

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
ESCUELA NACIONAL DE CIENCIAS QUIMICAS

EFICIENCIA TERMICA DE UN HORNO ROTATORIO  
EN LA PRODUCCION DE CLINKER PARA  
CEMENTO PORTLAND

T E S I S

QUE PARA SU EXAMEN PROFESIONAL DE INGENIERO QUIMICO  
PRESENTA EL PASANTE

RODOLFO MARTINEZ CAMBEROS

MEXICO, D. F.

1949



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.

A mis Padres  
con gratitudud  
infinita.

A mi Esposa  
Amada, con  
adoración.

A mis Hijos  
Amada y  
Rodolfo.

ENCQ

A mis Hermanos  
Alexandro  
y Elena.

A mis Maestros.

A los "Compas".

I N D I C E

## CAPITULO I - I N T R O D U C C I O N.

- a) Consideraciones Previas.
- b) Generalidades.
- c) Descripción del proceso.
- d) Descripción y funcionamiento de los hornos rotatorios.

## CAPITULO II - C A L C I N A C I O N.

- a) Consideraciones previas.
- b) Calentamiento del material.
- c) Deshidratación del caolín.
- d) Transformaciones varias.
- e) Consideraciones sobre el fierro.
- f) Descomposición de los Carbonatos.
- g) Clinkerización.
- h) Formación de la porción fluida del clinker.
- i) Enfriamiento del clinker.

## CAPITULO III - CALCULOS PREVIOS A PARTIR DEL ANALISIS DE LA MATERIA PRIMA.

- a) Cálculo de la mezcla cruda.
- b) Cálculo del clinker probable.

## CAPITULO IV - EFICIENCIA TERMICA.

- a) Consideraciones.
- b) Cálculos del calor necesario para producir clinker.
- c) Resumen.
- d) Cálculo de la EFICIENCIA TERMICA.
- e) Conclusiones generales.

## A P E N D I C E.

## B I B L I O G R A F I A.

EFICIENCIA TERMICA DE UN HORNO ROTATORIO  
EN LA PRODUCCION DE CLINKER PARA  
CEMENTO PORTLAND.

## I

## I N T R O D U C C I O N

a) Consideraciones Previas.- El problema que se abordará en el presente trabajo se refiere concretamente al horno rotatorio que existe en la fábrica para Cemento Portland que está en Lagunas, Oaxaca, perteneciente a la compañía "La Cruz Azul", S. C. L., el cual tuve oportunidad de observar en su funcionamiento íntimo durante mi trabajo diario en dicha fábrica.

Para una mayor objetividad del proceso efectuado en el horno y con el propósito de destacar su importancia primordial en toda la elaboración del cemento en sí, se dará una ligera explicación al respecto, así como una breve descripción y funcionamiento de los hornos rotatorios.

b) Generalidades.- Se empezará por dar la definición de CEMENTO PORTLAND; esta definición es la que se da en la "NORMA OFICIAL DE CEMENTO PORTLAND" de la Secretaría de la Economía Nacional a través de la Dirección General de Normas. Es la siguiente: (9)

EL CEMENTO PORTLAND ES EL QUE PROVIENE DE LA PULVERIZACION DEL PRODUCTO OBTENIDO POR FUSION INCIPIENTE DE MATERIALES ARCILLOSOS Y CALIZOS QUE CONTENGAN LOS OXIDOS DE CALCIO, -

SILICIO, ALUMINIO Y FIERRO EN CANTIDADES CONVENIENTEMENTE CALCULADAS Y SIN MAS ADICION POSTERIOR QUE YESO SIN CALCIAR Y AGUA, ASI COMO OTROS MATERIALES QUE NO EXCEDAN EL 1% DEL PESO TOTAL Y QUE NO SKAN NOCIVOS PARA EL COMPORTAMIENTO POSTERIOR DEL CEMENTO.

c) Descripción del Proceso.- Para la producción de cemento Portland se parte de piedra caliza y arcilla o pizarra. (El siguiente diagrama nos dará una idea de las fases más importantes del proceso).

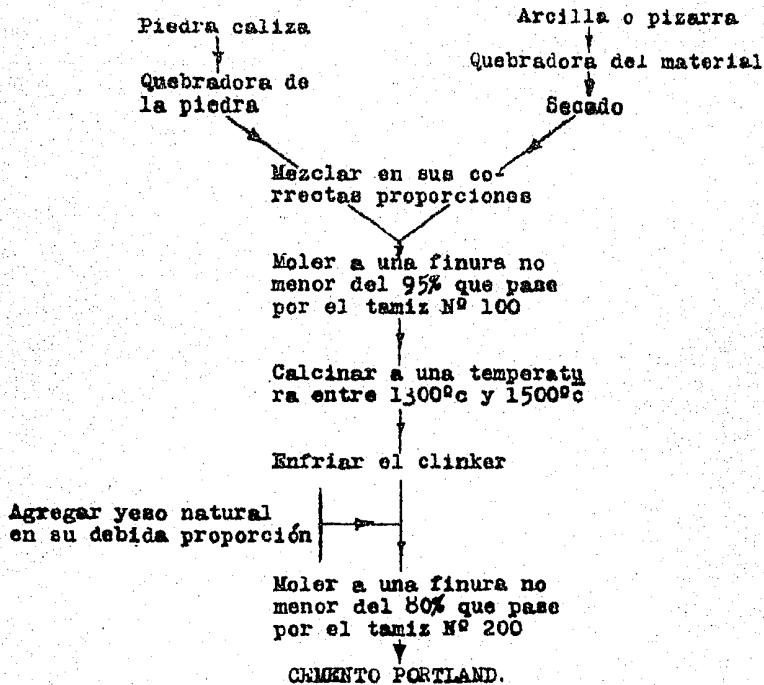


Diagrama N°1



Los materiales antes mencionados se quiebran por separado a un tamaño adecuado ( $\phi 1/2''$ ) y lo más homogéneo posible con el objeto de que puedan ser fácilmente manejables y que se puedan medir con precisión en los proporcionadores correspondientes; enseguida la pizarra es secada hasta que tenga una humedad inferior al 4%, con el objeto que en el molino no se apelmace el material, - pues con el calor que se desarrolla en la molienda, el agua se evapora y se condensa después a la salida del molino (que es la parte más fría) obstruyéndose las rejillas de salida al quedarse adherido ahí el polvo resultante de la molienda. (En algunas fábricas se seca el material de caliza y pizarra juntos y mezclados, pero en éstas, como la caliza empleada tiene una humedad inferior al límite permisible, se seca solo la pizarra, obteniéndose una gran economía de combustible).

Viene después la mezcla de los materiales en las proporciones establecidas de antemano (por medio del análisis de las materias primas y de un cálculo que se verá más adelante) y juntos ya, pasan al molino para ser reducidos a polvo, denominándose entonces MEZCLAS CRUDAS o simplemente CRUDOS. Es lógico pensar que mientras más finamente se muele el material, mejor será la combinación química de sus componentes, pues las partículas de los diversos materiales estarán en contacto más íntimo, sin embargo, una finura muy grande trae como consecuen-

cia un mayor gasto en la molienda, mayor pérdida de polvo en el horno por arrastre de los gases de chimenea y otros factores que se verán más adelante y que afectan de una manera directa el costo de producción; por lo dicho anteriormente, en cada fábrica se acostumbra normar la molienda de acuerdo con los estudios efectuados respecto al equipo en que se trabaje, fuerza, fuerza motriz, etc.; sin embargo, el dato que se da en el diagrama es considerado en la generalidad de los casos como el mínimo práctico para una buena calcinación.

La calcinación es el proceso siguiente y se efectúa en un horno apropiado (en este caso rotatorio) y es ahí donde se efectúan los mayores cambios de energía y las reacciones químicas más importantes del proceso en general. Los cruces entran al horno y en su trayecto dentro de él se efectúa la calcinación y CLINKERIZACION o sea cuando la cal ( $C_aO$ ) se combina con los óxidos llamados ácidos ( $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  y  $Fe_2O_3$ ) para formar los compuestos constituyentes principales del cemento. Posteriormente y todavía dentro del horno se produce la fusión incipiente del CLINKER formado, para después caer al enfriador.

Una vez el material frío pasa a mezclarse con una pequeña cantidad ( $\pm 4\%$ ) de yeso natural (para retardar el tiempo de fraguado del cemento) y de ahí al molino, de donde, después de alcanzar la finura necesaria, sale del molino listo para envasarse, pues ya es lo que se denomina CEMENTO PORTLAND.

d) Descripción y funcionamiento de los Hornos Rotatorios.

Los hornos rotatorios para la producción de cemento Portland, constan esencialmente de un tubo de hierro (casco -- del horno); éstos varían en su tamaño pero se puede decir que la mayoría de los existentes están comprendidos de los 6 a los 12 pies de diámetro interior y los 75 a 200 pies de longitud. Sin embargo, en la actualidad se están comenzando a usar hornos hasta de 500 pies de longitud, con el objeto de aprovechar mejor el calor que llevan los gases, eliminando por lo tanto los precalentadores del material crudo. Esta parte del horno está colocada con una ligera inclinación (generalmente de  $1^{\circ}$  a  $2^{\circ}$  con respecto a la horizontal) y sostenida por unas llantas de acero que tienen de tramo en tramo alrededor del casco y descansando dichas llantas sobre unos rodillos de acero. Más o menos en la parte media alrededor del horno se encuentra una corona de engranes para transmitirle por medio de un juego de engranes reductores de velocidad el movimiento de un motor; de esta manera el horno da generalmente una vuelta por cada minuto o por cada dos minutos.

Rematando uno de los extremos del tubo se encuentra la carátula del horno que es una especie de caja móvil en el sentido de la longitud del horno, para permitir la expansión del mismo debida al calentamiento que sufre; dicha caja no tiene fondo con el objeto de permitir al material que caiga dentro del enfriador. Por la pared de enfrente se encuentra la entrada del quemador de combu

tible que está dirigida hacia el centro del tubo; a uno o ambos lados del quemador se encuentran unas mirillas para observar que se efectúe la calcinación en la forma debida.

El otro extremo del tubo se encuentra rematado por la caja de humo que se comunica con la chimenea por la parte baja de ésta, es decir, a ras del piso con el objeto que el polvo que arrastran los gases quede en su mayor parte en la caja de humo para de ahí volverlo a meter a la tolva de alimentación y de esta manera reducir las pérdidas por este concepto. También en la parte baja de la chimenea se encuentran unas aberturas que en la mayoría de los casos tienen unas persianas para controlar el tiro de la chimenea y de esta manera poder alargar o acortar la llama según convenga.

La alimentación del material se efectúa de una manera constante y uniforme por medio de un alimentador con motor propio. El material casi siempre es llevado dentro del tubo del horno por medio de un tubo bastante inclinado, revestido éste por una chaqueta de agua.

El horno propiamente dicho se divide en cuatro zonas, a saber: la primera que corresponde a la zona de calentamiento del material hasta el punto de descomposición de los carbonatos; la segunda corresponde a la zona donde se efectúa dicha descomposición; la tercera es la zona de calentamiento del material hasta que alcanza la temperatura de clinkerización y la cuarta que es la zona donde se efectúa dicha clinkerización. Estas zonas no están perfec-

tamente delimitadas, pero se puede considerar, a groso modo, que la primera es de un 25%, la segunda de un 50% y la tercera y cuarta juntas el otro 25%.

La parte baja de la chimenea, la caja de humo, el casco del horno y la carátula, se encuentran revestidas interiormente de ladrillo refractario de diferentes calidades, según se necesite, tomando en consideración las temperaturas que deben soportar.

En las partes sometidas a temperaturas bajas se puede inclusive usar ladrillo hecho de barro común y corriente. En algunas fábricas, sobre todo cuando se trata de aquellas que producen cemento por el proceso húmedo, la primera zona del horno la dejan sin recubrir con ladrillo, pues el material se adhiere a la pared del casco y esto es suficiente aislante. En algún tiempo se estuvo usando ladrillo de Magnesia, pero por su alto costo, hoy en día está totalmente descartado. Lo más usual es el ladrillo aluminoso y para la segunda y aún para la tercer zona se acostumbra usar ladrillo con un contenido de más o menos 50% de alúmina, pero en la cuarta zona el contenido de alúmina se acostumbra que sea de aproximadamente un 70 a un 75%; procurando que el contenido de fierro, así como de álcalis sea el menor posible, pues éstos hacen las veces de fundente.

También se hicieron experimentos para usar ladrillos hechos con clinker en la siguiente forma: (8) se cernió el clinker por un tamiz para dar un tamaño de más o menos  $1/4"$  y se pusieron 30 partes de éste por 12 partes -

de cemento Portland y agua para hacer los ladrillos; después de secos éstos, se colocaron en el horno con bastante buen resultado, aunque se vió que no es recomendable en aquellos hornos que no trabajen de una manera continua. (Quizá esto último fuera conveniente experimentarlo aquí en México dado lo costoso que es el ladrillo altamente refractario).

Los hornos rotatorios son de funcionamiento bastante simple y es quizá por esto por lo que se han generalizado tanto en aquellos países donde el combustible es relativamente barato. (4)

Como ya se vió, los crudos entran al horno por el extremo más elevado de él; ahí el material va bajando paulatinamente merced a la inclinación y al movimiento de rotación del horno que a la vez sirve para voltear el material, de tal suerte que en toda su masa puedan tener lugar los cambios necesarios para la producción de clinker. Como se habrá visto el material dentro del horno va a contra corriente con los gases de descomposición del material y los de combustión del combustible (ver Diagrama No.3) encontrándose, por consiguiente, el material con regiones cada vez más calientes; estos gases son los que transmiten el calor por convección en la primera y gran parte de la segunda zona del horno; después, y esto es en proporción mucho más grande, el calor se transmitirá principalmente por radiación de la llama sobre la superficie libre del material y por conducción, de las paredes calientes del forro

del horno al entrar en contacto éstos con el material.

Estos hornos son de proceso continuo y también continuamente se puede estar observando como se está efectuando la clinkerización, disponiéndose de varias formas para corregir un mismo defecto. Por ejemplo: el más común es que el material tiende a salir crudo, es decir, que por equis circunstancias los procesos químicos y térmicos no se efectúen en las zonas correspondientes sino más adelante del horno; en este caso, algunas veces con un simple alargamiento de la llama aumentando el tiro de la chimenea por medio de las persianas, se corrige dicho defecto; en otras ocasiones lo indicado es aumentar la cantidad de combustible en el quemador para obtener más calorías que lleven a cabo los procesos termoquímicos que se habían retardado, o bien, si lo anterior no convenía porque se viera, por ejemplo, que la temperatura de salida de los gases era superior al límite práctico permisible, se procedería a reducir la velocidad del horno y con ello se aumentaba el tiempo de permanencia del material dentro del mismo, etc. Estas medidas las puede tomar más o menos correctamente el hornero experimentado, pero sobre todo disponiendo de un buen equipo de control (como es en el caso presente) se podrá tomar la medida que más convenga.

Se han visto brevemente las características principales de hornos rotatorios en general y para que se tenga una visión ligeramente más amplia del caso particular del horno rotatorio de la fábrica de cemento en Lagu-

nas, Oaxaca, se incluirá en el presente trabajo un apéndice conteniendo el análisis tabular del equipo del citado horno y unas fotografías del mismo.

## C A L C I N A C I O N

a) Consideraciones Previas.- Por calcinación se tomarán - todas las transformaciones que sufren los crudos dentro -- del horno para convertirse en clinker.

En esta parte se harán también ciertas consideraciones de óiden práctico para la resolución del problema de referencia.

b) Calentamiento del Material.- Los crudos entran al horno y el primer cambio térmico que ocurre en el proceso es el calentamiento del mismo. Soper midió la temperatura en varias partes de un horno de 7 pies de diámetro por 100 -- pies de longitud insertando tubos de porcelana conteniendo el par termoeléctrico de un pirómetro a través de agujeros previamente taladrados a través del casco del horno y del forro de ladrillo refractario; el diagrama N<sup>o</sup>3 nos muestra la temperatura de los gases en varios puntos del horno tal como quedaron establecidos en dicha prueba, así como también la temperatura del material a través del horno calculada de la temperatura de los gases. (8)

El agua presente como humedad es eliminada total y prácticamente a 115°C. Esta agua no se tomará en cuenta en los cálculos, ya que el calor gastado en calentarla y evaporarla es el mismo que el recuperado al condensarla y enfriarla.

c) Deshidratación del Caolín.- Cuando el material alcanza

ENCO

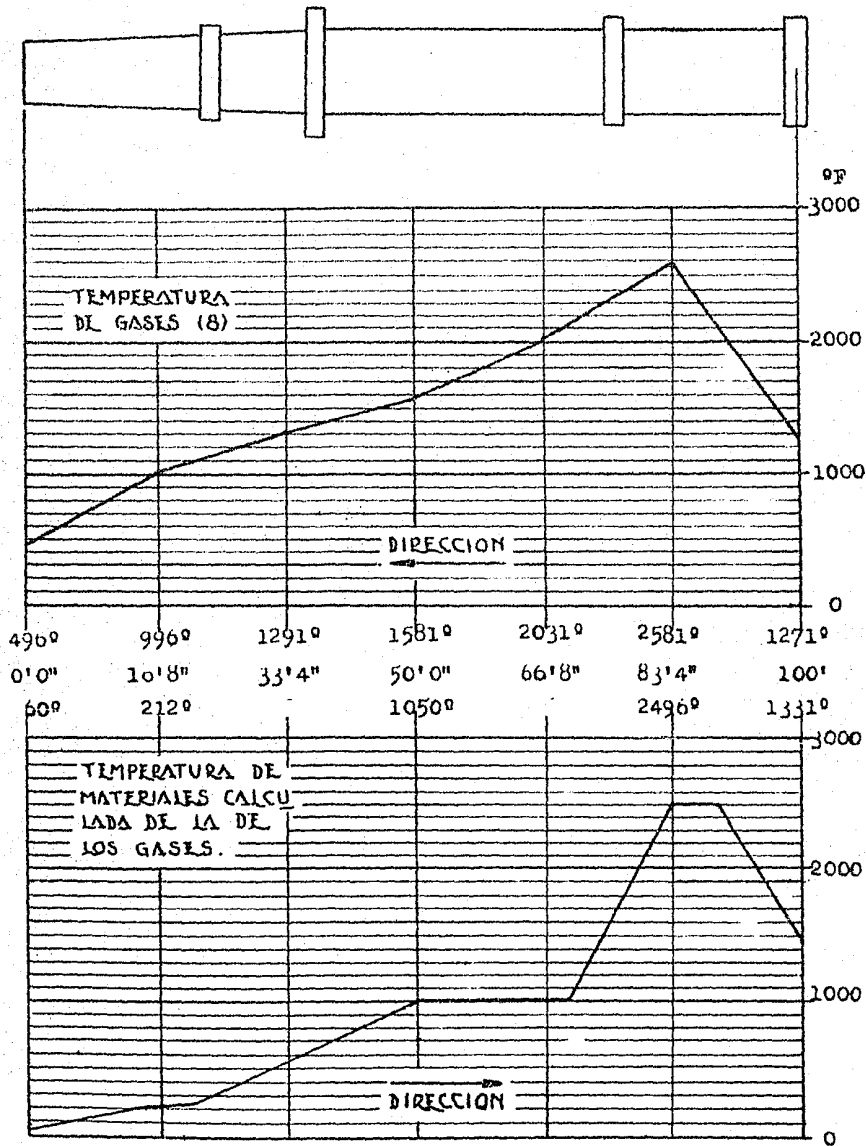


DIAGRAMA 3



El efecto endotérmico en la formación del metacaolín de los óxidos puros se obtiene de la diferencia de los calores de solución del producto calentado a 600°C y -- 1050°C y es de  $72 \pm 10$  cal. por cada gramo de metacaolín. ( $164.6 - 180.5 = - 15.9$  Kg.cal/mol).

Hasta ahora no ha sido posible decir en que forma se presenta la sílice que proviene del caolín descompuesto. Es probable que tenga un mayor contenido de energía que el cuarzo. Como se carece de una idea precisa, se supone -- que este tipo de sílice sea amorfa y su contenido de calor ha sido tomado como 56 cal por gramo mayor que el de cuarzo.

En trabajos anteriores, el calor de deshidratación del caolín acerca de 500°C ha sido tomado usualmente -- como de 135 a 145 cal/gr. como lo determinaron Kleber y -- Kordes. (5) Por la ley de Hess, puede ser demostrado que la deshidratación a 450°C requiere 78 cal/gr. más que la diferencia entre los calores de solución de cantidades equivalentes de material hidratado y deshidratado a 20°C.

En la aplicación de esta ley, los cálculos deberán ser referidos a 1 gr. de caolinita, es decir:  $\frac{222}{258}$  gr. de metacaolín. Los calores específicos medios entre los -- 20°C y los 450°C del caolín y metacaolín y el calor obtenido por el enfriamiento y condensación de 0.1394 gr. de agua de constitución en la caolinita de 450°C (109.6 cal) debe -- ser tomada en cuenta. La ecuación de acuerdo con la ley de Hess será por consiguiente:

$$\Delta^K_{(450^\circ)} = \Delta^K_{(20^\circ)} + \frac{222}{25^H} \bar{C}_p_{(AS_2)} \times \Delta T + 109.6 - \bar{C}_{p_X} \times \Delta T$$

$$\Delta^K_{(450^\circ)} = 145 + 88.2 + 109.6 - 120.4 = 223 \text{ cal/gr.}$$

$$\bar{C}_p \text{ (entre } 20^\circ\text{c y } 450^\circ\text{c) del } AS_2 = 0.238 \quad (3)$$

$$\bar{C}_p \text{ (entre } 20^\circ\text{c y } 450^\circ\text{c) del } K = 0.280 \quad (3)$$

El valor 223 cal/gr. de caolín deberá ser usado para el calor de deshidratación de la caolinita en cálculos para la calcinación de cemento Portland.

d) Transformaciones Varias.— Las transformaciones (a que se referirá este párrafo) que sufren varios componentes de la materia prima, dado su mínimo porcentaje en que se encuentran presentes casi no afectan térmicamente el proceso, o mejor dicho, en comparación con los otros cambios térmicos, pierden su importancia y prácticamente se pueden despreciar. Solo se enumerarán para que se tenga una visión más completa del proceso de calcinación.

El carbón y la materia orgánica presentes en los crudos son quemados y expulsados.

El azufre presente en la materia prima, ya sea como sulfuros, sulfatos o en combinación con la materia orgánica, es expulsado en su mayoría y el residuo se encuentra presente como sulfato de calcio.

Los álcalis potasa y sosa son parcialmente expulsados en el horno; en experimentos efectuados, las pérdidas de sosa son un 19% a un 28% mientras que las de pota

sa varían del 46% al 52%. Estas pérdidas de álcalis son también determinadas por un análisis de el depósito colectado en las paredes y el fondo de la caja de humo del horno; una muestra del cual contiene:

1.38% de sosa y

6.83% de potasa.

e) Consideraciones sobre el Hierro.- El hierro, gran parte del cual generalmente se encuentra en la materia prima en condiciones ferrosas, es oxidado a compuestos férricos.

Como los compuestos de hierro que contiene la materia prima no se conocen exactamente cuales son, ya que para los fines prácticos de la elaboración de cemento no importa que se encuentre dicho hierro como óxido ferroso o férrico, ni si proviene de pirita (sulfuro), de ferrita de calcio o en todas esas formas a la vez, para nuestro propósito (sin temor a caer en gran error) se considerará que el hierro está presente en forma de óxido férrico ( $Fe_2O_3$ ) que es la forma como se determina y se reporta siempre en los análisis rutinarios de materia prima, clinker y cemento.

f) Descomposición de los Carbonatos.- El bióxido de carbono presente en los crudos como carbonatos de calcio y magnesio, es expulsado totalmente, aún cuando en el producto final bien calcinado y recién molido se encuentren pequeñas cantidades de carbonatos, de seguro que provienen del aire, ya que el cemento rápidamente absorbe bióxido de carbono y agua.

La descomposición efectiva de los carbonatos -

empieza a una temperatura superior a los 880°C (2); por lo tanto, se considerará como temperatura de descomposición - los 900°C, pues la descomposición total se alcanza alrededor de los 920°C, ya que al empezar la disociación, el CO<sub>2</sub> que se desprende, se contrapone al subsecuente desprendimiento del mismo, dado que para que se siga desalojando el CO<sub>2</sub> de la masa de la carga es necesario vencer la presión del ya desprendido, pues según lo anunció Aimé en 1837, -- CUANDO UN CUERPO SE DESCOMPONE POR EL CALOR, NO ES LA PRESION DE CUALQUIER GAS O VAPOR ESCOGIDO AL AZAR QUIEN PUEDE IMPEDIR LA DESCOMPOSICION, SINO LA DEL GAS O VAPOR QUE SE DESPRENDE DE LA DESCOMPOSICION, EL CUAL POR SI SOLO PUEDE ACTUAR. Por lo tanto, para que se realice el desprendimiento total del CO<sub>2</sub> de los carbonatos habrá que elevarse la temperatura o eliminarse la atmósfera de dicho gas.

El calor requerido para la descomposición del carbonato de calcio representa la mayor porción entre las reacciones termoquímicas de la calcinación y asciende de 395 a 397 cal. por gramo de carbonato. El valor para esto de 425 cal/gr. que es obtenido de la diferencia de los calores de solución del óxido de calcio y carbonato de calcio en un ácido adecuado a 20°C no debe usarse. (3)

Si los calores específicos medidos entre 20°C y 900°C del CaO, CO<sub>2</sub> y CaCO<sub>3</sub> son tomados como: 0.2129, ----- 0.2580 y 0.2657 respectivamente (3), usando el método de Hess, el valor de 396 cal/gr. es obtenido como el calor de disociación del carbonato de calcio a 900°C.

$$\Delta F_{(900^{\circ}\text{c})} = \Delta H_{(20^{\circ}\text{c})} + 0.2129 \times \frac{56}{100} \times 880 + 0.258 \times \frac{44}{100} \times 880 - 0.2657 (880)$$

$$\Delta F_{(900^{\circ}\text{c})} = 425 + 185 + 100 - 234 = 396 \text{ cal/gr.}$$

Este valor será usado en el cálculo de la eficiencia térmica del horno. F.M. Lea ha llegado por un razonamiento similar al valor de 665 B.T.U./lb. = 369 cal/gr. a 900°c. (2)

Para el  $\text{MgCO}_3$  se sigue procedimiento igual al anterior refiriéndolo a 1 gr. de carbonato de magnesio. Los calores específicos medios entre 20°c y 900°c son:

$$\text{para el } \text{MgCO}_3: 0.238 \text{ cal/gr}^{\circ} \quad (3)$$

$$\text{para el } \text{CO}_2: 0.258 \text{ cal/gr}^{\circ} \quad (3)$$

y para el MgO se calculará por no haber encontrado disponible ese dato.

$$\text{Capacidad calorífica del MgO en cal/}^{\circ}\text{Kmol} = 10.86 + 0.001197T - 208700T^{-2} \quad (7)$$

por consiguiente tenemos que el calor específico medio entre 20°c y 900°c y para 1 gr. de MgO será:

$$\bar{C}_p \frac{\text{cal}}{\text{gr.}} = \frac{\int_{T_1}^{T_2} (10.86 + 0.001197T - 208700T^{-2}) dT}{\Delta T \times 40.32} \quad (6)$$

$$\frac{10.86(T_2 - T_1) + \frac{0.001197}{2} (T_2^2 - T_1^2) + \frac{208700}{(T_2 - T_1)}}{880 \times 40.32}$$

$$T_1 = 293^{\circ}\text{K}; T_1^2 = 85849 \quad T_2 - T_1 = 880; (T_2 - T_1)^2 = 774400$$

$$T_2 = 1173^{\circ}\text{K}; T_2^2 = 1375929 \quad T_2^2 - T_1^2 = 1290080$$

$$\bar{C}_p = \frac{10.86 \times 880 + 0.0005985 \times 1290080 + \frac{208700}{880}}{880 \times 40.32}$$

$$\bar{C}_p = \frac{9556.8 + 772.11 + 237.15}{880 \times 40.32} = \frac{10566.06}{35481.60} = 0.2977$$

Procediendo a aplicar la fórmula de Hess, tenemos:

$$\begin{aligned} \Delta H(900^\circ\text{C}) &= 215 + 0.2977 \times \frac{0.4761 \times 880}{420.728} + 0.258 \frac{44.01}{84.32} 880 \\ &\quad - 0.238 \times 880 = \\ &= 215 + 125 + 118 - 209 = 249 \text{ cal/gr.} \end{aligned}$$

valor que se usará en la resolución del problema.

g) Clinkerización.- Los cambios químicos enumerados o descritos anteriormente son aquellos que podemos palpar por medio de análisis químicos comparativos de la materia prima y del clinker.

W.M. Newberry hizo un experimento de gran interés para tratar de aclarar qué es lo que sucede durante el paso de la materia prima a través del horno. Para lo anterior se dejó apagar un horno rotatorio que estaba trabajando normalmente y sin vaciarlo se dejó enfriar de tal manera que se pudieran tomar muestras de la carga cada cuatro pies en toda la longitud del horno. Después de cuidadoso examen, estas muestras fueron analizadas y los resultados mostraron los cambios que tienen lugar en la composición química del material en las sucesivas etapas de la calcinación. (8)

La primera muestra correspondió a los crudos y fué tomada a la entrada del horno y la última fué el clin-

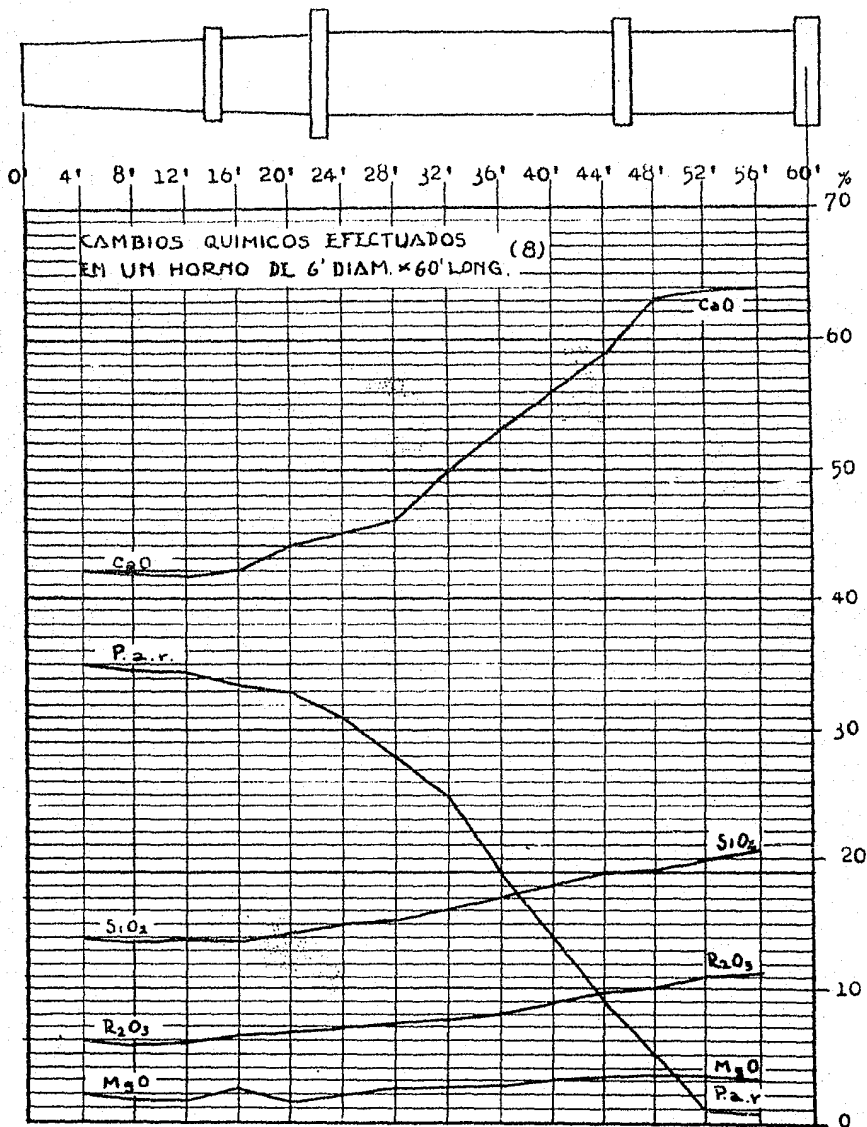


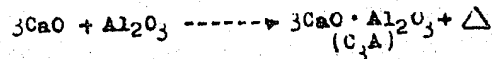
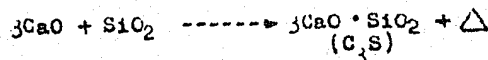
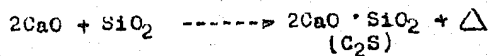
DIAGRAMA 4

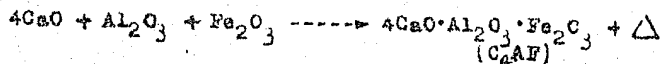
ker formado dentro de los últimos cuatro pies de la descarga del horno.

El Diagrama N°4 nos muestra gráficamente los diversos porcentajes de los compuestos químicos determinados en este experimento.

Ninguno de los citados cambios químicos efectuados son suficientes por sí solos para formar clinker de cemento Portland; todos los carbonatos pueden haber sido descompuestos y el bióxido de carbono expulsado en su totalidad de la materia prima y aún así no resultaría clinker de cemento Portland. Para que esto suceda es necesario calentar el material a una temperatura considerablemente más alta que la requerida para expulsar el bióxido de carbono. Si una pequeña muestra de crudos es calentado a peso constante con una lámpara de calcinación ordinaria, muy poco, si es algo, se convertirá en clinker, excepto tal vez la parte de la muestra en contacto con el fondo del crisol, aún después de que el bióxido de carbono haya sido expulsado.

Para la formación del clinker es necesaria la combinación de la cal (CaO) liberada por la descomposición del carbonato, con los llamados óxidos ácidos (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) para formar silicatos di y tricálcico, aluminato tricálcico y ferro-aluminato tetracálcico. (8)





Estas reacciones se efectúan sin que los materiales hayan sido realmente fundidos, sino que se efectúan por contacto íntimo entre las superficies. Lo anterior se afecta por tres factores, a saber: La cantidad de superficie expuesta, o en otras palabras la superficie específica o finura de la materia prima, la temperatura a la cual el material es calentado y el tiempo durante el cual el material es mantenido a esta temperatura.

Estas tres condiciones están íntimamente ligadas por medio de la siguiente expresión: (8)

$$D \times T \times F = C$$

en la cual D representa el tiempo; T la temperatura; F la finura y C una constante llamada CLINKER. Si nosotros incrementamos cualquiera de las tres variables D, T o F, deberá decrementarse una o ambas de las otras dos; así, por incrementar el tiempo en el horno, nosotros decrementamos la temperatura necesaria para el clinker (C) o la finura; mientras que si molemos el material más finamente, bajamos la temperatura o el tiempo de permanencia del material en el horno, pudiendo de esta manera incrementar el rendimiento del horno o bien bajar el consumo de combustible para una determinada cantidad de clinker (factores principales de la eficiencia térmica).

Como se habrá visto en la expresión anterior no interviene la composición química de la mezcla y más bien -

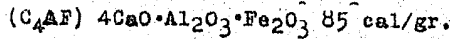
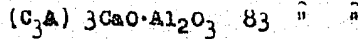
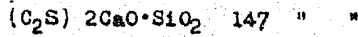
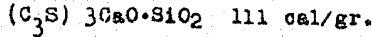
intenta expresar solamente las relaciones físicas en el proceso de calcinación. Sin embargo, en los sentidos técnico y práctico ha sido demostrado que esta consideración existe en la calcinación. Debe entenderse que los materiales deben calentarse a la temperatura a que tiene lugar la formación de clinker.

Como se vió al expresar las reacciones termoquímicas en la formación de los principales componentes de --- constitución del clinker, se desprende calor, es decir, la formación del clinker es un efecto exotérmico.

En la descripción del efecto exotérmico en la formación del clinker, con objeto de hacer el balance de calor o de calcular la eficiencia térmica del horno, es necesario distinguir los dos tipos siguientes: uno es el efecto exotérmico que acompaña a la formación del clinker únicamente a temperaturas superiores a los 1300°C; el otro además - incluye el efecto exotérmico debido a la cristalización de los compuestos amorfos del metacaolín y el calor de fusión en la formación de la porción fluida que no se relaciona directamente con la formación del clinker en sí.

Ahora se conocen los calores de formación de -- los principales componentes del clinker y usando estos valores se puede calcular el efecto exotérmico a partir del análisis de la materia prima sin efectuar ninguna determinación de calores de solución que era la forma de proceder antes. Las cantidades de los principales componentes del clinker se calculan de acuerdo con el método de Vogue.

Los calores de formación de dichos compuestos - a la temperatura de equilibrio son: (3)



y sus calores específicos medios entre 20°C y 1400°C (que es la temperatura que tomaremos como a la cual se forman los dos estos compuestos) son los siguientes:

$\bar{C}_p$  del  $C_3S$  0.246 cal/°c gr.

$\bar{C}_p$  "  $C_2S$  0.256 " " "

$\bar{C}_p$  "  $C_3A$  0.236 " " "

$\bar{C}_p$  "  $C_4AF$  0.257 " " "

En muchas fábricas por razones de orden práctico desprecian los compuestos del hierro para cálculos de calor, (sobre todo en las de cemento Portland blanco donde el contenido de  $Fe_2O_3$  es sumamente bajo) en tales casos se usa el procedimiento siguiente:

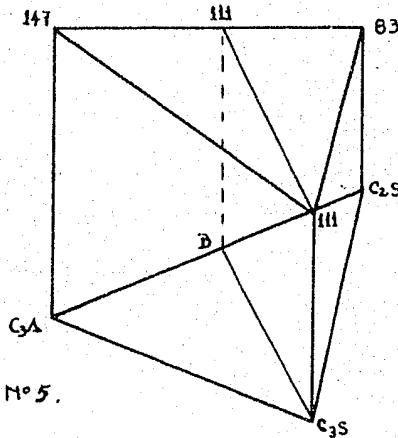


DIAGRAMA N° 5.

En el Diagrama N°5 los efectos exotérmicos están representados por las perpendiculares trazadas en los vértices  $C_3S$ ,  $C_2S$  y  $C_3A$  del triángulo de composiciones. Si se considera un plano que pase por los puntos 83, 111 y 147 entonces cualquier punto de este plano correspondiente a determinada composición de clinker, tendrá representado el efecto exotérmico por la distancia perpendicular del punto al plano mencionado. Como se verá, se pueden obtener una serie de clinkeres que tengan un mismo efecto exotérmico, por ejemplo: tendrán el mismo efecto exotérmico que el  $C_3S$ , todos aquellos clinkeres cuya composición corresponda a cualquiera de los puntos de la línea  $C_3S, B$  que es paralela a la línea 111, 111.

h) Formación de la Porción Fluida del Clinker.- Arriba de los  $1100^{\circ}C$  se comienza a fundir parte del material que a los  $1400^{\circ}C$  que es la temperatura máxima que dicho material alcanza en el horno (observada periódicamente con el pirómetro óptico) es de aproximadamente de un 22% a un 24%. La parte fundida al enfriarse aglutina partículas no fundidas formando piedrecillas que hacen más fácil su manejo.

El calor requerido para formar la parte fluida aún es materia a discusión entre los estudiosos del problema.

E. Schoff expresa en un artículo que según sus observaciones y las de Gilbert, no había efecto exotérmico que considerar en los diagramas térmicos. La causa de esta paradoja es que el efecto endotérmico en la deshidratación

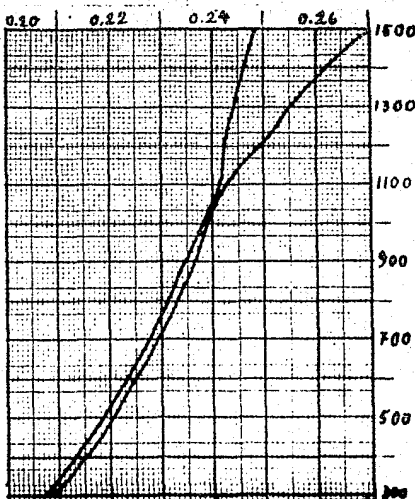
de la caolinita a 500°C es mayor que la que habían supuesto ya que se necesita una cierta cantidad de calor para formar la parte fluida del material (3) que estos autores no tomaron en cuenta.

Una gran parte del material fundido presente en el clinker a 1400°C puede en la práctica enfriarse rápidamente hasta adquirir un aspecto vidrioso y el calor necesario para formarlo arriba de 1200°C no se recupera como calor de cristalización, sino que permanece en forma de un lavado calor específico del vidrio. (3)

Si se hace una comparación entre los calores específicos medios del C<sub>3</sub>S y el clinker para cemento Portland de 20°C a 1500°C, se verá que hasta cerca de los 1100°C son muy parecidos y que de ahí en adelante los del clinker se hacen mayores. (3)

Temps.	$\bar{c}_p(C_3S)$	$\bar{c}_p(Clin.)$
20 - 300	0.207	0.208
20 - 400	0.213	0.215
20 - 500	0.218	0.220
20 - 600	0.223	0.225
20 - 700	0.227	0.229
20 - 800	0.231	0.233
20 - 900	0.234	0.236
20 - 1000	0.238	0.239
20 - 1100	0.241	0.242
20 - 1200	0.242	0.249
20 - 1300	0.244	0.255
20 - 1400	0.246	0.262
20 - 1500	0.248	0.270

DIAGRAMA N° 6



H.N. Schwite ha atribuido el incremento en el calor específico medio del clinker arriba de los  $1100^{\circ}\text{C}$  a la aparición de una cantidad creciente de una fase líquida en el clinker, con la elevación de la temperatura.

De acuerdo con estas determinaciones, el calor específico medio de  $20^{\circ}\text{C}$  a  $1400^{\circ}\text{C}$  del clinker cristalizado puede considerarse igual al del silicato tricálcico puro - ( $\text{C}_3\text{S}$ ) (ver tabla anterior) y que es de  $0.246 \text{ cal/gr}^{\circ}\text{C}$  y el del clinker con un contenido de fluido de cuando mucho 24% es  $0.262 \text{ cal/gr}^{\circ}\text{C}$  de tal manera que el contenido de energía del producto con materia fundida es  $0.0164 \times 1380 = 22 \text{ cal.}$  - por gramo de material.

Se puede suponer por las experiencias sobre la termodinámica del estado vítreo, que este valor calculado a partir de la diferencia de los calores específicos medios arriba de la temperatura de ablandamiento concuerda bien con el calor de fusión de la parte fundida de este clinker a  $1400^{\circ}\text{C}$ .

1) Enfriamiento del Clinker.- Lo más importante en el enfriamiento del clinker es la gran cantidad de calor que se recupera.

La determinación de la cantidad de calor que se recupera al enfriar el clinker hasta  $20^{\circ}\text{C}$  (que es la temperatura base) se hará a partir de los componentes minerales calculado por el método de Vogue y de sus respectivos calores específicos medios entre  $20^{\circ}\text{C}$  y  $1400^{\circ}\text{C}$  que fueron dados a conocer en el sub-capítulo de "clinkerización".

El MgO se presenta en su mayor parte en solución sólida como constituyente de un vidrio intersticial. Es muy necesario conocer el calor específico medio de dicho vidrio para poder calcular el calor específico medio del clinker a partir de su composición mineral. Ya que lo anterior todavía no ha sido medido, un valor debe ser supuesto. Para hacer dichos cálculos, hemos tomado para el MgO su calor específico medio calculado en (f) y que es: 0.2977 cal/gr. El resultado final para el clinker no debe ser afectado seriamente por esto, ya que la cantidad de material específico desconocido es muy pequeña.

## III

CALCULOS PREVIOS A PARTIR DEL  
ANALISIS DE LA MATERIA PRIMA.

a) Cálculo de la mezcla cruda.- En la citada fábrica se -  
partía de piedra caliza y pizarra para la fabricación del  
cemento Portland, así es que partiremos de los resultados  
de los análisis que sobre dicha materia prima se hicieron.

ANALISIS DE CALIZA DE LA  
PARTE NORTE DE LA CANTERA

<u>Muestra</u>	<u>I</u>	<u>II</u>	<u>III</u>
SiO <sub>2</sub>	2.78	1.66	3.03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.41	0.72	0.96
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.71	0.55	0.62
CaO	52.65	53.50	52.08
MgO	1.01	0.50	1.06
CO <sub>2</sub>	42.33	42.76	41.40
n.d.	0.11	0.31	0.25

--- --

ANALISIS DE CALIZA DE LA  
PARTE ESTE DE LA CANTERA

<u>Muestra</u>	<u>I</u>	<u>II</u>	<u>III</u>
SiO <sub>2</sub>	3.14	3.26	1.81
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.09	2.35	1.24
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.21	0.98	0.46
CaO	53.30	50.82	53.51
MgO	1.19	0.92	0.72
CO <sub>2</sub>	40.86	41.20	41.68
n.d.	0.20	0.47	0.58

--- --

Para simple comparación enseguida se darán las composiciones químicas de materias primas y cemento Portland de diversas fábricas de Estados Unidos que utilizan piedra caliza y pizarra.

		SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	P.a.r.
I	Caliza	1.54	1.04	0.39	53.87	0.52	42.86
	Pizarra	61.92	7.84	16.58	2.01	1.53	9.12
II	Caliza	4.20	0.64	2.11	50.86	0.88	40.85
	Pizarra	59.00	2.66	17.04	5.51	2.80	10.60
III	Caliza	1.76	0.62	0.62	53.83	0.72	42.92
	Pizarra	46.20	5.57	16.77	8.62	5.22	13.34
IV	Caliza	1.16	1.72	0.58	51.87	1.99	43.28
	Pizarra	54.36	7.75	18.57	7.44	1.43	9.76
V	Caliza	0.42	0.10	0.71	55.08	0.28	43.11
	Pizarra	42.30	5.92	12.36	12.86	5.50	18.11
VI	Caliza	1.20	0.32	0.56	54.08	0.53	42.94
	Pizarra	55.60	5.24	16.39	6.29	1.62	11.60
VII	Caliza	0.66	0.26	1.40	53.47	0.72	42.72
	Pizarra	55.12	6.20	20.00	3.26	1.73	10.70
VIII	Caliza	1.21	0.50	0.70	53.62	0.44	42.98
	Pizarra	58.25	7.35	18.56	3.10	1.28	8.55

- I - Alpha Portland Cement Co., Catskill, N. Y.  
 II - Marquette Cement Manufacturing Co., La Salle, Ill.  
 III - The Hecla Co., Bay City, Mich.  
 IV - Iola Portland Cement Co., Iola, Kansas.  
 V - Oklahoma Portland Cement Co.  
 VI - The Northwestern Portland Cement Co., Mason City, Ia.  
 VII - Henry Cowell Lime and Cement Co., Cowell, Cal.  
 VIII - Pacific Portland Cement Co., Suisun, Cal.

ANALISIS DE CEMENTOS PORTLAND AMERICANOS

	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	P.a.r.
Bay City, Mich.....	20.72	2.85	7.17	62.64	1.97	1.42	2.58
Wellston, O.....	21.84	5.05	6.77	62.66	0.80	1.24	-
Chanute, Kan.....	20.74	3.72	7.06	62.76	1.78	1.12	1.40
Ada, Okla.....	12.28	3.20	6.36	59.66	3.11	1.40	2.82
Glens Falls, N.Y...	21.50		10.50	63.50	1.80	1.50	n.d.
Alsen, N.Y.....	23.94	3.20	5.62	62.32	1.77	0.90	1.68
Fordwick, Va.....	21.31	2.81	6.54	63.01	2.71	1.42	2.01
Davenport, Cal.....	25.38	1.20	3.34	62.96	1.20	0.35	4.58
Cement, Cal.....	22.34	3.30	7.00	60.72	1.30	1.05	2.54
Baker, Wash.....	24.63		8.56	62.88	1.60	1.33	n.d.
St. Louis, Mo.....	23.12	2.49	6.18	63.47	0.88	1.34	1.81
Demopolis, Ala.....	19.36	4.10	9.18	63.20	1.16	1.18	1.12
Portland, Colo.....	21.88	2.85	7.14	64.94	huella	0.73	1.08

-----

ANALISIS DE LA CANTEIRA DE PIZARRA.

Muestra	I	II	III	IV
SiO <sub>2</sub>	69.02	67.60	67.56	67.60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.08	14.57	14.86	14.35
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.28	4.39	5.14	6.85
CaO	4.00	3.45	2.56	2.80
MgO	2.30	2.16	2.24	3.26
P.a.r.	3.60	4.08	3.76	4.24
n.d.	5.72	3.75	3.88	0.90

Fara determinar la cantidad de cada materia prima que debe ponerse para que los crudos tengan los diferentes componentes dentro de los límites establecidos para que produzcan un buen clinker, se pueden aplicar varias fórmulas, pero atendiendo a que debe de haber una correspondencia con el índice de hidráulicidad y a la relación de cal. (8)

$$\text{INDICE HIDRAULICO} = \frac{\% \text{SiO}_2 + \% \text{Al}_2\text{O}_3}{\% \text{CaO}} = \text{de } 0.4 \text{ a } 0.5$$

$$\text{RELACION DE CAL} = \frac{\% \text{CaO}}{\% \text{SiO}_2 + \% \text{Al}_2\text{O}_3 + \% \text{Fe}_2\text{O}_3} = \text{de } 1.8 \text{ a } 2.3$$

Nosotros tomaremos la fórmula que a continuación se indica para conocer la proporción en que deben mezclarse la caliza y la pizarra:

$$\frac{\text{Caliza}}{\text{Pizarra}} = \frac{\text{En pizarra } (2.8\% \text{SiO}_2) + (1.1\% \text{Al}_2\text{O}_3) + (0.7\% \text{Fe}_2\text{O}_3) - \% \text{CaO}}{\text{En caliza } \% \text{CaO} - [(2.8\% \text{SiO}_2) + (1.1\% \text{Al}_2\text{O}_3) + (0.7\% \text{Fe}_2\text{O}_3)]}$$

La fórmula anterior es la más frecuentemente usada y nos da el máximo de piedra caliza que puede entrar en la composición de las mezclas crudas de tal suerte que estando molidas éstas

a una finura adecuada y efectuada una buena calcinación, toda la cal se combine con los óxidos ácidos y no quede cal libre, pues ésta es sumamente dañina para el cemento; por lo anterior se acostumbra tomar, para mayor seguridad, un 10% menos de lo obtenido con la fórmula.

Para el propósito que aquí se persigue, tomaremos los promedios de los análisis de calizas y pizarra. Tenemos lo siguiente:

	<u>Caliza</u>	<u>Pizarra</u>
SiO <sub>2</sub>	2.71	67.95
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.13	14.22
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.59	4.66
CaO	52.64	3.20
MgO	0.90	2.49
CO <sub>2</sub>	41.70	3.92
n.d.	0.33	3.56

Aplicando la fórmula tenemos:

$$\frac{\text{Piedra caliza}}{\text{Pizarra}} = \frac{2.8 \times 67.95 + 1.1 \times 14.22 + 0.7 \times 4.66 - 3.20}{52.64 - (2.8 \times 2.71 + 1.1 \times 1.13 + 0.7 \times 0.59)}$$

$$\frac{190.26 + 16.412 + 3.262 - 3.20}{52.64 - (7.58 + 1.243 + 0.413)} = \frac{206.734}{43.396} = 4.76$$

o sean: para una parte de pizarra 4.76 partes de caliza.

Deduciendo el 10% de seguridad tenemos:

$$4.76 - 0.47 = 4.29$$

lo cual dado en % queda:

$$\frac{4.29}{4.29} = \frac{100}{X} \therefore X = \frac{429}{4.29} = 81\%$$

o sea:

Piedra caliza 81%  
Pizarra 19%

Calculando la composición de la mezcla cruda resultante -  
tenemos :

$$\text{SiO}_2 \quad \frac{2.71 \times 4.29 + 67.95}{5.29} = 15.04$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 \quad \frac{1.13 \times 4.29 + 14.22}{5.29} = 3.60$$

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 \quad \frac{0.59 \times 4.29 + 4.66}{5.29} = 1.35$$

$$\text{CaO} \quad \frac{52.64 \times 4.29 + 1.20}{5.29} = 43.28$$

$$\text{MgO} \quad \frac{0.90 \times 4.29 + 2.44}{5.29} = 1.20$$

$$\text{CO}_2 \quad \frac{41.70 \times 4.29 + 3.92}{5.29} = 34.55$$

$$\text{n.d. por dif.} = 0.08$$

tenemos, por consiguiente:

	<u>Mezcla teórica</u>	<u>Experimental</u>	<u>Diferencia</u>
SiO <sub>2</sub>	15.04	14.97	0.07
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.60	3.20	0.40
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.35	1.00	0.35
CaO	43.28	44.20	-0.92
MgO	1.20	1.60	-0.40
CO <sub>2</sub>	34.55	34.43	0.12

como se habrá visto, es muy poca la diferencia del análisis calculado y del experimental, así es que podemos perfectamente tomar como promedio el teórico y usarlo como base de los siguientes cálculos.

b) Cálculo del Clinker Probable.- Para hacer el cálculo del clinker probable a partir de la composición de la mezcla cruda, se empieza por sumar los porcentajes de SiO<sub>2</sub>,

$\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  y  $\text{MgO}$  a cuyo resultado se le denominará clinker total, dado el caso que se considera que en el horno al efectuarse la calcinación es lo único que queda. Hecho lo anterior se toma tal suma como el 100% y se calcula la parte en por ciento que corresponde a cada uno de los óxidos citados:

$$\text{tenemos: } 15.04 + 3.60 + 1.35 + 43.28 + 1.20 = 64.47$$

de donde resulta que:

si en 64.47 de clinker hay A de un componente,  
en 100 de clinker habrá X

$$\therefore X = \frac{100}{64.47} A = 1.551 A$$

y tendremos:

	<u>Clinker Calculado</u>	<u>Experimental</u>	<u>Diferencia</u>
$\text{SiO}_2$	$1.551 \times 15.04 = 23.32$	22.42	0.90
$\text{Al}_2\text{O}_3$	$1.551 \times 3.60 = 5.58$	6.06	-0.48
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$1.551 \times 1.35 = 2.09$	2.41	-0.32
$\text{CaO}$	$1.551 \times 43.28 = 67.13$	66.60	0.53
$\text{MgO}$	$1.551 \times 1.20 = 1.86$	1.79	0.07

Como se verá por las diferencias, no son dignas de tomarse en consideración y por lo tanto seguiremos trabajando con los datos teóricos como perfectamente factibles de ser reales.

Ahora por el método de Vogue calcularemos la forma en que están distribuidos dichos óxidos en los principales componentes del clinker para cemento Portland y tenemos: (9)

$$\% \text{ CaO } \text{Al}_2\text{O}_3\% (\text{C}_4\text{AF}) = 3.043 \times \% \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

-37-

$$\% \text{ CaO Al}_2\text{O}_3 (\text{C}_3\text{A}) = (2.65 \times \% \text{ Al}_2\text{O}_3 - (1.69 \times \% \text{ Fe}_2\text{O}_3))$$

$$\begin{aligned} \% \text{ C}_3\text{S} (\text{C}_3\text{S}) &= 4.07 \% \text{ CaO} - 7.60 \% \text{ SiO}_2 - \\ &\quad - 6.72 \% \text{ Al}_2\text{O}_3 - 1.43 \% \text{ Fe}_2\text{O}_3 \end{aligned}$$

$$\% \text{ C}_2\text{S} (\text{C}_2\text{S}) = 2.87 \% \text{ SiO}_2 - 0.754 \% \text{ C}_3\text{S}$$

Substituyendo valores tenemos:

$$\% \text{ C}_4\text{AF} = 3.043 \times 2.09 = 6.3$$

$$\% \text{ C}_3\text{A} = 2.05 \times 5.58 - 1.69 \times 2.09 = 11.2$$

$$\begin{aligned} \% \text{ C}_3\text{S} &= 4.07 \times 67.13 - 7.60 \times 23.32 - \\ &\quad - 6.72 \times 5.58 - 1.43 \times 2.09 = 55.4 \end{aligned}$$

$$\% \text{ C}_2\text{S} = 2.87 \times 23.32 - 0.75 \times 5.54 = 25.2$$

## IV

## EFICIENCIA TERMICA.

a) Consideraciones.- Con los datos preparados en los capítulos II y III podemos entrar de lleno a la resolución del problema.

La eficiencia térmica se determina por medio de la relación que nos da el calor teórico necesario para producir una determinada cantidad de clinker entre la cantidad de calor gastada en la realidad para producir esa cantidad de clinker.

La cantidad de clinker producida tomada como base será la de 1000 grs.

Se considerará además que los crudos entran al horno a 20°C y por lo tanto esta temperatura se tomará como base.

b) Cálculo del Calor Necesario para producir Clinker.- Primero se buscará la cantidad de crudos necesarios para producir los 1000 grs. de clinker y tenemos:

si 100 grs. de crudos dan 64.47 grs. de clinker

X grs. de crudos darán 1000 grs. de clinker

$$\therefore X \times \frac{100000}{64.47} = 1551 \text{ grs.}$$

Ahora bien, estos 1551 grs. de crudos tendrán la siguiente composición:

SiO <sub>2</sub>	233.3 grs.
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	55.8 "
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.9 "
CaO	671.2 "

-39-

MgO 18.6 gra.

F.a.r. 530.0 "

n.d. 15.2 " (por dif.)

Considerando que toda la alúmina ( $Al_2O_3$ ) está formando cao-  
linita ( $K = Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ ) tenemos:

$$\frac{120.12 \text{ (Fm. } 2SiO_2 \text{)}}{101.94 \text{ (Fm. } Al_2O_3 \text{)}} = \frac{X}{55.8}$$

$$\therefore X = \frac{6702.696}{55.8} = 65.8 \text{ gra. de } SiO_2 \text{ en K}$$

y quedará  $233.3 - 65.8 = 167.5$  gra. como cuarzo.

entonces tenemos para el metacaolín:

$$(AS_2 = Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 = 65.8 + 55.8 = 121.6 \text{ gra.}$$

$$\text{y así: } \frac{222.06 \text{ (Fm. } AS_2 \text{)}}{36 \text{ (Fm. } H_2O \text{)}} = \frac{121.6}{X}$$

$$\therefore X = \frac{4377.6}{222.06} = 19.7 \text{ gr. de } H_2O \text{ en K}$$

Resumiendo:

$Al_2O_3$	= 55.8 gra.	K	= 141.3 gra.
$SiO_2$ (en K)	= 65.8 "	$AS_2$	= 121.3 "
$H_2O$ (en K)	= 19.7 "	$SiO_2$ (cuarzo)	= 167.5 gra.

por consiguiente tenemos que el calor necesario para calen-  
tar la caolinita (K) de  $20^\circ C$  a  $450^\circ C$  con un calor específi-  
co medio entre estas temperaturas de  $0.284 \text{ cal/gr.}^\circ C$ , (3) -  
será de:

$$141.3 \times 430 \times 0.284 = 17255 \text{ cal.}$$

Calor necesario para deshidratar el caolín:

$$141.3 \times 223 = 31510 \text{ cal.}$$

(3)

En el carbonato de calcio tenemos:

$$\frac{44.01 \text{ (Pm. CO}_2\text{)}}{56.08 \text{ (Pm. CaO)}} = \frac{X}{671.2}$$

$$\text{CO}_2 = 526.7 \text{ grs.}$$

$$\text{CaO} = 671.2 \text{ "}$$

$$\text{CaCO}_3 = 1197.9 \text{ "}$$

$$\therefore X = 526.7 \text{ de CO}_2$$

Calor necesario para calentar el  $\text{CaCO}_3$ :

$$1197.9 \times 0.266 \times 886 = 280404 \text{ cal.}$$

Calor necesario para descomponer el  $\text{CaCO}_3$ :

$$1197.9 \times 396 = 474368 \text{ cal.}$$

(3)

Para el carbonato de magnesio tenemos:

$$\frac{44.01 \text{ (Pm. CO}_2\text{)}}{40.31 \text{ (Pm. MgO)}} = \frac{X}{18.6}$$

$$\text{MgO} = 18.6 \text{ grs.}$$

$$\text{CO}_2 = 20.3 \text{ "}$$

$$\text{MgCO}_3 = 38.9 \text{ "}$$

$$\therefore X = \frac{818.586}{40.32} = 20.3$$

Calor necesario para calentar el  $\text{MgCO}_3$ :

$$38.9 \times 6.238 \times 886 = 8147 \text{ cal.}$$

(3)

Calor necesario para descomponer el  $\text{MgCO}_3$ :

$$38.9 \times 249 = 9686 \text{ cal.}$$

(3)

Calor necesario para calentar el metacaolín de  $450^\circ\text{C}$  a  $960^\circ\text{C}$

(calores específicos medios (3) de  $20^\circ\text{C}$  a  $450^\circ\text{C}$ : - - - - -

$0.238 \text{ cal/gr}^\circ\text{C}$  y de  $20^\circ\text{C}$  a  $960^\circ\text{C}$ :  $0.260 \text{ cal/gr}^\circ\text{C}$ )

$$121.6 (940 \times 0.260 - 430 \times 0.238) = 17274 \text{ cal.}$$

Calor desprendido en la cristalización de los componentes -  
amorfos del metacaolín cerca de los  $960^\circ\text{C}$ :

$$121.6 \times 72 = 8755 \text{ cal.}$$

(3)

Calor necesario para calentar la alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) de  $960^\circ\text{C}$  a  
 $1400^\circ\text{C}$ :

(calores específicos medios (3) de 20°C a 960°C:

0.267 cal/gr°C y de 20°C a 1400°C: 0.279 cal/gr°C)

$$55.8 (1380 \times 0.279 - 940 \times 0.267) = 7479 \text{ cal.}$$

Calor necesario para calentar la sílice (SiO<sub>2</sub>) proveniente

del metacaolín (calores específicos medios (3) de 20°C a - 960°C: 0.264 cal/gr°C y de 20°C a 1400°C: 0.271 cal/gr°C.)

$$65.6 (1380 \times 0.271 - 940 \times 0.264) = 8279 \text{ cal.}$$

Calor necesario para calentar el cuarzo (SiO<sub>2</sub>) de 20°C a - 1400°C:

$$167.5 \times 0.271 \times 1380 = 62641 \text{ cal.}$$

(3)

Calor necesario para calentar la cal de 900°C a 1400°C -

(calores específicos medios (3) de 20°C a 900°C: 0.213 -- cal/gr°C y de 20°C a 1400°C: 0.218)

$$671.2 (1380 \times 0.218 - 880 \times 0.213) = 76114 \text{ cal.}$$

Calor necesario para calentar el Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de 20°C a 1400°C:

Capacidad calorífica del Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

$$(24.72 + 0.01604 T - 423400 T^{-2}) \frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot ^\circ\text{K}} \quad (7)$$

$$\text{Calor necesario} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{24.72 + 0.01604T - 423400T^{-2}}{159.68} dT \times 20.9$$

$$= \frac{24.72 (T_2 - T_1) + \frac{0.01604}{2} (T_2^2 - T_1^2) + \frac{423400}{(T_2 - T_1)}}{159.68} \times 20.9$$

$T_1$	$=$	$293$	$T_1^2$	$=$	$85849$
$T_2$	$=$	$1673$	$T_2^2$	$=$	$2798929$
$T_2 - T_1$	$=$	$1380$	$T_2^2 - T_1^2$	$=$	$2713080$
$(T_2 - T_1)^2$	$=$	$1904400$	$1^\circ\text{C}$	$=$	$1^\circ\text{K}$

$$= \frac{24.72 \times 1380 + 0.00802 \times 2713080 + \frac{+23400}{1360}}{159.68} \times 20.9$$

$$= \frac{34113.6 + 21758.4 + 309.8}{159.68} \times 20.9$$

$$= \frac{56179.8}{159.68} \times 20.9 = \frac{1174147.17}{159.68} = 7353 \text{ cal.}$$

Calor necesario para formar la parte fluída de aproximadamente el 24% del material al 1400°C (3):

22000 cal.

Para el clinker tenemos:

$$\begin{array}{l|l} \text{C}_4\text{AF} = 63 \text{ gra.} & \text{C}_3\text{S} = 554 \text{ gra.} \\ \text{C}_3\text{A} = 112 \text{ " } & \text{C}_2\text{S} = 253 \text{ " } \\ \text{MgO} = 18.6 \text{ gra.} & \end{array}$$

Calor desprendido en la formación del C<sub>4</sub>AF:

$$63 \times 87 = 5481 \text{ cal.}$$

Calor desprendido en la formación del C<sub>3</sub>A:

$$112 \times 83 = 9296 \text{ cal.}$$

Calor desprendido en la formación del C<sub>3</sub>S:

$$554 \times 111 = 61494 \text{ cal.}$$

Calor desprendido en la formación del C<sub>2</sub>S:

$$252 \times 147 = 37044 \text{ cal.}$$

Calor recuperado en el enfriamiento del C<sub>4</sub>AF de 1400°C a - 20°C:

$$63 \times 0.257 \times 1380 = 22343 \text{ cal.}$$

Calor recuperado en el enfriamiento del C<sub>3</sub>A de 1400°C a - 20°C:

$$112 \times 0.236 \times 1380 = 36476 \text{ cal.}$$

Calor recuperado en el enfriamiento del C<sub>3</sub>S de 1400°C a -

20°C:

$$554 \times 0.246 \times 1380 = 188072 \text{ cal.}$$

Calor recuperado en el enfriamiento del  $\text{C}_2\text{H}_6$  de 1400°C a -

20°C:

$$252 \times 0.256 \times 1380 = 89026 \text{ cal.}$$

Calor recuperado en el enfriamiento del  $\text{MgO}$  de 900°C a -

20°C:

$$18.6 \times 0.2977 \times 880 = 4872 \text{ cal.}$$

Para el  $\text{CO}_2$  tenemos:

$\text{CO}_2$ del $\text{CaCO}_3$	526	grs.
$\text{CO}_2$ del $\text{MgCO}_3$	20	"
Total....	546	grs.

Calor recuperado en el enfriamiento del  $\text{CO}_2$  de 900°C a -

20°C:

$$546 \times 0.258 \times 880 = 123963 \text{ cal.}$$

Calor recuperado en el enfriamiento del ( $\text{H}_2\text{O}$ ) vapor de -  
agua de 450°C a 100°C:

$$19.7 \times 0.478 \times 350 = 3295 \text{ cal.}$$

Calor recuperado en la condensación del vapor de agua:

$$19.7 \times 539 = 10618 \text{ cal.}$$

Calor recuperado en el enfriamiento del agua de 100°C a

20°C:

$$19.7 \times 80 \times 1 = 1576 \text{ cal.}$$

## c) Resumen.-

## CALOR RECUPERADO

Calor desprendido en la cristalización de los componentes del $AS_2$ .....	8755 cal.
Calor desprendido en la formación del $C_4AF$ ...	5481 "
Calor desprendido en la formación del $C_3A$ ....	9296 "
Calor desprendido en la formación del $C_3S$ ....	61494 "
Calor desprendido en la formación del $C_2S$ ....	37044 "
Calor recuperado al enfriar el $C_4AF$ .....	22343 "
Calor recuperado al enfriar el $C_3A$ .....	36476 "
Calor recuperado al enfriar el $C_3S$ .....	188072 "
Calor recuperado al enfriar el $C_2S$ .....	89026 "
Calor recuperado al enfriar el $MgO$ .....	4872 "
Calor recuperado al enfriar el $CO_2$ .....	123963 "
Calor recuperado al enfriar el $H_2O$ (vap)....	3295 "
Calor recuperado al condensar el $H_2O$ (vap)...	10618 "
Calor recuperado al enfriar el $H_2O$ .....	1576 "
Total.....	602311 cal.

c) Resumen.-

## CALOR TOMADO

Calentamiento del Caolín.....	17255	cal.
Deshidratación del Caolín.....	31510	"
Calentamiento del $\text{CaCO}_3$ .....	280404	"
Calentamiento del $\text{MgCO}_3$ .....	8147	"
Descomposición del $\text{CaCO}_3$ .....	474368	"
Descomposición del $\text{MgCO}_3$ .....	9686	"
Calentamiento del $\text{AS}_2$ .....	17274	"
Calentamiento del $\text{Al}_2\text{O}_3$ del $\text{AS}_2$ .....	7479	"
Calentamiento del $\text{SiO}_2$ del $\text{AS}_2$ .....	8279	"
Calentamiento del $\text{SiO}_2$ (cuarzo).....	62641	"
Calentamiento del $\text{CaO}$ .....	76114	"
Calentamiento del $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .....	7353	"
Calor de la fusión del 24% del clinker.....	<u>22000</u>	"
Total de calor tomado.....	1,022510	cal.
Menos:		
Calor recuperado.....	<u>602311</u>	"
	420199	cal.

d) Cálculo de la Eficiencia Térmica.- El petróleo combustible que se usaba para producir clinker en la citada fábrica era procedente de Poza Rica, Ver. Según datos proporcionados por Petróleos Mexicanos, dicho combustible tenía un poder calorífico de 10500 K-cal/Kg. (10500 cal/gr.) y un peso específico de 0.965 Kg/lt. de donde resulta, por consiguiente, que cada litro tenía un poder calorífico de - - - 10132.5 K-cal. 10132.5 cal/ml.

Se tenía como promedio un gasto de 202 litros de combustible por cada tonelada de clinker producida o sea que para producir un kilogramo se requerían 202 mililitros de petróleo.

Ahora bien, como según se ha visto, se necesitan 420199 calorías para producir un kilogramo de clinker, tendremos que tal cantidad de calorías nos las proporcionarán:

$$\frac{420199}{10132.5} = 41.47 \text{ mililitros de petróleo}$$

y como en realidad se gastaban 202 ml., tenemos que la eficiencia térmica del horno rotatorio en la producción de clinker para cemento Portland, es de:

$$\frac{41.47}{202} \times 100 = 20.52\%$$

O visto de otra manera, tenemos que para producir tal kilogramo de clinker se gastaban 202 mililitros de petróleo que equivalían a:

$$202 \times 10132.5 = 2046765 \text{ calorías}$$

y como teóricamente se requieren 420199 calorías tenemos -

que la eficiencia térmica del horno rotatorio en la producción de clinker para cemento Portland, es de:

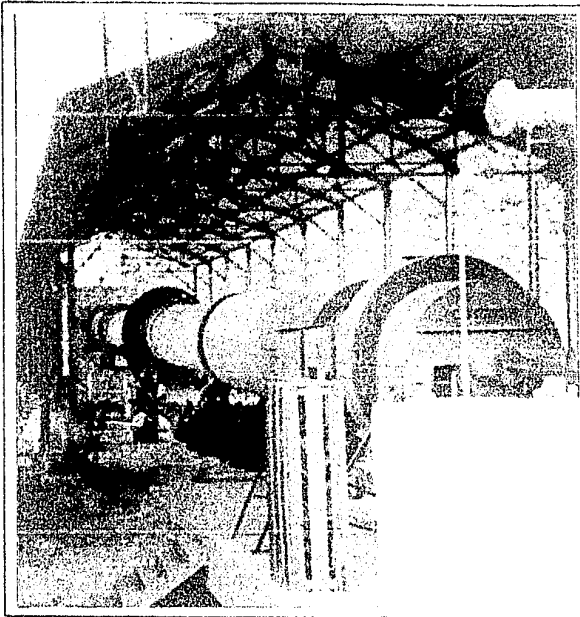
$$\frac{420199}{2046765} \times 100 = 20.52\%$$

e) Conclusiones Generales.- La eficiencia térmica del horno a simple vista parecerá baja, pero podemos concluir que en la forma en que se está operando, es más o menos la correcta, es decir, dicho horno está trabajando dentro de lo conceptuado como normal y aceptable, dado que los hornos rotatorios usados en la producción de cemento Portland por el proceso seco tienen una eficiencia térmica baja, pues ésta varía, por lo general, de un 19% a un 25%. (8)

La cifra de 420199 calorías (41.47 ml. del citado petróleo) requeridas para producir cada kilogramo de --- clinker, es una cantidad de calor ideal a la cual no se llegará pues esto equivaldría en la práctica a lograr recuperar todo el calor de más que no es utilizado realmente en la clinkerización.

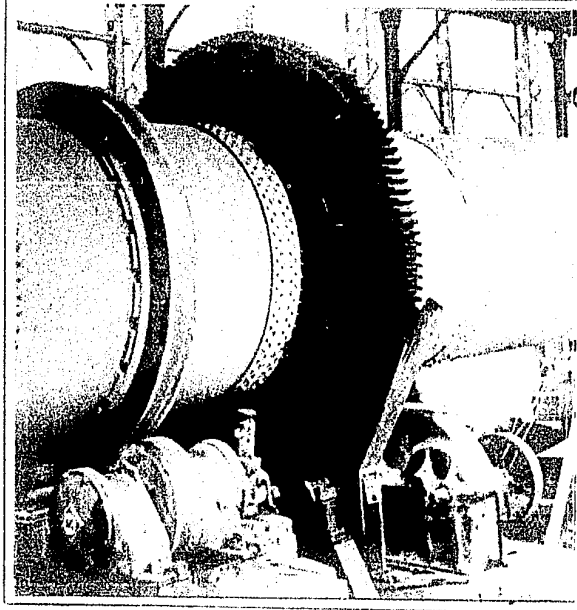
Se debe tender naturalmente, a evitar la radiación del horno y a que los gases y el clinker dejen el horno a la temperatura ambiente, siendo a medida que se logre esto de una manera económica, cuando la eficiencia térmica de los hornos rotatorios aumente en forma efectiva y costosa.

## A P E N D I C E



Vista total  
del HORNO  
durante su  
instalación

Detalle del  
mismo HORNO  
(Transmisión  
de movimiento)



ANÁLISIS TABULAR DEL EQUIPO DEL HORNO ROTATORIO DE LA FABRICA DE CEMENTO PORTLAND "LA CRUZ AZUL", S.C.L. EN LAGUNAS, OAXACA.

EQUIPO	MARCA	NUMERO DE MODELO CAPACIDAD O TIPO	NOTAS	TRANSMISIONES	OBSERVACIONES
ALIMENTADOR	ING. AVALOS	Tambor rotatorio con ranuras, corrugaciones interiores y bolas de fierro para despejar el polvo; contador de revoluciones y mecanismo para proteger contra piedras o cuerpos extraños. Tambor de 18" diam: velocidad variable entre 1 y 40 r.p.m. (4 velocidades normales).	General Electric, de 5 HP 440 v. 1800, 1200, 900, 600 r.p.m., tipo K.	Banda reductor y engranes 1 banda: polea motor 5" polea conducida 30"-banda 4" 2 pares engranes 20/100 d. y 13/65 dientes. 1 reductor de velocidad - Reeves N°2 (1:4)	El reductor Reeves servirá para las pruebas iniciales y posteriormente se eliminará de ser posible.
ELEVADOR DE ALIMENTACION	CAJERIA: JEFFREY CANGILONES: ING. AVALOS TRANSMISIONES: ING. LESTAYE	Tipo 767 Link Belt, continuo, vertical, caja de 39"x11-1/4"x34"10" a 25 ton/hora, cadena G-102B, cangilones de 8"x5"x7-1/4": 23.4 r.p.m. catarina superior 16 dientes, catarina inferior 12 dientes.	Allis Chalmers de 7 1/2 HP. 440v 1750 r.p.m. velocidad constante, tipo ART.	1 banda: polea motor 8" polea conducida 27", banda 5" 2 pares de engranes 21/99d. 1 freno de tranquete.	
HORNO ROTATORIO	MAQUINARIA: ALLIS CHALMERS TUBO: USADO FORRO: HARBIN WALKER DESCARRILLERA: ING. LESTAYE	(6'-0"x6'-6-3/4"x8'-0"x6'-0") x 178'-1/2", 4 velocidades: 1.4, 0.95, 0.7, 0.47 r.p.m., 4 apoyos de rodillos con enfriamiento de agua, llantas del sistema flotante, lubricadas con agua. Sello de aire en ambas extremas. Inclinación 1/8"x12": boquilla de descarga enfriada con aire. Carátula especial para enfriador rápido. Descarriera de alimentación de doble tubo con anchaquetado de agua, regadera de agua para los crudos. Forno de 6", 70% alúmina en la zona de calcinación.	Allis Chalmers de 25 HP. 440v, 2 embobinados, 4 velocidades: 1800, 1200, 900 y 600 r.p.m. tipo ART. Arrancador magnético Cutler-Hammer. Estación de 5 botones	BANDAS, REDUCTOR Y ENGRANES 4 bandas Tectrope C 128, polea motor 10.6", polea conducida 24". Reductor Falk 10 DA58.05:1 Engranes cilíndricos: 15/142 dientes.	

## ANALISIS TABULAR DEL EQUIPO DEL HORNO ROTATORIO EN LA FABRICA

DE CEMENTO PORTLAND "LA CRUZ AZUL", S.C.L. EN LAGUNAS, OAXACA.

EQUIPO	MARCA	NUMERO DE MODELO CAPACIDAD O TIPO	MOTORES	TRANSMISIONES	OBSERVACIONES
CHIMENEA Y CAJA DE HUMO	C. MAHER	Chimenea de concreto armado de 55.10 m. de altura; 1.68 diámetro arriba y 2.94 m. diámetro en la base. Forro refractario Sta. Julia 1/3 de la altura. Caja de humo de concreto, con forro refractario de Sta. Julia. Galería de tabique refractario para la compuerta de tiro.			
SISTEMA DE COMBUSTION Y DE CONTROL					
TANQUE NUTRIA EQUIPO DE COMBUSTION	ING. GOMEZ SHELLENBERGER	2 Tanques de 20 m <sup>3</sup> capacidad cada uno.			
	GRIGG CO. (Conducto ALLIS CHALMERS)	2 Bombas de Laval tipo DMC, tamaño 1"xl", 1 calentador de aceite Wa-tu-bo No. 6810; válvulas de alivio y de regulación; válvula automática para regular el vapor de calentamiento; un quemador Nauck No. 514; Un ventilador para aire primario Spencer de 2650 p <sup>3</sup> /m a 12 onzas.	2 motores Allis Chalmers de 1 HP, 440v, 1750 r.p.m. velocidad constante, tipo AR	Directamente acoplado a las bombas.	El calentador y el quemador emplean vapor a 100 lb./pulg. <sup>2</sup>
VENTILADOR	CLARAGE FAN CO.	Ventilador tipo 2L, IE. Arr. "B", 8411 p <sup>3</sup> /min. (70°F) a 5.8" de agua de presión estática - 976 r.p.m. 1356 BHP.	Louis Allis de 15 HP, 440v, 3500 r.p.m. velocidad constante, tipo CK. Allis Chalmers, 15 HP, 440v, 1200 r.p.m. velocidad constante, tipo AR. Arrancador Cuttler-Hammar 9605H792 -- tamaño 2.	Directamente acoplado - al ventilador. Bandas múltiples. Polea motor 9", polea - conducida 10.6", 4 bandas Texrope C-120	Compuerta Spencer para - controlar la cantidad de aire.

EQUIPO	MARCA	NUMERO DE MODELO CAPACIDAD O TIPO	MOTORES	TRANSMISIONES	OBSERVACIONES
EQUIPO DE CONTROL	HRCSEY	<p>Control automático del tiro y de la cantidad de combustible. Registrador gráfico del tiro, del gasto de combustible y de la temperatura de los gases de escape. Indicación instantánea del tiro y de la temperatura de los gases de escape.</p> <p>APARATOS:</p> <p>1 compuerta de persiana W42C de 9'x4' movida con motor neumático modelo 8A y posicionador 18328.</p> <p>1 indicador y controlador de tiro modelo - 7808-899 No.4-B.</p> <p>1 Potenciometro registrador modelo 113661 con par termoelectrico Chromel-Alumel No.80 de 72°.</p> <p>1 Registrador de tiro Hayes, modelo OT.</p> <p>1 Controlador de gasto de combustible, modelo 200121x99, completo con un medidor tipo de - arca, modelo 7531b, actuado automáticamente.</p> <p>1 Compresora de aire Ingersoll, modelo VEF-7, con recipiente vertical 575 r.p.m.</p> <p>1 Tablero lámina y accesorios; válvulas, manómetros, filtros, etc.</p>	<p>Westinghouse de 3/4 HP - 1725 r.p.m.110/200v. velocidad constante, tipo FJ</p>	<p>Banda corrugada. (V)</p> <p>Polea motor 4", polea conducida 12", banda 3/4 HP.</p>	

B I B L I O G R A F I A

- (1)  
ENRIQUE CALVET  
Química General  
Salvat Editores, S. A.  
Barcelona, España. 1936.
- (2)  
F. M. LEA Y C. H. IRESCH  
Química del Cemento y del Hormigón  
Manuel Marín.  
Barcelona, España. 1941.
- (3)  
H. KLSNER Y V. GRONOW  
The Thermochemical Basis of Cement Manufacture  
Cement and Lime Manufacture.  
London, England. 1937.
- (4)  
ING. J. REZOLA  
El Horno Rotativo Sistema "LEPOL".  
Barcelona, España. 1932.
- (5)  
KLEVER Y KORDES  
Veröff. des K.W.I. für Silikatforschung.  
Vol. 3 - (17) - 1930.
- (6)  
CLAF A. HOUGHN Y KENNETH M. WATSON  
Chemical Process Principles. Part I  
John Wiley & Sons, Inc.  
New York, U. S. A. 1944.
- (7)  
PERRY J. H.  
Chemical Engineer's Handbook  
McGraw-Hill Book Co. Inc.  
New York and London. 1941.
- (8)  
RICHARD K. MEADE  
Portland Cement.  
The Chemical Publishing Co.  
Easton, Pa. 1926.
- (9)  
SECRETARIA DE LA ECONOMIA NACIONAL  
Norma Oficial de Cemento Portland.  
Dirección General de Normas.  
México, D. F. 1944.