resultantes, la última versión

de Microsoft Excel; para bases de datos, Microsoft Access en su última versión; para Administración de Proyectos Microsoft Project y para planos el Programa Autocad en versión 14 o posterior. Todo ello sin perjuicio de los programas computacionales desarrollados o utilizados al efecto, y que previamente hayan sido aprobados por el Promotor.

Cada informe que presente el Contratista deberá ser autosuficiente, evitando al máximo las referencias a otros informes y, por lo tanto, permitir que el Promotor pueda verificar, analizar y evaluar integralmente su contenido, sin necesidad de tener que recurrir a otros documentos o informaciones adicionales. El Promotor rechazará los informes que no respondan a estas condiciones.

## **9. REVISIÓN DE LOS INFORMES**

El Promotor revisará, analizará, evaluará y, en caso de encontrarlos conformes a las normas contenidas en la documentación contractual, aceptará los informes y demás documentación de respaldo a sus tareas que entregue al contratista durante la vigencia del contrato.

## **10. CERTIFICACIÓN DE LAS PRESTACIONES**

El Promotor emitirá un informe de evaluación de las tareas ejecutadas por el Contratista. En caso de que su evaluación concluya, en el sentido que las funciones del contratista hubiesen sido cumplidas en forma satisfactoria por el mismo en el período considerado y se ajustan a las normas contenidas en la documentación contractual, se dará curso a la factura de pago correspondiente.

## **11. CONFECCIÓN DE LAS FACTURAS DE PAGO**

El Contratista presentará las facturas de pago a la comisión, para cuya confección utilizará formularios previamente aprobados y que se ajusten a las disposiciones vigentes en la

materia. Para tales facturas se considerará como fecha de emisión, la del día hábil posterior al de finalización del periodo al que corresponden las prestaciones liquidadas.

## **12. PAGO DE LOS CERTIFICADOS**

El pago de las facturas o certificados semanales se efectuará dentro de los treinta (30) días contados desde el primer día posterior a su fecha de emisión. En caso de producirse demora en el pago, será de aplicación lo estipulado en el Derecho español.

## **13. PROPIEDAD INDUSTRIAL, COMERCIAL E INTELECTUAL**

Al suscribir el Contrato, el Contratista garantiza al Promotor contra toda clase de reivindicaciones que se refieran a suministros y materiales, procedimientos y medios utilizados para la ejecución de las tareas y que procedan de titulares de patentes, licencias, planos, modelos, marcas de fábrica o comercio.

En el caso de que fuera necesario, corresponde al Contratista la obtención de las licencias o a utilizations precisas y soportar la carga de los derechos e indemnizaciones correspondientes.

En caso de acciones dirigidas contra el Promotor por terceros titulares de licencias, autorizaciones, planos, modelos, marcas de fábrica o de comercio utilizadas por el Contratista para la ejecución de los trabajos, el Contratista responderá ante el Promotor del resultado de dichas acciones estando obligado además a prestarle su plena ayuda en el ejercicio de las excepciones que competan al Promotor.

La propiedad intelectual del contenido de todos los informes presentados por el Contratista en lo que hace a los estudios, cálculos, recomendaciones, conclusiones y demás trabajos propios de los profesionales de aquélla, será exclusiva del Promotor, quien podrá disponer

libremente de los mismos. El Contratista sólo podrá invocarlos como antecedentes de su propia labor.

#### **14. TRIBUNALES**

El Contratista renuncia al fuero de su propio domicilio y se compromete a sustanciar cuantas reclamaciones origine el Contrato ante los tribunales.

## **CAPÍTULO VI: DESARROLLO DE LAS TAREAS, CONDICIONES TÉCNICO-ECONÓMICAS**

### **1. MODIFICACIONES DEL PROYECTO**

El Promotor podrá introducir en el proyecto, antes de empezar las tareas o durante su ejecución, las modificaciones que sean precisas para la normal ejecución de las mismas, aunque no se hayan previsto en el proyecto y siempre que no varíen las características principales de las tareas.

También podrá introducir aquellas modificaciones que produzcan aumento o disminución y aún supresión de las unidades de obra marcadas en el presupuesto.

Cuando se trate de aclarar o interpretar preceptos de los Pliegos de Condiciones o indicaciones de los planos o dibujos, las órdenes o instrucciones se comunicarán exclusivamente por escrito al Contratista, estando obligado éste a su vez a devolver una copia suscribiendo con su firma el enterado.

Todas estas modificaciones serán obligatorias para el Contratista, y siempre que, a los precios del Contrato, sin ulteriores omisiones, no alteren el Presupuesto total de ejecución Material contratado en más de un 35%, tanto en más como en menos, el Contratista no tendrá derecho a ninguna variación en los precios ni a indemnización de ninguna clase.

Si la cuantía total de la certificación final, correspondiente a la obra ejecutada por el Contratista, fuese a causa de las modificaciones del Proyecto, inferior al presupuesto total de ejecución material del contrato en un porcentaje superior al 35%, el Contratista tendrá derecho a indemnizaciones.

Para fijar su cuantía, el Contratista deberá presentar al Promotor en el plazo máximo de dos (2) meses a partir de la fecha de dicha certificación final, una petición de indemnización

con las justificaciones necesarias debido a los posibles aumentos de los gastos generales e insuficiente amortización de equipos e instalaciones, y en la que se valore el perjuicio que le resulte de las modificaciones introducidas en las previsiones del Proyecto. Al efectuar esta valoración el Contratista deberá tener en cuenta que el primer 35% de reducción no tendrá repercusión a estos efectos.

Si por el contrario, la cuantía de la certificación final, correspondiente a la obra ejecutada por el Contratista, fuese, a causa de las modificaciones del Proyecto, superior al presupuesto total de ejecución material del contrato y cualquiera que fuere el porcentaje de aumento, no procederá el pago de ninguna indemnización ni revisión de precios por este concepto.

No se admitirán mejoras de tareas más que en el caso de que el Promotor haya ordenado por escrito, la ejecución de trabajos nuevos o que mejoren la calidad de los contratados.

Tampoco se admitirán aumentos de tareas en las unidades contratadas, salvo caso de error en las mediciones del Proyecto, o salvo que el Promotor ordene también por escrito la ampliación de las contratadas. Se seguirá el mismo criterio y procedimiento, cuando se quieran introducir innovaciones que supongan una reducción apreciable en las unidades de obra contratadas.

## **2. MODIFICACIONES DE LOS PLANOS**

Los planos de construcción podrán modificar a los provisionales de concurso, respetando los principios esenciales y el Contratista no puede por ello hacer reclamación alguna al Promotor.

El carácter complejo y los plazos limitados de que se dispone en la ejecución de un Proyecto, obligan a una simultaneidad entre las entregas de las especificaciones técnicas de los suministradores de equipos y la elaboración de planos definitivos de Proyecto.

El Promotor tomará las medidas necesarias para que estas modificaciones no alteren los planes de trabajo del Contratista entregando los planos con la suficiente antelación para que la preparación y ejecución de estos trabajos se realice de acuerdo con el programa previsto.

El Contratista por su parte no podrá alegar desconocimiento de estas definiciones de detalle, no incluidas en el proyecto base, y que quedará obligado a su ejecución dentro de las prescripciones generales del Contrato.

El Contratista deberá confrontar, inmediatamente después de recibidos, todos los planos que le hayan sido facilitados, debiendo informar por escrito al Promotor en el plazo máximo de quince (15) días y antes de proceder a su ejecución, de cualquier contradicción, error u omisión que lo exigiera técnicamente incorrectos.

### **3. EMPLEO DE MATERIALES NUEVOS PERTENECIENTES AL PROMOTOR**

Cuando fuera de las previsiones del Contrato, el Promotor juzgue conveniente emplear materiales y equipos nuevos que le pertenezcan, el Contratista no podrá oponerse a ello y las condiciones que regulen este suministro serán establecidas de común acuerdo o, en su defecto, se establecerá mediante Arbitraje de Derecho Privado.

### **4. USO ANTICIPADO DEL EQUIPO O COMPONENTES**

El Promotor se reserva el derecho de hacer uso de los componentes o del equipo terminado de las tareas contratadas, antes de que los trabajos prescritos en el contrato se hayan terminado en su totalidad, bien por necesidades de servicio, bien para permitir la realización de otros trabajos que no forman parte del contrato.

Si el Promotor deseara hacer uso del citado derecho, se lo comunicará al Contratista con una semana de antelación a la fecha de utilización. El uso de este derecho por parte del Promotor no implica recepción provisional del equipo afectado.

## **5. PLAN DE TRABAJO Y MONTAJE**

Independientemente del plan de trabajos que los Contratistas ofertantes deben presentar con sus ofertas, de acuerdo a lo establecido en el punto 2.4.8. del presente pliego, el Contratista presentará con posterioridad a la firma del Contrato, un plan más detallado que el anterior.

El plazo máximo a partir de la formalización del Contrato, en el que debe presentarlo y tipo de programa exigido queda establecido en un mes.

Este Plan, que deberá ser lo más completo, detallado y razonado posible, respetará obligatoriamente los plazos fijados en el Concurso, y deberá venir acompañado del programa de certificaciones mensuales.

En el caso de que el Contratista, decidiera proponer un adelanto en alguno de los plazos fijados, deberá hacerlo como una variante suplementaria, justificando expresamente en este caso todas las repercusiones económicas a que diese lugar.

El Plan de Trabajo deberá ser aprobado oficialmente por el Promotor, adquiriendo desde este momento el carácter de documento contractual. No podrá ser modificado sin autorización expresa del Promotor, y el Contratista estará obligado a respetarlo en el desarrollo de los trabajos.

En caso de desacuerdo sobre el Plan de Trabajo, una vez rechazado por el Promotor, se someterá la controversia a arbitraje, siendo desempeñado por un profesional competente, designado por el Colegio Profesional correspondiente.

Los medios ofrecidos, que han de ser como mínimo los de la propuesta inicial, salvo que el promotor, a la vista del Plan de Trabajo, autorice otra cosa, quedarán afectos a la obra y no podrán ser retirados o sustituidos.

La aceptación del Plan y relación de medios auxiliares propuestos por el Contratista no implica exención alguna de responsabilidad para él mismo en el caso de incumplimiento de los plazos parciales, o final convenido.

Si el desarrollo de los trabajos no se efectuase de acuerdo al Plan aprobado y ello pudiera dar lugar al incumplimiento de plazos parciales o final, el Promotor podrá exigir del Contratista la actualización del Plan vigente, reforzando las plantillas de personal, medios auxiliares e instalaciones necesarias a efectos de mantener los plazos convenidos y sin que el Contratista pueda hacer recaer sobre el Promotor las repercusiones económicas que este aumento de medios puede traer consigo. El Plan de Trabajo actualizado sustituirá a todos los efectos contractuales al anteriormente vigente, con la salvedad que se indica en el párrafo siguiente.

En cualquier caso, la aceptación por parte del Promotor de los Planes de Trabajo actualizados que se vayan confeccionando para adecuar el desarrollo real de los trabajos al mantenimiento de los plazos iniciales, no liberará al Contratista de las posibles responsabilidades económicas en que incurra por el posible incumplimiento de los plazos convenidos.

## **6. PLAZOS DE EJECUCIÓN**

En el Pliego de Condiciones Particulares, se establecen los plazos parciales y plazo final de terminación, a los que el Contratista deberá ajustarse obligatoriamente.

Los plazos parciales corresponderán a la fabricación, adquisición o terminación de determinados elementos, tareas o conjuntos de tareas, que se consideren necesarios para la prosecución de otras fases del montaje.

## **7. RETENCIONES POR RETRASOS DURANTE LA EJECUCIÓN DE TRABAJOS**

Los retrasos sobre el plan de trabajo y programa de certificaciones imputables al Contratista, tendrán como sanción económica para cada mes la retención por el Promotor, con abono a una cuenta especial denominada "Retenciones", del 50% de la diferencia entre el 90% de la tarea que hasta ese momento debería haberse justificado y la que realmente se haya realizado.

Si el Contratista realizase tareas con valor superior a lo establecido en el Plan de Trabajos para cada momento, tendrá derecho a recuperar de la cuenta de "Retenciones" la parte proporcional que le corresponda.

Cuando se alcance el plazo total previsto para la ejecución del trabajo con un saldo acreedor en la cuenta de "Retenciones" quedará éste bloqueado a disposición del Promotor para responder de las posibles multas y sanciones correspondientes a una posible rescisión.

En el momento de la total terminación y liquidación de las tareas contratadas, se procederá a saldar esta cuenta abonando al Contratista el saldo acreedor si lo hubiere o exigiéndole el deudor si así resultase.

## **8. INCUMPLIMIENTO DE LOS PLAZOS Y MULTAS**

En el caso de incumplimiento de los plazos fijados por causas directamente imputables al Contratista, satisfará éste las multas que se indiquen en el Pliego Particular, con cargo a las certificaciones, fondo de retenciones o fianza definitiva, sucesivamente, sin perjuicio de la responsabilidad por daños.

Si el retraso producido en el cumplimiento de los plazos ocasionara a su vez retrasos en otros contratistas, lesionando los intereses de estos, el Promotor podrá hacer repercutir sobre el Contratista las indemnizaciones a que hubiera lugar por tales perjuicios.

En el caso de que los retrasos se produzcan por causas imputables al Promotor en los suministros a que venga obligado, se prorrogarán los plazos en un tiempo igual al estimado por el Promotor como retraso producido, de acuerdo con lo establecido en el apartado 6.12.

## **9. SUPRESIÓN DE LAS MULTAS**

Cuando el Promotor advierta la posibilidad de que un retraso en la ejecución de las obras o en el montaje, no va a repercutir en la entrega final ni causar perjuicios a terceros, podrá acordar libremente la supresión de multas, o la ampliación de los plazos de ejecución.

En este último caso, el Promotor podrá diferir a la nueva fecha de terminación, y en el supuesto de que ésta tampoco se cumpla, la aplicación de las multas establecidas.

## **10. PROCEDIMIENTO PARA LA APLICACIÓN DE MULTAS**

A los fines de la aplicación de las multas que se establecen en el Pliego y en el Contrato, se considerará producido el hecho por el solo incumplimiento de las cláusulas contractuales que dan origen a la aplicación de las mismas. El importe de la penalidad será exigible y cobrable sin necesidad de interpelación extrajudicial o judicial previa, produciéndose la mora en forma automática por el solo vencimiento del plazo concedido para su cancelación.

En todos los casos en que corresponda la aplicación de multas, las mismas serán dispuestas por resolución del Promotor y notificadas al Contratista. La cantidad resultante será pagada por el Contratista en un plazo de diez (10) días contados a partir de la fecha de su notificación.

Vencido el plazo de pago, el Promotor podrá deducir las cantidades impagadas más sus

intereses moratorios, de cualquier crédito que tenga a su favor el Contratista, a cuyo fin los importes originados en penalidades, cualquiera sea su origen, se consideran de plazo vencido, líquido y exigible.

En especial las multas podrán deducirse de los pagos de cualquier tipo que tenga a cobrar el Contratista o de las fianzas constituidas de acuerdo a las disposiciones contractuales, a cuyo efecto se deberá disponer los mecanismos o la redacción necesaria para que ello pueda efectivizarse de manera automática. Cada vez que se produzca una reducción en la cantidad de las fianzas por deducción de multas, el contratista deberá reintegrar la cantidad original de las mismas, dentro de los diez (10) días de efectivizada la deducción.

Las multas, una vez aplicadas, serán deducidas en forma automática, sin perjuicio de las presentaciones recurriendo las mismas que el Contratista pueda efectuar mediante la correspondiente nota dirigida al Promotor. Si se diese curso favorable a alguna solicitud de reconsideración, el importe descontado le será reintegrado mediante un certificado especial, sin ningún tipo de intereses.

## **11. PREMIOS Y PRIMAS**

Se podrán establecer premios en el caso de cumplimiento de los plazos parciales y totales contratados y/o un sistema de primas para premiar los posibles adelantos sobre dichos plazos de terminación de obras.

En el Pliego Particular, se especificarán las condiciones que deberán concurrir para que el Contratista pueda obtener dichos premios y/o primas.

El Promotor podrá supeditar el pago de los premios, siempre que así lo indique expresamente, al cumplimiento estricto de los plazos, incluso en el caso de retrasos producidos por causas no imputables al Contratista o de fuerza mayor.

## **12. RETRASOS OCASIONADOS POR EL PROMOTOR**

Los retrasos que pudieran ocasionar la falta de planos, demoras en el suministro de materiales que deba realizar por el Promotor, o interferencias ocasionadas por otros Contratistas, serán valorados en tiempo por el Promotor, después de oír al Contratista, prorrogándose los plazos conforme a la valoración.

Para efectuar ésta, el Promotor tendrá en cuenta la influencia sobre la parte de las tareas realmente afectada, y la posibilidad de adelantar la ejecución de tareas cuya realización estuviese prevista para fecha posterior.

## **13. DAÑOS Y AMPLIACIÓN DE PLAZO EN CASO DE FUERZA MAYOR**

Cuando se produjeran daños en las tareas por causa de fuerza mayor, si su prevención o minoración hubiera correspondido a las partes, la que hubiese sido negligente soportará sus consecuencias.

Si fuese por completo ajena a la actuación del Contratista el riesgo sobre la tarea ejecutada, será soportado por el Promotor en cuanto a las unidades de que se hubiese hecho previa medición, según se determina en el punto 6.15.

Si por causa de fuerza mayor no imputable al Contratista hubiese de sufrir demora el curso de las tareas, lo pondrá en conocimiento del Promotor con la mayor prontitud posible, concretando el tiempo en que estima necesario prorrogar los plazos establecidos, el Promotor deberá manifestar su conformidad o reparos a la procedencia y alcance de la prórroga propuesta en un plazo igual al que hubiese mediado entre el hecho originario y la comunicación del Contratista.

#### **14. MEDICIONES DE LAS TAREAS EJECUTADAS**

Servirán de base para la medición y posterior abono de las obras los datos contractuales de presupuestos parciales y totales.

Las mediciones con los datos recogidos de los elementos cualitativos que caracterizan las tareas ejecutadas, los acopios realizados, o los suministros efectuados, constituyen comprobación de un cierto estado de hecho y se recogerán por el Promotor en presencia del Contratista. La ausencia del Contratista, aún habiendo sido avisado previamente, supone su conformidad a los datos recogidos por el Promotor.

En caso de presencia del Contratista las mediciones serán avaladas con la firma de ambas partes.

El Contratista no podrá dejar de firmar las mediciones. En caso de negarse a hacerlo, podrá levantarse acta notarial a su cargo. Si las firmara con reservas, dispondrá de un plazo de 10 días a partir de la fecha de redacción de las mismas para formular por escrito sus observaciones. Pasado ese plazo, las mediciones se suponen aceptadas sin reserva alguna.

En el caso de la firma con reserva, se redactará un acta en la que se hará constar los motivos de disconformidad, acta que se unirá a la correspondiente medición.

En el caso de reclamación del Contratista las mediciones se tomarán a petición propia o por iniciativa del Promotor, sin que estas comprobaciones prejuzguen, en ningún caso, el reconocimiento de que las reclamaciones están bien fundamentadas.

El Contratista está obligado a exigir a su debido tiempo la toma contradictoria de mediciones para los trabajos, prestaciones y suministros que no fueran susceptibles de comprobación o de verificaciones ulteriores, a falta de lo cual, salvo pruebas contrarias que deben proporcionar a su costa, prevalecerán las decisiones del Promotor con todas sus consecuencias.

## **15. CERTIFICACIÓN Y ABONO DE LAS TAREAS**

**15.1** Las tareas se medirán periódicamente sobre las partes realmente ejecutadas con arreglo al Proyecto, modificaciones posteriores y órdenes del Promotor, y de acuerdo con los artículos del Pliego de Condiciones.

La medición de la tarea realizada se llevará a cabo en los dos (2) primeros días siguientes a la fecha de cierre de certificaciones. Dicha fecha se determinará al comienzo de las obras.

Las valoraciones efectuadas servirán para la redacción de certificaciones al origen, de las cuales se tendrá el líquido de abono. Corresponderá al Promotor en todo caso, la redacción de las certificaciones periódicas.

**15.2.** Las certificaciones y abonos de los equipos y componentes, no suponen aprobación ni recepción de los mismos.

**15.3.** Las certificaciones periódicas se deben entender siempre como abonos a buena cuenta, y en consecuencia, las mediciones de unidades de obra y los precios aplicados no tienen el carácter de definitivos, pudiendo surgir modificaciones en certificaciones posteriores y definitivamente en la liquidación final.

**15.4.** Si el Contratista rehusase firmar un certificado semanal o lo hiciese con reservas por no estar conforme con ella, deberá exponer por escrito y en el plazo máximo de dos (2) días, a partir de la fecha de que se le requiera para la firma, los motivos que fundamenten su reclamación e importe de la misma. El Promotor considerará esta reclamación y decidirá si procede atenderla. Los retrasos en el cobro, que pudieran producirse como consecuencia de esta dilación en los trámites de la certificación, no se computarán a efectos de plazo de cobro ni de abono de intereses de demora.

**15.5.** Terminado el plazo de dos días, (2) señalado en el epígrafe anterior, o si hubiesen variado las tareas en forma tal que les fuera imposible recomprobar la medición

objeto de discusión, se considerará que la certificación es correcta, no admitiéndose posteriormente reclamación alguna en tal sentido.

- 15.6.** Tanto en las certificaciones, como en la liquidación final, las obras serán en todo caso abonadas a los precios que para cada unidad de obra figuren en la oferta aceptada, o a los precios contradictorios fijados en el transcurso de la obra, de acuerdo con lo provisto a continuación.
- 15.7.** Los precios de las tareas, así como los de los materiales, maquinaria y mano de obra que no figuren entre los contratados, se fijarán contradictoriamente entre el Promotor y el Contratista, o su representante expresamente autorizado a estos efectos. Estos precios deberán ser presentados por el Contratistas debidamente descompuestos, conforme a lo establecido en el apartado 2.4 del presente Pliego. El Promotor podrá exigir para su comprobación la presentación de los documentos necesarios que justifique la descomposición del precio presentado por el Contratista. La negociación del precio contradictorio será independiente de la ejecución de la unidad de obra de que se trate, viniendo obligado el Contratista a realizarla, una vez recibida la orden correspondiente. A falta de acuerdo, se certificará provisionalmente a base de los precios establecidos por el Promotor.
- 15.8.** Cuando circunstancias especiales hagan imposible el establecer nuevos precios, o así le convenga al Promotor, corresponderá exclusivamente a éste la decisión de abonar estos trabajos en régimen de administración, aplicando los baremos de mano de obra, materiales y maquinaria, aprobados en el Contrato.
- 15.9.** Cuando así lo admita expresamente el Pliego de Condiciones Particulares, o el Promotor acceda a la petición en este sentido formulada por el Contratista, podrá certificarse a cuenta de acopios de materiales en la cuantía que determine dicho Pliego, o en su defecto la que estime oportuno el Promotor.

Las cantidades abonadas a cuenta por este concepto se deducirán de la certificación de la unidad de obra correspondiente, cuando dichos materiales pasen a formar parte de la tarea ejecutada.

En la liquidación final no podrán existir abonos por acopios, ya que los excesos de materiales serán siempre por cuenta del Contratista.

El abono de cantidades a cuenta en concepto de acopio de materiales no presupondrá, en ningún caso, la aceptación en cuanto a la calidad y demás especificaciones técnicas de dicho material, cuya comprobación se realizará en el momento de su puesta en obra.

**15.10.** Del importe de la certificación se retraerá el porcentaje fijado en el apartado 3.5.3 de este Pliego General para la constitución del fondo de garantía.

**15.11.** Las certificaciones por revisión de precios, se redactarán independientemente de las certificaciones mensuales de obra ejecutada, ajustándose a las normas establecidas en el capítulo V, apartado 6 de este Pliego General.

## **16. ABONO DE UNIDADES INCOMPLETAS O DEFECTUOSAS**

El Promotor determinará si las unidades que han sido realizadas en forma incompleta o defectuosa, deben rehacerse o no. Caso de rehacerse el Contratista vendrá obligado a ejecutarlas, siendo de su cuenta y cargo dicha reparación, en el caso de que ya le hubiesen sido abonadas. De no haberlo sido, se certificará la obra como realizada una sola vez.

Cuando existan trabajos defectuosos o incompletos que el Promotor considere, que a pesar de ello puedan ser aceptables para el fin previsto, se abonarán teniendo en cuenta la depreciación correspondiente a las deficiencias observadas.

En lo referente a resistencias, densidades, grados de acabado, tolerancias en dimensiones, etc. Se podrá hacer una proporcionalidad con las obtenidas, siempre que sean admisibles, o

bien fijar de entrada una depreciación en los precios de un 10% para obras defectuosas pero aceptables.

## **17. INFORME FINAL**

Previo a la finalización de la relación contractual o de suscripción de la prórroga del contrato, lo que ocurra antes, el contratista deberá presentar:

- Informe final global.
- Informe final de cada tarea.

## **18. ACTA DE FINALIZACIÓN DE LAS PRESTACIONES**

Una vez aprobado el informe final por parte del Promotor se procederá a elaborar el acta de finalización de las prestaciones. En el acta de finalización de las prestaciones, se deberá dejarse constancia de:

- Fecha en que se elabora.
- Listado e índice del informe, de la documentación de respaldo y del soporte computacional, que el contratista haya entregado.
- Constancia de las modificaciones, ampliaciones o supresiones producidas en el transcurso de la ejecución de las prestaciones, si hubieren existido.
- Constancia expresa que las prestaciones fueron ejecutadas de acuerdo con lo establecido en la documentación contractual.
- Constancia de las multas impuestas al contratista por mora u otros motivos, si hubiesen existido.

## **19. RECEPCIÓN PROVISIONAL DE LOS EQUIPOS**

A partir del momento en que todas las tareas que le han sido encomendadas, hayan sido terminadas, el Contratista lo pondrá en conocimiento del Promotor, mediante carta certificada con acuso de recibo.

El Promotor procederá entonces a la recepción provisional de los equipos y de los componentes, habiendo convocado previamente al Contratista mediante notificación escrita con acuso de recibo, al menos con cinco días de anticipación. Si el Contratista no acude a la convocatoria, se hará mención de su ausencia en el Acta de Recepción.

Del resultado del reconocimiento de los equipos, se levantará un Acta de Recepción en la que se hará constar el estado final de los mismos así como las deficiencias que pudieran observarse. El Acta será firmada conjuntamente por el Contratista y el Promotor.

Si el reconocimiento de los equipos fuera satisfactorio se recibirán provisionalmente los mismos, empezando a contar desde esta fecha el plazo de garantía. Si por el contrario se observara deficiencias y no procediese efectuar la recepción provisional, se concederá al Contratista un plazo breve para que corrija los defectos observados, transcurrido el cual deberá procederse a un nuevo reconocimiento.

Si transcurrido el plazo concedido al Contratista, no se hubieran subsanado dichos defectos, el Promotor podrá proceder a su realización, bien directamente, bien por medio de otros contratistas, con cargo al fondo de garantía y si este no bastase, con cargo a la fianza definitiva.

Una vez terminados los trabajos de reparación, se procederá a recibir provisionalmente los equipos y componentes.

## **20. PLAZO DE GARANTÍA**

Una vez terminadas totalmente la ejecución de las tareas, se efectuará la recepción provisional de las mismas, tal como se indica en el artículo 6.19, a partir de cuyo momento comenzará a contar el plazo de garantía, al final del cual se llevará a cabo la recepción definitiva.

Durante este plazo, será de cuenta del Contratista la conservación y reparación de los equipos, así como todos los desperfectos que pudiesen ocurrir en los mismos, desde la terminación de éstos, hasta que se efectúe la recepción definitiva, excepción hecha de los daños que se deriven del mal trato o uso inadecuado de las obras por parte del Promotor.

Si el Contratista incumpliese lo estipulado en el párrafo anterior, el Promotor podrá encargar a terceros la realización de dichos trabajos o ejecutarlos directamente por administración, deduciendo su importe del fondo de garantía y si no bastase, de la fianza definitiva, sin perjuicio de las acciones legales a que tenga derecho el Promotor en el caso de que el monto del fondo de garantía y de la fianza no bastasen para cubrir el importe de los gastos realizados en dichos trabajos de reparación.

## **21. RECEPCIÓN DEFINITIVA DE LOS EQUIPOS**

Una vez transcurrido el plazo de garantía se procederá a efectuar la recepción definitiva de las obras de un modo análogo al indicado en el punto 6.19 para la recepción provisional.

En el caso de que hubiese sido necesario conceder un plazo para subsanar los defectos hallados, el Contratista no tendrá derecho a cantidad alguna en concepto de ampliación del plazo de garantía, debiendo continuar encargado de la conservación de las obras durante esa ampliación.

Si el equipo presentase con posterioridad a la recepción definitiva defectos de cualquier tipo debidos a incumplimiento doloso del Contrato por parte del Contratista, responderá éste de los daños y perjuicios en el término de dos (2) años.

Transcurrido este plazo, quedará totalmente extinguida la responsabilidad del Contratista.

## **22. LIQUIDACIÓN**

Una vez efectuada la recepción provisional se procederá a la medición general de las tareas que han de servir de base para la valoración de las mismas.

La liquidación se llevará a cabo después de la recepción definitiva, saldando las diferencias existentes por los abonos a cuenta y descontando el importe de las reparaciones u obras de conservación que haya habido necesidad de efectuar durante el plazo de garantía, en el caso de que el Contratista no las haya realizado por su cuenta.

Después de realizada la liquidación, se saldarán el fondo de garantía y la fianza definitiva, tanto si ésta última se ha constituido Aval Bancario.

También se liquidará, si existe, la cuenta especial de retenciones por retrasos durante la ejecución de las tareas.

**PRESUPUESTO**

A continuación se detalla presupuesto desglosado del coste del horno rotatorio dimensionado en este proyecto, según datos facilitados por Polysius, S.A.

<b>ELEMENTO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>IMPORTE (€)</b>
<i>CUERPO DEL HORNO</i>	Formado por: <ul style="list-style-type: none"><li>▪ Cilindro, realizado en construcción soldada de virolas de acero de 4,4 m de diámetro por 67 m de largo.</li><li>▪ 3 estaciones de rodillo, donde descansan los 3 aros de rodadura para el soporte del peso del horno.</li><li>▪ Cabezal del horno.</li></ul>	4.210.436
<i>REFRACTARIO</i>	Revestimiento interior del horno rotatorio con ladrillo refractario ALMAG AF REFRACTEchnik.	1.097.467
<i>EQUIPOS AUXILIARES DEL HORNO</i>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ 5 Bombas de engrase; potencia del motor por bomba 0.75 kW, velocidad del motor 940 rpm.</li><li>▪ Motoventiladores para refrigeración; caudal 9.500 m<sup>3</sup>/h, potencia del motor 7.5 kW, velocidad del motor 3000 l/min.</li></ul>	520.230

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN	IMPORTE (€)
<i>QUEMADOR</i>	<p>Quemador mixto para la quema de fuel-oil y coque con una longitud de penetración en el horno de 6 m.</p> <p>Formado por:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>▪ Tobera del quemador.</li><li>▪ Aparatos de medida del aire primario.</li><li>▪ Transmisor de temperatura con sonda PT-100, señal de salida 4-20 mA, protección IP65.</li><li>▪ Un manómetro de toma a distancia.</li><li>▪ Dos rótulas anti-abrasión para el desplazamiento del eje.</li><li>▪ Conducto antivibratorio para la conexión del motoventilador de aire primario y el conducto metálico que va hacia el quemador.</li><li>▪ Moto-reductor 1.5 Kw con mecánica de volante para accionamiento manual y velocidad de salida de 3.8 rpm,</li></ul>	936.200

<b>ELEMENTO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>IMPORTE (€)</b>
<i>EQUIPOS AUXILIARES DEL QUEMADOR</i>	Formados por: <ul style="list-style-type: none"><li>▪ Caña de pulverización mecánica.</li><li>▪ Juego de atomización formado por pastilla, atomizador primario y atomizador secundario.</li><li>▪ Conjunto de materiales de acoplamiento.</li><li>▪ Dos mangueras metálico-flexibles.</li><li>▪ Dos juegos de enlaces rápidos para la interconexión mangueras-caña.</li><li>▪ Pórtico para manejo automático, indicación, control y seguridad del fuel-oil, que comprende:</li></ul>	361.456

<b>ELEMENTO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>IMPORTE (€)</b>
<i>ACCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE GIRO Y MOTOR</i>	<p>Formado por.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reductor planetario, con instalación de engrase y calefacción.</li> <li>▪ Motor de accionamiento con variador de frecuencia y las siguientes características: <ul style="list-style-type: none"> <li>□ Engranaje planetario.</li> <li>□ Potencia de accionamiento: 190kW.</li> <li>□ Velocidad de accionamiento: 1500rpm.</li> <li>□ Velocidad de salida: 11.7 kW.</li> <li>□ Potencia motor bomba de aceite: 1.5 kW.</li> <li>□ Velocidad del motor: 980 rpm.</li> </ul> </li> <li>▪ Motor de accionamiento auxiliar formado por: <ul style="list-style-type: none"> <li>□ Engranaje planetario.</li> <li>□ Potencia de accionamiento: 15 kW.</li> <li>□ Velocidad de accionamiento: 1500 rpm.</li> </ul> </li> </ul>	581.983
<b>TOTAL</b>	-	<b>7.707.772</b>

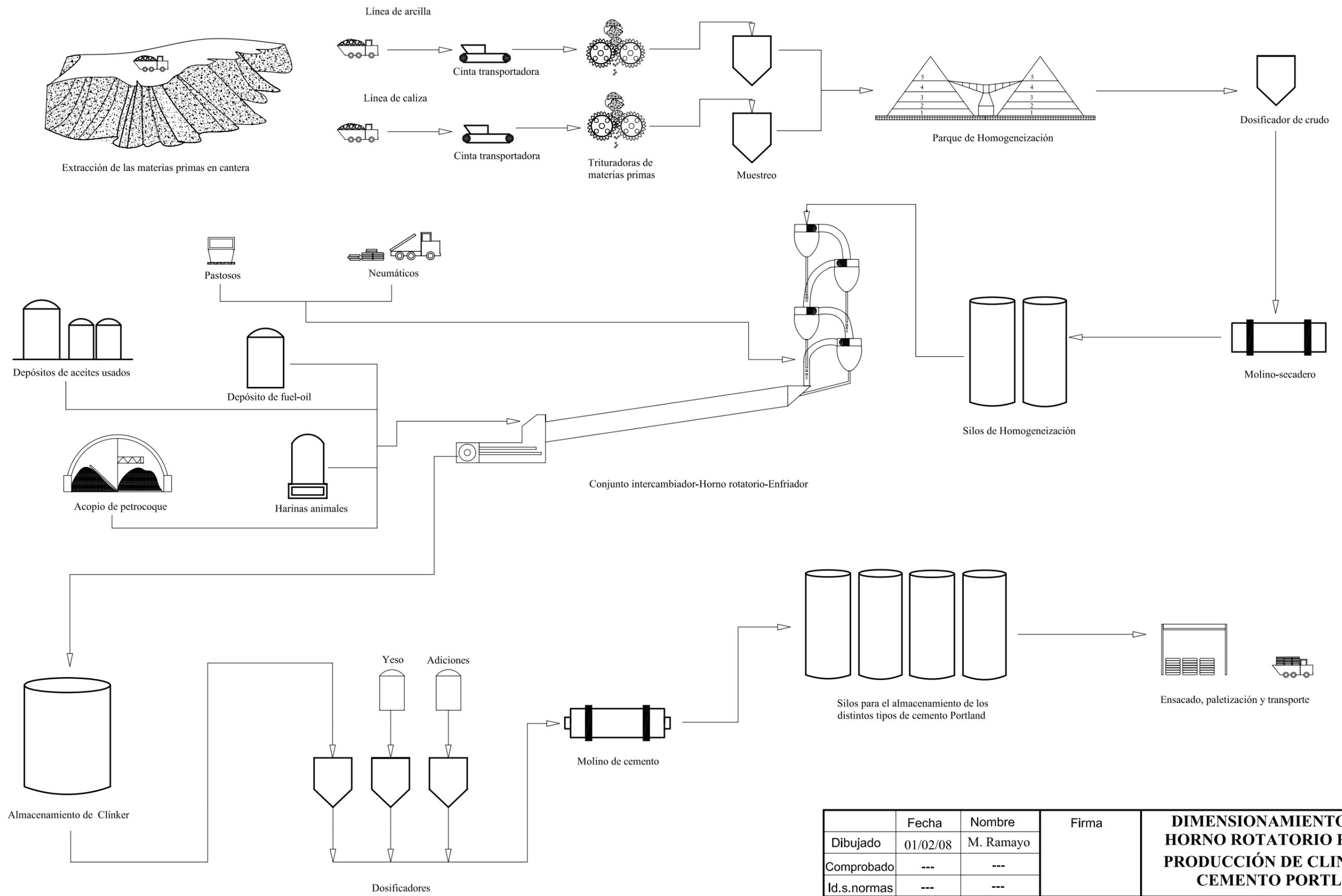
## ÍNDICE DE PLANOS

**PLANO 1. PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CEMENTO.**

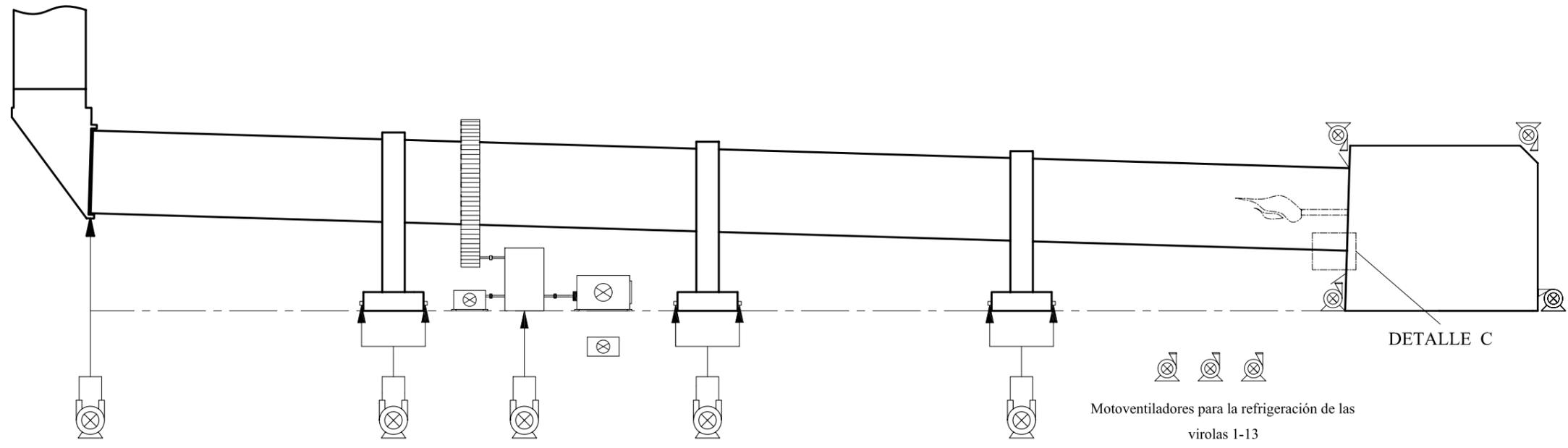
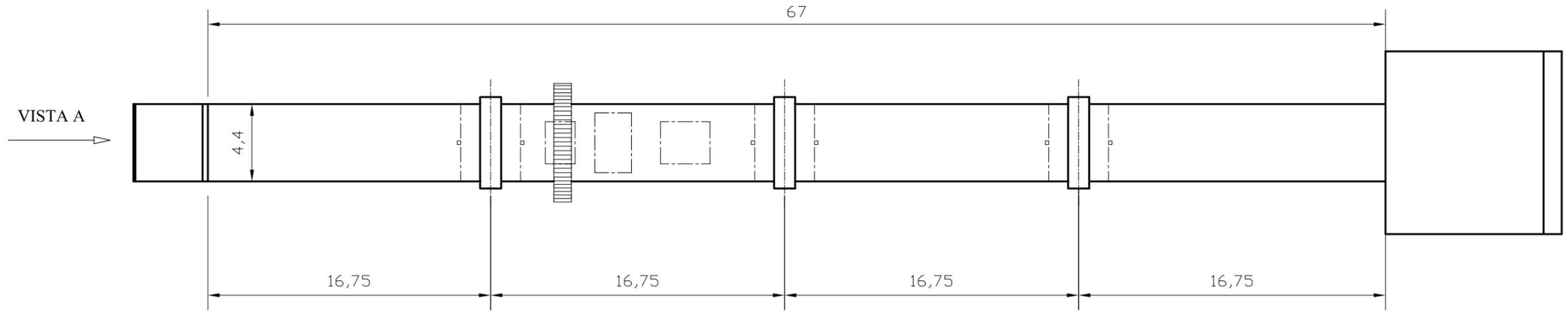
**PLANO 2. HORNO ROTATORIO.**

**PLANO 3. DETALLES DEL HORNO ROTATORIO.**

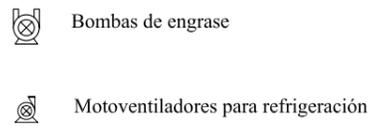
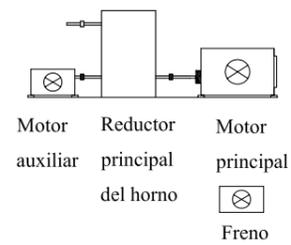
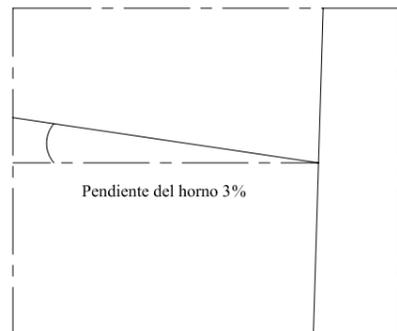
---



				<b>DIMENSIONAMIENTO DE UN HORNO ROTATORIO PARA LA PRODUCCIÓN DE CLINKER DE CEMENTO PORTLAND</b>
	Fecha	Nombre	Firma	
Dibujado	01/02/08	M. Ramayo		
Comprobado	---	---		
Id.s.normas	---	---		
Escala	<b>PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CEMENTO</b>			Plano N°
---				<b>1</b>
Dimensiones				Sustituye a
---	Sustituido por	---		

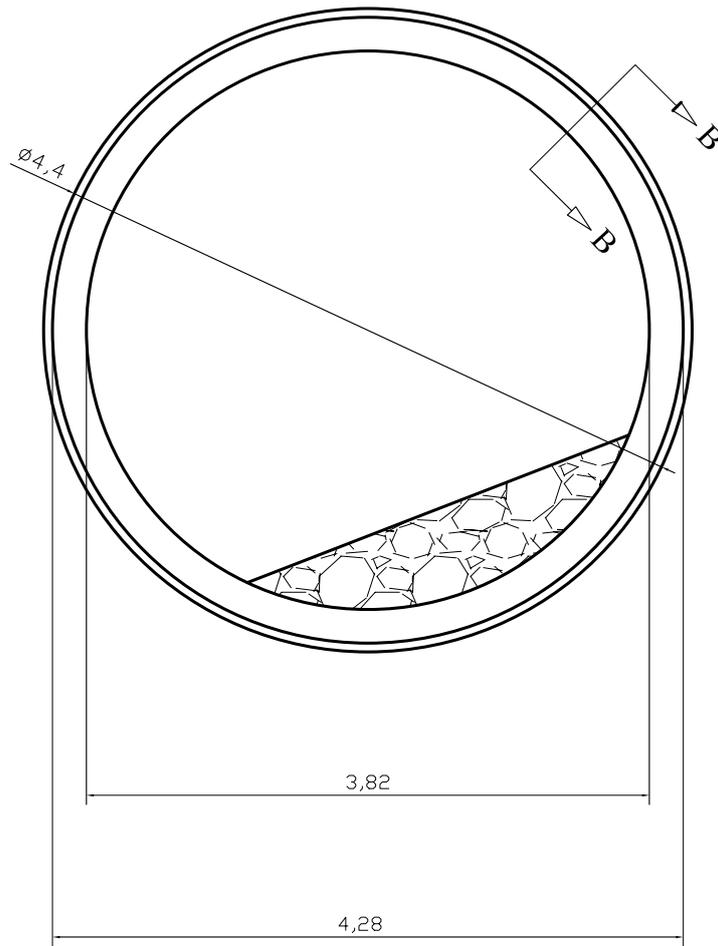


DETALLE C

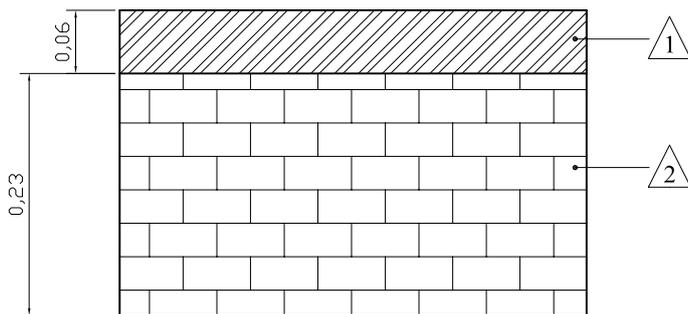


	Fecha	Nombre	Firma	<b>DIMENSIONAMIENTO DE UN HORNO ROTATORIO PARA LA PRODUCCIÓN DE CLINKER DE CEMENTO PORTLAND</b>	
Dibujado	01/02/08	M. Ramayo			
Comprobado	---	---			
Id.s.normas	---	---		Plano N°	<b>2</b>
Escala	<b>HORNO ROTATORIO</b>			Sustituye a	---
1:200				Sustituido por	---
Dimensiones metros					

VISTA A



SECCIÓN B-B



Acero al carbono 1%



Revestimiento de ladrillo refractario  
ALMAG AF Refratechnik

	Fecha	Nombre	Firma	<b>DIMENSIONAMIENTO DE UN HORNO ROTATORIO PARA LA PRODUCCIÓN DE CLINKER DE CEMENTO PORTLAND</b>
Dibujado	01/02/08	M. Ramayo		
Comprobado	---	---		
Id.s.normas	---	---		
Escala	<b>DETALLES DEL HORNO ROTATORIO</b>			Plano N°
1:50				<b>3</b>
Dimensiones metros				Sustituye a ---
				Sustituido por ---

## Bibliografía

### Libros:

- [1] Duda W. H. “Manual tecnológico del cemento”. 1ª Edición, Editores técnicos asociados, S.A., Barcelona, 1977.
  - [2] Soria F. “Estudio de materiales. Conglomerantes hidráulicos”. Instituto Eduardo Torroja de la construcción y del cemento. Novena edición. Madrid 1980.
  - [3] Vian A. y Ocón J. “Elementos de la ingeniería química”. Operaciones básicas. Aguilar, 5ª Edición, 1979.
  - [4] Perry J. “Manual del Ingeniero Químico”. 6ª Edición (3ª en español). Mc. Graw Hill. John Wiley & Sons, New York, 1992.
  - [5] Carnahan Brice, “Cálculo numérico, métodos y aplicaciones”. Madrid, Rueda D.L 1979.
  - [6] Mills A. F, “Transferencia de Calor”. Mc. Graw Hill, versión en español de Sergio de Régules Ruiz. México, Irwin 1995.
  - [7] Reid Robert, K. Sherwood Thomas, “Correlaciones para gases y líquidos”. Mc. Graw Hill, 3ª edición, New York, London 1977.
  - [8] Holman J. P, “Transferencia de Calor”, Mc. Graw Hill, Madrid 1998.
  - [9] Chapman. Alan J. “Transmisión de Calor”. 3ª edición. Madrid, Bellisco 1990.
  - [10] Calleja Carrete José. “Normas Españolas Une 2002 para cementos”. Instituto español del cemento y sus aplicaciones (IECA). José Abascal, 53. 28003 Madrid Julio 2002.
  - [11] Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo. 3ª Ed. Madrid: Ministerio de Trabajo y Seguridad Social, 1998.
  - [12] Fernández Cánovas M. “Hormigón”. 3ª edición. Madrid: ETS Ingenieros de caminos 1993.
-

Artículos:

- [13] Colina F. G, Caballero I. y Costa J. Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia. Universitat de Barcelona. “Diseño básico de hornos rotatorios para el tratamiento de minerales”. Revista Ingeniería Química. Julio/Agosto 2002.
- [14] Sullivan. J. “Passage of solid particles through rotary cylindrical kilns”. US-Bureau of mines, Technical paper No. 384, 1927.
- [15] Joachim Gehrman Hans, Warnecke Ragnar, Fontana Brüssel André, Beckmann Michael. “Residence Time behaviour of waste in rotary kiln system”. Experimental investigations and mathematical modelling. Seaman 1951.
- [16] Cuadernos del CER N°3: “Contribución de la industria del cemento a la gestión de residuos en Europa”. Septiembre 2001.
- [17] Mastorakos E., Massias A., Tsakiroglou C.D., Goussis D.A., Burganos U.N, “CFD predictions for cement kiln including flame modelling, heat transfer and clinker chemistry”. Engineering and high temperature chemical processes foundation for research and technology. Greece, 1998.
- [18] Hoatenot A.A. and Barr P.V. “A thermal model for the rotary kiln including heat transfer with in the bed”. Department of Metals and Materials Engineering, The University of British Columbia, Vancouver, B.C., Canada V6T 1Z4, 15 July, 1995.
- [19] Polysius, “Horno rotatorio de Polysius. Pieza central de la técnica de calor”. 2007.

Revistas:

- [20] Revista técnica Cemento Hormigón, “Modelos matemáticos del proceso de cocción del clinker de cemento. Parte I. Reacciones y operaciones básicas”. N° 871, Enero 2005.
  - [21] Revista técnica Cemento Hormigón, “Modelos matemáticos del proceso de cocción del clinker de cemento. Parte II. Precalentador, calcinador y bypass”. N° 872, Febrero 2005.
  - [22] Revista técnica Cemento Hormigón, “Modelos matemáticos del proceso de cocción del clinker de cemento. Parte III. Horno rotatorio”. N° 873, Marzo 2005.
-

- [23] Revista técnica Cemento Hormigón, “Modelos matemáticos del proceso de cocción del clinker de cemento. Parte IV. Enfriador de parrilla”. N° 874, Abril 2005.
  - [24] Revista técnica Cemento Hormigón, “Modelos matemáticos del proceso de cocción del clinker de cemento. Parte V. Instalación completa”. N° 875, Mayo 2005.
  - [25] Revista técnica Cemento Hormigón, N° 802. Octubre 1999.
-

