

**"MINIPLANTAS DE CEMENTO CON TECNOLOGIA DE MORNOS VERTICALES
HASTA 200 TONELADAS/DIA"**

RIGOBERTO WALTER PEREDA ZAVALA

TESIS PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECANICO

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

LIMA-PERU

1990

TABLA DE CONTENIDO

Prólogo	1
CAPITULO 1. INTRODUCCION.	4
CAPITULO 2. ANTECEDENTES DE LA INDUSTRIA DEL CEMENTO EN EL PERU	8
2.1 Del Producto	
2.1.1 Historia.	8
2.1.2 Definición.	9
2.1.3 Cemento Portland - Composición y Clasificación.	10
2.1.3.1 Tipos de Cemento Por- tland Puros.	11
2.1.3.2 Tipos de Cemento Port- tland adicionados.	14
2.2 La demanda del Cemento	15
2.2.1 Consumo.	15
2.2.2 Demanda por Regiones.	16
2.3 La Oferta del Cemento	19
2.3.1 Fuentes actuales de Abasteci- miento.	19
2.3.2 Ubicación de las Empresas de Producción.	19
2.3.3 Capacidad de Producción de la Industria de Cemento en el País.	19

2.3.4 Serie Histórica de la Producción de Cemento.	20
2.4 Comercialización	20
2.4.1 Sistema de Abastecimiento.	20
2.4.2 Principales Fuentes.	21
2.5 Estudios realizados para la instalación de nuevas Plantas de Cemento	22
2.5.1 Sector Privado.	22
2.5.2 Sector Público.	24
CAPITULO 3. SITUACION ACTUAL. POSIBLES SOLUCIONES	25
3.1 Definición de la problemática actual.	25
3.1.1 Regiones alejadas de las grandes Fábricas.	
Disponibilidad de mano de Obra y Recursos.	25
3.1.2 Incidencia del costo de Transporte en el precio del cemento.	29
3.1.3 Precios del cemento en diversos puntos del país.	32
3.2 Posibles soluciones a la problemática actual.	33
3.2.1 Experiencias en otros Países.	33
3.2.1.1 Análisis de la Industria China del cemento.	33
3.2.1.2 Mini Plantas de Cemento en la India.	41

3.2.2 Efectos de la aplicación de estas experiencias en nuestro País.	47
CAPITULO 4. TECNOLOGIA DE LA PRODUCCION DE CEMENTO	50
4.1 Materias Primas.	50
4.2 Descripción de la Tecnología de Hornos Rotatorios.	53
4.2.1 Procesos en general.	53
4.2.1.1 Fábricas para el Proceso Húmedo de Producción de cemento.	53
4.2.1.2 Fábricas para el Proceso Seco de producción de Cemento.	71
4.3 Descripción de la tecnología de Hornos Verticales	105
4.3.1 Características particulares de los Hornos verticales.	105
4.3.2 Condiciones de operación en el horno Vertical de cemento y la influencia que sobre ellas ejercen la forma del material de carga, el soplador y altura.	116
4.3.3 Transferencia de calor a través del Horno vertical.	127
4.3.4 Procesos Específicos.	141

4.3.4.1 Peletización.	141
4.3.4.2 La Combustión en el Horno Vertical.	151
4.3.5 Maquinaria Básica.	165
4.3.5.1 El Peletizador.	165
4.3.5.2 Tolva de Alimentación Giratoria.	174
4.3.5.3 El Horno Vertical.	175
4.3.5.4 Parrilla . Evacuación del clinker.	182
4.3.5.5 Esclusas. Descarga del Horno.	184
4.3.6 Comparación entre ambas Tecnologías.	186
CAPITULO 5. EVALUACION DE LAS ALTERNATIVAS DE TAMAÑO Y LOCALIZACION EN FUNCION DE LOS FACTORES LOCALES.	190
5.1 Tamaño.	190
5.1.1 Relación Tamaño - Mercado.	190
5.1.2 Relación Tamaño Disponibilidad de Recursos.	191
5.1.3 Relación Tamaño Mano de Obra.	194
5.1.4 Relación Tamaño - Localización.	195
5.1.5 Determinación del tamaño de Planta.	196

5.2 Localización.	197
5.2.1 Localización en función de la disponibilidad de Insumos.	197
5.2.2 Localización en función del Mercado.	197
5.2.3 Localización en función de los Servicios e Infraestructura.	197
5.2.4 Localización en función de Estrategias de Desarrollo.	198
5.2.5 Lugares de posible instalación de las Mini Plantas.	198
CAPITULO 6. INGENIERIA	199
6.1 Proceso de Producción de Cemento en Horno Vertical.	199
6.1.1 Materias Primas para la obtención del Clinker.	199
6.1.2 Obtención del Clinker en Horno Vertical.	204
6.1.2.1 Proceso de formación del Clinker - Fases Minerales.	204
6.1.2.2 Calor de formación del Clinker.	205
6.1.2.3 Características del Clinker correctamente cocido.	208

6.1.3 Obtención del Cemento.	208
6.2 Diseño de Equipos indispensables en las Mini Plantas.	209
6.2.1 Diseño del Peletizador.	210
6.2.2 Diseño de la Parrilla.	210
6.2.3 Cálculos	213
6.3 Especificación de Maquinarias y Equipos.	252
6.3.1 Diagrama de Flujo de Proceso.	252
6.3.2 Detalles de Planta y Maquinaria.	255
CAPITULO 7. COMPOSICION Y ESTRUCTURA DE LA INVERSION Y COSTOS.	265
7.1 Inversiones.	265
7.1.1 Inversión Fija.	265
7.1.1.1 Terrenos Edificios.	265
7.1.1.2 Maquinarias.	265
7.1.2 Capital de Trabajo.	266
7.1.3 Inversión Total.	266
7.2 Costos.	267
7.2.1 Costos de Fabricación.	267
7.2.1.1 Costos Directos.	267
7.2.1.2 Costos Indirectos.	269
7.3 Utilidad Anual Bruta.	272
Conclusiones y Recomendaciones.	273

Bibliografía.

Planos.

Apéndice (Tablas).

PROL D60

El presente trabajo se refiere al estudio e instalación de una planta para la fabricación de cemento, con una tecnología diferente a la convencional.

Este documento muestra la tecnología de hornos verticales; sus ventajas, características y criterios que se deben tener en cuenta para analizar la factibilidad de su implementación como una alternativa de solución al grave problema del precio y distribución del cemento. También pretende hacerla comprensible y familiar de tal manera que a la larga, pueda ser considerada seriamente por los entes relacionados al rubro y también en futuros programas de desarrollos regionales.

En el primer capítulo, se dan a conocer enunciados de informes y estudios emitidos por entidades prestigiosas y respetadas como la ONUDI y el Instituto de Investigación del cemento de la India acerca de las Miniplantas de Cemento, sus tamaños más económicos, inversiones, ventajas y consideraciones que se deben tener en cuenta, para obtener éxito en esta y en cualquier tecnología.

En el segundo capítulo, se muestra como fluctúa la demanda de cemento en nuestro país, así como la forma de distribución del mismo. Además se anotan algunos estudios realizados con el propósito de instalar fábricas de cemento en

distintos puntos, síntoma de lo palpable que es el problema del abastecimiento oportuno de este producto.

En el tercer capítulo, se plantea la problemática que se presenta en el país por el desabastecimiento de cemento, básicamente por la ubicación de las plantas cementeras, lo que ocasiona el encarecimiento de la bolsa por flete. Se presenta la solución a este mismo problema que le han dado países como China e India, utilizando Miniplantas de Cemento con hornos verticales, lo que nos puede servir de ejemplo.

En el cuarto capítulo, se describen las materias primas a utilizar; también se describe la tecnología convencional de Hornos Rotatorios por vía seca y vía húmeda, aplicables para grandes capacidades de producción, con el fin de mostrar su complejidad. Enseguida se detalla lo más importante que es la descripción del horno vertical, en cuanto a su evolución, particularidades de funcionamiento, descripción de sus componentes más importantes, comportamiento técnico, así como los principales procesos que se presentan.

En el quinto capítulo, se dan parámetros generales a seguir para definir y localizar la miniplanta según los factores locales.

En el capítulo seis, se enumeran en principio los requisitos que deben reunir las materias primas y el carbón utilizado

como combustible; las fases minerales que deben tener el Clinker y sus características. También se presenta el diseño de los equipos más importantes tales como el peletizador y la parrilla, basándose en el cálculo teórico de ambos, lo que se plasma en los planos respectivos. Este Capítulo también comprende el diagrama de flujo y detalles de planta y maquinaria y plano respectivo.

En el capítulo siete, se hace un breve análisis de inversiones y costos con el fin de determinar la utilidad que podría generar una planta tipo de 25 t/d.

Expreso mis agradecimientos a la Sta. Maritza Rojas por su invaluable apoyo en el tipeo de este trabajo, a los profesionales con los que he compartido horas de trabajo y que me han brindado su apoyo y conocimiento, en particular al Ing. Miguel Veliz y al Ing. Froilán Seguil. También agradezco y en forma especial, al Ing. Marcos Valencia por haberme cedido documentos valiosos acerca del tema y al ITINTEC por brindarme las facilidades requeridas.

CAPITULO

INTRODUCCION

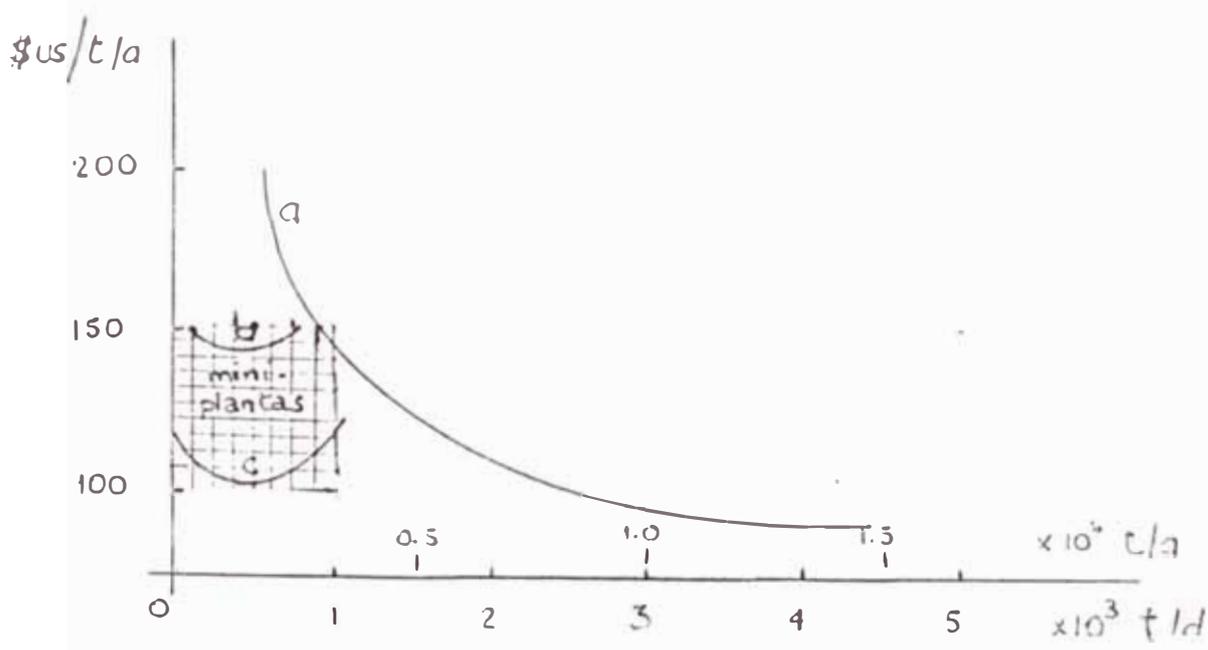
En un informe comisionado por la ONUDI en 1973 se sostiene que "actualmente es posible construir una planta de horno vertical de cemento a una fracción del costo de plantas convencionales lo que permite el establecimiento económico de una industria del cemento a menor escala". El autor Steven Gottlieb señala que "durante los últimos 50 años los estudios estuvieron dedicados al nuevo horno vertical los que han conducido a un mejor entendimiento de los procesos que lo comprenden".

Basándose en este trabajo se produjeron mejoras sustanciales; se contruyeron y probaron plantas con hornos verticales que pueden producir cemento uniforme y de excelente calidad, sin ningún problema en su funcionamiento. El horno vertical de cemento probó ser competitivo, desempeñándose bien en las más complicadas estructuras de concreto para perforaciones de petróleo en el lecho del mar lejos de la costa de Australia.

En un más reciente informe de la ONUDI se sostiene que una mini-planta que produce 100,000 - 120,000 t/a es el tamaño más económico. Sin embargo este puede no ser el caso ya que un alto grado de estandarización y la fabricación en el lugar pueden hacer bajar los costos considerablemente. For

ejemplo, de acuerdo a las investigaciones hechas por el Instituto de Investigación del Cemento de la India (Nueva Delhi) el horno vertical más económico tiene una producción de 25,000 - 33,000 t/a.

Este Instituto también ha realizado muchas investigaciones relativas al funcionamiento del horno vertical. Los expertos de la India han diseñado, fabricado y operado satisfactoriamente por más de dos meses, un horno vertical de 2 t/d que produce clinker de calidad.



F'g. No. 1.1

Inversión de Capital para Nuevas Plantas de Cemento
(Llave en mano sin instalaciones de energía eléctrica)

- a) Proceso seco en hornos rotatorios con precalentador y calcinador
- b) Nuevos desarrollos del proceso semi-seco en hornos verticales
- c) Si es posible una intensiva manufactura local de maquinaria.

La elección del tamaño de una planta de cemento usualmente depende de una serie de factores, incluyendo el social, técnico y económico. Mientras que existe una gran competencia para maximizar los beneficios de los efectos de escala recurriendo a plantas cada vez más grandes, hay una creciente realización de las ventajas de las mini-plantas de cemento, tales como:

- La industria del cemento puede ser explotada por empresarios relativamente pequeños.
- Son creadas mayores oportunidades de trabajo en áreas rurales sobre una base bien dispersada.
- Contribución destinada a elevar la economía local y el desarrollo.
- Ganancias rápidas sobre el capital invertido, debido a un bajo período de gestación.
- Desarrollo de la industria del cemento en terrenos donde el movimiento de maquinaria y cemento son difíciles.
- Reducción de esfuerzos en la infraestructura del transporte del país.
- Reducción de intermediarios entre el punto de fabricación y el punto de consumo.

En conclusión, podemos decir que el éxito de cualquier tecnología radica en su viabilidad económica y su compatibilidad con parámetros funcionales conseguidos en situaciones prácticas y en el alcance y medida de su efectividad para desarrollar y elevar la economía nacional y satisfacer simultáneamente los objetivos sociales. En general se puede esperar que las mini-plantas de cemento sean un éxito económico en donde existe una adecuada demanda local que no puede satisfacerse mediante despacho de grandes plantas centrales, disponibilidad del material crudo requerido, combustible local barato y la posibilidad de obtener condiciones financieras ventajosas.

Según la Holtec, en la India, como el tamaño y la situación de la mini-planta de cemento tiene una gran influencia sobre la economía, se recomienda que en vez de extraer conclusiones generales, debe juzgarse independientemente cada situación por sus propios méritos y tomarse, por consiguiente, una decisión apropiada.

CAPITULO 2

ANTECEDENTES DE LA INDUSTRIA DEL CEMENTO EN EL PERU

2.1 Del Producto

2.1.1 Historia

La fabricación de los cementos o aglomerantes se remonta a épocas tan antiguas como las del Imperio de los Faraones. En la construcción de las famosas pirámides de Egipto se usó algún tipo de aglomerante para ligar los gigantescos bloques de piedra, e, igualmente, ellos usaron para sus viviendas y otros tipos de construcciones yeso impuro calcinado.

El vocablo "cemento" proviene del término "opus caementitum" que utilizarón los romanos para identificar una mezcla (parecida al concreto) que obtenían usando agregados gruesos, cal, polvo de arcillas y puzolana y que usada en sus construcciones obtenía un endurecimiento que al observarlas hoy, después de mas de 2,000 años se comprueba que ya en tan remotas épocas eran dueños de un aglomerante hidráulico de excelente calidad. Siglos después J. Smeaton (1724 - 1792) en Inglaterra inició la historia moderna de la fabricación del cemento al descubrir, después de múlti-

ples experiencias, que era necesaria la presencia de la arcilla en las mezclas con cal para conseguir una cal hidráulica que endureciera por sí sola.

Posteriormente, otro inglés, J. Aspdin (1778 - 1855), fue reconocido como "el Padre del Cemento Portland". Este llamó así al material que utilizaba debido a que, en sus experimentos, utilizó una roca extraída de la isla Portland, en la costa sur de Inglaterra. Su hijo W. Aspdin mejoró la calidad de esta mezcla al llevar este material a altas temperaturas (sinterizándolo). La materia prima así tratada y luego pulverizada dió como resultado el cemento Portland que tiene como principal propiedad la de fraguar mucho más rápidamente y obtener asimismo, una resistencia muy superior a la de la cal hidráulica.

En el Perú la historia de la fabricación de cemento se remonta a mediados del año 1916, al constituirse la Compañía Peruana de Cemento Portland, la que al cambiar de razón social, el año 1967 dió origen a Cementos Lima S.A.

2.1.2 Definición

El cemento es un polvo resultante de la pulverización conjunta del clinker y otros materiales adi-

cionados en forma eventual. Tiene como característica principal el poseer propiedades hidráulicas.

Existen una variedad de cementos, los más conocidos son los de tipo Portland, cemento aluminoso, cemento de escoria, cemento puzolánico, cemento blanco y cementos de endurecimiento rápido.

1.3 Cemento Portland-Composición y Clasificación

El cemento Portland es un polvo de color gris, aproximadamente verdoso, obtenido por la pulverización del clinker portland (producto artificial obtenido por calcinación de mezclas convenientemente dosificadas de materias primas arcillosas y calizas), con la adición de yeso natural obteniéndose el Cemento Portland puro, y cuando se adiciona al clinker, aditivos ferrosos puzolánico o calcáreos se obtiene el cemento Portland adicionado.

Según estudios realizados acerca de la composición química del cemento Portland, parecen indicar que un clinker, bien quemado tiene la siguiente composición:

Silicato Tricálcico	3 CaO, SiO ₂	=	36%
Silicato Bicálcico	2 CaO, SiO ₂	=	33%
Aluminato Tricálcico	3 CaO, Al ₂ O ₃	=	21%
Otros componentes		=	10%

El rubro "otros componentes" comprende:

Oxido de Fierro	Fe ₂ O ₃
Magnesia	MgO
Azufre en forma de	
Oxido de Calcio, en	
calcinación insuficiente	SO ₃ , CaO

El cemento Portland es un aglomerante hidráulico por excelencia que al mezclarse con agua y agregados (arena y piedra) en proporciones convenientes alcanzan dureza petrea que favorece la elaboración de elementos estructurales integrantes de las obras de construcción civil.

2.1.3.1 Tipos de Cemento Portland Puros

Con la finalidad de satisfacer ciertos requerimientos físicos y químicos, se elaboran diferentes tipos de cementos Portland puros.

* Cemento Portland Tipo I

Este tipo de cemento es de uso general, cuando el cemento o concreto no van a estar sujetos a exposiciones específicas,

tales como ataques de sulfatos del suelo o agua a una elevada temperatura, ocasionada por el elevado calor de hidratación.

Se utiliza en la ejecución de pavimentos rígidos, veredas, estructuras de concreto armado, puentes, tanques, reservorios, etc.

* Cemento Portland Tipo II

Este tipo de cemento es usado donde no se requiere una excesiva protección contra ataques de sulfatos, es decir donde los ataques por sulfatos no son muy severos.

Este tipo de cemento es inferior al tipo I, en su contenido de Aluminato Tricálcico que no excede al 8%.

Se utiliza en la ejecución de pilares, estribos voluminosos de puentes y muros de contención con pantallas de gran espesor.

* Cemento Portland Tipo III

Se utiliza en la ejecución de obras que

requieren resistencias iniciales altas, generalmente a una semana o menos; son de gran utilidad en los casos en que los encofrados o formas tienen que ser retiradas lo antes posible o cuando la estructura tiene que ser puesta en servicio a la brevedad. Este cemento produce un alto calor de hidratación por lo que resultara inconveniente su uso en estructuras que demanden un volúmen masivo de concreto.

* Cemento Portland Tipo IV

Son de gran utilidad en la ejecución de estructuras que demanden un volúmen masivo de concreto, tales como grandes presas. Produce bajo calor de hidratación.

* Cemento Portland Tipo V

Se utiliza principalmente donde los suelos o aguas en contacto con la estructura física tienen un alto contenido de sulfatos; como en hidroeléctricas, obras portuarias, revestimientos de túneles, etc.

Este tipo de cemento presenta un bajo

contenido (4% • 5%) de Aluminato Tricálcico.

2.1.3.2 Tipos de Cemento Portland Adicionados

Este tipo de cemento tienen usos similares al cemento Portland tipo I.

* Cemento Portland Puzolánico.

Estos cementos son fabricados añadiendo en la molienda del clinker una apropiada cantidad de puzolana. Se utiliza principalmente estos cementos en la ejecución de grandes estructuras hidráulicas, como presas, puentes, pilares etc., donde se requieren resistencia a las aguas agresivas.

* Cemento Portland de Escoria.

En algunos países es conocido como cemento Ferro-Portland, generalmente tiene los mismos usos que se le da al cemento Portland tipo I, especialmente en la ejecución de obras hidráulicas, ciertos tipos de pavimentos rígidos y estabilización de suelos.

* Cemento Portland Blanco.

El cemento blanco es fabricado con materia prima selecta, conteniendo pequeñas cantidades de fierro y óxido de manganeso. Este tipo de cemento es utilizado en los acabados de pisos, losetas y en concreto decorativo.

* Cemento Portland con Incorporador de Aire.

A estos cementos se les ha añadido pequeñas cantidades de materiales incorporadores de aire clinker, durante el proceso de fabricación. Estos cementos producen concretos con una menor resistencia a la acción del congelamiento y deshielo, en tales concretos existen millones de pequeñas burbujas de aire, convenientemente distribuidas.

2.2 La Demanda del Cemento.

2.2.1 Consumo.

Las ventas totales de cemento registradas en el año 1984 ascendieron a las cantidades de 1'939,791 toneladas, cifra inferior en -1.3% con respecto a las ventas totales de cemento efectuadas en el año 1983 (1'964,210 toneladas).

El volumen de ventas de cemento con destino al mercado interno en el año 1984, ascendió a la cantidad de 1'932,888 toneladas y representó el 99.6% del volumen total de ventas del cemento. Las ventas de cemento para fines de exportación el mismo año ascendió a 6,903 toneladas, representando el 0.4% del volumen total de ventas de cemento.

En el año 1985 el volumen total de ventas de cemento alcanzó a 1'737,786 toneladas. El volumen de ventas desconsolidado para mercado interno y para exportación muestra que el 99.9% de las mismas fueron para el mercado interno, alcanzando a 1'735,678 toneladas, mientras que el 0.1% restante significó las ventas de exportación, los que alcanzaron a 2,108 toneladas. Al comparar el volumen de ventas alcanzados en los años 1984 y 1985 se tiene que a nivel de ventas totales en 1985 hubo un descenso de -10.4%.

Las ventas totales de cemento en 1986 fueron 3'220,704 toneladas, mayor en 27.8% a las ventas totales de 1985; de este total el 99.9% se destinó al consumo del mercado interno y el 0.1% restante fue exportado.

2.2.2 Demanda por Regiones.

Sabemos que la demanda total de cemento en 1986

fue de 2'218,484 toneladas. Para consideraciones del presente trabajo es importante visualizar la demanda por departamento y también la demanda por regiones -los utilizados por el Ministerio de Vivienda- (Ver fig. No.2.1), para esto se ha echado mano a los porcentajes estimados de la demanda total de cemento por departamento (Ministerio de Vivienda y Construcción, información a Junio de 1985) y la demanda total de cemento de 1986. (Tablas Nos. 2.1 y 2.2). También se muestra en la tabla respectiva las zonas de influencia de las empresas productoras en el mercado (Tabla No. 2.3).

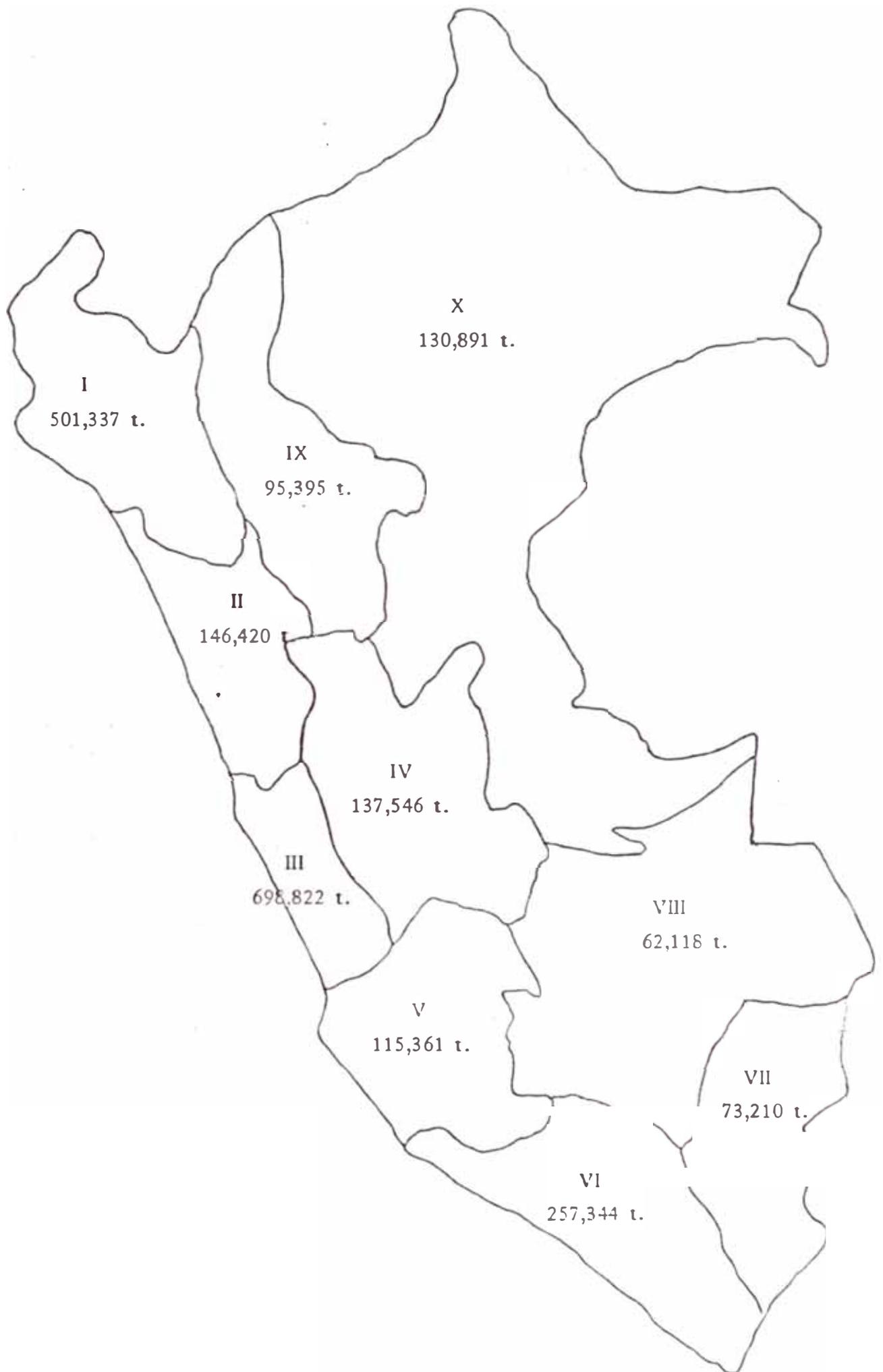


FIG. 2.1

2.3 La Oferta del Cemento

2.3.1 Fuentes Actuales de Abastecimiento

La oferta de cemento en el Perú está compuesto por el volúmen de producción nacional, efectuada por las cinco empresas productoras de cemento que se encuentran ubicadas en el territorio nacional.

2.3.2 Ubicación de las Empresas de Producción

Las empresas productoras de cemento se encuentran ubicadas en el territorio nacional en la forma siguiente:

-Cemento Norte Pacasmayo	Pacasmayo	La Libertad
-Cementos Lima	Atocongo	Lima
-Cementos Andino	Tarma	Junín
-Cementos Yura	Yura	Arequipa
-Cementos Sur	Juliaca	Puno

2.3.3 Capacidad de Producción de la Industria del Cemento en el País

Las cinco plantas productoras utilizan hornos rotatorios, cuyos volúmenes de producción varían de 100,000 a 1'000,000 de toneladas anuales. Asimismo, la evolución de la capacidad práctica de producción de cemento en el período 1985 - 1990 de acuerdo a los planes de ampliación y mejoras de las empresas productoras nos señala un probable incremento de 1'330,000 toneladas/anuales, las que

incrementadas a la capacidad práctica actual nos permitirá alcanzar en 1990, 4'390,000 t/año, como se puede observar en el cuadro No. 2.4.

2.3.4 Serie Histórica de la Producción de Cemento

En la tabla No. 2.5 se observa que el mayor volumen de producción se alcanzó en el año 1980 con la cifra de 2'769,000 toneladas, descendiendo luego paulatinamente en los años subsiguientes alcanzando en 1985 la cantidad de 1'762,000 toneladas, aumentando en 1986 a 2'203,000 toneladas.

2.4 Comercialización

2.4.1 Sistema de Abastecimiento

Las empresas nacionales productoras de cemento venden sus productos bajo cuatro modalidades de comercialización a saber:

- Venta por intermedio de los distribuidores, modalidad en la cual estos abastecen directamente al público usuario y/o a sub-distribuidores y minoristas tales como: ferreteras y depósitos.
- Venta directa a compañías constructoras e ingenieros contratistas de obras perteneciente al sector no público.

- Venta directa al sector público, la que se realiza en la planta de producción y está destinada a obras del Estado, que se ejecutan generalmente por el Sistema de Administración o Licitación Pública a cargo de Contratistas de Obras.
- Venta directa al público usuario, modalidad que se efecta en planta con un volumen mínimo de 1,000 bolsas. Además las empresas productoras realizan ventas para fines de exportación.

2.4.2 Principales Agentes

Entre los principales agentes mayoristas para cada una de las empresas productoras podemos señalar las siguientes:

. CEMENTOS LIMA S.A.

A. Berrío y Da	Lima
Distribuidora de Materiales S.A.	Lima-Huaraz
A. Cemento Portland S.A.	Ica

. CEMENTO NORTE PACASMAYO

Normana - Chiclayo	Lambayeque
Normana - Trujillo	La Libertad
Normana - Cajamarca	Cajamarca
Normana - Piura	Piura
Normana - Chimbote	Prov.Santa
Tador Miletec	Tumbes
Almacenes Romero S.A.	Piura-Sullana-Chiclayo

. CEMENTO ANDINO

A. Nolimbide - DANSA	Lima
A. Berrío	Lima
Mat. Const. M. y Z. Tolentino	Huancayo
Depovent	Lima
Depósito de Mat. Const. Gonzales	Iquitos
Uchiyama Import S.A.	Huancayo
Dist.de Cemento Tingo María	Tingo María
Vidal Inocente	Huánuco
Absalón Justamaita	Ayacucho
Francisco Meléndez	Ayacucho

. CEMENTOS YURA

Raúl Fuentes Delgado	Arequipa
Provesur	Arequipa
Dinaco - Moquegua	Moquegua
Dinaco - Ilo	Ilo

. CEMENTOS SUR

Morgante Torres	Puno
Consur S.A.	Cuzco, Apurímac

2.5 Estudios Realizados para la Instalación de Nuevas Plantas de Cemento

2.5.1 Sector Privado

Estudios pertinentes a la instalación de una planta de cemento en la Selva y en otros puntos del país datan desde hace aproximadamente 30 años.

Los mismos que se llevaron a cabo debido especialmente a que:

- a) La oferta del producto no alcanzaba a cubrir la demanda.
- b) El suministro del producto era deficiente.

Algunos estudios fueron:

- Estudio Ganso Azul: no fue de conocimiento público.
- Cemento Ucayali: también se le llamó estudio Logan King (año 1964). De ubicación en un recodo del Río Ucayali, a 20 horas de Pucallpa, de capacidad 35,000 t., y de producción de 35,000 t/año, operando 24 horas al día por 250 días al año.
- Cemento Selva: Estudio ADELATEC (año 1966). De ubicación en los alrededores de Pucallpa, de capacidad 39,000 toneladas por año, proceso húmedo, de producción 130 t/día de 24 horas. De los estudios y considerando centros de consumo como por ejemplo Tingo María, Pucallpa, Iquitos; se dedujo que los precios de venta eran variables, de acuerdo a la distancia entre el centro de producción y el centro de consumo.

2.5.2 Sector Público

Este sector también tomó interés en la instalación de plantas de cemento en la Selva, pues a las razones esgrimidas por el sector privado añadió las siguientes:

- a) Mejorar la deficiente infraestructura regional.

- b) Romper la dependencia del abastecimiento, disminuyendo los insumos importados consumidos por el transporte terrestre, aliviando así los requerimientos de divisas.

CAPITULO 3

SITUACION ACTUAL Y POSIBLES SOLUCIONES

3.1 Definición de la Problemática Actual

3.1.1 Regiones Alejadas de las Grandes Fábricas. Disponibilidad de Mano de Obra y Recursos.

En la actualidad la demanda de cemento en el país está en cierto modo cubierta por cinco plantas productoras que utilizan hornos rotatorios horizontales y que en conjunto tienen una capacidad anual de producción de 3'260,000 toneladas. Si dividimos el país en las 10 zonas que normalmente se utilizan para efectos de la administración nacional, encontramos que la demanda anuales de cemento son relativamente bajas en comparación con las capacidades instaladas de las plantas productoras (100,000 a 1'000,000 de toneladas anuales), por ejemplo en la zona VII , que incluye los departamentos de Cuzco, Apurímac y Madre de Dios, tiene una demanda anual de 62,113 toneladas y la planta más pequeña Cemento Sur tiene una capacidad de 90,000 toneladas. Además, la ubicación geográfica de las plantas existentes, da lugar a un desabastecimiento en importantes zonas que se derivan no de la capacidad de producción existente sino de la distancia, lo que encarece el producto (Ver Fig. No. 3.1).

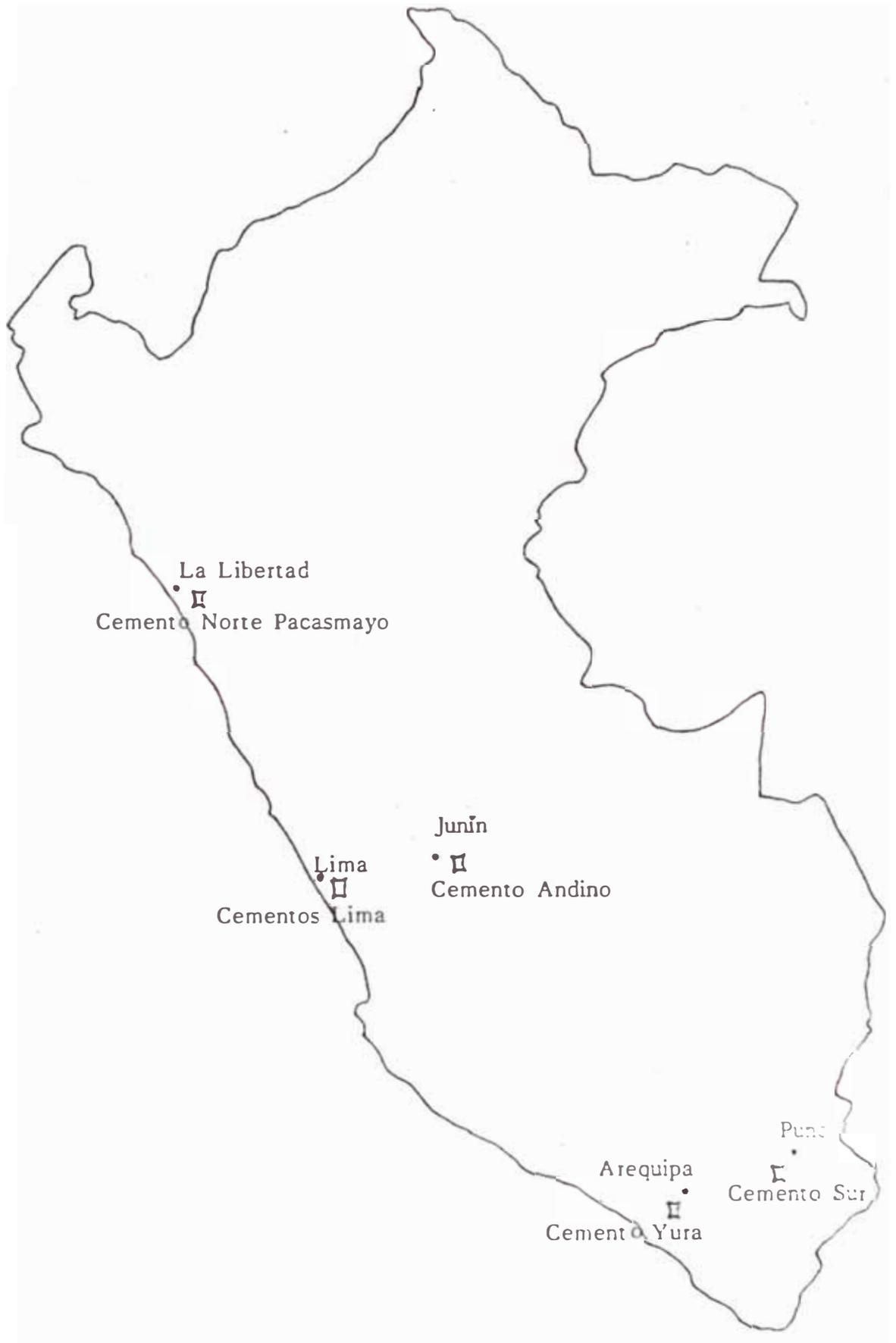


FIG. 3.1

UBICACION DE LAS PLANTAS CEMENTERAS EN EL PERU

En el contexto de las producciones de la industria cementera existente no hay posibilidades de solución ya que las ampliaciones que puedan programarse en las plantas actuales permitirá un mayor abastecimiento de las zonas cercanas a ellas, pero no resolverá el problema del gran número de poblaciones que por estar alejadas de los centros productores y no contar con vías de comunicación adecuadas, se ven obligadas a pagar precios varias veces más altos que los que rigen en los centros de producción.

Por otro lado, las zonas de Sierra y Selva por la abundancia de sus recursos naturales y de su población adquieren importancia prioritaria para el país y su desarrollo socio económico es fundamental. Para ello, el cemento es un insumo esencial y se requiere de un abastecimiento oportuno y en condiciones económicas favorables. El alto costo de este material en esas zonas y su porcentaje de participación en el costo de las obras en general reduce significativamente la capacidad de ejecución, llegándose a tener que descartar la ejecución de algunas de ellas. Es decir, que si en la actualidad se dispone de una cierta cantidad de dinero para la adquisición de cemento requerido por una obra, con esa misma cantidad de dinero se podría adquirir de 3 a 4 veces mayor cantidad de

cemento para la ejecución de un mayor número de obras y para reducir los costos de otras, si el material no fuese encarecido por el transporte y la especulación.

Si enfocamos el problema desde otro punto de vista, encontramos que contamos con los recursos naturales requeridos para la fabricación de cemento (canteras, recursos hidráulicos, combustibles, etc.), pero que no pueden ser utilizados por la falta de una tecnología apropiada a nuestra realidad que tiene como características: multiplicidad de yacimientos, falta de vías de comunicación, bajo nivel de demanda, limitados recursos económicos, escasez de fuentes de trabajo, abundancia de mano de obra no calificada, etc.

Una solución a lo planteado consiste en la instalación de plantas productoras de cemento en localidades del país estratégicamente seleccionadas. Estas, además de permitir el abastecimiento en condiciones adecuadas de oportunidad, calidad y precio, propiciarán un desarrollo de la zona en base a actividades económicas relacionadas al cemento.

El sistema de producción con miniplantas con hor-

nos verticales, además de corresponder a un nivel de producción adecuado (hasta 200 toneladas diarias), permitirá el establecimiento de plantas modulares en diversos puntos, lográndose un mayor aprovechamiento de los recursos naturales que posee el país. Otro aspecto importante a señalar es que el combustible que se utilizará será el carbón (que el país posee en volúmenes importantes); lo cual en esta época da mayor importancia a esta idea. Además la amplia difusión de las miniplantas de cemento tienen la particularidad de ofrecer un efecto considerable en el empleo de recursos humanos no calificados (una persona por cada 100 t/año), que abundan tanto en nuestro país.

3.1.2 Incidencia del Costo de Transporte en el Precio de Cemento

Es necesario examinar profundamente el problema de los costos de transporte. El sistema de transporte de nuestro país, comparado con los de los países industrializados, se ha subdesarrollado en muchas partes, ya que la mayoría de las ciudades del interior generalmente no tienen accesibilidad al transporte barato.

La influencia de los costos de transporte pueden ser más fácilmente comprendidas observando dos

alternativas diferentes de la demanda anual su-
 puesta de 6,500 toneladas, en cada nueve ciudades.
 Se supone que una región cualquiera con nueve
 ciudades cubre aproximadamente $22,500 \text{ Km}^2$.

La primera alternativa (Fig. 3.2.1), es la denomi-
 nada centralizada que consiste en construir una
 planta que produzca $9 \times 6,500$ toneladas anuales.
 Para minimizar los costos de transporte esta podrá
 estar ubicado en el centro de la región, de esta
 manera la distancia promedio para enviar cemento a
 las otras ocho ciudades - antes de su redistri-
 bución-es de :

$$\frac{4 \times 50 + 70 \times 4}{9} = 60 \text{ Km.}$$

Por lo tanto, el costo del transporte promedio:

Costo Flete = I/. 14 060/t (Camión,Lima-Chancay)*

Costo : I/. 84 360

La segunda alternativa (Fig. 3.2.2), es que en
 cada ciudad en donde los materiales brutos están
 disponibles tenga su propia planta de cemento.

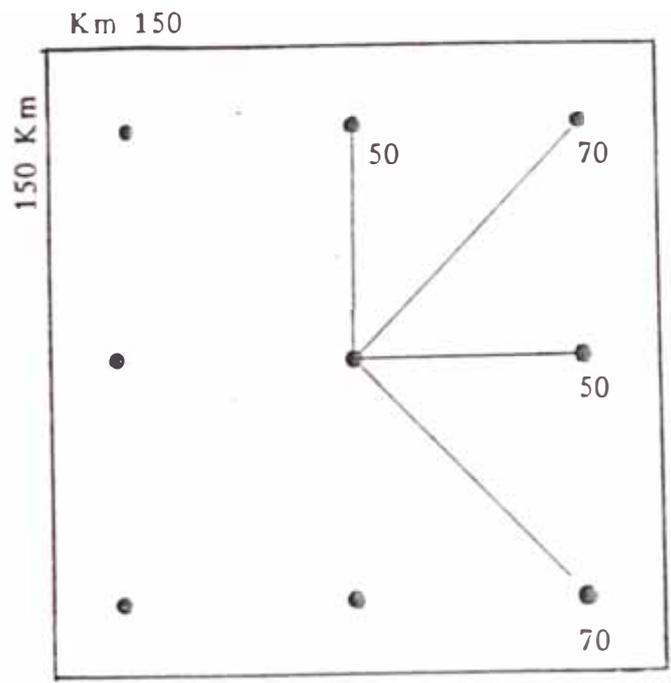
En ausencia de ferrocarriles baratos o transportes
 fluviales, el cemento producido centralmente tiene
 que ser fabricado a un costo que es por lo menos
 I/. 84 360.00 más bajo que el cemento producido
 en los centros de las ciudades.

* EN BASE A LOS DATOS OBTENIDOS DE LA COMISION REGULADORA DE TARIFAS DE TRANSPORTE.

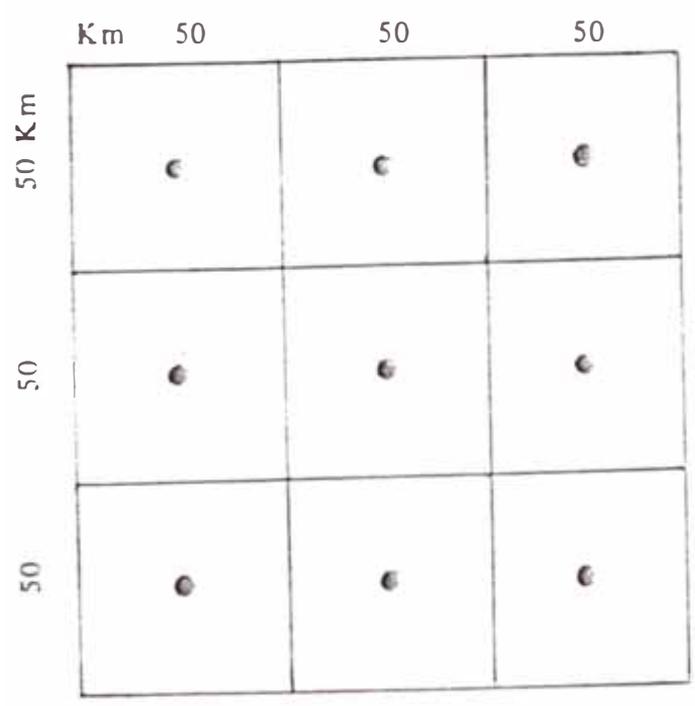
FLETES PARA EL TRANSPORTE DE CARGA EN CAMION REGIONAL NACIONAL 04.25.89

3.1.3 Precios del cemento en diversos puntos del país

REGION	US \$/TONELADA	RAZON CON PRECIO EX-FABRICA
NOR ORIENTAL		
a) Dpto. de San Martín		
Tarapoto	220	3.16
Moyobamba	232	3.83
Rioja	247	3.55
Saposoá	209	3.00
Lamas	232	3.33
Juanjuí	174	2.50
Tocache		
b) Dpto. de Huánuco		
Tingo María		
c) Dpto. de Ucayali		
Pucallpa		
d) Dpto. de Loreto		
Iquitos		
Yurimaguas	174	2.50
CENTRO SUR		
Huancavelica	130	1.86
Ayacucho	135	1.93
Apurímac	180	2.58
Cuzco		
PRECIO PROMEDIO EX-FABRICA	69.6	1.00



1



2

FIG. 3.2

3.2 Posibles soluciones a la problemática actual.

3.2.1 Experiencias en Otros Países.

Las mini plantas de cemento han atraído la atención de agencias internacionales y de los economistas industriales que tratan con el desarrollo.

La producción global de cemento era de 700 millones de toneladas en 1974, en donde la mayor parte fué producida en hornos rotatorios. Sin embargo, aproximadamente el 5% proviene de hornos verticales pequeños, muchos de los cuales están localizados en China. El Directorio de la World Cement proporciona 72 localizaciones en 17 países - China no está incluida - las que juntas dan más de 200 hornos en funcionamiento. La mayor parte de los hornos verticales, a excepción de China, se encuentran en Francia, Alemania, Italia, España, Yugoslavia. Además, más de 2,800 plantas de cemento a menor escala - generalmente un horno activo en cada uno - funcionan actualmente en China (Ver Tabla No. 3.1.)

3.2.1.1 Análisis de la Industria China del Cemento

La Oficina de Minas de los Estados Unidos en un estudio ha señalado que la industria china del cemento se ha convertido en un factor mundial. La capacidad de más de 40 millones de toneladas métricas está a la

el que se usa en muchas plantas de cemento a menor escala. El número de plantas pequeñas de cemento, casi todas ellas localizadas en áreas rurales, ha aumentado de 200 en 1965 a más de 2800 en 1975.

La producción total de las plantas pequeñas ha aumentado durante este mismo período de 5 millones de toneladas a 25 millones de toneladas. De manera que el tamaño promedio de dichas plantas ha disminuído considerablemente (de 25,000 toneladas por año en 1965 a 10,100 toneladas en 1975).

La producción anual de cemento se ha triplicado en el período 1965-1975 y actualmente está en los 48 millones de toneladas. En lo que concierne a las pequeñas, las plantas rurales se han incrementado del 35% al 57%. Un gran número de plantas de cemento pequeñas se han construido durante el período. Más información sobre éste adelanto se puede encontrar en la Tabla 3.2.

Los hornos en las modernas plantas pequeñas de cemento de China - generalmente funcionan en distritos o prefecturas - tienen las siguientes características:

- a) La alimentación es de pelets uniformes que se obtienen de un disco peletizador.
- b) El horno es alimentado más o menos en forma continua por un grupo de hombres que trabajan en la parte superior del horno.
- c) La formación de clinker está limitada a la porción superior del horno.
- d) La corriente de aire es usualmente inducida y la transferencia de calor toma lugar en la parte inferior del horno.
- e) La descarga de clinker es usualmente discontinua.
- f) El ahorro de combustible es bueno porque:

- El combustible es triturado con los nódulos
- Hay una eficiente transferencia de calor dentro del horno
- El clinker es poroso, por eso necesitan menor energía para su trituración.

Una consideración importante puede ser el hecho de que el tamaño pequeño de una planta permite que la capacidad de la planta aumente con la demanda local. Esto puede hacer sobretodo, que los costos sean menores que si una planta de gran capacidad hubiera sido creada desde el comienzo.

Los costos de producción de las plantas muy pequeñas son inicialmente bastante altos, pero en general considerablemente bajos cuando el tamaño de la planta aumenta y la técnica es completamente dominada. La principal razón para obtener costos de producción comparativamente bajos puede ser que las plantas hayan sido construidas usando grandes cantidades de equipo en desuso.

Esto se ha provisto a costos de oportunidad que han sido mucho más bajos que si un equipo nuevo hubiera estado disponible a través de planes centrales.

Un manual industrial registra los costos de inversión para plantas de cemento de diferentes tamaños. El costo de inversión es de 1.2 millones de yuanes para una planta con una producción anual de 32,000 toneladas, la que es un diseño standard para plantas pequeñas de cemento. Esto da un costo de inversión de 37.5 yuanes por tonelada. Grandes plantas con hornos horizontales rotatorios producen costos de inversión de 19.5 yuanes y 17.6 yuanes por tonelada en plantas que producen 492,000 y 709,000 toneladas por año respectivamente. (Ver Tabla 3.3)

Debe tenerse en cuenta también que las grandes plantas producen cemento de gran calidad y que el producto en las grandes plantas es posible que sea de calidad más uniforme.

El costo de inversión apreciado en las visitas a pequeñas plantas de cemento en

1971 y 1973 indica que los costos para las 32,000 toneladas por plantas anual pueden ser ligeramente inferiores que las cifras citadas. El consumo de carbón por tonelada de cemento no varía en las plantas de diferentes tamaños.

¿Qué consecuencias tienen los diferentes costos de inversión por tonelada de cemento en los costos del producto acabado?. El precio del cemento es ambiguo y depende del uso que se le da.

El precio de la antigua fábrica es de alrededor de 70 yuanes por tonelada cuando los impuestos y ganancias planificadas se incluían. Si se calculaba una depreciación, cargas de mantenimiento y posibles cargas capitales a un 25% de los costos de inversión, éste ascendía a 9.4 yuanes para las dos más grandes plantas mencionadas que usan hornos rotatorios. Existen, por supuesto, otras clases de economías. Los costos de los salarios son menos importantes con relación al crecimiento de la planta. El consumo de carbón por tonelada de cemento no difiere para las plantas de diferentes tamaños y no hay razón para

creer que el consumo de electricidad podrá ser más alto por tonelada de cemento en una pequeña planta comparada con una mayor.

En el campo de la fabricación del cemento, China también está usando tecnología extranjera pero no plantas completas. De acuerdo a un informe comercial, la Corporación de Maquinaria de Exportación-Importación ha estado discutiendo la importación de cierto equipo técnico para una planta de cemento con una capacidad de producción de 1.0 - 2.0 millones de toneladas por año. Los costos totales de inversión para una planta con una capacidad anual de 1.0 millones de toneladas por año fueron de US \$ 35.00 millones (1975). Si ésta cantidad se convierte a yuanes al cambio oficial, y si se calculan como costos por tonelada de cemento, ascenderá a 70 yuanes por tonelada que incluirán costos de ubicación de la construcción y de todas sus periferias. Esto es considerablemente más elevado que las alternativas domésticas presentadas en la Tabla 3.4.

Cuando se decide la ubicación, el tamaño y la tecnología para las plantas de cemento, los costos de transporte en la China son mucho más importantes que los costos de inversión por tonelada de producto acabado. Es decir que las economías de escala debido a los reducidos costos de inversión por tonelada de cemento para grandes plantas, rara vez compensan los altos costos de transporte comparados con las pequeñas plantas ampliamente distribuidas. Hoy en día, los costos de producción dependen de la eficiencia de las plantas y muchas de éstas pequeñas son, por supuesto, inicialmente mucho menos eficientes que las mayores.

Sin embargo, la demanda no se equipara con la capacidad de producción. Una baja utilización de la capacidad conduce inmediatamente a altos costos de producción.

La fabricación local del cemento, de acuerdo a informes disponibles, puede lograrse en una pequeña planta de diseño standard con una capacidad de 32,000 toneladas por año, aproximadamente 40 yuanes por tonelada. Más de 2,000 distritos de

China tienen todos los materiales brutos para producir cemento. Informes periodísticos de China mencionan actualmente que se han creado en un 80% de estos lugares plantas pequeñas de cemento. No hay duda de que los altos costos de transporte - en ausencia de ferrocarriles o vías fluviales - han sido factores significativos en la fabricación local de plantas relativamente pequeñas; la capacidad de la planta ha sido seleccionada para competir con los requerimientos del mercado de un distrito.

La información disponible indica que el 70% de la producción de cemento, a través de mini plantas de cemento en la China, va al sector de la agricultura y el 30% a la industria local.

3.2.1.2. Mini Plantas de Cemento en la India

Recientemente, el desarrollo de las mini plantas de cemento ha sido promovido por el Ministerio de Desarrollo Industrial de la India, a través de la apropiada Célula de Tecnología. El Instituto de Investigación del Cemento de la India ha sido comisionado para llevar a cabo ciertos es-

tudios. De acuerdo a esto, las mini plantas de cemento están justificadas en un gran número de ubicaciones y los costos de producción son aproximados a los de las grandes plantas -por lo menos bajo condiciones de laboratorio- de acuerdo al Instituto.

La experimentación de plantas de cemento a menor escala en la India puede remontarse a la Guerra Indo China en 1962 cuando la gente en el establecimiento de la resistencia India tomó ciertas precauciones con el fin de tener ubicaciones en lugares distantes, en las plantas de cemento. Una planta piloto en Jarhat en Assam es obviamente un ejemplo.

Sin embargo, la revista Science Today (Bombay) informa en una sección especial de cemento en su edición de Enero de 1975 que la tecnología del horno no se hizo popular en el país. El primer horno fue construido apresuradamente por los científicos de la resistencia en 1963 sin mucho conocimiento y lo transfirieron a la Corporación de Desarrollo Industrial Tamil

Nadu, ese mismo año. La planta fracasó.

A comienzos de los años 70 el presidente de un grupo que trabajaba en las plantas pequeñas solicitaron a tres personas que:

- a) Determinaran los costos comparativos del establecimiento de los diferentes tamaños de las plantas de cemento junto con los costos de los materiales y otros.
- b) Hicieran sugerencias con respecto a la ubicación de las plantas pequeñas.
- c) Descubrieran la posibilidad de abastecer una planta incluyendo el peletizador, horno y otros componentes.
- d) Prepararan un mapa de la India dando detalles con respecto al tamaño y ubicación de las plantas de cemento existentes.

Cierto número de plantas pequeñas se construyeron, sobre una base experimental y todas fueron evaluadas por el grupo.

Un detallado exámen de las cuatro plantas experimentales existentes revelaron que la viabilidad económica no puede determinarse por dos de ellas. Se expresaron también algunas dudas con respecto a la calidad de cemento. Datos técnicos y económicos provenientes de las dos plantas restantes llevaron al grupo a concluir que "dependía de la disponibilidad de la instalación de los depósitos de mineral de plantas de cemento de 30 toneladas y 100 toneladas de capacidad por día para que se juzguen apropiadas". Este tamaño promedio puede incluir probablemente la mayor parte del cemento que se produce en plantas pequeñas de la China, aunque no de todas las plantas pequeñas existentes.

El grupo sostuvo además que, la ubicación de las plantas de cemento a pequeña escala en las diferentes regiones del país dependía de la disponibilidad de los materiales brutos básicos y que los costos de transporte no son una desventaja si el cemento es producido en donde se encuentra el mercado. Además, como los hornos verticales son usados para producir cantidades

limitadas de cemento, el mercado no es la **principal** desventaja. En consecuencia, las plantas de horno vertical de cemento a menor escala pueden estar ubicadas en áreas donde los medios de comunicación y transporte no se han desarrollado pero en donde la piedra caliza y el carbón están disponibles en cantidades limitadas suficientes para mantener una planta por 20 a 25 años.

Basándose en este criterio el grupo preparó una lista de aproximadamente 35 ubicaciones sugiriendo que las plantas de 30 toneladas por día o de 100 toneladas por día deben construirse en estos lugares. Posteriormente, sugirieron que se debería iniciar un programa y escoger siete ubicaciones primarias para que de esta manera su experiencia pueda aplicarse a las plantas restantes que se iban a construir después. Sin embargo, no se inició tal programa.

Ultimamente, en un artículo publicado en *Industrial World* de Abril de 1985 da cuenta del éxito de las mini plantas de cemento que producen económicamente sólo 20

toneladas diarias de cemento. Trabajando con un proceso desarrollado por el Instituto de Investigación de Cemento (IIC) de la India, (M10 South Extension 11 Ring Road, New Delhi, India), estas plantas han demostrado su practicidad desde su instalación a mediados de 1970.

Según el IIC el horno rotativo pequeño no es tan económico ni técnicamente eficiente en pequeñas capacidades, como el horno vertical.

En 1974 IIC desarrolló el proceso HTV para producción de cemento en pequeña escala. Lo ensayaron en una planta desocupada en Miduvathur cerca de Tindurapalli, a más o menos 2000 Km de Nueva Delhi. El IIC informó que para 1976 esta planta de 20 toneladas por día, producía cemento de acuerdo a la norma IS: 269 - 1976.

Como la composición química de las materias primas y la fineza del polvo de materia prima son factores críticos en el proceso IIC, las características de las materias primas incluyendo el combustible

se evalúan respecto a su capacidad de formar pelets de la medida requerida, su resistencia en crudo, su porosidad, estabilidad térmica, uniformidad, etc.

IIC diseñó las plantas HTV para capacidades de 30, 50, 100 y 200 toneladas por día. Hay dos plantas en Hosachurga (60 toneladas) y Lokapur (30 toneladas) en Karnataka. Ambas producen cemento de acuerdo a la norma IS:269-1976 y se están expandiendo a 90 toneladas. Otras tres plantas están próximas a terminarse una en Mahuva (estado de Gumarat), otra en Ramgarh (Bihar) y la tercera en Tezue (Arunachal). Cinco plantas de más de 100 toneladas se están concluyendo en Gurajar, Karnataka y Rajasthan.

Todo esto indica que la India ha logrado una competencia técnica en el diseño de las mini plantas de cemento, el que se equipara o sobrepasa a la China.

3.2.2 Efectos de la Aplicación de estas Experiencias en nuestro País.

Recogiendo la experiencia de otros países podemos

mencionar la incidencia social que podrá tener la instalación de mini plantas de cemento en nuestro país. De hecho ejercerá un efecto positivo considerable en el empleo; una pequeña planta de 20,000 toneladas por año empleará alrededor de 200 personas.

En China por ejemplo, el aumento total del empleo industrial en plantas de cemento a menor escala es de por lo menos 140,000 personas. Un gran número de plantas rurales son más pequeñas y proporcionan más trabajo que en el ejemplo anteriormente citado

De esta manera se puede pensar que el efecto total directo del empleo de las plantas de cemento rurales (fabricación solamente) asciende a por lo menos 250,000 personas. Este número es 10 veces más alto que, el ofertado por un pequeño número de plantas de cemento modernas a gran escala que producen la misma cantidad de cemento y que usan un horno rotatorio con una capacidad anual de 500,000 toneladas. Existen otras consideraciones importantes de trabajo, además del efecto directo en el empleo:

En primer lugar un gran número de personas pueden ser fácilmente entrenadas en el proceso de tecno-

logía industrial, después un buen número de personas dentro de las unidades de producción podrán recibir adiestramiento en el campo de la organización, una cantidad más pequeña pero considerable será adiestrada en el campo de la administración relacionado a la obtención de maquinaria y materiales brutos, distribución de los productos y coordinación con otras unidades industriales.

CAPITULO 4

TECNOLOGIA DE LA PRODUCCION DE CEMENTO

4.1 Materias Primas

Teóricamente se puede fabricar cemento Portland a base de cualquier material conteniendo cal, sílice, alúmina y hierro. En la práctica las posibilidades son mucho más limitadas, porque es evidente que se deben escoger materias primas fáciles de extraer, de tratar y de combinarse. Puede también emplearse como corrector materias o subproductos de otras industrias tal como escorias de alto horno, o también cenizas de centrales térmicas.

Se acostumbra a clasificar las materias primas naturales en:

Caliza	de más de 80% CO_2/Ca
Elementos arcillo calcáreos:	de 40 a 80% de CO_2/Ca
Arcilla	: de menos de 40% CO_2/Ca

- Calizas

Las calizas pueden ser de dureza y pureza variables. Proviene de yacimientos de CO_2/Ca contenidos en las aguas de los mares o de los lagos, yacimientos provocados por precipitación química o realizados por medio de organismos vivos (moluscos, algas). Algunos de estos yacimientos, bajo los efectos de una presión y de una temperatura suficiente, han dado calizas cris-

talinas, tales como el mármol, cuya dureza es elevada.

Las principales impurezas contenidas en las calizas son:

La sílice: que se presenta bajo varias formas:

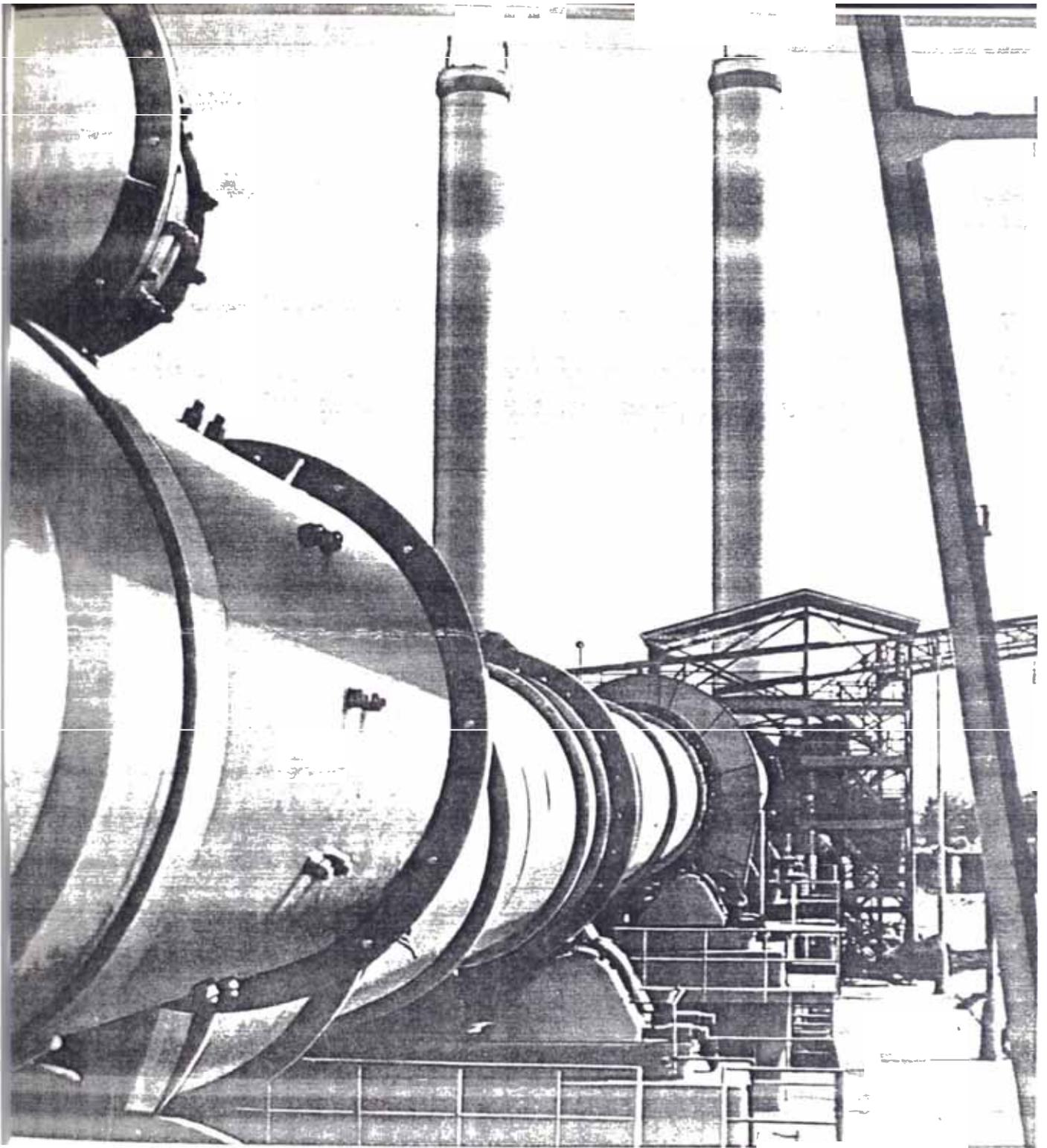
Libre. Que no puede combinarse y debe eliminarse cuando se presenta en nódulos de sílex o de cuarzo. Cuando se encuentra en estado natural, finamente dividida y repartida en la masa de una caliza, puede actuar distintamente.

Combinada con varios elementos.- tales como hierro, magnesia y alúmina. La sílice y la alúmina, ya combinadas bajo forma de arcilla, reaccionan bien con la cal.

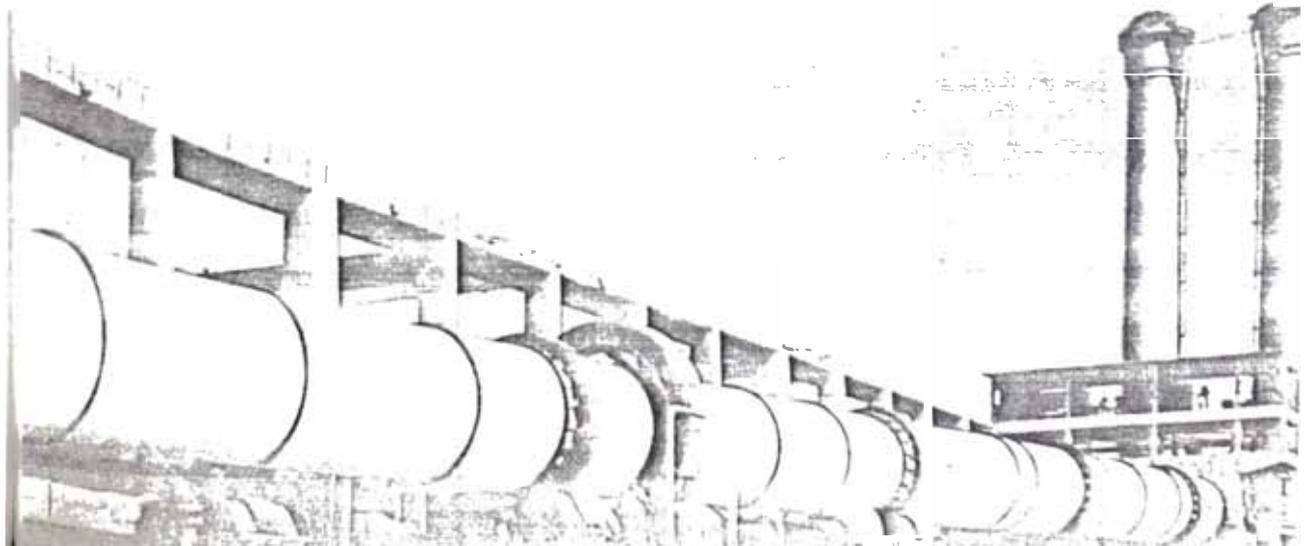
La magnesia: es un elemento peligroso, debido a la posibilidad de expansionarse en el seno del cemento hidratado. Las calizas no deben contener más del 5% de magnesia.

El hierro: se encuentra en la mayoría de los casos bajo forma de óxido Fe_2O_3 ó de pirita FeS (lo máximo permitido es aproximadamente 2% en este último caso). El hierro desarrolla un papel útil de fundente.

Los álcalis: tales como sosa y potasa, se volatili-



Egipto ▼



zan en el momento de la clinkerización, hallándose especialmente en el polvo de los hornos. Los álcalis pueden provocar ciertas dificultades en el curso de la fabricación del cemento (formación de anillos en el horno, modificación de ciertas características físicas del cemento).

Las calizas denominadas "puras" contienen por lo menos 95% CO_2 Ca, las impurezas mencionadas desarrollan un papel poco importante.

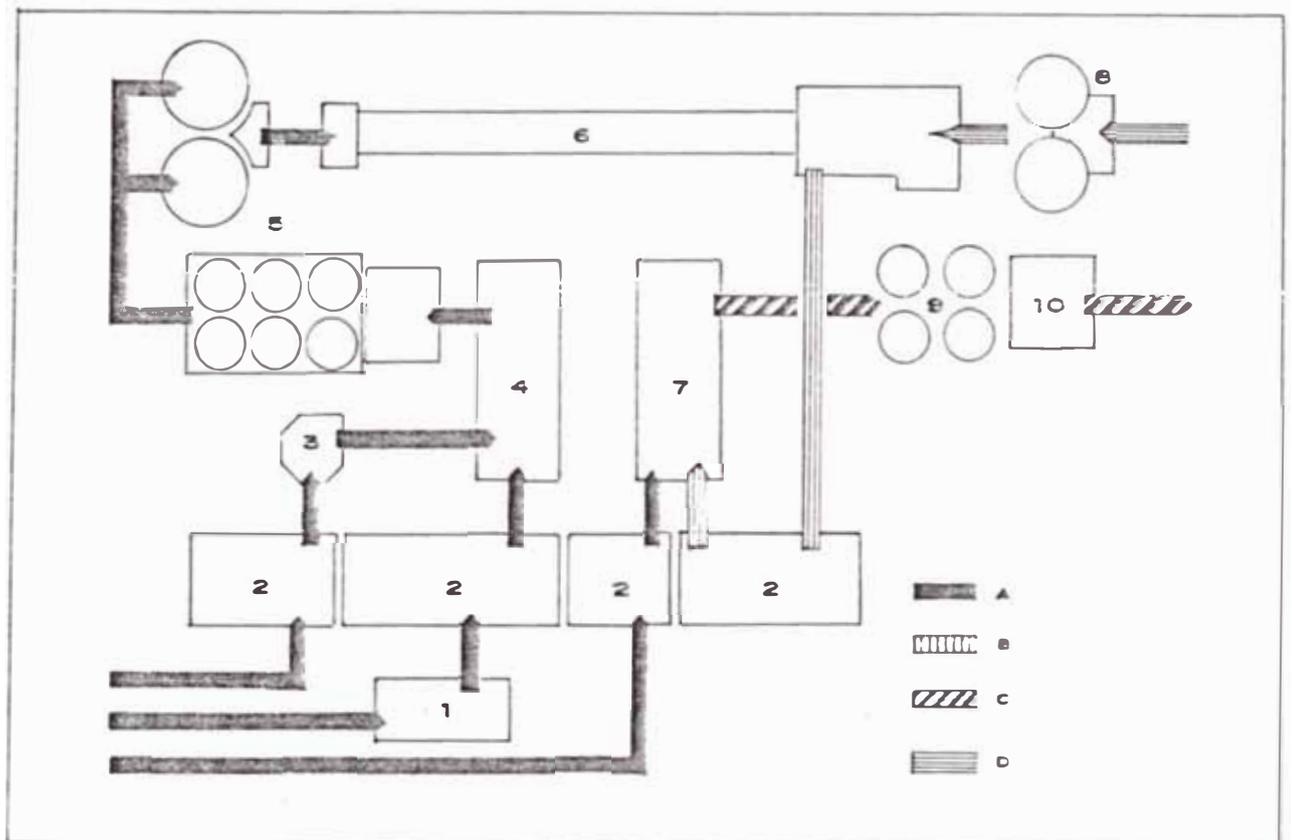
4.2 Descripción de la Tecnología de Hornos Rotatorios

4.2.1 Procesos en General

4.2.1.1 Fábricas de Cemento para Proceso Húmedo de Producción de Cemento.

Todo el proceso tecnológico de la producción del cemento por vía húmeda puede repartirse en las tres etapas siguientes (Fig. 4.3)

- a) Extracción de la caliza y de las materias primas de corrección
- . Quebrantamiento de las materias primas
 - . Molturación de las materias primas
 - . Preparación de las materias primas
 - . Homogenización
 - . Preparación del combustible



A - COMBUSTIBLE B - FABRICACION DE CLINKER C - FABRICACION DEL CEMENTO
 D - EXTRACCION DE LA CALIZA Y DE LAS MATERIAS PRIMAS DE CORRECCION .

- | | |
|--|---|
| 1.- Sección de quebrantamiento de la caliza | 6.- Horno rotativo y transporte del clinker |
| 2.- Descargador de la materia prima y del clinker | 7.- Sección de molienda del cemento |
| 3.- Levigador de polvo | 8.- Servicio de manipuleo con coque |
| 4.- Sección de molienda de la materia prima | 9.- Silos de cemento |
| 5.- Servicio de manipuleo con posta, ellos y estanques | 10.- Sala de ensacar y expedición |

**ESQUEMA TECNOLÓGICO DE UNA FABRICA DE CEMENTO
 CON PROCESO HUMEDO DE FABRICACION**

FIG. 4.3

b) Fabricación del clinker

- . Cocción de las materias primas en hornos de cemento
- . Enfriamiento del clinker cocido

c) Fabricación del cemento

- . Molturación del clinker y los agregados
- . Almacenamiento del cemento en depósitos
- . Ensacado y expedición del cemento

A continuación detallaremos algunos aspectos de este proceso:

- Preparación de la materia prima.- Las materias primas de partida tienen que **tratarse antes de la elaboración propia**. Esto se efectúa de dos modos diferentes, según su composición química y las demás características. Si son **triturables todas las materias primas de partida** (tanto la caliza de alto porcentaje como los demás componentes), **se elaboran en quebrantadores en grava** **lla corriente que se moltura luego, en molinos tubulares con agua a pasta cruda**.

Si la pasta cruda se fabrica de la caliza y arcilla; la arcilla extraída se leviga en pasta arcillosa. Esta se agrega luego a los molinos tubulares donde se moltura la gravilla de caliza.

- Quebrantamiento.- El material se quebranta preponderantemente en una planta quebrantadora aplicando grandes quebrantadores de martillos, eventualmente en caso de una mayor humedad y pegajosidad de la materia prima, en quebrantadores de martillos especiales con cilindros (Fig. 4.4)

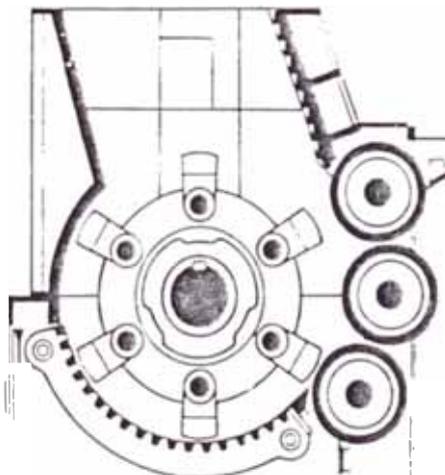


FIG 4.4
QUEBRANTADOR DE MARTILLOS CON CILINDROS

- Levigación.- Para el tratamiento y la desintegración secundaria de materiales no triturables blandos y plásticos sirven los levigadores. El equipo consiste en esencia en un depósito de hormigón de forma poligonal en cuyo centro está colocado sobre la base un árbol vertical. En los brazos del árbol en forma de cruz están suspendidos rastrillos con dientes de acero recambiables. Tanto los rastrillos como los dientes desintegran, al girar, el material y lo mezclan con agua llevada al levigador. El material triturado sale a través de un agujero lateral al foso colector de donde se lleva por medio de bombas centrífugas de pasta al depósito en forma de silo o directamente al molino.

- Molturación de las materias primas.- La molturación figura entre las fases más importantes de la preparación de las materias primas antes de la cocción. (Fig. 4.5) El material de un tamaño de los granos de 8-25 mm se desmenuza una suspensión (pasta) de una finura de

las partículas preponderantemente inferior a 60 hasta 70 micrones. La finura de la molturación ejerce una influencia decisiva en la velocidad de la creación del **clinker** durante la cocción. El material se moltura de modo continuo en molinos agrupados (de cámaras múltiples). Las materias primas individuales se alimentan en la relación correspondiente a la composición exigida de la pasta. En molinos de capacidades grandes resulta económicamente ventajoso equipar los molinos de materias primas con un sistema de gobierno automático.

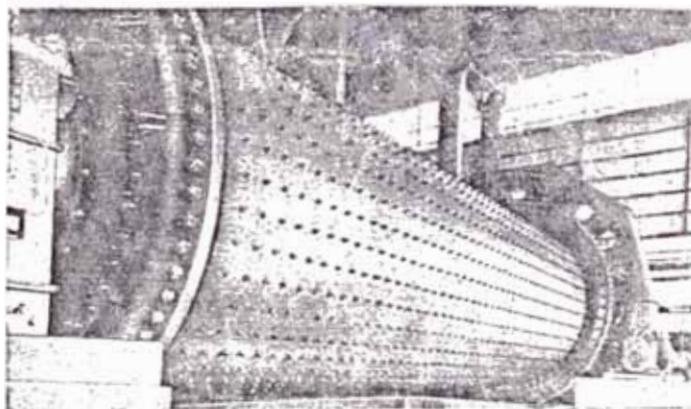


Fig. 4.5
Molino para Molturación Húmeda

- **Corrección y Homogenización de la Mezcla de la Materia Prima.**- En la calidad del clinker producido y también en el servicio del horno y la vida útil del revestimiento ejerce influencia la estabilidad de la composición química de la mezcla de la materia prima. En fábricas de cemento con proceso húmedo de la producción la pasta se corrige y homogeniza, por consiguiente, en silos de pasta verticales. La pasta corregida se lleva a través de una tubería a depósitos de reserva de pasta de forma circular. Allí se consigue una alta homogenización de la suspensión por medio de la agitación mecánica con una estructura trasladable de acero y aire comprimido. El transporte de la pasta del molino a los silos, su trasiego y transporte de los depósitos de reserva a los hornos se lleva a cabo por medio de bombas de pasta.

- **Combustible.**- La energía térmica necesaria para la descomposición de la caliza y la producción del clinker se suministra al horno en forma del combustible sólido, líquido o gaseoso

(carbón, petróleo crudo, gas natural). El carbón se tritura y al mismo tiempo deseca; al horno se impele en forma de polvo de finura prescrita. El petróleo crudo se calienta previamente a la temperatura apropiada para el arreglo de la viscosidad y, bajo presión, se impele al recinto del horno, después de haberse mezclado anteriormente con el aire primario. El combustible gaseoso se impele al horno bajo una presión apropiada para combustión en un quemador especial.

- Producción del Clinker.- El grupo más importante de la cadena del horno es el horno rotativo. El largo y el diámetro del horno dependen de la capacidad exigida. Se proyectan y suministran hornos de capacidades de hasta 1500 t/24 horas, de un diámetro de 5.2 m. La relación del largo y diámetro del horno es decisiva desde el punto de vista del aprovechamiento útil del calor. Los especialistas proyectan las dimensiones de los hornos a base de experiencias de largos años y conoci-

mientos técnicos más nuevos. Un gran cuidado se dedica a la elaboración de taller y montaje. Las carcazas de los hornos se sueldan de chapas de caldera de calidad superior. El ajuste axial de los hornos lo efectúan los trabajadores de la propia planta de montaje por medio de un aparato especial según el principio del laser. El desplazamiento axial de los hornos de grandes capacidades se gobierna por medio de roldanas hidráulicas; el propio diseño del correspondiente sistema de mando está amparado por patentes.

Una de las importantes condiciones de marcha regular del horno es la alimentación uniforme de la pasta de materia prima. La efectúa con seguridad el alimentador de pasta con regulación infinitamente variable de la cantidad provisionada.

- Procesos Termico-Químicos en el Horno Rotativo.- Según el carácter de los procesos termico-químicos que se desarrollan en el horno, su recinto de

mientos técnicos más nuevos. Un gran cuidado se dedica a la elaboración de taller y montaje. Las carcazas de los hornos se sueldan de chapas de caldera de calidad superior. El ajuste axial de los hornos lo efectúan los trabajadores de la propia planta de montaje por medio de un aparato especial según el principio del laser. El desplazamiento axial de los hornos de grandes capacidades se gobierna por medio de roldanas hidráulicas; el propio diseño del correspondiente sistema de mando está amparado por patentes.

Una de las importantes condiciones de marcha regular del horno es la alimentación uniforme de la pasta de materia prima. La efectúa con seguridad el alimentador de pasta con regulación infinitamente variable de la cantidad provisionada.

- Procesos Termico-Químicos en el Horno Rotativo.- Según el carácter de los procesos termico-químicos que se desarrollan en el horno, su recinto de

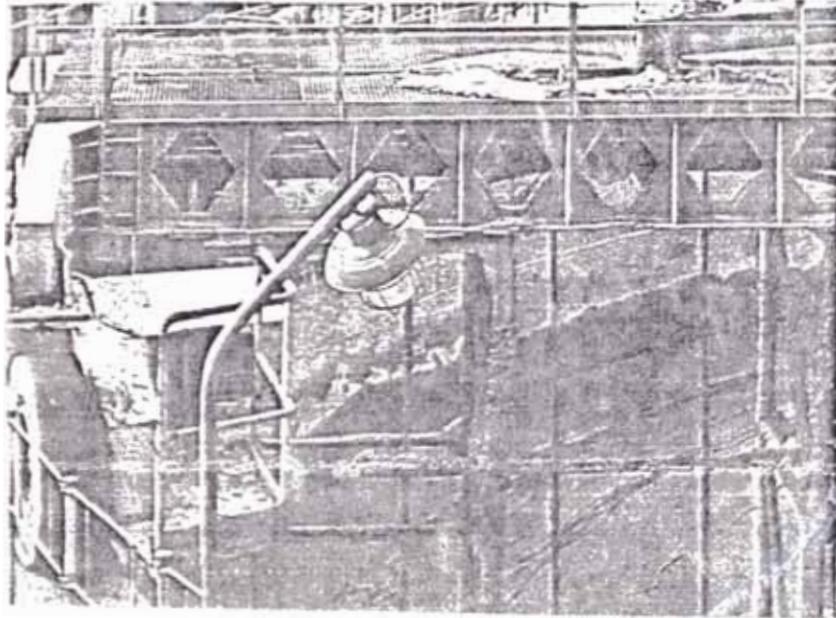


Fig. 4.6
Depósito de Reserva de la Pasta con Equipo Agitador

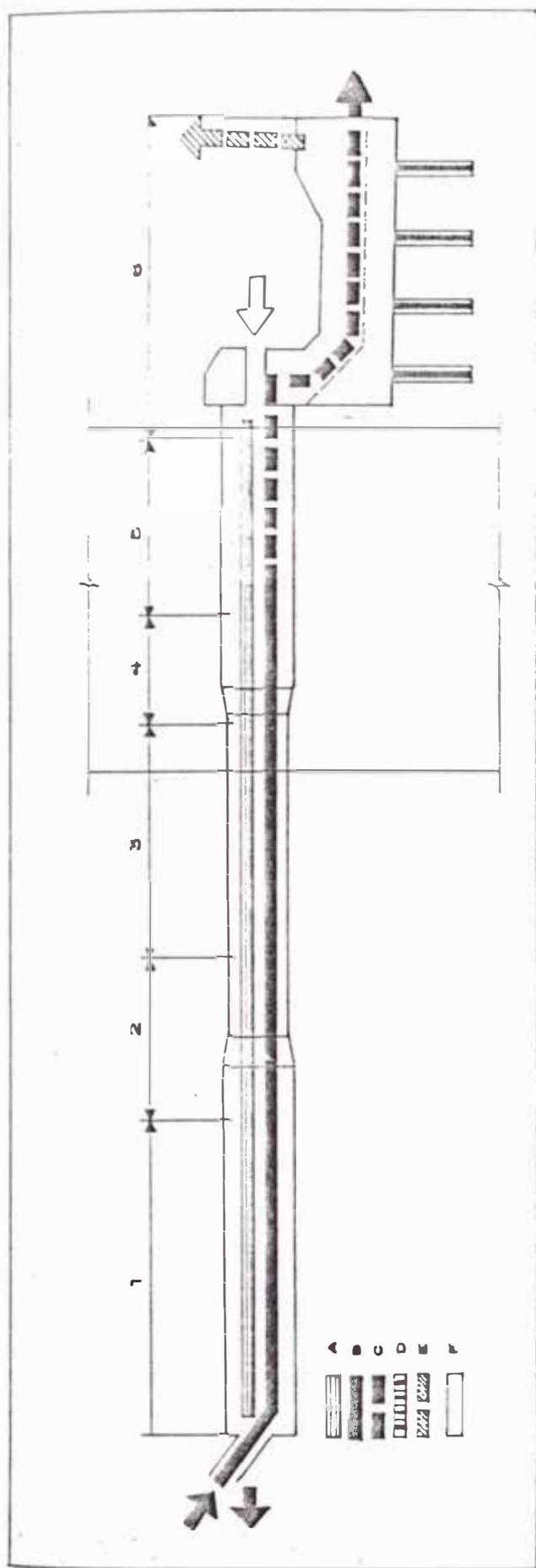
funcionamiento puede repartirse en 6 zonas siguientes:

1. Zona de secado
2. Zona de calentamiento previo
3. Zona de calcinación
4. Zona exotérmica
5. Zona de sinterización
6. Zona de enfriamiento

Ver Fig. 4.7

Zona de secado y calentamiento previo
 (1 y 2)

La pasta de cemento cruda contiene -- en



A.- GASES. B.- MATERIA PRIMA. C.- CLINKER. D.- AIRE DE EMPRIAMIENTO. E.- AIRE RESIDUAL. F.- COMBUSTIBLE
 ESQUEMA TECNOLÓGICO DE UNA CADENA DE HORNO PARA EL PROCESO HUMEDO
 DE LA FABRICACION DEL CEMENTO

FIG. 4.7

vista de las características físicas y minerológicas de partida - por regla general el 33-38% del agua. La pasta se hace entrar a través del tubo de admisión en la parte de alimentación del horno, a través de la cual se desplaza por la influencia de su inclinación y rotación lenta. El recinto secador del horno suele estar equipado con una zona de cadenas suspendidas libremente o en guirnaldas. Las cade-nas que arreglan el contacto intenso de los gases de combustión con la pasta de cemento cruda y, con ello, también una evaporación más rápida del agua, llevan cabo el secado de la materia prima.

La pasta que a través de la estructura interna de cadena, crea gránulos que en la zona de calentamiento previo se calientan a una velocidad relativamente muy alta a la temperatura necesaria para la descomposición de la caliza.

Zona de calcinación y zona exotérmica
(3 y 4)

La descomposición térmica de la caliza en esta zona es una reacción fuertemente endotérmica. Esto significa que

consume una cantidad sustancial del calor entregado, de modo que la temperatura se conserva allí prácticamente al mismo valor. Al mismo tiempo se producen en esta zona cambios en la rejilla estructural de las materias primas de corrección. Tan pronto que la descomposición térmica de la caliza haya sido terminada, la temperatura crece con bastante velocidad y tienen lugar las primeras reacciones entre el óxido altamente activo, desprendido de la caliza y el óxido de silicio, de aluminio y ferrico.

Zona de Sinterización (5)

La temperatura elevada trae como consecuencia igualmente la formación de la fase líquida, en la cual se diluyen las componentes presentes y la creación de los minerales que crean el clinker se desarrolla luego de una manera más intensa. La temperatura máxima en dicha zona oscila entre 1350 y 1420 °C según la composición química y las características físicas de las materias primas. El mecanismo de la creación de

minerales que crean el clinker es bastante complicado. El proceso está terminado cuando prácticamente todo el calcio libre se ha convertido en silicatos, aluminatos y aluminoferritos. La mezcla de los compuestos así creados, interpenetrada por la materia fundida viscosa, procede a la zona de enfriamiento en el extremo final del horno.

Zona de enfriamiento (6)

La calidad del clinker depende de su rápido enfriamiento. Este tiene lugar parcialmente en la zona de enfriamiento del horno, mientras que el propio enfriamiento se termina en el refrigerador. El aire que atraviesa el refrigerador se calienta por el calor derivado y se introduce en el horno como aire secundario precalentado para la quemadura del combustible. El clinker producido se mezcla con cierta cantidad de la gipsita para la regulación de la solidificación y, una vez molido a la finura prescrita, se convierte en cemento.

Enfriamiento del clinker

El clinker adquirido por la calcinación en el horno rotativo se enfría en refrigeradores de diseños diversos. Los más generales son los enfriadores planetarios o de parrilla. Los enfriadores planetarios consisten en varios tambores soldados emplazados en la circunferencia del extremo del horno y junto con este último giran. La máxima velocidad y el más alto grado de enfriamiento los proporcionan los enfriadores de parrilla. Un enfriador de parrilla consiste, en esencia, en una parrilla móvil, compuesta de las barras de parrilla individuales, encerrada en una envuelta inmóvil revestida de ladrillos refractarios. El clinker se enfría con aire que atraviesa la parrilla; de la cantidad del aire depende el grado de enfriamiento. El clinker evacuado del refrigerador es triturado por regla general inmediatamente en el quebrantador de rebotamiento encadenado.

Almacenamiento del clinker

El clinker se almacena ya sea en des-

cargaderos abiertos con vía de grúa y una grúa con cucharón de almeja o en silos de acero, eventualmente silos cilíndricos de hormigón armado. Con el almacenado se persigue una finalidad doble: por un lado, un enfriamiento perfecto del clinker (el clinker caliente reduce el rendimiento del molino) y, por otro lado, la mejora de su calidad por hidratación y carbonización de la cal restante libre debidas a la humedad y la presencia del anhídrido carbónico en el aire.

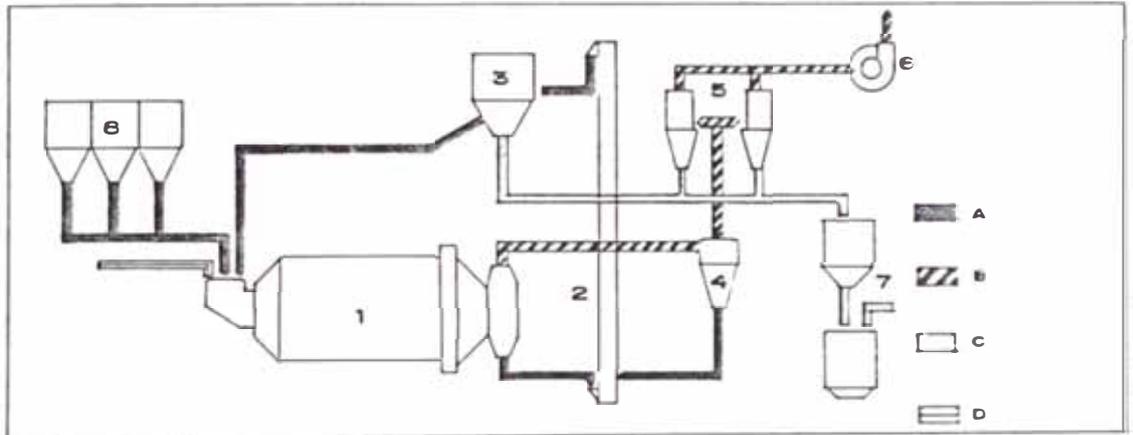
Molturación

El clinker almacenado se moltura en molinos tubulares con circuito abierto (molturación continua) o cerrado (molturación en un molino de circulación) Fig. 4.8 y 4.9. En la fabricación del cemento portland se agrega yeso. El clinker y el yeso atraviesan sucesivamente las cámaras molturadoras del molino y se expone a los efectos mecánicos de los cuerpos moledores. Una vez alcanzada la finura necesaria, producto molido - el cemento ya termi-

nado - abandona la sección de molienda y se traslada mecánica o neumáticamente a los depósitos de cemento.

Ensayado y Expedición

De los depósitos el cemento es provisto a la sala de ensacar, donde las máquinas ensacadoras llenan los sacos de papel autocerrables (Fig. 4.10). El cemento a granel se transporta por medios de transporte especiales (vagonas-cisterna y camiones-cisterna).

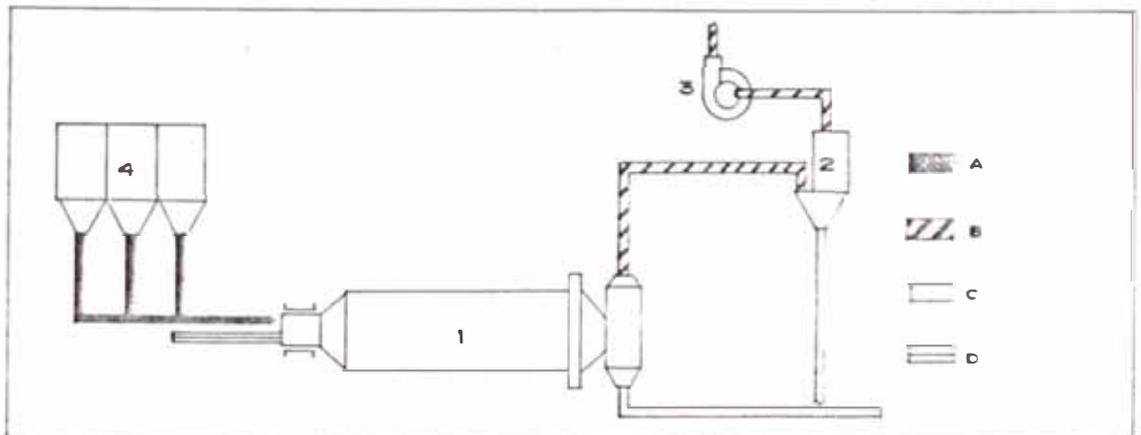


- A.- PRODUCTO MOLIDO B.- AIRE ASPIRADO C.- CEMENTO D.- AIRE
- 1.- Molino. 5.- Filtro de tela.
 2.- Elevador de cangilones. 6.- Ventilador.
 3.- Clasificador neumático rotativo. 7.- Sistema de transporte.
 4.- Separador. 8.- Silos de componentes.

ESQUEMA TECNOLÓGICO DE LA SECCION DE MOLTURACION DEL CEMENTO

TIPO DE CIRCULACION

FIG. 4.8



- A.- PRODUCTO MOLIDO. B.- AIRE ASPIRADO C.- CEMENTO D.- AIRE
- 1.- Molino tubular. 3.- Ventilador.
 2.- Filtro. 4.- Silos de componentes.

ESQUEMA TECNOLÓGICO DE MOLTURACION EN EL MOLINO TUBULAR DE CAMARAS MÚLTIPLES (Círculo Abierto)

FIG. 4.9

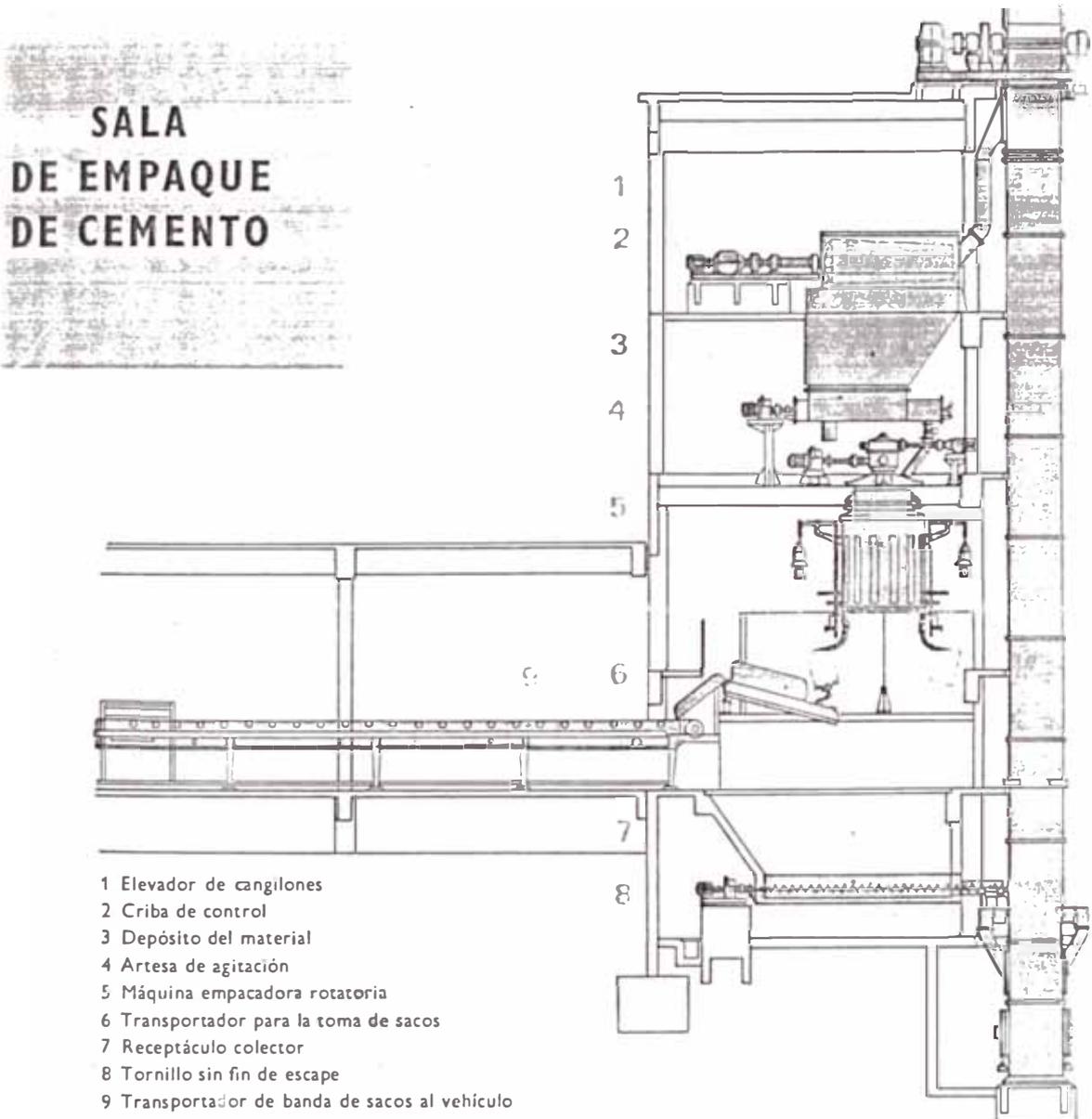
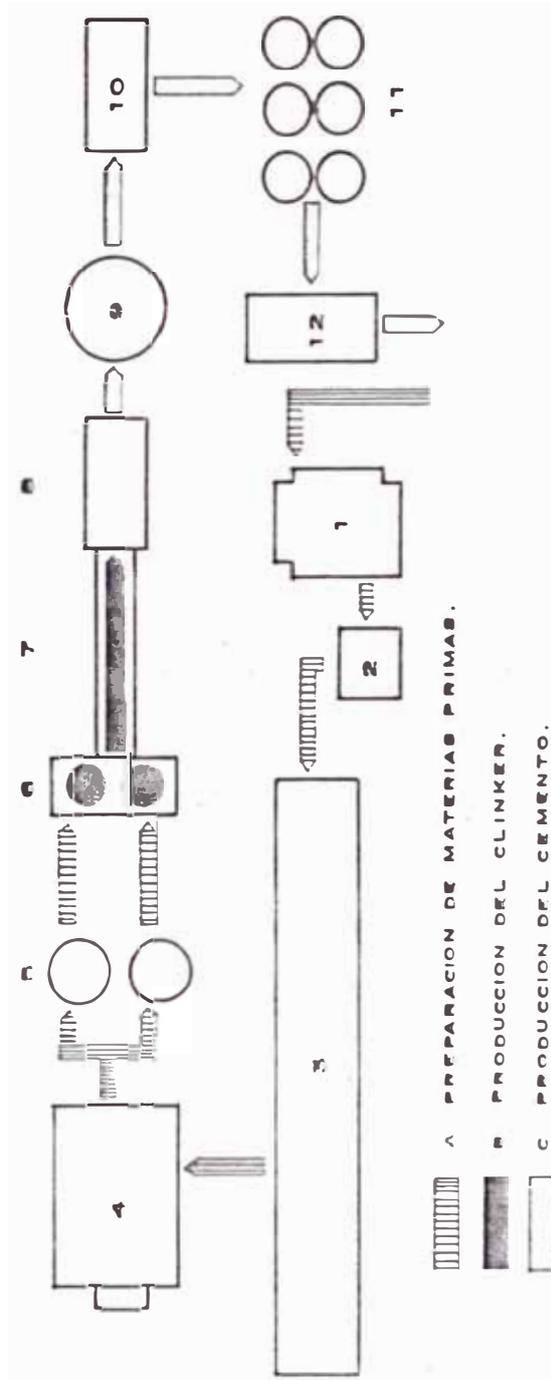


Fig. 4.10
Sala de Ensacar Cemento

4.2.1.2. Fábricas de Cemento Para el Proceso Seco de Producción de Cemento.

El efecto económico del modo de proceso

de producción en seco del cemento se basa en la mejor economía con el calor. El modo clásico en húmedo, calóricamente es desmedidamente pretencioso. Su balance termico lo empeora la gran cantidad de agua que se necesita para la preparación del fango de materia prima. Dicha agua - irremisiblemente perdido deberá evaporarse otra vez durante la calcinación en el horno. Por otro lado, al modo en seco, la materia prima se trabaja en forma de polvo, previamente homogeneizada suficientemente y precalentada mediante los gases residuales del horno en el intercambiador de calor. Del carácter del asunto se desprende que el modo en húmedo permanece por su tecnología más adecuado para materias primas que tienen alto contenido de agua, alcalis y cloruros, cuya elaboración en seco exigirá inmensamente altos costos **de inversión y de operación.**



- 1.- Instalación de trituración primaria.
- 2.- Instalación de trituración secundaria.
- 3.- Descargadero de materias primas.
- 4.- Instalación de molienda de materia prima.
- 5.- Silos de homogeneización de materia prima.
- 6.- Intercambiadores de calor.
- 7.- Horno rotatorio.
- 8.- Puesto del engranete.
- 9.- Silo para clínker.
- 10.- Instalación de molienda de cemento.
- 11.- Silos de cemento.
- 12.- Sala de empaque y despacho.

ESQUEMA TECNOLÓGICO DE UNA FABRICA DE CEMENTO
CON PROCESO DE PRODUCCION EN SECO

FIG. 4.11

Detallando algunos aspectos de este proceso:

- **Trituración:** La materia prima excavada se tritura al grano adecuado para la alimentación a los molinos de materias primas. Los materiales más blandos se trabajan en las instalaciones de trituración de una sola etapa equipadas, por regla general, mediante las quebrantadoras de martillos. Para la trituración de las materias primas difícilmente trabajables y pegajosos, con alto contenido de agua se han desarrollado quebrantadoras de martillos especiales con cilindros, las cuales encuentran buena aceptación. Para materiales más duros, para materias primas que contienen mayor cantidad de aditamentos abrasivos, o bien en los casos cuando se solicita cierto producto intermedio para otra tecnología escogemos la instalación de trituración de múltiples etapas, con las quebrantadoras de mandíbulas aprobadas en la primera etapa y, con quebrantadoras de martillos, de repulsión o bien cónicas en la segunda etapa.

Como ejemplo de la posible solución mencionamos la instalación de trituración de una sola etapa de margas calcáreas. (Fig. 4.12)

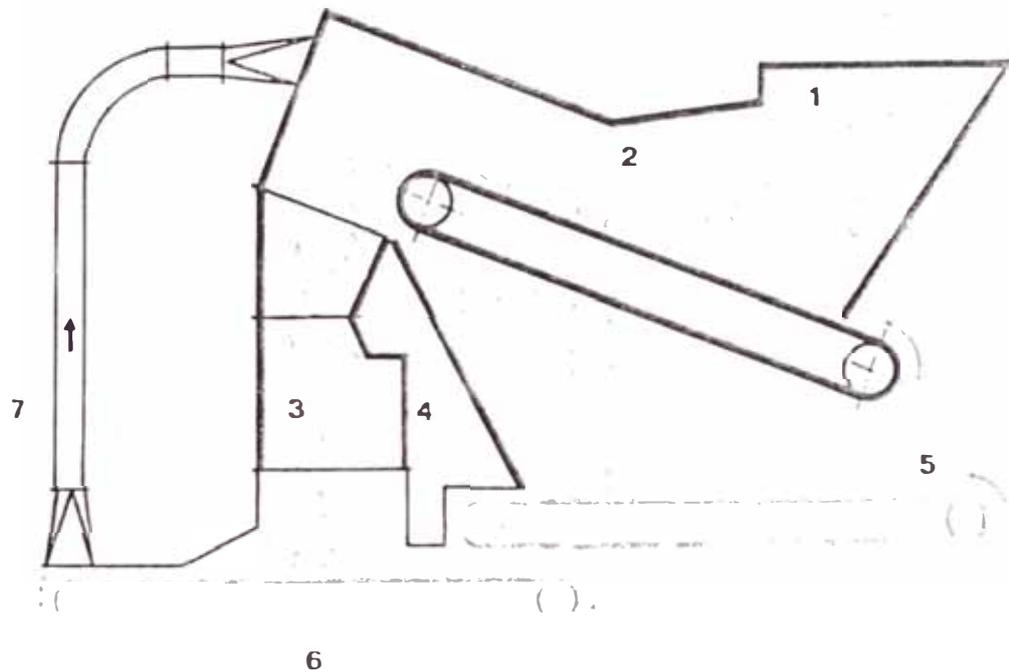


Fig. 4.12
Instalación de Trituración de una Sol Etapa de Margas
Calcáreas

El material volcado por los camiones a la tolva de descarga 1 se transporta mediante el alimentador articulado inclinado de ejecución pesada 2 a la quebradora de martillos con cilindros 3.

La velocidad de alimentación se regula automáticamente, en dependencia a la carga de la quebrantadora. El material que cae como abrasivo desde el alimentador articulado se orienta con ayuda de la deslizadera retirable 4 a la artesa de hormigón del transportador de cadena 5 el cual lo transporta al alimentador de banda cubierto 6. El mismo transportador de banda hace pasar también el material que cae desde la quebrantadora a otros caminos de transporte, al descargadero entejado de la materia prima. Con respecto al efecto de ventilación de la quebrantadora, la cubierta de la tolva de carga está empalmado por la tubería de aire 7 con la tolva de descarga, debajo de la quebrantadora. El equipo mecánico de la instalación de trituración, lo manobra el operario desde la cabina climatizada.

- Molienda de Materias Primas

La materia prima machacada se muele a la harina de materia prima, de la finura necesaria para la elaboración en la línea de horno. Durante la

molienda, la materia prima se deseca, al mismo tiempo, de modo que la humedad remanente no ocasione dificultades, al llevarse a cabo la homogeneización y el almacenaje de la harina de materia prima en los silos. Para el secado final de la materia prima durante la molienda se aprovecha el calor residual de los gases de humo proveniente desde el intercambiador de calor dispuesto detrás del horno rotatorio.

Como ejemplo describiremos el proceso en una instalación de molienda de materia prima con molino tubular y con secado del producto molido en el circuito mecánico de 100 toneladas/h de capacidad.

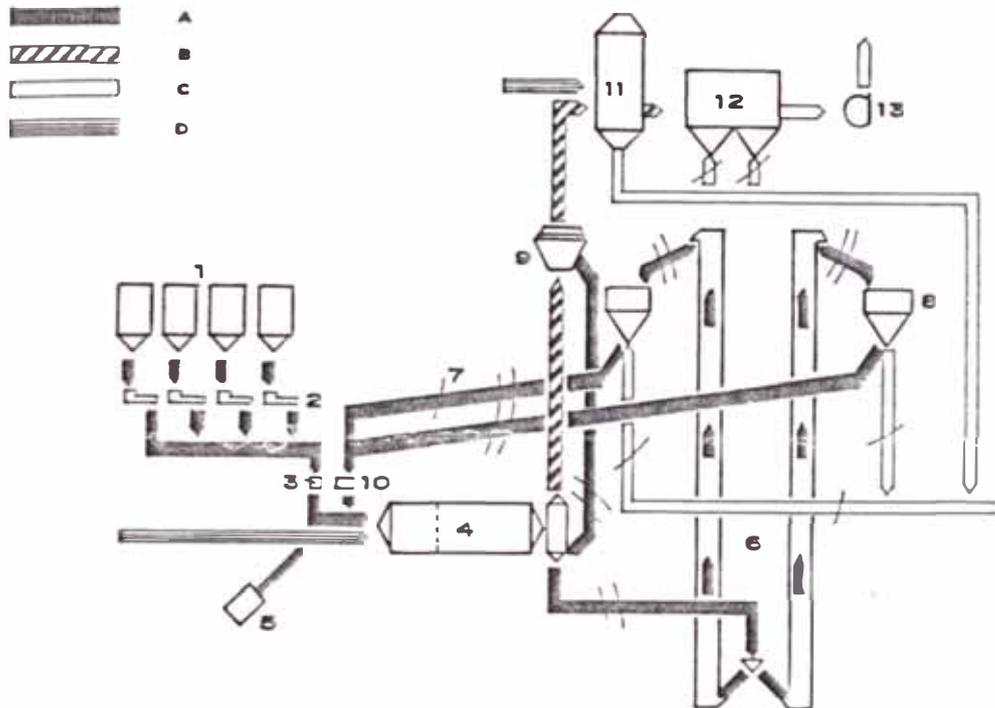
El esquema tecnológico representa la solución típica de la instalación de molienda de materias primas con el molino tubular de circulación, la circulación mecánica del producto molido, dos cernidores rotatorios de aire y el secado de la materia prima, a la molienda mediante el calor resi-

dual de gases de humo desde el intercambiador. (Fig. 4.13).

Líneas de Horno.— En todo sistema para la producción del cemento por el modo en seco; la línea de horno (Fig. 4.14) la constituyen tres grupos mecánicos básicos:

- . Intercambiador de calor donde la harina de materia prima homogeneizada se precalienta y, por parte calcina
- . Horno rotatorio corto para la terminación de la calcinación y la propia calcinación del clinker.
- . El refrigerador donde se enfría el clinker calcinado y, al mismo tiempo precalienta el aire de combustión.

En todos los sistemas para la producción del cemento por el modo en seco, el grupo, el más interesante, lo forma el intercambiador de calor, que aprovecha lo más económicamente posible el



A - PRODUCTO DE MOLIENDA
C - HARINA DE MATERIA PRIMA

B - AIRE ASPIRADO
D - GASES DE HUMO

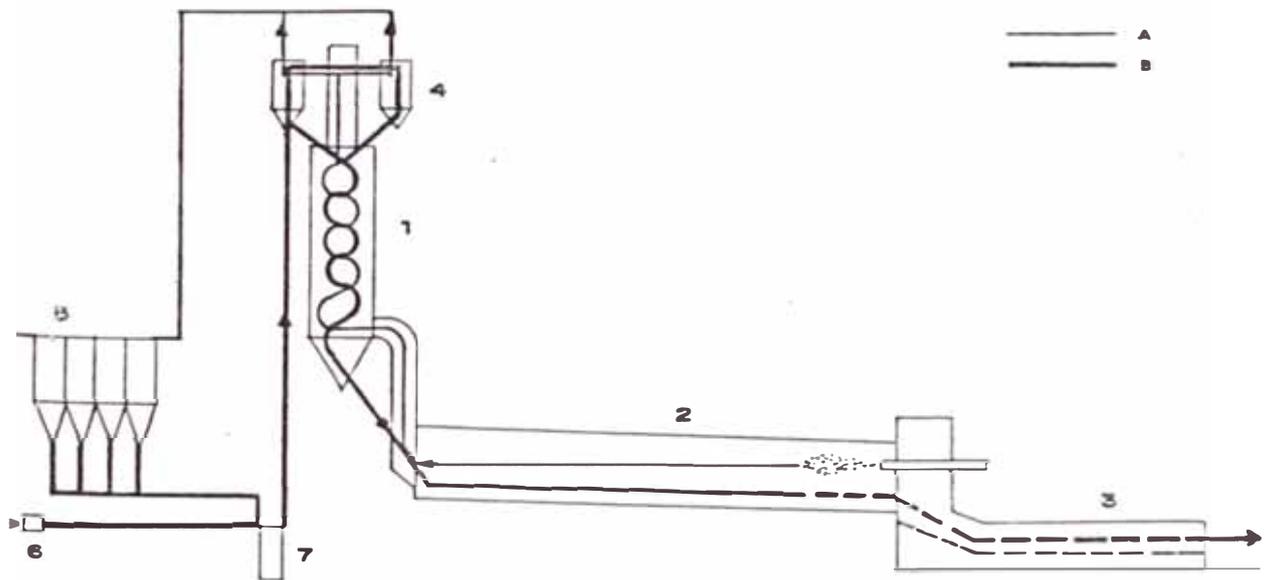
- 1.- Depósitos de materias primas.
2.- Alimentadores de pesado.
3.- Clapetela de junta.
4.- Molino tubular.
6.- Fuente complementaria de gases de secado.
8.- Elevadores de anglicones.
7.- Artefactos neumáticos.

- 8.- Cernidores de aire.
9.- Avantadoras de paletas.
10.- Deshidradora de pesado.
11.- Torre refrigeradora de pesado.
12.- Sistema de desempolvadura.
13.- Ventilador.

ESQUEMA TECNOLÓGICO DE UNA INSTALACION DE MOLIENDA
DE MATERIA PRIMA

FI . 4.13

calor residual desde el horno. Por la incorporación del intercambiador al horno rotatorio, se reduce la caída de temperatura entre los gases y la materia prima trabajada y, la parte de calor correspondiente retorna al proceso operativo. De esta manera se prolonga prácticamente su zona de calcinación, el horno puede ser relativamente más corto y su rendimiento aumenta considerablemente.



A.- MATERIA PRIMA

- 1.- Intercambiador de calor de contracorriente, tipo de pozo.
 2.- Horno rotatorio.
 3.- Refrigerador de emparrillado.

B.- GASES CALIENTES

- 4.- Ciclones de espesamiento.
 5.- Ciclones de despolvadura.
 6.- Alimentador de pesado.
 7.- Elevador neumático.

LINEA DE HORNO

FIG. 4.14

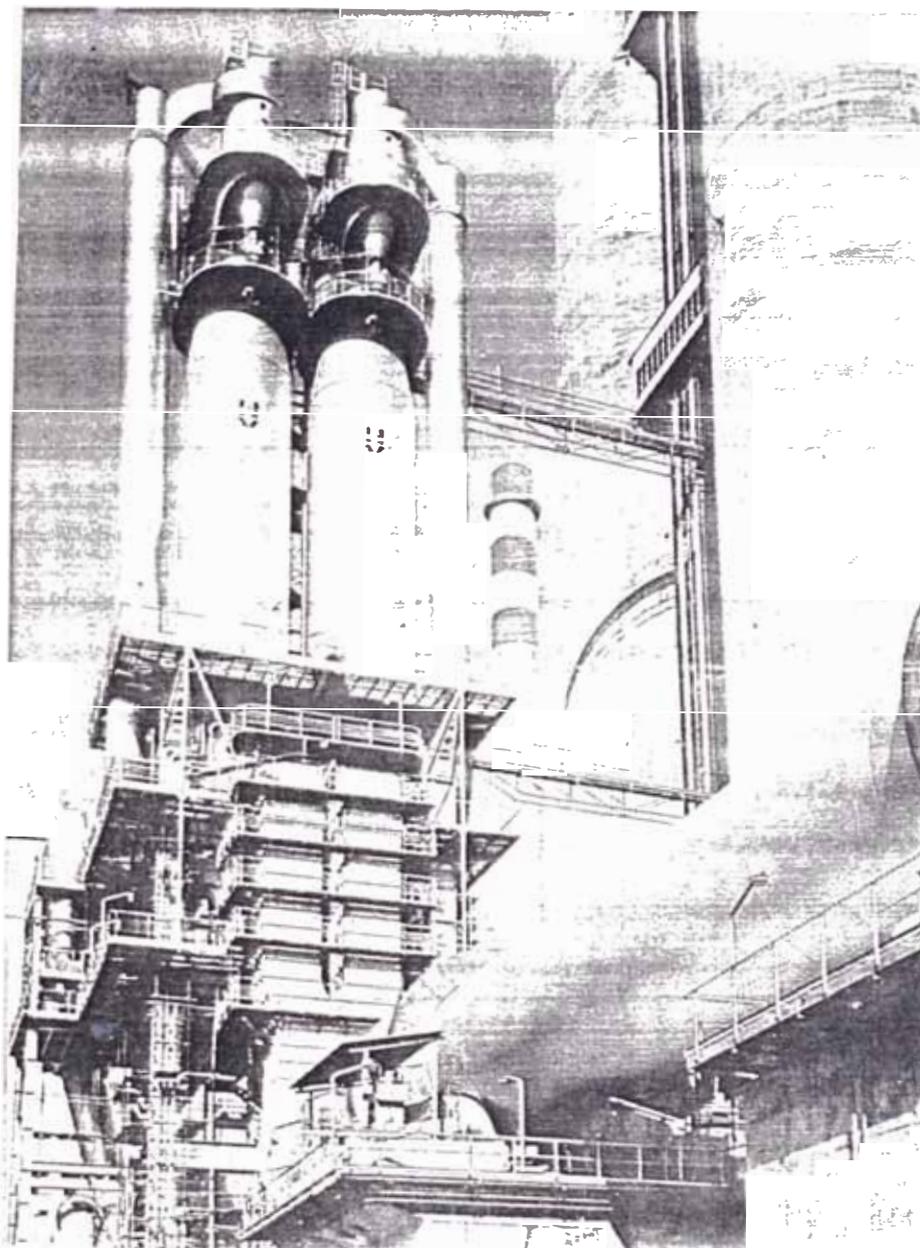


Fig. 4.15
Intercambiador de Calor

En todo sistema para la producción del cemento por el modo en seco nos encontramos con intercambiadores que trabajan sobre la base de la dispersión. La función de dichos equipos se basa

en el conocimiento que las ínfimas partículas de materia dispersadas en la corriente de gases calientes recibían extraordinariamente rápido su calor. El intercambiador de dispersión trabaja con el principio de espesamiento del medio portante por la materia prima de polvo, de forma que las partículas de la materia prima pasan contra la corriente de gases siempre más calientes.

El elemento principal del intercambiador, lo forma el pozo vertical, de sección circular 1. A la parte superior del pozo liga el sistema de espesamiento, consistiendo en los ciclones de gran capacidad 2 y, la parte inferior termina por la tolva de descarga cónica 3. Los gases de humo se conducen desde el horno rotatorio por el canal 4, el cual desemboca a la parte inferior del pozo en dirección tangencial. A consecuencia del desembocadero tangencial del canal de humo, los gases calientes reciben el movimiento rotatorio a toda altura del pozo,

formando la turbulencia que se necesita para la transferencia intensiva

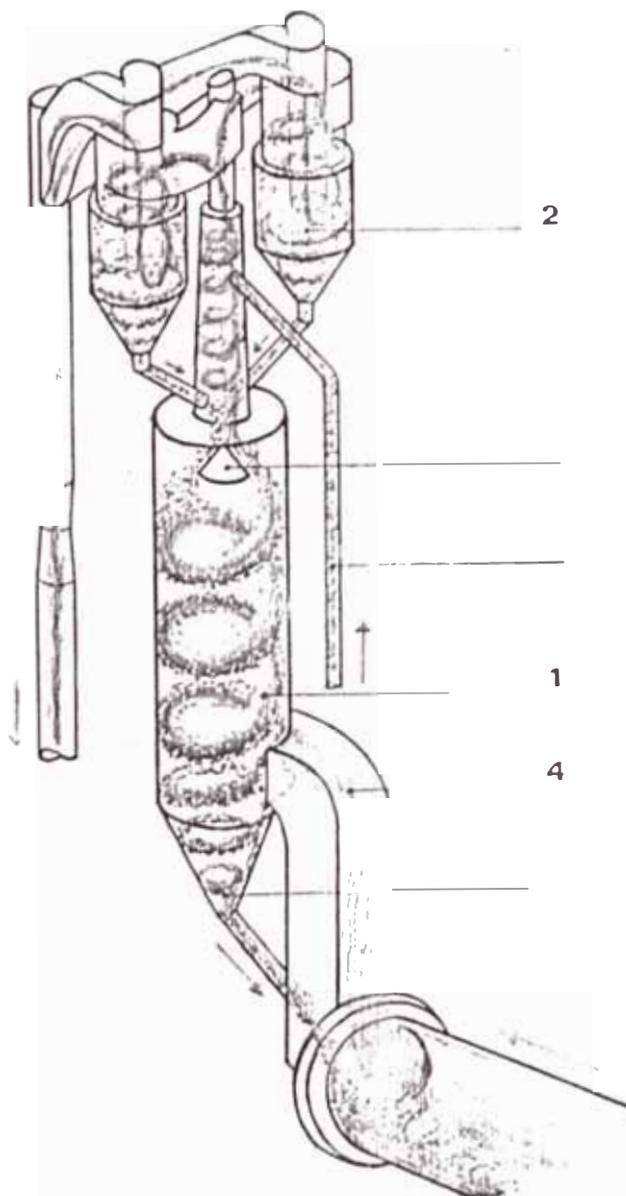


Fig. 4.16
Partes de un Intercambiador de Calor

de calor. La materia prima se hace llevar, lo más frecuente, por el elevador neumático 5 a la tubería, ante el sistema de espesamiento; la parte prolongada de la tubería ejerce la función de la chimenea de encendido y, a la operación normal está cerrada mediante el cierre.

La materia prima entra a la corriente de gases que la arrastran, desecan y calientan a la temperatura aprox. de 350°C , de modo que adquiere la aptitud formar una nube de partículas. La nube de partículas de la materia prima separado del medio portante en los ciclones de espesamiento se dispersa uniformemente por la caída al cono reventador 6 y desciende a lo largo de las paredes del pozo, contra la corriente de los gases siempre más calientes. Al pasar por pozo, la materia prima se calienta a los $780-810^{\circ}\text{C}$, calcinándose por parte y, por fin se acumula en la tolva de descarga, de donde se introduce al horno rotatorio.

Transferencia de Calor en el Pozo del

Intercambiador

Por la influencia del reventón en el cono y, consecuencia de la rotación de gases, la parte preponderante de materia prima desciende en forma espiral, en las cercanías de las paredes del pozo. Aquí se calienta por el contacto directo con la parte de gases, al mismo tiempo que el calor contenido en la parte restante de gases pasa, por influencia de la gran turbulencia, igualmente en dirección a la circunferencia del pozo. En la Fig. 4.17 está dibujado el curso de temperaturas en los cortes característicos del pozo. Desde la c_1 a de temperatura, entre los lugares más cercanos y más lejanos de la pared del pozo se puede estimar la intensidad de recambio del calor: cuanto más pequeña es la caída de temperatura, tanto más intensivo es el recambio de calor. La intensidad mayor de calor está en la parte inferior del pozo. En dirección hacia arriba se reduce de tal medida como decrece la intensidad de rotación de los gases.

El recambio de calor de contracorriente, lo caracteriza la disminución continua de calor por la altura del pozo (Fig. 4.17-2)

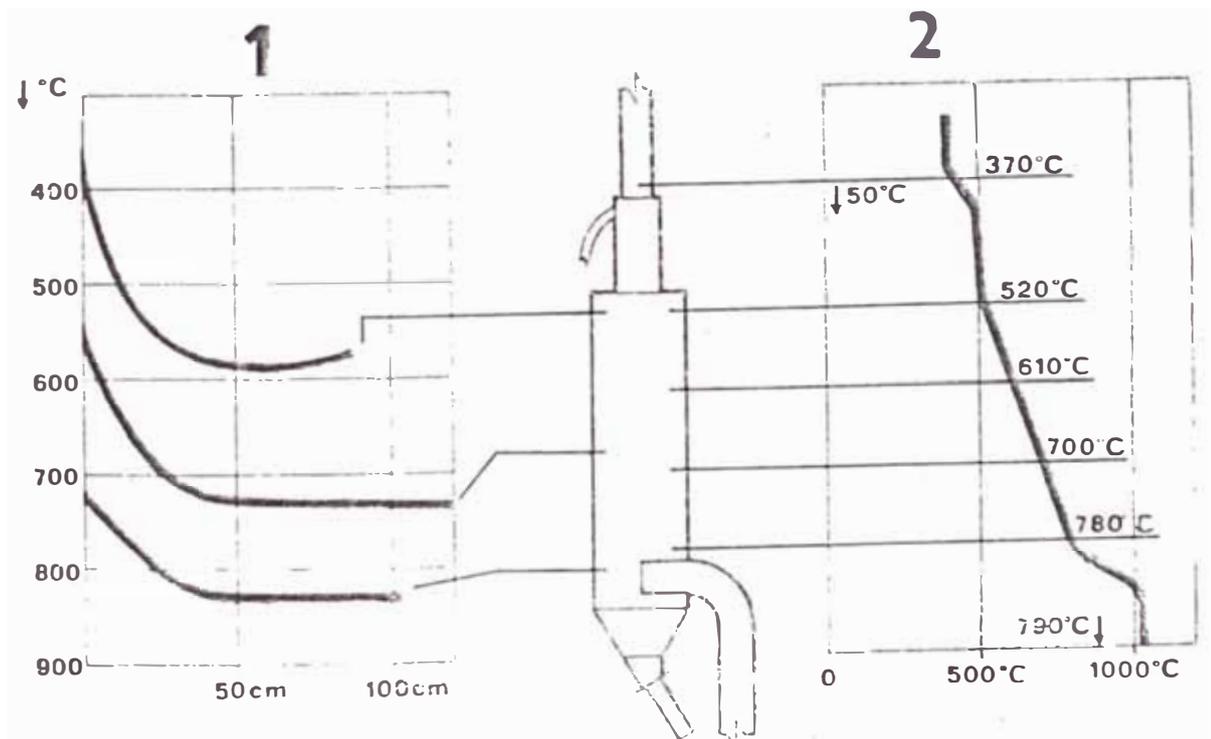


Fig. 4.17

Transferencia de Calor en el Intercambiador de Calor

Hornos Rotatorios

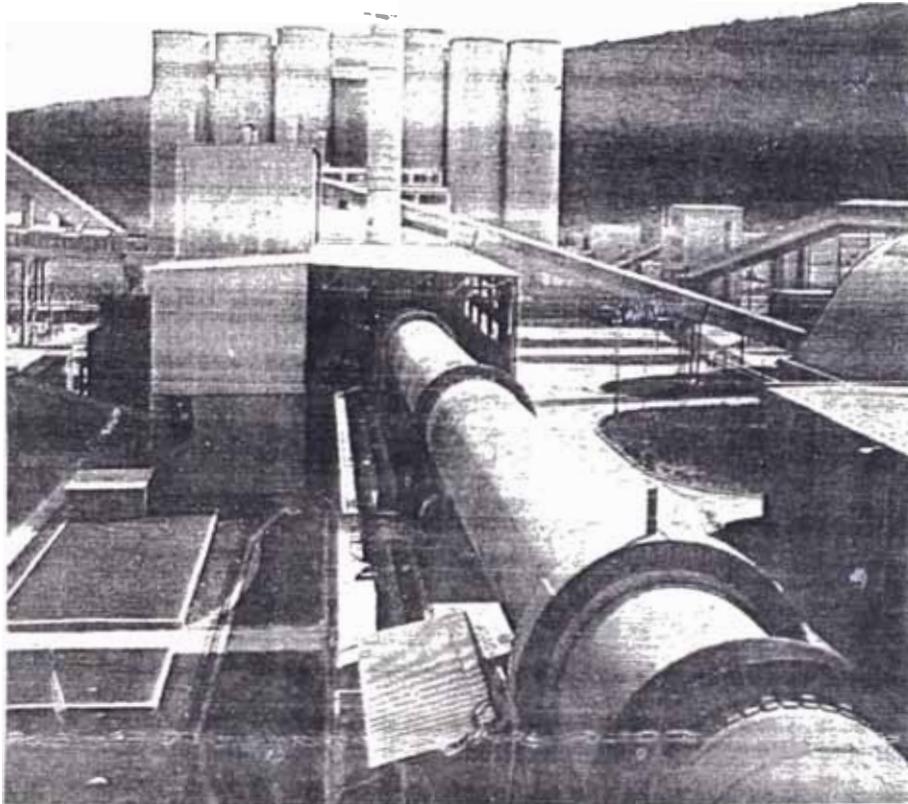


Fig. 4.18
Horno Rotatorio 5 x 20 m, del Rendimiento 2000-2400
Toneladas de Clinker por día

En el horno rotatorio culmina el proceso térmicamente tecnológico de producción del clinker. Después de la entrada al horno, en primer término finaliza la calcinación de la materia prima precalentada, la cual luego entra a la zona de sinterización del horno. El clinker calcinado pasa por la zona de enfriamiento del horno, de donde se lleva al

siguiente enfriamiento, al refrigerador.

Los hornos rotatorios combinados con intercambiadores de dispersión son relativamente cortos; la relación óptima de la largura al diámetro interior del horno está dado por la relación 16:1. Sin embargo, el rendimiento de los mismos resulta casi cuadruplo, en comparación con los hornos largos para el proceso de producción en húmedo. Al rendimiento específico alto de los hornos responden sus velocidades expresados por la velocidad periferica aproximada de unos 0.5 m. por segundo.

La envoltura del horno queda confeccionada de chapas de caldera de alta calidad. Las soldaduras se controlan por aparatos de radiografía o bien radioisótopos, al llevarse a cabo la producción en la fábrica y tambien el montaje en el lugar de obra. La construcción y la ejecución sencilla de la envoltura garantizan la estabilidad incluso en

condiciones desfavorables. La mampostería protege la envoltura del horno ante las deformaciones, por la influencia de altas temperaturas y reduce las pérdidas térmicas por la radiación. Una atención particular, la dedican los especialistas a la aplicación de los métodos de revestimiento progresivos de los hornos modernos de diámetros grandes.

El proceso de producción garantiza la perfecta forma circular de la envoltura y por ello también la durabilidad de la mampostería.

- Colocación del horno.- La envoltura del horno está colocada en inclinación de 3.5%. Los aros portantes de la envoltura descansan sobre varios pares de roldanas radiales dimensionadas para la carga hasta 10.8 Mn de un apoyo. Los casquillos de cojinetes quedan alojados en superficies esféricas y permiten leves oscilaciones de las roldanas en todas direcciones. La fuerza axial del

peso de la envoltura se recoge por la alineación de ejes de las roldanas radiales.

La larga vida útil de los aros portantes y roldanas de los hornos de grandes capacidades, la garantiza la unidad hidráulica para el avance axial dirigido.

El mando del horno rotatorio consiste en las unidades principal y auxiliar. El mando principal está dotado de motores eléctricos con regulación por tiristor, la cual permite el cambio continuo de revoluciones del horno dentro de los límites tecnológicos requeridos. El rendimiento del mando principal incluso con los hornos mayores está suficientemente dimensionado para los casos de la sobrecarga por un lapso de tiempo corto.

El mando auxiliar se aplica para reducir la velocidad a la puesta en marcha y a la fuera de funcionamiento del horno. El mismo queda conec-

tado a la fuente de emergencia de energía formado sea el circuito eléctrico independiente o bien el grupo motor diesel o bien el motor de combustión interna.

- Refrigeradores.- Las líneas de horno están equipados con refrigeradores de parrillas o bien planetarios, cumpliendo en alta medida las exigencias a la seguridad de operación, balance equilibrado del aire refrigerante y para la combustión y, bajos componentes de las exhalaciones polvorientes.

Los refrigeradores planetarios, los caracterizan los bajos costos de inversión, muy pequeño consumo de energía eléctrica y operación sin aire de descarga y, desde luego, sin emisiones. Los refrigeradores planetarios consisten en planetas (tambores) ubicados longitudinalmente al extremo del horno a donde cae el clinker. El clinker se hace subir, con ayuda de paletas y cadenas de

suspensión transmitiendo el calor al aire pasante que también aquí se introduce al horno. Por medio de incorporaciones de paletas y cadenas, la temperatura se traslada en el aire refrigerante y con él pasa al horno (Fig. 4.19).

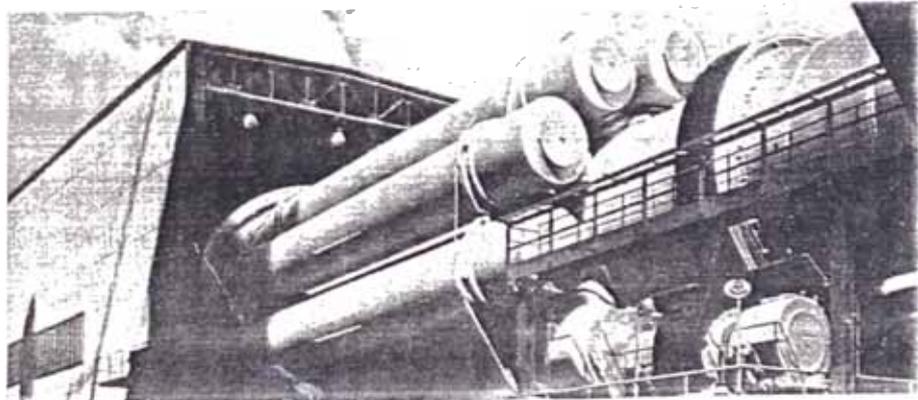


Fig. 4.19
Parte del Horno Rotatorio con Refrigerador Planetario

- Calefacción.- Las líneas de horno en la mayoría decisiva de los casos se calefaccionan mediante gas combustible líquido con carbón en pol-

vo. Los sistemas calefactores combinados, los entregamos cuando ambos tipos de combustibles cambien menudo o bien se combustionan simultáneamente.

El sistema de calefacción con gas consiste en el quemador completo, armadura de gas de entrada y tubería dentro de la unidad operativa. El quemador queda incorporado a la cadena de seguridad del horno.

El sistema de calefacción mediante combustibles líquidos generalmente consiste en:

- . Equipo para el trasiego desde las cisternas de camiones o bien ferrocarriles, depósito, trasiego y calentamiento, distribuciones, tuberías de vapor, de distribución y acompañadoras.
- . Salas de caldera tecnológicas completas
- . Quemadores de la más moderna cons-

trucción para la pulverización a presión, con encendido gas-electrico o bien electrico automático.

- . Armaduras de entrada de aceite con elementos de cierre, de regulación, de seguridad y de medición, incluso el pupitre de maniobra.

El sistema de calefacción con carbón consiste en:

- . Depósito de carbón
- . Transporte tecnológico
- . Equipo tecnológico completo para la molturación y secado del carbón
- . Quemador para combustionar carbón.

- Dirección Automática de la Calcina-
ción del Clinker.- Los sistemas automatizados de la dirección sirven, en primer termino, a la estabilización del rendimiento de las líneas de horno al nivel deseado. Además de ello atribuyen al aumento de la calidad del clinker y, a la reducción del consumo de calor. Se han desarrollado sistemas para la dirección automática de las líneas

de horno con el intercambiador de pozo, con ayuda de la computadora, la cual regula el proceso termico. (Fig. 4.20)

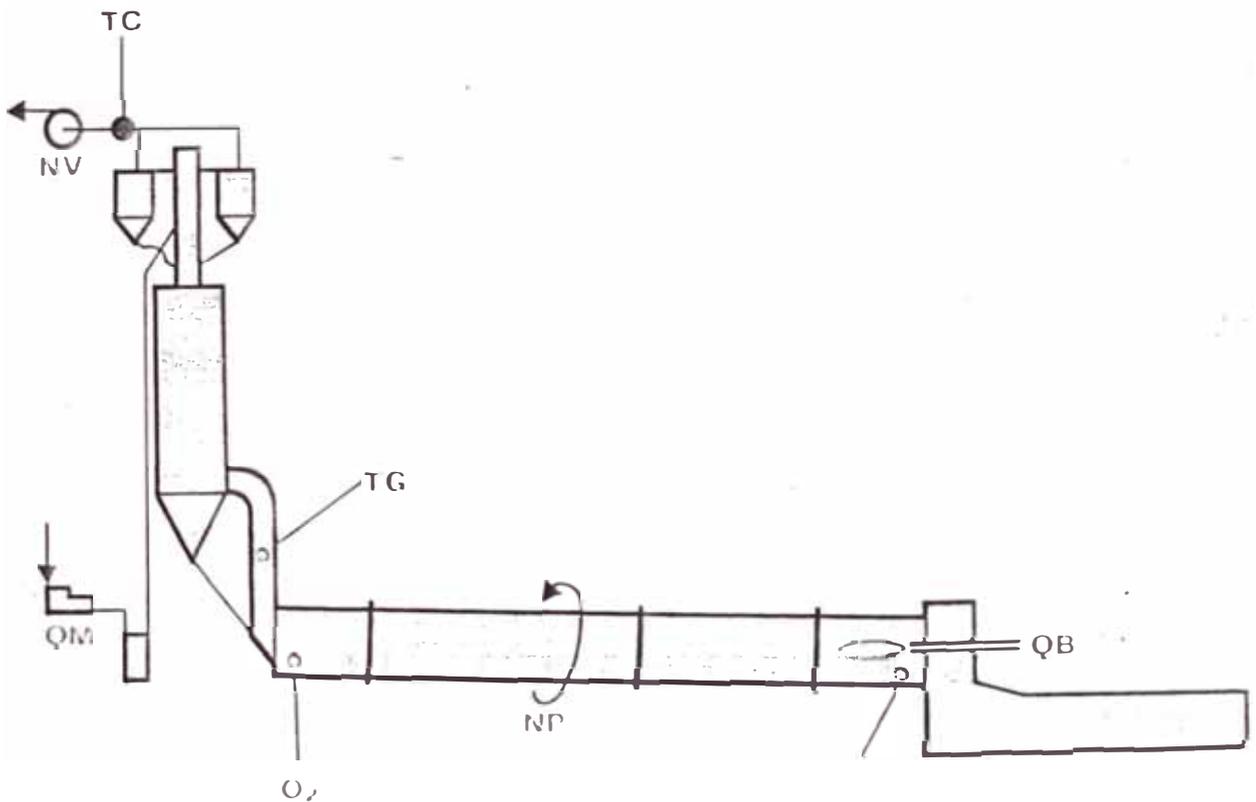


Fig. 4.20

Las magnitudes principales de salida y de entrada del sistema automatizado de dirección de la línea de horno son las siguientes:

- TS Temperatura del material en la zona de sinterización
- TG Temperatura de gases detrás del horno
- O₂ Contenido de oxígeno en los gases detrás del horno
- TS Temperatura de gases detrás de los ciclones de espesamiento
- QB Flujo del combustible
- NV Velocidad del ventilador de tiro inducido
- QM Flujo de la materia prima suministrada al intercambiador
- NP Velocidad del horno

- Molturación del Clinker.- El clinker se muele con la adición de la caliza o bien otro regulador, en los molinos tubulares con circuito abierto o bien cerrado. En el primer caso se trata de la molturación de paso, en el segundo caso de la molturación en la instalación de molienda de circulación. La molturación del clinker constituye la más importante operación final, con la cual se alcanzará las características físico-mecánicas requeridas del cemento. La molturación del clinker pertenece, al mismo tiempo, a las operaciones energéticamente las más pretenciosas, a la producción del cemento.

La calidad del cemento y la economía de la molturación figuran, por lo tanto, en primer lugar en las estimaciones de los trabajadores de investigación y desarrollo. Sus soluciones de las unidades de molienda para las líneas de producción de cemento de altas capacidades se basan en los principios siguientes:

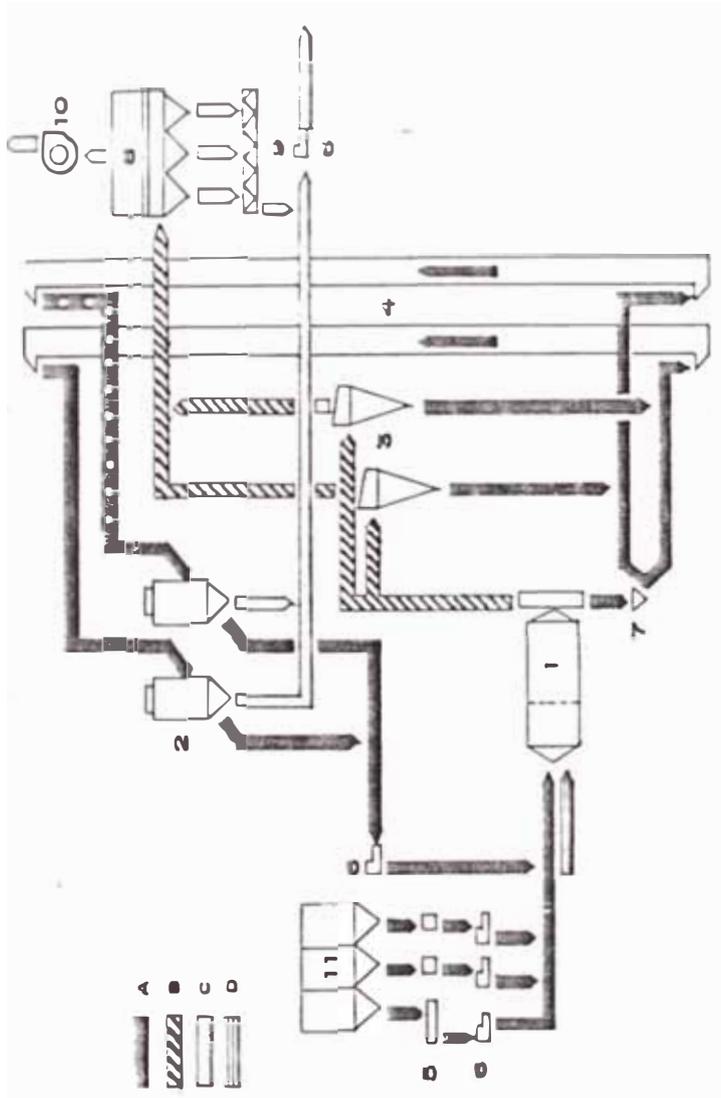
- . Bajo consumo de energía eléctrica por tonelada del cemento producido
- . Alto rendimiento específico calculado por tonelada del equipo instalado
- . Realización económica de los parámetros cualitativos y de rendimiento a la molienda de cementos de mejores marcas de calidad
- . Alto grado de automatización, manejo sencillo en el ambiente de trabajo higiénico

Como ejemplo de la posible solución traemos la instalación de molienda de cemento con la circulación mecánica del producto de molienda.

- Instalación de Molienda de Cemento.-
Con circulación mecánica del producto de molienda, del rendimiento 100 toneladas por hora con los cernidores de aire de regulación mencionamos dicha instalación de molienda como equipo de referencia, la misma

trabaja la mezcla del clinker, de la escoria y yeso, del tamaño de grano de entrada 2-30 mm (con alguna presencia de granos hasta 45 mm) y, la instalación de molienda está solucionada como de una sola etapa, con molino tubular de dos cámaras, 4.2 x 13 m y dos cernidores de aire - de regulación. El equipo fundamental referido está completado por una serie de grupos adicionantes, como son : sistema de desempolvadura, camiones tecnológicos de transporte, sistemas de alimentación y de pesar. Con objeto que la instalación de molienda trabaje lo más económicamente posible se equipa con el sistema muy eficaz para la regulación automática para cargar el molino (Fig. 4.21)

Los individuales componentes del producto de molienda, es decir, clinker, escoria y yeso se toman desde el depósito 11 mediante los alimentadores conduciéndose a través de los dosificadores de pesar



A.- PRODUCTO DE MOLIENDA. B.- AIRE ASIFRADO.
C.- CEMENTO. D.- AGUA

- 1.- Molino.
- 2.- Cornidores de aire.
- 3.- Separadores (seleones).
- 4.- Elevadores de angiliones.
- 5.- Alimentadores.
- 6.- Dosificadores de pesar.
- 7.- Distribuidor.
- 8.- Filtro electrico.
- 9.- Transportador de tornillo sin fin.
- 10.- Ventilador.
- 11.- Depositos de materias primas.

ESQUEMA TECNOLÓGICO DE LA INSTALACION DE MOLIENDA DE CIRCULACION DE CEMENTO

FIG. 4.21

6 al molino de la tabla tubular de dos cámaras 1, donde se muelen. El producto de molienda molido pasa a través del sistema de distribuidor 7 y llega a los elevadores de cangilones 4. En los cernidores de aire 2 se separa el producto acabado de la finura requerida de las fracciones sobre malla (granitos). Los granitos retornan otra vez al molino, con lo cual, el circuito de molienda esta cerrado.

Para la función de la instalación de molienda es indispensable aspirar aire a través del molino. La cantidad de aire se puede cambiar según el régimen por medio de la regulación de eje del ventilador 10. El aire evacuado acelera el proceso de paso del producto de molienda por el molino, al mismo tiempo que disipa una parte del calor generado por el trabajo de molienda y lleva afuera las fracciones finas del polvo. La desempolvadura transcurre en dos etapas. El aire cribado se conduce a través de dos separadores mecánicos

(ciclones)3, de las cuales las fracciones separadas se hacen llevar a los elevadores cangilones. Como segunda etapa queda instalado el filtro eléctrico 8. Su eficacia máxima está acondicionada por cierta cantidad de agua evaporada en el aire evacuado. El agua necesaria se inyecta al molino, al mismo tiempo que reduce muy eficazmente su temperatura interior.

- Empaque y Despacho.- El despacho rápido, continuo y limpio representa la tarjeta de visita de cada fábrica de cemento.

Los depósitos de cemento, en la mayoría de los casos, están ejecutados como silos de hormigón o bien de chapa dotados de los sistemas neumáticos para agitar y evacuar el material.

Desde los depósitos, el cemento se toma en la sala de empaque donde lo llenan las máquinas empacadoras en sacos de papel de cierre automático.

El cemento cargado a granel se transporta por medio de vehículos ferroviarios o bien de carreteras especiales. (Fig. 4.22)

En las fábricas de cemento con la línea de horno del rendimiento diario 3000 toneladas, es necesario ensacar 1000 hasta 1500 toneladas de cemento que representan 20 hasta 30 mil sacos de 50 kgs cada uno. Las salas de empaque de las fábricas de cemento de grandes capacidades, se equipan por lo tanto, con máquinas empacadoras de alto rendimiento, de nuestra producción. Las máquinas empacadoras rotatorias de catorce boquillas, del rendimiento hasta 2400 sacos por hora funcionan con seguridad, con la exactitud de peso de 2%. El manejo de las mismas ha simplificado desmedidamente la maniobra neumática de los cabezales. (Fig. 4.23)

La máquina empacadora de catorce boquillas consiste en el depósito girable provisto del sistema de agitación que mantiene al cemento en estado

**SALA
DE EMPAQUE
DE CEMENTO**

- 1 Elevador de cangilones
- 2 Criba de control
- 3 Depósito del material
- 4 Artesa de agitación
- 5 Máquina empacadora rotatoria
- 6 Transportador para la toma de sacos
- 7 Receptáculo colector
- 8 Tornillo sin fin de escape
- 9 Transportador de banda de sacos al vehículo

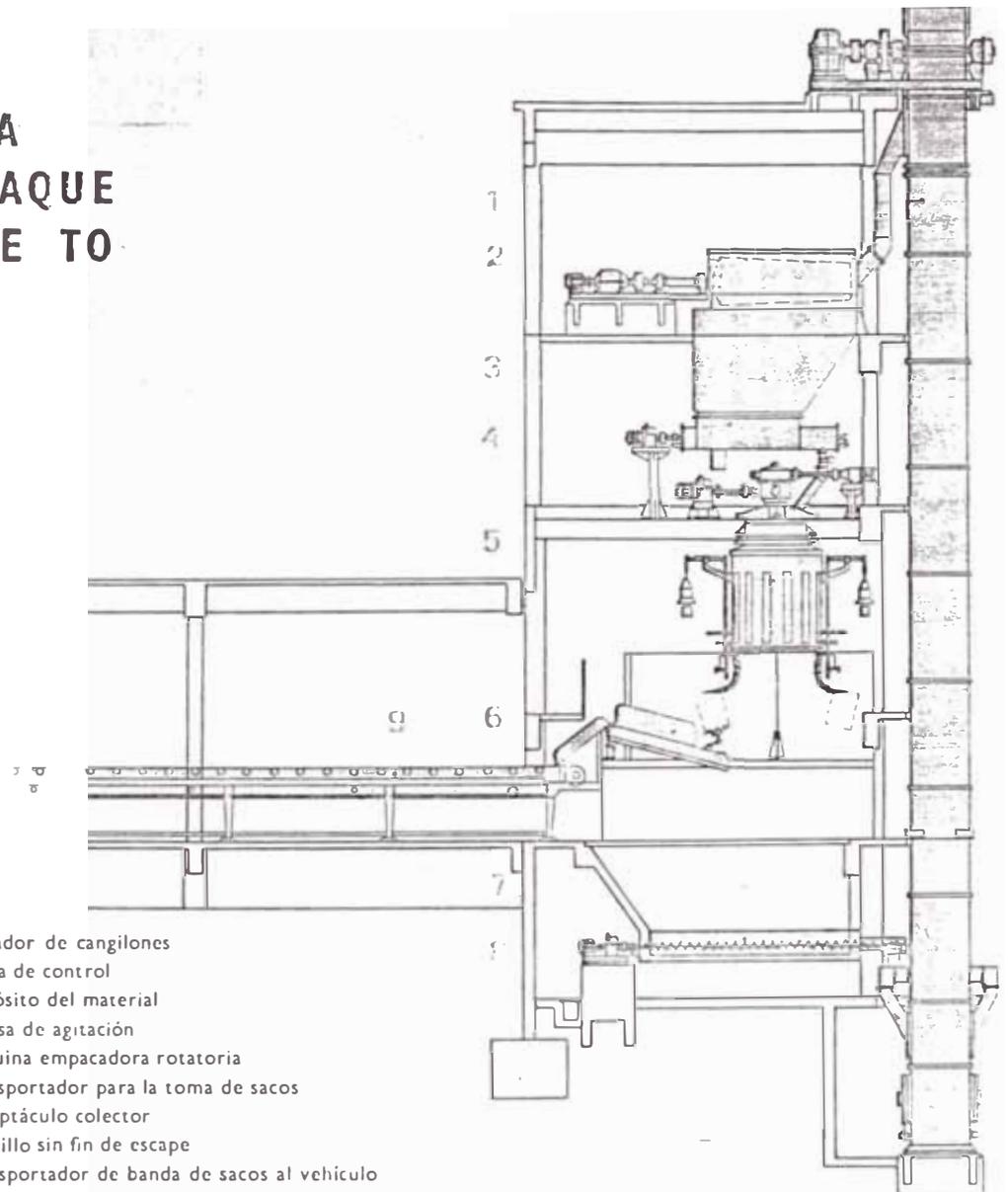


FIG. 4.22

aireado "líquido" constante. A la periferia del depósito están colocados los mecanismos de pesar con boquillas.

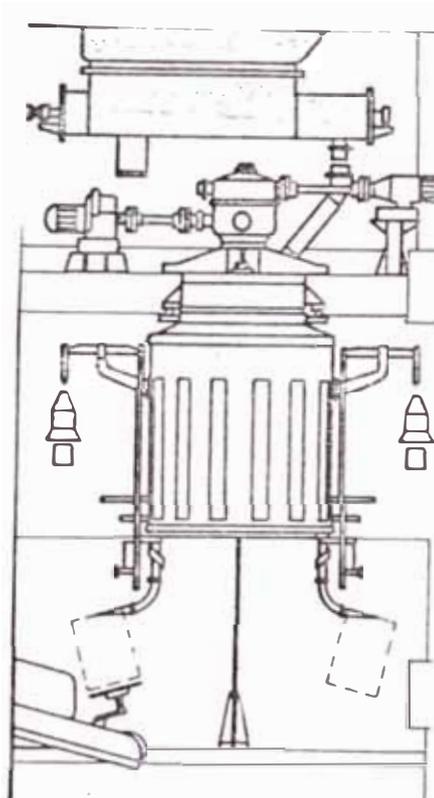
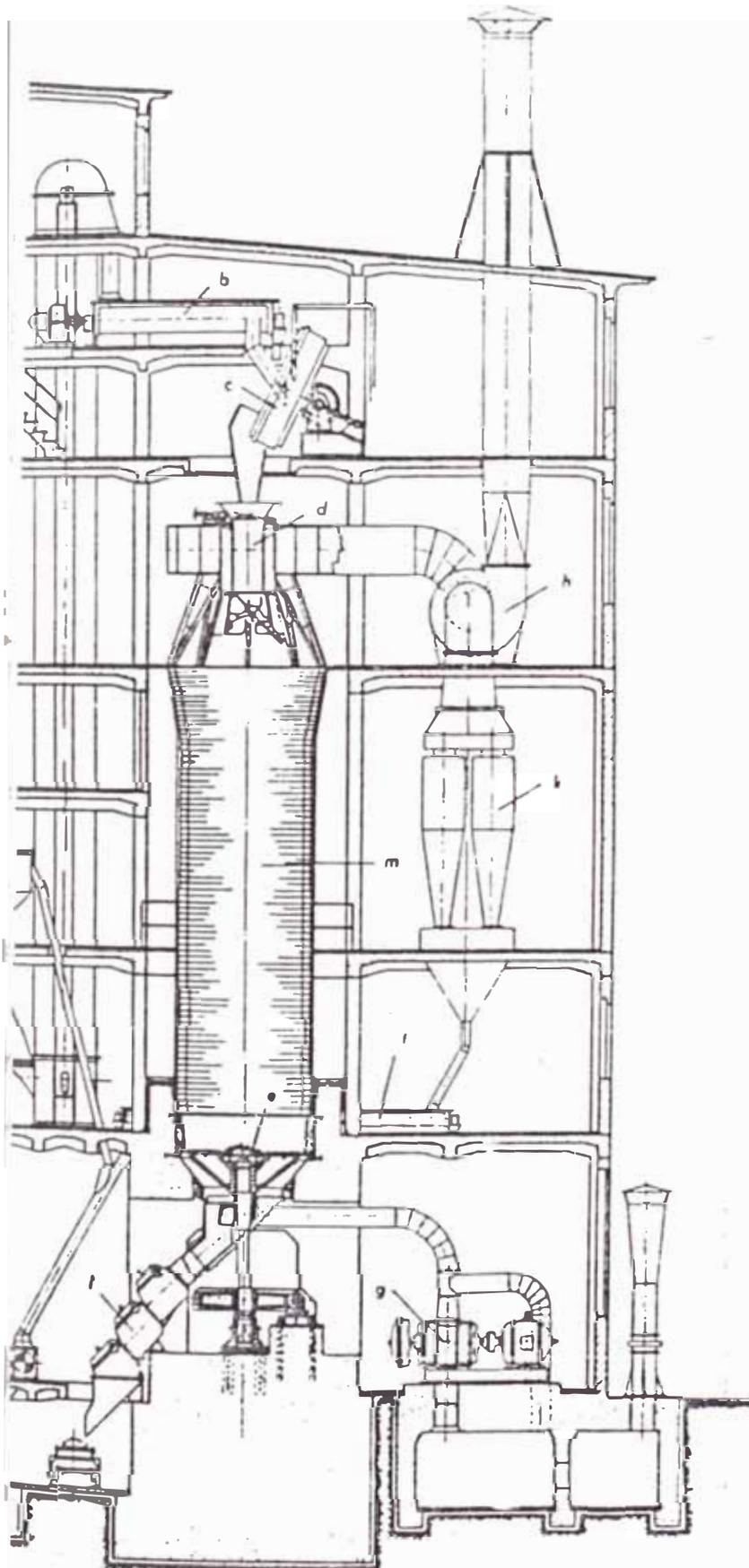


Fig. 4.23
Máquina Empacadora de Catorce Boquillas



- alimentadores pa
 harina de crudo y
 combustible
 b tornillo mezclado
 humectador
 c plato granulador
 d sombrero del horri
 con dispositivo
 alimentador
 e emparrillado re
 f esclusa de descá
 a alta presión
 g máquina soplante
 para el aire neces
 de combustion
 h máquina soplante
 para la expulsión
 los gases del trag
 k separacion del p
 sistema ciclon
 retorno del polvo
 recuperado
 m cuba del horno

22-28-71

FIG · 4.24

Dibujo esquemático d
 instalación de un hor
 vertical de gran
 producción para ceme

4.3 Descripción de la Tecnología de los Hornos Verticales

4.3.1 Características Particulares de los Hornos Verticales

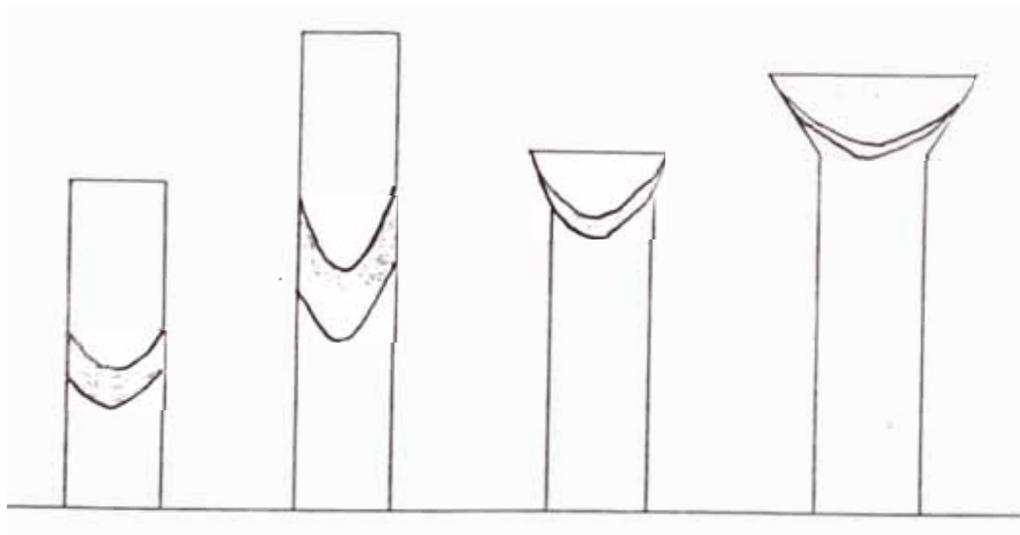
Hace unos 30 años los hornos verticales normales tenían una producción máxima de 80-100 toneladas por día. Luego el desarrollo logrado ha impuesto hornos verticales de gran capacidad, con producciones que pasan las 200 toneladas por día. El consumo de calor mínimo llegó a ser 3768 KJ por Kg de clinker para las calidades óptimas de clinker.

En relación a la reforma de hornos antiguos o construcción de nuevas instalaciones hay que tener presente que diversos factores han variado considerablemente; la figura 4.24 muestra un horno vertical moderno de gran producción que presenta la zona superior ensanchada (zona de sinterización). Tiene una parrilla reforzada, un cierre hermético de esclusas y un soplador Roots.

Este ensanchamiento o bien el estrangulamiento está condicionado a causa de que el material se contrae considerablemente, y según se ha comprobado esta contracción llega a ser de 30.5 por ciento del volumen primitivo (esta contracción también determina que disminuyan considerablemente los huecos entre los pelets o granulos con los que se

alimenta el horno). Mediante este estrangulamiento impedimos que se formen vacíos en el material y que la masa sea uniforme.

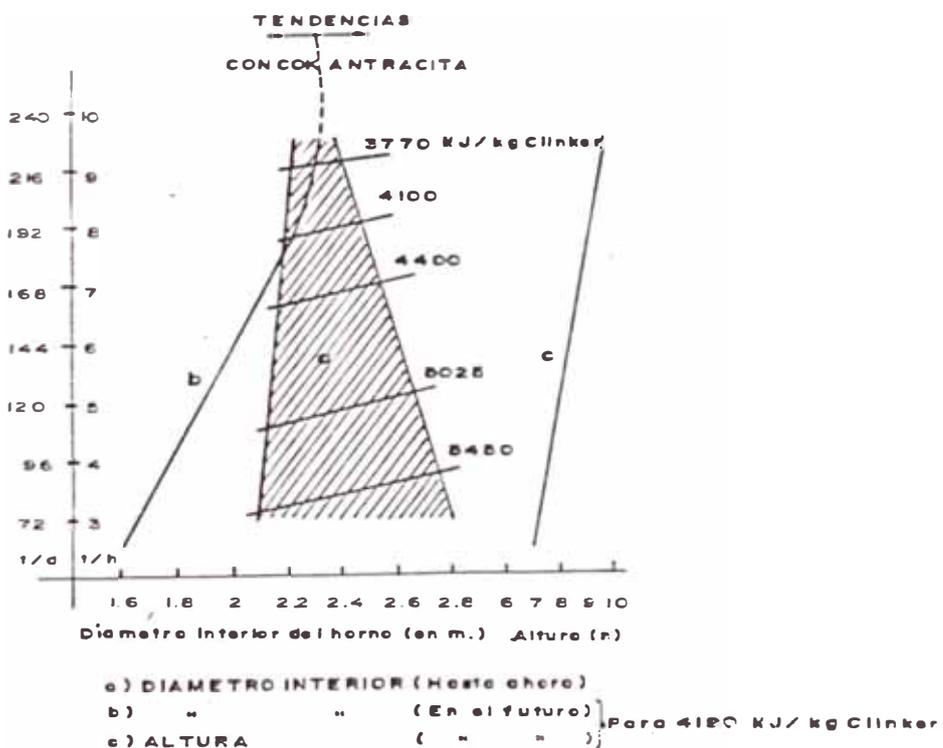
La figura 4.25 muestra la evaluación que se ha dado en los hornos verticales, indicándose ante todo, la posición de la zona de sinterización. Se ve como ésta estaba situada antes muy baja y como ahora se ha reducido y está casi junto a la boca del horno, con lo que se consigue una combustión rápida.



EVOLUCION DE HORNOS VERTICALES

FIG. 4.25

Si no se disminuye el diámetro no se podría pasar de una determinada velocidad dentro del horno que, aún para rendimientos elevados sería reducido. La figura 4.26 muestra este desarrollo en función de la producción y del consumo de calor. Como se deduce por la inclinación de las curvas, al aumentar la luz interior se altera el consumo de calor, a producción constante. La causa de esto era que el aire no llegaba al centro del horno, produciéndose así una combustión incompleta.

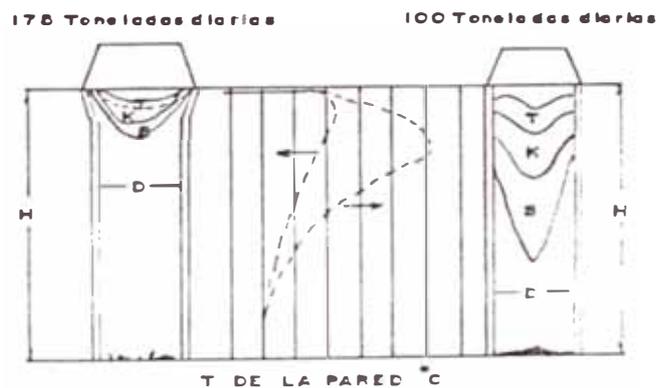


**PRODUCCION Y CONSUMO DE CALOR EN FUNCION AL
DIAMETRO INTERIOR**

FIG. 4.26

De esta manera se logra un rendimiento específico por metro cúbico de volúmen interior del horno hasta cinco toneladas por día.

La figura 4.27 muestra las temperaturas de la cubierta envolvente de un horno antiguo y uno moderno. Las mediciones indicaron una pérdida por radiación sorprendentemente pequeña la cual ha llegado a ser la quinta parte que antes.



- T • ZONA DE SECADO
- K • ZONA DE CALCINACION
- S • ZONA DE SINTERIZACION

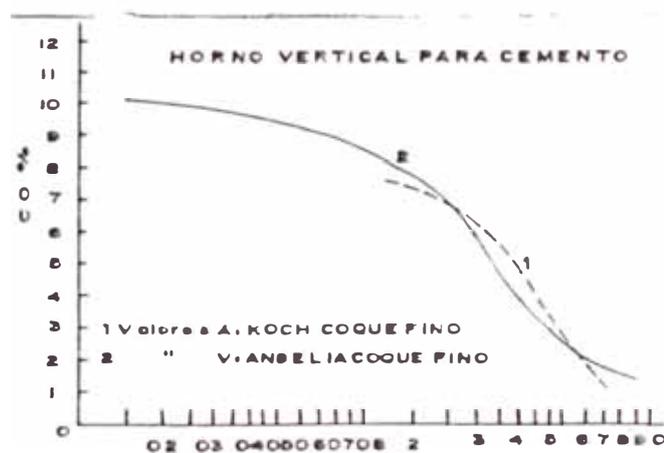
TEMPERATURAS DE LA ENVOLVENTE DE CHAPA EN EL HORNO
VERTICAL

FIG. 4.27

Uno de los puntos más importantes en estas mejoras consiste en el método adoptado para la elaboración del gránulo o pelet (crudo más carbón pulverizado). Antes se trabajaba con briquetas prensadas y

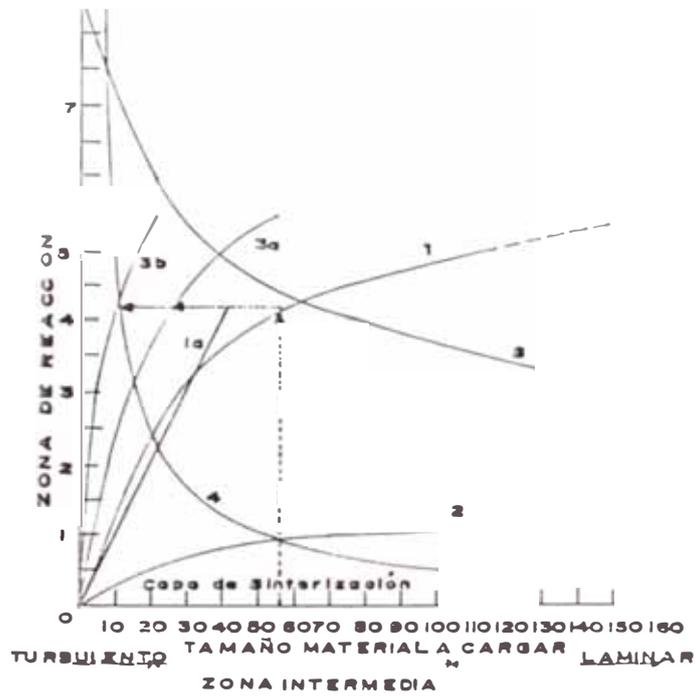
posteriormente con barras cilíndricas moldeadas de 60 mm. Ahora el material se granula en tambores y bastidores inclinados con tamaños comprendidos entre 5 y 25 mm. Sólo mediante un estudio concienzudo del crudo puede tomar una determinación que permita decidir que método de granulación es el que se va a adoptar.

Pero en ningún caso ha sido favorable un tamaño de los granulos de combustible muy pequeño, ya que éstas se convierten en CO desde la zona de sinterización. La figura 4.28 presenta los resultados de minuciosos ensayos que demuestran que, al disminuir el tamaño, aumentan las pérdidas de CO en el horno vertical de cemento. Con ello disminuye el rendimiento y crece el consumo de calor, lo



CONTENIDO DE CO EN LOS GASES DE ESCAPE EN FUNCION DE LA GRANULACION DEL COQUE

Fig. 4.28



- A - ALTURA DE LA ZONA DE REACCION, BOCA HASTA LA ZONA DE INTERERIZACION - ALTURA DEL ENSANCHE.
- 1a - ALTURA DE LA ZONA DE REACCION EN PORPORCION AL TAMAÑO DEL MATERIAL A CARGAR.
- 2 - ALTURA DE LA ZONA DE SINTERIZACION EN METROS.
- 3a - TAMAÑO DEL COMBUSTIBLE (MAX.).
- 3b - " " (MIN.).
- 4 - ALTURA RELATIVA DE LA CAPA " TAMAÑO MEDIO DEL MATERIAL A CARGAR 100
- ALTURA DE LA ZONA DE REFRIGERACION EN METROS.

ALTURA DE LA ZONA DE REACCION Y TAMAÑO DEL COMBUSTIBLE EN RELACION CON EL TAMAÑO DEL MATERIAL A CARGAR EN EL HORNO VERTICAL PARA CEMENTO

FIG. 4.29

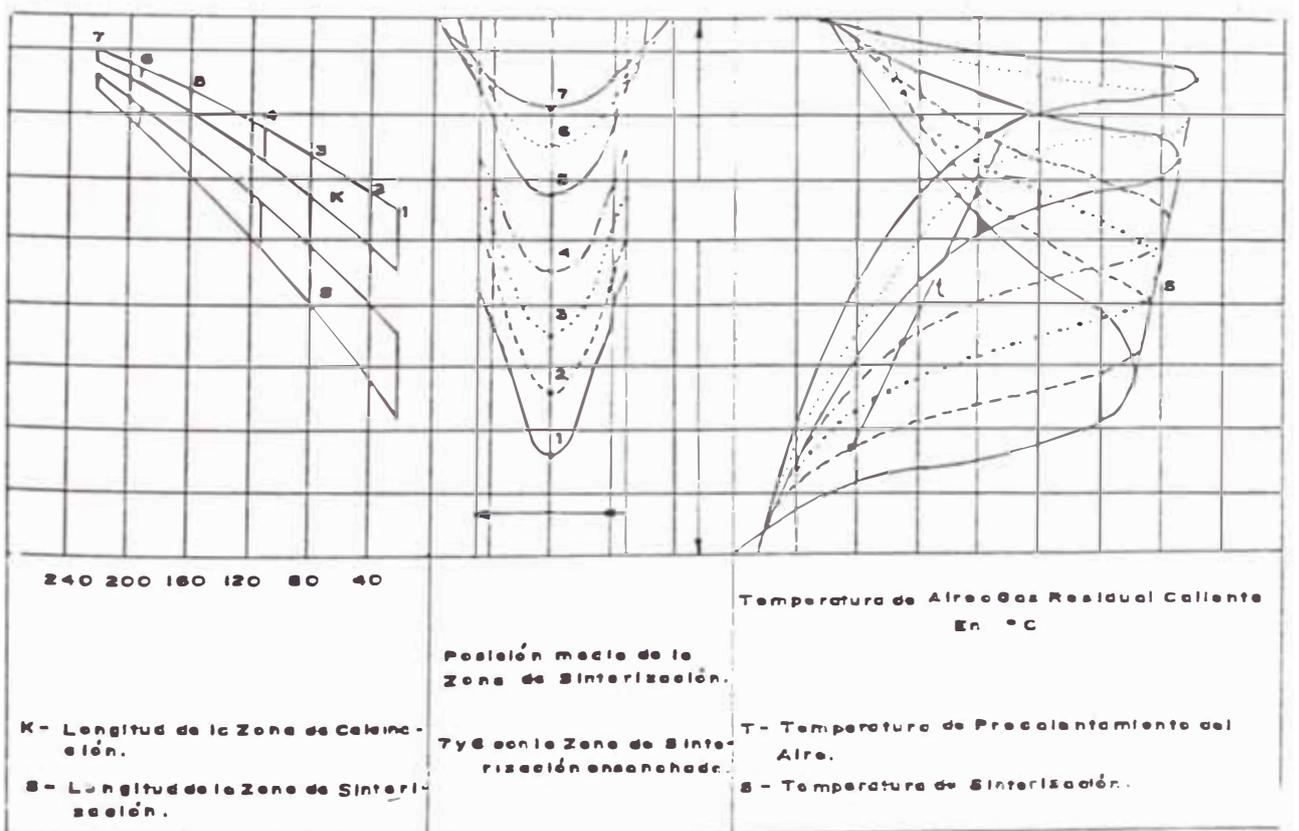
cual se ha comprobado también en otras industrias análogas.

Naturalmente, que existe una relación entre el tamaño del combustible y el del crudo, y se ha visto que el tamaño máximo de los granos de combustible debe determinarse experimentalmente estando limitado el tamaño mínimo por las pérdidas crecientes de CO, como se puede deducir de la figura 4.29.

Esta figura hace también ostensible, en la curva 1, como la zona de reacción, o sea la comprendida entre la boca y la zona de sinterización, decrece en forma muy acusada con el tamaño de los gránulos de crudo. Antes cuando se trabajaba con cilindros de 100 mm. la zona de reacción tenía 5 m. de altura. Hoy con el empleo de pelets de 10 mm, estamos en el metro y aún por debajo. Al final de la curva se ve la posición de la cinta de sinterización, que con gránulos de 1.5 - 2 mm., tiene una zona de reacción de 200 mm. únicamente. El desarrollo que se ha seguido puede verse en la figura. Sin embargo, por diversas razones, se adoptará un tamaño límite de pelets (5 a 12 mm.) ya que de no ser así aparecen más condiciones eventuales de inestabilidad en la capa de pelets que no favorecen una buena transmisión de calor.

Esta gran capacidad de reacción física se consiguió en su mayor parte, primero, por la reducción de los gránulos, y después, por el empleo de los sopladores Roots en sustitución de los turbo-compresores (de los cuales hablaremos más adelante).

En la figura 4.30 se ve la anchura de la zona de sinterización y de la calcinación y la situación media de la zona de sinterización, así como la correspondiente curva de variación de temperatura en la evolución de los hornos verticales.



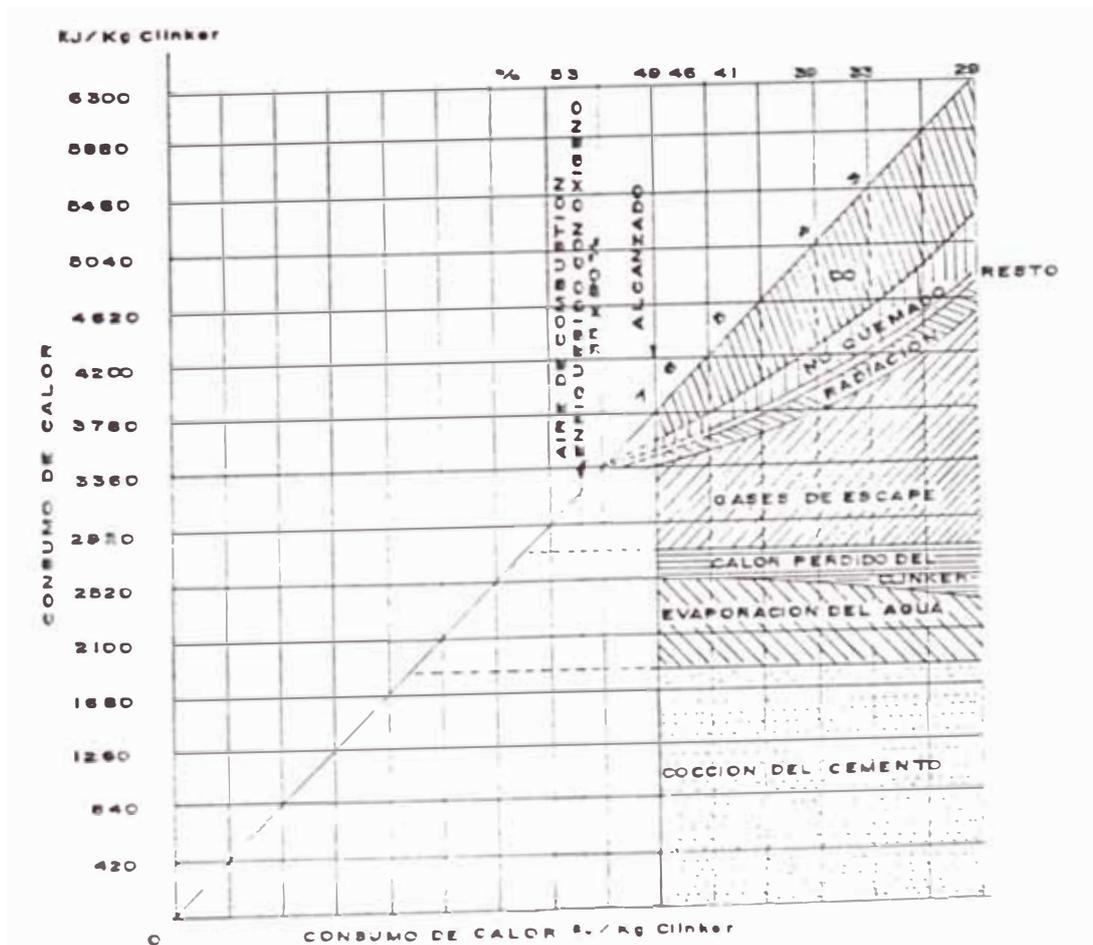
TEMPERATURAS DE AIRE Y GAS, RESPECTIVAMENTE, Y POSICION DE LA ZONAS EN EL HORNO VERTICAL PARA CEMENTO

FIG. 4.30

Debe utilizarse una combustión rápida en lo que el aire de combustión sufre un calentamiento previo.

Por ello, y por la presión que utilizamos se consigue que el carbón se quemara en forma explosiva. La zona de sinterización es muy breve y se obtiene un clinker de alta calidad.

Por último, en la figura 4.31 puede verse el desarrollo que ha seguido el consumo de calor y la distribución de las diferentes pérdidas. En la parte inferior aparece el consumo teórico para la



DESARROLLO EN EL HORNO VERTICAL DE CEMENTO DEL CONSUMO DE CALOR EN KJ/KG DE CLINKER

FIG 4 31

cocción del cemento y después, la parte requerida para la evaporación del agua. Siguen las pérdidas por enfriamiento del clinker y las pérdidas importantes debidas a los gases de escape.

Antes las pérdidas eran enormes a consecuencia de las cantidades insuficientes de aire que impedían la combustión completa del carbón y la formación del CO. Mediante la combustión rápida, éstas dos fuentes de pérdidas se han reducido considerablemente.

Podemos resumir estas y otras características actuales de los hornos que más adelante serán tratadas nuevamente:

- La alimentación es en forma de pelets uniformes
- El proceso es seco
- Es un proceso de sinterización, el sinterizado está limitado sólo a la porción superior del horno.
- La zona cilíndrica actúa como un permutador térmico que recobra el calor sensible del clinker
- Todo el clinker es descargado por una parrilla móvil lenta que asegura el flujo uniforme
- El aire para la combustión es abastecido por un

soplador a través de la parrilla rotatoria

- El crudo está mezclado con combustible pulverizado, lo que hace que el combustible tenga mayor rendimiento
- El clinker es poroso, de calidad uniforme y más fácil de triturar.

4.3.2 Condiciones de Presión en el Horno Vertical de Cemento y la Influencia que Sobre Ellas Ejercen la Forma del Material de Carga, El Soplador y La Altura

Tres factores importantes determinan la capacidad de rendimiento del horno vertical:

- a) Forma del material de carga
- b) Aire de combustión
- c) Medida del horno, sobre todo la altura.

Considerando el tema en forma puramente teórica podemos suponer que el horno vertical es un cilindro que es alimentado con un contenido permeable a través del cual penetra el aire. Para simplificar la cuestión los procesos químicos y térmicos en el horno no serán tomados en cuenta. La penetración de gases o líquidos (fluidos) a través de lechos granulados ha sido examinado por una serie de investigadores y cimentada en leyes matemáticas.

Por ejemplo, la ley de Poiseuille expresa que la cantidad de un líquido dado, con una temperatura determinada en la unidad de tiempo que circula por un capilar es directamente proporcional a la caída de presión y a la cuarta potencia del radio del capilar. En forma de ecuación la ley se expresa como sigue:

$$V_1 = \frac{g}{8\eta} \cdot r^4 \cdot \pi \cdot \frac{P}{L} \quad (1)$$

V = Volúmen que circula por un capilar en la unidad de tiempo

g = Aceleración de la gravedad

η = Viscosidad dinámica

r = Radio del capilar

L = Longitud del capilar

$\frac{\Delta P}{L}$ – Caída de presión

Si dividimos la ecuación (1) por $r \pi$, tendremos la velocidad de tránsito por unidad de superficie capilar y obtenemos la ecuación (2)

$$V_1 = \frac{g}{8\eta} \cdot r^2 \cdot \frac{\Delta P}{L} \quad (2)$$

Si reemplazamos el valor $\frac{g}{8\eta}$ por la constante K tenemos:

$$v_1 = kr^2 \cdot \frac{\Delta P}{L} \quad (3)$$

Si en vez de un capilar aislado tomamos un haz de capilares paralelos, todos de radio r . Con toda la superficie de la sección transversal A , el tránsito por unidad de tiempo sería:

$$v_2 = v_1 A = kr^2 A \cdot \frac{\Delta P}{L} \quad (4)$$

Para un número dado de tales capilares la expresión $kr^2 A$ puede igualarse a una constante y así obtenemos:

$$v_2 = k' \frac{\Delta P}{L} \quad (5)$$

La ecuación (5) es idéntica en su forma a la ley que D'arcy ha establecido experimentalmente, que expresa, que la velocidad de la corriente de un fluido a través de un lecho de arena es directamente proporcional a la cada de presión. Realmente el tránsito en el lecho de pelets no ocurre en forma rectilínea como ocurre en los capilares rectos; por observaciones experimentales se ha comprobado que el ángulo promedio de desviación en un lecho lleno de bolas asciende a 45° y por eso el trayecto efectivo es $\sqrt{2}$ veces más largo que el trayecto aparente. Es así que en la expresión de

la longitud del trayecto, el diámetro de las bolas carece de importancia.

Se deduce entonces que es necesario, conservar el principio del contenido monogranular, pues la resistencia crece no solo con la figura y con ello la superficie del contenido, por lo cual se estrechan los capilares, sino también con la distribución de los pelets para evitar una gran densidad del contenido del horno que opone una resistencia muy grande al aire que es introducido a presión.

Las elevaciones en el rendimiento del horno se deben en gran parte a las mejoras en el mantenimiento de las condiciones requeridas del aire. El estado de funcionamiento del horno así como su contenido determina la altura de la contrapresión; si hay que enviar grandes cantidades de aire por el horno se requiere para ello la correspondiente alta presión. Con los turbo-compresores subsiste desafortunadamente la desventaja que la cantidad de aire transportado con diferente presión es muy variable.

Con los sopladores Roots no hay que temer que eso suceda, la cantidad transportada depende de la contrapresión pero sólo en pequeña medida.

La figura 4.32 muestra en corte la construcción de un soplador Roots; los dos émbolos de trabajo con perfil en ocho rotan con juego pequeño, uno contra otro y contra la armadura; no existe espacio muerto. Los émbolos se fabrican con gran precisión y normalmente son intercambiables, no hay ningún deterioro en el funcionamiento y no necesita engrase.

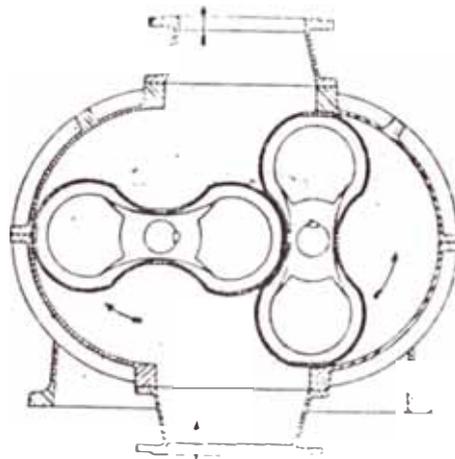


Fig. 4.32
Corte de un Soplador Roots

La activación del aire es de movimiento forzado y su dosificación sólo puede lograrse por la modificación del número de giros o por la descarga del aire excedente. Los sopladores son relativamente insensibles a las oscilaciones de presión. La selección del soplador más apropiado para un de-

terminado horno, se rige por las circunstancias locales, ante todo por la carga de material, las dimensiones del horno y el rendimiento deseado. Los hornos verticales de alto rendimiento de 150 a 160 toneadas diarias de producción, necesitan alrededor de 200 a 230 m³ de aire de combustión por minuto; la resistencia en el horno se sita - según las condiciones de carga- entre 14.7 kPa y 19.6 kPa.

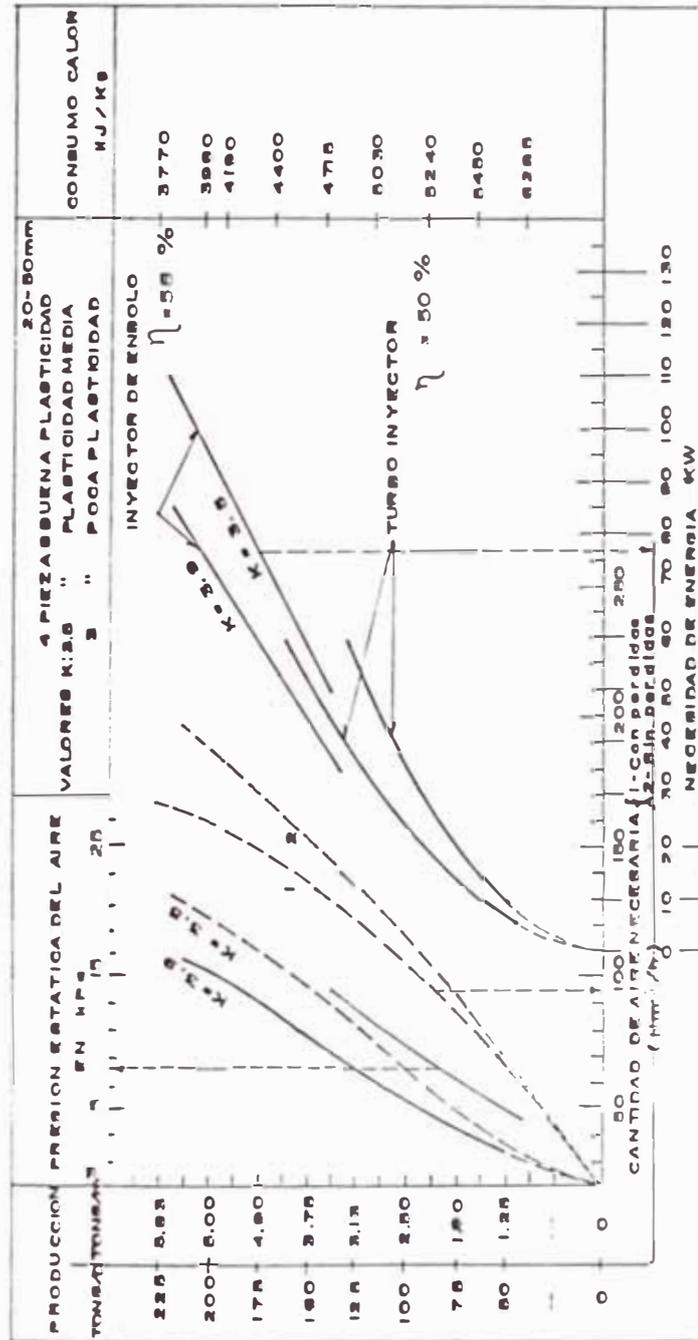
Para una buena operación del horno es oportuno saber siempre que cantidades de aire se necesita y que contrapresiones imperan. La medición de la cantidad de aire se realiza en la mejor forma con el diafragma normalizado de medición, el cual puede aplicarse tanto en la tubería de impulsión, como en la de aspiración.

Por fuerte que sea el soplador escogido, si el horno está excesivamente compactado, no alcanzará a soplar el aire requerido a todas partes en suficiente cantidad, ésta reflexión nos lleva a examinar el requisito de la altura del horno. Un horno bajo opone una resistencia más pequeña al paso del aire que un horno alto, además proporciona un aprovechamiento mucho mejor del calor ya que el clinker del horno bajo abandona el mismo, más

frío que un clinker de un horno alto porque la refrigeración del clinker es esencialmente intensa y actúa mejorando de ese modo la calidad. Se puede suponer que la refrigeración se mejora con la elevación de la altura del horno; pero es lo contrario, en los hornos altos actúa el peso del material desfavorablemente durante el proceso de combustión. El clinker que recién se está formando puede aglutinarse bajo la influencia de la alta presión del material, en consecuencia pierde porosidad y el bloque de clinker resultante se vuelve muy sólido y tiene la tendencia de llevar fuego de la mitad del horno hacia abajo. Puede ocurrir también que por efecto de este bloque el aire produzca canales en el borde del horno y allí se filtre en gran parte inútilmente.

Las características de funcionamiento de un horno vertical se recogen en la figura 4.33 donde se puede ver que cantidad de aire y que cantidad de energía es preciso suministrar al inyector de aire para conseguir un rendimiento y un gasto de calor determinado.

Por ejemplo, para un horno de 200 toneladas diarias de producción y un consumo de calor de 3980 kJ/Kg de clinker, necesitamos $180 \text{ m}^3/\text{min.}$, a una presión de 18 kPa, lo cual exige un consumo de



PRESSION Y CANTIDAD NECESARIA DE AIRE, SIN Y CON PERDIDAS Y POTENCIA NECESARIA PARA UN HORNO VERTICAL DE CEMENTO DE 2.5 x 9.5 m.

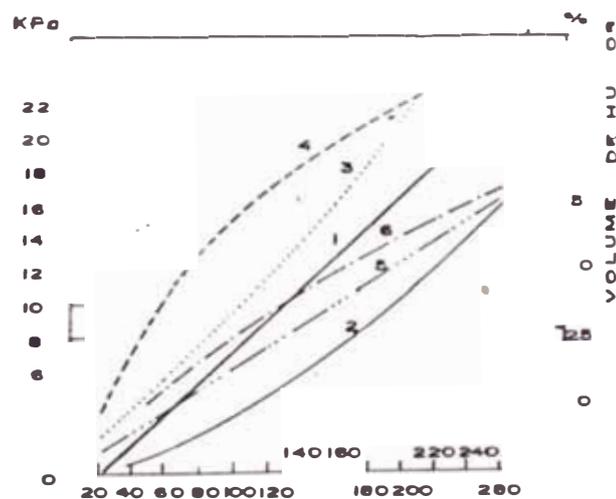
FIG. 4.33

energía de 125 kW.

A continuación se muestran algunas figuras referentes a diversas experiencias realizadas sobre cada de presión y velocidad de gases, que proceden de minuciosos estudios sobre hornos verticales.

En la figura 4.34 se ve que la presión total depende de la producción diaria y que la velocidad de los gases está en relación directa con el volumen de huecos dentro del horno.

Para conseguir estas velocidades en la zona de sinterización por ejemplo 20 m/s., tenemos que quemar una capa de clinker que seguramente debe poseer canales hidráulicos de 1 mm.



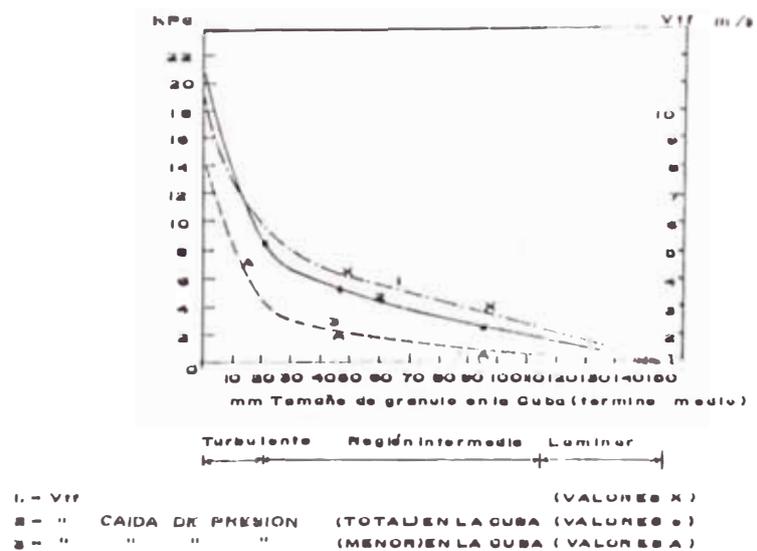
1.- PRESION (total), T/día 2.- PRESION (medio) 3.- T/día y m² 4.- V. L. 5.- V. L. 6.- VOLUMEN DE HUECOS %

CAIDA DE PRESION - RENDIMIENTO ESPECIFICO - VELOCIDAD DEL GAS Y VOLUMEN DE HUECOS EN RELACION A LA PRODUCCION

FIG. 4.34

Los pelets aglomerados en forma de racimos presentan huecos demasiado grandes, por lo que no se alcanza la velocidad requerida.

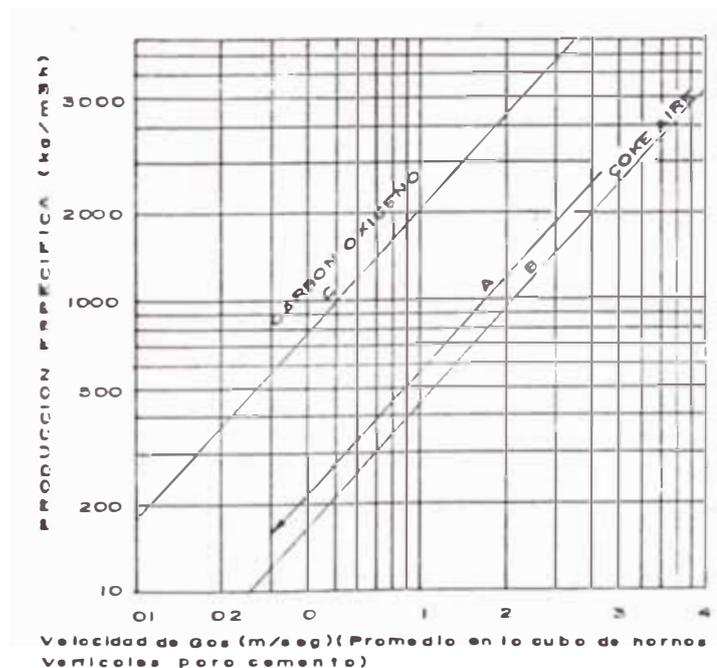
La figura 4.35 muestra una relación entre la presión total y el tamaño medio de los pelets en el horno. Con pelets más pequeños la presión crece, pero teniendo presente todas las variables, se ve que el reducir a la mitad el diámetro de los pelets (de 80 a 40 mm) el aumento de presión es de 1 a 2, mientras que al pasar de 10 a 5 mm., en los pelets sólo se experimenta un aumento de presión de 1 a 1.3. Sino sucediese esto, habríamos llegado hoy día a presiones por encima de 24.5 kPa; sin embargo se comprueba que rara vez se ha pasado de los 16 kPa.



VELOCIDAD DEL AIRE Y GAS, RESPECTIVAMENTE, Y CAIDA DE PRESION EN FUNCION DEL TAMAÑO DE GRANULOS EN EL HORNO VERTICAL DE CEMENTO

FIG. 4.35

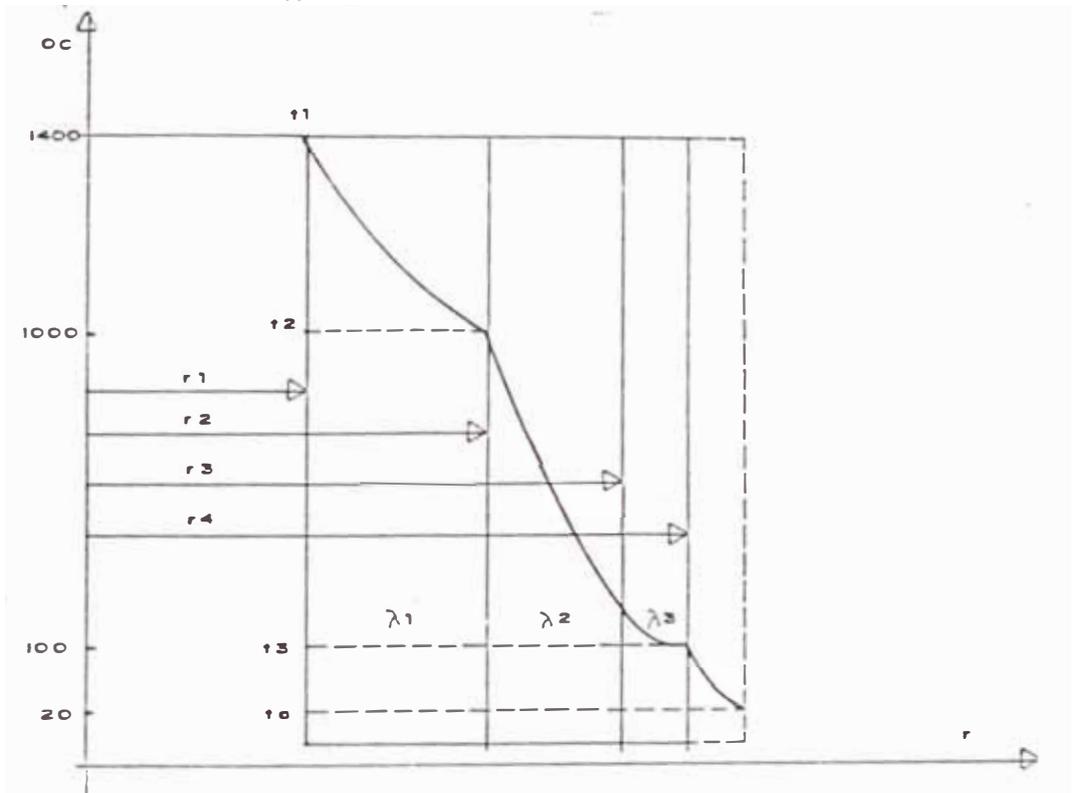
La figura siguiente muestra la relación que existe entre la velocidad de los gases y la carga específica en kilogramos por metro cuadrado de parrilla y hora. La curva media muestra el desarrollo de los actuales hornos verticales cuyo rendimiento depende con exactitud de la velocidad de los gases. Las otras curvas expresan los resultados de generadores de gas y altos hornos, que también presentan una variación lineal. Con esto se ha llegado al convencimiento que existe una base segura en el perfeccionamiento de los hornos verticales de cemento y que sus rendimientos se alcanzaron únicamente mediante el aumento de la velocidad de los gases y reducción de la zona de sinterización.



PRODUCCION ESPECIFICA EN RELACION CON LA VELOCIDAD DEL AIRE O DEL GAS

FIG 4.36

4.3.3 Transferencia de Calor a Través del Horno Vertical



TRANSFERENCIA DE CALOR ATRAVÉS DEL HORNO VERTICAL

FIG. 4.37

En la figura 4.37 ha sido esquematizado un corte vertical a través de la pared de un horno vertical. Las abscisas indican los radios (diámetros) de generación de las diferentes capas y las ordenadas indican las temperaturas. La primera capa comprende el revestimiento de ladrillo refractario, λ_1 el coeficiente de conductibilidad térmica en $\frac{\text{KJ}}{\text{m.h.}^\circ\text{C}}$, la segunda capa representa el espesor de la mampostería de relleno con su respectivo coeficiente de conductibilidad térmica λ_2 enseguida la carcaza con coeficiente λ_3 y por

último tendremos la llamada capa hidrodinámica límite, una capa de aire cuyo espesor llega, según la velocidad del viento, a algunos milímetros. Lo mencionamos porque debido a la reducida capacidad de conducción térmica del aire, juega un importante rol en la transmisión de calor.

Se han formulado las siguientes hipótesis simplificadoras:

- a) Los ejemplos de cálculo se harán para un horno vertical con una zona de sinterización de 3 m. y con diámetro exterior también de 3 m.
- b) La temperatura interior debe llegar a 1400 °C
- c) La temperatura exterior ser de 20 °C.
- d) Las pérdidas en las restantes zonas del horno no se han tomado en cuenta.

La transferencia de calor se da según lo siguiente:

- La transmisión de calor del clinker caliente y gas a la pared del horno principalmente mediante radiación (caracterizado por la cifra de transmisión de calor α)
1
- La transmisión de calor a través del revestimiento del horno, la mampostería de relleno y la carcasa de hierro por conducción térmica (carac-

terizado por $\sum \frac{1}{d_i}$ en $\frac{d_{i+1}}{d_i}$)

- Paso de calor de la carcaza al aire exterior por radiación y convección (caracterizado por α_2)

Las magnitudes arriba mencionadas se resumen en la fórmula

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{1}{d_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

K está dado en $\frac{\text{kJ}}{\text{m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}}$

La cantidad de calor es entregada por la pared a una determinada temperatura t_1 al aire (t_a) se calcula generalmente según:

$$Q = \alpha_2 \cdot F (t_1 - t_a) \text{ (KJ/h)}$$

En donde:

Q = Cantidad de calor por unidad de tiempo en kJ/h

F = Area en m^2

$t_1 - t_a$ = Diferencia de temperatura pared-aire exterior en $^\circ\text{C}$

La cifra de transmisión de calor (α) por simplicidad se designa por α . lo que resume todos los factores que influyen en este recambio de calor. En primer lugar está repartida en que son los coeficientes de calor por radiación y por convección.

α se calcula según la ley de Stephan-Boltzmann

$$\alpha_s = \frac{C \left(\frac{T_i}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a}{100} \right)^4}{t_1 - t_a}$$

$C = \sigma * 10^8$ coeficiente radiación $\text{KJ/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}^4$
 Para hornos de cemento $C = 16.7 \text{ KJ/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}^4$

α puede ser calculado con ayuda de las llamadas k números de semejanza, basándose en la teoría de la semejanza es posible resumir las variables de α en cuatro magnitudes no dimensionales. Las magnitudes fundamentales y derivadas utilizadas para estos números de semejanza se encuentran reunidas en la Tabla 4.1.

A continuación presentamos los números de semejanza

$$1. \text{ Número de Reynolds } Re = \frac{w l}{\nu}$$

Determina la similitud hidromecánica entre las corrientes de los agentes portadores del calor

$$2. \text{ Número de Prandtl } Pr = \frac{\mu c}{\rho}$$

Es la característica termofísica del agente portador de calor

$$3. \text{ Número de Nusselt } Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}$$

Caracteriza la intensidad del proceso de intercambio de calor por convección.

$$4. \text{ Número de Grashof } Gr = g \beta t \frac{H^3}{\nu^2}$$

Caracteriza la eficacia relativa de la fuerza de sustentación que provoca el movimiento de convección libre el medio.

La ecuación de semejanza para los procesos del intercambio de calor por convección durante el movimiento forzado del agente portador de calor tiene la forma:

$$Nu = f (Re, Pr)$$

La ecuación de semejanza para los procesos del intercambio de calor durante la convección libre tiene la forma:

$$\text{Nu} = f(\text{Gr}, \text{Pr})$$

La corriente laminar solo puede considerarse estable hasta $\text{Re}=2300$ (cifra crítica de Reynolds), para flujo turbulento se considerará a partir de $\text{Re}=10^4$

Ejemplo: Horno vertical $d=3 \text{ m.}$, $W=3 \text{ m/s}$

$$V = 0.237 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Re} = \frac{Wd}{L} = 3.8 \times 10^5$$

Se deduce entonces que existe flujo turbulento. Si estudiamos la emisión calorífica durante un régimen forzado turbulento y consideramos en la elaboración de los resultados de los ensayos, como medio activo el aire para el que el número Pr tiene un valor constante: $\text{Pr} = 0.7$ la ecuación de semejanza $\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr})$ toma la forma $\text{Nu} = f(\text{Re})$

Al representar los resultados de los experimentos como la dependencia entre los números Nu y Re obtenemos $\text{Nu} = c\text{Re}^{0.805}$ y para el caso particular de $\text{Re} > 10^4$

$$\text{Nu} = 0.024 \text{ Re}^{0.805}$$

Si existiera convección libre en la corriente de aire, la intensidad de emisión calorífica puede representarse por la ecuación general:

$$Nu = c(Gr.Pr)^n$$

Ejemplo: Emisión de calor de la zona de sinterización de un horno vertical por autoconvección.

Altura de la zona : 3 m $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

$$\beta = 0.00366 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad V = 0.237 \times 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad t_a - t_1 = 80 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$Gr = \frac{H^3 \cdot g \cdot \beta (t_a - t_1)}{V^2}$$

$$Gr = \frac{27 \times 9.81 \times 0.00366 \times 80}{(0.237)^2 (10^{-4})^2}$$

$$Gr = 1.38 \times 10^{11}$$

Entonces $Gr.Pr > 3.5 \times 10^7$ que es el campo de validez de una capa límite turbulenta.

Luego:

$$Nu = 0.13 \sqrt[3]{Gr.Pr}$$

De aquí se puede volver a calcular α_k según:

$$\alpha_k = \frac{Nu \lambda}{l}$$

En la figura 4.38 se encuentran graficados el coeficiente de transmisión de calor - calculadas según estas fórmulas- multiplicadas por la diferencia de temperatura pared-aire exterior (t_1-t_a), por lo tanto las cantidades de calor emitidas por tiempo y unidad de superficie se representa frente a la temperatura de carcaza t_1 . Por medio de estas curvas se puede leer inmediatamente la cantidad de calor en $\text{kJ/m}^2 \text{h}$ que es emitida por radiación y convección. Con una temperatura de carcaza dada. Para volver a obtener de aquí el coeficiente de calor se deben dividir estos valores por la diferencia de temperatura.

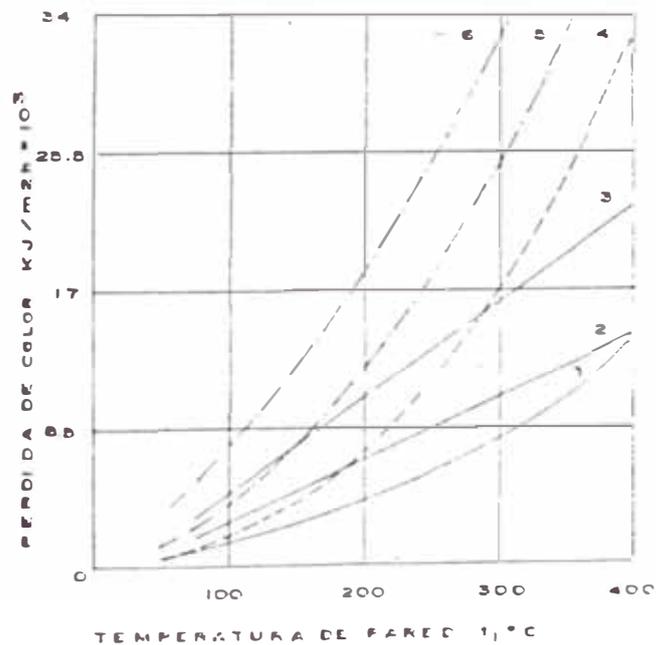


FIG.4.38 LOS DIFERENTES COMPONENTES DE LA PERDIDA DE CALOR CON Y SIN INFLUENCIA DEL VIENTO

Perdida de calor a través de:

- 1.- Convección (t_3-t_a) para convección libre
- 2.- Convección (t_3-t_a) para 3 m/s de viento
- 3.- Convección (t_3-t_a) para 5 m/s de viento
- 4.- Radiación (t_3-t_a)
- 5.- Transferencia de calor total para convección libre
- 6.- Transferencia de calor total para 5 m/s de viento

En la siguiente tabla se encuentran reunidas las magnitudes requeridas (valores para aire) para el cálculo de α en convección libre.

TABLA 4.2
COEFICIENTE DE TRASPASO DE CALOR POR CONVECCION LIBRE

t1	T1	t1-ta	$V \times 10^4$	y	Pr	α_k	α_s	α_{Total}
°C	K	°C	m ² /s	$\frac{KJ}{mh^\circ C}$		$\frac{KJ}{m^2h^\circ C}$	$\frac{KJ}{m^2h^\circ C}$	$\frac{KJ}{m^2h^\circ C}$
50	323	30	0.185	0.0985	0.717	16.76	19.53	36.29
100	373	80	0.237	0.1102	0.718	22.00	24.68	46.68
150	423	130	0.296	0.1211	0.720	24.51	31.76	56.27
200	473	180	0.360	0.1307	0.725	26.15	39.60	65.75
250	523	230	0.428	0.1412	0.730	27.24	48.60	75.84
300	573	280	0.497	0.1508	0.735	28.20	60.00	88.20
350	623	330	0.575	0.1628	0.742	29.33	72.40	101.73
400	673	380	0.650	0.1730	0.750	30.21	84.64	114.85

Con la influencia del viento la emisión de calor en el frente y la parte posterior del horno cubre el mayor porcentaje. Con $Re = 5 \times 10^5$ y con una temperatura de carcasa de 130 °C y una velocidad de viento de 3 m/s, la parte posterior tiene una participación de 60% en la emisión de calor, esto es debido a los remolinos que se forman y destruyen la capa hidrodinámica límite; mientras que en los costados la capa se mantiene uniforme.

Calculando el coeficiente de transmisión de calor:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_i \frac{1}{d_{i+1}} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad \frac{\text{K J}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}}$$

y la transmisión de calor:

$$K(t_g - t_a) = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_i \frac{1}{d_{i+1}} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad \frac{\text{K J}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}}$$

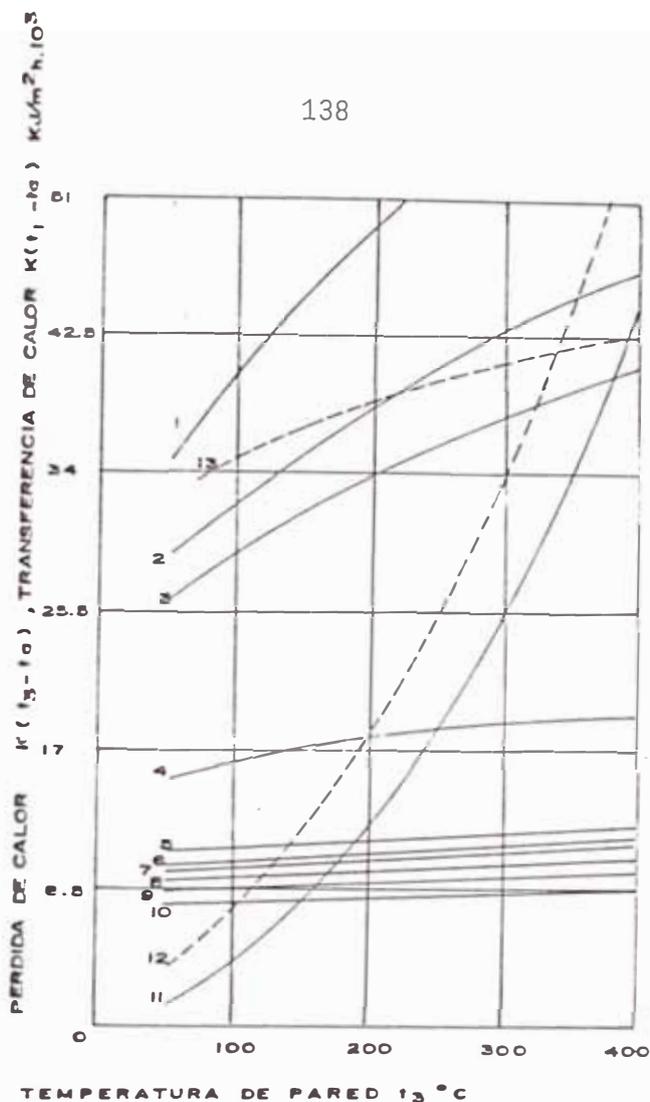
Hay que calcular por separado las magnitudes $1/\alpha_1$, $1/\alpha_2$, $\sum_i \frac{1}{d_{i+1}} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}$, para averiguar que magnitud

ofrece la mayor resistencia. Los valores para α ya han sido calculados, los valores de $\frac{1}{d_{i+1}} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}$ son los correspondientes valores del material de los ladrillos refractarios y mampostería de relleno. Sobre α para la transmisión de calor del interior del horno (t_g) a la pared (t_1) no se pueden obtener datos precisos, ya que las condiciones de flujo y de temperatura dentro del horno no pueden conocerse con exactitud. Pero como la radiación asciende poderosamente con la temperatura, se hace muy grande y

correspondientemente $t_g - t_1$ muy pequeñas frente a las otras diferencias de temperatura, la transmisión de calor se puede escribir de la siguiente manera:

$$K(t_g - t_1) = \frac{t_1 - t_a}{\sum_i \frac{1}{\ln \frac{d_{i+1}}{d_i}} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

Esta expresión contiene en $1/\alpha_2$ un miembro que asciende poderosamente con la temperatura de la carcaza t_3 . En la Fig. 4.39 está representado para diferentes materiales de mampostería $K(t_1 - t_a)$ en dependencia de la temperatura de la carcaza. Para una determinada temperatura de carcaza t_a existe equilibrio entre la transmisión de calor $K(t_1 - t_a)$ y la cantidad de calor emitido $(t_3 - t_a)$; del punto de intersección de las curvas en la figura se obtiene la temperatura de la carcaza y al mismo tiempo la pérdida de calor que aparece en el equilibrio estacionario.



TEMPERATURA DE CARCAZA Y TRANSFERENCIA DE CALOR
CON Y SIN PARED INTERNA

FIG. 4.39

Curvas de transferencia de calor para convección libre

1.-	S 42%	5 cm.	$\lambda = 3.9$		
2.-	S	25 cm.	$\lambda = 11.7$		
3.-	S 42%	10 cm.	$\lambda = 3.9$		
4.-	S 42%	25 cm.	$\lambda = 3.9$		
5.-	S	10 cm.	$\lambda = 11.7 + H$	25 cm.	$\lambda = 2.52$
6.-	S	25 cm.	$\lambda = 11.7 + H$	25 cm.	$\lambda = 3.35$
7.-	S 42%	10 cm.	$\lambda = 3.9 + H$	25 cm.	$\lambda = 2.52$
8.-	S 42%	5 cm.	$\lambda = 3.9 + K$	10 cm.	$\lambda = 0.84$
9.-	S 65%	25 cm.	$\lambda = 5.4 + H$	25 cm.	$\lambda = 2.52$
10.-	S 42%	25 cm.	$\lambda = 3.9 + H$	25 cm.	$\lambda = 2.52$

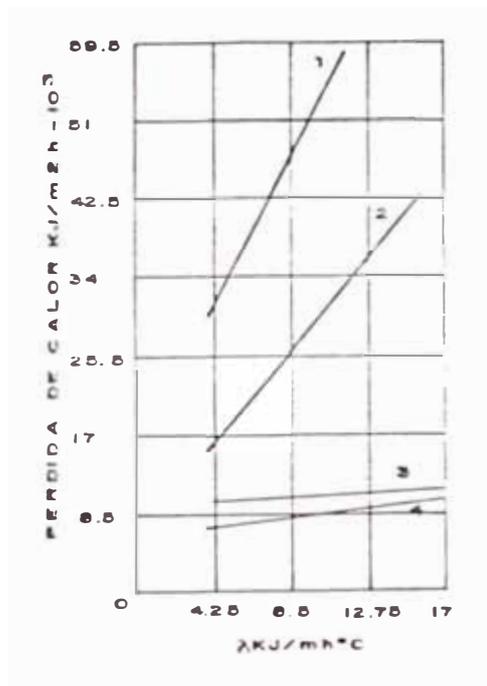
- Curvas de transferencia de calor para 5 m/s de viento.
- 11.- Curvas de pérdida de calor para convección libre.
 - 12.- Curvas de pérdida de calor para 5 m/s de velocidad de viento
 - 13.- S 42% 10 cm. $\lambda = 3.9$
S 42% = chamota con 42% Al₂O₃

2 3

H = Pared interna del horno con chamota
K = Pared interna del horno recubierta con clinker

De la Fig. 4.39 se desprende que los hornos con mampostería de relleno tienen una temperatura de pared más baja y por eso mismo una pérdida más reducida de calor que aquellos sin mampostería. Sin embargo, se vé además que con la mampostería de relleno, el coeficiente de conductibilidad térmica del revestimiento interno no juega ningún rol esencial y además es insignificante, si el revestimiento pierde grosor debido al deterioro.

En un horno sin mampostería, se modifica notablemente la emisión de calor, tanto con el desgaste del revestimiento como con la modificación de la capacidad de conducción térmica del ladrillo (Fig. 4.40), además, las influencias de las condiciones atmosféricas son más notorias. En la Fig. 4.39 está dibujada la curva α para una velocidad de viento de 5 m/seg. y la correspondiente curva de transmisión de calor para un revestimiento de chamota de 10 cm. de espesor ($\lambda = 3.9$). Frente a la convección libre aparece un descenso de temperatura de la carcaza de cerca de 65 °C, mientras que la emisión de calor se eleva a cerca de 1676 kJ/m h. Este efecto es naturalmente más grande con revestimiento más delgado o bien con más alta velocidad de viento.



DEPENDENCIA DE LA PERDIDA DE CALOR DE LA CAPACIDAD DE CONDUCCION DE CALOR Y DE LA SOLIDEZ DE RE ESTIMIENTO

FIG. 4.40

1. 10 cm. revestimiento sin pared interna
2. 25 cm. revestimiento sin pared interna
3. 5 cm. revestimiento, 25 cm. de pared interna = 2.5
4. 25 cm. revestimiento, 25 cm. de pared interna = 2.5

En seguida calcularemos la cada de temperatura en los ladrillos cuando se usa mampostería de relleno, la cual por la durabilidad del revestimiento debe ser moderada. La cantidad de calor que fluye través del ladrillo es igual a la pérdida total

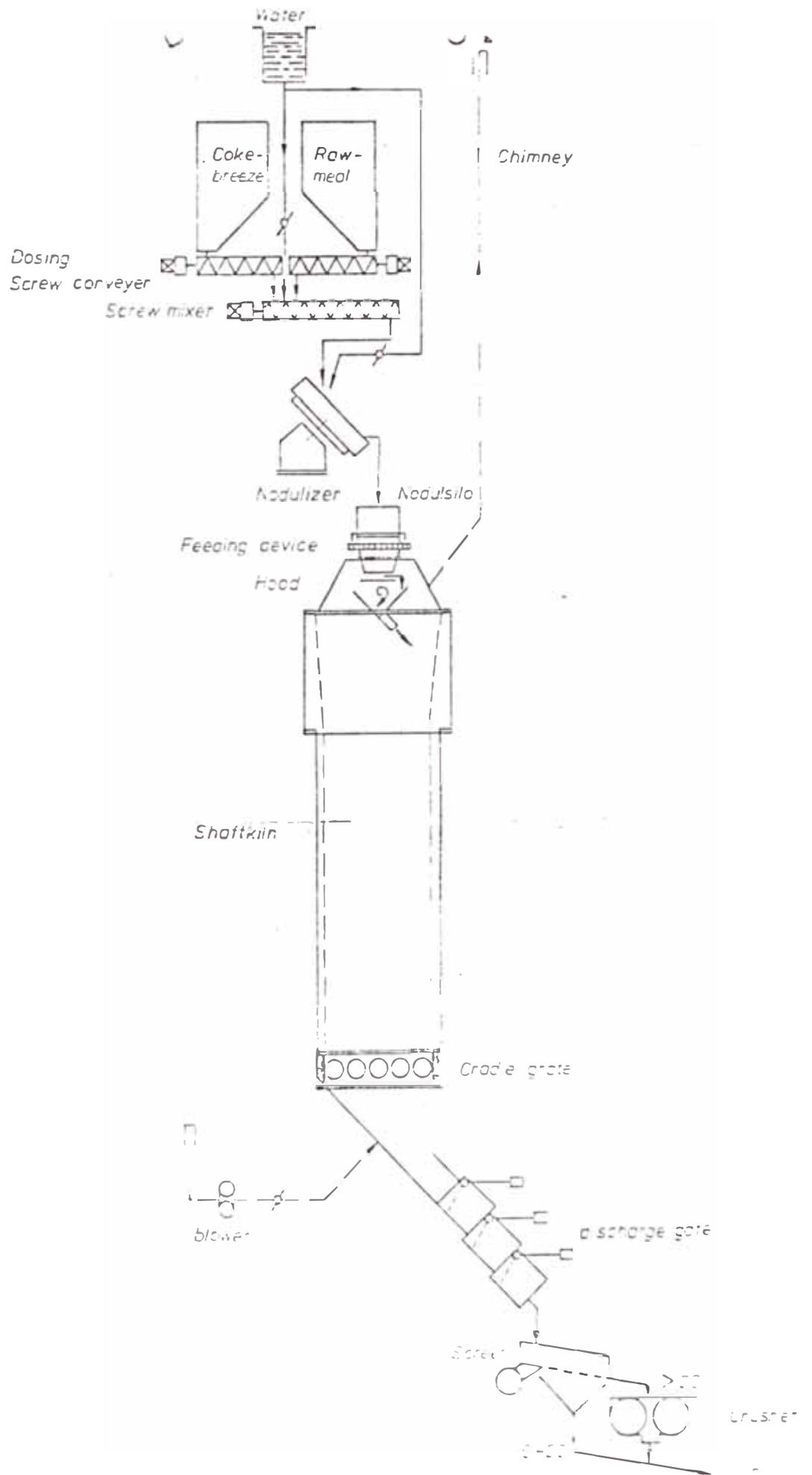


FIG. 4.41

horno por su parte superior (Ver Fig. 4.41). La necesidad de hacer manejable el material fino utilizado en la fabricación del clinker (crudo y antracita pulverizada) determina la utilización del proceso de peletización, por la que se obtienen gránulos ó pelets que presentan una serie de ventajas con respecto a otras formas aglomeradas de material.

* Formación de Pelets

La aglomeración del crudo mezclado con la antracita y su transformación en pelets se efectua en el plato peletizador (Fig. 4.42) que consiste esencialmente en un disco rotatorio, con pared periférica y que trabaja inclinado con respecto a la horizontal. Es aqui donde el material toma forma casi esférica, por rodadura del material fino y por añadidura de cantidades convenientes de agua mediante rociadores.

El proceso tiene lugar en tres etapas:

- a) Formación de núcleos: El material al rodar y tomar contacto con el agua, se aglomera y forma agregados muy

porosos de partículas que, por efecto

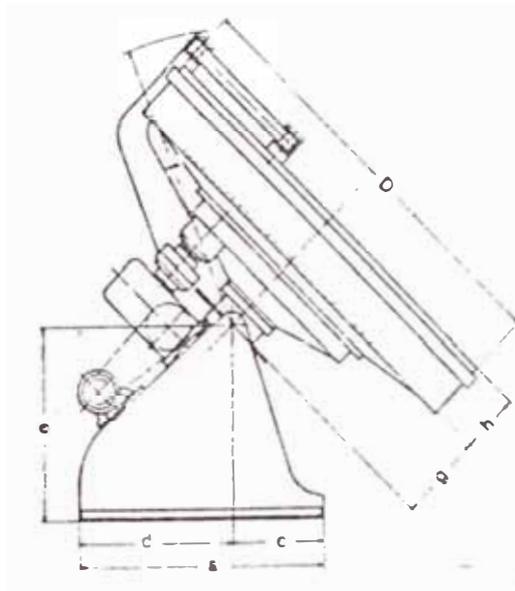


Fig. 4.42
Plato Peletizador

del rodamiento continúa formando pequeñas esferas que constituyan el núcleo del pelet.

b) Transición: El núcleo se compacta y los espacios vacíos entre partículas se llenan de agua.

c) Crecimiento de los pelets: Se lleva a cabo de dos maneras.

- Crecimiento por asimilación cuando no se agrega suficiente material fresco de alimentación, los pellets pequeños son fragmentados por los mayores y asimilados por éstas.
- Crecimiento por recubrimiento cuando se tiene suficiente alimentación nueva en el plato, el crecimiento se efectúa por capas de material que se acumulan sobre el núcleo.

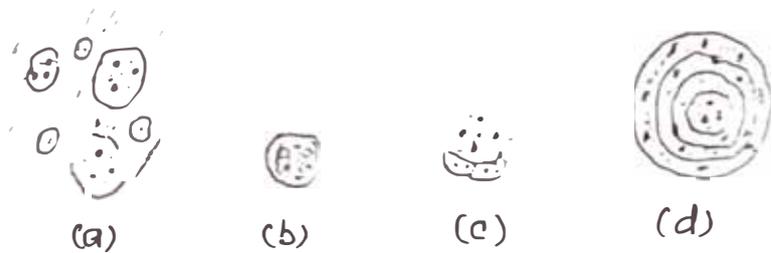
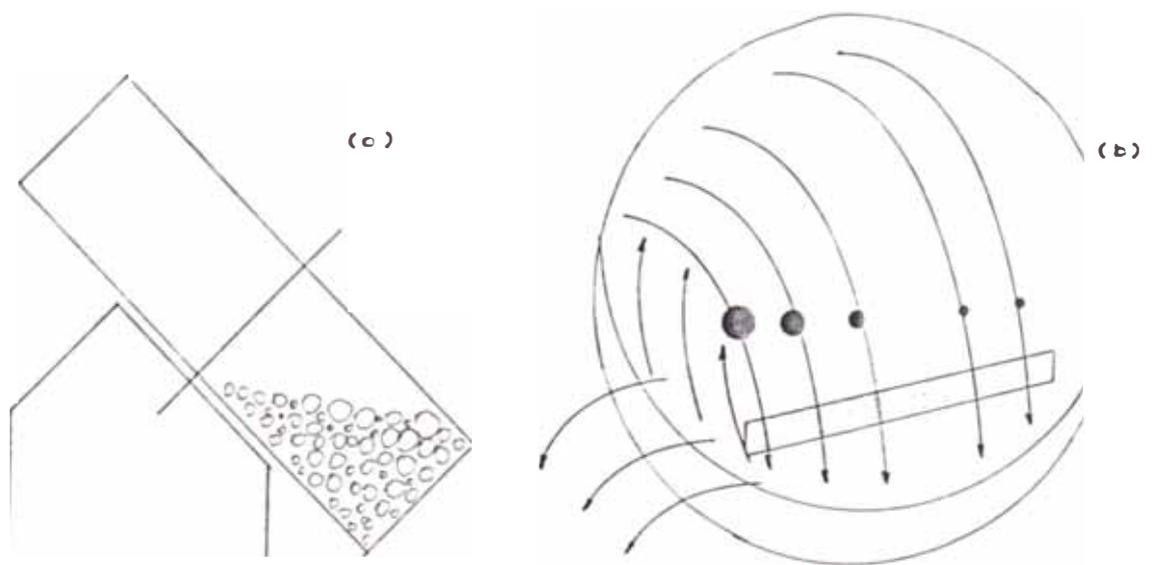


FIG. 4.43 FORMACION DE PELLETS
 (a) Formacion de Núcleos (b) Transición
 (c) Crec. por Asimilacion (d) Crec. por Recubrimiento

* Incidencia en el Peletizado de las Características del Plato Peletizador y Otros Factores.

Cuando los pelets alcanzan el tamaño requerido son descargados del plato automáticamente debido a que la altura de la pared periférica y el total del material acumulado actúan como elementos de clasificación (Fig. 4.44).



REPRESENTACION ESQUEMATICA DEL EFECTO CLASIFICADOR (a)
A I COMO EL MOVIMIENTO DEL MATERIAL Y DEL INTERVALO DE
ASPERSION EN UN PLATO PELETIZADOR (b)

FIG. 4.44

La formación de los núcleos se verifica en la zona de los rociadores, donde el material se humedece y satura de agua a tal punto que en etapa posterior de crecimiento permite la adherencia de más material. El sistema de rociado de agua debe estar regulado de tal forma que permita una generación de núcleos en cantidad igual a la cantidad de pelets descargados del disco, ya que de producirse muchos núcleos, estos producirán pelets pequeños. Resulta más sumamente importante tanto el porcentaje de agua de alimentación como el sistema de rociado.

Una velocidad de rotación excesiva reduce la eficiencia del peletizado y puede provocar fracturación de los pelets por impacto entre ellos y el borde periférico.

La resistencia de los pelets aumenta medida que van rodando, por lo que reduciendo el ángulo de inclinación del disco la componente normal de la gravedad aumenta incrementando la resistencia de los pelets. Cuando el diáme-

tro del plato peletizador aumenta, la velocidad a la cual descienden los pellets también crece de modo que es preciso corregir el ángulo de inclinación para lograr la velocidad apropiada. Tendremos más una combinación óptima de ángulo de inclinación y velocidad de rotación para un material dado que permitir un rodamiento del núcleo formado en un recorrido en el que va absorbiendo más material hasta alcanzar el tamaño requerido.

Por otro lado el peletizado se favorece con una materia cruda almacenada mientras, que una materia cruda fresca y caliente dificulta su formación. La materia cruda finamente molida se peletiza más fácilmente que la gruesamente molida; inciden también las fuerzas de cohesión de los granos de crudo y su relación con el efecto capilar del fluido.

* Características que Deben Reunir los Pellets

El plato peletizador debe ser tan grande

que cómodamente alcance el máximo rendimiento del horno. Sin embargo, si el tiempo transcurrido se extiende largamente, los pelets se vuelven demasiado duros y tienden a romperse. Pero es necesario tener una idea de la resistencia a la compresión de los pelets, ya que estos deben tener cierta dureza como para soportar el peso de la carga del horno sin ser aplastados o desmoronados de manera que los gases puedan circular libremente.

La resistencia contra los esfuerzos mecánicos en el horno y la resistencia a la desintegración con el tratamiento térmico, son propiedades importantes de los pelets que dependen principalmente de sus porosidades. Se recomienda una porosidad aproximada de 30% que es aquella donde se conjugan tanto resistencia mecánica, así como el suficiente número de espacios vacíos para una correcta evacuación de los gases durante el quemado del pelet y de esta forma no se desintegre. Los pelets rotos son menudo la causa de una mala combustión, gran desarrollo de polvo y finalmente un

funcionamiento del horno deficiente no solamente en rendimiento sino también en la calidad del clinker.

El tamaño y la resistencia de los pelets dependen en gran parte de la calidad de los materiales. Mientras más plástico sean mejor será la calidad de los pelets. Los pelets de buena calidad pueden en todo caso, formarse cuando un material es plástico, o sea, cuando la arcilla y la marga están presentes en los componentes de la mezcla cruda. Una mezcla que consiste en caliza molida y de un componente no plástico como la ceniza, las escorias metalúrgicas, esquistos, etc., son poco nodulizables. En tales casos, el plástico es añadido bajo la forma de arcilla plástica (3-5%).

La humedad de los pelets determina su calidad y el consumo de combustible. Los pelets con un bajo contenido de humedad probablemente se desintegren con más facilidad, mientras que cuando hay mayor humedad aumenta el consumo de

combustible por el secado y la evaporación. De acuerdo a las propiedades de los materiales crudos, la humedad óptima puede variar de 11 a 16%.

* Ventajas en la Utilización de Pelets

Entre las principales ventajas tenemos:

- a) Su forma esférica y poca variabilidad de tamaño facilita que la carga se distribuya en forma regular, lo que aumenta el contacto gas-sólido, con alta transferencia de calor y masa.
- b) Son de composición homogénea, lo que facilita un quemado apropiado.
- c) Facilidad de transporte.
- d) El ascenso de calor y la circulación del aire es de lo más favorable cuando se trabaja con pelets.

4.3.4.2 Combustión en el Horno Vertical

* El Combustible del Horno - El Carbón

Los tipos de carbón recomendados, como combustibles son el coke y la antracita, debido a que contienen muy poco material

volátil, por lo que no habrán pérdidas de calor. Al carbón finamente molido es mezclado con el crudo; éste carbón reacciona en forma diferente al carbón grueso. El carbón grueso requiere oxígeno para reaccionar.

Sin embargo, el carbón molido, puede reaccionar con la materia prima aún sin oxígeno, según la reacción de Hauenschild.



Con carbón pulverizado, la longitud de la llama depende principalmente del tamaño del pelet de modo que puede ser controlado y conservado uniforme. El fuego corto en la parte superior del horno no produce un clinker denso. El material permanece poroso y los pelets no funden, permanecen sueltos o están ligeramente cocidos.

Con carbón pulverizado, el clinker no se encoge más de lo normal. La forma de cono no necesita ser cubierta demasiado

y es más fácil tener una buena distribución de aire a través de la sección del horno.

De acuerdo a estudios efectuados en otros países; con un cono formado adecuadamente, buen aislamiento, carbón triturado al tamaño conveniente y una buena parrilla, se consumirá 3600 kJ/kg clinker.

El valor calorífico del combustible debe ser tan alto como sea posible, se recomienda entre 27,450 kJ/kg - 29,560 kJ/kg y de ninguna manera menor que 23,230 kJ/kg (un coke que contenga 22% de cenizas y 10% de humedad es apropiado).

La antracita debe contener 6 a 8% de materia volátil, 6 a 15% de cenizas y 4 a 6% de humedad. El coke 2 a 4% de materia volátil, 6 a 15% de cenizas y 4 a 6% de humedad. El tamaño de partículas de coke ó antracita no deber ser mayor de 8 mm. y no menor de 1.2 mm., en lo posible debera estar entre 1.2 mm. y 6.4 mm. Las partículas extremadamente finas incrementan la cantidad de CO en

los gases de salida y una alta proporción de partículas más grandes que 6.4 mm. requiere un incremento innecesario de la zona de calcinación, por lo cual, el clinker será descargado a temperatura más alta. Sobre una cantidad dada de combustible, el tamaño puede tener efectos considerables sobre el calor producido.

* Encendido de los Pelets

Una vez obtenidos los pelets, deben ser alimentados al horno (previamente calentado ó en funcionamiento); para ello se debe contar con un sistema de introducción de pelets, de manera que se impida fuga de aire y en consecuencia de calor. Las velocidades de alimentación de los pelets al horno y la descarga de clinker a través de una parrilla rotatoria deben ser las mismas de modo que el nivel en el horno permanezca constante.

Gottlieb hace una descripción del desarrollo de los procesos en un horno vertical de 200 t/d, y anota que el material se mueve en el horno hacia

abajo a una velocidad de 10-15 cm/h. El aire se mueve hacia arriba de manera que se calientan en forma paulatina hasta que la temperatura está suficientemente alta como para encender las partículas de carbón incorporados en los pelets, **produciendo** la zona más caliente a una temperatura de 1450 °C.

Si seguimos a un pelet en su viaje a través del horno observaremos lo siguiente. En primer lugar es calentado por los gases calientes de escape. Estos gases ya no contienen oxígeno, pero sí mucho CO tan pronto hace su aparición cierta elevación de temperatura la superficie del gránulo (quizás 600 °C a 800 °C) reaccionará el carbón que se **encuentra** en la superficie del **pelet** según la ecuación de Boudouard $\text{CO} + \text{C} = 2\text{CO}$. El CO se traslada rápidamente a las capas frescas y por falta de oxígeno no se puede seguir quemando.

De la zona de precalentamiento el pelet descarbonizado en su superficie **llega después de poco tiempo a la más profunda zona** oxigenada de combustión; **entre**

tanto las capas internas del pelet comienzan a recalentarse a la temperatura de reacción. El carbón reacciona con el CO desalojado de la caliza según la reacción de Hauenschild $C+CaO \rightleftharpoons 2CO+CaO$.

3

El CO así formado avanza a la superficie del pelet y al llegar encuentra allí O₂ con el cual puede seguir quemando para formar CO₂.

2

Lo malo está sin embargo en que, el carbón de la zona de precalentamiento con el O₂ libre ponen en movimiento gases calientes de escape, lo cual debe ser evitado.

* Velocidad de Combustión del Combustible en los Pelets del Horno Vertical de Cemento

Para el buen funcionamiento del horno vertical de cemento es de gran importancia poder regular oportunamente la zona de sinterización, a fin de mejorar la calidad del clinker quemado. El desarrollo de la zona de sinterización está condicionado apreciablemente por el com-

portamiento de los pelets en el horno o sea por la efectiva velocidad de combustión del combustible incorporado en los gránulos y en efecto se puede incluso considerar los gránulos como una especie de combustible cuyas propiedades térmicas de combustión en lo posible deben ser oportunamente establecidas.

Existen diversos factores que inciden en la velocidad de combustión. Estos son: diámetro (D_g) y superficie interior específica (A_g) de los pelets, diámetro (D_f) y superficie interior y exterior específica del combustible (A_{fi} y A_f), concentración del oxígeno en el gas de reacción (C_g), concentración de carbono del combustible en los pelets (C_f), coeficiente efectivo de difusión del gas de reacción (D_{eff}), temperatura de reacción (T) y capa límite hidrodinámica del gas.

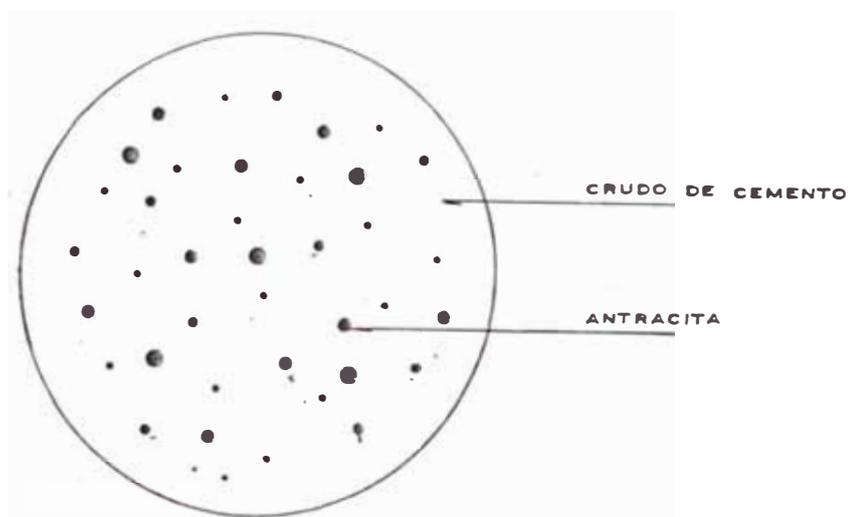
Las influencias de estos factores sobre la velocidad efectiva de combustión del combustible fueron estudiados por H. Kono (Industrias Ube Ltda), y presentadas como ecuaciones de reacción. Con

eso fue posible calcular numéricamente de antemano el comportamiento de combustión de los gránulos en el horno vertical en relación con diversas magnitudes de influencia.

Como material de partida hizo uso de crudo de cemento y antracita de tres diferentes granulaciones, cuyas propiedades químicas y físicas están reunidas en las Tablas 4.3 y 4.4. El crudo fue previamente desacidificada debido a que resulta difícil comprender separadamente el progreso de la combustión del carbono sólido, si al mismo tiempo tiene lugar, en algunos niveles de temperatura la desacidificación de los carbonatos de calcio.

El combustible fue dosado en cantidades de 6.5 a 17% en peso y la mezcla con el crudo peletizado; los diámetros de los pelets fueron fijados en 1.7 cm., 3 cm. y 4.3 cm., como la porosidad del pelet corriente del crudo de cemento (30-35%) después de la desacidificación sube más o menos 60%, la porosidad del gránulo

fue mantenida siempre en el experimento alrededor del 60%. La Fig. 4.45 muestra esquemáticamente la sección transversal de un pelet.



SECCION TRANSVERSAL DE UN PELET

FIG. 4.45

Como es conocido que los componentes fluidos de la antracita durante el calentamiento en la zona de precalentamiento se escapan sin provecho, en ese estudio solo se trató el carbono de la antracita como sustancia activa del proceso de combustión.

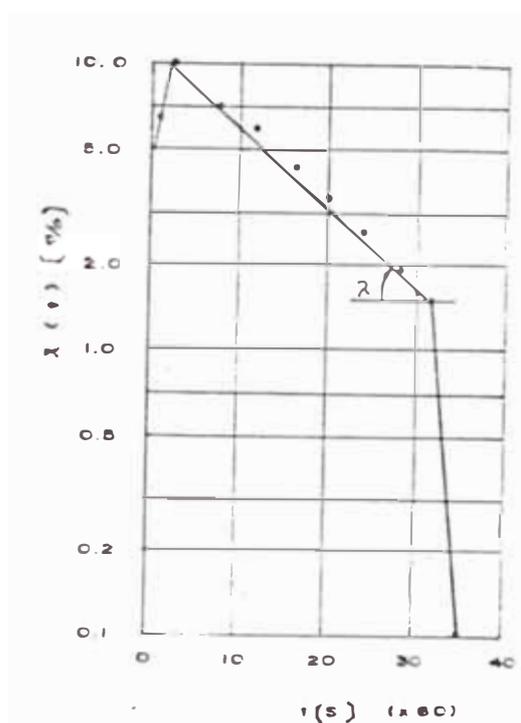
d.- Superficie Específica de la Antracita

<0.15 mm	= 24,000 cm ² /mol C
0.3 ~ 6 mm	= 3,600 cm ² /mol C
1.2 ~ 2.5 mm	= 840 cm ² /mol C

Los pelets de prueba fueron secados y recalentados bajo gas de protección (argón) hasta la temperatura de reacción (700 °C a 1400 °C) y mantenidos a esta temperatura durante 20 a 30 minutos para garantizar el establecimiento del equilibrio térmico. En seguida se insufló el aire de reacción (4 a 12 l/min) en el tubo de reacción donde se encontraban los pelets; el progreso de la combustión fue medido en el gas de escape mediante la temporal modificación de su contenido de CO y se calculó la velocidad efectiva del carbono sólido. Durante la combustión el CO resultante, con el exceso de oxígeno, en parte se transformó rápidamente a CO₂.

La Fig. 4.46 muestra el curso típico de una curva de transformación en donde el logaritmo de la concentración de CO en el gas de escape $x(t)$ está indicado en

función del tiempo t . Se puede reconocer un corto periodo de arranque, condicionado a que primeramente el gas inerte sea expulsado por el aire que contiene oxígeno, luego el periodo de reacción propiamente dicho, que abarca del 90 al 95% de la transformación total y que en esta representación es rectilínea y un corto periodo final, en el cual la velocidad desciende velozmente.



VARIACION DE LA CONCENTRACION DE CO_2
CON RESPECTO AL TIEMPO

FIG. 4.4

Kono dedujo la siguiente ecuación que refleja la variabilidad de la concentración de CO_2 en el gas de escape con el tiempo.

$$\log X = \log \frac{M_0 C_{g1} K_{\text{meff}}}{Q} - 0.4343 \cdot K_{\text{meff}} \cdot C_{g1} \cdot t$$

K_{meff} se puede calcular por el ángulo de inclinación de la recta en la Fig. 4.46

$$K_{\text{meff}} = \frac{t_1 \lambda}{0.4343 \cdot C_{g1}}$$

Donde:

M = Contenido de carbono sólido en un pelet (mol)

C_{g1} = Concentración de oxígeno y aire insuflado (mol/cm^3)

K_{meff} = Constante de velocidad efectiva de combustión ($\text{cm}^3/\text{mol} \cdot \text{s}$)

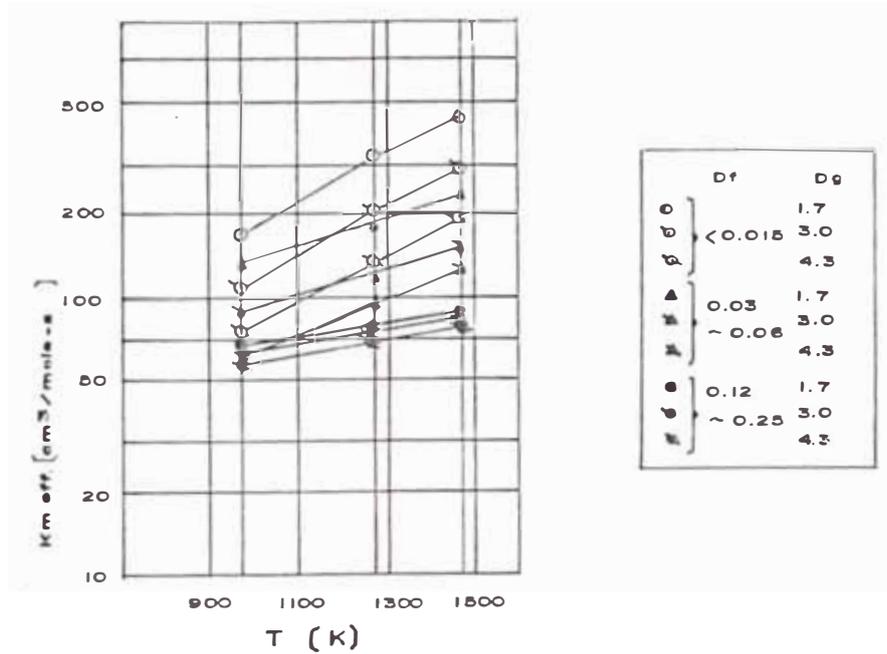
t = Tiempo (s)

Q = Cantidad de aire insuflado por seg (mol/s)

En la Fig. 4.47 está representada la constante efectiva de velocidad de combustión en función de la temperatura de reacción con tres diferentes diámetros de gránulos y tres tamaños diferentes de grano de antracita. De allí se deduce que la velocidad efectiva de combustión aumenta con el ascenso de temperatura y disminuye al aumentar el tamaño de los gránulos.

También hay que tomar en cuenta que las influencias de la temperatura de reacción y del diámetro de los gránulos sobre K_{meff} son muy notables, si la granulación de la antracita es pequeña (<0.15 mm.), pero que las mismas no son tan grandes, si es grande la granulación de la antracita (1.2 a 2.5 mm.)

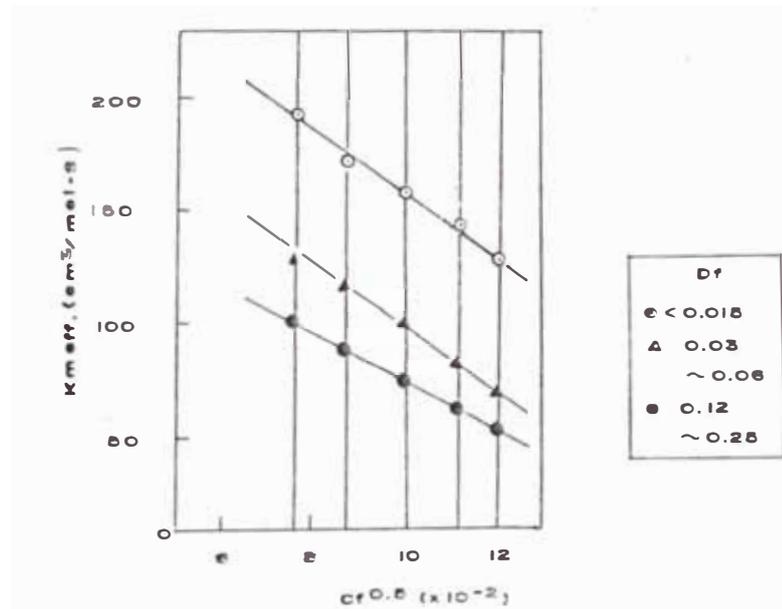
Una serie más de experimentos tuvo por objeto la influencia de la concentración inicial C_f del combustible en pelets sobre la velocidad de reacción. Los experimentos tuvieron lugar a una temperatura de 1,000 °C en gránulos con



VARIACION DE $K_{m\text{ eff}}$ CON LA TEMPERATURA ABSOLUTA PARA DIFERENTE GRANULOMETRIA Y TAMAÑO DE GRANO DE LA ANTRACITA $C_f = 0.01 \text{ mol/cm}^3$

FIG. 4.47

diámetro $D_g = 3.5 \text{ cm.}$, con diferentes concentraciones C_f y diferentes granulaciones de la antracita D_f . En la Fig. 4.48 está representada la dependencia de la constante de la velocidad de reacción $K_{m\text{ eff}}$ de $\sqrt{C_f}$, en donde se ha escogido como abscisa D_f . Por esta representación se hace visible que $K_{m\text{ eff}}$ desciende aumentar el tamaño D_f de grano y subir la concentración C_f .



DEPENDENCIA DE $K_{m\text{ eff}}$ DE LA CONCENTRACION DE ANTRACITA PARA DIFERENTES GRANULACIONES DE ANTRACITA $T = 1273^\circ \text{K}$ $D_g = 3.5 \text{ cm}$
 FIG. 4.48

4.3.5 Maquinaria Básica

4.3.5.1 Peletizador

* Características

El peletizador o nodulizador es un plato rotatorio de inclinación variable, movido por un sistema motriz compuesto por un motor eléctrico, reductor y poleas de transmisión, la estructura soporte le da estabilidad a todo el conjunto.

Además el plato debe poseer un raspador que mantenga la materia prima adherida

al interior del plato con un espesor adecuado. Para su construcción se utilizan planchas rolados, ciertos perfiles para la estructura soporte y otros (Ver Fig. 4.49)

* Determinación de la Velocidad de Rotación y de la Potencia

La velocidad de rotación del peletizador está nitivamente ligada al diámetro de éste, podemos adelantar que cuanto más grande el peletizador ms lento debe girar. La deducción de la fórmula (RPM crítico) se hace necesaria para tenerla presente como una consideración de diseño.

Esta fórmula es parecida a la que se aplica para el caso de la velocidad crítica en un molino de bolas en donde β es el ángulo de elevación de cualquier bola (Fig. 4.50).

Para un punto m (ver figura) la bola está sometida a la influencia de dos fuerzas que operan en direcciones opuestas y permiten mantener la bola en dicho punto; la fuerza centrífuga y la componente "P" de la fuerza de gravedad "G".

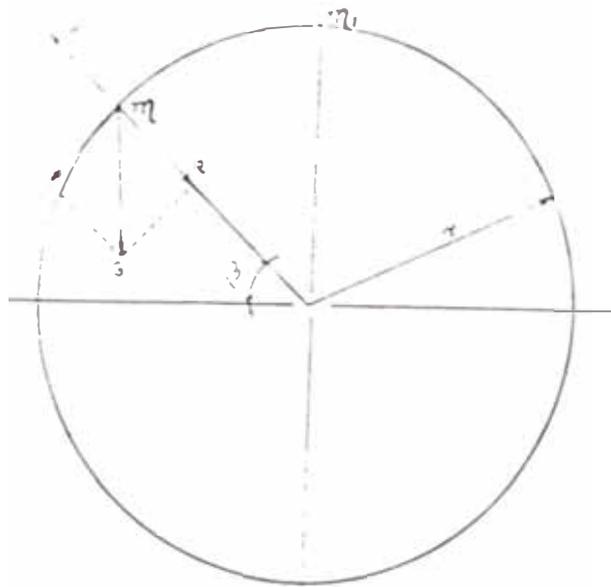


FIG. 450

Para aplicar esta fórmula al caso del plato peletizador, es necesario efectuar una verificación de la fórmula ya que el sistema de fuerzas es diferente, debido a la inclinación con que opera el plato.

Seguidamente efectuaremos esta verificación:

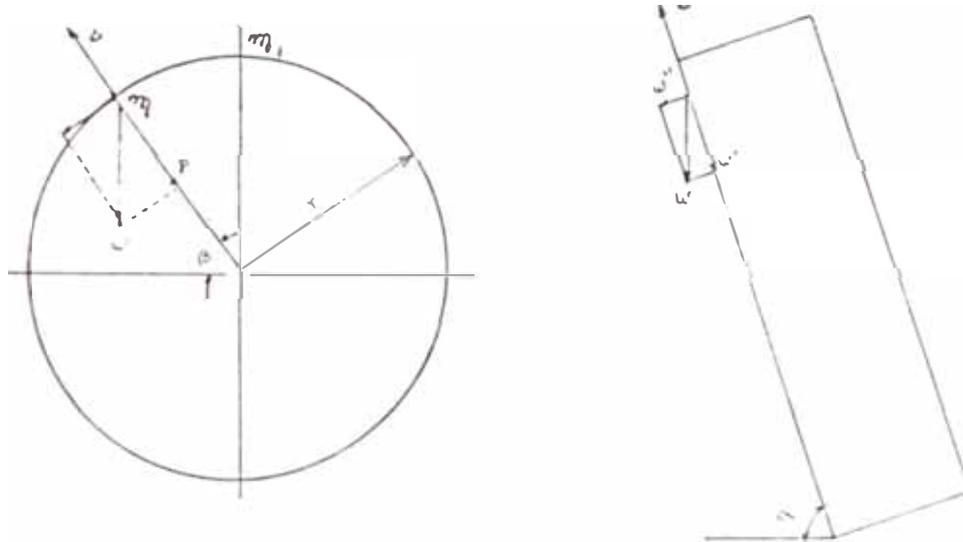


FIG. 451

β = Angulo de elevación de una unidad de masa (m) de crudo
 α = Angulo de inclinación del plato
 W = Peso de la masa (m) de crudo

$$W' = W \cos (90 - \alpha)$$

$$P = W \cos (90 - \alpha) \text{ sen } \beta$$

$$C = mw^2 r = \frac{W}{g} w^2 r \text{ --- Fuerza centrífuga}$$

Para mantener la masa m en esa posición se tendrá que cumplir: $C \geq P$

$$\frac{W}{g} w^2 r \geq W \cos (90 - \alpha) \text{ sen } \beta$$

$$\frac{W}{g} w^2 r \geq W \text{ sen } \alpha \text{ sen } \alpha$$

Si $\beta = 90$ cuando la masa m se encuen-

tra en m.

$$w \cdot r > g \cdot \sin \alpha$$

$$\left(\frac{2\pi n}{60}\right)^2 r >= g \cdot \sin \alpha$$

De aquí se deduce que la velocidad crítica es:

$$n = \sqrt{\frac{60^2 \cdot g}{4\pi^2 \cdot r}} \cdot \sqrt{\sin \alpha} = \sqrt{\frac{60^2 \cdot 9.8}{4 \cdot 3.14^2 \cdot \frac{D}{2}}} \cdot \sqrt{\sin \alpha}$$

$$n = \frac{42.3}{\sqrt{D}} \cdot \sqrt{\sin \alpha} \quad D \text{ en m}$$

Cuando el peletizador opera a esta velocidad crítica de rotación (RPM crítica), el proceso de peletizado no se realiza ya que el material gira adherido al plato, sin que se produzca la caída o rodamiento que permite la formación de los pelets.

De acuerdo a las referencias bibliográficas, y a través de la práctica se ha encontrado que la velocidad apropiada para lograr un buen proceso de peletiza-

do es de, aproximadamente, el 65% de la velocidad crítica.

La fórmula práctica serán entonces:

$$N = \frac{32}{\sqrt{D}} \sqrt{\text{Sen } \alpha} \quad D \text{ en metros}$$

En cuanto a la potencia es necesario efectuar un análisis más detallado y desarrollar una fórmula propia, que refleje las condiciones que se observaran durante las pruebas en una plato peletizador (Proyecto ITINTEC).

Para deducir la fórmula se hizo necesario efectuar varias pruebas con el peletizador, variando las rpm., el ángulo de inclinación, la forma de alimentación del crudo, el sistema de rociado de agua; variación de la altura del plato, etc., con el fin de establecer las condiciones más favorables del trabajo y, lo fundamental para nuestro cálculo, la forma en que se distribuye el material durante la rotación. Hay que insistir en el hecho que se han definido ciertos parámetros teniendo como base datos reales que se presenta-

ron en el peletizador del proyecto.

Hechas estas consideraciones y mediante Cálculo Integral se obtuvo la fórmula requerida:

$$\text{Pot. max} = 6.75 * 10^{-5} \text{ HD}^3 \rho \text{ N (Kw)}$$

donde:

H = Altura periférica del plato en metros

D = Diámetro del plato en metros

ρ = Densidad del pelet kg/m³

N = 1/min. (rpm)

Es conveniente hacer notar que, como un paso previo para el cálculo de la potencia, fue necesario obtener una fórmula para el volumen aproximado de material que permanezca en el plato durante el proceso. La fórmula obtenida fue:

$$\text{Carga} = 0.1187 \text{ HD}$$

Donde:

$$Y = \rho \cdot g$$

H = Altura periférica del plato en metro

D = Diámetro del plato en metro

γ = Peso específico del pelet en kg/m³

De acuerdo al análisis efectuado y uni-

formizando los simbolismos, utilizaremos las siguientes fórmulas:

- Número de revoluciones óptimas del plato peletizador

$$N = \frac{32}{\sqrt{D}} \sqrt{\text{Sen } \alpha}$$

$$N = \text{rpm (r/min)}$$

α = Angulo de inclinación

D = Diámetro interior en metros

- Régimen de Producción

$$G = 0.35 D^4 \rho \quad (\text{Manual del Ing. Químico de Perry 5a. Ed.})$$

G = Salida del peletizador kg/hr

ρ = Densidad de gránulos kg/m³

D = Diámetro del peletizador en metros

- Altura periférica del plato peletizador

$$H = 0.2 D$$

H = Altura periférica en metros

D = Diámetro del peletizador

- Potencia (motor)

$$\text{Pot. max} = 6.75 \times 10^{-5} \frac{HD^3}{\rho} \quad (\text{Kw})$$

H = Altura periférica en metros
D = Diámetro del plato en metros
= Densidad de pelets kg/m³
N = rpm óptimas. (1/min)

* Datos Experimentales de Peletizadores

Como una forma de reflejar el comportamiento de los peletizadores incluiremos algunos datos y resultados de ensayos en las tablas subsiguientes.

4.3.5.2 Tolva de Alimentación Giratoria-Alimentación del Horno

Es necesario que en lo posible el pelet recorra el menor camino posible para llegar al **horno y que no** caiga libremente sino que se deslice lentamente hacia abajo. De no ser así el material pierde su forma y a menudo se fracturan ocasionando distorsión en el interior del horno.

Es recomendable disponer de un canal giratorio de descarga, lo más profundo posible hasta casi llegar a la capa superior del material en el horno, también su inclinación debe ser fácil de cambiar para que el **hornero puede dirigir el material de acuerdo al requerimiento, hacia el medio o**

de material en los lugares donde por cualquier motivo el contenido del horno se vacía más rápido o donde el paso del aire se ha vuelto muy fuerte. La importante tarea de tapar el fuego se hace así, de una manera fácil y rápida.

El alimentador rotativo o tolva de alimentación giratoria (Fig. 4.52) cumple con todos estos requisitos, es mecanizado y además de fácil construcción.

4.3.5.3 Horno Vertical

* Revestimientos

El horno propiamente dicho, está formado por la envolvente del horno constituida de planchas de acero rolada, soldada y revestida, interiormente, de ladrillos refractarios

Frecuentemente, la paralización de los hornos afecta al revestimiento del clínker y a la vida del revestimiento refractario. Los factores operantes dentro del horno pueden variar por los cambios de temperatura, atmósfera y las condiciones del tiempo fuera de los hornos. Estas variaciones pueden a su

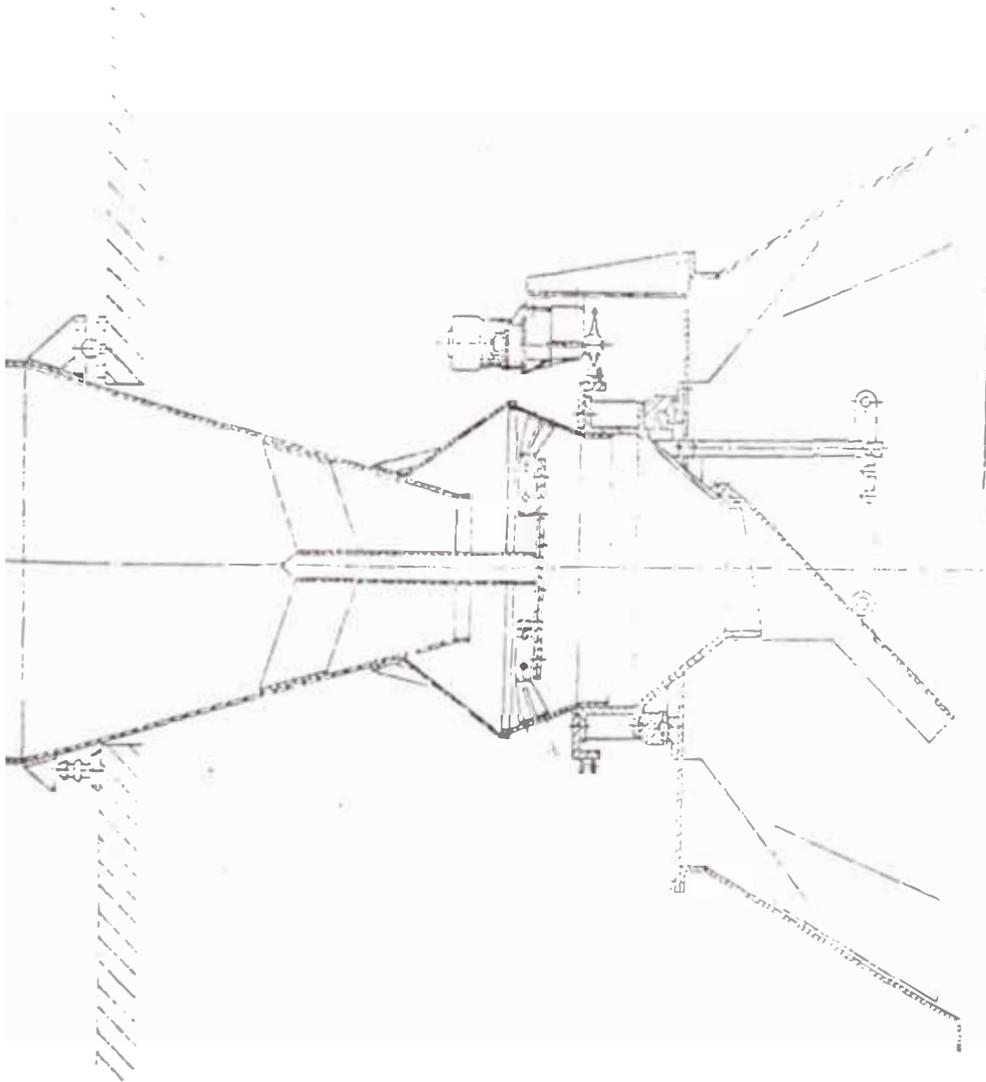
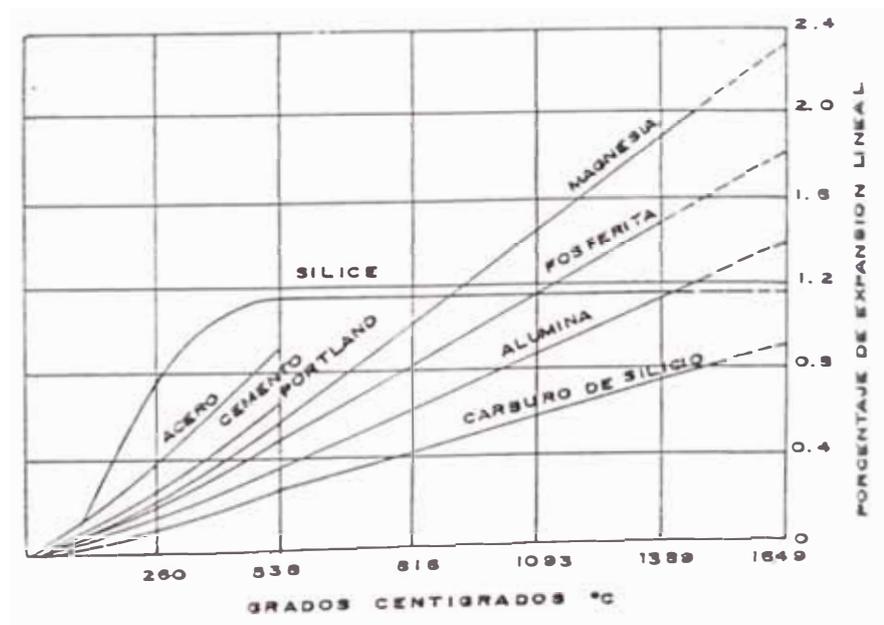


FIG. 4.52
TOLVA DE ALIMENTACION GIRATORIA

vez influenciar en el espesor de la capa protectora de clinker y sobre la superficie del refractario. En consecuencia los refractarios deben poseer propiedades que los hagan resistentes a estas condiciones de trabajo.

Deben poder soportar elevadas temperaturas, propiedad que se mide por el Equivalente del Cono Pirométrico (E.C.P.) - (Ver Tabla 4.7), en el material o punto de fusión; deben poseer resistencia al reblandecimiento o deformación a elevadas temperaturas lo que se denomina refractariedad; deben tener propiedades aislantes apropiadas bajo las temperaturas operantes a las cuales serán expuestas.

Además los revestimientos refractarios son continuamente **expuestos** condiciones abrasivas. Las cargas en movimiento tienden a cortar o socavar la superficie de los **revestimientos**; las partículas de polvo en el aire y los gases del horno chocan sobre los refractarios, causando desgaste. También las diferencias de temperatura en diferentes reas del horno dan como resultado cambios dimensionales no uniformes en el mismo, lo que puede originar fragmentación en el refractario. (Fig. 4.53)



EXPANSION LINEAL DEL LADRILLO POR EFECTOS DE LA
TEMPERATURA

FIG. 4. 53

La fragmentación mecánica también puede ser causada por la presión excesiva durante la instalación del refractario o por el desalineamiento del ladrillo en el horno.

La formación de costras sobre la superficie depende del coeficiente de penetración en el refractario (o sea en la porosidad) y de la composición química del refractario en el punto donde la escorificación líquida es absorbida).

Existen diversos tipos de ladrillos refractarios definiremos algunos:

El ladrillo de arcilla super refractario esta prescrito para condiciones de servicio severos y tiene un mínimo Equivalente de Cono Pirométrico de 33 en la ASTM.

El ladrillo de arcilla refractario de alto rendimiento tiene un mínimo ECP de 32 1/2. El ladrillo de arcilla refractario es menos refractario que los tipos de alto rendimiento y tienen un valor mínimo ECP de 29.

El ladrillo de alta alúmina tiene una refractariedad más elevada que el del ladrillo de arcilla refractario. Por esta razón el reblandecimiento es retardado debido únicamente a la acción del calor. El contenido de alta alúmina da mayor resistencia para el ataque de fundentes como los óxidos metálicos y alcalinos, cuando se le compara con el ladrillo de arcilla refractaria. La refractariedad se eleva con el incremento del contenido de alúmina; en la ASTM el mínimo ECP es 34 para el 50% de alúmina en el ladrillo, 35 para el 60% de alúmina, 36 para el 60% de alúmina, 37 para el 80% de alúmina.

El ladrillo básico refractario es utilizado en la zona caliente (cocción) de los hornos de cemento o donde hay mayor cantidad de agentes fundentes. Comercialmente el ladrillo básico asequible puede ser clasificado como: ladrillo magnesita (contenido nominal de MgO es 90% - 95%), ladrillo cromo-magnesita, ladrillo de cromo (hecho de mineral de

chromo sin añadidura de magnesita) y ladrillo dolomita.

La magnesita pura tiene una gran expansión térmica. El ladrillo de chromo es más resistente al ataque químico de escorias silíceas que el ladrillo magnesita.

Los refractarios compuestos de mezclas de magnesita y mineral de chromo ofrecen mayor resistencia a la fragmentación y mayor estabilidad de volumen y aumentan las propiedades de apoyo para la carga caliente y en algunos casos resisten mejor el ataque químico que los ladrillos elaborados con cualquier material principal.

Las propiedades y características de los refractarios son detallados en catálogos industriales para permitir la especificación del material del revestimiento y **satisfacer** las necesidades del horno operante.

* Tamaños y Producción

En la actualidad cuando la producción es

menor que 700 t/d se prefieren hornos verticales. Cuando es superior el horno rotativo presenta ventajas. Se han construido hornos verticales de 3 m. y de 250 t/d. Un horno que excede los 3 m. de diámetro es inconveniente porque la distribución de aire se hace difícil resultando una operación inestable.

Una común y efectiva medida del horno es de 180 - 200 t/d., tal horno tendrá un diámetro efectivo interior de 2.4 m y una altura aproximada de 8 m.

Seguidamente, se muestran algunas características de tres plantas con hornos verticales en producción. (Tabla 4.8)

4.3.5.4 Parrilla-Evacuación del Clinker

La evacuación uniforme del clinker del horno es muy importante. Una descarga irregular podrá llevar a una dislocación en la zona de sinterización provocando condiciones inestables de funcionamiento y un calentamiento muy bajo o alto del clin-

ker. Cuando un material fluye por una sección de sinterización, más material tiende a fluir en el centro que en la periferia.

La parrilla tiene que estar diseñada para contrarrestar estos efectos y asegurar el flujo uniforme descendente del material por toda la sección transversal del horno. También debe actuar como un sistema de distribución de aire y contar además con dispositivos de rompimiento de racimos de clinker si los hubiere.

La parrilla rotatoria, se instala en el extremo inferior del horno; posee una corona excéntricamente superpuesta y se apoya en un eje vertical. Un motor eléctrico da al emparrillado un lento movimiento de rotación (2 - 8 rph); la reducción de la velocidad del motor deberá efectuarse mediante un reductor hidráulico de regulación totalmente progresivo (o motor especial trifásico de tipo colector de Shunt), porque si súbitamente se presenta un intenso desarrollo del fuego debe hacerse descender rápidamente la carga del horno y al revés si la combustión se hace

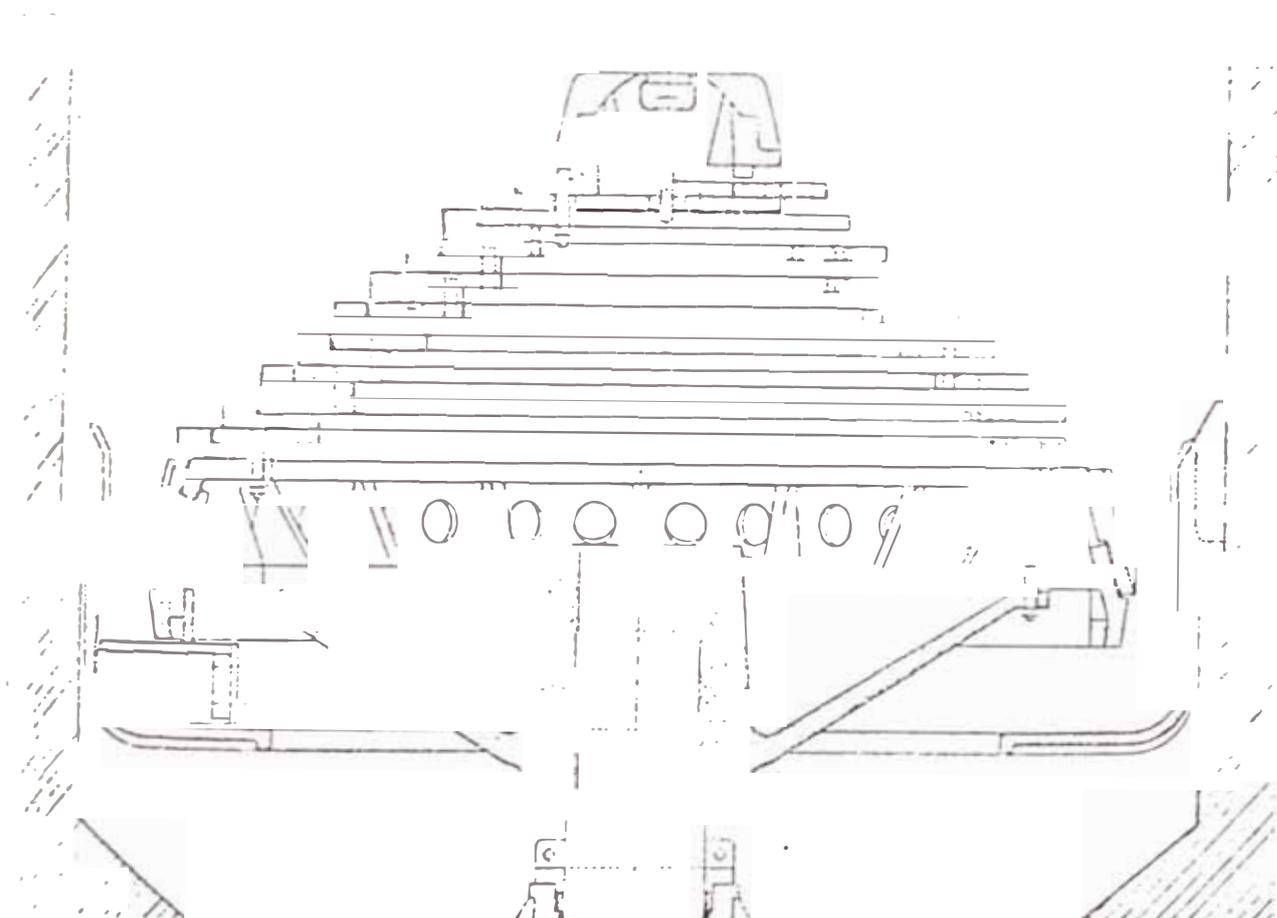
lenta el descenso debe hacerse en forma lenta con el fin de lograr una producción normal.

Los sólidos se mueven por el horno como una masa con un movimiento muy suave hasta que se aproximan a la elevación del punto máximo de la parrilla; aquí los sólidos son desviados por los lados hacia las aberturas laterales (Ver Fig. 4.54)

El clinker extraído en pequeños fragmentos, pasa primero a una cámara existente debajo del emparrillado, de la cual se descarga fuera del horno mediante las esclusas de descarga.

4.3.5.5 Esclusas-Descarga del Horno

Una vez que el clinker pasa a la cámara que se encuentra debajo del emparrillado, es extraída de allí a través de la esclusa de descarga a alta presión de cierre estanco. La construcción idónea de esta esclusa impide que el aire de combustión insuflado a alta presión, vuelva a salir al exterior con el clinker. Las esclusas de vaciado, generalmente inclinadas a 45° y adosadas a la cámara, están formadas por



Stepped grate at bottom of shaft kiln doesn't break up compact clinker, thus eliminates uneven burning, uneven cement quality

FIG. 4.54
PARRILLA ROTATORIA

un sistema de tres compuertas, alojadas en una caja subdividida en tres cámaras. Las tres compuertas se abren y cierran sucesivamente con el objeto de extraer el clínker al exterior, pasando de una cámara a otra sin desarrollar polvo y sin permitir que escape el aire del interior del horno (hermeticidad).

Los ciclos de trabajo del sistema de compuertas van desde uno a siete ciclos por minuto aproximadamente, al objeto de adaptarlos a la cantidad de material que se quiera descargar, por unidad de tiempo, y que puede alcanzar hasta 200 t de clínker diarias.

4.3.6 Comparación entre Ambas Tecnologías

- Las miniplantas de cemento son más fáciles de construir y emplean menos acero. La cantidad de acero por capacidad de producción en toneladas anuales es de sólo un cuarto de acero de una moderna planta de horno rotatorio.
- Los hornos verticales tienen una capacidad por metro cúbico mayor que el horno horizontal.
- Los hornos verticales ocupan mucho menos espacio que los hornos horizontales, para la misma capa-

idad requieren de casi la séptima parte del espacio.

- Los administradores de las plantas a menor escala en la China, sostienen que el número de calidad de su cemento excede usualmente los 400. Esto significa 400 Kp/cm^2 y es el valor de la prueba cuando se mide la fuerza compresiva después de 28 días. Esto corresponde a 39.2 Megaspascal. Juntos son, de acuerdo a las regulaciones de Estado seis clases de cemento. Estas son 200, 250, 300, 400, 500 y 600 Kp/cm^2 . Dado que los métodos de prueba son comparables con los que especifica la Institución Británica de Standards, el cemento que se produce en las plantas a menor escala se compara favorablemente con el cemento Portland de las plantas a gran escala. El uso en la China de cemento producido localmente para muchos propósitos de construcción en áreas rurales no ha sido puesto en duda en lo que se refiere a calidad. Existen publicaciones en los que se indica la calidad de cemento que se usa para varios propósitos en las áreas rurales. Los productos cubiertos incluyen trabajos de irrigación, bloques de construcción, puentes, tuberías, cilindros de cemento; según estos informes casi todos estos productos pueden fabricarse usando cemento No. 400.

- Los hornos verticales son más flexibles de operar que los hornos horizontales, siendo posible detener el horno en cualquier momento y volverlo a encender sin perder el calor del horno, lo que es imposible con los hornos horizontales.
- Los hornos verticales requieren de mucho menos tiempo de fabricación e instalación que el horno horizontal; además su fabricación es sencilla.
- Los hornos verticales pueden funcionar con pequeños depósitos de materiales crudos y están ubicados en áreas en donde el transporte es difícil.
- Los hornos verticales a diferencia de los hornos horizontales no necesitan complicadas plantas de empaquetamiento ni estar ubicadas en áreas de gran consumo de cemento.
- En cuanto al consumo de energía; en hornos horizontales comunmente se tiene de 5,450 kJ/kg clinker a 5,670 kJ/kg clinker para proceso húmedo y para el proceso en seco de 3,150 kJ/kg clinker 3,350 kJ/kg clinker. Para hornos verticales el consumo promedio es de 3,690 kJ/kg clinker.
- El límite para la utilización de hornos de una tecnología determinada es de 700 t/d. Cuando la

producción es inferior se prefieren los hornos verticales (es más económico), cuando es superior el horno rotativo presenta ventajas.

CAPITULO 5

EVALUACION DE LAS ALTERNATIVAS DE TAMAÑO Y LOCALIZACION EN FUNCION DE LOS FACTORES LOCALES

5.1 Tamaño

5.1.1 Relación Tamaño-Mercado

Las **regiones más** alejadas de los centros de producción, por sus **especiales características** geográficas y económicas, constituyen un **mercado potencial** para el cemento producido en hornos verticales. También favorece este hecho el alto costo de transporte (más de las **dos terceras partes del costo total del cemento** en algunas zonas) lo que ocasiona que los precios de venta sean limitantes para que **muchos** sectores puedan llevar **cabo sus proyectos.**

Lo que se pretende en principio, es al menos sustituir la mitad del consumo de cemento que se produce en los centros productores con hornos horizontales por cemento producido en hornos verticales de **pequeña capacidad situados** en zonas **próximas** a los centros de consumo y cuyo precio es relativamente menor según lo mostrado anteriormente, considerando además los innumerables problemas que se presentan en la distribución, transporte y comercialización del cemento.

3.2 Relación Tamaño-Disponibilidad de Recursos

Los insumos requeridos para la producción industrial son:

a) El Carbón

Veamos la tabla siguiente:

Tabla 5.1
Reservas Mineras de Carbón
(Millones de Toneladas Métricas)

Area	Reservas	Tipo de Carbón	Poder Calorífico (KJ/Kg)
Dyon	42 probadas	semibituminoso	29,310
azuna	25 probadas	semiantracita	29,310-31,820
Tarica-Sihuas	80 estimadas	antracita	30,940-31,400
Conchucos	80 estimadas	antracita	29,310-30,370
San Marcos-			
Huallanca	50 estimadas	antracita	no establecido
Alto Chicama	329 estimadas	antracita	29,300-31,400
Jatunhuasi	60 estimadas	sub bituminoso	29,300
Yanacancha	25 estimadas	bituminoso	29,300
Piipala	50 estimadas	antracita	26,800-31,820
Cupisnique	3 estimadas	antracita	29,120-31,400
Carumas	3 estimadas	sub bituminoso / antracita	no establecido
Pebón / Chamira	100 estimadas	lignito	no establecido

Fuente: Economía del Carbón y Coque INCITEMI, 1977

Existen también pequeños yacimientos de carbón en los departamentos de Cajamarca, Amazonas, Huancavelica y Apurímac.

b) Caliza

Existen en el país depósitos de materiales calcáreos distribuidos en los Andes y zonas circundantes.

Tabla 5.2
Producción de Caliza

Departamento	Toneladas métricas
Lambayeque	10,070
Ancash	75,103
Cajamarca	173,179
La Libertad	8,118
Huánuco	112
Junín	864,761
Lima	1,200,773
Pasco	1,616
Huancavelica	5,458
Ica	10,902
Cuzco	3,407
Arequipa	217,469
Puno	160,503

Fuente: Inventario Nacional de Sustancias No Metálicas, INGEMMET, DGG, 1982

ITINTEC en 1981 preparó un estudio preliminar de calizas para fabricación de cemento en el Valle del Huabanga, habiéndose identificado yacimientos en las siguientes áreas de la Provincia de Barranca: Cáceres en el Departamento de San Martín; Santa Cruz, Río Tocayo, Río Cachiyaqui, Áspusana, Cerro Muyuna, Cayumba

De otras investigaciones efectuadas en la región de la Selva se han determinado probables yacimientos en las siguientes zonas:

- **Borja - Pongo de Manseriche:** Cánceras en la cordillera Campanaqui entre las localidades de Borja y Tenente Pongo con reservas probables de 10'000,000 de toneladas de piedra caliza.

Región Huallaga Central: se han determinado posibles yacimientos de caliza en Rioj, Tioyacu, Pucallpa, Yanapoto, Huayabamba, Pongo Sabaloyacu.

Pucallpa: localidad de **Aguas Calientes.**

c) Yeso y Arcilla

Que intervienen en una pequeña proporción en la fabricación de cemento.

Tabla 5.3
Producción de Yeso y Arcilla
(Toneladas Métricas)

	Yeso	Arcilla
Ancash	2,000	6,590
Cajamarca		33,921
La Libertad	2,000	4,073
Junín	18,000	41,590
Lima	160,000	42,439
Pasco	1,500	
Ayacucho		1,000
Huancavelica	20,000	1,000
Ica		1,000
Cuzco	1,000	20,713
Arequipa	3,000	
Puno	7,000	24,093
Apurímac	900	

Fuente: Inventario Nacional de Sustancias No-Metálicas, INGENMET, DGG, 1982

También han sido detectados yacimientos de yeso sobre el Río Uchayta a una distancia entre 15 y 30 Km. de Pucallpa.

d) Energía Eléctrica

El consumo de energía eléctrica para una n^o instalación de cemento con hornos verticales es de aproximadamente 100 Kw.h por tonelada de cemento.

5.1.3 Relación Tamaño-Mano de Obra

No se requiere de personal altamente especializado para las labores que requiere la producción de cemento. La preparación de personal es sencilla.

tiempo que consume esta preparación es relativamente pequeña. Por lo tanto, no será necesario contratar personal que no sea de la región donde se instalen los hornos.

5.1.4 Relación Tamaño-Localización

La localización condiciona el tamaño de la planta a través de los costos de transporte de las materias primas, del personal y de los productos terminados. Así por ejemplo a medida que aumenta la distancia que tiene que recorrer la materia prima, aumentan los costos de transporte y por consiguiente los costos de producción. Los beneficios generados por el proyecto compensan estos costos hasta determinados tamaños de planta, por encima del cual la operación se torna antieconómica.

En el caso de este estudio, el transporte de materia prima no es relevante para el tamaño ya que el propósito es instalar los hornos cerca de las canteras de explotación económica más conveniente. En la comercialización del cemento un elemento importante que eleva los precios de venta es el flete de producto terminado. Estos costos de transporte delimitan el tamaño de la zona abastecer por consiguiente el tamaño de la planta.

Para determinar la magnitud de la zona de influencia de la fábrica de cemento en función de los fletes de transporte se debe tomar en cuenta lo siguiente:

Los precios de venta se tienen que comparar con los precios de venta del cemento producido en las plantas con hornos horizontales más el flete por transporte al sitio de consumo.

Se podría abaratar el precio del cemento, distribuyéndolo en granel o como clinker.

5.3.5 Determinación del tamaño de Planta

En concordancia a los parámetros delimitados anteriormente y resaltando que las consideraciones más importantes para determinar el tamaño de la planta deben ser: la sustitución del cemento producido en las grandes plantas cementeras a un elevado costo por el cemento producido en miniplantas con hornos verticales a un precio comparativamente menor y lograr cubrir la demanda de la mayor cantidad posible de poblaciones cercanas a las miniplantas.

Teniendo en cuenta las provisiones anteriores se puede admitir una capacidad instalada nominal de 25-30 t/d para cada horno que se instale.

5.2 Localización

5.2.1 Localización en Función de la Disponibilidad de Insumos.

Considerando que los materiales de que disponen las canteras localizadas en los estudios preliminares pueden ser utilizados en la fabricación de cemento, que las reservas satisficieran las necesidades de la planta; su ubicación en función de las materias primas fundamentales (caliza, arcilla) puede ser efectuada indistintamente en cualquiera de las zonas donde están localizadas las canteras, sin embargo también hay que analizar la influencia de los requerimientos de las otras materias primas (correctivos y yeso) y los otros insumos (antracita y tal vez envases).

5.2.2 Localización en Función del Mercado

Considerando que en la actualidad los precios los cuales se abastece el cemento en regiones alejadas son altos, por influencia de los fletes, la localización de la planta en función del mercado está orientada a ubicarla en aquella zona en la que se logra una minimización de la incidencia del factor anotado.

5.2.3 Localización en Función de los Servicios de Infraestructura.

La localización de la nueva planta en función de

los servicios de infraestructura se orienta a determinar cuál de ellas ofrece mayores ventajas como por ejemplo:

Existencia de servicios básicos como hospitales, escuelas, vivienda, etc.

Comunicación con las principales ciudades

Los planes de desarrollo prevean que la zona sea considerada polo de desarrollo.

5.2.4 Localización en Función de Estrategias de Desarrollo

Quizás el principal factor que favorece la implementación de las miniplantas de cemento con hornos verticales repercute favorablemente en la aceleración del desarrollo de las localidades donde se instalen.

De aquí se puede deducir que a mayor cantidad de miniplantas mayor área de influencia y en consecuencia mayor desarrollo en el país.

5.2.5 Lugares de Posible Instalación de las Miniplantas

En la Figura 5.1, se indican algunas alternativas de localización de las miniplantas de cemento como son: Ecorja, Rioba, Contamana, Tingo María, Urubamba.

CAPITULO 6

INGENIERIA

6.1 Proceso de Producción de Cemento en Horno Vertical

1.1 Materias Primas para la Obtención de Clinker

a) Combustible

Las exigencias **térmicas son menores** 4600 kJ/Kg clinker. Se requiere de coque o antracita por **contener** una proporción de volátiles muy **pequeña**, o de lo contrario las fracciones altamente volátiles son **desilados** en la zona alta del horno y contaminan la zona de clinkerización. El **poder calorífico debe ser tan alto como se pueda obtener** de preferencia de unos 27,200 kJ/Kg carbón 29,250 kJ/Kg carbón; la **clase de ceniza es importante**, su **análisis** es parte de la carga que va a convertirse en clinker.

El combustible debe cumplir las **siguientes especificaciones: (Anselmi Alemania):**

Antracitas:

Volátiles	a	8 %
Ceniza	b	a 15 %
Água	4	a 6 %
Poder Calorífico	27,200	29,250 kJ/kg carbón

Coque:

Volátiles	2	%
Ceniza	6	15
Água	4 a 10	%
Poder Calorífico	27,200	29,350 KJ/Kg carbón

El Crudo

Para fabricar cemento pueden utilizarse tanto minerales de origen **natural** como **productos** industriales. Como materiales de partida **sirven** **sustancias** minerales, que **contienen** los **componentes** principales **del** cemento: cal, sílice, alúmina **óxidos** de **hierro**. Estos componentes **raramente** se encuentran en **las** proporciones deseadas, en un sola sustancia.

Por tanto, **la** mayoría de las veces se **ha** **de** **elegir** **la** mezcla **de** un componente rico en **cal** (componente calcreo) con otro pobre **en** cal pero que contiene más alúmina y óxidos de **hierro** (componente arcilloso). **Estos** dos componentes **son** por lo **general** la caliza y la arcilla.

la composición química del crudo **para** horno vertical es prácticamente **la** misma que para el horno rotatorio. Es esencial tener **una** distri-

bución uniforme en una condición homogénea. Para una adecuada clinkerización en un horno vertical, sin embargo es importante también que el contenido de hierro y aluminio sea alto en proporción a sílice. Puede ser necesario en algunos casos, que se añada aluminio en forma de arcilla y bajo ciertas condiciones puede ser aconsejable agregar por ejemplo mineral de hierro para aumentar el contenido de hierro.

Las experiencias efectuadas aquí (ITINTEC) y en el extranjero indican que las especificaciones de la mezcla de calizas y arcilla se deben acortar al siguiente promedio

SiO ₂	14.0 %
Al ₂ O ₃	3.5 %
Fe ₂ O ₃	2.0 %
CaO	45.0 %
MgO	8 %
SO ₃	0.8 %

Comparando análisis químicos se pueden relacionar los porcentajes de los cuatro óxidos fundamentales del cemento: CaO, SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃. Estas relaciones llamadas **módulo** en las proporciones más favorables definen la calidad del cemento.

Módulo de Silicatos



Que define hasta **cierto punto** las condiciones de cocción, así su incremento implica el **descenso** de la fase líquida y **baja** su tendencia a la formación costras.

Módulo Aluminoso ó Ferrico



Este **módulo** es decisivo para la composición de la fase líquida del clinker. Es el que va a determinar **condiciones** en el fraguado.

Índice de Standard de Cal

No **slo** presenta una relación ponderal, sino **expresa la cantidad de cal** capaz de combinarse en condiciones **normales** de cocción y enfriamiento, y por tanto define en **forma más exacta** la calidad del cemento:

Este índice está dado por:

$$\frac{100 \text{ CaO}}{2.8 \text{ SiO}_2 + 1.1 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0.7 \text{ Fe}_2\text{O}_3} \approx 95 \text{ a } 100$$

c) Cálculo de las Proporciones Crudo Combustible

La experiencia indica que por cada 100 partes de crudo se volatizará un aproximado de 37 partes lo cual nos dará la siguiente relación:

$100 - 37 = 63$ partes de clínker con lo que se determina la relación crudo-clínker en:

$$\frac{100 \text{ crudo}}{63 \text{ clínker}} \approx 1.6 \quad \frac{\text{Kg crudo}}{\text{Kg clínker}}$$

Sabemos por el y 6.1.4 que :

$$1.6 \frac{\text{Kg crudo}}{\text{Kg clínker}} * \frac{\text{Kg clínker}}{4,495 \text{ KJ}} * \frac{28,000 \text{ KJ}}{\text{Kg carbón}}$$

$$9.967 \frac{\text{Kg crudo}}{\text{Kg carbón}} \approx 0.100 \quad \frac{\text{Kg carbón}}{\text{Kg crudo}}$$

Entonces para obtener una tonelada de clínker necesitaríamos 1.6 toneladas de crudo y 0.10 toneladas de carbón.

6.1.2 Obtención del Clinker en Horno Vertical

a) Proceso de Formación del Clinker Fases Mineralógicas

El clinker de cemento no es una combinación pura sin fases de cristales mixtos que contienen los componentes de otras fases, en pequeñas cantidades en enlace cristalino. Sin embargo, de todas ellas se pueden señalar sus principales fases mineralógicas.

- 1. Silicato Tricálcico (C₃S) Alita. Es el principal decisivo mineral del clinker para sus propiedades resistentes, su formación se presenta a temperaturas de 1400 a 1450 °C.
- 2. Silicato Dicálcico (C₂S) Belita. Este presenta propiedades hidráulicas, se endurece más lentamente que la alita, después de largos plazos alcanza la misma resistencia. Su formación se produce a temperaturas entre 1200 y 1300 °C.
- 3. Ferrito Aluminato Teترacálcico (C₃AF) y el Aluminato Tricálcico (C₄A), que intervienen en la fragua del cemento. Constituyen la fase líquida en el clinker y su formación se da por los 1200 °C.

La **formación mineralógica** del clinker se va desarrollando en todo un proceso térmico

100 °C Se da la **evaporación del agua higroscópica**

300 °C Y superiores, **crystalización** de materiales arcillosos. Descomposición del carbonato de calcio

$$\text{CO}_2 \text{ Ca} \xrightarrow{\text{Calor}} \text{CaO} \text{ CO}_2$$

$$\text{CaCO}_3 \xrightarrow{900-1200^\circ\text{C}} \text{CaO} + \text{CO}_2$$
 Reacción entre la cal y la alúmina óxido ferrico

$$\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{CaO} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaO} \text{ (C3A)}$$

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 + 4\text{CaO} \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{CaO} \text{ (C4AF)}$$

Ambos compuestos forman **una** masa líquida en la cual flotan el SiO_2 y CaO

1200 - 1300 °C Reacciona la cal con la sílice para dar el silicato **bi**calcico

$$\text{SiO}_2 + 2\text{CaO} \rightarrow \text{SiO}_2 \cdot 2\text{CaO} \text{ (C2S)}$$
 1400 - 1450 °C Una parte de **silicato bi**calcico reacciona con la cal **restante** para **formar** silicato **tri**calcico

$$\text{SiO}_2 \cdot 2\text{CaO} + \text{CaO} \rightarrow \text{SiO}_2 \cdot 3\text{CaO} \text{ (C3S)}$$

6.1.2.2 Calce de Formación de Clinker

De los **numerosos** factores que influyen en el funcionamiento del horno vertical tienen dos de carácter **primario**, los cuales presuponen condiciones cuyo incumplimiento

hace ineficaces los más modernos hornos y métodos. Se trata de la composición química en relación con el calor teórico de formación de clinker y la dosificación del combustible. La producción de un clinker de alta calidad requiere una preparación rigurosa del crudo que se extiende tanto a su composición como a su estado físico. El calor teórico de formación de un clinker determinado es función de la composición química del mismo, ya que no se trata de un compuesto definido sino de una mezcla de compuestos. Varía la composición del crudo, varía igualmente el calor de formación del clinker precisándose más o menos combustible en el horno vertical, donde el crudo y el combustible se mezclan de antemano, no es posible la regulación continua del combustible, una vez introducido en el horno. Si existe un exceso de carbón, el clinker presenta zonas de reducción y funde en parte, siendo prácticamente imposible adoptar continuamente la cantidad de carbón. Las variaciones del crudo, el único camino factible para suministrar el calor necesario que cubra el calor teórico de formación de clinker

consiste en mantener la composición del crudo y la dosificación del carbón constante.

Según Gottlieb se puede considerar como típico el siguiente balance de calor (Tabla 6.1)

Gottlieb **considera que el horno en referencia tenía una deficiencia en el aislamiento de las paredes.**

6.1.2.3 Características del Clinker Correctamente Cocido

Tiene una estructura porosa o suelta. Debido a la acción de fracturación de la parrilla, el clinker de horno vertical generalmente está recubierto con polvo grisáceo amarillento. El clinker limpio toma un aspecto fino y negro con cristales brillantes.

La estructura porosa garantiza buen apagado y buena calidad del clinker y enfriamiento necesario para su molienda. El clinker de horno vertical es menos denso y duro que el de horno horizontal, por lo que su molienda es más económica.

6.1.3 Obtención del Cemento

El cemento se fabrica partiendo de clinker con adición de yeso u otro sulfato cálcico y moliendo el conjunto hasta gran finura.

La adición de yeso sirve para retardar el tiempo

de fraguado. La roca natural llamada yeso, habitualmente usada $SO_4 \cdot Ca \cdot 2H_2O$, es sustituido a veces ⁴ ² totalmente por otra roca natural llamada anhidrita.

El valor máximo admisible según DIN 1164 para el Portland, Portland siderúrgico es 3.5% expresado en SO_3 y cuando la finura supera a los 4,000 cm^2/g de superficie específica, el límite es de 4.0%. En USA para cemento denominado comercialmente normal, tipo I, con contenido de ³ hasta lo sumo 8.0% el límite para SO_3 es 2.5%; cuando ³ Al supera 8%, ese límite pasa a 4% para los cementos muy molidos, correspondientes tipo III, en los dos casos considerados, el límite superior para el SO_3 pasa a 3 y 4%.

6.2 Diseño de Equipos Indispensables en las Miniplantas

Existen equipos que caracterizan las miniplantas de cemento como son el horno vertical mismo las esclusas de descarga; la parrilla de extracción de clinker y el peletizador. Por considerarlas fundamentales en el desempeño de las miniplantas desarrollaremos el diseño de la parrilla el peletizador, para lo que inicialmente haremos consideraciones de tipo experimental (basados en los trabajos realizados en el ITINTEC), luego pasaremos al cálculo teórico para finalmente pasar al diseño en sí.

6.2.1 Diseño del Peletizador

En el ITINTEC se realizaron varias pruebas con un peletizador de 800 mm de diámetro y 200 mm de altura perisérica; variando la velocidad de rotación, ángulo de inclinación, la forma de alimentación del crudo, el sistema de rociado de agua, variación de la altura del plato, etc., con fin de establecer las condiciones más favorables de trabajo y lo que es más importante para cálculo teórico y la forma en que se distribuirá el material una vez que rotaba el plato.

Es así que esta distribución se ha dividido en tres partes. Según la Fig. 6.1 BCD cuya sección se considera como un trapecio, BOD cuya sección es un triángulo, AOB y DOE cuyas secciones también son consideradas como triángulos (todos los cortes están considerados en el plano XZ). Hechas estas consideraciones y mediante cálculo integral se han obtenido los datos requeridos para el diseño.

6.2.2 Diseño de la Parrilla

La parrilla tiene varios requerimientos que satisfacer, tenemos por ejemplo la extracción de material al régimen ya establecido a un tamaño adecuado previo rompimiento del material, que permita una alimentación de aire uniforme a lo largo del horno; además la caída de material por

efecto de la parrilla debe ser efectuada de tal manera que no se distorsione la zona más caliente del horno (zona de clinkerización).

La parrilla debe proveer un rango para el tiempo de retención y residencia convenientes para los pellets.

El diseño de la parrilla trata de solucionar todas las dificultades. Para no distorsionar la zona de clinkerización y obtener una caída apropiada del material, se opta por un descentramiento entre las pirámides de escalones, bridas y la llanta; este descentramiento será de 12 mm para evitar que sufran los ladrillos por el abecceo que esto ocasionará en la parrilla. Es interesante anotar que este descentramiento y el abecceo que ocasiona removerá al material y también lo romperá.

Las aristas de las bridas o escalones siguen un perfil curvo para facilitar el desplazamiento de aire y permitir que la caída de material por ese perfil tenga una velocidad conveniente y no sea muy diferente con respecto a la velocidad del material que cae en la zona adyacente a la pared del horno. Se ha optado por el amarre de bridas mediante pernos porque es más fácil hacer futuras mejoras en la parrilla.

La altura de cada brida se determina por los problemas de amarre y por la necesidad de practicarle las ranuras radiales para la salida de aire . Con respecto a las muelas postizas para el rompimiento del material, estos poseen ojos chinos para que se puedan desplazar con respecto a sus pernos de amarre y así puedan controlar el flujo de material, cerrando o abriendo la salida.

6.2.3 Cálculos

Paletizador

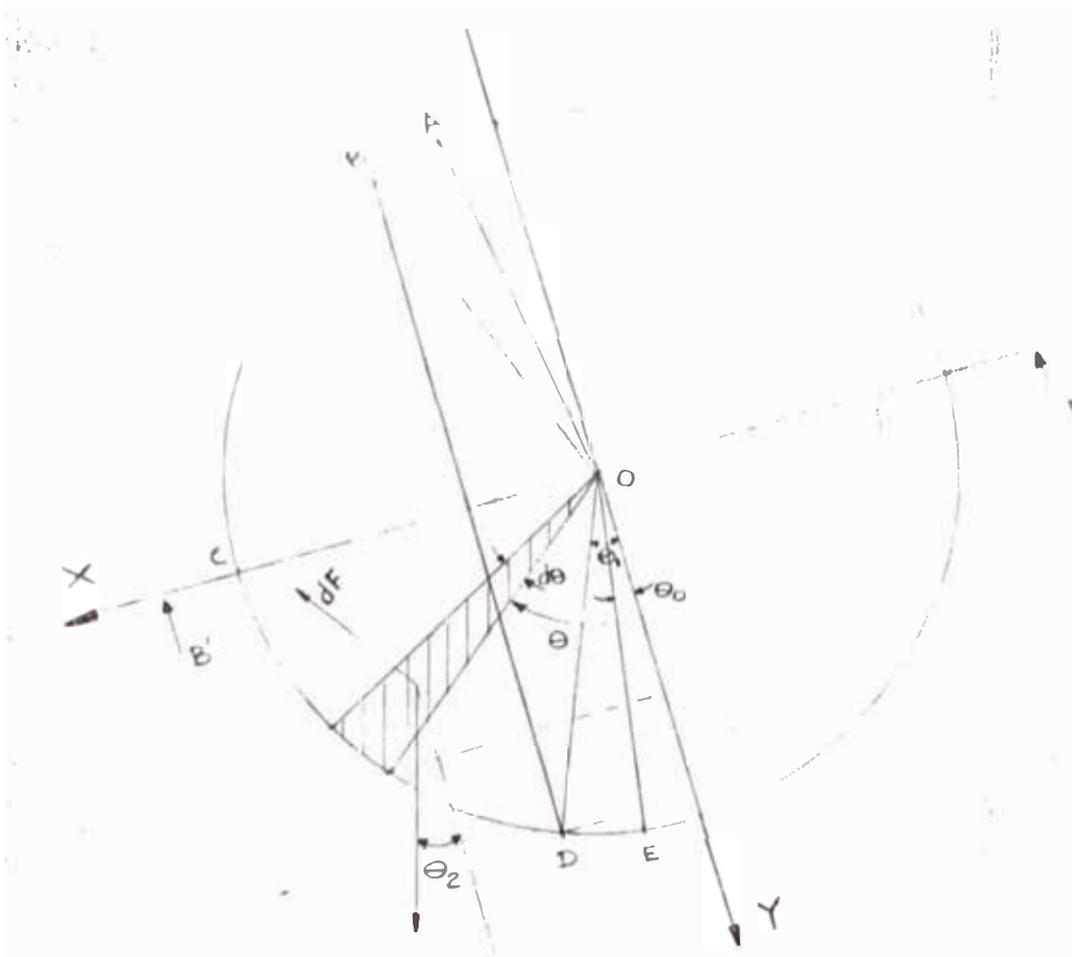


Fig. 6.1. Distribución de material en el paletizador

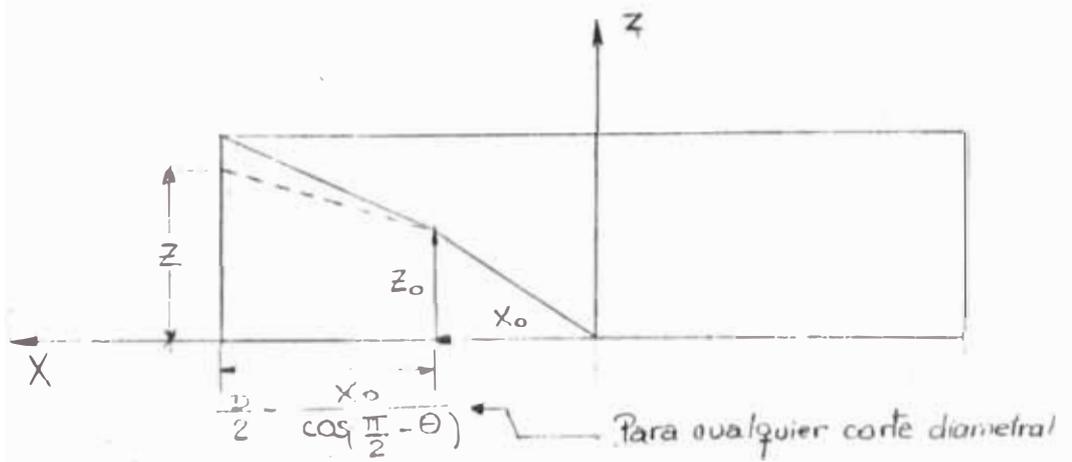


Fig. 6.2. Corte B-B

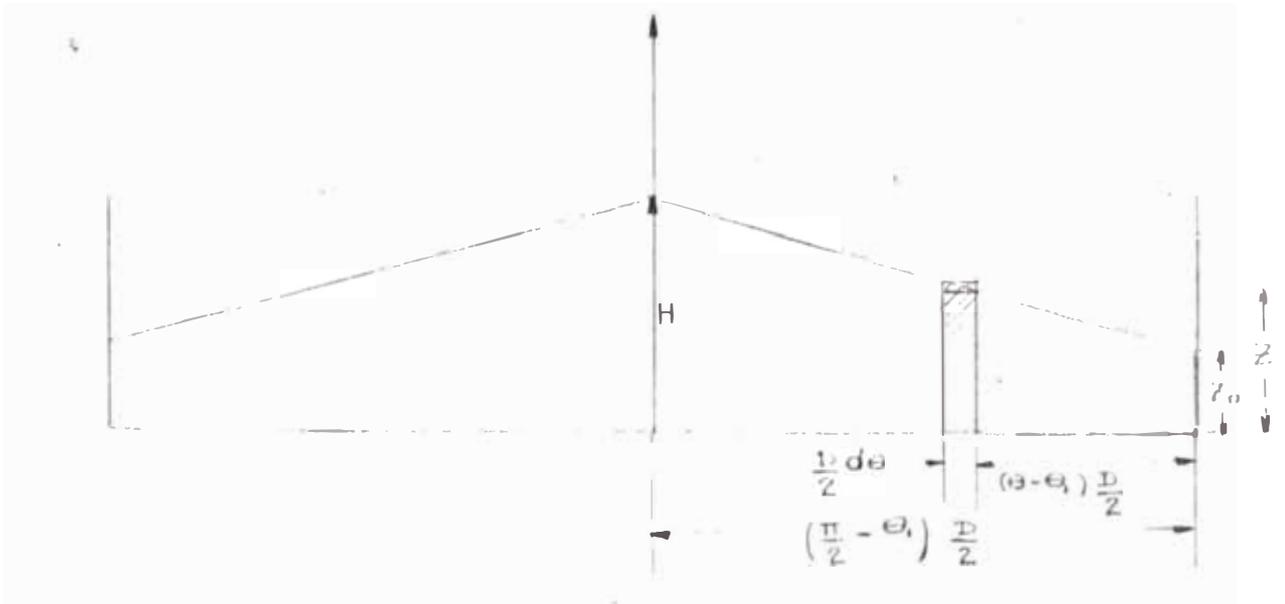


Fig. 6.3. Perfil del material. Desarrollo de arcos

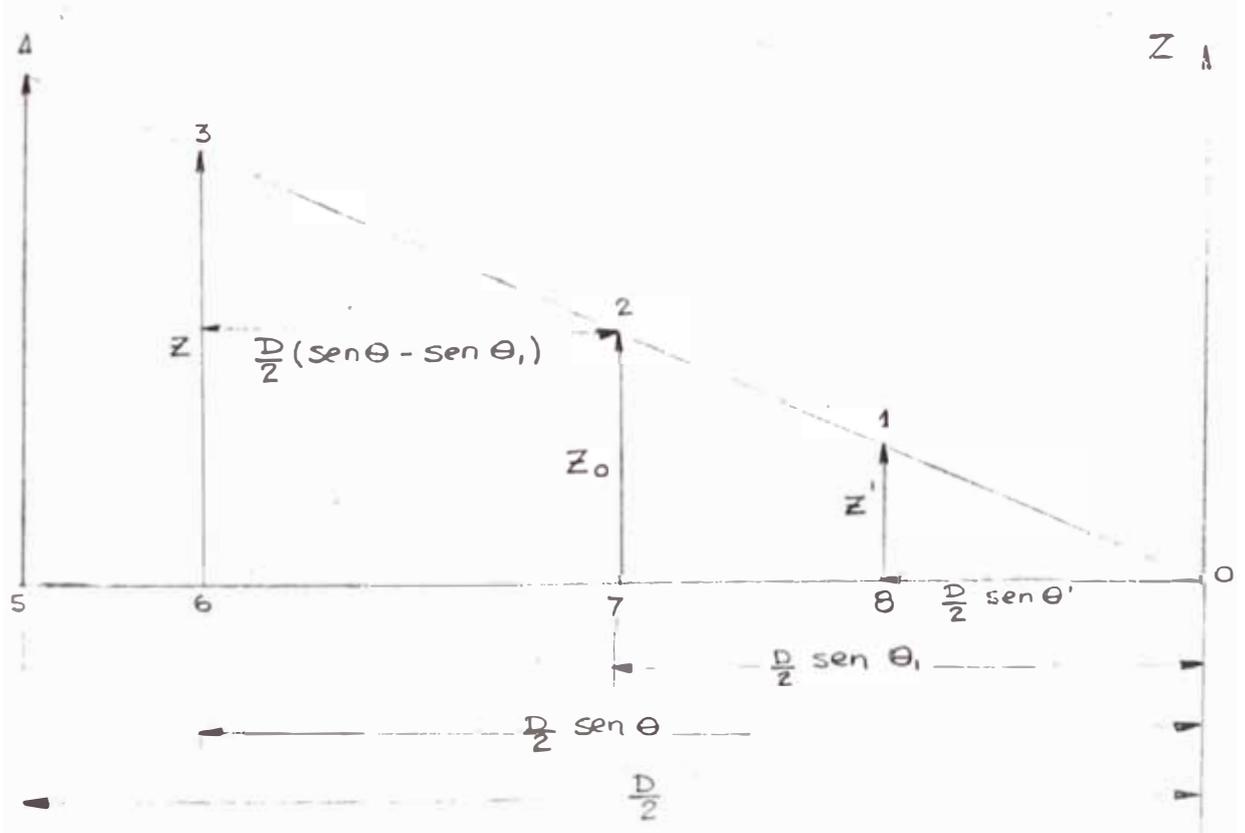


Fig. 6.4. Proyección de alturas y sus brazos respectivos en el plano XZ

De Fig.

$$\frac{z - z_0}{H - z_0} = \frac{\frac{D}{2} \operatorname{sen} \theta - \frac{D}{2} \operatorname{sen} \theta_1}{\frac{D}{2} - \frac{D}{2} \operatorname{sen} \theta_1}$$

$$z - z_0 = \frac{\operatorname{sen} \theta - \operatorname{sen} \theta_1}{1 - \operatorname{sen} \theta_1} (H - z_0)$$

Calculando el área para integración para V_1 que en la fig. 6.1 corresponde a BCD y en la fig. 6.4 a 2-3-6-7.

$$A_1 = \frac{z - z_0}{2} \frac{D}{2} = \frac{\operatorname{sen} \theta - \operatorname{sen} \theta_1}{\operatorname{sen} \theta}$$

$$dV_1 = A_1 \frac{\left(\frac{D}{2} d\theta + \frac{D \operatorname{sen} \theta_1}{2 \operatorname{sen} \theta} d\theta \right)}{2}$$

$$= A_1 \frac{D}{4} \left(1 + \frac{\operatorname{sen} \theta_1}{\operatorname{sen} \theta} \right) d\theta$$

$$dV_1 = \frac{D^2}{16} (z + z_0) \left(\frac{\operatorname{sen}^2 \theta - \operatorname{sen}^2 \theta_1}{\operatorname{sen}^2 \theta} \right) d\theta$$

$$dV_1 = \frac{D^2}{16} \left[\left[\frac{(H-z_0) \operatorname{sen} \theta_1}{2z_0 - \frac{(H-z_0) \operatorname{sen} \theta_1}{1 - \operatorname{sen} \theta_1}} + \frac{(H-z_0) \operatorname{sen} \theta}{1 - \operatorname{sen} \theta_1} \right] \left(1 + \frac{\operatorname{sen}^2 \theta_1}{\operatorname{sen}^2 \theta} \right) \right] d\theta$$

Haciendo :

$$C_1 = 2z_0 - \frac{(H-z_0) \operatorname{sen} \theta_1}{1 - \operatorname{sen} \theta_1}$$

$$C_2 = \frac{H-z_0}{1 - \operatorname{sen} \theta_1}$$

$$\frac{16dV_1}{D^2} = \left[C_1 + C_2 \operatorname{sen} \theta - C_1 \operatorname{sen}^2 \theta_1 \operatorname{csc}^2 \theta - C_2 \operatorname{sen}^2 \theta_1 \operatorname{csc} \theta \right] d\theta$$

$$\frac{16V_1}{D^2} = \int_{\theta_1}^{\pi-\theta_1} \left[C_1 + C_2 \operatorname{sen} \theta - C_1 \operatorname{sen}^2 \theta_1 \operatorname{csc}^2 \theta - C_2 \operatorname{sen}^2 \theta_1 \operatorname{csc} \theta \right] d\theta$$

$$\frac{16V_1}{D^2} = C_1 \theta \Big|_{\theta_1}^{\pi-\theta_1} - C_2 \cos \theta \Big|_{\theta_1}^{\pi-\theta_1} + C_1 \operatorname{sen}^2 \theta_1 \operatorname{ctg} \theta \Big|_{\theta_1}^{\pi-\theta_1} + C_2 \operatorname{sen}^2 \theta_1 \ln [\operatorname{csc} \theta - \operatorname{ctg} \theta] \Big|_{\theta_1}^{\pi-\theta_1}$$

$$\frac{16V_1}{D^2} = C_1 (\pi - 2\theta_1) + C_2 \cos \theta_1 - C_1 \operatorname{sen}^2 \theta_1 \operatorname{ctg} \theta_1 + C_2 \operatorname{sen}^2 \theta_1 \ln \left[\frac{1 - \cos \theta_1}{1 + \cos \theta_1} \right]$$

$$V_1 = \frac{D^3}{16} \left[\left[\frac{(H-z_0) \sin \theta_1}{2z_0 - 1 - \sin \theta_1} \right] \left[\pi - 2\theta_1 - 2\sin \theta_1 \cos \theta_1 \right] \right. \\ \left. + \left[\frac{H - z_0}{1 - \sin \theta_1} \right] \left[2\cos \theta_1 + \sin^2 \theta_1 \ln \left[\frac{1 - \cos \theta}{1 + \cos \theta_1} \right] \right] \right]$$

$$V_1 = \frac{D^3}{16} \left[\left[\frac{(H-z_0) \sin \theta_1}{2z_0 - 1 - \sin \theta_1} \right] \left[\pi - 2\theta_1 - \sin^2 \theta_1 \right] \right. \\ \left. + \left[\frac{H - z_0}{1 - \sin \theta_1} \right] \left[2\cos \theta_1 + \sin^2 \theta_1 \ln \left[\frac{1 - \cos \theta}{1 + \cos \theta_1} \right] \right] \right]$$

Area de integración de V_2

En la fig. $A_{22} = 0 - 1 - 8 - 0$

$A_{21} = 0 - 1 - 2 - 7 - 8 - 0$

$$A_{21} = z_0 \frac{D}{4} \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta'}$$

$$A_{22} = z' \frac{D}{4} = \frac{D \sin \theta' z_0}{4 \sin \theta_1}$$

$$z' = \frac{\sin \theta' z_0}{\sin \theta_1}$$

$$dV_2 = A_{21} \frac{D \operatorname{sen} \theta_1 d\theta'}{2 \operatorname{sen} \theta_1} + A_{22} \frac{D d\theta'}{2}$$

$$V_2 = \int_{\theta_0}^{\theta_1} \frac{D^2 \operatorname{sen} \theta' z_0 d\theta'}{16 \operatorname{sen} \theta_1} + \int_{\theta_1}^{\pi-\theta_1} \frac{D^2 \operatorname{sen}^2 \theta_1 z_0 d\theta'}{16 \operatorname{sen}^2 \theta_1} + \int_{\pi-\theta_1}^{\pi-\theta_0} \frac{D^2 \operatorname{sen} \theta' z_0 d\theta'}{16 \operatorname{sen} \theta_1}$$

$$V_2 = \frac{D^2}{16} \left[\frac{2 z_0}{\operatorname{sen} \theta_1} (\cos \theta_0 - \cos \theta_1) + 2 z_0 \operatorname{sen}^2 \theta_1 \operatorname{ctg} \theta_1 \right]$$

Tomando $z_0 = fH$

$$V_1 = \frac{D^2 H}{16} \left[\left[2f - \frac{(1-f) \operatorname{sen} \theta_1}{1 - \operatorname{sen} \theta_1} \right] + \left[\pi - 2\theta_1 - \operatorname{sen}^2 \theta_1 \right] + \left[\frac{1-f}{1 - \operatorname{sen} \theta_1} \right] \left[2 \cos \theta_1 + \operatorname{sen} \theta_1 \ln \left[\frac{1 - \cos \theta_1}{1 + \cos \theta_1} \right] \right] \right]$$

$$V_2 = \frac{D^2 H}{16} \left[\frac{4f (\cos \theta_0 - \cos \theta_1)}{1 - \operatorname{sen} \theta_1} + 2f \operatorname{sen} 2\theta_1 \right]$$

Evaluando formulas por tanteo

θ_0/θ_1	$\pi/12$	$\pi/10$	$\pi/8$	$\pi/7$
	$\pi/6$	$\pi/6$	$\pi/6$	$\pi/6$
$\frac{16V_1}{HD^2}$	2.855f-0.3982	2.855f-0.3982	2.855f-0.3982	2.855f-0.3982
$\frac{16V_2}{HD^2}$	2.5313f	2.4123f	2.1949f	2.0116f
f	1.2302	0.8995	0.6032	0.4721
X	3.1140	2.1698	1.3240	0.9496

$$\frac{16V^2}{HD^2} = X \quad V_2 = \frac{HD^2}{16} X \quad V_{TOTAL} = \frac{HD^2}{8} X$$

Tomando datos experimentales

H = 0.20 m. D = 0.80 m. Γ = peso por volúmen de
 pelets = $2 \times 10^3 \frac{Kg}{m^3}$

Carga en el plato : 30 Kg. $V = 1.5 \times 10^{-2} m^3$

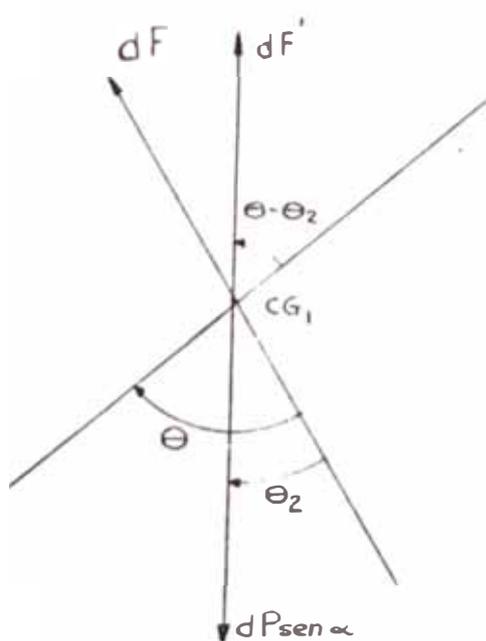
$$1.5 \times 10^{-2} = \frac{0.2 (0.8)^2}{8} X$$

$$X = \frac{1.5 \times 10^{-2} \times 8}{0.2 (0.8)^2} = 0.9375$$

que corresponde a $\theta_0/\theta_1 = \frac{\pi/7}{\pi/16}$

- Cálculo del Torque

Torque₁ Para el volumen 1, el plato actúa levantando material; este permanece casi suspendido en una posición.



α = ángulo de inclinación - del plato peletizador.

$$dF' = dP \operatorname{sen} \alpha$$

$$dF \operatorname{sen} (\theta - \theta_2) = dP \operatorname{sen} \alpha$$

$$dF' = dF \operatorname{sen} (\theta - \theta_2)$$

$$CG_1 = \frac{D \operatorname{sen} \theta_1}{2 \operatorname{sen} \theta} + \frac{D}{2} = \frac{D \operatorname{sen} \theta_1}{2 \operatorname{sen} \theta} + \frac{D}{2}$$

$$CG_1 = \frac{D}{4} \left(1 + \frac{\operatorname{sen} \theta_1}{\operatorname{sen} \theta} \right)$$

Fig. 6.5

Torque₂ Para el volumen 2, el material actúa con fricción, se levanta y cae.

$$CG_{21} = \frac{2}{3} \frac{D \operatorname{sen} \theta_1}{2 \operatorname{sen} \theta} = \frac{D \operatorname{sen} \theta_1}{3 \operatorname{sen} \theta}$$

$$T_{21} = \int \mu dF_{21} \cos \alpha = \frac{D \operatorname{sen} \theta_1}{3 \operatorname{sen} \theta}$$

$$T_{21} = \int_{\theta_1}^{\pi-\theta_1} \mu \Gamma \cos \alpha \frac{D}{3} \operatorname{sen} \theta_1 \frac{dV_{21}}{\operatorname{sen} \theta}$$

$$CG_{22} = \frac{2}{3} \frac{D}{2} = \frac{D}{3}$$

$$T_{22} = \int_{\theta_0}^{\theta_1} \mu \Gamma \cos \alpha \frac{D}{3} dV_{22} + \int_{\pi-\theta_1}^{\pi-\theta_0} \mu \Gamma \cos \alpha \frac{D}{3} dV_{22}$$

Desarrollando

$$T_1 = \int_{\theta_0}^{\pi-\theta_1} \frac{D}{4} \Gamma \operatorname{sen} \alpha - H \frac{D^2}{16} \left[2f - \frac{(1-f) \operatorname{sen} \theta_1}{1 - \operatorname{sen} \theta_1} + \left(\frac{1-f}{1 - \operatorname{sen} \theta_1} \operatorname{sen} \theta \right) \left[1 - \frac{\operatorname{sen}^2 \theta_1}{\operatorname{sen}^2 \theta} \right] \left[1 - \frac{\operatorname{sen} \theta_1}{\operatorname{sen} \theta} \right] \left[\operatorname{sen}(\theta - \theta_2) \right] d\theta \right]$$

Si:

$$C_1 = 2f + \frac{(1-f) \operatorname{sen} \theta_1}{1 - \operatorname{sen} \theta_1}$$

$$C_2 = \frac{1-f}{1 - \operatorname{sen} \theta_1} \operatorname{sen} \theta$$

$$\begin{aligned}
 \frac{64 T_1}{HD^3 T \text{sen} \alpha} &= \int_{\theta_1}^{\pi-\theta_1} (C_1 + C_2 \text{sen} \theta - C_1 \text{sen}^2 \theta_1 \text{csc}^2 \theta - C_2 \text{sen}^2 \theta_1 \text{csc} \theta) \\
 &\times \frac{(\text{sen} \theta + \text{sen} \theta_1)}{\text{sen} \theta} (\text{sen} \theta \cos \theta_2 - \cos \theta \text{sen} \theta_2) d\theta \\
 &= \int_{\theta_1}^{\pi-\theta_1} \left[C_1 [\text{sen} \theta_1 \cos \theta_2 + \cos \theta_2 \text{sen} \theta - \text{sen}^2 \theta_1 \cos \theta \right. \\
 &\quad - \text{sen} \theta_1 \text{sen} \theta_2 \text{ctg} \theta - \text{sen}^2 \theta_1 \cos \theta_2 \text{csc} \theta + \\
 &\quad + \text{sen}^2 \theta_1 \text{sen} \theta_2 \text{csc} \theta \text{ctg} \theta - \text{sen}^3 \theta_1 \cos \theta_2 \text{csc}^2 \theta \\
 &\quad + \text{sen}^3 \theta_1 \text{sen} \theta_2 \text{csc}^2 \theta \text{ctg} \theta] + C_2 [\cos \theta_2 \text{sen}^2 \theta \\
 &\quad - \text{sen} \theta_2 \text{sen} \theta \cos \theta + \text{sen} \theta_1 \cos \theta_2 \text{sen} \theta - \\
 &\quad - \text{sen} \theta_1 \text{sen} \theta_2 \cos \theta - \text{sen}^2 \theta_1 \cos \theta_2 + \\
 &\quad + \text{sen}^2 \theta_1 \text{sen} \theta_2 \text{ctg} \theta - \text{sen}^3 \theta_1 \cos \theta_2 \text{csc} \theta + \\
 &\quad \left. + \text{sen}^3 \theta_1 \text{sen} \theta_2 \text{csc}^2 \theta \cos \theta \right] d\theta
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= C1 \left[(\operatorname{sen}\theta_1 \cos\theta_2)(\pi-2\theta_1) + 2\cos\theta_2 \cos\theta_1 - \operatorname{sen}\theta_2 \right. \\
&\quad \left. [\operatorname{sen}(\pi-\theta_1) - \operatorname{sen}\theta_1] - \operatorname{sen}\theta_1 \operatorname{sen}\theta_2 \operatorname{Ln} \frac{\operatorname{sen}(\pi-\theta_1)}{\operatorname{sen}\theta_1} \right. \\
&\quad \left. - \operatorname{sen}^2\theta_1 \cos\theta_2 \operatorname{Ln} \left[\frac{\operatorname{ctg}\theta_1 + \operatorname{csc}\theta_1}{\operatorname{ctg}(\pi-\theta_1) + \operatorname{csc}(\pi-\theta_1)} \right] \right. \\
&\quad \left. + \operatorname{sen}^2\theta_1 \operatorname{sen}\theta_2 (\operatorname{csc}\theta_1 - \operatorname{csc}(\pi-\theta_1)) \right. \\
&\quad \left. - \operatorname{sen}^3\theta_1 \cos\theta_2 (\operatorname{ctg}\theta_1 - \operatorname{ctg}(\pi-\theta_1)) \right. \\
&\quad \left. + \frac{1}{2} \operatorname{sen}^3\theta_1 \operatorname{sen}\theta_2 (\operatorname{csc}^2\theta_1 - \operatorname{csc}^2(\pi-\theta_1)) \right] \\
&+ C2 \left[\cos\theta_2 \left(\frac{\pi-2\theta_1}{2} - \frac{\operatorname{sen}2(\pi-\theta_1) - \operatorname{sen}2\theta_1}{4} \right) \right. \\
&\quad \left. + \frac{1}{4} \operatorname{sen}\theta_2 (\cos2(\pi-\theta_1) + \cos2\theta) + \operatorname{sen}\theta_1 \cos\theta_2 \right. \\
&\quad \left. (\cos\theta_1 - \cos(\pi-\theta_1)) - \operatorname{sen}\theta_1 \operatorname{sen}\theta_2 (\operatorname{sen}(\pi-\theta_1) \right. \\
&\quad \left. - \operatorname{sen}\theta_1) - \operatorname{sen}^2\theta_1 \cos\theta_2 (\pi-2\theta_1) \right. \\
&\quad \left. + \operatorname{sen}^2\theta_1 \operatorname{sen}\theta_2 \operatorname{Ln} \frac{\operatorname{sen}(\pi-\theta_1)}{\operatorname{sen}\theta_1} \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \operatorname{sen}^3 \theta_1 \cos \theta_2 \operatorname{Ln} \frac{\operatorname{ctg} \theta_1 + \operatorname{csc} \theta_1}{\operatorname{ctg}(\pi - \theta_1) + \operatorname{csc}(\pi - \theta_1)} \\
& + \operatorname{sen}^3 \theta_1 \operatorname{sen} \theta_2 (\operatorname{csc} \theta_1 - \operatorname{csc}(\pi - \theta_1)) \Big] \\
& = C_1 \left[(\pi - 2\theta_1) (\operatorname{sen} \theta_1 \cos \theta_2) + 2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 \right. \\
& + \operatorname{sen}^2 \theta_1 \cos \theta_2 \operatorname{Ln} \frac{1 - \cos \theta_1}{1 + \cos \theta_1} \\
& \left. - 2 \operatorname{sen}^3 \theta_1 \cos \theta_2 \operatorname{ctg} \theta_1 \right] + C_2 \left[\frac{1}{2} \cos \theta_2 (\right. \\
& (\pi - 2\theta_1 + \operatorname{sen} 2\theta_1) + 2 \operatorname{sen} \theta_1 \cos \theta_1 \cos \theta_2 - (\pi - 2\theta_1) \\
& \left. \operatorname{sen}^3 \theta_1 \cos \theta_2 + \operatorname{sen}^3 \theta_1 \cos \theta_2 \operatorname{Ln} \frac{1 - \cos \theta_1}{1 + \cos \theta_1} \right] \\
& = C_1 \cos \theta_2 (\pi - 2\theta_1) \operatorname{sen} \theta_1 + 2 \cos \theta_1 + \operatorname{sen}^2 \theta_1 \\
& \operatorname{Ln} \frac{1 - \cos \theta_1}{1 + \cos \theta_1} - \operatorname{sen} \theta_1 \operatorname{sen} 2\theta_1 + C_2 \cos \theta_2
\end{aligned}$$

$$\left[\frac{\pi - 2\theta_1 + \text{sen}2\theta_1}{2} + \text{sen}^2\theta_1 + \text{sen}2\theta_1 - (\pi - 2\theta_1) \right]$$

$$\text{sen}^2\theta_1 + \text{sen}^2\theta_1 \quad \text{Ln} \quad \frac{1 - \text{cos}\theta_1}{1 + \text{cos}\theta_1} \quad \left. \right]$$

$$= \frac{64 T}{\pi D^3 \Gamma \text{sen}\alpha}$$

Haciendo :

$$C3 = (\pi - 2\theta_1)\text{sen}\theta_1 + 2\text{cos}\theta_1 + \text{sen}^2\theta_1 +$$

$$\text{Ln} \left[\frac{1 - \text{cos}\theta_1}{1 + \text{cos}\theta_1} \right] - \text{sen}\theta_1 \text{sen}2\theta_1$$

$$C4 = \frac{\pi - 2\theta_1 + \text{sen}2\theta_1}{2} + \text{sen}2\theta_1 + (\pi - 2\theta_1)\text{sen}^2\theta_1 -$$

$$- \text{sen}^2\theta_1 \quad \text{Ln} \quad \frac{1 - \text{cos}\theta_1}{1 + \text{cos}\theta_1}$$

$$T1 = \frac{HD3\Gamma \text{sen}\alpha \text{cos}\theta_2}{64} (C1C3 + C3C4)$$

$$T21 = \mu \Gamma \text{cos}\alpha \frac{D}{3} \text{sen}\theta_1 \int_{\theta_1}^{\pi - \theta_1} \frac{D2}{16} \frac{\text{sen}^2\theta_1 fH}{\text{sen}^3\theta} d\theta$$

$$T_{21} = \frac{\mu f \Gamma H D^3 \cos \alpha \sin^3 \theta_1}{48} \int_{\theta_1}^{\pi - \theta_1} \frac{d\theta}{\sin^3 \theta}$$

$$T_{21} = \frac{\mu f \Gamma H D^3 \cos \alpha \sin^3 \theta_1}{48} \left[2 \frac{\cos \theta_1}{\sin^2 \theta_1} + \right. \\ \left. \ln \frac{1 + \cos \theta_1}{1 - \cos \theta_1} \right]$$

De igual manera

$$T_{22} = \frac{\mu f \Gamma H D^3 \cos \alpha \csc \theta_1}{24} (\cos \theta_0 - \cos \theta_1)$$

Tenemos las siguientes constantes :

$$C_1 = 2f - \frac{(1-f) \sin \theta_1}{1 - \sin \theta_1}$$

$$C_2 = \frac{1-f}{1 - \sin \theta_1}$$

$$C_3 = (\pi - 2\theta_1) \sin \theta_1 + 2 \cos \theta_1 + \sin^2 \theta_1$$

$$\ln \frac{1 + \cos \theta_1}{1 - \cos \theta_1} \Big] - \sin \theta_1 \sin 2\theta_1$$

$$C_4 = \frac{(\pi - 2\theta_1) + \sin 2\theta_1}{2} + \sin 2\theta_1 - (\pi - 2\theta_1)\sin^3\theta_1 +$$

$$\sin^3\theta_1 \ln \frac{1 - \cos\theta_1}{1 + \cos\theta_1}$$

$$\text{Evaluandolas para } \theta_2/\theta_1 = \frac{\pi/7}{\pi/6}$$

$$C_1 = 0.4163$$

$$C_2 = 1.0558$$

$$C_3 = 1.6878$$

$$C_4 = 1.4934$$

Sustituyendo estos valores en los T

$$T_1 = \frac{(0.4163 \cdot 1.6878 + 1.0558 \cdot 1.4934)}{64} HD^3 T \sin \alpha \cos \theta_2$$

$$T_1 = 3.56 \cdot 10^{-2} HD^3 T \sin \alpha \cos \theta_2$$

Asumiendo $\theta_2 = 10^\circ$

$$T_1 = 3.507 \cdot 10^{-2} HD^3 T \sin \alpha$$

$$T_{21} = 5.878 \cdot 10^{-3} \mu \Gamma HD^3 \cos \alpha$$

$$T_1 = 3.507 \cdot 10^{-2} \text{ HD}^3 \Gamma \text{ sen} \alpha$$

$$T_2 = 7.253 \cdot 10^{-3} \mu \text{ cos} \alpha \text{ HD}^3 \Gamma$$

$$T = \text{HD}^3 \Gamma (3.507 \cdot 10^{-2} \text{ sen} \alpha + 7.253 \cdot 10^{-3} \mu \text{ cos} \alpha)$$

Evaluando potencia

$$\text{Pot} = T * w = T \frac{2\pi N}{76 * 60} \quad (\text{HP})$$

$$\text{Pot} = (3.507 \cdot 10^{-2} \text{ sen} \alpha + 7.253 \cdot 10^{-3} \mu \text{ cos} \alpha) \frac{2\pi \text{HD}^3 \Gamma N}{76 * 60}$$

$$\text{Pot} = (4.832 \cdot 10^{-6} \text{ sen} \alpha + 9.994 \cdot 10^{-6} \mu \text{ cos} \alpha) \text{HD}^3 \Gamma N$$

K_1

K_2

Ahora podemos calcular potencia para distintos μ y α .

μ/α	0.2/45°	0.3/45°	1/45°	1/45°
$K_1 * 10^6$	34.167	34.167	34.167	39.581
$K_2 * 10^6$	1.413	2.120	7.067	5.732

Considerando potencia máxima para $\mu = 1$ $\alpha = 55^\circ$

$$Pot_{max} = 45.318 * 10^{-6} HD^3 TN$$

Que es la potencia requerida en el plato o la potencia consumida para mover el material.

Podemos tomar como potencia del motor

$$P = 9 * 10^{-6} HD^3 TN \quad (HP)$$

$$P = 6.75 * 10^{-6} HD^3 TN \quad (KW)$$

Forzillo

d = El fuerza de disgregación del clinker =
aglomerado

R_0 = Radio del horno (m.)

b_1 = Espesor de la brida (m.)

e = Descentramiento (m.)

R_1 = Radio de la brida (m.)

μ = Coeficiente de rozamiento.

h_1 = altura de la columna de material (m.)

Torque por altura d material en las caras
laterales de las bridas.

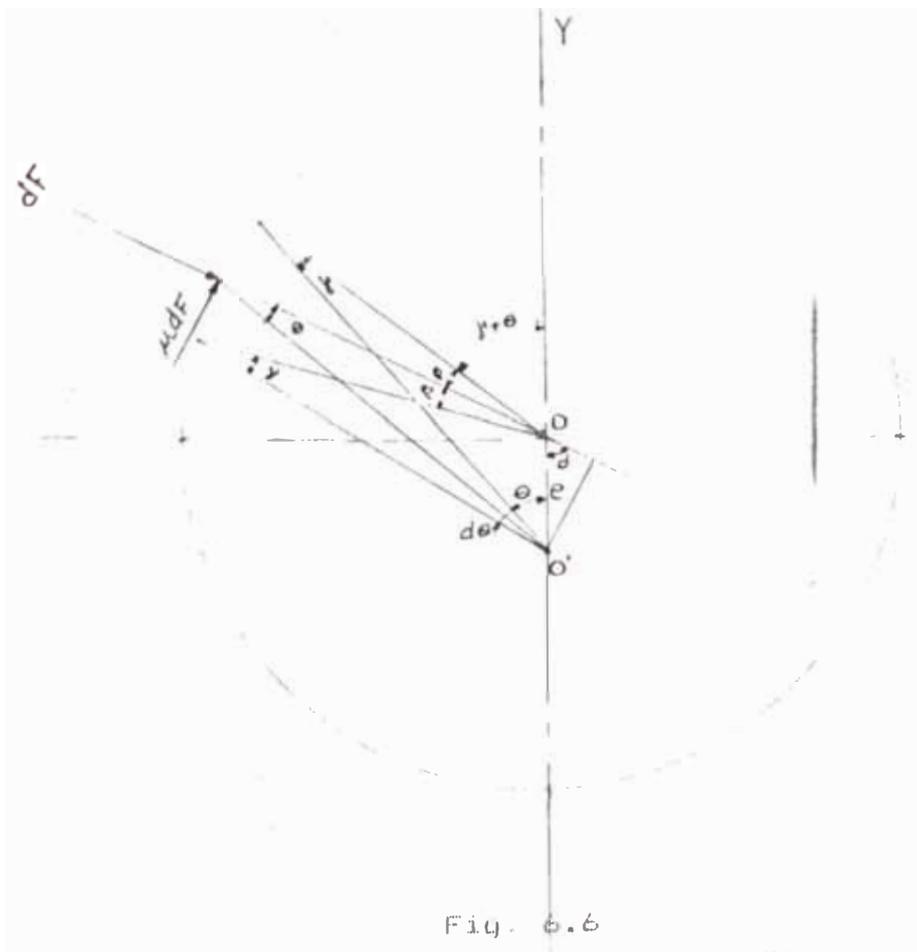


Fig. 6.6

$$T = T_0$$

$$dR_1 = T \sin \delta = T h R_1 (2\beta) b$$

$$dT = T h R_1 b e \sin \delta (2\beta) + \mu T h R_1 b (R_1 + e \cos \delta) 2\beta$$

$$dT = T h R_1 b e \sin \delta [(\alpha - \tau) + d\theta] + \mu T h R_1 b (R_1 + e \cos \delta) [(\alpha - \tau) + d\theta]$$

$$\sin \alpha = \frac{e}{R_1} - \sin(\theta + d\theta) \quad \sin \tau = \frac{e}{R_1} - \sin \theta$$

Vemos que $\alpha \rightarrow \tau$

$$dT = T h R_1 b e \sin \delta d\theta + \mu T h R_1 b (R_1 + e \cos \delta) d\theta$$

$$\sin \delta = \sin \epsilon \cos \theta + \cos \epsilon \sin \theta$$

$$\cos \delta = \cos \epsilon \cos \theta - \sin \epsilon \sin \theta$$

De la fig.

$$\epsilon = \frac{\alpha}{2} + \frac{\tau}{2} \quad \epsilon \rightarrow \tau$$

$$\sin \epsilon = \sin \tau = \frac{e}{R_1} - \sin \theta$$

$$\cos \epsilon = \cos \tau = \sqrt{1 - \frac{e^2 \sin^2 \theta}{R_1^2}}$$

$$dT = \Gamma h R_1 b e \left(\frac{e}{R_1} \sin\theta \cos\theta + \sqrt{1 - \frac{e^2}{R_1^2} \sin^2\theta} \sin\theta \right) d\theta$$

$$+ \mu \Gamma h R_1 b \left[R_1 + e \left(\sqrt{1 - \frac{e^2}{R_1^2} \sin^2\theta} \cos\theta - \frac{e}{R_1} \sin^2\theta \right) \right] d\theta$$

$$dT = \Gamma h R_1 b e \left(\frac{e}{R_1} \sin\theta \cos\theta + \sin\theta \right) d\theta +$$

$$+ \mu \Gamma h R_1 b \left[R_1 + e \cos\theta - \frac{e^2}{R_1} \sin^2\theta \right] d\theta$$

$$T = \Gamma h b e^2 \int_0^\pi \sin\theta \cos\theta d\theta + \Gamma h R_1 b e \int_0^\pi \sin\theta d\theta$$

$$+ \mu \Gamma h R_1^2 b \int_0^\pi d\theta + \mu \Gamma h R_1 b e \int_0^\pi \cos\theta d\theta - \mu \Gamma h b e^2 \int_0^\pi \sin^2\theta d\theta$$

$$T = \Gamma h b e^2 \left[-\frac{1}{4} \cos\theta \right]_0^\pi + \Gamma h R_1 b e \left[\cos\theta \right]_0^\pi +$$

$$\mu \Gamma h R_1^2 b \left[\theta \right]_0^\pi + \mu \Gamma h R_1 b e \left[\sin\theta \right]_0^\pi - \mu \Gamma h b e^2 \left[\frac{\theta}{2} - \frac{\sin 2\theta}{4} \right]_0^\pi$$

$$T = 2\Gamma h R_1 b e + \pi \mu \Gamma h R_1^2 b - \frac{\pi \mu \Gamma h b e^2}{2}$$

$$T = \Gamma h b \left(2R_1 e + \pi \mu R_1^2 - \frac{\pi \mu e^2}{2} \right)$$

- Torque por altura de material en caras horizontales

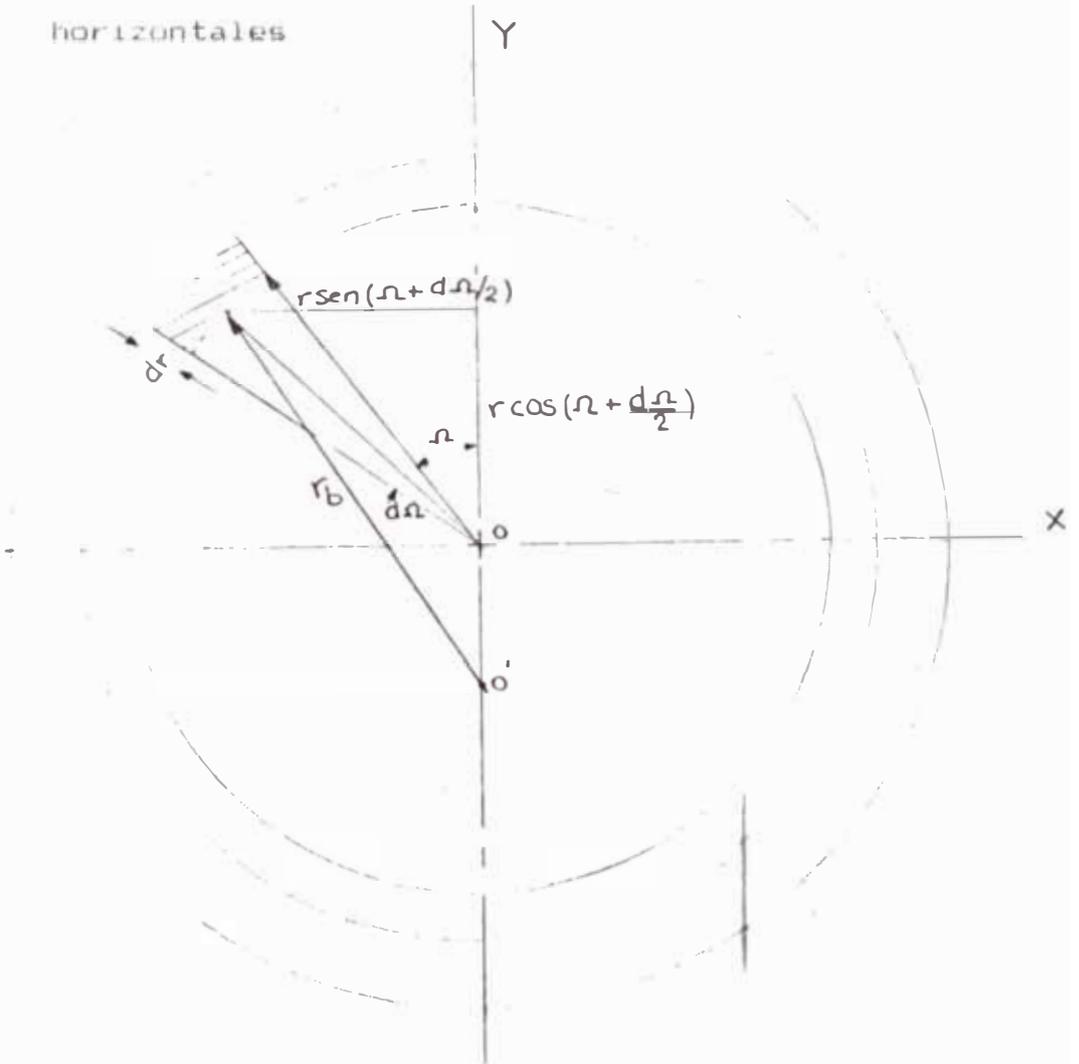


Fig. 6.7

$$r_b^2 = r^2 \text{sen}^2 \left(\Omega + \frac{d\Omega}{2} \right) + \left(r \cos \left(\Omega + \frac{d\Omega}{2} \right) + e \right)^2$$

$$= r^2 \sin^2 \left(\Omega + \frac{d\Omega}{2} \right) + (r^2 \cos^2 \left(\Omega + \frac{d\Omega}{2} \right) +$$

$$+ 2er \cos \left(\Omega + \frac{d\Omega}{2} \right) + e^2$$

$$r_b^2 = r^2 + 2er \cos \left(\Omega + \frac{d\Omega}{2} \right) + e^2$$

$$r_b = \sqrt{r^2 + 2er \cos \left(\Omega + \frac{d\Omega}{2} \right) + e^2}$$

$$dT = r_b d\Omega$$

$$dF_N = \Gamma h dA$$

$$dF_N = \Gamma h r d\Omega dr$$

$$dF_T = \mu \Gamma h r d\Omega dr$$

$$dT = \sqrt{r^2 + 2er \cos \left(\Omega + \frac{d\Omega}{2} \right) + e^2} \mu \Gamma h r dr d\Omega$$

$$T = \mu \Gamma h \int_0^{2\pi} \int_{R_1-1}^{R_1} r \sqrt{r^2 + 2er \cos \left(\Omega + \frac{d\Omega}{2} \right) + e^2} r d\Omega$$

$$T = \mu \Gamma h \int_0^{2\pi} \left[(r^2 + 2er \cos \left(\Omega + \frac{d\Omega}{2} \right) + e^2)^{3/2} - e \cos \left(\Omega + \frac{d\Omega}{2} \right) \right]$$

$$\begin{aligned}
 & \int_{R_{k-1}}^{R_k} \left[\sqrt{r^2 + 2er \cos\left(\frac{\Omega+d\Omega}{2}\right) + e^2} \right] dr \Big| d\Omega \\
 \\
 T = \mu I h \int_0^{2\pi} & \left[\left(\frac{r^2 + 2er \cos\left(\frac{\Omega+d\Omega}{2}\right) + e^2}{3} \right)^{3/2} - e \cos\left(\frac{\Omega+d\Omega}{2}\right) \right. \\
 & \left. \left[\frac{2r + 2er \cos\left(\frac{\Omega+d\Omega}{2}\right)}{4} \sqrt{r^2 + 2er \cos\left(\frac{\Omega+d\Omega}{2}\right) + e^2} + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{4e^2 - 4e^2 \cos\left(\frac{\Omega+d\Omega}{2}\right)}{8} \int_{R_{k-1}}^{R_k} \frac{dr}{r^2 + 2er \cos\left(\frac{\Omega+d\Omega}{2}\right) + e^2} \right] \right] d\Omega \\
 \\
 T = \mu I h \int_0^{2\pi} & \left[\left(r^2 + 2er \cos\left(\frac{\Omega+d\Omega}{2}\right) + e^2 \right)^{3/2} - e \cos\left(\frac{\Omega+d\Omega}{2}\right) \right. \\
 & \left[\frac{r + er \cos\left(\frac{\Omega+d\Omega}{2}\right)}{4} \sqrt{r^2 + 2er \cos\left(\frac{\Omega+d\Omega}{2}\right) + e^2} + \right. \\
 & \left. \left. \frac{e^2 \sin^2\left(\frac{\Omega+d\Omega}{2}\right)}{2} \left[\ln \left(\frac{2r + 2er \cos\left(\frac{\Omega+d\Omega}{2}\right)}{2} \right) + \right. \right. \right.
 \end{aligned}$$

$$\left. + 2 \sqrt{\frac{r^2 + 2er \cos \left(\frac{\Omega + d\Omega}{2} \right) + e^2}{2}} \right] d\Omega$$

Podemos afirmar :

$$r^2 + 2er \cos \left(\frac{\Omega + d\Omega}{2} \right) + e^2 \leq (r+e)^2$$

$$\frac{(r^2 + 2er \cos \left(\frac{\Omega + d\Omega}{2} \right) + e^2)^{3/2}}{3} \leq \frac{(r+e)^3}{3}$$

y despreciando los otros términos

$$T = \mu \Gamma h \frac{(r+e)^3}{3} \int_{R_1-1}^{R_1} \int_0^{2\pi} d\Omega$$

$$T = \mu \Gamma h \frac{(r+e)^3}{3} \left[\begin{array}{c} R_1 \\ R_1-1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} 2\pi \\ \Omega \\ 0 \end{array} \right]$$

$$T = \frac{2\pi \mu \Gamma h}{3} \left[(R_1^3 - R_{1-1}^3) + 3e(R_1^2 - R_{1-1}^2) + 3e^2(R_1 - R_{1-1}) \right]$$

Torque por fricción y rotura debido al descentramiento

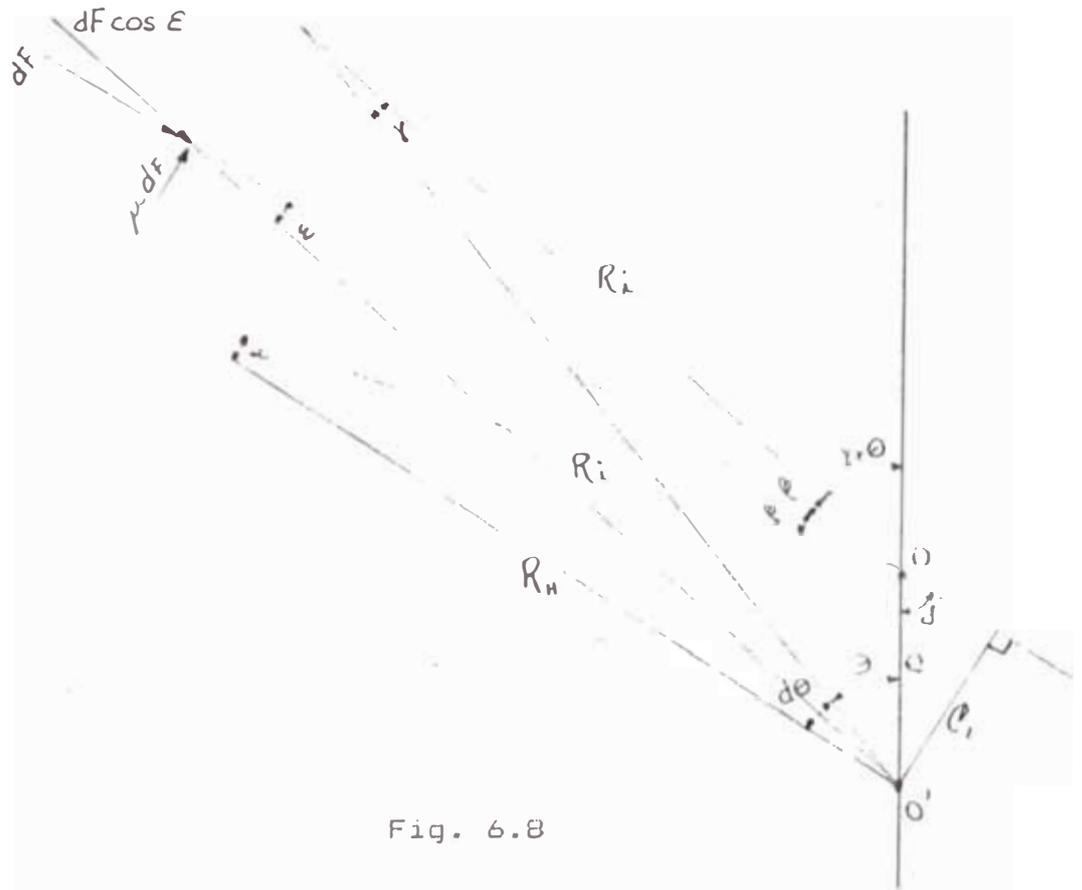


Fig. 6.8

Relacionando ángulos :

$$\frac{\text{sen } \tau}{e} = \frac{\text{sen } \theta}{R_1}$$

$$\text{sen } \tau = - \frac{e}{R_1} \text{sen } \theta$$

$$\frac{\text{sen } \alpha}{e} = \frac{\text{sen } (\theta + d\theta)}{R_1}$$

$$\text{sen } \alpha = - \frac{e}{R_1} \text{sen } (\theta + d\theta)$$

$$\epsilon = \pi - \beta - \pi - \alpha + \theta + d\theta \quad \text{ó}$$

$$\delta = \theta + \frac{d\theta}{2} \quad \delta = \theta + \frac{\alpha + \tau}{2} \quad \delta = \theta + \frac{d\theta}{2}$$

$$\alpha = \pi - \beta - \pi - \alpha + \theta + d\theta = \theta + d\theta/2$$

$$\epsilon = \frac{\alpha + \tau}{2}$$

$$\delta = \epsilon + \theta + \frac{d\theta}{2}$$

$$dF = \frac{\mu R_1 b d\theta}{\cos \epsilon}$$

que es la fuerza elemental en la pared.

$$dT = C_1 dF + \mu (R_1 + C_2) dF$$

$$C_1 = e \operatorname{sen} \delta$$

$$C_2 = e \operatorname{cos} \delta$$

$$dT = \mu R_1 b e \frac{\operatorname{sen} \delta}{\operatorname{cos} \epsilon} d\theta + \mu R_1 b \frac{(R_1 + e \operatorname{cos} \delta)}{\operatorname{cos} \epsilon} d\theta$$

$$\frac{\operatorname{sen} \delta}{\operatorname{cos} \epsilon} d\theta = \frac{\operatorname{sen}(\epsilon + \theta + d\theta/2)}{\operatorname{cos} \epsilon} d\theta$$

$$= \left[\frac{\operatorname{sen} \epsilon}{\operatorname{cos} \epsilon} \operatorname{cos}(\theta + \frac{d\theta}{2}) + \frac{\operatorname{cos} \epsilon}{\operatorname{cos} \epsilon} \operatorname{sen}(\theta + \frac{d\theta}{2}) \right] d\theta$$

$$= \left[\operatorname{tg} \varepsilon \left(\cos \theta \cos \frac{d\theta}{2} - \operatorname{sen} \theta \operatorname{sen} \frac{d\theta}{2} \right) + \operatorname{sen} \theta \cos \frac{d\theta}{2} + \cos \theta \operatorname{sen} \frac{d\theta}{2} \right] d\theta$$

$$= \left[\operatorname{tg} \varepsilon \cos \theta - \operatorname{tg} \varepsilon \operatorname{sen} \theta \frac{d\theta}{2} + \operatorname{sen} \theta + \cos \theta \frac{d\theta}{2} \right] d\theta$$

$$= \operatorname{tg} \varepsilon \cos \theta d\theta - \operatorname{tg} \varepsilon \operatorname{sen} \theta \frac{d^2 \theta}{2} + \operatorname{sen} \theta d\theta + \cos \theta \frac{d^2 \theta}{2}$$

$$= (\operatorname{tg} \varepsilon \cos \theta + \operatorname{sen} \theta) d\theta$$

$$\frac{R_1 + e \cos \delta}{\cos \theta} d\theta = \left[\frac{R_1}{\cos \varepsilon} + \frac{e \cos \varepsilon \cos(\theta + \frac{d\theta}{2}) - \operatorname{sen} \varepsilon \operatorname{sen}(\theta + \frac{d\theta}{2})}{\cos \varepsilon} \right]$$

$$= \frac{R_1}{\cos \theta} + e \left[\cos \theta \cos \frac{d\theta}{2} - \operatorname{sen} \theta \operatorname{sen} \frac{d\theta}{2} - \operatorname{tg} \varepsilon \left(\operatorname{sen} \theta \cos \frac{d\theta}{2} + \cos \theta \operatorname{sen} \frac{d\theta}{2} \right) \right]$$

$$= \frac{R_1}{\cos \theta} d\theta + e \cos \theta d\theta - e \operatorname{sen} \theta \frac{d^2 \theta}{2} - e \operatorname{tg} \varepsilon \operatorname{sen} \theta d\theta - e \operatorname{tg} \varepsilon \cos \theta \frac{d^2 \theta}{2}$$

$$dT = sR_H b e (\operatorname{tg} \epsilon \cos \theta + \operatorname{sen} \theta) + \\ + \mu s R_H b [R_1 \operatorname{sec} \epsilon + e (\cos \theta - \operatorname{tg} \epsilon \operatorname{sen} \theta)]$$

$$\epsilon = \alpha/2 + \tau/2 \quad \epsilon \rightarrow \tau \quad \operatorname{sen} \epsilon = \frac{e \operatorname{sen} \theta}{R_1}$$

$$\cos \epsilon = \sqrt{1 - \frac{e^2 \operatorname{sen}^2 \theta}{R_1^2}}$$

= -->

$$dT = sR_H b e \left[\left(\frac{e \operatorname{sen} \theta \cos \theta}{R_1 \sqrt{1 - \frac{e^2 \operatorname{sen}^2 \theta}{R_1^2}}} + \operatorname{sen} \theta \right) + \right.$$

$$\left. + \mu s R_H b \left[\frac{R_1}{1 - \frac{e^2 \operatorname{sen}^2 \theta}{R_1^2}} + \right. \right.$$

$$\left. \left. e \left(\cos \theta - \frac{e \operatorname{sen}^2 \theta}{R_1 \sqrt{1 - \frac{e^2 \operatorname{sen}^2 \theta}{R_1^2}}} \right) \right] \right] d\theta$$

$$T = \int_0^{\pi} \frac{sR_H b e^2}{R_1} \left[\frac{\operatorname{sen} \theta \cos \theta}{\sqrt{1 - \frac{e^2 \operatorname{sen}^2 \theta}{R_1^2}}} + \right. \\ \left. + \mu \left(\frac{R_1}{1 - \frac{e^2 \operatorname{sen}^2 \theta}{R_1^2}} + e \left(\cos \theta - \frac{e \operatorname{sen}^2 \theta}{R_1 \sqrt{1 - \frac{e^2 \operatorname{sen}^2 \theta}{R_1^2}}} \right) \right) \right] d\theta$$

$$+ \int_0^{\pi} \frac{SR_H b e \sin \theta d\theta}{R_1}$$

$$+ \int_0^{\pi} \mu SR_H b R_1 \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{e^2}{R_1^2} \sin^2 \theta}} d\theta +$$

$$\int_0^{\pi} \mu SR_H b e \cos \theta d\theta$$

$$- \int_0^{\pi} \frac{\mu SR_H b e^2}{R_1^2} \frac{\sin^2 \theta}{\sqrt{1 - \frac{e^2}{R_1^2} \sin^2 \theta}} d\theta$$

$$T = SR_H b R_1 \left(1 - \frac{e^2}{R_1^2} \sin^2 \theta\right)^{1/2} \Big|_0^{\pi} + SR_H b e \cos \theta \Big|_0^{\pi} +$$

$$+ \mu SR_H b R_1 \theta \Big|_0^{\pi} + \mu SR_H b e \sin \theta \Big|_0^{\pi} +$$

$$\frac{\mu SR_H b e^2}{R_1} \left(\frac{\theta}{2} - \frac{\sin 2\theta}{4} \right) \Big|_0^{\pi}$$

$$2SR_{11}be \quad \mu SR_{11}be \quad \frac{\mu SR_{11}be^2}{2R_1}$$

$$I = 2SR_{11}be + \pi\mu SR_{11}b \left(R_1 - \frac{e^2}{2R_1} \right)$$

$$T = 2SR_{11}be + \pi\mu SR_{11}b \left(R_1 - \frac{e^2}{2R_1} \right)$$

Torque por rozamiento en el plano

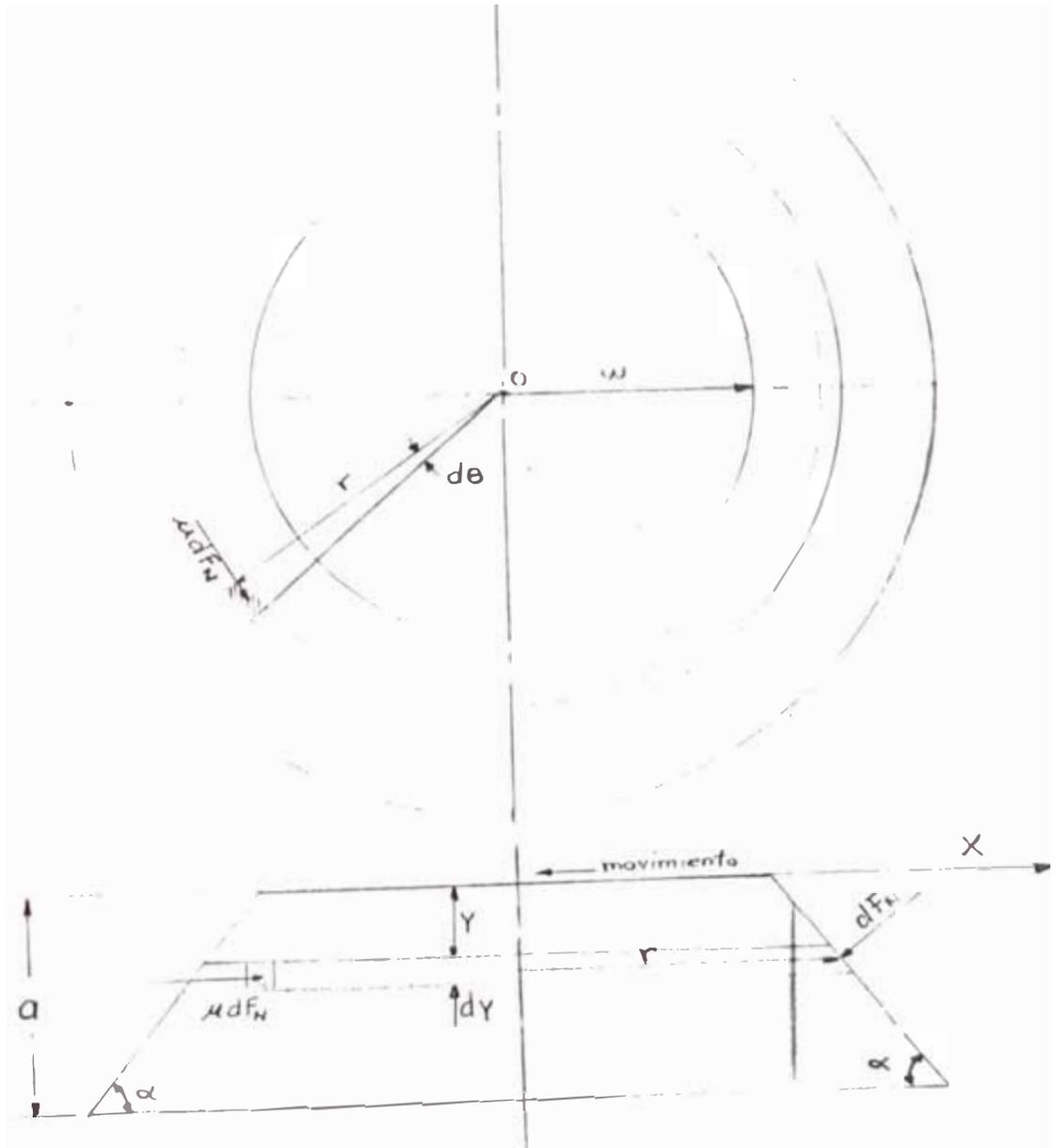


Fig. 6.9

$$dF_N = \Gamma h dA$$

$$dF_f = \mu dF_N = \mu \Gamma h dA$$

$$dA = r d\theta dy$$

$$r = w + y \operatorname{ctg} \alpha$$

$$\cdot dF = r dF_r = r \mu \Gamma h r d\theta dy = r^2 \mu \Gamma h d\theta dy$$

$$T = \int_{y=0}^{y=a} \int_{\theta=0}^{2\pi} r^2 \mu \Gamma h d\theta dy$$

$$T = \int_{y=0}^{y=a} \int_{\theta=0}^{2\pi} (w + y \operatorname{ctg} \alpha)^2 \mu \Gamma h d\theta dy$$

$$= \mu \Gamma h \int_{y=0}^{y=a} \int_{\theta=0}^{2\pi} (w^2 + 2wy \operatorname{ctg} \alpha + y^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha) d\theta dy$$

$$= \mu \Gamma h \theta \int_0^a (w^2 + 2wy \operatorname{ctg} \alpha + y^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha) dy$$

$$= 2\pi \mu \Gamma h \left[w^2 y \Big|_0^a + 2w \operatorname{ctg} \alpha \left| \frac{y^2}{2} \right|_0^a + \operatorname{ctg}^2 \alpha \left| \frac{y^3}{3} \right|_0^a \right]$$

$$T = 2\pi \mu \Gamma h \left(w^2 a + w \operatorname{ctg} \alpha a^2 + \operatorname{ctg}^2 \alpha \frac{a^3}{3} \right)$$

$$T = 2\pi \mu \Gamma h \left(w^2 + a w \operatorname{ctg} \alpha + \frac{a^2}{3} \operatorname{ctg}^2 \alpha \right)$$

Identificando Torques :

Torque debido a fricción por columna de material en caras horizontales

$$T_{fch} = \frac{2\pi\mu Fh}{3} \left[(R_1^3 - R_{1-1}^3) + 3e(R_1^{2e} - R_{1-1}^{2e}) + \right.$$

$$\left. 3e^{2e}(R_1 - R_{1-1}) \right]$$

Torque debido a fricción por columna de material en caras laterales

$$T_{fcl} = Fhb \left(2R_1e + \pi\mu R_1^{2e} - \frac{\pi\mu e^{2e}}{2} \right)$$

-- Torque por rotura debido al descentramiento

$$T_{idd} = 2SR_Hbe$$

Torque por fricción ocasionado por descentramiento

$$T_{ifd} = \pi\mu SR_Hb \left(R_1 - \frac{e^2}{2R_1} \right)$$

Torque debido a fricción por columna de material
en la llanta

$$T_{f11} = 2\pi\mu\Gamma h \left(w^2 + aw\text{ctg } \alpha + \frac{a^2}{3} \text{ctg}^2 \alpha \right)$$

CALCULO DE TORQUE

DATOS :

$$T = \text{Peso Volumétrico} = 12000 \text{ N/m}^3$$

$$S = \text{Esfuerzo de disragación del Clinker} = 0.2 \text{ MPa}$$

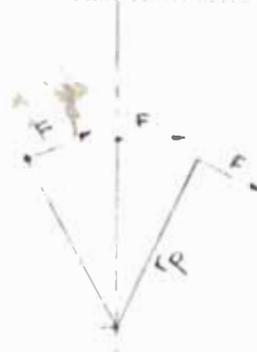
$$S_r = \text{Esfuerzo de rotura del Clinker} = 0.1 \text{ MPa}$$

$$\mu = \text{Coef. de rozamiento Clinker - Acero} = 0.4$$

Nro de brida	r_1 cm.	Tifch N-cm.	Tifcl N-cm.	Tida N-cm.	Tifd N-cm.	Torque total generado N-cm.	Torque acumulado N-cm.
1	8.6	7,000	8,000	102,000	90,000	207,000	207,000
2	12.5	12,000	16,000	102,000	133,000	263,000	470,000
3	17.8	30,000	32,000	102,000	160,000	353,000	823,000
4	24.8	75,000	59,000	102,000	264,000	500,000	1'323,000
5	34.3	191,000	111,000	102,000	366,000	770,000	2'093,000
6	40.0	179,000	151,000	102,000	427,000	859,000	2'952,000
Llanta N - cm				815,000 (Estimada)			
Muelas Postizas				1'780,000 (Estimada)			

Selección de los pernos de amarre

Lugar geométrico
donde se ubican
los pernos



Torque resistente
en cada brida

Fig. 6.10

En cada perno actúa una fuerza F debido al torque resistente que se genera.

Para n pernos

$$n r_p F = T_1$$

$$F = \frac{T_1}{n r_p}$$

Por otro lado

$$\text{máx} = \frac{F}{\text{Aperno}} = \frac{T_1}{n r_p \text{Aperno}}$$

$$n r_p = \frac{T_1}{r_p \tau_{\text{máx}}}$$

$$A \text{ total pernos} = \frac{T_A}{r_p \tau_{\text{máx}}}$$

Escogiendo un material adecuado

Especificación ASTM para pernos

A 193 GRADO B& Acero Aleado

Temperatura máxima de trabajo = 570°C

Esfuerzo de rotura = 880 MPa

Esfuerzo de fluencia = 739 MPa

Esfuerzo de corte aprox. = 370 MPa

Haciendo los cálculos respectivos, tenemos los resultados siguientes :

Brida Nro.	r_p ca.	T_A N-ca.	A pernos cm^2	Pernos (cantidad)	Designación
1	---	207,000	---	1	M10x1.0
2	4.30	470,000	2.95	6	M10x1.0
3	10.0	823,000	2.22	8	M 8x1.0
4	14.75	1'323,000	2.42	8	M 8x1.0
5	21.25	2'093,000	2.66	8	M 8x1.0
6	31.25	2'952,000	2.55	8	M 8x1.0
Parri-lla con cubo	36.5	5'551,000	9.11	8	M10x1.0

- Cálculo de las placas de la llanta



Fig. 6.11

$$r = 260 \text{ mm.}$$

$$R = 400 \text{ mm.}$$

$$\mu = 0.287$$

$$W_{\text{TOTAL}} = \frac{\pi \times 1^2}{4} \times 7 \times 12000 = 65,970 \text{ N}$$

$$W = \frac{W_{\text{TOTAL}}}{\pi(R^2 - r^2)} = \frac{65,970}{\pi(400^2 - 260^2)} = 0.227 \text{ MPa}$$

Escogeremos como material : Plancha gruesa laminada en caliente calidad estructural PG E24 SIDERPERU.

De : $R = 410 \text{ MPa}$ y $F = 240 \text{ MPa}$.

Cuyos equivalentes aproximados son :

EG 26 ITINTEC 341-083 y A 36 ASTM

$$f.s. = 2 \quad S_{ol} = \frac{S_y}{2} = \frac{240}{2} = 120 \text{ MPa}$$

Utilizaremos la siguiente fórmula :

$$\sigma_{\max} = \frac{3w}{4t^3} \left[R^2 - 2r^2 + \frac{r^4(1-\mu) - 4r^4(1+\mu)\ln(R/r)(1-\mu)}{R^2(1-\mu) + r^2(1+\mu)} \right]$$

Efectuando los cálculos respectivos encontramos que espesor $T = 16$ mm.

Por deflexión utilizamos la siguiente fórmula

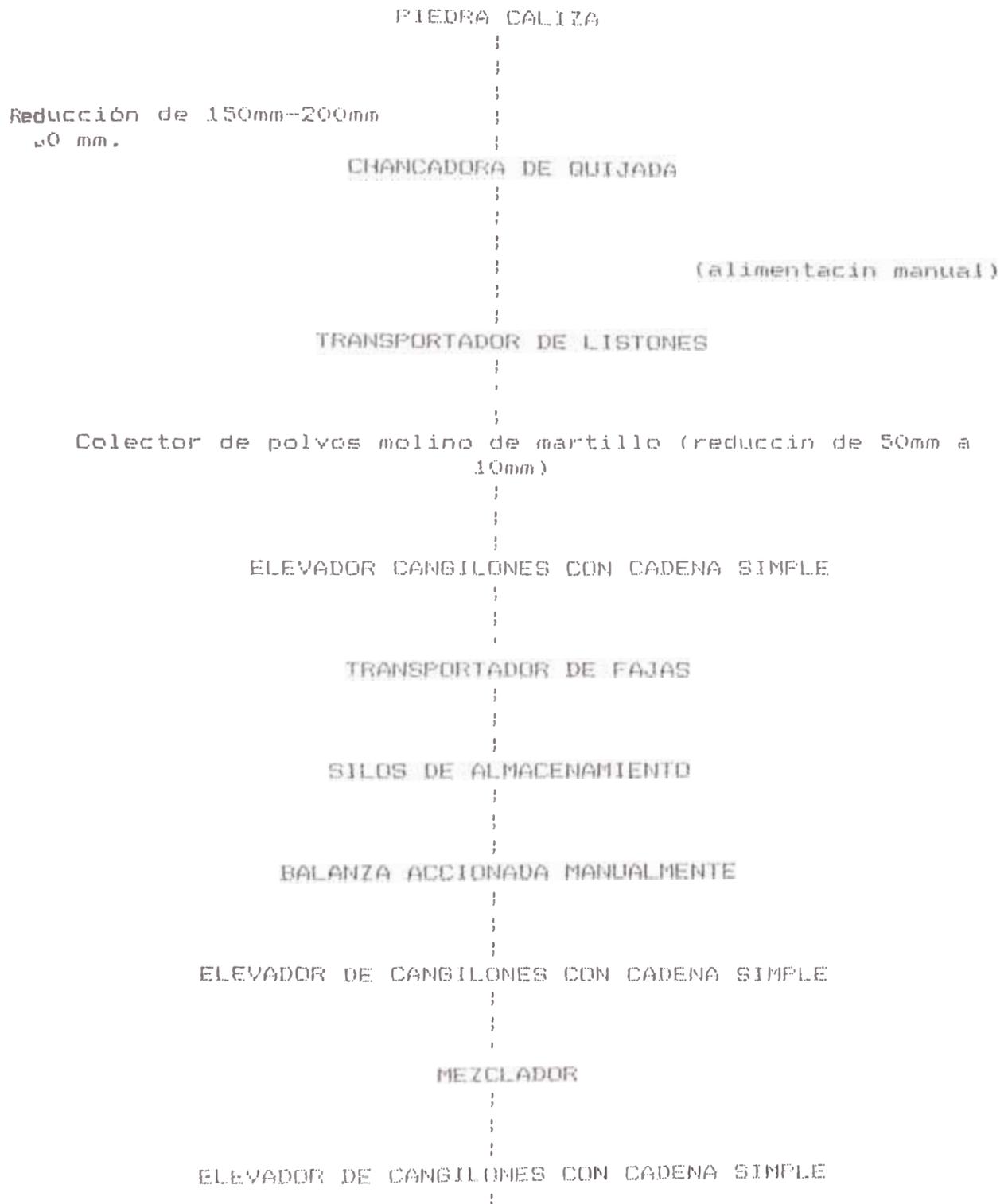
$$\begin{aligned} y_{\max} = \frac{3w(1-\mu^2)}{16Et^3} & \left[R^4 + 5r^4 - 6R^2r^2 + 8r^4 \ln(R/r) - \right. \\ & - 18r^6(1+\mu) + 4R^2r^4(3+\mu) - R^2(1-\mu) + r^2(1+\mu) - \\ & \left. - \frac{4R^4r^2(1+\mu)\ln(R/r) - 16R^2r^4(1+\mu)[\ln(R/r)]^2}{R^2(1-\mu) + r^2(1+\mu)} \right. \\ & \left. - \frac{4R^2r^4 + 2R^4r^2(1+\mu)}{R^2(1-\mu) + r^2(1+\mu)} + \frac{2r^6(1-\mu)}{R^2(1-\mu) + r^2(1+\mu)} \right] \end{aligned}$$

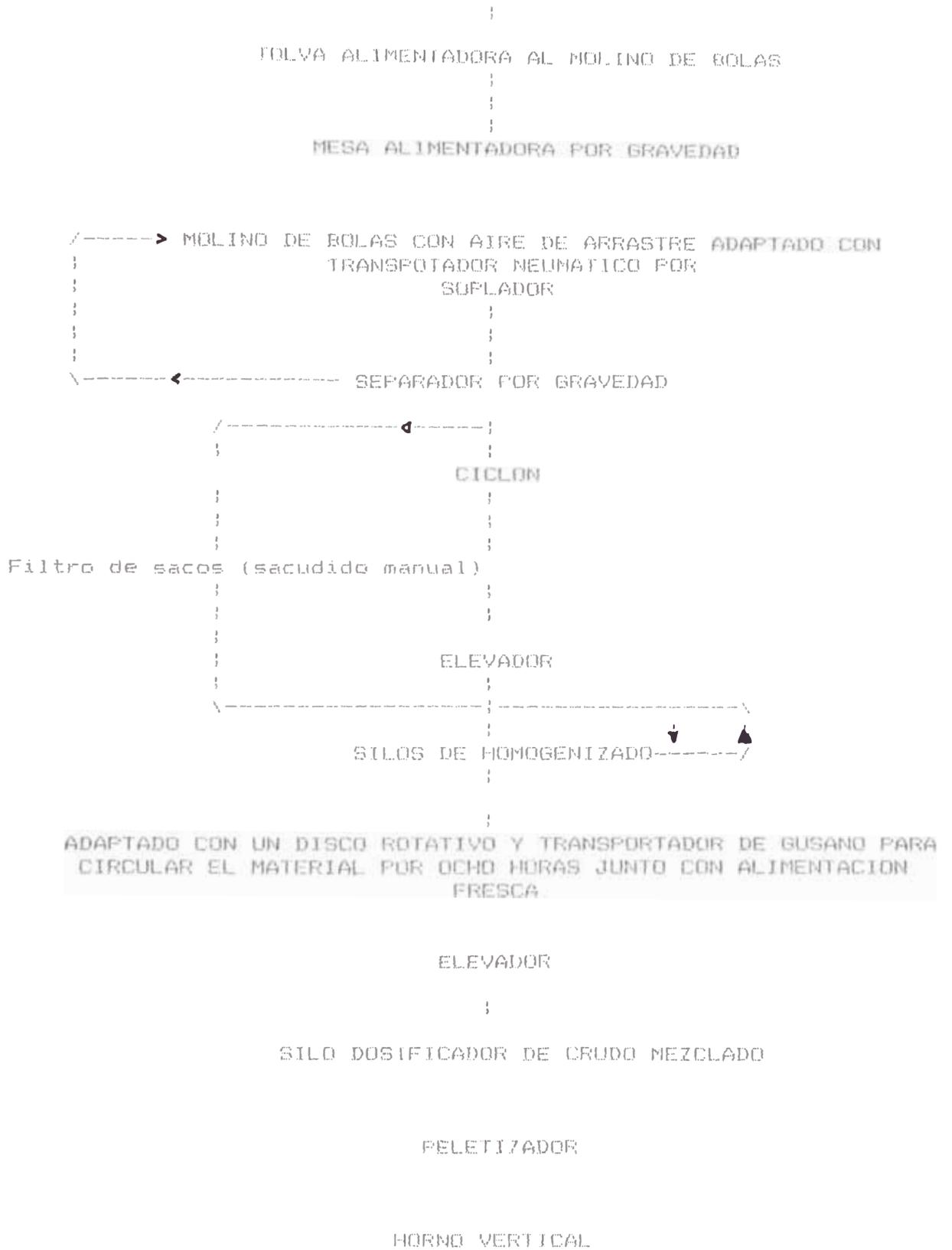
Para $y_{\max} = 3$ mm. tenemos $t = 25$ mm.

Podemos minimizar esta deflexión con nervaduras.

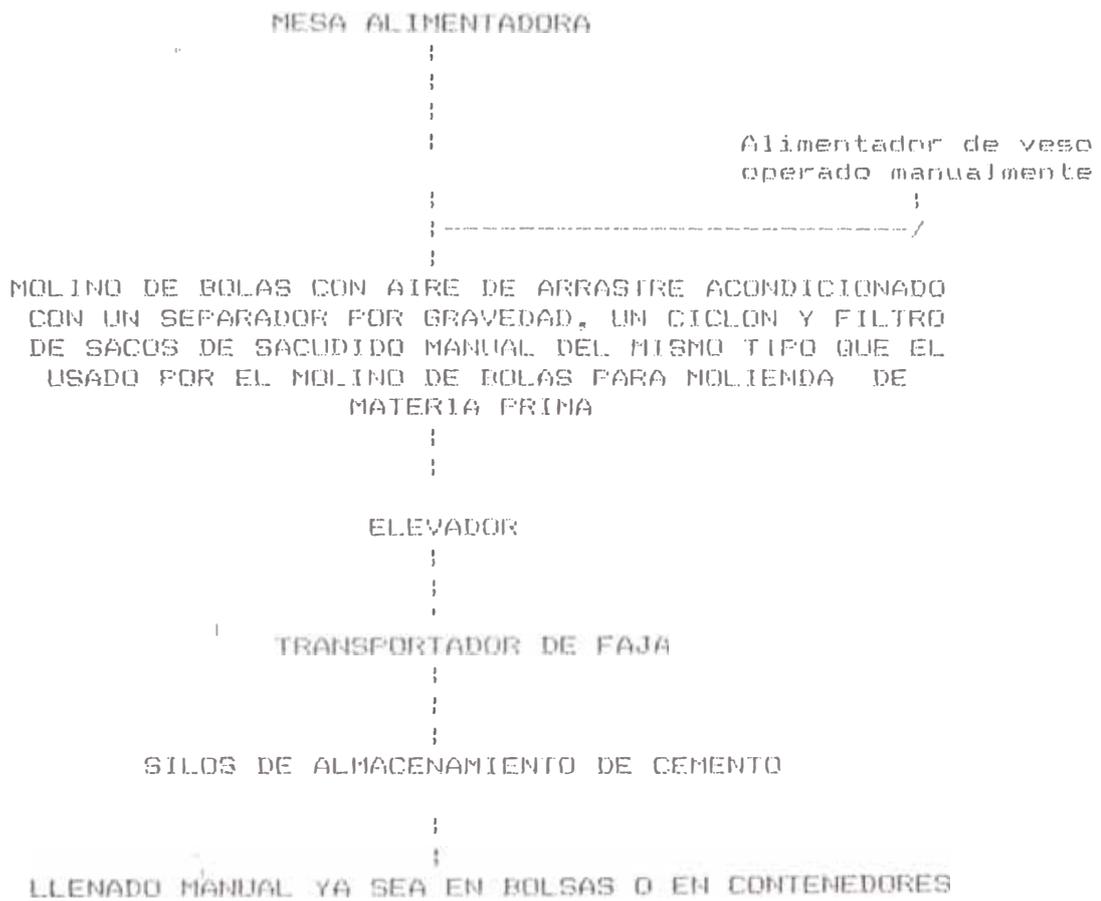
6.3 Especificación de Maquinarias y Equipos

6.3.1 Diagrama de flujo del proceso





ELEVADOR DE CANGILONES TIPO CADENA SIMPLE



6.3.2 Detalles de Planta y Maquinaria

Localización: Debe seleccionarse considerando la cercanía de los yacimientos.

Disposición de Planta: Consiste en una nave central de 30 m. de largo, 15 m. de ancho y 9 m. de alto. Las máquinas están situadas siguiendo una configuración en "U" uno de los extremos de la "U" tiene las maquinarias de procesamiento de materia prima, incluyendo los depósitos de materia prima, el fondo de la "U" tiene homogenizador y el horno y el otro lado de la "U" tiene la maquinaria de molienda de cemento y silos de almacenamiento. En ambos lados de la nave están otras dos naves con techo a un agua, uno es usado para almacenamiento de la materia prima junto con un triturador de quijadas y molino de martillos para molienda de la materia prima; un almacén del molino y un pequeño taller también se encuentran en esta nave. En la segunda nave están el almacén de clinker y el almacén de cemento. Al frente una oficina es instalada en la planta baja y un equipo apropiado de laboratorio está montado en primer piso.

La planta está localizada en un terreno de 15,000 m

La maquinaria se describe seguidamente:

Chancadora de quijadas

Tamaño : 305 mm. x 152 mm.

Motor : 12 kW, 1200/min.

Capacidad: 4 t/h.

Transportador de listones

Para transportar material roto desde la chancadora de quijada alimentando directamente al molino de martillos.

Ancho : 460 mm

Longitud : 7,600 mm.

Angulo de inclinación

Cadena de rodillos : 75 mm ∇ 160 mm
entre centros

Motor : 2,5 kW, 960/min.

Reducción : 50 : 1

Velocidad del Transp. : 27 m/min

Molino de martillos

Diámetro de los martillos: 450 mm

Motor : 19 kW , 830/min.

Tamaño de tamiz : 10 mm

Elevador No. 1

Para tomar el material de una faja transportadora instalada sobre el silo de materia prima

Capacidad de cangilon	:	1 kg
Paso	:	300 mm
Motor	:	2.5 kW, 1440/min.
Reductor	:	30 a 1
Velocidad de cadena de polea	:	47/min
Salida del elevador	:	2.25 t/h

Todos los elevadores usados son del tipo mencionado.

Colector de Polvos

Para coleccionar polvos del molino de martillos

Tipo	:	Filtro de sacos
Número de sacos	:	21
Longitud del saco	:	1900 mm
Diámetro del saco	:	150 mm
Soplador	:	Motor de 3.75 kW y 3 m ³ /min a 2900/min.

Transportador de Faja

Para alimentar los silos de materia prima

Ancho de poleas	:	450 mm
Diámetro de poleas	:	480 mm
Reductor	:	50 a 1
Velocidad del Transp.	:	30 m/min.

Los transportadores de faja de los silos de cemento son del mismo tipo.

Silos de almacenamiento de materia prima

Número de silos	:	5
Diámetro	:	2400 mm
Altura	:	3400 mm
Altura del cono del fondo:		130 mm
Volúmen total	:	8.4 m ³

Tolva dosificadora de peso

Instalada con una balanza de plataforma móvil que tiene una capacidad de pesado de 1000 kg. La tolva tiene forma trapezoidal y una capacidad de 500 kg. El conjunto es movido sobre rieles fin de recibir material de los diferentes silos para entregarlo en el chute del elevador respectivo a fin de alimentar al mezclador.

Elevador No. 2

Para alimentar al mezclador.

Todos los elevadores son del mismo tipo difiriendo solamente en la altura y velocidad

Mezclador.

Que proporciona un mezclado preliminar. El modelo consiste en un cubo de 1200 mm. rotando alrededor de una diagonal.

Volúmen.....	1.8 m ³
Motor.....	11.5 kW.,
Velocidad del mezclador	14/min
Tiempo requerido para una operación.....	20 min
Para llenado.....	5 min.
Para mezclado.....	10 min.
Para vaciado.....	min.

Elevador No.3

Lleva material desde el mezclador la tolva del molino de bolas.

Todos los elevadores son del mismo tipo difiriendo en altura y velocidad solamente

Mesa alimentadora

Para alimentar al molino de bolas

Diámetro	: 380 mm
Potencia del motor	: 1.5 kW
Reductor	: 52 a 1
Velocidad del alimentador:	13.5/min

Molino de bolas

Diámetro interior	: 1400 mm
Longitud	: 2500 mm
Espesor de ferros	: 13 mm

Volúmen efectivo	:	5.8 m ³
Reducción	:	10 : 1
Velocidad de rotación	:	2.75/min

Sistema de aire de arrastre

Capacidad del soplador	:	85 m ³ /min
Velocidad del soplador	:	2900/min
Potencia del motor	:	2 kW

Clasificador

Tipo	:	Doble cono
Diámetro de corona	:	1300 mm
Altura total	:	1600 mm
Diámetro de admisión	:	300 mm

Ciclón

Diámetro de corona	:	810 mm
Altura de parte recta	:	1250 mm
Altura del ahusamiento	:	1800 mm

Colector de polvos

Tipo	:	sacos, sacudido manu
Número de sacos	:	78
Diámetro de saco	:	100 mm
Longitud de sacos	:	2280

Elevador No. 4..

Para llevar el material recibido del molino de bolas al silo de homogenizado

Sus especificaciones son las mismas del elevador No. 1.

Silo de homogenizado

Diámetro	:	2400 mm
Altura parte recta	:	3400 mm
Altura del cono	:	1300 mm
Volúmen total	:	18.4 m ³

Transportador de gusano

Acoplado dentro de los silos de almacenamiento para libre descarga

Diámetro de gusano	:	150 mm
Paso	:	150 mm
Potencia del motor	:	1.5 kW
Reducción por rueda dentada gusano	:	52 a 1

- Elevador No. 5

Para llevar el crudo al peletizador

Silo dosificador

Para regular y medir la alimentación al peletizador

Diámetro : 1200 mm
 Altura recta : 1700 mm

Transportador de gusano

Del mismo tipo como el usado en silo de almacenamiento; se utiliza para regular la alimentación al peletizador

Peletizador

Diámetro : 1500 mm
 Altura periférica : 300 mm
 Velocidad : 20/min
 Potencia del motor : 6 kW

Horno vertical

Diámetro del horno después de colocado el jarro de drillo

: 1000 mm

Altura del horno : 6700 mm

Angulo del cono :

Parrilla cónica tipo Spohn; está movida por un motor de 6 kW y su velocidad es menos de 1/min

Soplador Roots

Capacidad : 45 m³/min

Altura de presión : 10 kPa

Potencia de motor : 30 kW

Esclusas de descarga del horno

Tres esclusas operadas manualmente. Después de la descarga el clinker es trasladado al almacén cercano; una vez enfriado es llevado al elevador No.

Elevador No. 6

Similar a los otros elevadores

Tolva de alimentación al molino de bolas

Este vesó es alimentado manualmente a otra tolva de alimentación del molino de bolas

Tanto la tolva de alimentación de clinker como la de vesó descargan sus respectivos materiales a dos mesas alimentadoras, las que los depositan en el molino de bolas.

- Molino de bolas para cemento

El molino de bolas es del mismo tipo que el de molienda de materia prima y tiene sistema de arrastre por aire, clasificador de doble cono, ciclón colector y filtro de sacos.

Después de la molienda el cemento es llevado directamente al chute del elevador No. 6.

Elevador No. 6 -

Similar a otros elevadores.

Este elevador entrega cemento al transportador de faja colocado en la cima de los silos. Los silos de almacenaje de cemento son seis y son del mismo tamaño que los silos de materia prima.

CAPITULO 7

COMPOSICION Y ESTRUCTURA DE LA INVERSION Y COSTOS

De acuerdo al punto 5.1.5 consideraremos una planta de 25 t/d de producción nominal.

Se ha tomado como referencia el tipo de cambio correspondiente al 03 de Mayo de 1970 (Dolar MUC = 17,6,253, Dolar M.I. = 17,29,000).

7.1.1 Inversión Fija

7.1.1.1 Terreno y Edificios

		Miles de Intis
Terreno	: 15,000 m ² a 17,580,000/m ²	81700,000
Edificios:	870 m ² a 17,81700,000/m ²	569,000

		161369,000

7.1.1.2 Maquinaria (incluido motores)

	Miles Intis
Chancadora de quijadas (4t/h)	39 515
Molino de martillo (150 mm)	47 418
Equipo de pesado (crudo)	50 805
Mezcladora (2.5 t/h capacidad)	45 160
Molino de bolas de crudo con transportador y separador (2 t/h de capacidad)	790 000
Homogenizador de circulación continua	
Fluidizador	169 000
Repletizador y silo doblificado	13* 190

Horno vertical, soplador Roots, panel de instrumentos, descarga controlada, etc.	354 300
Molino de bolas (cemento)	767 720
Tolvas	124 900
Elevadores y transportadores	245 380
Silos para materias primas	564 500
Instalación y erección	282 250
Edificio de laboratorio con equipo de ensayo	677 400
Otros	580 600

	1 845 570

7.1.2 Capital de Trabajo

Conjunto de recursos necesarios para la operación racional durante un ciclo productivo. Consideraremos capital de trabajo como un 20% de la inversión fija en maquinaria.

1 373 310

7.1.3 Inversión Total

3 218,870

7.2 Costos

7.2.1 Costos de Fabricación

Se contemplará en **este rubro** todos los gastos que **se han incurrido** para efectos de generar una de terminada producción.

Se consideran costos directos e indirectos

7.2.1.1 Costos Directos

son los asociados directamente al producto en **fabricación**, se consideran (1/ (t cemento)

. Materie Prima

Caliza	0.90 t	a 1/ 470 000 /t	423 000
Arcilla	0.65 t	a 1/ 240 000/t	156 000
Correctivos	0.05	1/ 120 000/t	6 000
Yeso	0.05 t	1/ 280 000/t	14 000
			1/ 599 000/tcc

Lo anterior representa una alternativa de cemento composición de crudo.

. Combustible

Se estima que la planta consumir **0.1** de antracita por tonelada de cemento

Antracita	0.1	1/ 3 000 000/t	1/ 300 000/t,
-----------	-----	----------------	---------------

• **Energía Eléctrica**

$100 \text{ Kw.h} \times 17\% + 200/\text{Kw.h} = 17 + 120 = 137$

• **Mano de Obra Directa**

Esta definido por el costo del personal que trabaja directamente con el **producto**

Incluye:

• Sueldos y salarios

• Seguro social

• Indemnizaciones

• Pensiones

• Gratificaciones

A los sueldos habrá que agregar las **aportaciones del empleador y las provisiones**, según:

I.P. S. 6%

S.N.P. 6%

FONAVI 10%

Aportaciones: 17% (mensual) del empleador

Indemnización 1 100%

12'

Aguinaldos 1 100%

12

Provisiones 16.5% (mensual)

Total Aportaciones y Provisiones 37,5%

Por lo tanto:

Labor	Turno	Numero	Sueldo	Aport y Provi	Total
Trituración y Pesado			10 000,000	703,500	14 017,50
Mezclado y Molido	3	4	21 800,000	938,000	11 214,00
Peletizado y Homogenizado		7	3 840,000	1 286,200	15 379,20
Operación del Horno	3	3	51 600,000	1 576,000	22 428,00
Molino de Clin-ker y Cemento	3	6	2 700,000	737,000	17 622,00
Silos	3	3	21 200,000	737,000	8 311,00
Empaque	1	1	21 200,000	737,000	2 937,00
Extras			100,000	737,000	17 622,00
		30			<u>110 030,70</u>

Un día de labor costará ... 4'121,000 ó 12'164, 840/t de cemento.

7.2.1.2 Costos Indirectos

Son los incurridos indirectamente en la producción. Tenemos:

Mano de Obra Indirecta

Representado por los sueldos y salarios de los jefes de producción, supervisión, choferes, mantenimiento, limpieza, guardia.

	Hombres	Sueldo	Provis.	Total
Gerente	1	14'000,000	4'690,000	18'690,000
Ing. Mecánico	1	11'200,000	3'750,000	14'950,000
Supervisores	3	7'420,000	2'485,700	99'717,100
Químico	1	9'380,000	3'145,300	12'525,300
Jefe Taller	1	5'600,000	1'876,000	7'476,000
Asist. Laborat.	3	3'780,000	1'266,300	15'132,900
Electricista	1	630,000	1'547,700	6,187,700
Asist. Mecánico	1	3'780,000	1'266,300	5'046,300
Contador	1	6'180,000	2'204,300	8'384,300
Cajero	1	3'780,000	1'266,300	5'046,300
Oficinista	1	3'780,000	1'266,300	5'046,300
Secretaria	1	5'600,000	1'876,000	7'476,000
Meranógrafa		3'780,000	1'266,300	5'046,300
Chofer	2	3'780,000	1'266,300	10'092,600
Conserje	1	2'000,000	670,000	2'670,000
	20			157'872,100

Esto **equivale** a l/. 230,520 por tonelada de cemento.

Tenemos además los **gastos por** conservación y mantenimiento.

Por año

Edificios 2% de l/. 8,700 000,000 l/. 174 000,000

Lo que **es equivalente** l/. 14 500,000/mes o l/. 46,723/t cemento.

. Materiales Indirectos

Representados **por** los materiales que no forman parte del producto en sí por ejemplo, **repuestos lubricantes**, reactivos y otros.

Tomamos un 4% de lo invertido en maquinaria

4% de 6,866 578,000 274 663,120

Lo que es equivalente l/. 22 688,573/mes ó l/. 34,290/t de cemento.

- **Costos de fabricación por tonelada de cemento.**

Materia Prima 579 000

Combustible	300 000
Energía Eléctrica	120 000
Mano de Obra Directa	164 840
Mano de Obra Indirecta	230 520
Conservación y Mantenimiento	21 725
Materiales Indirectos	34 290
	<u>17.1 470 375</u>

Utilidad Anual Bruta

Para calcular el ingreso **bruto** anual, consideremos una producción de 25 toneladas por día, 320 días/año, lo que **equivale a 8 000 toneladas anuales**. El precio de mercado (mayo de 1990) menos el impuesto, el embolsado y **flete es de aproximadamente 2 200 000** In/ta/tonelada de cemento.

Ingreso Bruto Anual	000 x 17. 2 200 000	17. 17 600 000 000
Gastos	: 000 x 17. 1 470 375	17. 1 762 984 000

Si deducimos la depreciación por :

Edificios	17. 252 300 000
Maquinaria	17. 686 657 800
retorno neto será	: 17. 4 678 058 200

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este estudio concluye ofreciendo una posibilidad de instalación de una planta productora de cemento con tecnología aparente para solucionar la problemática latente que presenta el consumo de cemento en nuestro país.

Esta alternativa elimina en gran parte los costos por transporte, que significa una gran cantidad de dinero y a la vez justificar si se presentara el caso un precio relativamente mayor de la bolsa de cemento con respecto a la producida en las grandes plantas de cemento ya conocidas.

También debe considerarse la simplicidad de los hornos verticales lo que conlleva a la fabricación o adquisición de equipos en gran porcentaje en muchos locales, con el consecuente ahorro de divisas.

Se recomienda:

- Realizar mayor número de investigaciones sobre canteras y sus análisis correspondientes dimensionándolas de acuerdo al volumen requerido por la tecnología de hornos verticales.

Considerar en un estudio más profundo, la posibilidad de aplicar parcial o totalmente, la maquinaria y equipos que existen, actualmente instalados con capar-

idad ociosa en algunos fábricas del país.

- Considerar en el estudio citado, el análisis detallado de costos por fleles para asegurar la reducción de los mismos, dada la influencia que tienen sobre precio del producto.

BIBLIOGRAFIA

- DISEÑO Y DESARROLLO DE HORNOS VERTICALES PARA LA FABRICACION DE CEMENTO PORTLAND

M.S. IYENBAR

- DESARROLLO DE LA TECNOLOGIA APROPIADA PARA PRODUCCION A MENOR ESCALA DE CEMENTO PORTLAND EN PAISES Y REGIONES SUBDESARROLLADAS

ONUDI. BASADO EN EL TRABAJO DE HAROLD C. BOECK, CONSULTOR DE CEMENTO

- ÜBER DAS BRENNEN VON HOCHWERTIZEN PORTLANDKLINER IM AUTOMATISCHEN SCHACHTOFEN

(Sobre la combustión del Clinker Portland de alta calidad en el horno vertical automático)

POR : A. BUES, BECKUM WESTF

DE : Zement-Kalk-Gips Nro. 5/1957,
pág 187/194

- DIE DRUCKVERHÄLTNISSE IM ZEMENTSCHACHTOFEN UND DEREN BEEINFLUSSUNG DURCH DIE FORM DES AUFBAUEGUTES, DURCH DAS GEBLÄSE UND DIE OFENHOHE

(Condiciones de presión en el horno vertical la

influencia que sobre ella ejercen la forma del material de carga, el soplador y la altura del horno)

1.
 POR : A. BEITLICH, PORTLAND,
 NEUSUDWALES (AUSTRALIEN)
 DE : ZEMENT-KALK-GIPS Págs. : 151/155

DER WARMEÜBERGANG BEI SCHACHTÖFFEN MIT UND OHNE
 HINTERMAUERUNG

(Transferencia de Calor en los hornos verticales con y
 sin mampostería de relleno)

POR : VON H. RECHMEIER, KARLSTADT a.M
 DE : ZEMENT-KALK-GIPS, Págs 156/160

- HORNOS VERTICALES DE GRAN PRODUCCION

FRIED KRUPP MASCHINEN - UND STAHLBAU
 RHEINHAUSEN

PROPUESTA Y ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA UNA MINI PLANTA
 DE CEMENTO

R. BRUCE Y M.K. GARG

- MANUAL TECNOLOGICO DEL CEMENTO

ING. WALTER H. DUDA

- DER SCHACHTOFEN VON MORGUEN ,

(El Horno vertical de Mañana)

E. SPOHN HEIDELBERG.

EXTRACTO DE "TÄGUNGSRICHTE DER ZEMENTINDUSTRIE" 1988

Nro. 11 Pág. 35/39 Nov. 1954

POR : E. SPOHN, HEIDELBERG .

DE : ZEMENT-KALK.GIPS 1954. Nro11,
PAG.405/415

DIE HAUENSCHILD'SCHE REAKTION BEIM ZEMENTSCHACHTOFEN,

(La reacción de Hauenschild en el horno vertical de cemento.)

E. SOHN, HEIDELBERG. EXTRACTO DE "ZEMENT - KALK - GIPS"
1961

No. 3 PAG. 100/108

DER ZEMENTSCHACHTOFEN HEUTE,

(El Horno vertical Hoy)

E. SPOHN HEIDELBERG.

EXTRACTO DE ZEMENT KALK- GIPS" 1958 No. 7 PAG. 285/290

- NEW GRATE BOOSTS QUALITY OF SHAFT KILN CEMENT

POR : EBERHARD SPOHN Y EDUARD WOORMAN

DE : ROCK PRODUCTS, Febrero de 1959

- FABRICACION, CARACTERISTICAS Y APLICACIONES DE LOS
DIVERSOS TIPOS DE CEMENTO

POR : M. PAPADAKIS

- FABRICACION DE CEMENTO EN HORNOS VERTICALES

FOR : ITINTEC

OFICINA DE INFORMACION Y

EXTENSION

- DOCUMENTOS DE FRAGOINVEST.

(Constructora de plantas de Cemento).