

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**  
**FACULTAD DE QUIMICA**



**BALANCE TERMICO DEL SISTEMA PRECALEN-  
TADOR-HORNO-ENFRIADOR EN UNA PLANTA DE  
CEMENTOS UBICADA EN BARRIENTOS, ESTADO  
DE MEXICO.**

**T E S I S**  
**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE**  
**INGENIERO QUIMICO**  
**P R E S E N T A**  
**ARTEMIO RAMON ACEVEDO VARGAS**

**México, D. F.**

**1980**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Ing. Eugenio L. Faustch Tapia.

VOCAL: Ing. Arturo E. Acevedo Gómez.

SECRETARIO: Ing. Roberto Rodríguez Vázquez.

1er.SUPLENTE: Ing. Sergio F. Larios y Santillán.

2do.SUPLENTE: Ing. Eduardo Ramírez Gómez.

Lugar donde se desarrolló el tema: Fábrica ubicada en Barrientos,  
Estado de México. Facultad de Química, U.N.A.M.

NOMBRE DEL SUSTENTANTE: Artemio Ramón Acevedo Vargas.

NOMBRE DEL ASESOR DEL TEMA: Ing. Eugenio L. Faustch Tapia.

-----

## I. INTRODUCCION.

I.1. Antecedentes históricos.

I.2. Definición y objetivos del balance térmico.

I.3. Términos técnicos más usuales en la industria cementera.

I.4. Organización general de la prueba.

### I.1. ANTECEDENTES HISTORICOS.

El criterio decisivo en una fábrica o empresa que explota un proceso laboral, es el de obtener el mayor beneficio posible, el cual depende, entre otras cosas, del aumento de la productividad, del descenso en los costos de fabricación, etc.

Para el procesamiento de cualquier material a nivel mundial, es necesario el constante desarrollo y perfeccionamiento de la producción a base de los más recientes adelantos de la ciencia y la tecnología, lo cual no significa otra cosa que mecanizar, automatizar, normalizar y simplificar los procedimientos laborales existentes.

Generalmente, el capítulo más importante entre los diversos conceptos que inciden sobre los costos de fabricación del cemento tipo "Portland", es el mayor o menor consumo de la energía térmica durante el proceso de cocimiento del "crudo" para formar el "clinker" del cemento. Por lo tanto, para rebajar el costo y mejorar la calidad del "clinker", la mayor parte (por no decir que todas) de las actividades creadoras de los fabricantes y usuarios de hornos rotatorios ( con sus diferentes sistemas

auxiliares) destinados a la industria cementera, deberían reflejarse en todas aquellas instalaciones en las que el intercambio de calor sea considerable.

Es importante hacer notar que, a pesar de contar México con abundantes reservas de energéticos, cada vez se hace preciso esforzarse más por una racional y completa utilización y aprovechamiento de todas las fuentes de energía disponibles, lo cual constituye un urgente y apremiante problema a nivel mundial.

Por otra parte, para obtener un proceso adecuado de transferencia de calor es necesario tener en cuenta varias cosas: una acertada elección del vehículo de la energía para el proceso térmico, dispositivos de medida, regulación y seguridad del proceso idóneos, personal calificado para el uso del equipo, aprovechamiento de todos los recursos de energía disponibles, etc.

Por consiguiente, se ha hecho necesario rebajar el gasto de energía o el costo por unidad de producto obtenido, para lo cual se han experimentado diversos sistemas y equipos en la industria cementera, desde hornos verticales hasta cubas y hornos horizontales rotatorios, cada uno con sus diferentes accesorios y equipos auxiliares.

Actualmente, el equipo más usado por los bajos costos de producción alcanzados hasta la fecha es el horno rotatorio, en el cual se puede llevar a cabo la fabricación del "clinker" (cocimiento del crudo) según tres métodos diferentes que dependen del estado de preparación que guardan las materias primas al entrar al horno:

a) Vía húmeda: se adiciona hasta 40% de agua a las materias primas durante la preparación de la mezcla íntima;

b) Vía semi-seca ( Método Lepol ): se agrega de 10 a 12 % de agua a las materias primas homogeneizadas, suficiente para soportar un proceso de granulación previa a su entrada al horno rotatorio;

c) Vía seca: la mezcla cruda homogeneizada entra al horno rotatorio con una humedad máxima de 0.5%.

Debido al extraordinario ahorro de energía calorífica logrado, el método más usado actualmente es el de vía seca, en el cual se lleva a cabo un aprovechamiento del calor perdido en los gases de escape del horno (debe observarse que en vía húmeda y semi-seca, el consumo térmico es de 1500 y 950 Kcal/kg clinker respectivamente, mientras que en hornos con proceso por vía seca el consumo es de 800 Kcal/kg clinker aproximadamente).

El aprovechamiento del calor de escape de toda índole es un método muy eficaz, tanto energético como económicamente, para obtener energía útil adicional. Es por esto que las posibilidades de los sistemas que trabajan con aprovechamiento por compensación del calor de escape del horno rotatorio, son infinitos y su utilización va en aumento día con día.

Para nuestro caso, el sistema de calcinación en el cual se llevará a cabo el balance térmico, es un horno rotatorio que trabaja por vía seca con aprovechamiento por compensación de los gases de escape, pues cuenta con un enfriador de parrilla y un intercambiador de calor por suspensión en gases, sistema del cual se hablará posteriormente.

## I.2. DEFINICION Y OBJETIVOS DEL BALANCE TERMICO.

Es condición necesaria, tanto física como técnicamente, que para el calentamiento de un cuerpo siempre haya que perder parte de la energía aportada al sistema. Este calor perdido es el que inevitablemente debe tratarse de recuperar (o disminuir) lo mejor posible, si se desea minimizar el consumo específico de energía.

Si hay que trabajar con instalaciones (hornos) destinadas a la fabricación de productos que requieren un alto consumo calorífico como es la industria del cemento, es necesario valorar y aplicar los más recientes adelantos de la ciencia y de la tecnología, para tener muy presente siempre los problemas de la transferencia de calor en el sistema. Además, en virtud del incremento que en todas partes se observa del uso de energéticos en la industria, ha aumentado considerablemente la demanda de equipos y sistemas que midan, regulen y aprovechen mejor el calor residual que se pierde en tales procesos.

Por otra parte, un balance térmico no es más que una evaluación continuada de las entradas y salidas de material y de calor que se producen en el Sistema Precalentador-Horno-Enfriador del proceso de cocción del clinker. Su interés radica precisamente en la confiabilidad que aporta esa continuidad, puesto que en algún momento podrían efectuarse mediciones aisladas que determinarían con un alto margen de error, todas las variables que entran en juego en el proceso, mientras que la repetición de las mediciones a lo largo del balance disminuye las posibilidades

de error por alteraciones temporales de las condiciones de marcha del sistema o defectos de las mediciones, permitiéndonos con esto obtener conclusiones válidas para todo el proceso.

De acuerdo con las normas de la V.D.Z.(Asociación Alemana de Fabricantes de Cemento), la duración de un balance térmico debe ser de 24 horas como mínimo y 48 como máximo; tiempo durante el cual la marcha del horno debe ser lo más estable posible. Además, al compararse en el balance todas las entradas y salidas de calor del sistema, éstas deben coincidir para que tenga validez el balance.

Para completar el balance térmico, es necesario efectuar una serie de cálculos que nos permitan cuantificar la transferencia de calor en sus diferentes manifestaciones dentro del sistema, como son: calor latente, calor sensible, calor irradiado, calor de combustión, etc. Únicamente a base de tales cálculos puede llevarse a cabo la evaluación de la economía real de una instalación de calcinación en una planta cementera, de la cual nace este interés por establecer una cierta metodología en la realización de su balance térmico, que permita su realización sin mayores complicaciones.

Por último, el objetivo de un balance térmico es:

a) Proporcionar información acerca de las principales variables que intervienen en la marcha del proceso, como son temperaturas, depresiones, caudales, etc., en cada punto del sistema, y una indicación acerca de los procesos de transferencia térmica que se llevan a efecto en el sistema;

b) A la vista de los precedentes, definir los puntos

de bajo rendimiento térmico del proceso con respecto a lo especificado por el fabricante, de tal manera que se tomen las acciones subsecuentes tendientes a la disminución del consumo calorífico.

c) Proporcionar a los técnicos especialistas en energía de la planta, una base para desarrollar nuevos y mejores métodos que aprovechen las reservas de energía acumuladas en el calor de escape del sistema y así mejorar la eficacia de este tipo de instalaciones, lo cual ha de redundar en una mejor satisfacción de las necesidades materiales humanas.

### I.3. TERMINOS TECNICOS MAS USUALES EN LA INDUSTRIA CEMENTERA

Con objeto de hacer más entendible este trabajo para todas aquellas personas que se inician en el estudio de los procesos de fabricación de cemento actuales, a continuación se definen algunos de los términos técnicos usados más frecuentemente por todos aquellos profesionales que de una u otra manera tienen que ver con la industria cementera:

#### A) COMPUESTOS:

1.- CEMENTO: En construcción y en ingeniería indica una sustancia, la mayoría de las veces una mezcla de varios compuestos que se emplea para unir arena y roca machacada (u otros tipos de áridos hasta formar una masa sólida y compacta.

2.- CEMENTO PORTLAND: Es el conglomerante hidráulico que resulta de la pulverización del clínker frío, hasta un grado de finura determinado, y al que se le adiciona yeso en ciertas proporciones para regular su velocidad de fraguado.

3.- CONGLOMERANTE HIDRAULICO: Es el material finamente

pulverizado que tiene la propiedad de fraguar tanto en el aire como en el agua, hasta formar una masa endurecida, al agregarle cierta cantidad de agua, ya sea sola o mezclada con arena, grava, asbesto u otros materiales similares.

4.- CLINKER: Es el mineral sintético granular, resultante de la calcinación a una temperatura del orden de 1400 - 1500°C de una mezcla proporcional de materias primas de naturaleza calcárea y arcillo-ferruginosa, hasta obtener un producto constituido por silicatos, aluminatos y ferroaluminatos cálcicos.

5.- MEZCLA CRUDA: Mezcla proporcional de materiales calcáreos y arcillosos, previamente triturados y mezclados, que se introduce a los molinos de crudo para su pulverización.

6.- HARINA CRUDA: Producto resultante de la molienda de la mezcla cruda ya pulverizada y homogeneizada, es decir, la mezcla antes de introducirse en el horno.

7.- PASTA: Suspensión espesa que se origina al mezclar un conglomerante hidráulico con agua y un árido en proporciones convenientes para que ocurra el fraguado.

8.- ARIDO: Compuesto que se agrega a la mezcla de cemento y agua durante el amasado para dar cuerpo a la pasta y que tiene la propiedad de no reaccionar con el cemento (o solo muy superficialmente).

9.- CONCRETO: Producto formado a partir del fraguado y endurecimiento de un cemento, agua y un árido en proporciones adecuadas.

10.- MORTERO: Pasta preparada solo con un cemento y agua, es decir, en ausencia del árido.

11.- PUZOLANA: Material natural reactivo de origen volcánico y constituido principalmente por silicatos bicálcicos y tricálcicos de alto poder de hidratación.

12.- ESCORIA DE ALTO HORNO: Es el subproducto granulado, no metálico, constituido esencialmente por silicatos y aluminosilicatos cálcicos, que se obtiene por el enfriamiento brusco con agua (o vapor) y aire del residuo que se produce simultáneamente con la fusión de minerales de hierro en el alto horno.

13.- MAGNESIA: Es el MgO contenido en el clínker en estado libre y que se hidrata lentamente durante el endurecimiento del concreto. También se le conoce como "Periclasa".

14.- ALCALIS: Compuestos a base de Na y K (generalmente los óxidos) que se consideran impurezas de las materias primas y que afectan al funcionamiento del horno y las propiedades del cemento elaborado.

15.- FINOS: Partículas sólidas trituradas y pulverizadas hasta alcanzar un tamaño tal, que la corriente gaseosa que fluye en el horno es capaz de arrastrarlas, hasta el filtro de gases, por su poco peso.

16.- CAL LIBRE: Contenido de cal en el clínker obtenido de la calcinación, en estado libre.

17.- OXIDOS INDIVIDUALES DEL CLINKER: Todos aquellos compuestos que de una u otra manera intervienen en el proceso de clinkerización, tales como CaO, MgO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, etc.etc.

18.- OXIDOS BASICOS: Aquellos que durante el proceso de clinkerización se comportan como bases: CaO y MgO.

19.- OXIDOS ACIDOS: Aquellos que durante el proceso de clinkerización adoptan un comportamiento ácido, tales como:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , etc.

20.- AGUA LIBRE: Contenido de agua higroscópica de la mezcla, es decir, su humedad.

21.- AGUA DE CRISTALIZACION: Aquella que forma parte de la constitución cristalográfica del mineral (Ej., el caolín).

22.- AIRE PRIMARIO: Aquel que es utilizado para atomizar el combustóleo, además de proporcionar una parte del  $\text{O}_2$  necesario para la combustión.

23.- AIRE SECUNDARIO: Aire proveniente de la recuperación de calor del enfriador y que proporciona el mayor porcentaje del  $\text{O}_2$  necesario para la combustión en el horno.

24.- AIRE DE ENFRIAMIENTO: Aire total introducido al enfriador con el objeto de enfriar el clinker proveniente del horno.

25.- AIRE FALSO: Aquel que se introduce por todos los registros del equipo debido a la depresión existente en el sistema y que es indeseable para la buena marcha del proceso.

26.- AIRE DE ESCAPE: Exceso de aire de enfriamiento introducido al enfriador y que no es recuperado por el sistema (escapa a la atmósfera).

27.- GASES DE ESCAPE: Todos aquellos gases que abandonan la torre después de precalentar al crudo introducido al sistema (la suma de los gases de combustión, exceso de aire para la combustión y el aire falso).

28.- GASES DE COMBUSTION: Todos aquellos que se generan a

partir de la combustión del combustóleo en el quemador del horno.

B) DEFINICIONES:

- 1.- GRANULOMETRIA: Distribución de un sólido triturado en los diferentes tamaños de partícula existentes en la mezcla.
- 2.- FINURA: Proporción de un cierto tamaño de partícula en una mezcla sólida triturada y/o pulverizada.
- 3.- DOSIFICACION: Adicionar las cantidades y proporciones de materias primas requeridas para satisfacer las normas de calidad y cantidad, de acuerdo a la constitución física y química de todas y cada una de las materias primas que intervienen en el proceso.
- 4.- TALUD: Montón de material que se forma a lo largo del horno o del molino debido al movimiento rotatorio de estos equipos.
- 5.- COSTRA: Sobreforro que se forma sobre el tabique -- refractario que protege el casco del horno, por efecto de la formación de fase líquida durante el proceso.
- 6.- ANILLO: Costra que se forma en una sola parte del horno, de tal manera que puede llegar a cerrar el conducto y obstruir así el paso de gases y sólidos en el horno.
- 7.- MODULO: Relación o proporción existente entredos o más de los óxidos individuales del clínker y que nos permite controlar la calidad del cemento elaborado.
- 8.- FASE DE FUNDENTES: Proporción de  $Al_2O_3$  y  $Fe_2O_3$  existente en la mezcla introducida al horno y que van a dar origen a la fase líquida.
- 9.- RESIDUO INSOLUBLE: Aquella materia prima que no se

calcina en las mismas condiciones del horno, por lo que no interviene en las reacciones de formación del clinker.

10.- PERDIDA POR CALCINACION: Proporción de material perdido, con respecto al total alimentado al horno, que se pierde por efectos de la calcinación (gases procedentes de la descarbo natación, principalmente).

11.- FASES POTENCIALES DEL CLINKER: Aquellos compuestos que teóricamente se forman para dar origen al clinker en las condiciones existentes, sin tomar en cuenta posibles alteraciones del proceso.

12.- FASE LIQUIDA: Proporción de materia (con respecto al total alimentado) que se fusiona en el horno durante el proceso de clinkerización; constituida básicamente por  $Al_2O_3$  y  $Fe_2O_3$ .

13.- DEPRESION: Presión de trabajo inferior a la atmosférica, es decir, una succión en vez de una descarga.

14.- ZONA DE COMBUSTION: Aquella zona del horno donde incide directamente la flama producida por la combustión en el quemador. Generalmente abarca entre los 5 y los 12 mts., a partir de la descarga del clinker.

15.- TEMPERATURA DE CLINKERIZACION: Aquella que provoca una fusión parcial de la mezcla alimentada y a la que se combinan satisfactoriamente todos los óxidos componentes del crudo.

16.- CALOR DE HIDRATACION: Cantidad de calor liberado durante las reacciones de hidratación del cemento, especialmente de las fases  $C_3S$  y  $C_2A$ . (Sicco Tardes y Aluminio Tardes)

17.- CALOR DE ESCAPE: Calor perdido durante el proceso de calcinación, por varias causas: gases de escape de la torre,

clínker caliente a la descarga del enfriador, pérdidas por radiación, etc.

18.- CALOR DE RECUPERACION: Aquel que se recupera a partir del enfriamiento del clínker con aires fríos que se introducen ya calientes al horno como aire secundario.

19.- CONSUMO CALORIFICO: Es el consumo de calorías que se tiene, referido a cada kilogramo de clínker producido en el horno.

20.- GRADO DE DESCARBONATACION: Es la proporción en que se lleva a cabo la descomposición del  $\text{CaCO}_3$  en cierto punto del sistema, con respecto al máximo permisible por la mezcla alimentada.

21.- EFICIENCIA TERMICA: Nos indica la proporción entre el consumo calorífico real del sistema y el teórico garantizado por el fabricante.

22.- RENDIMIENTO DE ENFRIAMIENTO: Relaciona la cantidad de calorías eliminadas al clínker en el enfriador, con respecto al total de calorías que entran al mismo equipo.

23.- RENDIMIENTO DE RECUPERACION TERMICA: Da la proporción entre el calor suministrado al enfriador y el calor recuperado para el sistema con el aire secundario.

### C) EQUIPOS:

4.- MOLINOS DE GRUDO: Aquellos cilindros rotatorios cuya misión es pulverizar todos los sólidos componentes de la mezcla cruda.

2.- MOLINOS DE CEMENTO: Aquellos cilindros rotatorios cuya misión es dividir finamente al clínker y sus agregados, hasta cierto tamaño de partícula, para así formar los diferentes tipos de cemento posibles.

3.- PRECALENTADOR: Equipo utilizado para someter la harina cruda a un calentamiento previo a su entrada al horno, con el objeto de utilizar los gases de escape del horno.

4.- LAMINA DISPERSORA: Mamparas colocadas en los ciclones del precalentador para dispersar los polvos que entran al sistema y provocar así un mejor intercambio térmico.

5.- HORNO ROTATORIO: Tubo cilíndrico horizontal mediante el cual se lleva a cabo la calcinación y clinkerización de la harina cruda.

6.- QUEMADOR: Dispositivo por medio del cual se lleva a cabo la inyección e ignición del combustóleo alimentado al horno.

7.- CARATULA: Sello del horno a la descarga del clinker que contiene varios registros para introducir los instrumentos para el control del proceso.

8.- ENFRIADOR: Equipo cuya misión es someter, por algún medio, al clinker, a un enfriamiento brusco que establezca sus fases y recuperar parte de las calorías transportadas por el clinker en su viaje al almacén.

9.- BOMBA FULLER: Equipo cuya misión es transportar sólidos finamente divididos por medio de un sistema neumático de bombeo.

10.- OPACIMETRO: Instrumento cuya función es medir la concentración de sólidos en una corriente gaseosa, en determinado punto.

D) PROCESOS:

1.- FRAGUADO: Espesamiento inicial de una pasta de cemento, árido y agua. Generalmente sucede en pocas horas.

2.- REACCIONES DE HIDRATACION: Aquellas que provocan el

fraguado y endurecimiento del concreto, a partir de la reacción del agua con los silicatos y aluminatos presentes en el cemento.

3.- ENDURECIMIENTO: Formación del concreto a partir de las reacciones de hidratación. Proceso más lento que origina las propiedades mecánicas del concreto.

4.- CURADO: Dejar en reposo la pasta mientras ocurren el fraguado y el endurecimiento.

5.- CALCINAR: Someter a la harina cruda a altas temperaturas para activar así a todos sus óxidos componentes y llevar a cabo la clinkerización.

6.- CLINKERIZACION: Reacciones entre los óxidos básicos y los óxidos ácidos que dan origen al clinker (mezcla de  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  y  $C_4AF$  principalmente). *aluminato tricalcico*

7.- DESCARBONATACION: Descomposición de los carbonatos existentes en el crudo a causa de la temperatura a la que son sometidos durante el proceso de calcinación. *Silicatos de calcio*

8.- EFECTO ALCALINO: Fenómeno durante el cual los álcalis se volatilizan en el horno y regresan a la torre con los gases, donde condensan y vuelven al horno con los sólidos, formando así un ciclo.

9.- ENFRIAMIENTO DEL HORNO: Cuando la zona de clinkerización cae a una temperatura inferior a 1300 °C.

10.- MOLIENDA: Fenómeno físico que consiste en pulverizar la mezcla cruda hasta alcanzar cierto tamaño de partícula.

11.- ENFRIAMIENTO DEL CLINKER: Disminuir drásticamente la temperatura del clinker de unos 1100 °C hasta unos 150 °C aproximadamente, en un intervalo de tiempo relativamente corto.

I.4. ORGANIZACION GENERAL DE LA PRUEBA.

La duración del balance térmico fue de 24 horas en forma continua, en las cuales el horno solo tuvo un pequeño enfriamiento de poca consideración y cuya duración fue de media hora aproximadamente, por lo que podemos considerar que se mantuvo estable el proceso durante el periodo de prueba.

Para poder tener control de la prueba durante todo el intervalo de tiempo que duró el ensayo, se formaron tres grupos de cuatro personas cada uno, que trabajarían en cada uno de los turnos de trabajo de la planta y que se distribuirían de la siguiente manera en cada turno:

Una persona checando las condiciones de operación del sistema en el tablero de control de éste; una persona tomando las muestras de gases; una persona tomando las muestras del material crudo y la última persona muestreando el clinker en los diferentes puntos de medición del sistema. Además se requiere la participación de dos analistas del laboratorio en cada turno de trabajo, para que realicen los análisis necesarios para el desarrollo del balance térmico.

También, previamente al desarrollo de la prueba, se hace necesario tomar muestras del combustible y llevar a cabo su análisis de componentes elementales y propiedades más importantes, con la finalidad de poder estimar así las propiedades intrínsecas de este combustible en particular, como son: capacidad calorífica, punto de ignición, aire mínimo necesario para su combustión, dependencia entre temperatura y viscosidad, si es líquido el combustible, etc.

Por último, para estimar ciertos parámetros necesarios para la evaluación del balance, es necesario proveer a las personas encargadas del muestreo los instrumentos necesarios para llevar a cabo estas mediciones, son: termómetros, tomamuestras de sólidos y de gases, manómetros, tubos de Prandtl, etc., en cada punto de medición del sistema.

## II. QUIMICA DEL CEMENTO.

### II.1. Generalidades.

II.2. Tipos de cemento existentes en la industria.

II.3. Materias primas utilizadas para fabricar  
Cemento Portland.

II.4. Relaciones que definen la calidad del  
material crudo.

II.5. Formación y composición de las fases  
potenciales del clínker de Cemento Portland.

### II.1. GENERALIDADES.

En el sentido más amplio, la palabra CEMENTO indica cualquier clase de adhesivo utilizado en la industria de la construcción. Se puede observar un tipo primitivo de cemento en la cal apagada ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), la que todavía se usa conjuntamente con la arena para fabricar ARGAMASA, pasta elaborada a partir de la mezcla de cal apagada con agua y arena, y que endurece gradualmente como consecuencia de la eliminación del agua y de la reacción del  $\text{CaO}$  con el anhídrido carbónico atmosférico para producir  $\text{CaCO}_3$ , mientras que la arena no toma parte en la reacción (actúa como árido). Este tipo de cemento desarrolla su -- resistencia mecánica en forma lenta e irregular, y la pasta no endurece si está sumergida en agua.

Actualmente, los cementos hidráulicos son los que tienen mayor importancia por su gran versatilidad, entre los que se cuentan las distintas variedades de Cemento Portland.

Los más comunes fraguan y endurecen al mezclarlos con agua y un árido a la temperatura ambiente, aunque existen algunos que pueden usarse a altas temperaturas (ejemplo de esta última clase es la mezcla de cal con cuarzo finamente dividido, que actúa como un cemento hidráulico si se amasa primero con agua y después se trata con vapor saturado a alta presión en un autoclave). Con un buen cemento hidráulico la resistencia mecánica es previsible y su desarrollo es uniforme y relativamente rápido.

Casi todos los cementos empleados actualmente en construcción, deben su acción sobre todo a la formación de silicatos, aluminatos o sulfoaluminatos de calcio hidratados (o a compuestos de dos o más de estos tipos), y solo unos cuantos cementos deben su acción a la formación de compuestos de otros tipos, tales como sulfato cálcico hidratado, cloruros básicos de magnesio o silicatos magnésicos hidratados. Por lo tanto, puede presumirse que la mayor parte de los áridos utilizados reaccionan con el cemento solo superficialmente (aunque esto no está totalmente investigado, en virtud de las dificultades que se presentan al tratar de determinar los compuestos que se forman a partir de la hidratación del cemento y el árido).

## II.2. TIPOS DE CEMENTO EXISTENTES EN LA INDUSTRIA.

A) CEMENTOS PORTLAND. Es con mucha diferencia, el cemento más importante en lo que se refiere a la cantidad producida (únicamente en México se produjeron 13,227,000 toneladas en el año de 1977).

Se fabrica por calentamiento de una mezcla de caliza y arcilla en ciertas proporciones (u otros materiales de composición global similar), hasta formar un producto llamado clinker, que se mezcla con un pequeño porcentaje de yeso y se muele hasta alcanzar cierto tamaño de partícula.

Cuando se le amasa con agua y un árido, fragua y se endurece a causa de las reacciones químicas que se producen entre el agua y los compuestos presentes en el cemento. El fraguado y el endurecimiento no dependen del secado ni de procesos externos (como es el caso de la reacción del  $\text{CaO}$  con el bióxido de carbono de la atmósfera); ocurren no solo si la pasta se deja al aire, sino también cuando se le sumerge en el agua, puesto que el producto tiene baja permeabilidad y es casi insoluble en ella, todo lo cual ocasiona que, en condiciones normales, el agua no destruya el material endurecido.

Existen varios tipos de Cemento Portland con diferentes características de comportamiento durante el proceso de fraguado y endurecimiento. Las variables más importantes que definen los diferentes tipos de cemento son: La velocidad de endurecimiento, la velocidad de desprendimiento de calor y la cantidad de calor desprendido durante la hidratación, y la resistencia del cemento endurecido al ataque por soluciones de sulfatos. Estas características están influidas básicamente por las proporciones relativas de las cuatro fases principales del clinker ( $\text{C}_3\text{S}$ ;  $\beta\text{-C}_2\text{S}$ ;  $\text{C}_3\text{A}$ ;  $\text{C}_4\text{AF}$ ) y por la finura alcanzada en la molienda final del clinker con el yeso.

La clasificación de los diferentes tipos de Cemento Portland

se basa actualmente en la composición de la fase potencial, es decir, en las proporciones de las cuatro fases principales del clinker calculadas a partir del análisis químico total de los óxidos individuales del crudo y que se conoce como "Método de Bogue". Esta composición potencial está probablemente en buen acuerdo con la verdadera composición de fases para la mayoría de los cementos Portland, puesto que a partir de ésta se ha podido predecir el comportamiento final del cemento en diferentes circunstancias.

Sin embargo, en México se emplea para la clasificación de los diferentes tipos de Cementos Portland, los resultados del análisis químico completo de los óxidos individuales componentes del crudo, además de las fases potenciales del clinker calculadas a partir del Método de Bogue.

La siguiente tabla, extraída del libro de normas oficiales de la Dirección General de Normas, dependiente de la S.I.C., nos indica los requisitos químicos que deben cumplir los diferentes tipos de cementos Portland y sus aplicaciones más comunes.

(Norma:DGN - C - 1 - 1975):

---

CEMENTO tipo I	De uso general
Cemento tipo II	De moderado calor de endurecimiento.
Cemento tipo III	De rápida resistencia mecánica.
Cemento tipo IV	De bajo calor de hidratación.
Cemento tipo V	Alta resistencia a los sulfatos.

###

T A B L A

COMPUESTOS Y CARACTERISTICAS.	CEMENTO TIPO					
	I	II	III	IV	V	
SiO <sub>2</sub> ( % mín)	---	21.0	---	---	---	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ( % máx)	---	6.0	---	---	---	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ( % máx)	---	6.0	---	6.5	---	
MgO ( % máx)	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	
SO <sub>3</sub> ( % máx)	cuando C <sub>3</sub> A ≤ 8%	3.0	3.0	3.5	2.3	2.3
	cuando C <sub>3</sub> A > 8%	3.5	---	4.5	---	---
Pérdida de calcinación ( % máx)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	
Residuo insoluble ( % Máx)	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	
C <sub>3</sub> S ( % máx)	---	---	---	35.0	---	
C <sub>2</sub> S ( % mín)	---	---	---	40.0	---	
C <sub>3</sub> A ( % máx)	---	8.0	15.0	7.0	5.0	
C <sub>4</sub> AF ( % máx)	---	---	---	---	20.0	

Además de los tipos de Cemento Portland indicados en la tabla anterior, se fabrican algunos otros para usos más especializados a partir del clínker normal del Cemento Portland o a partir de sus componentes individuales.

En Estados Unidos de Norte América existen varios cementos denominados BPC, Cemento Ferrari o Cemento Erz, que indican cemento Portland con alto contenido en C<sub>4</sub>AF y mínima cantidad de C<sub>3</sub>A, lo que les confiere propiedades de cemento tipo IV, es decir, de bajo calor de hidratación (la hidratación del cemento Portland es un

proceso exotérmico, debido principalmente a la formación de cristales durante la hidratación del  $C_3A$  y  $C_3S$  ). En oposición a este tipo de cementos, existen los cementos Portland de Kühl y Bauxitland ricos en  $C_3A$  y  $C_4AF$ , de alto calor de hidratación y moderado desprendimiento de calor durante el endurecimiento.

Otro tipo de cemento Portland que se fabrica actualmente es el blanco, el cual está hecho con materiales libres de  $Fe_2O_3$  tales como la caliza y el caolín, que le dan una composición potencial a base de  $C_3S$ ,  $\beta-C_2S$  y  $C_3A$  únicamente.

Actualmente, se han desarrollado cementos especiales para fijar las tuberías de los pozos de petróleo a las rocas que las rodean (la suspensión debe soportar el bombeo a través de regiones de alta presión y temperatura sin el riesgo de tener un fraguado prematuro), tales como: cementos de mayor tamaño de partícula, cementos con bajo módulo de fundentes o cementos con agentes retardadores orgánicos del tipo de hidratos de carbono o lignosulfenatos.

También se preparan otros productos diferentes moliendo el Cemento Portland o el clinker con otros materiales, además del yeso, tales como los cementos pozulánicos, los que se elaboran agregando un material natural reactivo llamado Puzolana, de origen volcánico y a base de óxidos de silicio, que le confiere al producto final notables características, tales como: mayor resistencia al ataque de los sulfatos disueltos en agua; mejor plasticidad del concreto elaborado, mayor impermeabilidad (al reaccionar la puzolana con los otros componentes cierra las peque

ñísimas fisuras que generalmente se presentan durante el fraguado); menor contracción por efectos térmicos; superiores resistencias mecánicas del concreto a edades avanzadas, etc.

Otro tipo de cemento Portland que entra en esta clase de cementos es el producido a partir de la escoria de Alto Horno, el cual es un conglomerante hidráulico que resulta de la molienda conjunta de clínker, escoria granulada de alto horno y sulfato de calcio natural (yeso), como regulador del tiempo de fraguado y cuyas propiedades hidráulicas son superiores a las del clínker que se obtiene de la calcinación de calizas y arcillas por el método Portland.

B) CEMENTOS DIFERENTES AL PORTLAND.

1) El cemento aluminoso o de alto contenido de  $Al_2O_3$  se fabrica por calentamiento de una mezcla de caliza y bauxita, normalmente hasta la fusión completa, y su principal fase es el aluminato cálcico (CA). Fragua casi tan rápidamente como la pasta de Cemento Portland, pero se endurece muy rápidamente y posee gran resistencia al ataque por sulfatos contenidos en el agua.

2) Los cementos expansivos, los que forman una pasta que se expande ligeramente durante la hidratación, a diferencia de todos los otros tipos de cemento antes mencionado, que sufren una ligera contracción al hidratarse.

3) Los productos derivados del silicato cálcico (CS), que se fabrican por tratamiento de pastas en autoclave a partir de mezclas de cal con sílice o cualquier otro material rico en sílice reactivo. Entre estos productos se encuentran los materiales con

propiedades de aislantes térmicos, las láminas de amianto y silicato cálcico, etc.

4) Cemento de cloruro básico de Magnesio, conocido con el nombre de cemento "Sorel". Se obtiene tratanto una mezcla de MgO (preparado por calcinación del  $MgCO_3$ ) a bajas temperaturas para así obtener un material reactivo y un árido con una solución concentrada de  $MgCl_2$ . El producto es duro, pero no resiste la acción abrasiva del agua y a menudo se emplea para pavimentos.

5) Los yesos que se fabrican por deshidratación parcial o completa del yeso mineral ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ), mejor conocido como yeso dihidrato. Existen por lo menos cuatro formas del sulfato de calcio anhidro o hidratado, con estructuras cristalinas íntimamente relacionadas: el dihidrato ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ), el hemihidrato o basanita ( $CaSO_4 \cdot 1/2 H_2O$ ), la anhidrita soluble ( $\alpha$ - $CaSO_4$ ) y la anhidrita insoluble o yeso calcinado a muerte ( $\beta$ - $CaSO_4$ ).

En virtud de la semejanza suficientemente estrecha existente entre estas estructuras, es posible una interconversión de éstas bajo ciertas condiciones, la que se puede observar durante el fraguado y secado de los yesos: si se calienta el dihidrato en aire por encima de 60 °C, se transforma en el hemihidrato lentamente; por encima de 100 °C se origina el  $\alpha$ - $CaSO_4$ , y a temperaturas superiores a 200 °C se produce el  $\beta$ - $CaSO_4$ .

La siguiente tabla describe las principales variedades de yeso, incluyendo los métodos de preparación en períodos de calentamiento relativamente cortos; las fases presentes en el

producto y su conducta en lo que respecta al fraguado:

TABLA

<u>NOMBRE:</u>	<u>METODO DE PREPARACION:</u>	<u>FASES PRESENTES:</u>	<u>CONDUCTA EN EL FRAGUADO:</u>
YESO DE PARIS.	Calentamiento a 150°C en recipientes abiertos.	Hemihidrato con trazas de dihidrato y $\delta$ -CaSO <sub>4</sub> .	Muy rápido.
YESO RETARDADO	a) Yeso de París + Retardador; b) Tratamiento en Autoclave.	Hemihidrato con trazas de dihidrato y $\delta$ -CaSO <sub>4</sub> .	Moderado
ANHIDRITA SOLUBLE	Calentamiento a 190°C - 200°C	$\delta$ -CaSO <sub>4</sub>	Moderado
Cemento Keene o Cemento Parián	Calentamiento a 600°C., adición de un acelerador (0.5-1% de alumbre o K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ).	$\beta$ -CaSO <sub>4</sub>	Moderado
Yesos Estreich	Calentamiento a 1100°C a 1200°C	$\beta$ -CaSO <sub>4</sub> y CaO	Muy lento.

6) Los cementos a base de aluminato de estroncio y aluminato de bario, que han sido elaborados para su empleo como cementos refractarios, pues permiten alcanzar temperaturas más altas que las permitidas por los cementos de aluminato cálcico. Además, actualmente los cementos de silicato de bario se están estudiando para un posible uso en la fabricación de concreto para protección de reactores nucleares, pero no han sido investigados profundamente.

### II.3. MATERIAS PRIMAS UTILIZADAS PARA FABRICAR CEMENTO PORTLAND.

Como se mencionó anteriormente, el cemento Portland consta principalmente de cuatro compuestos:  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  y  $C_4AF$ , los que se originan a temperaturas del orden de 1300 - 1500 °C, por una serie de reacciones entre la cal, por una parte, y la alúmina, la sílice y el óxido férrico por la otra parte. Para ésto, la cal se prepara por descarbonatación de materiales calizos, mientras que la alúmina, la sílice y el óxido férrico se obtienen por calentamiento de materiales arcillosos principalmente (aunque pueden existir materiales correctores que intervengan en el proceso). Las materias primas más importantes para la elaboración de cemento tipo Portland son las siguientes:

#### A) MATERIALES CALIZOS:

Se designa con el nombre de calizas a todas aquellas rocas cuyo principal componente es el carbonato de calcio. Se encuentran en grandes cantidades en la corteza terrestre y casi siempre acompañadas de diversas substancias consideradas como impurezas, que originan variaciones en su composición química, dando lugar a diferentes clases de calizas que se distinguen por su formación geológica y por su composición física: cretas, carbonatitas y calizas sedimentarias, metamórficas, coralinas o secundarias.

La creta es, con frecuencia, relativamente blanda y puede reducirse con facilidad a un estado de fina división; las impurezas que más comúnmente lleva consigo son arena y nódulos de pedernal, y, hablando con exactitud, es una caliza del tipo

sedimentario que se le clasifica aparte en virtud de sus propiedades características.

Las calizas sedimentarias se presentan en diversas formaciones geológicas que le provocan composiciones químicas variables y una amplia gama de impurezas, tales como la Magnesia (MgO), los compuestos de Fluor, óxidos y sulfuros metálicos, fosfatos, etc.

Las calizas metamórficas están ampliamente distribuidas, pero son más comunes en las plataformas continentales geológicamente antiguas. Son, normalmente, calizas sedimentarias antiguas sometidas a intensos procesos geológicos que se encuentran con frecuencia toscamente cristalizadas, por lo que se trituran y muelen con relativa facilidad y tienen una composición química global parecida a las sedimentarias, aunque el contenido de impurezas sea diferente: esquistos, granito y minerales de hierro. Las calizas coralinas son de menor importancia (aunque también se usan en la fabricación de cemento), y pueden ser magnesianas o silíceas. Las calizas secundarias, por ser de origen geológico reciente, a menudo se presentan como depósitos superficiales delgados y pueden ser magnesianas, fosfatadas o silíceas y muchas veces están contaminadas con arcilla. Por último, la carbonatita es una forma de caliza asociada a estructuras volcánicas, por lo que puede contener una gama muy amplia de minerales: apatito, espato flúor, magnesia, etc.

Desde el punto de vista de la fabricación del cemento, las calizas más utilizadas son generalmente del tipo secundario, de las que se encuentran en los sistemas Jurásico y Cretácico, aunque también se encuentran en el Mioceno. Igualmente, desde el mismo

punto de vista, se pueden clasificar de la siguiente manera:

1) CALIZAS DURAS: aquellas que contienen un mínimo de 80% de  $\text{CaCO}_3$  y un máximo de 5% de  $\text{MgCO}_3$ , y que son de dureza normal (tres en la escala de Mohs).

2) CALIZAS BLANDAS: aquellas que están constituidas por esqueletos de organismos microscópicos (tizas), son de gran permeabilidad y pueden conservar en tiempo seco hasta un 10% de humedad.

3) CALIZAS ARCILLOSAS O MARGAS: con un contenido del 50 al 80% de  $\text{CaCO}_3$ , sus impurezas son principalmente a base de silicatos de aluminio; se presenta en forma de roca y su color varía del gris oscuro al negro, dependiendo del contenido de  $\text{CaCO}_3$  que se encuentre presente.

4) BARROS CALIZOS: formados por finas partículas de calizas no aglomeradas que se precipitan en el fondo de lagos o ríos; se presentan en depósitos de forma reticular y se encuentran en regiones pantanosas.

#### B) MATERIALES ARCILLOSOS:

Constituyen los elementos de sedimentación geológica más difundidos de la naturaleza y provienen siempre de rocas madres aluminosas (concretamente de los feldespatos que éstas contienen). Por el nombre de arcilla se conoce una materia de estructura finamente granulada, no cohesiva, que tiene la propiedad de ser plástica cuando está húmeda y pierde esta propiedad cuando se le somete a altas temperaturas. Los materiales más comunes son las arcillas, las arcillas endurecidas y las margas; pero también los limos, caolines, esquistos, algunas rocas y cenizas volcánicas, y los lodos de estuarios y de aluviones pueden usarse igualmente.

Las arcillas, las arcillas endurecidas y los limos, aunque de composición química similar, tienen propiedades físicas muy diferentes y requieren métodos distintos para su reducción al tamaño de partícula deseado, puesto que representan estados diferentes en la formación de rocas a partir de los lodos. Sus impurezas más usuales son la sílice, azufre y álcalis, aunque algunas veces contiene MgO.

El caolín es una arcilla blanca o ligeramente coloreada que generalmente resulta de la descomposición del granito; es relativamente rico en  $Al_2O_3$ , y se usa en la fabricación del cemento blanco (aunque a veces contiene pequeñas cantidades de  $Fe_2O_3$ ). Los esquistos se forman por recristalización de los minerales de las arcillas sedimentarias y contienen mica; son con frecuencia ricos en  $Al_2O_3$  y pueden tener también altos contenidos de álcalis y azufre, además de que en algunas ocasiones contienen sílice en forma de cuarzo (inerte) en granos grandes que originan dificultades adicionales.

Las cenizas volcánicas son normalmente blandas, de grado fino cuando se depositan y normalmente presentan altos contenidos de álcalis; procesos geológicos secundarios pueden producir a partir de ellas, materiales que varían desde una arcilla plástica a una roca endurecida.

Por último, las margas son sedimentos calcáreos compactos que pueden también presentarse en una forma endurecida (de acuerdo al contenido de  $CaCO_3$  presente).

C) MATERIALES CORRECTORES DEL CRUDO:

Se conoce con este nombre a todos aquellos minerales que

se emplean durante la dosificación del crudo para compensar las posibles deficiencias de todos los óxidos de carácter ácido necesarios para formar el clínker, tales como:  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  y  $Fe_2O_3$  (sobre todo los dos últimos).

Los principales materiales correctores que se utilizan en la industria cementera son los siguientes:

**Arena o Sílica:** constituida esencialmente por sílice en forma de cuarzo (entre 75 y 90%); presenta ciertos inconvenientes en el proceso de fabricación: difícil de triturar, origina granulometrías del producto heterogéneas a la salida del molino y, con ésto, segregaciones posteriores en el horno.

**Mineral de hierro:** utilizado para compensar deficiencias de  $Fe_2O_3$  en las materias primas, y aunque su proporción sea pequeña en comparación con los otros óxidos presentes, conviene utilizarlo para efectuar una buena dosificación que garantice la fase de fundentes necesaria en el proceso de calcinación.

#### II.4. MODULOS QUE DEFINEN LA CALIDAD DEL CEMENTO PORTLAND.

La conducta de las materias primas durante el proceso de fabricación y las propiedades del cemento Portland producido están muy influenciadas, además de la finura y el grado de contacto de los componentes individuales de la mezcla (nivel de homogeneización), por las proporciones relativas entre la cal, la sílice, la alúmina y el óxido férrico y por las impurezas existentes en la mezcla.

Por todo lo anterior, se ha hecho necesario establecer

relaciones y límites entre los diversos componentes existentes en la mezcla de materias primas, de tal manera que nos permita controlar el proceso y podamos predecir el comportamiento del cemento hidratado. Las relaciones y límites más importantes para la industria cementera, son las siguientes:

A) GRADO DE SATURACION REAL.

Nos proporciona la relación entre el contenido efectivo de cal en un clínker y la cantidad máxima de cal necesaria para saturar los óxidos ácidos presentes en el crudo, a partir de las relaciones estequiométricas correspondientes y restando el residuo insoluble de la sílice y la cal libre que no reaccionan durante el proceso:

$$\text{SKR} = \frac{\% \text{CaO} - (\% \text{CaO}_1 + 0.7 \% \text{SO}_3) \times 100}{2.8(\% \text{SiO}_2 - \text{RI}) + 1.1 \% \text{Al}_2\text{O}_3 + 0.7 \% \text{Fe}_2\text{O}_3}$$

( la cal libre presente en el clínker proviene de la descarbona tación del  $\text{CaCO}_3$ , y prácticamente a nivel industrial es imposible obtener un clínker que no presente cal libre; ésta es ligera y esponjosa, por lo que ofrece una gran superficie a la acción del agua y su hidratación se realiza rápidamente)

Según se puede deducir de la fórmula anterior, cuanto más próximo esté el SKR de un crudo al 100% y su contenido de cal libre sea bajo (menor al 2%), mejor será la calidad del cemento, puesto que se habrán formado todos los compuestos mineralógicos del clínker a partir de la saturación de los óxidos ácidos por la cal presente.

Un crudo con SKR superior a 100%, necesariamente producirá un clínker con cal libre (por saturación de los óxidos ácidos y

exceso de cal), entrañando ésto el riesgo de falta de estabilidad de volumen en el concreto, producido por la expansión que trae consigo la reacción de hidratación de la cal:



Por otra parte, cuanto más bajo de 100% sea el SKR de un crudo, peor será la calidad del clínker a obtenerse, puesto que los compuestos mineralógicos no podrán formarse por falta de CaO, cosa que ocasiona una baja resistencia del cemento.

B) MODULO HIDRAULICO.

Indica la relación existente entre la cal presente y la suma de los óxidos ácidos principales ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ):

$$\text{MH} = \frac{\% \text{CaO}}{\% \text{SiO}_2 + \% \text{Al}_2\text{O}_3 + \% \text{Fe}_2\text{O}_3}$$

Su valor normalmente queda comprendido entre los límites de 1.7 y 2.2. Un cemento con MH superior a 2.2 indica un exceso de CaO que provoca expansiones de volumen en el concreto o mortero fabricado, mientras que un valor inferior a 1.7 origina un cemento cuyo fraguado es difícil de regular y que produce un reblandecimiento del concreto en que ha sido utilizado.

C) MODULO DE SILICE.

Define la proporción existente entre la sílice y los óxidos fundentes ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) según la siguiente ecuación:

$$\text{MS} = \frac{\% \text{SiO}_2}{\% \text{Al}_2\text{O}_3 + \% \text{Fe}_2\text{O}_3}$$

Los valores promedio de utilización del MS oscilan generalmente entre 2.4 y 2.7

Cuando el MS aumenta demasiado, se producen cementos de fraguado lento que ofrecen gran resistencia mecánica, pero necesitan una temperatura de calcinación más elevada.

D) MODULO DE FUNDENTES O DE ALUMINA.

Nos define la relación  $Al_2O_3 / Fe_2O_3$  y su valor fluctúa normalmente entre 1.1 y 2.5 . Si se aumenta la proporción de alúmina, el fraguado del cemento obtenido es más rápido, pero la combinación se vuelve más difícil (predominan los aluminatos y no los silicatos, como normalmente debe ser). Si disminuye el MA, pueden presentarse dificultades en el proceso debido a una producción excesiva de fase líquida en el horno.

E) IMPUREZAS PERJUDICIALES.

Las principales que existen en las materias primas y tienen efectos significativos sobre las propiedades del cemento son:

1) MgO, que en su forma "Periclasa", sufre expansiones al hidratarse lentamente (mucho después que el cemento ha endurecido); pudiendo destruir el concreto. Las especificaciones ASTM fijan el límite de 5% máximo.

2) Compuestos de Fluor: la presencia de más de 0.1 % de Flúor en las materias primas (en forma de fluoruro cálcico) produce disminuciones considerables en las propiedades mecánicas del cemento.

3) Los fosfatos, que afectan adversamente la operación en el horno y el fraguado y endurecimiento, si su contenido es mayor de 0.5 %.

4) Los álcalis, en forma de  $K_2O$  y  $Na_2O$ , afectan al funcionamiento del horno y pueden reaccionar con el azufre

presente para formar sulfatos alcalinos capaces de reaccionar con algunos áridos, si se encuentran en cantidades superiores al 0.6% expresados como  $\text{Na}_2\text{O}$ .

5) Los sulfuros, que pueden combinarse con los álcalis con las consecuencias antes expuestas, o pueden ayudar a establecer condiciones reductoras en el horno, que pueden afectar las propiedades mecánicas del cemento fabricado.

## II.5. FORMACION Y COMPOSICION DE LAS FASES POTENCIALES DEL CLINKER DE CEMENTO PORTLAND.

El clinker de cemento tipo Portland se produce por:

Reacción a alta temperatura entre un material rico en  $\text{CaCO}_3$  y otro conteniendo  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en diversas proporciones; hasta formar sus fases constituyentes principales: el silicato tricálcico ( $\text{C}_3\text{S}$ ), el  $\beta$ -silicato dicálcico ( $\beta\text{-C}_2\text{S}$ ), el aluminato tricálcico ( $\text{C}_3\text{A}$ ), y una fase ferrita, correspondiente a la serie de soluciones sólidas  $\text{C}_2\text{F} - \text{C}_2\text{A}$ . Sin embargo, también se encuentran presentes en muchos clínkeres cantidades menores de  $\text{CaO}$ , periclasa ( $\text{MgO}$ ) y sulfatos alcalinos.

La calcinación del material crudo en el horno empieza con una serie de reacciones entre sólidos íntimamente mezclados, y solamente en las últimas etapas del proceso de calcinación se forma la fase líquida que activa las reacciones de formación de los compuestos del clinker. Por lo tanto, la producción de cemento Portland por un proceso de clinkerización, en el que solo una proporción pequeña de la mezcla se vuelve líquida, depende principalmente de cuatro factores: la composición química de la

mezcla, el estado físico-químico de las materias primas, la temperatura y tiempo de calcinación, y la velocidad de enfriamiento del clínker.

Aunque las reacciones químicas que se producen durante la clinkerización son muy complejas y deben ser motivo de un minucioso y profundo estudio, se puede esquematizar brevemente y de una forma muy general, la formación de los cuatro componentes principales del clínker, de la siguiente manera:

TEMPERATURA °C	PROCESO:	PROCESO TÉRMICO:
100	Evaporación del agua higroscópica: $\text{H}_2\text{O} \xrightarrow[100^\circ\text{C}]{\Delta} \text{H}_2\text{O} \uparrow$	Endotérmico
400	Descomposición del $\text{MgCO}_3$ : $\text{MgCO}_3 \xrightarrow[400^\circ\text{C}]{\Delta} \text{MgO} + \text{CO}_2 \uparrow$	Endotérmico
400 - 900	Pérdida del agua de cristalización de los compuestos minerales de la arcilla:	Endotérmico
900 - 1250	a) Descomposición del $\text{CaCO}_3$ : $\text{CaCO}_3 \xrightarrow[900^\circ\text{C}]{\Delta} \text{CaO} + \text{CO}_2 \uparrow$ b) Cristalización de los productos derivados de la pérdida del agua de cristalización de la arcilla. c) Reacciones de formación: $2\text{CaO} + \text{SiO}_2 \xrightarrow[1200^\circ\text{C}]{\Delta} \text{C}_2\text{S}$	Endotérmico  Exotérmico  Exotérmico

###

TEMPERATURA °C	PROCESO:	PROCESO TERMICO:
1250 - 1280	$2 \text{ CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 \xrightarrow{1200^\circ\text{C}} \text{C}_2\text{A}$ $\text{C}_2\text{S} + \text{C}_2\text{A} \xrightarrow{1200^\circ\text{C}} \text{C}_4\text{AF}$	Endotérmico
1280 - 1500	<p>Comienzo de la formación de la fase líquida:</p> <p>a) Mayor formación de fase líquida.</p> <p>b) Formación del <math>\text{C}_3\text{S}</math>:</p> $\text{C}_2\text{S} + \text{CaO} \xrightarrow{\Delta} \text{C}_3\text{S}$ <p>c) Desaparición progresiva de la cal libre.</p>	En total, probablemente endotérmico.

En los hornos horizontales rotatorios, la temperatura máxima se alcanza en la zona de combustión, a unos 5-12 m del extremo inferior, y normalmente está comprendida entre 1300 y 1500°C lo cual tiene por objeto producir un grado de fusión adecuada para lograr que el material se agrupe en pequeñas masas de clinker hasta cierta proporción (20 -30%), por lo que se le conoce como "temperatura de clinkerización". Más allá de la zona de combustión la temperatura baja, por lo que el clinker suele entrar al enfriador a unos 1,100 - 1300°C.

El producto a la temperatura de clinkerización consta esencialmente de cristales de  $\text{C}_3\text{S}$  y  $\text{S}_2\text{S}$  sólidos, juntamente con un líquido que contiene cierta proporción de  $\text{CaO}$  y la mayoría del  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{MgO}$ ; pero relativamente poco  $\text{SiO}_2$ . Por lo tanto,

las fases aluminato y ferrito se forman durante el enfriamiento del clínker (se solidifican), proceso éste durante el cual ocurren, o pueden ocurrir, otros fenómenos como son: Transiciones polimórficas (especialmente en el  $C_2S$ ), cristalización de la periclasa ( $MgO$ ) y reacción entre la fase líquida y los cristales de  $C_3S$  o  $C_2S$  ya formados.

Actualmente, aunque no se conoce con toda exactitud la secuencia de reacciones a través de las cuales se forman los compuestos del clínker, existe un acuerdo general sobre el hecho de que cualquiera que sea el mecanismo, se alcanzan condiciones aproximadas al equilibrio, a la temperatura de clinkerización (suponiendo que la molienda, la mezcla y la calcinación se han efectuado de una manera adecuada), de tal manera que un enfriamiento suficientemente rápido rompe este equilibrio metaestable y provoca que el líquido presente cristalice independientemente de los sólidos ya formados o se separe en forma de vidrio, evitándose con esto la transición polimórfica del  $C_2S$ , de su forma  $\beta$  a su forma  $\alpha$ , la cual carece de propiedades hidráulicas.

### III. DESCRIPCION DE LA INSTALACION.

- III.1. Tipo de proceso y de instalación.
- III.2. Funcionamiento de la instalación.
- III.3. Datos técnicos de la instalación.

#### III.1. TIPO DE PROCESO Y DE INSTALACION.

Como se mencionó anteriormente, la fabricación del clinker de cemento en un horno rotatorio se puede efectuar de tres maneras diferentes, según el estado de humedad que guardan las materias primas al llegar a la etapa de calcinación: vía húmeda, vía seca y vía semiseca.

Para el balance térmico aquí considerado, se trabajó en un sistema por vía seca que consta de los siguientes equipos:

El material crudo proveniente de los molinos secadores de crudo, es bombeado a la parte superior del precalentador, por medio de una bomba Fuller (sistema neumático), pasando previamente por una báscula del tipo de banda pesadora.

El precalentador que se utiliza es del tipo del procedimiento "Polysius", el cual consiste de un intercambiador de calor por suspensión del polvo crudo en los gases calientes que circulan por cada una de las etapas de que consta el precalentador en cuestión (conocido como tipo Dopol).

La Torre Dopol se compone de cuatro etapas numeradas del 1 al 4, en el sentido en que circulan los gases, es decir, de abajo hacia arriba respectivamente.

La primera y la tercera etapa constan cada una de dos ciclones colocados en paralelo, mientras que la segunda etapa está formada por un solo recinto de diámetro superior a los anteriores y que se conoce como "cámara de turbulencia". La cuarta etapa consiste de cuatro ciclones en paralelo que se equilibran por medio de una compuerta rotatoria de velocidad variable regulada por las temperaturas de los gases de salida de los ciclones.

Tanto los ciclones como la cámara de turbulencia están provistos en su parte interior, de concreto o tabique refractario del tipo aluminoso para proteger a los cascos metálicos de las altas temperaturas que se alcanzan en estos puntos.

Para lograr extraer los gases provenientes del horno y del precalentador, se emplea un ventilador de gran capacidad para succionar gases. Como los gases provenientes del horno y del precalentador sirven para secar y deshidratar el material crudo, ~~consideraremos al extractor de gases de la Torre Dopol como el~~ límite de la instalación para los fines del Balance; (ésto es debido a que después del extractor los gases calientes se dividen en cuatro corrientes que se usan para secar el crudo en los molinos y no es posible medir el caudal de cada corriente por su alto contenido de polvos).

El material previamente calentado pasa a un horno horizontal que tiene ligera inclinación para ayudar a desplazarse al material, y que también se encuentra en su parte interna forrado de tabique refractario para protección del casco. (Se entiende que debe ser horno horizontal rotatorio).

En su parte interior se localiza el quemador, el cual es del tipo de lanceta y está sobre el eje del conducto de aire primario, necesario para la atomización del combustible, (además de proveer parte del oxígeno necesario para la combustión).

El clinker formado en el horno es enfriado por medio de un enfriador de parrilla tipo "Fuller", que consta de cinco cámaras y cinco ventiladores que proveen el aire necesario para enfriar el clinker a la temperatura deseada, además de poseer un sistema de recolección de finos de clinker que consiste de una serie de ciclones (14) que precipitan el polvo y eliminan los gases de escape ya limpios por medio de una chimenea.

El aire que generan los cinco ventiladores cruza la parrilla que contiene al clinker, la que tiene un movimiento oscilatorio para ayudar a transportar el clinker hacia su almacenamiento. Por medio de un extractor auxiliar, una parte de este aire ( 2/3 aproximadamente ), se elimina del sistema, mientras que la otra parte se dirige hacia el horno para proporcionar el oxígeno necesario para la combustión completa del combustible empleado en el quemador, además de recuperar una considerable cantidad de calorías del clinker que sale del horno.

### III.2. FUNCIONAMIENTO DE LA INSTALACION.

#### (a) PRECALENTADOR.

El proceso de cocción en un horno rotatorio únicamente llevaba un grado de eficiencia poco satisfactorio por lo siguiente:

El material a cocer, que ocupa aproximadamente un octavo

del volumen libre del horno, se calienta en su parte superior por contacto directo con los gases de combustión calientes y en su parte inferior por tener contacto con la pared interior del horno, altamente calentada por los gases. Sin embargo el material localizado entre los extremos superior e inferior del espacio ocupado queda sometido a un indeseable aislamiento térmico, lo cual ocasiona que para calentar todo el crudo, se requiera un constante removimiento del material y, en consecuencia, un gran periodo de influencia térmica y una mayor longitud del horno rotatorio.

Por todo lo anterior, se ha hecho necesario apartar del horno el proceso de precalentamiento del material crudo y llevarlo a cabo en condiciones más favorables, como sucede en un precalentador de crudo individual, el cual ha alcanzado su máxima versión en aquellos sistemas que siguen el principio de precalentamiento por suspensión del polvo crudo en gases calientes, donde téoricamente cada partícula flota libremente en la corriente gaseosa para provocar un intercambio térmico más rápido y más intenso que en otros tipos de precalentadores.

La invención del intercambiador de calor por suspensión del polvo crudo en la corriente de gases de escape del horno a través de ciclones dispuestos en varias etapas (cuatro en los sistemas Dopol), supuso el desarrollo decisivo de la economía térmica del proceso por vía seca, pues además de someter al material crudo a un tratamiento primario antes de entrar al horno y utilizando únicamente los gases de combustión generados en el

horno en ocasión de la calcinación del crudo, se logró rebajar la temperatura de estos gases residuales hasta los 350°C aproximadamente, cosa que no se había conseguido por otros métodos.

En el precalentador, el intercambio térmico se efectúa por contacto íntimo entre las partículas del material alimentado al sistema, con los gases calientes que provienen del horno y que fluyen a través de los tubos ascendentes y de los ciclones por efecto de la depresión ocasionada por el extractor principal.

Analizando individualmente cada etapa del sistema, se observa que los gases y el material fluyen en igual dirección y en paralelo (excepto en la cuba de turbulencias o segunda etapa), mientras que como un conjunto la instalación funciona a contracorriente.

Como la transmisión de calor a las partículas se lleva a cabo en estado de suspensión, es fundamental que el material crudo presente una gran área de contacto para provocar un intercambio más activo, además de ser deseable que el tamaño de las partículas sea lo más uniformemente posible, para así conseguir una mejor separación en los ciclones y acortar con ésto el tiempo necesario para calentar los sólidos en suspensión.

Además, como las partículas más gruesas requieren tiempos más largos de calentamiento, debido a que son separadas antes de que hayan alcanzado la temperatura de los gases circundantes (en un ciclón, el tiempo necesario para que se depositen las partículas varía inversamente con el cuadrado del diámetro de las partículas, suponiendo que éstas sean esféricas), ocasionando con esto una disminución de la eficiencia térmica, se disponen los ciclones

en serie, de tal manera que el polvo acceda siempre a gases de temperatura creciente.

El proceso Dopol es un tipo específico de precalentador por suspensión del crudo en los gases residuales del horno, desarrollado por el fabricante alemán POLYSIUS (la denominación Dopol se formó a partir de las sílabas iniciales de las palabras "Doppelstrom", que significa "corriente doble", y Polysius). En este caso, las etapas primera, tercera y cuarta, contadas de abajo hacia arriba del precalentador, consisten de ciclones dobles dispuestos en paralelo (aunque la cuarta puede constar de cuatro ciclones), mientras que la segunda etapa, mejor conocida como "Cuba de Turbulencias", está incluida como elemento único, puesto que trabaja a contracorriente y recibe en una sola cámara las dos corrientes de material provenientes de la tercera etapa, para así lograr una distribución más homogénea del calor residual.

La parte más importante de la transmisión de calor se realiza en los tubos ascendentes (el 80% aproximadamente), donde la velocidad de la corriente formada por la mezcla gas-material, es del orden de 20-22 mts/seg. Los gases de salida del precalentador contienen polvo en una proporción de 6 - 8% con respecto al total del material alimentado al sistema, y su caudal oscila entre 1.3 y 1.5 m<sup>3</sup>N/kg clinker.

El material tarda alrededor de 25 segundos en pasar por las cuatro etapas, desde su introducción a los ciclones de la cuarta etapa hasta la entrada al horno, para una altura de torre de cincuenta metros aproximadamente. Durante este intervalo de tiempo, el material se calienta desde unos 50°C hasta el orden de

los 800°C y alcanza un grado de descarbonatación del 50 - 60%, mientras que los gases que ascienden se enfrían desde los 1,100°C hasta unos 350°C aproximadamente.

#### CAMINO DEL MATERIAL EN EL PRECALENTADOR.

El material se alimenta al sistema por medio de dos ductos que descargan a los ductos de gases de los ciclones de la cuarta etapa, regulado por medio de esclusas que operan como un sello que impide la salida de gases calientes por puntos indeseables y, a la vez, impiden la entrada de aire falso al sistema. Un poco abajo de las entradas de material a los ductos de gases, se encuentra instalada en cada una de ellas una vigueta que hace la función de dispersor, pues el material choca y se dispersa para obtener una mayor área de contacto de éste con los gases calientes que fluyen por los ductos y que van a transportar el crudo en el seno del fluido hasta los ciclones correspondientes donde, por acción de las fuerzas centrífuga y de gravedad, el material se separa de los gases y cae al fondo de los conos, para finalmente descargar por unos tubos provistos de chapaletas (doble válvula pendular) reguladoras de la caída de material, al ducto de gases situado entre la segunda y la tercera etapa, impidiendo además el paso de gases a la cuarta etapa por lugares inadecuados y evitando con esto el arrastre del polvo que ya pasó por esta etapa.

El último ducto de gases mencionado, situado sobre la "cuba de turbulencias", está provisto también de dos dispersores que ayudan a aumentar el área de contacto de las partículas con gases de escape de la segunda etapa, y así éstos transportan el

polvo en suspensión hasta los ciclones de la tercera etapa. Aquí se vuelven a separar los gases y los sólidos, y éstos van a descargar a la "cuba de turbulencias" por la parte superior de la misma, hasta chocar con una placa que los dispersa dentro de la cámara en forma de lluvia, para luego caer lentamente al fondo de la etapa siguiendo una trayectoria opuesta al flujo de gases, absorbiendo el calor de los gases y aumentando gradualmente su temperatura, a tal punto que las partículas abandonan la etapa a mayor temperatura que la correspondiente a la de salida de los gases de escape, única etapa en que se produce este fenómeno. Esto último se debe a que los gases pierden velocidad al pasar de un ducto de menor diámetro a otro mayor y a que ascienden en forma turbulenta, debido a sus dos entradas tangenciales a la cámara por la parte inferior, todo lo cual ocasiona que los gases no puedan arrastrar el material hacia la parte superior de la etapa y obteniéndose así un mayor intercambio térmico, pues a medida que desciende va encontrándose con gases de mayor temperatura.

El material de descarga de la segunda etapa cae al ducto de gases de entrada a los ciclones de la primera etapa, donde otra vigueta hace las veces de dispersor del material, para que éste sea suspendido por los gases en los ciclones hasta lograr llevar a cabo la última separación entre los gases y el polvo antes de introducirse éste, ya precalentado, al horno. Todos los ciclones del precalentador se encuentran revestidos de material refractario que protege los cascos metálicos de los choques térmicos y evita excesivas pérdidas por radiación en el sistema.

Estos ciclones deben trabajar con una eficiencia de separación del orden del 90-95%, para cumplir satisfactoriamente con su cometido.

#### TRAYECTORIA DE LOS GASES EN LA TORRE.

Los gases de escape del horno entran al ducto de gases de la primera etapa, lugar donde reciben el material procedente de la segunda etapa. Aquí lo suspenden y lo transportan hasta los ciclones correspondientes, separándose por centrifugación y pasando a los ductos de gases de la "cuba de turbulencias" o segunda etapa. En este lugar, los gases acceden a la cámara en direcciones opuestas y en forma tangencial, provocando con ésto la formación de una especie de "remolino" de muy baja velocidad debido al mayor diámetro del recinto, lo que ocasiona que los gases no sean capaces de suspender el crudo que desciende por la etapa.

Al salir de la etapa los gases pasan a un ducto de menor diámetro que les hace aumentar su velocidad nuevamente y así puedan suspender el polvo descargado de la cuarta etapa, para arrastrarlo hasta los ciclones de la tercera etapa. Aquí se separan de los sólidos y pasan a los ductos de gases de la cuarta etapa, donde reciben, suspenden y transportan el material alimentado por primera vez al sistema hasta los ciclones correspondientes, para finalmente separarse y fluir por un ducto único de gases que los lleva hasta el extractor principal que guía el flujo de gases desde el horno, con una temperatura cercana a los 350°C.

Siempre que se hable de precalentadores de torre, deben

tomarse en cuenta dos aspectos:

a) la eficiencia térmica, la cual se mide por el consumo de combustible del horno y se afecta principalmente por tres factores: la calidad de la dispersión del material en los gases, el grado de captación de los ciclones y las entradas de aire falso;

b) la resistencia al paso de gases, que limita la succión provocada por el extractor y, en consecuencia, la producción del horno, y se detecta por la evolución de las depresiones en las diferentes etapas del precalentador.

Aunque resulta prácticamente imposible hablar de datos característicos en lo que se refiere a depresiones y pérdidas de carga en precalentadores de torre, debido a las altísimas dispersiones encontradas en la bibliografía y en la práctica, en cambio si es posible hablar de rangos y comportamientos generales de este tipo de precalentadores. Así se observan puntos tan interesantes como: el mayor intercambio de calor entre gases y material se efectúa en la etapa conocida como "cuba de turbulencias"; las temperaturas del material son ligeramente inferiores (20-30°C) a las del gas a la salida de la etapa correspondiente, excepto en la etapa a contracorriente (segunda), en la que los sólidos salen a una temperatura entre 40°C y 80°C mayor a la de los gases; las pérdidas por radiación oscilan entre 6 y 12 Kcal/kg clínker, etc.

No puede hablarse de la eficacia de un precalentador sin hacer alusión al horno al que está acoplado, por la estrecha interrelación que existe entre estos equipos para provocar el

posterior comportamiento de todo el sistema: a horno de mayor longitud menor descarbonatación en la torre y viceversa. En la actualidad, no existe ninguna manera precisa de determinar el grado de descarbonatación real producido en el precalentador por varias causas: el resultado obtenido a partir del análisis de gases se afecta por errores en la toma de las muestras (más adelante se indicará), mientras que el calculado a partir del análisis de pérdida al fuego del material de salida de la primera etapa, se ve afectado por la recirculación de polvos del horno y porque se carbonata fácilmente en presencia del aire atmosférico. Se considera un grado de descarbonatación alto, cuando excede al 50% y bajo cuando es menor del 40%; obtenido por medio del análisis de pérdida al fuego; por el análisis de gases, los límites se pueden fijar en un 40% el alto y en un 30% el bajo.

Sin embargo, para obtener una mayor economía del proceso de calcinación, todos estos datos deben checarse con cierta frecuencia y analizarse conjuntamente con el consumo calorífico global, para obtener conclusiones acerca del comportamiento general del sistema ( con respecto a los valores usuales y lo recomendado por el fabricante), tales como los siguientes postulados básicos:

- 1) Consumo calorífico elevado, con grado de descarbonatación alto, indica una baja eficiencia del enfriador;
- 2) Consumo calorífico elevado, con grado de descarbonatación bajo y temperatura de gases elevada, indica un trabajo deficiente del precalentador;

- 3) Consumo calorífico elevado, con pérdidas por radiación y eficacia del enfriador correctas (ambas magnitudes medibles), implican una mala eficiencia del precalentador, independientemente del grado de descarbonatación del material a la entrada al horno.

Para mantener, y aún más, aumentar la eficiencia del precalentador, es necesaria la revisión periódica de los dispersadores, de los tubos de inmersión de los ciclones y de las entradas de aire falso al sistema (con respecto a los gases de salida del horno; su valor nominal oscila entre 8 y 15 %). Además, los gases de escape de la torre deben arrastrar polvos en una cierta magnitud, delimitada generalmente por el fabricante entre el 6 y el 10% con respecto a la cantidad de material alimentado al sistema. Una concentración excesiva de polvos en los gases de escape, indica una débil captación de los ciclones de la cuarta etapa ó una excesiva concentración de sólidos en los gases de entrada a esta etapa, provocada por una mala captación en las etapas anteriores, fenómeno que viene acompañado por un aumento en la temperatura de los gases y un mayor consumo térmico en el horno.

(b) HORNO ROTATORIO.

El material, que ha sido calentado previamente en el precalentador tipo Dopol, se introduce por dos ductos recubiertos con material refractario a los lados de la recámara de alimentación al horno, de tal manera que los gases de escape de éste, tengan el menor contacto en este punto con el material para evitar que sea arrastrado. En el horno rotatorio es donde se llevan a cabo las reacciones entre los diferentes compuestos de las materias primas que dan origen al clínker.

Podemos definir al horno rotatorio como un dispositivo para generar y aplicar altas temperaturas para transformar el crudo en clínker, por combinación de los óxidos componentes de las materias primas.

El horno consta de un cilindro de acero de bajo contenido de carbón, recubierto en su interior con material refractario para su protección; su transmisión está integrada por dos motores (uno eléctrico, el principal; y el auxiliar de combustión interna), una caja de engranes que hace las veces de reductor, un piñón y la corona del horno. Generalmente está sostenido por tres soportes, formados por dos rodillos cada uno y que reciben el nombre de "roles"; además, en cada uno de estos puntos se localiza rodeando al casco un aro de rodadura, mejor conocido como "llanta" en la industria cementera. El soporte del extremo por donde se alimenta el material, es mantenido en posición constante por medio de candeleros, discos de acero colocados perpendicularmente a la llanta y que permiten un movimiento axial mínimo de ésta, de tal manera que las expansiones del casco se realicen hacia los

extremos del horno cuando se eleve la temperatura, teniendo este soporte como punto límite.

Las llantas son de diseño flotante, es decir; no están fijadas al casco del horno y pueden girar con relación a él. Entre el cilindro de acero y el diámetro interior de la llanta, se encuentran placas de apoyo soldadas en forma conveniente sobre el casco y con un dispositivo de lubricación que permite inyectar grasa de alta temperatura entre las placas y la llanta para facilitar su libre movimiento.

Para reducir los efectos del rozamiento entre las llantas y los "roles", se instala en uno de los rodillos de cada base una placa de grafito para lubricar el sistema, apoyada directamente sobre la cara del rodillo. Estos cuentan con un sistema de lubricación de anillos y sus chumaceras de apoyo son circulares con sus correspondientes tejuelos para evitar el movimiento axial, además de contar con un sistema de enfriamiento de agua.

En virtud de la excesiva radiación de calor generada por el casco del horno hacia los roles, se coloca en cada uno de ellos una pantalla de dos placas de lámina, separadas e inclinadas, formando un colchón de aire que al calentarse asciende y establece una cierta circulación que origina la continua renovación del mismo, con lo que se absorbe el calor irradiado por el casco y protegiendo así a las chumaceras de los roles.

En el extremo de alimentación del horno, se cuenta con un sello que evita fugas de material y que trabaja por la acción de placas de desgaste que se ajustan entre sí, por medio

tornillos con resorte que las mantiene en constante rozamiento. En el interior, en la parte metálica del casco y como parte del dispositivo del sello, existe un sistema de levantadores que regresan hacia el horno al material que tiende a fugarse por la parte inferior.

El horno realiza un movimiento rotacional con la ayuda de un motor eléctrico de corriente continua, de velocidad variable y que acciona, a través de un cople del tipo de "quijadas", al reductor principal (de tres pasos de velocidad), el que a su vez acciona por medio de un cople flexible a la flecha del piñón principal, para que finalmente éste mueva la corona que está montada directamente sobre un sistema de muelles en el casco del horno (el sistema de muelles evita que la dilatación radial del casco, ocasionada por aumentos de temperatura, provoque un desalineamiento de la corona). Para girar el horno en los períodos en que no hay energía eléctrica o durante el paro o arranque del mismo, y con el único objeto de evitar que se deforme el casco, se cuenta con un motor de combustión interna que acciona al reductor por medio de un segundo reductor y otro cople de "quijadas".

En el extremo de descarga de material del horno está la zona considerada como de enfriamiento, la que se localiza precisamente adelante y hacia la descarga de la zona de clinkerización. En la industria cementera, a esta zona del horno se le conoce con el nombre de "nariz", y cuenta por su parte exterior con un ventilador que le suministra aire por medio de un ducto y secciones

en forma de toberas para concentrar el aire en esta sección. Inmediatamente después de la nariz, se localiza la carátula del horno, la que está montada sobre ruedas metálicas que facilitan su retiro durante el montaje o para reparaciones más o menos largas. Sobre el frente de la carátula se localizan varios registros que tienen diversas finalidades: para observación directa del interior del horno, para la colocación del pirómetro óptico que envía una señal que registra en una gráfica el valor de la temperatura en la zona de calcinación; para la instalación de una cámara de televisión en circuito cerrado que transmite al tablero de control, la imagen que se tiene del interior del horno; para la colocación de un cañón que permite tirar anillos en el interior del horno; para la instalación del quemador de combustible, etc.

El quemador, cuya finalidad es llevar a cabo la combustión del combustóleo, para producir el calor necesario para llevar a cabo las reacciones químicas que dan origen al clínker, está formado por los siguientes elementos: soporte, aparatos de regulación y medición, pulverizador, pastilla, ductos de alimentación de aire, combustóleo, lanza y tobera.

Existen dos flujos en el quemador: de combustóleo y de aire, cuya mezcla permite regular la combustión y la forma de la flama. A su vez, el combustible está dividido en dos corrientes: la primaria, que provoca rotación; y la secundaria, que alarga la flama.

El aire necesario para la combustión, también está formado

por dos corrientes llamada "aire primario" y "aire secundario" (el que proviene del enfriador). A su vez, el aire primario también se divide en dos: el interior, que sirve como elemento de rotación; y el exterior, que da el movimiento axial, y su mezcla apropiada ayuda también a regular la forma de la flama. Por último, un punto muy importante para la buena marcha del proceso lo constituye la posición del quemador en el horno, cuya posición correcta es un poco abajo del eje central del horno y ligeramente cargado hacia el talud de material.

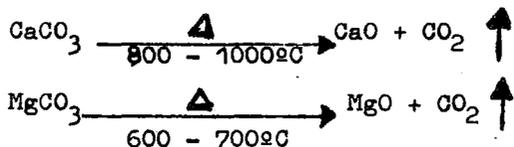
Para efectos de avance de material dentro del horno, el cilindro horizontal gira, a velocidades angulares comprendidas generalmente entre 1.3 y 1.8 RPM, y presenta una cierta -- inclinación con respecto al eje horizontal, que varía entre el 2% y el 4% de la longitud total del horno (tangente del ángulo de inclinación). Esta pendiente influye drásticamente en el grado de llenado del horno, que no es más que la relación del área que ocupa el material a la sección total del horno expresada en porcentaje, y cuya magnitud oscila entre el 5% y el 17%, aunque su valor más generalizado es del 13%. Además, con la pendiente del horno fija y con el control de la velocidad angular, se regula a voluntad el tiempo de permanencia del material en él.

Dentro del horno fluyen dos corrientes que avanzan en sentido opuesto: una de gases calientes que va del quemador hacia el precalentador y que pierde calor a medida que avanza, y otra del material sólido proveniente del precalentador y que se

dirige hacia el quemador, aumentando gradualmente de temperatura a medida que avanza en el horno. Durante todo este tiempo se producen varios fenómenos físico-químicos en el material: descarbonatación total, preparación, clinkerización y enfriamiento en sucesivas e invariables etapas, provocados por la cesión e intercambio térmico, tanto de los gases como del refractario y del recubrimiento de éste (costra), del propio material entre sí y en la última zona, incluso por radiación directa de la flama. Una vez pasada la zona de influencia de la llama, el material sufre un enfriamiento debido a su encuentro con aire de menor temperatura, procedente del enfriador y que se utiliza en la combustión como aire secundario.

De acuerdo a los fenómenos que se llevan a cabo y a las temperaturas existentes en el horno, se detectan claramente varias zonas:

1) La zona de preparación, hasta los 1,100°C aproximadamente, donde los carbonatos todavía existentes se descomponen por acción del calor para producir óxidos con carácter alcalino según las siguientes reacciones:



En los hornos con precalentador de torre, la descarbonatación comienza en la segunda etapa y termina en los primeros metros del horno, cuando el material ha alcanzado ya los 1,000°C.

2) La zona de calcinación, la que en realidad es una prolongación de la zona de preparación y en la que se calienta el material hasta alcanzar una temperatura de  $1300^{\circ}\text{C}$  -  $1350^{\circ}\text{C}$  - aproximadamente, temperatura en la cual teóricamente comienza la formación de la fase líquida, debido a la aparición de puntos eutécticos de los componentes fundentes del crudo: alúmina, óxido férrico, óxido de magnesio y álcalis (óxido de sodio y óxido de potasio); asimismo, comienzan las reacciones químicas con la formación del silicato bicálcico.

La formación de la fase líquida antes citada, resulta esencial para efectos de facilitar las reacciones subsecuentes de clinkerización. La proporción de fase líquida formada en cierto momento depende de la temperatura de trabajo y de la cantidad existente de fundentes. Además, es la responsable directa de dos fenómenos que se presentan en el horno: aglomeración del material y adhesión de éste al refractario, para formar la costra que va a proteger al forro refractario en la zona de clinkerización.

3) La zona de clinkerización, a los  $1450^{\circ}\text{C}$  aproximadamente, que es cuando se empiezan a formar los compuestos que van a dar origen al clínker: el óxido de calcio se combina con los demás componentes del crudo (solo con los óxidos de carácter ácido) para formar el clínker, mientras que el óxido de magnesio, aunque no se combina, interviene en la formación de la fase líquida y ayuda a bajar la temperatura de combinación de los silicatos. Al final de la zona se han formado los siguientes

compuestos: silicato tricálcico ( $C_3S$ ), silicato bicálcico ( $C_2S$ ), aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) y ferroatuminato tetracálcico ( $C_4AF$ ). La cal que no se combina se va con el clinker y su presencia en el cemento produce expansiones.

En general, en un horno rotatorio se desarrollan dos procesos: el proceso termoquímico y el transporte de material. El proceso termoquímico provoca que el material no avance con la misma velocidad a todo lo largo del cilindro, puesto que ocasiona variaciones físicas y químicas en el material durante el proceso de calcinación; sin embargo, existe una cierta regularidad en el comportamiento general del material en todos los hornos: la velocidad más pequeña se presenta en la zona de clinkerización y la más alta se observa en la zona de calcinación. Además, se debe considerar que el movimiento general del crudo en el interior del horno se ve influenciado en gran medida, por el estado físico que guardan las materias primas al penetrar en éste (sea en forma de nódulos o en forma de harina): en el horno alimentado con mezcla cruda seca y finamente dividida (como es éste el caso), en una cierta fase se forman nódulos, cuya cantidad y tamaño dependen primordialmente de la composición química y de la granulometría de la harina introducida al sistema. Si la proporción de nódulos formados es muy baja con respecto al total alimentado, la harina exhibirá un modelo muy irregular de movimiento que provocará una alimentación irregular del material a la zona de clinkerización y, en consecuencia, cambios bruscos en la distribución de temperaturas en el horno y variaciones considerables en la formación de costra sobre el refractario, que ocasiona

desgastes poco uniformes y prematuros de éste (aunque generalmente estos procesos exhiben consumos refractarios específicos más bajos, que los hornos que trabajan con otros tipos de procesos).

Por todo lo mencionado anteriormente, acerca de la evolución del material en las diversas fases del proceso, se deduce la importancia que guarda la composición del crudo en el desarrollo de éste. En la práctica, esta composición química viene definida por las relaciones: grados de saturación de la cal, módulo de sílice y módulo de alúmina. Asimismo, quedó demostrada la gran influencia que en todo esto tiene la finura del material crudo alimentado al horno, lo cual se comprende porque la mayor parte de las reacciones que se producen en éste, se llevan a cabo en estado sólido por contacto superficial entre las partículas, y este contacto es mayor cuanto mayor es la finura.

El consumo específico de energía ( $\text{Kw/m}^3$  horno) en la etapa de calcinación del crudo, varía de acuerdo al diseño del proceso; para hornos con precalentador por suspensión del crudo en gases, este consumo es del orden de  $0.208 - 0.222 \text{ Kw/m}^3$ , y son los que presentan el más alto consumo de energía específica debido a que aumenta la relación longitud de zona de clinkerización a longitud total del horno, provocando con esto que se presente el clinker en mayor proporción, y como el talud natural del clinker es mayor que el de crudo, se necesita mayor momento de giro y, en consecuencia, una potencia más elevada del motor. En explotación normal, la potencia efectiva exigida por el horno es de --  
--aproximadamente-- el 40%-60% de la potencia instalada, quedando

el resto a disposición de eventuales perturbaciones en el - proceso, como sucede cuando se produce un desprendimiento de costra, de-melición de anillos, etc.

El tiempo de actividad de un horno depende, en primer lugar, de la calidad del revestimiento interior, para el que se prescinde de su alto costo en aras de obtener el material de mejor calidad, pues las paradas de horno debido a la mala calidad del material refractario producen cuantiosas pérdidas en producción.

Es interesante observar que, actualmente, la disponibilidad de grandes instalaciones de hornos oscila alrededor de un 80% debido principalmente a reparaciones de refractario, y por razones económicas este valor debería ser del 90%. En este tipo de hornos, en el que aumentan considerablemente las cargas termo-mecánicas, se observa un consumo específico de material refractario del orden de 0.5 kg/T clinker aproximadamente, para aspirar a obtener un factor de utilización del orden del 90%.

Además, en aquellos hornos con diámetros internos mayores de cuatro metros, el forro refractario en la zona de preparación (etapa de transición), alcanza una vida sustancialmente más corta que aquel en la zona de clinkerización, debido al hecho de que en la fase transicional, la costra formada es débil y delgada (en todos los hornos), y en aquellos sistemas de mayor diámetro es menos capaz de mantenerse como una protección al refractario, debido a que los cambios térmicos a que está expuesto éste son mayores en cada ciclo del horno.

El forrar el casco del horno rotatorio con revestimiento

refractario en su parte interior tiene varias razones de ser: proteger al casco de acero del horno de las altas temperaturas de la flama y del material en proceso de reacción; disminuir las pérdidas de calor por radiación; absorber energía térmica de los gases para cederlo al material durante la rotación del horno, etc. Además, el material refractario reacciona con el crudo alimentado cuando éste se encuentra en su fase líquida para formar la "costra" necesaria para la protección de todo el horno.

Para que un material refractario sea útil para forrar un horno rotatorio de cemento, debe cumplir con varios requisitos: resistencia mecánica, poder refractario bajo presión, estabilidad bajo los cambios de temperatura, capacidad de resistencia química, dilatación por el calor, conductividad térmica, resistencia al rozamiento, baja porosidad, etc. En la industria del cemento, básicamente se utilizan dos tipos de refractarios:

a) Refractario sílico-aluminoso: tienen como materia prima básica, un tipo de arcilla no deformable por fusión. Soportan hasta 1600°C en atmósferas oxidantes, elevando su temperatura a razón de 10°C cada minuto. Se emplea en casi la totalidad del horno, variando la proporción de alúmina en función de las temperaturas de las distintas zonas del horno.

b) Refractario de magnesita: su materia prima básica son los óxidos de magnesio. Se emplean en la zona de clinkerización, con pequeñas adiciones de óxidos de cromo en ocasiones, y se consiguen duraciones muy superiores a las obtenidas con los sílico-aluminosos de más alto contenido de alúmina.

Para hornos de gran diámetro, se ha demostrado la gran --

influencia que tiene el estado mecánico del cilindro sobre la vida de la mampostería refractaria en cada zona del horno, sobre todo en aquellas donde se localizan las llantas y los roles, zonas que se conocen con el nombre de "virolas" por tener el casco reforzado y que, pese a todo, experimentan deformaciones por la presión de apoyo de los rodillos sobre las llantas, las que se aplanan y les transmiten su deformación. La camisa del horno en su deformación semeja una elipse con el mayor diámetro en dirección horizontal. En cada vuelta del horno la curvatura de la "virola" cambia varias veces y transmite al refractario estos cambios, por lo que éste gradualmente se deteriora a causa de los variables esfuerzos a que está sujeto. Por lo tanto, la ovalidad del horno no debe sobrepasar del 0.2 - 0.3% con respecto al diámetro del horno.

Otro punto que afecta sustancialmente al factor de utilización, son los paros menores del equipo, que en instalaciones grandes puede exceder de cien por año. Los paros más frecuentes se atribuyen principalmente a problemas asociados con los grandes enfriadores de clínker y al equipo auxiliar, altamente sofisticado, instalado para el control y supervisión de estas plantas. Ahora bien, el grado de disponibilidad de un horno grande, siempre es menor que el de un horno de diámetro inferior, independientemente del número de paros menores de ambos, debido al hecho de que las pérdidas de tiempo asociadas con el enfriamiento, demolición, limpieza, colocación del refractario y calentamiento, son -- significativamente más grandes en los hornos de diámetros -- superiores.

Para conocer el rendimiento real del horno, es práctica común en la industria cementera, emplear el dato de producción específica del horno, el cual nos da la relación entre la producción de clínker durante veinticuatro horas y el volumen total del tubo.

Para hornos con precalentador por suspensión del crudo en gases, la producción específica generalmente oscila entre 1.4 y 1.8 ton/m<sup>3</sup> en veinticuatro horas, y su consumo calorífico no debe exceder de 800 - 900 kcal/kg clínker, cuando se trata de hornos que trabajan con altos rendimientos.

(c) ENFRIADOR.

El objeto de colocar un enfriador inmediatamente después del horno rotatorio para recibir el producto formado, se puede explicar por las siguientes razones:

(i) someter al clínker a un enfriamiento brusco para estabilizar así su estructura y composición mineralógica, cosa que influye notablemente en las propiedades del cemento a fabricar, por lo siguiente: el enfriamiento lento provoca que casi todos los componentes mineralógicos presentes en el clínker cristalicen, mientras que en un enfriamiento rápido una parte de la fase fundida solidifica en estado vítreo, lo que además impide el crecimiento de los cristales formados. Todo lo anterior trae como consecuencia que el compuesto predominante en el clínker sea el silicato tricálcico y no el bicálcico, lo que ocasiona un mejoramiento de la calidad del clínker, pues éste es el componente del cemento que aporta la mayor resistencia mecánica con sus propiedades hidráulicas. Además, el enfriamiento lento provoca reacción reversible del silicato bicálcico, de su forma  $\beta$  (beta) a su forma  $\gamma$  (gama) compuesto éste que aumenta de volumen al hidratarse, ocasionando así que el cemento se expanda durante el fraguado, además de carecer por completo de propiedades hidráulicas.

(ii) disminuir los costos de fabricación del cemento al aprovechar buena parte del contenido térmico del clínker que abandona el horno, el cual es del orden de unas 200 kcal/kg clínker.

(iii) proporcionar al horno el aire secundario necesario

para llevar a cabo completamente la combustión, cosa que sería imposible utilizando únicamente el aire que proporciona el quemador para la atomización del combustible (aire primario).

(iv) aumentar la molturabilidad del clínker (facilidad de molienda), pues el tamaño de los cristales formados durante el proceso de estabilización de los componentes mineralógicos influye grandemente en la molienda posterior: cuando se forman cristales grandes, es decir, cuando el enfriamiento es lento, el trabajo necesario a realizar por los molinos aumenta y, en consecuencia, el consumo de energía se hace mayor.

(v) facilitar la posterior manipulación del clínker cuando se hace necesario transportarlo hasta la sala de molienda, además de proteger así al equipo de las altas temperaturas existentes en este momento.

En la industria cementera existen diversos equipos para el enfriamiento del clínker, entre los que podemos mencionar los siguientes:

(A) ENFRIADORES ROTATORIOS:

Constan de tubos inclinados que elevan y dejan caer luego el material, por lo que tienen ventilación a contracorriente. Son de una gran simplicidad mecánica y tienen buena recuperación del calor contenido en el clínker, pero tienen el inconveniente de ser de gasto limitado y la fijación del silicato tricálcico no es muy buena.

(B) ENFRIADORES DE SATELITES:

Equipos muy voluminosos, constan de tubos paralelos que se

fijan alrededor del casco del horno a la salida del clinker. Son muy simples mecánicamente y pueden permitir un gasto ilimitado de aire, pero tienen el inconveniente de que el enfriamiento no permite mucha regulación y la fijación del silicato tricálcico no es muy buena.

(C) ENFRIADORES DE PARRILLA:

Procesados por varios fabricantes, Fuller, Recupol, - Follax, etc., constan de una o varias parrillas móviles que forman una cierta "cama" de clinker de espesor variable y que es atravesada, de abajo hacia arriba, por una corriente de aire. Permite gastos ilimitados con un enfriamiento y una recuperación de calor excelentes, además de una fijación del silicato tricálcico muy buena. Tienen los inconvenientes de su alta complejidad mecánica, la fragilidad de sus piezas y, sobre todo, su alto precio en comparación con los otros tipos de enfriadores existentes en la industria cementera.

Como se mencionó anteriormente, el enfriador que utiliza la fábrica donde se llevó a cabo el balance térmico, es del tipo de parrilla, marca "Fuller", y el que consta de las siguientes partes: una parrilla formada por una serie de placas fijas y otra serie de placas móviles que realizan un movimiento oscilante, con una entrada de material inclinada a 45°; consta de cinco cámaras con sus respectivos ventiladores y equipos auxiliares necesarios para desalojar los "finos" de clinker que atraviesan las placas ranuradas. A la altura de la tercera cámara se instaló un ventilador que inyecta aire a una cámara más estrecha, a mayor presión, para que atravesase completamente la "cama" de

clínker, formándose así una cortina que divide el aire de enfriamiento en dos partes con el fin de utilizar la porción más caliente como aire secundario para la ignición del combustible en el horno y el sobrante se escape por la chimenea auxiliar por efectos del extractor secundario. La cantidad de aire inyectado en la primera cámara es menor que en las subsiguientes, pero a mayor presión, para aumentar con esto el estado fluidizado del lecho de clínker, cosa que provoca un mayor intercambio térmico. Del total de aire inyectado al enfriador, un 25% se suministra a la entrada del material, un 50% en el centro y un 25% a la salida del enfriador aproximadamente, y su caudal oscila entre 1.8 y 2.5 m<sup>3</sup>N aire/kg clínker normalmente.

Entre los equipos auxiliares de que consta el enfriador de parrilla en cuestión, se pueden mencionar los siguientes: el transportador de cadenas de arrastre (conocido como "rastra") que se encuentra abajo de la parrilla para transportar los finos de clínker hasta el almacén correspondiente y que consta de las siguientes partes: una serie de eslabones unidos entre sí y que giran en forma de banda, y una transmisión que viene dada por un motor eléctrico acoplado a unas catarinas.

En la descarga de la parrilla enfriadora se tiene instalado un molino del tipo de martillos, cuya finalidad es reducir el tamaño del clínker que sale del enfriador, por varias razones: aumentar su velocidad de enfriamiento, facilitar su transporte y, sobre todo, reducir el trabajo de los molinos de cemento. Está formado por una serie de martillos colocados alrededor de un

eje que gira por efecto de un motor acoplado, por medio de un sistema de poleas y bandas, a la flecha del molino (la velocidad del molino es constante). En la parte inferior del molino se tiene una serie de placas tipo "Griesley", que permite el paso únicamente de las partículas de tamaño adecuado. El sentido de giro del molino es de tal manera que tiende a levantar los trozos que llegan a la criba, para evitar que ésta se dañe y regresar al clinker un poco hacia la parrilla para proseguir así su enfriamiento.

En este caso, se cuenta con un filtro a la salida del enfriador para purificar los gases que abandonan el sistema, al no utilizarse como aire secundario y que escapan a la atmósfera.

Se conoce con el nombre de "filtro de Gravas" y consta de una serie de ciclones (catorce en total) que contienen una cama de carbón que retiene los finos de clinker al atravesar los gases el lecho formado en el interior de cada ciclón.

El enfriamiento se lleva a cabo al forzar el aire ambiental hacia arriba con la ayuda de una serie de ventiladores, -- obligándolo a atravesar el material que se transporta a lo largo de toda la parrilla por la acción del movimiento recíproco de las placas.

Al pasar el aire frío a través de la cama de material, el calor se transfiere del material al aire y éste se expande, lo que provoca que se requiera, para mantener el flujo de gas deseado, una mayor presión en el lado de la alimentación al enfriador, donde la transferencia de calor es alta, y menor en

la descarga del enfriador, zona donde la transferencia de calor es relativamente baja.

Debido al cambio de condiciones a lo largo de todo el enfriador, el compartimiento inferior, conocido como "Cámara de Ventilación", está dividido en pequeños compartimientos, cada uno dotado con su propio ventilador, que proporciona un cierto volumen de aire a una presión compatible con las condiciones existentes en la sección correspondiente: En el inicio del enfriador, la presión de aire requerida es mayor debido a la necesidad de realizar un rápido enfriamiento del material, y cambia rápidamente en el transcurso de éste, por lo que el compartimiento donde empieza la alimentación es corto. Al bajar las necesidades de altas presiones de aire los cambios que se efectúan son progresivamente en menor escala, por lo que los compartimientos, también progresivamente, son más largos. Este arreglo minimiza la cantidad de aire frío que se requiere que pase por la cama de clínker para enfriarla, con las correspondientes presiones más bajas requeridas en cada tramo del enfriador.

La óptima recuperación de calor en un enfriador de parrilla se logra manteniendo una cantidad de aire de enfriamiento y una altura de cama convenientes. La resistencia al flujo de gas de esta cama de material está en función de su altura, de la granulometría del clínker y del flujo de aire; se regula por medio de la velocidad de la parrilla y generalmente se mantiene a un nivel predeterminado que asegura un tiempo conveniente de retención y distribución del aire para

un óptimo enfriamiento.

El interior de un enfriador de este tipo está dividido en dos cámaras separadas por la línea de las parrillas: La cámara superior, donde el material es enfriado y se manejan los gases calientes, y el compartimiento inferior por donde entra el aire frío. La línea de la parrilla consiste de varias placas perforadas, colocadas en filas traslapadas y en forma angular; además, ciertas filas alternadas son móviles y están conectadas a un marco rodante que se mueve rectilíneamente accionado por una transmisión excéntrica, lo que provoca el movimiento recíprocante: el número de vaivenes de las placas móviles varía en un rango de 6 a 17 por minuto, y su desplazamiento es de 120 mm en cada vaivén; sus dimensiones son de 300 mm por 410 mm, y la carga específica que soportan es del orden de 27 a 32 toneladas de clínker /m<sup>2</sup> en veinticuatro horas.

Las particiones de la cámara inferior están equipadas con sellos para preservar la hermeticidad de los compartimentos en las uniones. Además, también está equipada con algún medio para remover los finos que se pasen a través de los orificios de las placas sin romper la hermeticidad de cada compartimento.

El ventilador de cada compartimento se monta por separado de la estructura del enfriador y proporciona el aire por medio de unos ductos de interconexión. Los ventiladores de los dos primeros compartimentos están equipados con persianas motocontroladas que permiten un control automático, mientras que los ventiladores de los siguientes compartimentos tienen persianas de operación manual.

El enfriador está equipado con puertas de acceso a la cámara superior y a cada uno de los compartimentos inferiores, mientras que unas ventanas de inspección, a los lados, permiten observar las condiciones de la cámara inferior en el interior del enfriador, incluso en operación. Un tubo de observación, desde el cuarto de control, apunta hacia la cama de material en la zona de mayor recuperación de calor, y una ventana sobre la machacadora de martillos permite observar la cámara superior por el extremo de descarga.

Todos los enfriadores operan con una serie de equipos auxiliares para control y protección del equipo. Entre éstos, podemos citar como los más comunes a los siguientes: Un detector de movimiento, consistente en un magneto y un contador de tiempo que suministra una señal de alarma o inicia el paro en cascada cuando se detiene la parrilla; un sistema de detección de temperatura de los finos de clínker, el cual activa una alarma en caso de que la cantidad de finos que pasa a través de las placas de cualquiera de los dos primeros compartimentos sea excesiva; termocoples en las placas de cada uno de los dos primeros compartimentos que activan una alarma si la temperatura de las placas aumentó arriba de un nivel predeterminado (generalmente 300°C); válvulas de descarga (usualmente neumáticas, pero también pueden ser hidráulicas o eléctricas) que hacen la función de sellos herméticos entre el fondo de cada compartimiento y el ducto de descarga de finos, que se conocen con el nombre de "válvulas de Platco"; transportador por cadenas de

arrastre, para desalojar del enfriador los finos que caen bajo la parrilla; sistema de lubricación automática para los principales puntos de fricción, etc.

La velocidad del enfriador y el aire requerido para enfriar el clinker son directamente proporcionales a la producción y a las condiciones de proceso existentes en el momento, además de que siempre trabajan en conjunto: la presión del aire bajo la parrilla en el primer compartimento, que no es más que una indicación de la resistencia de la cama de material, regula la velocidad de la parrilla y ésta, a su vez, controla el espesor de la cama al mantener la resistencia uniforme; por otra parte, el flujo del aire al primer compartimento se controla con el flujo del aire de enfriamiento y éste está conectado para reaccionar también con las variaciones de presión en este compartimento.

Por todo lo mencionado anteriormente, se explica que exista una relación estrecha entre la velocidad de las parrillas del enfriador y la altura de la cama de clinker, la cual debe ser la mejor, pues de ella depende la temperatura del aire secundario, el grado de enfriamiento del clinker y la economía de la operación en relación con la recuperación del calor que retorna al horno. La velocidad de las parrillas regula a voluntad la altura de la cama de clinker en el enfriador: cuando la velocidad es muy alta la cama es de poco espesor, por lo que el aire pasa rápidamente a través de ella y se pierde así el efecto de enfriamiento bajando las temperaturas, tanto del aire secundario

como de la zona de calcinación y produciéndose un clinker mal enfriado, con todas las consecuencias que ésto pueda traer a la calidad del cemento.

Cuando la velocidad de la parrilla es muy baja y se opera el enfriador con una cama de clinker muy alta, la presión del aire del ventilador puede ser insuficiente para atravesar la cama de material y en este caso no se dispondrá de la cantidad de aire secundario necesario para llevar a cabo la combustión en el horno, produciendo además otros efectos importantes en el proceso: crece anormalmente la succión en la carátula del horno, el clinker abandona el enfriador a mayor temperatura, el aire secundario se calienta demasiado y puede alcanzar temperaturas hasta de 1200°C, se sobrecalienta la carátula del horno y puede llegarse a la fusión misma del tabique en esta zona del horno.

Otro factor que influye en el rendimiento del enfriador, es la cantidad de aire de enfriamiento que se utiliza en el sistema. Cuando se recupera el 65% del calor que transporta este aire, se considera que se tiene una eficiencia muy buena, y si se desea mejorarla es necesario llevar al horno la mayor cantidad de aire generado en las dos primeras cámaras de enfriamiento, pues siendo en esta parte del enfriador donde el clinker se mantiene más caliente, la cantidad de calorías recuperadas será mayor y, por consiguiente, la temperatura del aire secundario irá en aumento (el valor de esta temperatura debe mantenerse entre los 900°C y los 1000°C).

Por último, a veces el clinker se acumula en exceso en

la descarga del horno hacia el enfriador, formando un "pilón" que puede llegar a tapar la caída del material a las parrillas y que es necesario destruir manualmente abriendo el registro correspondiente, lo que provoca que se pierdan calorías y baje la temperatura en la zona de calcinación.

Para que la presión del aire bajo las parrillas de cada compartimento se mantenga siempre en su valor correcto, es necesario que el aire de cada cámara pase a su sección correspondiente dentro del enfriador.

Cuando existen deformaciones o roturas en las divisiones de las distintas cámaras, el aire de un compartimento pasa al otro debido a que los gases tienden siempre a expandirse hacia las zonas de menor presión, lo que ocasiona que baje la presión del aire bajo la zona de las parrillas correspondientes a ese compartimento y por esto no pueda atravesar la cama de clinker, perdiéndose el efecto de enfriamiento.

Ahora bien, independientemente del espesor de la cama de clinker sobre las parrillas, el tamaño de los nódulos de clinker que circulen por el enfriador influirá decisivamente en el comportamiento del aire de enfriamiento en las cámaras de venti-lación: cuando el clinker sobre las parrillas contiene una gran cantidad de nódulos grandes, el aire atraviesa la cama de clinker fácilmente (debido a la gran cantidad de espacios vacíos existentes en la cama de material) y aumenta el consumo de energía eléctrica de los motores de los ventiladores de los compartimientos por el hecho de que el volumen de aire manejado es mayor, pero la presión de este aire bajo esa cámara se reduce notablemente.

Por el contrario, cuando se trabaja con una cama de clínker abundante en nódulos finos, la oposición al flujo de aire a través de élla crece, disminuyendo el consumo de corriente en los motores de los ventiladores a causa de que se maneja un menor volumen de aire, mientras que la presión bajo la cámara sube de valor.

La importancia del enfriador en el proceso de calcinación del crudo de cemento, se manifiesta plenamente si se observa que del calor total empleado en el horno, cerca del 25% proviene de los gases del enfriador, generado por la cantidad de calor residual que el aire secundario recupera del clínker. Actualmente el grado de eficiencia de los enfriadores utilizados en la industria cementera varía entre un 65% y un 70% generalmente, (aunque se conocen enfriadores que trabajan hasta con un 75% de eficiencia), lo cual significa que las pérdidas de calor del enfriamiento son del orden de 100 kcal/Kg clínker usualmente, lo que representa aproximadamente un 13% del consumo térmico total en el proceso de calcinación (750-800 kcal/Kg clínker , para hornos con precalentador por suspensión del polvo en gases).

El rendimiento térmico de un enfriador se designa como la relación existente entre el calor recuperado del clínker -- caliente y utilizado en el proceso de cocción, y el contenido térmico total del clínker que abandona el horno, según la siguiente fórmula:

$$E = \frac{A - B}{A} \times 100, \text{ donde}$$

E= Rendimiento térmico del enfriador,

A = Contenido total de calor del clínker procedente del horno,

B = Pérdidas de calor en el enfriador.

Las pérdidas de calor en el enfriador se originan por varias causas, imposibles de eliminar completamente: por el aire residual que escapa por la chimenea, por el clínker que sale del sistema, por pérdidas de calor por radiación y conducción, etc.

Un valor que nos da una cierta aproximación acerca del rendimiento térmico del enfriador, es la diferencia de temperaturas entre el clínker caliente que entra al enfriador y la temperatura del aire secundario caliente procedente de aquel: aquellos enfriadores que suministran el máximo de calor con el aire secundario, es decir, aquellos que trabajan con la máxima temperatura de aire secundario, necesariamente son los enfriadores de mayor rendimiento térmico. Teóricamente, es posible determinar la temperatura que tendrá el aire secundario a partir de la siguiente fórmula:

$$TAS = \frac{3250 (347 - K)}{X \cdot n}, \text{ donde:}$$

TAS= Temperatura del aire secundario,

X = Consumo específico de calor en el horno (Kcal/kg clínker),

n = Exceso de aire de dilución (%),

K = Pérdidas de calor del enfriador (kcal/kg clínker).

Sin embargo, la única manera posible y confiable de determinar la eficiencia de la recuperación térmica del enfriador es mediante un balance térmico, y no es posible obtener conclusiones dignas de consideración a partir de ciertos valores

de parámetros aislados de la operación que han variado con respecto a lo usual, lo que se puede demostrar a partir de los siguientes ejemplos aislados:

a) La indicación de la temperatura del aire secundario: La que se dispone en el tablero de control no proporciona información fidedigna en términos absolutos, debido a que cuando se mide aspirando aire del conducto de entrada al horno hay segregaciones de corrientes de diferentes temperaturas, y cuando se utiliza un termopar su valor es afectado por la radiación del clinker.

b) La temperatura del clinker: Por sí sola únicamente indica que el funcionamiento como enfriador es bueno, pero no dice nada acerca de su eficiencia como recuperador de calor.

c) La temperatura del aire de escape por chimenea: En conjunción con el clinker podría indicar algo más, pero para esto es necesario conocer en todo momento el caudal del aire de chimenea, cosa que es prácticamente imposible de conocer con certeza debido a la entrada de aire falso (que además influye en la temperatura).

d) La longitud de la zona al rojo vivo sobre la parrilla: Proporciona cierta información sobre el enfriamiento pero no sobre la recuperación de calor, aunque generalmente un buen rendimiento de recuperación térmica produce una zona al rojo vivo de 6 a 8 mts. de longitud, etc.

Ahora bien, de una forma cualitativa se puede

afirmar que temperaturas de clínker altas, junto con pérdidas elevadas de calor por chimenea, son indicios de una mala recuperación térmica del enfriador, al igual que una disminución en la presión habitual en la primera cámara bajo parrilla, y todo esto a pesar de que en algún momento pudiera suceder que la temperatura de los gases de escape por chimenea fuera baja.

Como conclusiones acerca de la manera más idónea de manejar un enfriador de parrilla, podemos postular lo siguiente:

1) El espesor de la cama de clínker es inversamente proporcional al consumo de combustible en el horno, pues un espesor alto proporciona temperaturas de aire secundario elevadas que reducen el consumo de combustible y viceversa. Además ocasiona una reducción del caudal suministrado por los ventiladores de enfriamiento por tener que vencer éstos una mayor resistencia.

Por lo tanto, se debe trabajar con presiones bajo primera cámara tan altas como lo permita el sistema.

2) La concentración del aire debe ser mayor en la zona donde se produce la caída de material del horno, pues es aquí donde existe una mayor diferencia entre las temperaturas del clínker y del aire, lo cual hace que el coeficiente de transmisión de calor sea mayor y el aire eleve su temperatura rápidamente. Además, para mejorar el intercambio térmico es fundamental un tiempo de contacto alto, por lo que la velocidad del aire debe ser baja, es decir, se debe trabajar con caudales bajos.

3) Las válvulas (chapaletas) de descarga de finos se deben revisar diariamente, procurando que su cierre siempre sea hermético para evitar que el aire escape a través de esas válvulas, sobre todo en las primeras cámaras, cuya presión es de mayor magnitud a las otras.

4) Los ventiladores de la primera cámara deben llevarse siempre al 100% de apertura con el fin de poder llevar al máximo la capa de clínker.

5) Disminuir al mínimo aquellas zonas por las cuales el aire de enfriamiento pasa a la cámara de alimentación, sin tener contacto con la cama de clínker (provocando que éste no se enfríe y, a su vez, enfriando el aire secundario), como son los espacios libres existentes entre las parrillas y las paredes del enfriador. Para ésto, se debe colocar una chapa soldada a la pared bajo el nivel de la parrilla y a todo lo largo de ésta.

6) Reducir al mínimo las entradas de aire falso al - enfriador, sobre todo en la zona de carátula del horno, y en la zona de la machacadora de martillos, que son las áreas donde generalmente se producen las mayores pérdidas de calorías, etc.



III.3. DAPOS TECNICOS DE LA  
INSTALACION.

A continuación, se mencionan los datos técnicos más importantes (como referencia o como ayuda para llevar a cabo los cálculos del balance), de la instalación en la cual se realizó la prueba :

a) PREGALENTADOR:

- 1) Procedimiento: vía seca, por suspensión del polvo crudo en gases;
- 2) Fabricante: "Polysius" (Torre Dopel);
- 3) Año de instalación: 1971;
- 4) Número de etapas: cuatro;
- 5) Características de las etapas: (en sentido al flujo de gases; ver diagrama No. 1 );

1a. ETAPA= Dos ciclones de iguales dimensiones;

2a. ETAPA=Un ciclón ("Cuba de turbulencias");

3a. ETAPA= Dos ciclones de iguales dimensiones;

4a. ETAPA= Cuatro ciclones de iguales dimensiones;

- 6) Dimensiones de los ciclones (mm) :

E T A P A	1	2	3	4
Altura total del ciclón	9,800	12,800	6,800	9,800
Diámetro interior del ciclón	3,920	6,300	4,500	3,920
Altura parte cilíndrica	3,136	5,040	3,600	3,136
Altura de la sección de entrada	1,607	2,583	1,845	1,607
Ancho de la sección de entrada	1,068	1,701	1,215	1,058
Diámetro del tubo de inmersión	1,999	3,150	2,250	1,999
Longitud del tubo de inmersión	2,234	3,276	2,430	2,234

E T A P A	1	2	3	4
Superficie de entrada de gases (m <sup>2</sup> )	1.70	4.39	2.24	1.70
Superficie de salida de gases (m <sup>2</sup> )	3.14	4.95	3.53	3.14

#####

- 7) Revestimiento interior: concreto refractario en saliente, de 8 pulgadas de espesor;
- 8) Eliminación de polvos: con filtro electrostático.  
b) H O R N O:
  - 1) Procedimiento: Por desplazamiento del material en el tubo horizontal rotatorio;
  - 2) Fabricante: "Polysius";
  - 3) Año de instalación: 1971;
  - 4) Dimensiones: Diámetro interior = 4.6 Mts.,  
Longitud total = 78 mts.;
  - 5) Inclinación del tubo (pendiente) = 3% con respecto al eje horizontal;
  - 6) Número de apoyos: tres llantas localizadas en los metros 3,27 y 64, con respecto a la descarga de material, respectivamente;
  - 7) Velocidad del horno = 1.25 a 1.6 RPM.;
  - 8) Tipo de combustible: combustóleo de 350 API a 200C :
    - i) Potencia calorífica superior = 10,854 Kcal/kg
    - ii) Potencia calorífica inferior = 10,184 Kcal/kg
    - iii) Composición:  
C = 86.81 % en peso  
H<sub>2</sub> = 12.40 % " "  
O<sub>2</sub> = 0.27 % " "  
N<sub>2</sub> = 0.07 % " "  
S = 0.45 % " "

- 9) Motor principal: A) Marca: "Alsthom",  
B) Tipo: De velocidad variable,  
C) Potencia Nominal: 400 CV ;
- 10) Motor auxiliar: A) Marca: General Electric,  
B) Potencia nominal = 55 Kw
- 11) Capacidad: A) Nominal = 1,800 ton clinker /día,  
B) Promedio= 1,500 " " " ;
- 12) Revestimiento: Zona de calcinación (Mt. 3 al Mt.27  
provista de tabique "Radex" de 9 pulgadas  
de espesor, y todo lo demás revestido de tabique  
aluminoso de igual espesor.

c) ENFRIADOR:

- 1) Tipo: de parrilla,
- 2) Fabricante: "Fuller",
- 3) Año de instalación: 1971.
- 4) Dimensiones: Ancho = 3.05 mts.,  
longitud= 19.50 mts.,
- 5) Pendiente: 5° con respecto al eje horizontal,
- 6) Velocidad de la Parrilla = 0.5 - 1.5 RPM.,
- 7) Velocidad de avance de las placas = 120 mm/vaivén,
- 8) Número de vaivenes de placas = 6 - 17 por minuto,
- 9) Motor: a) Marca: "Alsthom",  
b) Potencia Nominal: 30 cv  
c) Tipo: de velocidad variable,  
d) Velocidad: 200-1,500 RPM.;
- 10) Número de cámaras de ventilación = cinco,
- 11) Longitud de cámaras: 3.00, 2.90, 3.55, 4.33 y 4.82

respectivamente, comenzando por la parte de entrada del clinker;

- 12) Regulación de volumen de gases: únicamente bajo las cámaras 1 y 4;
- 13) Eliminación de polvos: con filtro de gravas.

d) VENTILADORES:

- 1) Ventilador de aire primario:
  - a) Tipo: motoventilador,
  - b) Fabricante: General Electric,
  - c) Caudal Nominal: 10,800 m<sup>3</sup>N/hr.,
  - d) Presión estática: +1,200 mm C.A.,
  - e) Potencia del motor: 75 Kw.
- 2) Ventilador de extracción de gases de Precalentador:
  - a) Tipo: centrífugo,
  - b) Fabricante: Babcock,
  - c) Caudal nominal: 93,500 M<sup>3</sup>N/hr.,
  - d) Presión estática: -600 mm C.A.,
  - e) Potencia del motor: 1,000 CV.
- 3) Ventiladores de aire de enfriamiento:

CAMARA:

1) Tipo:	radial	radial	radial	radial	radial
2) Fabricante:	Fuller	Fuller	Fuller	Fuller	Fuller
3) Caudal nominal(m <sup>3</sup> N/hr)	72,000	36,000	36,000	36,000	36,000
4) Presión estática(mm C.A)	400	180	180	170	160
5) Potencia del motor (Kw)	180	90	90	90	90.

IV. TECNICA DE MEDICION.

- IV.1. Puntos de medición en el sistema.
- IV.2. Toma de muestras y medición de variables termodinámicas.
- IV.3. Determinación de producciones y consumos.

IV.1. PUNTOS DE MEDICION EN EL SISTEMA.

Los puntos del sistema en los que se efectuó alguna medición o toma de muestras para conocer las características fisicoquímicas de los materiales involucrados en el proceso de calcinación de la harina cruda, se indican en el diagrama No. 2 que se adjunta. Los números indicados en el diagrama representan las siguientes partes del equipo:

- 1) Báscula para material crudo,
- 2) Ducto de descarga de gases de escape del Precalentador (salida de gases de la cuarta etapa),
- 3) Bóveda de descarga de gases del horno (descarga de material de la primera etapa del Precalentador),
- 4) Tubería de transporte de combustóleo al quemador del horno,
- 5) Ventilador de aire primario para la atomización del combustóleo en el quemador del horno,
- 6) Ventiladores (cinco) de aire de enfriamiento de las cámaras del enfriador,
- 7) Chimenea de escape del aire en exceso de la cámara de ventilación del enfriador,

- 8) Transportador de cadenas para arrastre del clínker desde la descarga del enfriador hasta el almacén correspondiente,
- 9) Gusano transportador de los finos de material crudo recuperados en el filtro electrostático,
- 10) Carcasa del horno, precalentador y enfriador, donde se lleva a cabo la medición de las temperaturas externas de las paredes de estos equipos, para estimar las pérdidas de calor por radiación,
- 11) Carátula del horno, donde descarga el clínker formado hacia la parrilla del enfriador (primera cámara).

Además, por aquí también se introduce el aire secundario necesario para la completa combustión del combustóleo, proveniente del enfriador.

#### IV.2. TOMA DE MUESTRAS Y MEDICION DE VARIABLES TERMIDINAMICAS

Los puntos mencionados en el inciso anterior, representan las zonas en las que se llevaron a cabo las mediciones y toma de muestras necesarias para realizar satisfactoriamente el balance térmico del sistema Precalentador-Horno-Enfriador. A continuación, se mencionan las operaciones realizadas en cada uno de los puntos indicados (en el mismo orden de aparición):

- 1) La harina de polvo crudo se muestreó cada hora en la banda del dosificador "Hasler", y simultáneamente se procedió a medir la temperatura del crudo de entrada al sistema. Con las muestras tomadas, inmediatamente se efectuó el análisis químico

en el laboratorio de la fábrica, determinándose básicamente la humedad, la pérdida al fuego y los componentes óxidos del crudo.

2) Se efectuaron muestreos horarios de los gases de escape de la cuarta etapa del Precalentador para efectuar inmediatamente el análisis Orsat necesario para conocer las proporciones de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}$  y  $\text{O}_2$  existentes en los gases. Además, se procedió a medir la temperatura de rocío de estos gases cada dos horas, y su temperatura fue determinada permanentemente por medio de un vástago introducido en el conducto indicado.

3) Se tomaron muestras horarios de los gases de escape del horno para su inmediato análisis Orsat, y su temperatura se determinó a partir del termopar instalado en la misma bóveda, previa calibración del instrumento.

4) Previamente a la realización de la prueba, se efectuó un muestreo del combustible a todo lo largo de la línea de transporte, lo que permitió obtener una muestra global necesaria para determinar, por medio del análisis químico, las características más importantes del combustible en cuestión. Además, se determinó cada hora su temperatura en la tubería.

5) El caudal de aire primario, por ser un gasto fijo en el sistema, se midió con un anemómetro antes del balance. Su temperatura se estableció a partir de la medición de la temperatura ambiente promedio, existente durante el desarrollo de la prueba.

6) Se realizaron mediciones de la temperatura de los gases aportados al enfriador por cada uno de los cinco ventiladores existentes, con la ayuda de un vástago de temperatura.

7) Se realizaron mediciones horarios de la temperatura

de los gases de escape en la chimenea del enfriador, por medio de un vástago de temperatura.

8) Se tomaron cada cuarto de hora muestras del clinker transportado con ayuda del transportador de cadenas hacia su almacén, y se determinó simultáneamente su temperatura por medio de calorimetrías efectuadas cada hora. Las muestras se llevaron al laboratorio para su posterior análisis químico.

9) Se tomaron muestras cada dos horas de los finos de crudo recuperados en el filtro electrostático durante la purificación de los gases de escape del precalentador, y se procedió a llevarlos al laboratorio para determinar su composición química por medio del análisis correspondiente.

10) La medida de las temperaturas de las paredes exteriores de las carcasas del precalentador, del horno y del enfriador, fue efectuada por dos métodos: un pirómetro de radiación "Ardocoll" y un pirómetro de contacto. Las temperaturas del enfriador y de la torre precalentadora fueron medidos una sola vez durante la prueba, mientras que las del horno se midieron dos veces.

11) Se tomaron muestras cada tres horas del clinker que descargaba directamente del horno hacia el enfriador, a la altura de la carátula del horno y se procedió a realizar a cada una de éstas, una calorimetría húmeda (dos de estas mediciones tuvieron que ser rechazadas debido a que la cantidad muestreada era demasiado pequeña y el resultado del análisis no era confiable). Además, aunque se contaba con el vástago indicador de la temperatura del aire secundario en el tablero de control, se procedió a realizar cuatro mediciones de esta temperatura (cada una de las cuales nos dió nueve puntos de medición), con la ayuda

de un vástago de aspiración enfriado con agua, tipo "Meci".

#### IV.3. DETERMINACION DE PRODUCCIONES Y CONSUMOS.

Para poder llevar a cabo todos los cálculos involucrados en el balance térmico efectuado, se hizo necesario conocer todos los consumos y producciones de los diferentes materiales que intervienen en el proceso de calcinación del crudo, como son: harina cruda, combustible, aire primario, aire de enfriamiento, etc.

A continuación, se menciona el procedimiento seguido para la determinación de todos los consumos, caudales y producciones que son necesarios para efectuar el balance:

1) La harina cruda alimentada al sistema de calcinación pasa previamente a una báscula dosificadora "Hasler", la que garantiza un régimen determinado y constante de alimentación. Antes del balance, este equipo se sujetó a una comprobación de entrega de material, que resultó exacta.

2) El clínker producido en el horno se pesó en los camiones cargados con la grúa puente, la que tomaba el clínker de la fosa en que se vaciaba al descargar el enfriador. Esta fosa se había limpiado con todo cuidado previamente.

3) El volumen de combustible consumido durante la prueba fue determinado con ayuda de un medidor de flujo, el cual se checó dos veces por el método siguiente (una vez antes del balance y la segunda durante las primeras horas de prueba): Se tomó el volumen correspondiente a un peso de combustible conocido (que fue el peso total del combustóleo contenido en un damión pipa), lo

que permitió relacionar el volumen de combustible consumido durante todo el balance con el peso correspondiente.

4) El volumen de los gases sopladados por los ventiladores del enfriador se midieron con un anemómetro: las medidas tomadas en los ventiladores fijos se realizaron antes de la prueba, mientras que durante el balance se realizaron cuatro mediciones en cada uno de los ventiladores variables (primera y cuarta cámaras respectivamente).

5) El exceso de aire de enfriamiento que escapa por la chimenea se midió cada tres horas con un tubo de Pitot, durante el ensayo. A partir de esto y de la cantidad total de aire de enfriamiento, se estableció el caudal de aire secundario en el horno.

6) El caudal de aire primario se midió con ayuda de un anemómetro antes del balance (por ser un gasto fijo), y el caudal de gases de combustión se calculó a partir del análisis Orsat de gases y el consumo de combustóleo.

7) Por último, se estimó la cantidad de polvos arrastrados por los gases de escape del <sup>h</sup>recalentador, a partir de un opacímetro colocado a la entrada del filtro electrostático y el caudal de gases manejados por el extractor del sistema.

V. CALCULOS Y RESULTADOS.

- V.1. Nomenclatura.
- V.2. Formulario.
- V.3. Datos promedio de las mediciones.
- V.4. Cálculos.
- V.5. Resultados.

V.1. NOMENCLATURA.

A continuación, se indica la nomenclatura utilizada en todos los cálculos e interpretación de resultados del balance térmico efectuado:

- R = Cantidad de harina cruda necesaria para la formación de clínker, incluyendo las pérdidas por arrastre de polvos: Kg/KgKL;
- R' = Cantidad de crudo que se convierte en clínker:  
 $R - S^1 = \text{Kg/KgKL};$
- S = Polvo separado en el filtro, en % referido al clínker;
- S' = Cantidad de polvo que se pierde por arrastre:  
Kg/KgKL;
- gR = Pérdida al fuego de la harina cruda = % Peso;
- GKL = Pérdida al fuego del clínker: % peso;
- gS = Pérdida al fuego del polvo recuperado: % peso;
- gRH = Pérdida al fuego del polvo reduperado al entrar al horno: % peso;
- $\sum \text{OX}_{\text{KL}}$  = Suma de los óxidos no volátiles del clínker: % peso;

- $\sum OX_R$  = Suma de los óxidos no volátiles del crudo : % peso;
- $\sum OX_S$  = Suma de los óxidos no volátiles del polvo recuperado : % peso;
- C = % CaO total en peso, contenido en el clínker;
- $C_L$  = % CaO libre " " " " " " " "
- Si = % SiO<sub>2</sub> total en peso, contenido en el clínker;
- F = % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> " " " " " " " "
- A = % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> " " " " " " " "
- M = % MgO " " " " " " " "
- K = % K<sub>2</sub>O " " " " " " " "
- N = % Na<sub>2</sub>O " " " " " " " "
- Su = % SO<sub>3</sub> " " " " " " " "
- RI = % residuo insoluble contenido en el clínker;
- $C_3S$  = % silicato tricálcico contenido en el clínker;
- $C_2S$  = % silicato dicálcico " " " " " "
- $C_3A$  = % Aluminato tricálcico " " " " " "
- $C_4AF$  = % Ferrito aluminato tetracálcico, contenido en el clínker;
- $VCO_2(R)$  = Bióxido de carbono liberado por el crudo: Nm<sup>3</sup>/Kg KL;
- $VCO_2(S)$  = Bióxido de carbono liberado por el polvo extraído : Nm<sup>3</sup>/Kg KL;
- $VH_2O(R)$  = Cantidad de agua libre que se libera en el crudo : Nm<sup>3</sup>/Kg KL;
- Vhidr = Cantidad de agua de hidratación que se libera del crudo : Nm<sup>3</sup>/Kg KL;
- $CO_2(R)$  = Contenido de CO<sub>2</sub> en el crudo : % peso;
- $CO_2(S)$  = Contenido de CO<sub>2</sub> en el polvo recuperado: % peso;

- CaO(KL) = Contenido de CaO en el clínker : % peso;
- MgO(KL) = " " " MgO en el clínker : % peso;
- CaO( S) = " " " CaO en el polvo recuperado : % peso;
- d = Contenido de agua en el crudo en forma no combinada (humedad, lodos, etc.) : % peso;
- d' = Contenido de agua de hidratación en el crudo : % peso;
- Cc = Contenido de carbono en el combustible: % peso;
- Hc = " " " hidrógeno en el combustible: % peso;
- Sc = " " " azufre en el combustible: % peso;
- Nc = " " " de nitrógeno en el combustible: % peso;
- Oc = Contenido de oxígeno en el combustible: % peso;
- H<sub>2</sub>O<sub>c</sub> = " " " agua en el combustible: % peso;
- O min' = Oxígeno mínimo necesario para quemar un Kg de combustible : Nm<sup>3</sup>/ Kg comb.;
- O min = Oxígeno mínimo necesario para la combustión, pero referido al clínker: Nm<sup>3</sup>/Kg KL;
- K = Consumo de combustible en %, referido al clínker: relación combustible/clínker =  $\frac{\text{Kg comb}}{100 \text{ Kg KL}}$
- V comb = Consumo de combustible en 24 horas : t ;
- ρ comb = Densidad del combustible a 20°C: Kg/lt ;
- P<sub>KL</sub> = Producción de clínker en 24 horas: tons.métricas;
- L min = Aire mínimo necesario para quemar el combustible referido al clínker: Nm<sup>3</sup>/ kg KL;

- L<sub>exc</sub> = Aire en exceso de combustión: Nm<sup>3</sup>/Kg KL;
- L<sub>ef</sub> = Cantidad efectiva de aire para la combustión:  
Nm<sup>3</sup>/Kg KL;
- n = Coeficiente de exceso de aire;
- CO<sub>2</sub> = Contenido de CO<sub>2</sub> medido por Orsat, en gases de escape: % Vol.;
- CO = Contenido de CO, medido por Orsat, en gases de escape: % Vol.;
- O<sub>2</sub> = Contenido de O<sub>2</sub>, medido por Orsat, en gases de escape: % Vol.;
- N<sub>2</sub> = Contenido de N<sub>2</sub>, medido por Orsat, en gases de escape: % Vol.;
- H<sub>2</sub>O = H<sub>2</sub>O, calculada en gases de escape: % Vol.;
- SO<sub>2</sub> = Contenido de SO<sub>2</sub>, calculado en gases de escape: % Vol.;
- V<sub>mín.</sub> = Cantidad mínima teórica de gases de combustión:  
Nm<sup>3</sup>/Kg KL;
- VeF = Cantidad efectiva de gases de combustión, (teórica):  
Nm<sup>3</sup>/Kg KL;
- VCO<sub>2</sub> = Cantidad de CO<sub>2</sub> generado de la combustión:  
Nm<sup>3</sup>/Kg KL;
- VSO<sub>2</sub> = Cantidad de SO<sub>2</sub> generado de la combustión:  
Nm<sup>3</sup>/Kg KL;
- VH<sub>2</sub>O(L) = Cantidad de agua libre contenido en el combustible: Nm<sup>3</sup>/Kg KL;
- VH = Cantidad de agua generada por la combustión:  
Nm<sup>3</sup>/Kg KL;

- $V_{N_2}$  = Cantidad de  $N_2$  generada de la combustión:  
 $Nm^3/Kg KL$ ;
- $V_{N_2}(L \text{ min})$  = Cantidad de  $N_2$  liberada a partir del aire  
mínimo necesario para la combustión:  $Nm^3/Kg KL$ ;
- FL = Humedad relativa atmosférica: % Volumen;
- F'LG = Contenido de agua en el aire en estado de  
saturación a 760 mm Hg:  $gr/Nm^3$ ;
- $V_{H_2O}(L)$  = Contenido de agua en el aire de combustión  
(inclusive en el aire en exceso):  $Nm^3/Kg KL$ ;
- LFL 1/2 = Cantidad de aire falso que penetra indebidamente  
entre los puntos de medición 1 y 2:  $Nm^3/Kg KL$ ;
- $n_2$  = Coeficiente de exceso de aire en el punto de  
medición No. 2;
- $n_1$  = Coeficiente de exceso de aire en el punto de  
medición No. 1.
- $V_1$  = Volumen de gases en condiciones normales de  
presión y temperatura:  $Nm^3/Kg KL$ ;
- $V_2$  = Volumen de gases en condiciones normales de  
presión y temperatura existentes en el  
proceso:  $m^3 / Kg KL$ ;
- $T_2$  = Temperatura del proceso:  $^{\circ}K$  ;
- Lech = Caudal de aire de escape por chimenea del  
enfriador:  $Nm^3/Kg KL$ ;
- L enf = Caudal de aire introducido al enfriador para  
efectos de enfriamiento del clinker:  $Nm^3/Kg KL$ ;
- L prim = Caudal de aire primario necesario para la  
atomización del combustible en el quemador  
del horno:  $Nm^3/Kg KL$ ;

- QS comb = Calor sensible aportado por el combustible:  
Kcal/Kg KL
- QL comb = Calor de combustión del combustóleo: Kcal/Kg KL;
- CP<sub>M</sub> = Calor específico medio del combustible:  
Kcal/°C Kg comb.;
- T comb = Temperatura del combustible en el punto de  
medición: °C ;
- PCI = Potencia calorífica inferior del combustible:  
Kcal/Kg comb.;
- Qs cru = Calor sensible del crudo alimentado al sistema:  
Kcal/Kg KL;
- Qs<sub>a</sub> = Calor sensible del agua contenida en el crudo:  
Kcal/Kg KL;
- A = Cantidad de agua libre, contenida en el crudo:  
Kg/Kg KL;
- C P<sub>R</sub> = Calor específico medio de la harina cruda:  
Kcal/Kg °C ;
- CP<sub>A</sub> = Calor específico medio del agua libre del  
crudo: Kcal/Kg °C;
- T<sub>R</sub> = Temperatura de entrada del material crudo: °C ;
- T<sub>A</sub> = Temperatura de entrada del agua libre del  
crudo: °C ;
- QSL = Calor sensible aportado por el aire introducido:  
Kcal/Kg KL ;
- C<sub>PL</sub> = Calor específico medio del aire : Kcal/Nm<sup>3</sup> °C ;
- T<sub>L</sub> = Temperatura del aire de entrada al sistema: °C ;

- $L_{FH}$  = Cantidad de aire falso introducido en el horno:  $Nm^3/Kg KL$  ;
- $L_{FT}$  = Cantidad de aire falso introducido en la torre:  $Nm^3 /Kg KL$ ;
- $Q_{Teor(se)}$  = Calor teórico necesario para la clinkerización sin considerar ningún efecto alcalino:  $Kcal/Kg KL$ ;
- $Q_{SULF}$  = Calor teórico generado a partir de la sulfatación de los óxidos alcalinos:  $Kcal/Kg KL$ ;
- $Q_{Teor(ce)}$  = Calor teórico necesario para la clinkerización considerando el efecto alcalino:  $Kcal/Kg KL$ ;
- $A_K$  = Contenido de  $Al_2O_3$  en 100 g de clínker, procedente de la arcilla: % en peso;
- $h_H$  = Contenido de agua de hidratación en 100 g de clínker procedente de la arcilla: % en peso;
- $M_K$  = Contenido de  $MgO$  en 100 g de clínker procedente del  $MgCO_3$ : % en peso;
- $C_K$  = Contenido en  $CaO$  en 100 g. de clínker, procedente del  $CaCO_3$ : % en peso;
- $Si$  = Contenido de  $SiO_2$  en % de peso del análisis del clínker, sin pérdidas por calcinación;
- $Fm$  = Contenido de  $Fe_2O_3 + Mn_2O_3$  en % de peso del análisis del clínker, sin pérdidas por calcinación;
- $N_R$  = Contenido de  $Na_2O$  en el crudo, referido a 100g de clínker ( a base de los datos de análisis incluyendo las pérdidas por calcinación): g de  $Na_2O$  ;

- $K_{KL}$  = Contenido de  $K_2O$  en 100 g de clínker: g de  $K_2O$ ;
- $SU_R$  = Contenido de  $SO_3$  en el crudo, referido a 100 g de clínker( a base de los datos de análisis, incluyendo las pérdidas por calcinación):  
g de  $SO_3$ ;
- $SU_{KL}$  = Contenido de  $SO_3$  en 100 g de clínker: g de  $SO_3$  ;
- $Q_{H_2O}(R)$  = Calor necesario para evaporar el agua libre contenida en el material de alimentación:  
Kcal/Kg KL ;
- $G_{H_2O}(R)$  = Contenido de agua libre en la harina cruda:  
Kg/Kg KL ;
- $Q_{geT}$  = Calor perdido por los gases de escape de la torre: Kcal/ Kg KL ;
- $V_{geH}$  = Cantidad de gas de escape húmedo:  $Nm^3/Kg$  KL ;
- $CP_{geT}$  = Calor específico medio de los gases de escape de la torre : Kcal/ $^{\circ}C$   $Nm^3$  ;
- $T_{geT}$  = Temperatura de los gases de escape de la torre:  $^{\circ}C$
- $CP_{CO_2}$  = Calor específico medio del  $CO_2$  a  $T_{geT}$  :  
Kcal/ $Nm^3$   $^{\circ}C$  ;
- $CP_{SO_2}$  = Calor específico medio del  $SO_2$  a  $T_{geT}$  :  
Kcal/ $Nm^3$   $^{\circ}C$  ;
- $CP_{H_2O}$  = Calor específico medio del  $H_2O$  a  $T_{geT}$ :  
Kcal/ $Nm^3$   $^{\circ}C$ ;
- $CP_{O_2}$  = Calor específico medio del  $O_2$  a  $T_{geT}$ :  
Kcal/ $Nm^3$   $^{\circ}C$  ;
- $CP_{N_2}$  = Calor específico medio del  $N_2$  a  $T_{geT}$ :Kcal/ $Nm^3$   $^{\circ}C$  ;
- $Q_{KL}$  = Calor sensible perdido en el clínker: Kcal/Kg KL;

- $C_{PKL}$  = Calor específico medio del clinker a  $T_{KL}$ :  
 Kcal/ Kg  $^{\circ}C$  ;
- $T_{KL}$  = Temperatura media del clinker a la salida  
 del enfriador:  $^{\circ}C$  ;
- $Q_{eCH}$  = Calor perdido en los gases de escape del  
 enfriador: Kcal/Kg KL;
- $C_{PeCH}$  = Calor específico medio del aire a  $T_{eCH}$ :  
 Kcal/Nm<sup>3</sup> $^{\circ}C$  ;
- $T_{eCH}$  = Temperatura del aire de escape del enfriador:  $^{\circ}C$  ;
- $Q_p$  = Calor perdido en polvos de arrastre de gases de  
 escape de la torre: Kcal/Kg KL ;
- $C_{Pp}$  = Calor específico medio de los polvos a  
 $T_{geT}$  : Kcal/ Kg $^{\circ}C$  ;
- $Q(R-c)_i$  = Calor perdido por radiación y convección de la  
 superficie  $i$  : Kcal/Kg KL;
- $S_A$  Superficie del cuerpo  $i$  : mts<sup>2</sup> ;
- $\alpha_s$  = Coeficiente de transferencia térmica por  
 radiación : Kcal/m<sup>2</sup>h  $^{\circ}C$  ;
- $\alpha_{KF}$  = Coeficiente de transferencia térmica por  
 convección libre : Kcal/M<sup>2</sup>h  $^{\circ}C$  ;
- $T_{si}$  = Temperatura promedio de la superficie del cuerpo  
 radiante  $i$  :  $^{\circ}C$  ;
- $T_{amb}$  = Temperatura ambiente :  $^{\circ}C$  ;
- $Q_{ent}$  = Calor suministrado al sistema Precalentador-  
 Horno-Enfriador; Kcal/Kg KL;
- $Q_{sal}$  = Calor consumido en el sistema Precalentador-  
 horno-Enfriador: Kcal/Kg KL;

- % E = Diferencia entre el calor de entrada y el calor de salida: Porcentaje con respecto al calor de entrada.
- $Q_{KLSH}$  = Calor sensible del clinker a la salida del horno: Kcal/Kg KL ;
- $C_{PKLSH}$  = Calor específico medio del clinker a  $T_{KLSH}$ : Kcal/Kg  $^{\circ}C$  ;
- $T_{KLSH}$  = Temperatura media del clinker a la salida del horno:  $^{\circ}C$  ;
- $Q_{LenF}$  = Calor sensible del aire de enfriamiento: Kcal/Kg KL;
- $Q_{EE}$  = Calor total introducido al enfriador: Kcal/Kg KL ;
- $Q_{SE}$  = Calor total consumido en el enfriador: Kcal/KgKL ;
- $Q_{RAS}$  = Calor recuperado en el aire secundario: Kcal/Kg KL;
- TAS = Temperatura del aire secundario:  $^{\circ}C$  ;
- LAS = Caudal del aire secundario: Nm<sup>3</sup>/kg KL ;
- Rend = Rendimiento de la recuperación térmica del enfriador: % con respecto al calor total introducido;
- R(enf) = Rendimiento del enfriador en lo que respecta a su capacidad de enfriamiento del clinker: % con respecto al calor contenido por el clinker al entrar al enfriador;

V.2. FORMULARIO:

a) RENDIMIENTO DEL HORNO:

I) Area útil del horno:  $Au = \frac{\pi \cdot Du^2}{4}$

Du= diámetro útil del horno.

II) Volumen útil del horno:  $Vu = \frac{\pi \cdot Du^2}{4} \cdot L$

L= Longitud del horno.

III) Carga específica del horno:

$$\frac{\text{Prod. Clinker}}{\text{día}} \times \frac{1}{Au} = \frac{\text{Ton}}{\text{día} \cdot \text{m}^2}$$

IV) Carga volumétrica Específica:

$$\frac{\text{Prod. clinker}}{\text{día} \cdot Vu} = \frac{\text{Ton}}{\text{día} \cdot \text{m}^3}$$

V) Consumo calorífico:  $\frac{\text{Consumo calorías}}{\text{Prod. Clinker}} = \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg KL}}$

b) CRUDO NECESARIO PARA LA FORMACION DEL CLINKER:

I) Factor crudo/clinker a partir del análisis de pérdidas al fuego:

$$R = \frac{1}{100 - g_r} \left[ 100 - g_{KL} + \frac{S}{100} (100 - g_s) \right]$$

II) Factor crudo/clinker a partir de los óxidos no volátiles:

$$R = \frac{\sum OX_{KL} + \frac{S \cdot (\sum OX_s)}{100}}{\sum OX_R} =$$

$$\sum OX = \% SiO_2 + \% Al_2O_3 + \% Fe_2O_3 + \% CaO + \% MgO$$

III) Cantidad de crudo que se convierte en clinker:

$$R' = R - S'$$

IV) Cantidad de crudo que se pierde en forma de polvo:

$$S' = \frac{S (\sum OX_s)}{\sum OX_R}$$

c) RELACIONES QUE DEFINEN LA CALIDAD DEL CLINKER:

I) Standar de Cal (KS) =  $\frac{C \times 100}{2.8 S + 1.1 A + 0.7 F}$

II) Grado de saturación de la cal (GSR):

$$\frac{[C - (CL + 0.7 SU)] \times 100}{2.8 (S - RI) + 1.1A + 0.7F}$$

III) Módulo de silicatos (MS) =  $\frac{S}{A + F}$

IV) Módulo de fundentes. (MA) =  $\frac{A}{F}$

V) % Fase líquida (%FL) =  $3.00 A + 2.25 F + M + K + N$

VI) Componentes mineralógicos potenciales del clinker:

$$\% C_3S = 4.07 (C - C_I) - (0.7 SU) - 7.6(S - RI) - 6.72 A - 1.43 F$$

$$\% C_2S = 2.87 (S - RI) - 0.754 C_3S$$

$$\% C_3A = 2.65 A - 1.69 F$$

$$\% C_4AF = 3.04 F$$

$$\% CaSO_4 = 1.7 SO_3$$

d) CAUDAL DE GASES DE ESCAPE DEL HORNO:

(1) GASES PROCEDENTES DEL CRUDO:

i) Bióxido de carbono del crudo:

$$V_{CO_2(R)} = \frac{1}{(100)(1.977)} (0.7848 C + 1.092 M) =$$

ii) Bióxido de carbono del polvo recuperado:

$$V_{CO_2(a)} = \frac{0.786 \text{ CaO}(s) - CO_2(s)}{197.7} \times \frac{S}{100}$$

iii) Agua libre:  $V_{H_2O} (R) = \frac{(d)(R)}{0.8038 (100-d)}$

iv) Agua de hidratación:  $V_{\text{hidr}} = \frac{(d')(R)}{(100)(0.8038)}$

$$d' \approx S_R - CO_2(R) - V_{H_2O}(R)$$

(2) GASES PROCEDENTES DE LA COMBUSTION:

i) Oxígeno mínimo necesario para la combustión:

$$O \text{ min}' = 1.864 \frac{C_c}{100} + 5.533 \frac{H_c}{100} + 0.698 \frac{S_c}{100} - 0.7 \frac{O_c}{100}$$

ii) Oxígeno mínimo necesario referido al clínker:

$$O \text{ mín} = \frac{K}{100} O \text{ min}'$$

iii) Relación combustible / clínker:

$$K = (V \text{ comb}) (P \text{ comb}) \frac{1}{P_{KL} \times 1000} (100) =$$

iv) Aire mínimo necesario referido al clínker:

$$L \text{ min} = 4.762 (O \text{ min})$$

v) Exceso de aire en la descarga del horno:

$$n = \frac{1}{1 - 3.762 \frac{O_2 - CO}{N_2}}$$

vi) Aire en exceso:  $L \text{ exc} = L \text{ min} (n-1)$

vii) Aire efectivo para la combustión:  $L_{ef} = L_{min} + L_{exc}$

viii) Cantidad mínima de gases de combustión: (Teórico)

$$V_{min} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{H_2O(l)} + V_H + V_{N_2} + V_{N_2(L_{min})}$$

$$V_{CO_2} = 1.867 \frac{(C_c)(K)}{10,000} =$$

$$V_{SO_2} = 0.700 \frac{(S_c)(K)}{10,000} =$$

$$V_{H_2O(l)} = 1.2441 \frac{(H_2O)_c(K)}{10,000} =$$

$$V_H = 11.21 \frac{(H_c)(K)}{10,000} =$$

$$V_{N_2} = 0.80 \frac{(N_c)(K)}{10,000} =$$

$$V_{N_2(L_{min})} = 0.79 (L_{min}) =$$

ix) Cantidad efectiva de gases de combustión:

$$V_{eF} = V_{min} + L_{exc} =$$

(3) HUMEDAD ATMOSFERICA EN EL AIRE DE ENTRADA AL HORNO:

i)  $F_{LG} = F'_{LG} \frac{F_L}{100}$

ii) Volumen de agua en la totalidad de los gases de combustión:

$$V_{H_2O(L)} = \frac{F_{LG} \cdot L_{eF}}{803 \cdot 8}$$

(4) AIRE FALSO DE ENTRADA AL SISTEMA:

$$L_{FL}^{1/2} = (n_2 - n_1) L_{min}$$

(5) VOLUMEN DE GASES EN CONDICIONES NORMALES TERMODINAMICAS:

( 0 °C y 760 mm Hg ) :

$$V_1 = 210.5 \frac{V_2}{T_2}$$

$$V_{geH} = V_{CO_2(R)} + V_{CO_2(S)} + V_{H_2O(R)} + V_{hidr} + V_{ef} + V_{H_2O(L)} + L_{FL(T/H)} =$$

(6) AIRE DE ESCAPE DEL ENFRIADOR:

$$L_{ech} = L_{enF} + L_{prim} - L_{eF}$$

(e) ENTRADAS DE CALOR AL SISTEMA (REFERIDAS A 20°C) :

(1) Calor sensible del combustóleo:

$$Q_S \text{ comb} = C_{Pm} (T_{\text{comb}} - 20) \frac{K}{100}$$

(2) Calor de combustión del combustóleo:

$$Q_L \text{ comb} = PCI \cdot \frac{K}{100}$$

(3) Calor sensible del material crudo seco:

$$Q_S \text{ cru} = C_{PR} (T_R - 20) (R)$$

(4) Calor sensible del agua contenida en el material crudo:

$$QSA = A \cdot C_{PA} (T_A - 20)$$

$$A = \frac{d}{100} \cdot R$$

(5) Calor sensible del aire introducido al sistema:

$$Q_S L = (L_{enF} + L_{prim} + L_{FH} + L_{FT}) C_{PL} (T_L - 20)$$

(f) CALOR CONSUMIDO EN EL SISTEMA:

(1) Calor teórico necesario para la clinkerización (según método desarrollado por H. Zur Strassen):

i) Sin efecto alcalino:

$$Q_{\text{Teor}(se)} = 2.22 A_K + 5.86 h_H + 6.48 M_K + 7.646 C_K - 5.116 Si - 0.59 F_m$$

$$h_H = (d')(R')$$

ii) Con efecto alcalino:

$$Q_{\text{Teor}(ce)} = Q_{\text{Teor}(se)} + Q_{\text{SulF}}$$

$$Q_{\text{SulF}} = -25.8 (N_R - N_{KL}) - 17.0 (K_R - K_{KL}) + 20.0 (SU_R - SU_{KL})$$

(2) Evaporación del agua libre contenida en la alimentación:

$$Q_{H_2O(R)} = G_{H_2O} (586)$$

$$G_{H_2O(R)} = \frac{(d)(R)}{100-d}$$

(3) Gases de escape de la Torre Precalentadora:

$$Q_{\text{get}} = V_{\text{geH}} \cdot C_{\text{Pget}} (T_{\text{get}} - 20)$$

$$C_{\text{Pget}} = \frac{CO_2 \cdot C_{P_{CO_2}} + SO_2 \cdot C_{P_{SO_2}} + H_2O \cdot C_{P_{H_2O}} + O_2 \cdot C_{P_{O_2}} + N_2 \cdot C_{P_{N_2}}}{V_{\text{geH}}}$$

$$V_{\text{geH}} = CO_2 + SO_2 + H_2O + O_2 + N_2$$

(4) Calor sensible del clinker:

$$Q_{KL} = C_{PKL} (T_{KL} - 20)$$

(5) Gases de escape del enfriador:

$$Q_{\text{ech}} = L_{\text{ech}} (C_{\text{Pech}}) (T_{\text{ech}} - 20)$$

(6) Calor perdido con el polvo arrastrado por los gases

de escape del precalentador:

$$Q_p = S \cdot (C_{pp}) (T_{get} - 20)$$

$$S = \frac{\text{polvo salido torre}}{\text{Prod. clinker.}} = \text{Kg/Kg KL}$$

(7) Calor perdido por radiación y convección: (según el método desarrollado por H. Zur Strassen; Ver Bibliografía).

$$Q_{(R-C)} = \sum Q_{(R-c)i} \quad ; i = 1, 2, \dots$$

$$Q_{(R-C)_i} = \frac{S_i (\alpha_s + \alpha_{kf}) (T_{Si} - T_{amb})}{\text{Producción clinker / h}}$$

$\alpha_s, \alpha_{kf}$  = de gráficas ( ver Strassen)

$S_i$  = superficie de: Precalentador, horno y enfriador.

(g) BALANCE TERMICO DEL SISTEMA PRECALENTADOR=HORNO=ENFRIADOR

$$\text{DIFERENCIA} = Q_{\text{ent}} - Q_{\text{sal}}$$

$$\% \text{ Error} = \frac{(Q_{\text{ent}} - Q_{\text{sal}})}{Q_{\text{ent}}} \cdot 100 = \% E$$

$$Q_{\text{ent}} = Q_{\text{Scomb}} + Q_{\text{Lcomb}} + Q_{\text{Scru}} + Q_{\text{Sa}} + Q_{\text{SL}}$$

$$Q_{\text{sal}} = Q_{\text{teor(CE)}} + Q_{\text{H}_2\text{O(R)}} + Q_{\text{get}} + Q_{\text{KL}} + Q_{\text{Lech}} + Q_p + Q_{(R-C)\text{Tot}}$$

Grado de descarbonatación en Torre:

$$= \frac{R(1-g_r) - R(1-g_R)}{1-g_{RH}} = R(1-g_R)$$

(h) BALANCE TERMICO DEL ENFRIADOR.

4) ENTRADAS DE CALOR:

i) Calor sensible del clinker a la salida del horno:

$$Q_{KLSH} = C_{PKLSH} (T_{KLSH} - 20)$$

- ii) Calor sensible introducido con el aire de enfriamiento:

$$A_{Lenf} = L_{enf} (C_{PL}) (T_L - 20)$$

- iii) Calor total de entrada al enfriador:

$$Q_{EE} = Q_{KLSH} + Q_{L_{enf}}$$

## 2) SALIDAS DE CALOR:

- a) Calor perdido en gases de escape del enfriador:

$$Q_{ech} = L_{ech} \cdot C_{Pech} \cdot (T_{ech} - 20)$$

- b) Calor perdido en el clinker de salida:

$$Q_{KL} = C_{PKL} (T_{KL} - 20)$$

- c) Calor perdido por radiación y convección:

$$Q_{(R-C)enf} = \frac{S_{enf} (\alpha_S + \alpha_{KF}) (T_{S_{enf}} - T_{amb})}{\text{Prod Clinker/hr}}$$

## 3) CALOR RECUPERADO EN EL AIRE SECUNDARIO:

$$Q_{RAS} = Q_{EE} - Q_{SE}$$

$$Q_{SE} = Q_{ech} + Q_{KL} + Q_{(R-C)enf}$$

## 4) TEMPERATURA DEL AIRE SECUNDARIO

$$T_{AS} = \frac{Q_{RAS}}{L_{AS} \cdot C_{PL}} + 20$$

## 5) RENDIMIENTO DEL ENFRIADOR RESPECTO AL ENFRIAMIENTO DEL CLINKER:

$$R_{(enf)} = \frac{Q_{KLSH} - Q_{KL}}{Q_{KLSH}} \times 100$$

## (6) RENDIMIENTO DE LA RECUPERACION TERMICA DEL ENFRIADOR:

$$\text{Rend} = \frac{Q_{RAS}}{Q_{EE}} \times 100$$

V.3. DATOS PROMEDIO DE LAS MEDICIONES

A) MATERIAL CRUDO:

CONSUMO	=2,375 ton/24 hs.
HUMEDAD	=0.1 %
CONSUMO CRUDO SECO	= 2,372.625 ton/24 hs.
TEMPERATURA DEL CRUDO	= 94 °C
SUPERFICIE B.E.T.	= 5.00 M <sup>2</sup> /g
SUPERFICIE BLAINE	= 5.47 cm <sup>2</sup> /g
MASA VOLUMETRICA	= 2.74 g/cm <sup>3</sup>
% RETENIDO EN MALLA-70	= 1.70 %.
% RETENIDO EN MALLA-170	=14.40 %

B) POLVOS EN GASES DE ESCAPE DE LA TORRE:

Concentración en gases de escape:	54.10 g/Nm <sup>3</sup>
Producción.....	127.5 ton/24 hs.
Temperatura ....	390 ° C.

C) GLINKER:

PRODUCCION:	1,504.13 ton/24 hs. = 17.41 Kg/seg.
DENSIDAD a 20°C	
TEMPERATURA A LA SALIDA DEL HORNO:	1,381 °C
TEMPERATURA A LA SALIDA DEL ENFRIADOR:	144 °C
% RETENIDO EN MALLA 20mm	= 1.81 %
% " " " 10mm	= 11.41 %
% " " " 5mm	= 24.67 %
% " " " 0.63 mm	= 74.94
% " " " 0.315mm	= 80.66

D) COMBUSTIBLE:

Consumo: 154.1 m<sup>3</sup>/24 hs = 129.75 ton/24 hs.

Temperatura: 134.5 °C

Densidad a 20 °C : 0.897 kg/lt

Densidad a 120 °C : 0.824 Kg/lt

Poder calorífico superior ( PCS) = 10,854 kcal/Kg

Poder calorífico inferior ( PCI) = 10,184 kcal/Kg

E) ANALISIS QUIMICO DE COMPONENTES INDIVIDUALES:

<u>Elemento:</u>	<u>Crudo</u>	<u>Clinker</u>	<u>Polvo</u>
% SiO <sub>2</sub>	14.85	22.65	10.85
% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.00	4.40	4.10
% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.35	3.75	2.95
% CaO	43.40	67.20	45.10
% MgO	0.40	0.65	0.55
% SO <sub>3</sub>	trazas	0.15	0.90
% K <sub>2</sub> O	0.40	0.55	0.60
% Na <sub>2</sub> O	0.08	0.17	0.09
% H <sub>2</sub> O	0.10	0.30	2.40
% H <sub>2</sub> O comb.	1.00	----	----
% Pérdida al fuego	34.50	0.20	33.60
% Residuo insoluble	----	0.10	----
% t o t a l	99.98	101.32	101.14

###

E) ANALISIS DE GASES POR EL METODO ORSAT:

i) MUESTRAS DE LOS GASES DE DESCARGA DEL HORNO:

<u>COMPUESTO:</u>	<u>MAXIMO</u>	<u>MINIMO</u>	<u>PROMEDIO</u>
% CO <sub>2</sub>	35.70	30.80	33.30
% CO	0.00	0.00	0.00
% O <sub>2</sub>	3.80	2.10	3.05
% N <sub>2</sub>	----	----	63.65

ii) MUESTRAS DE LOS GASES A LA SALIDA DEL PRECALENTADOR:

<u>COMPUESTO</u>	<u>MAXIMO</u>	<u>MINIMO</u>	<u>PROMEDIO</u>
% CO <sub>2</sub> +SO <sub>2</sub>	30.40	27.20	29.09
% CO	0.00	0.00	0.00
% O <sub>2</sub>	4.10	2.80	3.50
% N <sub>2</sub>	----	----	67.41

G) TEMPERATURAS DE GASES:

Gases de escape de la torre: 390 °C

Gases de escape de chimenea del enfriador: 195 °C

Aire de enfriamiento: 35 °C

Aire primario : 35 °C

Aire secundario (medido) = 880 °C

H) CAUDAL DE LAS CORRIENTES GASEOSAS:

Aire primario: 0.856 Nm<sup>3</sup>/seg = 0.0492 Nm<sup>3</sup>/ Kg KL

Aire de enfriamiento: 37.853 Nm<sup>3</sup>/seg = 2.1742 Nm<sup>3</sup>/Kg KL

Aire de escape de chimenea del  
enfriador: 23.95 Nm<sup>3</sup>/seg = 1.3756 Nm<sup>3</sup>/Kg KL

J) VALORES DE TABLAS:

$C_{Pm}$	=	0.462 Kcal/Kg°C	$C_{Pp}$	=	0.242 Kcal/Kg°C
$C_{PR}$	=	0.205 " "	$C_{P_{KLSH}}$	=	0.257 " "
$C_{PA}$	=	1.000 " "	$C_{P_{CO_2}}$	=	0.473 " "
$C_{PL}$	=	0.310 " "	$C_{P_{SO_2}}$	=	0.457 " "
$C_{PKL}$	=	0.200 " "	$C_{P_{H_2O}}$	=	0.372 " "
$C_{Pech}$	=	0.320 " "	$C_{P_{N_2}}$	=	0.318

I) TEMPERATURAS DE SUPERFICIE:

DEL Horno = 310 °C

del Precalentador = 120 °C

del Enfriador = 190 °C

J)	<u>S</u>	<u>KF</u>
Horno	14.9	6.5
Precalentador	6.7	5.6
Enfriador	14.1	5.8

V.4. C A L C U L O S

A continuación, se detallan todos los cálculos efectuados en base a la nomenclatura y formulario descritos anteriormente, del balance térmico:

1) RENDIMIENTO DEL HORNO:

Longitud del horno: (L) = 78 mts.;

Diámetro interior: 4.6. mts.;

Diámetro útil: (Du) = 4.6 - 0.2286 = 4.3714 mts.

$$a) \text{ Area útil (Au)} = \frac{(3.14) (4.3714)^2}{4} = 15.01 \text{ m}^2$$

$$b) \text{ Volumen útil (Vu)} = \frac{(3.14)(4.3714)^2(78)}{4} = 1170.6 \text{ m}^3$$

$$c) \text{ Carga específica} = \frac{1,504.13}{15.01} = 100.21 \frac{\text{tons.}}{\text{día} \cdot \text{m}^2}$$

$$d) \text{ Carga volumétrica específica} = \frac{1504.13}{1170.6} = 1.28 \frac{\text{Ton}}{\text{día} \cdot \text{m}^3}$$

$$e) \text{ Consumo calorífico} = \frac{129,750 \times 10,184}{1,504,130} = 878.5 \text{ Kcal/Kg KL}$$

2) CRUDO NECESARIO PARA LA FORMACION DEL CLINKER:

a) Factor crudo/clinker a partir del análisis de pérdidas al fuego:

$$R = \frac{1}{100 - 34.50} \left( 100 - 0.20 + \frac{8.4767}{100} (100 - 33.60) \right) = 1.6096 \text{ Kg/} \\ \text{/Kg KL.}$$

$$S = \frac{127.5 \text{ Ton/día}}{1,504.13 \text{ ton KL/día}} \times 100 = 8.4767 \%$$

b) Calculado a partir de los óxidos no volátiles:

$$R = \frac{98.65 + (0.084767)(63.55)}{64.00} = 1.6256 \text{ Kg/Kg KL}$$

$$OX_R = 14.85 + 3.00 + 2.35 + 43.40 + 0.40 = 64.00$$

$$OX_{KL} = 22.65 + 4.40 + 3.75 + 67.20 + 0.65 = 98.65$$

$$OX_S = 10.85 + 4.10 + 2.95 + 45.10 + 0.55 = 63.55$$

c) CONSIDERAREMOS de aquí en adelante que R es el promedio de los valores calculados en (a) y (b):

$$R = \frac{1.6096 + 1.6256}{2} = 1.6176 \text{ Kg/Kg KL}$$

d) GRUDO que se pierde en forma de polvo:

$$S' = \frac{8.4767 (63.55)}{100 \cdot 64.00} = 0.842 \text{ Kg/Kg KL}$$

e) GRUDO que se convierte en CLINKER:

$$R' = 1.6176 - 0.0842 = 1.5334 \text{ Kg/Kg KL}$$

3) RELACIONES QUE DEFINEN LA CALIDAD DEL CLINKER:

$$a) \text{ IS} = \frac{67.20(100)}{2.8(22.65 - 0.10) + 1.1(4.40) + 0.7(3.75)} = 94.80\%$$

$$b) \text{ GS}_R = \frac{[67.20 - (1.20 + (0.7)(0.15))](100)}{2.8(22.65 - 0.10) + 1.1(4.40) + 0.7(3.75)} = 93.33\%$$

$$c) \text{ MS} = \frac{22.65}{4.40 + 3.75} = 2.78$$

$$d) \text{ MA} = \frac{4.40}{3.75} = 1.17$$

$$\begin{aligned} \text{e) \% FL} &= 3.00(4.40) + 2.25(3.75) + 0.65 + 0.55 + 0.17 = \\ &= 23.01 \% \end{aligned}$$

f) Componentes mineralógicos potenciales del Blinker:

$$\begin{aligned} \% \text{C}_3\text{S} &= 4.07(67.20 - 1.20 - 0.7(0.15)) - 7.6(22.65 - 0.10) - 6.72(4.40) - \\ &- 1.43(3.75) = 61.88 \% \end{aligned}$$

$$\% \text{C}_2\text{S} = 2.87(22.65 - 0.10) - 0.754(61.88) = 18.06 \%$$

$$\% \text{C}_3\text{A} = 2.65(4.40) - 1.69(3.75) = 5.32 \%$$

$$\% \text{C}_4\text{AF} = 3.04(3.75) = 11.40\%$$

$$\% \text{CaSO}_4 = 1.7(0.15) = 0.26\%$$

4) CAUDAL DE GASES DE ESCAPE DEL HORNO:

a) Gases procedentes del polvo crudo:

1) Descarbonatación del crudo:

$$\begin{aligned} V_{\text{CO}_2}(\text{R}) &= \frac{1}{100(1.977)} \left[ 0.7848(67.20) + 1.092(0.65) \right] = \\ &= 0.2704 \text{ Nm}^3/\text{Kg KL} \end{aligned}$$

ii) Descarbonatación del polvo arrastrado:

$$C_{\text{CO}_2}(\text{S}) = \frac{0.786(45.10) - 33.60}{197.7} = 0.0008 \text{ Nm}^3/\text{Kg KL}$$

iii) Agua libre contenida en el crudo:

$$V_{\text{H}_2\text{O}}(\text{R}) = \frac{0.1(1.6176)}{0.8038(100-01)} = 0.0020 \text{ Nm}^3/\text{Kg KL}$$

iv) Agua de hidratación (H<sub>2</sub>O comb):

$$V_{\text{hidr}} = \frac{10(1.6176)}{0.8038(100)} = 0.0201 \text{ Nm}^3/\text{Kg KL}$$

v) Total de gases procedentes de la Harina cruda:

$$0.2704 + 0.0008 + 0.0020 + 0.0201 = 0.2933 \text{ Nm}^3/\text{Kg KL}$$

b) GASES PROCEDENTES DE LA COMBUSTION:

i) Oxígeno mínimo necesario:

$$O_{\text{min}} = 1.864 \frac{(86.81)}{100} + 5.533 \frac{(12.40)}{100} + 0.698 \frac{(0.45)}{100} - 0.7 \frac{(0.27)}{100} = 2.3055 \text{ Nm}^3 \text{ Kg comb.}$$

ii) Relación combustible-clínker:

$$K = \frac{(154,100) (0.824)(100)}{(1,504.13)(1000)} = 8.44 \text{ Kg comb}/100 \text{ Kg KL}$$

iii) Oxígeno mínimo necesario referido al clínker:

$$O_{\text{min}} = \frac{8.44}{100} (2.3055) = 0.1946 \text{ Nm}^3/\text{Kg KL}$$

iv) Aire mínimo necesario referido al clínker:

$$L_{\text{min}} = 4.762 (0.1946) = 0.9266 \text{ Nm}^3/\text{Kg KL}$$

v) Exceso de aire en la descarga del horno:  
(COEFICIENTE).

$$n = \frac{1}{1 - 3.762 \frac{3.05}{63.65}} = 1.2199$$

vi) Aire en exceso:

$$L_{\text{exc}} = 0.9266 (1.2199 - 1) = 0.2038 \text{ Nm}^3/\text{Kg KL}$$

vii) Aire total efectivo ocupado para la combustión:

$$L_{\text{ef}} = 0.9266 + 0.2038 = 1.1304 \text{ Nm}^3/\text{Kg KL}$$

viii) Cantidad mínima de gases de combustión  
(TEORICA):

$$V_{CO_2} = \frac{1.867 (86.81)(8.44)}{10,000} = 0.1368 \text{ Nm}^3/\text{Kg KL}$$

$$V_{SO_4} = 0.700 \frac{(0.45)(8.44)}{10,000} = 0.0003 \text{ Nm}^3/\text{Kg KL}$$

$$V_H = 11.21 \frac{(12.40)(8.44)}{10,000} = 0.1173 \text{ Nm}^3/\text{Kg KL}$$

$$V_{N_2} = 0.80 \frac{(0.07)(8.44)}{10,000} = 0.0000 \text{ Nm}^3/\text{Kg KL}$$

$$V_{H_2O}^{(1)} = \frac{1.2441(0.27)(8.44)}{10,000} = 0.0003 \text{ Nm}^3/\text{Kg KL}$$

$$V_{N_2} (\text{L min}) = 0.97 (0.9266) = 0.7320 \text{ Nm}^3/\text{Kg KL}$$

$$V \text{ min} = 0.9867 \text{ Nm}^3/\text{Kg KL}$$

ix) Cantidad efectiva de gases de combustión:

$$V_{ef} = 0.9867 + 0.2038 = 1.1905 \text{ Nm}^3/\text{Kg KL}$$

c) HUMEDAD ATMOSFERICA DEL AIRE DE ENTRADA AL HORNO

$$\text{DE TABLAS: FLG} = 19.10 \text{ gr/Nm}^3$$

$$V_{H_2O}^{(L)} = \frac{19.10 (1.1304)}{803.8} = 0.0269 \text{ Nm}^3/\text{Kg KL}$$

d) AIRE FALSO QUE ENTRA AL SISTEMA:

i) Coefficiente de exceso de aire a la salida de la torre:

$$n_2 = \frac{1}{1 - 3.762 \left( \frac{3.50}{67.41} \right)} = 1.2427$$

ii) Caudal de aire falso en el Precalentador:

$$L_{FL}(T/H) = (1.2427 - 1.2199) 0.9266 = 0.0211 \text{ Nm}^3/\text{Kg KL}$$

e) CAUDAL TOTAL DE GASES DE ESCAPE DE LA TORRE:

$$V_{gah} = 1.5318 \text{ Nm}^3 / \text{Kg KL}$$

f) AIRE DE ESCAPE POR CHIMENEA DEL ENFRIADOR:

$$L_{ech} = (2.1742 + 0.0492 - 1.1304) = 1.0930 \text{ Nm}^3 / \text{Kg KL}$$

OBSERVACION : La diferencia entre la medición y el valor calculado del caudal de gases de escape por la chimenea del enfriador (Lech) es de 25.85% que es mucho, lo cual se puede explicar por el alto grado de dificultad que presentó la medición en la chimenea, por el alto contenido de polvo del aire. Por lo anterior, se ha optado por escoger el valor calculado como el valor más fiable de los dos.

5) ENTRADAS DE CALOR AL SISTEMA.

A) Calor sensible del combustóleo:

$$Q_s \text{ comb} = (0.0844)(0.462)(134.5 - 20) = 4.46 \text{ Kcal/Kg KL}$$

B) Calor de combustión del combustóleo:

$$Q_{Lcomb} = (0.0844)(10,184) = 859.53 \text{ Kcal /Kg KL}$$

C) Calor sensible del material crudo seco:

$$Q_{Scru} = (1.6176)(0.205)(94 - 20) = 24.54 \text{ Kcal/Kg KL}$$

D) Calor sensible del agua contenida en el material crudo:

$$A = (1.6176)(0.1) = 0.0016 \text{ Kg/Kg KL (insignificante)}$$

$$Q_{SA} = (0.0016)(1.000)(94 - 20) \approx 0.12 \text{ Kcal/Kg KL}$$

E) Calor sensible del aire introducido al sistema:

$$Q_{SL} = (2.1742 + 0.0492 + 0.2038 + 0.0211)(0.310)(35-20) = 11.38 \text{ Kcal/} \\ \text{/Kg KL}$$

6) CALOR CONSUMIDO EN EL SISTEMA:

a) Calor teórico necesario para la clinkerización:

$$h_H = (d')(R') = (1.00)(1.5334) = 1.5334$$

$$Q_{\text{teor}}(\text{Se}) = 2.22(4.40 + 5.86 + 1.5334) + 6.48(0.65) + 7.646(67.20) - \\ - 5.116(22.65 - 0.59(3.75)) = 418.69 \text{ Kcal/Kg KL}$$

$$N_R = (1.6176)(0.08) = 0.1294$$

$$K_R = (1.6176)(0.40) = 0.6470$$

$$S_{U_R} = (1.6176)(0.01) = 0.01618$$

$$Q_{\text{SULF}} = -25.8(0.1294 - 0.17) - 17.0(0.6470 - 0.55) + 20.0(0.01618 - 0.15) = \\ = -3.28 \text{ Kcal/Kg KL}$$

$$T_{\text{teor}}(\text{CE}) = 418.69 - 3.28 =$$

$$Q_{\text{teor}}(\text{CE}) = 415.41 \text{ Kcal/ Kg KL}$$

b) Evaporación del agua libre contenida en el crudo:

$$G_{H_2O}(R) = \frac{(0.1)(1.6176)}{100 - 0.1} = 0.0016 \text{ Kg / Kg KL}$$

$$Q_{H_2O}(R) = (0.0016)(586) = 0.94 \text{ Kcal/Kg KL}$$

c) GASES de escape del precalentador:

$$V_{\text{geh}} = 1.5318 \text{ Nm}^3/\text{Kg KL}$$

$$CO_2 = 1.5318 (.2909) - 0.0003 = 0.4453 \text{ Nm}^3/\text{Kg KL}$$

$$SO_2 = 0.0003 \text{ Nm}^3/\text{Kg KL}$$

$$H_2O = 0.1666 \text{ Nm}^3/\text{Kg KL}$$

$$O_2 = 1.5318(.035) = 0.0536$$

$$N_2 = 1.5318 (.6741) - 0.1666 = 0.8660$$

$$Q_{CO_2} = 0.4453(0.473)(390-20) = 77.93 \text{ Kcal/Kg KL}$$

$$Q_{SO_2} = 0.0003(0.457)(390-20) = 0.05 \text{ " " "}$$

$$Q_{H_2O} = 0.1666(0.372)(390-20) = 22.93 \text{ " " "}$$

$$Q_{O_2} = 0.0536(0.331)(390-20) = 6.56 \text{ " " "}$$

$$Q_{N_2} = 0.8660(0.318)(390-20) = 101.89 \text{ " " "}$$

$$Q_{\text{get}} = 209.36 \text{ Kcal / Kg KL}$$

d) Calor sensible del clinker:

$$Q_{KL} = (0.20)(144-20) = 24.8 \text{ Kcal/Kg KL}$$

e) Gases de escape del enfriador:

$$Q_{\text{ech}} = (1.0930)(0.320)(195-20) = 61.21 \text{ Kcal/Kg KL}$$

f) Polvo arrastrado con los gases de escape de la torre:

$$Q_p = (0.084767)(0.242)(390-20) = 7.59 \text{ Kcal/Kg KL}$$

g) Pérdidas por radiación y convección:

i) HORNO: 
$$Q_{(R-C)_H} = \frac{(933.1)(14.9+6.5)(310-20)}{62,672} = 92.4 \text{ Kcal/Kg KL}$$

ii) PRECALENTADOR:

$$Q_{(R-C)_P} = \frac{(1024.2)(6.7+5.6)(120-20)}{62,672} = 20.1 \text{ Kcal/Kg KL}$$

iii) ENFRIADOR:

$$Q_{(R-C)_E} = \frac{(200.1)(14.1+5.8)(190-20)}{62,672} = 10.8 \text{ Kcal/Kg KL}$$

iv)  $Q_{(R-C)_{Tot}} = 92.4 + 20.1 + 10.8 = 123.3 \text{ Kcal/ Kg KL}$

7) BALANCE TERMICO DEL SISTEMA PRECALENTADOR-  
-HORNO - ENFRIADOR.

i)  $Q_{ent} = 4.46+859.53+24.54+0.12+11.38 = 900.03 \text{ Kcal/ Kg KL}$

ii)  $S_{SaL} = 415.41+0.94+209.36+24.8+61.21+7.59+123.3=842.61 \text{ Kcal /KgKL}$

iii) Diferencia = 57.42 Kcal/Kg KL

iv) Error =  $\frac{57.42}{900.03} \times 100 = 6.38\%$

v) Descarbonatación en torre =  $.355(1.6176)-248 \frac{(1.255)(1.617)}{1-.248}$   
= 43.7 %

8) BALANCE TERMICO DEL ENFRIADOR:

A) ENTRADAS DE CALOR

i) Calor sensible del clinker que entra:

$$Q_{KLSH} = (0.257)(1381-20) = 349.78 \text{ Kcal/Kg KL}$$

ii) Calor sensible del aire introducido para enfriamiento:

$$Q_{1 \text{ enf}} = (2.1742)(0.31)(35-20) = 10.11 \text{ Kcal/Kg KL}$$

iii) Calor total de entrada al enfriador:

$$Q_{EE} = 359.89 \text{ Kcal/ Kg KL}$$

B) SALIDAS DE CALOR:

i) Salida de gases por chimenea del enfriador:

$$Q_{ech} = 61.21 \text{ Kcal/Kg KL}$$

ii) Calor perdido en el clínker de salida:

$$Q_{KL} = 24.80 \text{ Kcal/Kg KL}$$

iii) Calor perdido por radiación y convección:

$$Q_{(R-C)_E} = 10.8 \text{ Kcal/ Kg KL}$$

iv) Calor de salida del enfriador:

$$Q_{SE} = 61.21 + 24.80 + 10.80 = 96.81 \text{ Kcal/Kg KL}$$

C) CALOR RECUPERADO POR EL AIRE SECUNDARIO:

i)  $Q_{RAS} = 359.89 - 96.81 = 263.08 \text{ Kcal/Kg KL}$

ii) Cálculo de la Temperatura del aire secundario:

$$TAS = \frac{263.08}{(1.1905 - 0.0492)(0.31)} + 20 = 763.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

D) EFICIENCIA DEL ENFRIADOR:

i) Rendimiento de la Recuperación Térmica:

$$\% \text{ Rend} = \frac{263.08}{359.89} \times 100 = 73.10\%$$

ii) Rendimiento respecto al enfriamiento del clínker:

$$\% R (\text{enf}) = \frac{349.78 - 24.80}{349.78} \times 100 = 92.91 \%$$

iii) Producción específica media:

$$\frac{1504.13 \text{ ton/24 hs}}{(3.05)(19.50)\text{m}^2} = 25.29 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2 \text{ 24 hs}}$$



PERDIDAS POR RADIACION Y CONVECCION

HORNO:	92.4	Kcal/Kg KL =	10.27 %
PRECALENTADOR:	20.1	" " " =	2.23 %
ENFRIADOR :	10.8	" " " =	1.20 %

TOTAL CALOR

DETECTADO =	842.61	Kcal/Kg KL=	93.62 %
DIFERENCIA =	57.42	" " " =	6.38 %

TOTAL CALOR

DE SALIDA =	900.03	Kcal/Kg KL=	100 %
-------------	--------	-------------	-------

D) RELACIONES ENTRE COMPONENTES DEL PROCESO:

Relación crudo/clínker medida	=	1.6786	Kg/Kg KL
Relación crudo/clínker calculada (R)	=	1.6176	Kg/Kg KL
Factor combustible/clínker (K)	=	8.44	%
Factor polvo / clínker ( S )	=	8.48	%

E) CAUDALES DE GASES

Aire primario medido	=	0.0492	Nm <sup>3</sup> /kg KL =	4.13 %
Aire secundario calculado	=	1.1413	Nm <sup>3</sup> /kg KL =	95.87 %
Aire de enfriamiento medido	=	2.1742	" "	" "
Aire de escape por chimenea medido	=	1.0930	" "	" "
Aire de escape por chimenea calculado	=	1.0930	" "	" "
Gases de escape por la torre.	=	1.5318	" "	" "

F) RENDIMIENTO DEL EQUIPO

% entrada de aire falso al horno	=	21.99 %
% entrada de aire falso precalentador	=	2.28 %
% entrada de aire falso total	=	<u>24.27 %</u>

% Descarbonatación en la torre= 43.71 %

Rendimiento respecto a enfriamiento del clinker = 92.91 %

Rendimiento respecto a la recuperación térmica = 73.10 %

Temperatura calculada del aire secundario: 763.6 °C

G) CALIDAD DEL CLINKER PROCESADO:

KS = 94.80 %

GSR = 93.33 %

MS = 2.78 %

MA = 1.17

% FL = 23.01

C<sub>3</sub>S = 61.88 %

C<sub>2</sub>S = 18.06 %

C<sub>3</sub>A = 5.32 %

C<sub>4</sub>AF = 11.40 %

CaSO<sub>4</sub> = 0.26 %

VI. INTERPRETACION DEL BALANCE  
TERMICO.

VI.4. Interpretación de los resultados obtenidos de la prueba efectuada.

VI.4. INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA EFECTUADA.

A) ANALISIS GLOBAL DEL BALANCE.

La diferencia entre las entradas y salidas de calor fue de 6.38 %, valor que está fuera de lo aceptable. La inestabilidad que se presentó en el horno en cierto momento y la imprecisión inherente de las mediciones propiamente dichas, muy probablemente ocasionaron esto. Sin embargo se observan principalmente dos puntos de medición susceptibles de falsear los resultados obtenidos:

1) La temperatura de la harina cruda a la entrada al sistema, que se midió sobre la báscula dosificadora y de aquí es transportada neumáticamente (con aire frío) hasta los ciclones de la cuarta etapa de la torre, aproximadamente 60m., por lo que puede suponerse que sí se produce una caída de temperatura entre el punto de medición y la entrada a la torre.

2) La temperatura del clínker a la salida del enfriador, que fue medida a partir de la muestra tomada a la descarga del transportador de cadenas y que no es representativa por haber segregación del material en éste, además de perder calorías el clínker a lo largo del transporte (aproximadamente 10m). Además, el cálculo de las pérdidas por radiación y convección no es totalmente confiable por la incertidumbre de las mediciones de las temperaturas de superficie.

B) EXCESO DE AIRE:

A la salida del horno, el valor encontrado fue elevado: 3.05%  $O_2 = 14.52$  % aire en exceso, lo cual se debe a que el extractor del aire de escape del enfriador no es suficiente, por lo que es necesario utilizar el extractor principal para desalojar el exceso de aire de enfriamiento (sin contar las entradas de aire por otros conductos). En cambio, las entradas de aire falso por la torre son muy reducidas (2.28%), y debe considerarse como satisfactorio teniendo en cuenta que incluye el aire del transporte de la harina cruda (Bomba Fuller).

C) FACTOR CRUDO/CLINKER:

El hallado por pesada (1.6786 Kg/kg KL) difiere del calculado (1.6176 kg/ Kg KL), en 3.77 %, valor que debe ser achacado a un error de la báscula. Como esto se calibró antes de la prueba, debe suponerse que es necesario someterla a una revisión mucho más exhaustiva que permita garantizar una operación completamente satisfactoria.

D) AIRE DE ENTRADA:

El aire primario medido representó el 4.13 % del total del aire de combustión y es un valor bastante aceptable de acuerdo a lo recomendado (5-10 %) por el fabricante. El aire secundario calculado ( $1.1413 \text{ Nm}^3/\text{Kg KL}$ ) es muy alto para este tipo de equipos ( $0.9 \text{ Nm}^3/\text{Kg KL}$  para enfriadores Fuller), lo que probablemente se deba a la insuficiencia del extractor del enfriador y al alto consumo calorífico del horno. Por lo que respecta al aire de enfriamiento medido, el valor encontrado ( $2.1742 \text{ Nm}^3/\text{Kg KL}$ ) es bastante aceptable para este tipo de enfriador.

E) AIRE DE ESCAPE DEL ENFRIADOR:

La diferencia entre el valor medido y el valor calculado fue de 25.86%, diferencia muy elevada y que puede explicarse por los problemas que representa el medir este caudal con su alto contenido de polvos. Sin embargo los dos valores son bajos con respecto a lo recomendado, probablemente debido al problema del extractor del enfriador antes mencionado.

F) RENDIMIENTO DEL ENFRIADOR:

En lo que respecta a la recuperación térmica fue de 73.10 %, y en cuanto al enfriamiento del clinker fue de 92.91 %, valores bastante aceptables. Sin embargo, la temperatura del aire secundario manejado fue muy baja (753.6 °C) con respecto a lo recomendable (900 °C), lo cual se debe al alto volumen manejado como aire secundario, y la producción específica media fue de 25.29 Ton/m<sup>2</sup>. día, valor muy inferior también al recomendado (31 ton/m<sup>2</sup>.día). Se recomienda estudiar más ampliamente este equipo para mejorar su funcionamiento.

G) CONSUMO CALORIFICO

En equipo cuyo consumo debe oscilar entre 750 y 800 kcal/Kg KL el valor obtenido de 878.5 Kcal/Kg KL debe considerarse como muy elevado. En parte, esto puede explicarse por las condiciones de inestabilidad existentes en algún momento de la prueba. Sin embargo, las pérdidas por gases de escape en torre y en enfriador son muy elevadas (209 y 61 Kcal/Kg KL respectivamente), por lo que este punto debe ser objeto de un estudio más profundo encaminado a reducir estas pérdidas.

### H) GRADO DE DESCARBONATACION EN LA TORRE:

El valor calculado de 43.71% es claramente bajo considerando que el caudal de gases caliente que le llegan es mayor de lo normal debido al excesivo consumo calorífico. Esto probablemente se deba a la heterogeneidad en cuanto al tamaño de partícula de la harina cruda y a que ésta no es lo suficientemente fina que el proceso requiere.

### I) CALIDAD DEL CRUDO Y DEL CLINKER:

La finura de la harina cruda en la entrada de la torre (1.7% y 14.4% retenido en malla 70 y 170 respectivamente) excede la prevista en la garantía especificada por el fabricante (1.2 % y 14.0%), lo que probablemente sea causante del alto consumo térmico. Igualmente, el módulo de fundentes del crudo (1.17) es muy inferior al previsto en la misma garantía (1.8 - 2.4), lo cual provoca el alto contenido de  $C_3A$  y un % de fase líquida del 23% que ocasiona alta porosidad del clínker.

El bajo valor de  $GS_R$  (93.33 %) ocasiona que predomine la proporción de  $C_2S$  sobre el  $C_3S$ , disminuyendo ésto las resistencias mecánicas del cemento fabricado con este clínker.

Por último, el alto módulo de sílice presentado por el crudo (2.78) ocasiona una operación muy irregular del horno, cosa que trae como consecuencia un material insuficientemente calcinado en ciertas zonas.

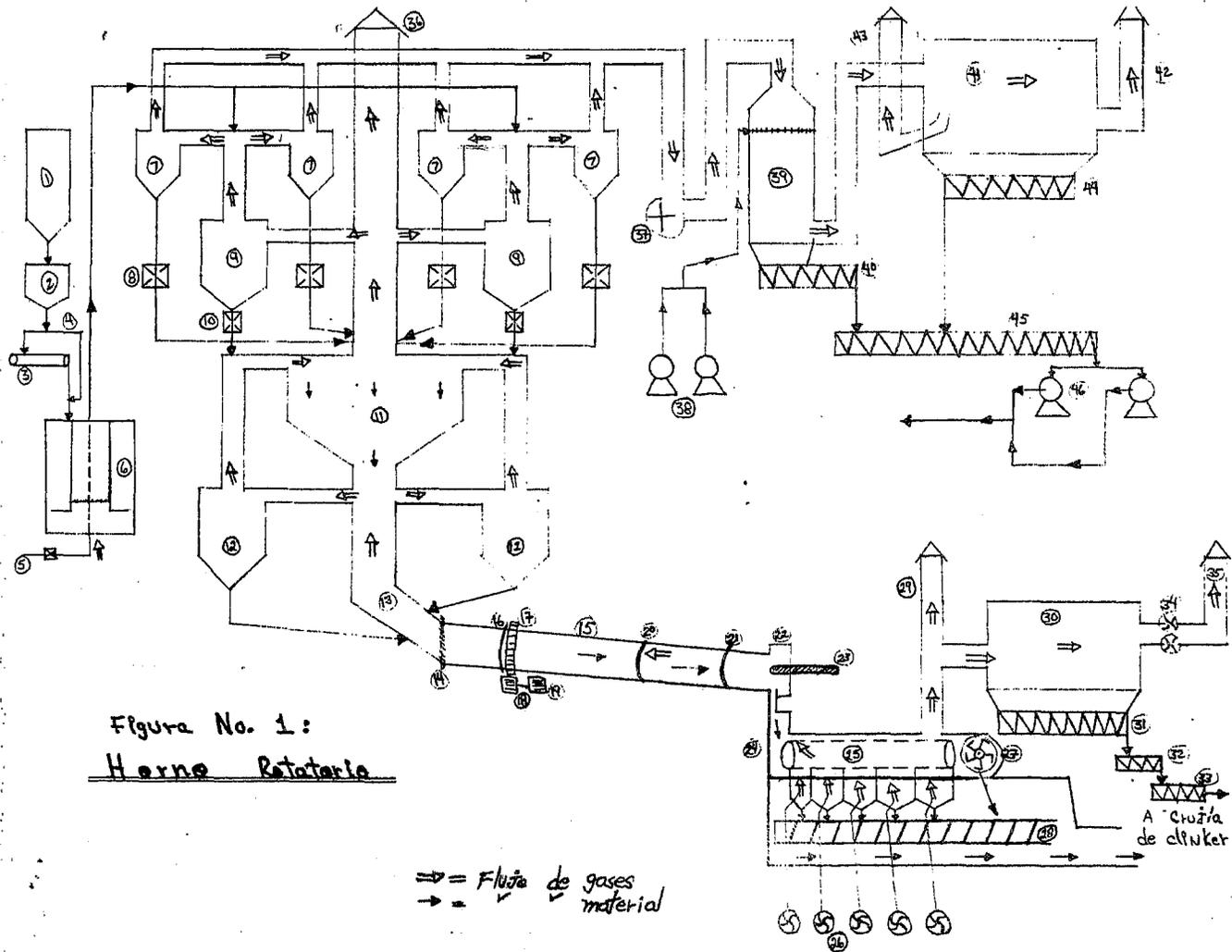


Figura No. 1:  
Horno Rotatoria

A: Cruzía de clinker

FIG. 1 : H O R N O R O T A T O R I O .

1. Tolva de Concreto.
2. Tolva de Prepesado.
3. Báscula dosificadora.
4. By pass Báscula.
5. Compresor (2) para Aeropol.
6. Aeropol.
7. Ciclonas (4), 4<sup>a</sup> Etapa prec.
8. Chapaletas descarga ciclonas 4<sup>a</sup>.
9. Ciclonas (2), 3<sup>a</sup> Etapa prec.
10. Chapaletas descarga ciclonas 3<sup>a</sup>.
11. Cuba de turbulencias, 2<sup>a</sup> Etapa prec.
12. Ciclonas (2), 1<sup>a</sup> Etapa prec.
13. Shutte Horno (entrada de material).
14. Sello del Horno.
15. Horno rotatorio.
16. Llanta sur.
17. Corona del Horno.
18. Motor principal.
19. Motor auxiliar.
20. Llanta Central.
21. Llanta norte.
22. Caráctula Horno.
23. Quemador Horno.
24. Enfriador.
25. Parrilla Enfriador.
26. Ventilador (5) del Enfriador.
27. Molino de Martillos.
28. Transporte de rastras.
29. Chimenea auxiliar.
30. Filtro de gravas.
31. Gusanos (3), descarga filtro.
32. Gusano descarga 3 gusanos filtro.
33. Gusano descarga a crujía.
34. Extractores (2), filtro gravas.
35. Chimenea filtro gravas.
36. Chimeneas del Horno.
37. Extractor principal.
38. Bombas alta presión agua (2).
39. Torre enfriamiento gases.
40. Gusano descarga torre enfriador.
41. Filtro electrostático.
42. Chimenea del filtro (8-a).
43. Chimenea del filtro.
44. Gusanos (3) descarga filtro.
45. Gusano general.
46. Bomba Fuller (2), finos crudo, a Tolva de Concreto.

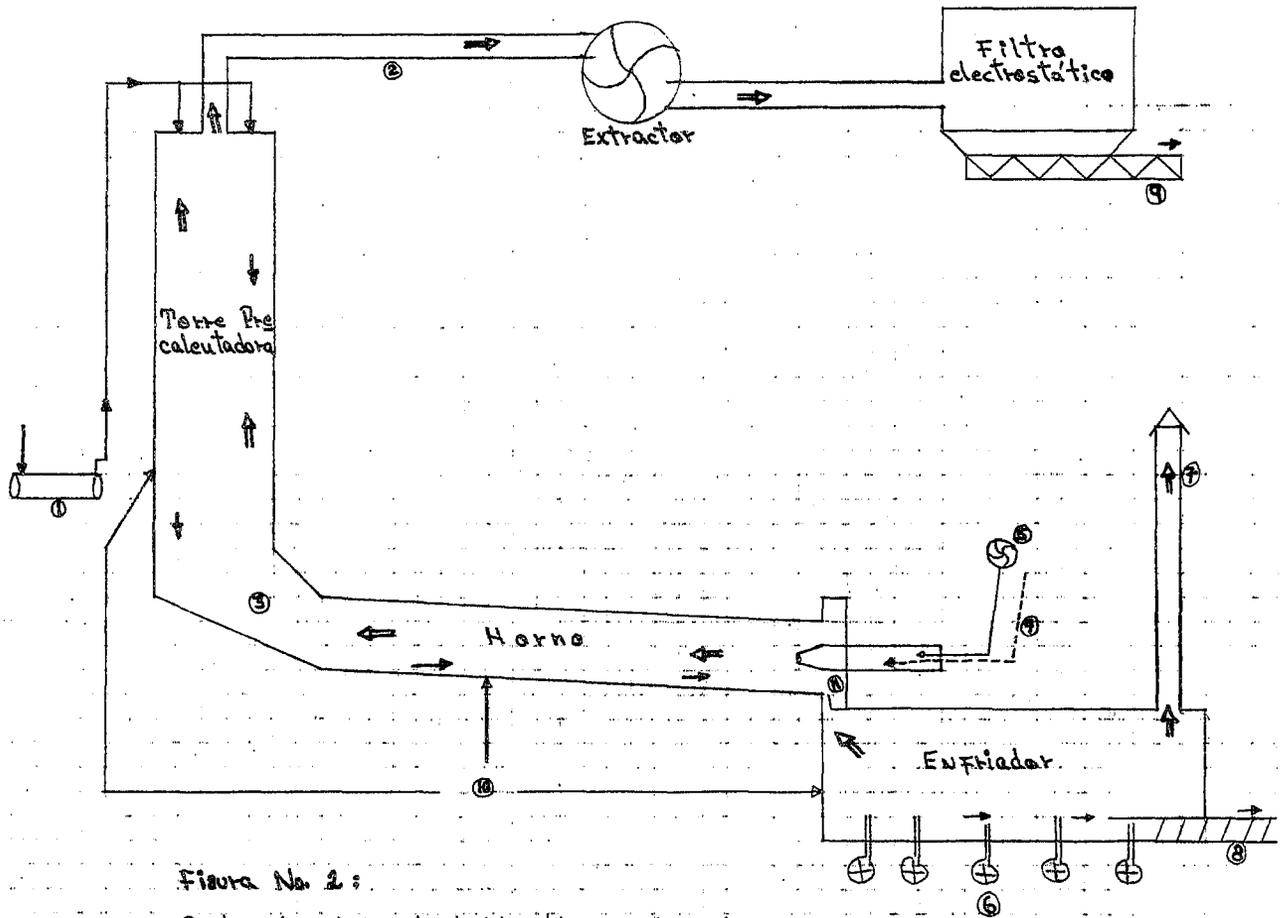


Figura No. 2:  
Puntos de Medición de Variables en el Sistema.

BIBLIOGRAFIA

ASSUMPCAO SANTOS, J. F. de : "Balance Térmico de Hornos Industriales", Madrid, 1971.

BOGUE, R. H.: "The Chemistry of Portland Cement", Reinhold, New York, 1955.

COMITE DE CALOR Y DE ENERGIA DE LA VDZ ( Asociación Alemana de Fabricantes de Cemento): "Ensayo de un Balance Térmico de un Horno Rotatorio", Dusseldorf, 1959.

COMPANIA DE CEMENTO ASLAND: "Manual Tecnológico del Cemento", Depto. de Ingeniería de Formación, Moncada, 1975.

DUDA, W.H., Ing., "Manual Tecnológico del Cemento", Editores Técnicos Asociados, S.A., 1977.

GREEN, A.P., Refractories Co., Missouri, Bulletin.

HOLDERBANK, ERNI H., "Funcionamiento de Grandes Hornos Rotatorios", Zement-Kal-Gips, No. 10, 1974.

KUNZE O.,: "Posibilidades de empleo del Cambiador de Calor por Suspensión del Crudo en Gases", Revista "Materiales de Construcción", No. 166, 1977.

LEA, F.M. "The Chemistry of Cement and Concrete", Edward Arnold Publishers, London, 1970.

LAFARGE CONSULTANTS LTD., Process And Systems Dept. Montreal, 1978, Bulletin.

FEERY, J. H.: "Chemical Engineers" Handbook, Mc Graw-Hill, new York, 1963.

POLYSIUS, S.A. "Boletín de Información Tecnológica para la Industria Cementera", Madrid, 1971.

REVISTA "Cemento-Hormigón", Ediciones de 1970 hasta la fecha; (del Número 430 en adelante.

TAYLOR S. F. W.: "La Química de los Cementos", Universidad de Aberdeen, 1964.

ZUR STRASSEN H.: "Zement-Kak-Gips", No. 9, 1956.