

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CONVERSIÓN DE UN HORNO DE CLINKER A HORNO DE CAL
EN LA PLANTA LA PEDRERA**

TESIS

PRESENTADA A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE
INGENIERÍA

POR

VÍCTOR HUGO CIFUENTES SOTO

AL CONFERÍRLE EL TITULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 1,997

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Biblioteca Central

08
TC4201
c.4

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con lo preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de tesis titulado:

CONVERSIÓN DE UN HORNO DE CLINKER A HORNO DE CAL EN LA PLANTA LA PEDRERA

tema que fuera asignado por la dirección de la Escuela de Ingeniería Química con fecha de 2 de octubre de 1997.



Victor Hugo Cifuentes Soto.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

MIEMBROS DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Herbert René Miranda Barrios
VOCAL 1o.	Ing. Miguel Ángel Sánchez Guerra
VOCAL 2o.	Ing. Jack Douglas Ibarra Solórzano
VOCAL 3o.	Ing. Juan Adolfo Echeverría Méndez
VOCAL 4o.	Br. Víctor Rafael Lobos Aldana
VOCAL 5o.	Br. Wagner Gustavo López Cáceres
SECRETARIA	Inga. Gilda Mariana Castellanos de Illescas.

TRIBUNAL QUE PRACTICO EL EXAMEN

GENERAL PRIVADO.

DECANO	Ing. Jorge Mario Morales Gonzalez
EXAMINADOR	Ing. Carlos Jacobsthal Reti
EXAMINADOR	Ing. José Francisco de Jesús Leal Trangay
EXAMINADOR	Ing. Julio Alberto Rivera Palacios
SECRETARIO	Ing. Edgar José Bravatti Castro



CEMENTOS PROGRESO, S.A.

Guatemala,
1 de Octubre de 1997

Ingeniero
Julio Chavez
Director de Escuela de Ingeniería Química
Universidad de San Carlos de Guatemala.

Ingeniero Chavez:

Por este medio le informo que estoy de acuerdo en que el Señor Victor Hugo Cifuentes Soto pueda desarrollar el proyecto de Conversion de un Horno de Clinker a horno de Cal en la Planta la Pedrera, contando con mi asesoría para desarrollar dicho tema.

Sin otro particular, me despido.

Atentamente,

Ing. Jorge Díaz
Gerente de Planta

/Vivian

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

Guatemala, 23 de octubre de 1,997.

Ingeniero
Julio Chávez Montúfar
Director Escuela Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente.

Estimado Ingeniero Chávez.

Por medio de la presente hago de su conocimiento, que he revisado el Informe Final de Tesis del estudiante **Víctor Hugo Cifuentes Soto**, titulado: **CONVERSION DE UN HORNO ROTATIVO DE CLINKER A UN HORNO DE CAL**, de la cual dejo constancia de aprobación, para proceder a la autorización del respectivo trabajo.

Sin otro particular me suscribo de usted.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Dr. Adolfo Gramajo Antonio
REVISOR

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

El Director de la Escuela de Ingeniería Química, Ing. Julio Chávez Montúfar, después de conocer el dictamen del Asesor con el Visto Bueno del Jefe de Departamento, al trabajo del estudiante Víctor Hugo Cifuentes Soto, titulado: **CONVERSION DE UN HORNO DE CLINKER A HORNO DE CAL EN LA PLANTA LA PEDRERA**, procede a la autorización del mismo.

Ing. Julio Chávez Montúfar
DIRECTOR
ESCUELA INGENIERIA QUIMICA



Guatemala, 29 de octubre de 1,997.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

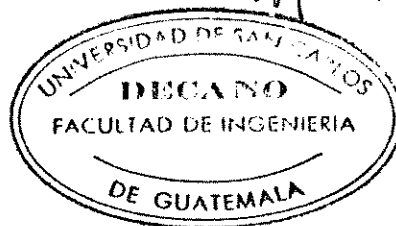
Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

El Decano de la Facultad de Ingeniería, luego de conocer la autorización por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de Tesis titulado: **CONVERSION DE UN HORNO DE CLINKER A HORNO DE CAL EN LA PLANTA LA PEDRERA**, del estudiante **Víctor Hugo Cifuentes Soto**, procede a la autorización para proceder a la impresión de la misma.

IMPRIMASE:


Ing. Herbert René Miranda Barrios
DECANO



Guatemala, 29 de octubre de 1,997.

AGRADECIMIENTO

A Dios,
al Ingeniero Jorge Díaz, por su asesoría;
al Ingeniero Adolfo Gramajo, por su colaboración;
a Cementos Progreso, por la ayuda prestada;
a mis padres, Vicente Cifuentes y Gloria Esmeralda Soto;
a mis hermanos, Erwin Cifuentes y Sucelly Cifuentes;
a mis amigos y compañeros de trabajo.

DEDICO ESTA TESIS

A: MI FAMILIA CIFUENTES TRUJILLO

por haber sido mi mayor apoyo, mi consejera y mi inspiración.

INDICE GENERAL

INDICE DE ILUSTRACIONES	IV
GLOSARIO	V
INTRODUCCIÓN	VI
JUSTIFICACIÓN	1
1. OBJETIVOS	2
1.1 Objetivos generales	
1.2 Objetivos específicos.	
2. METODOLOGÍA	3
3. DESARROLLO DEL PROYECTO	4
3.1 EXTRACCIÓN DE LA MATERIA PRIMA	4
3.1.1 Reducción de tamaño	6
3.1.1.1 Trituradora tipo cono	8
3.1.1.2 Trituradora de mandíbulas	
3.1.1.3 Trituradora tipo rodillo	
3.1.1.4 Trituradora tipo impacto	9
3.1.1.5 Tamizado	9
4. Teoría de calcinación	11
4.1 Temperatura de disociación	11
4.2 Tiempo de calentamiento	12
4.3 Remoción de CO ₂ generado	12
5. Fenómeno de decrepitation	12
6. Pérdida de peso de la caliza	15
7. Recarbonatación de la cal	15
8. Granza	16
9. Alta vrs. baja temperatura de calcinación	16
10. Reducción de tamaño	17
10.1 Porosidad y densidad	18
10.2 Efecto del tamaño de la piedra	19
10.2.1 Tamaños de piedras superior a 6 pulgadas	19
10.2.2 Distribución granulométrica de la alimentación	19
11. Esfuerzo de calcinación	20
12. Influencia de las impurezas de las rocas.	20

13.	Recapitulación	21
14.	Tipos de hornos para la fabricación de cal viva	22
	14.1 Transferencia de calor en hornos verticales.	22
	14.1.1 Hornos verticales a contracorriente	22
	14.1.2 Hornos verticales regenerativos	24
	14.2 Operación de un horno rotativo	26
	14.3 Horno rotativo con precalentador	26
	14.4 Calcinador "flash"	28
15.	Análisis comparativos entre hornos verticales y rotativos	28
	15.1 Calidad de la piedra	30
	15.2 Tamaño y distribución granulométrica	31
	15.3 Grado de calcinación	32
	15.4 Tiempo de calcinación	33
	15.5 Tipos de combustibles	33
	15.6 Generación de subproductos	34
16.	Inversión de hornos de cal	35
	16.1 Horno regenerativo	35
	16.2 Horno largo	35
	16.3 Horno con precalentador	36
17.	Enfriadoras para el proceso de la cal	40
	17.1 Enfriadora de parrillas	41
	17.2 Enfriadora rotativa	45
	17.3 Enfriadora planetaria	45
	17.4 Enfriadora de contacto	47
18.	Condiciones actuales del horno rotativo La Pedrera	50
	18.1 Sistema de alimentación	51
	18.2 Transporte del producto	51
	18.3 Sistema de filtración	52
	18.4 Sistema de enfriamiento	52
	18.5 Sistema de transferencia de calor	53
	18.6 Sistema de alimentación de combustible	54
19.	Proceso de hidratación de cal	55
	19.1 Descripción del proceso	55
	19.1.1 Paso 1	56
	19.1.2 Paso 2	56

19.1.3	Paso 3	56
19.1.4	Paso 4	57
19.1.5	Paso 5	57
CONCLUSIONES		59
RECOMENDACIONES		60
BIBLIOGRAFIA		61

INDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Proceso de fabricación de cal	5
2. Proceso de explotación de la cantera	7
3. Reducción de tamaño en circuito cerrado	10
4. Influencia de la presión en la temperatura de disociación	13
5. Influencia de la composición de la atmósfera en la temperatura de disociación	14
6. Operación de hornos en la fabricación de cal	23
7. Horno regenerativo vertical	25
8. Horno largo de cal	27
9. Horno rotatorio con precalentador	29
10. Horno 61 La Pedrera propuesto para fabricar cal viva	37
11. Enfriamiento de la cal en una enfriadora de parrilla	42
12. Enfriadora de parrilla	44
13. Enfriadora rotativa	46
14. Enfriadora de contacto	49
15. Planta de hidratación	58

TABLAS

Tabla 1 :	Temperatura de calcinación	17
Tabla 2:	Porosidad de la caliza	18
Tabla 3:	Calidad de la piedra caliza	30
Tabla 4:	Granulometría de la caliza de alimentación	31
Tabla 5:	Grado de calcinación	32
Tabla 6:	Tiempo de calcinación	33
Tabla 7:	Tipos de combustibles	34
Tabla 8:	Generación de subproductos	34
Tabla 9:	Costos de conversión horno rotatorio	39
Tabla 10:	Consumo de energía térmica hornos rotatorios	39

GLOSARIO

CaCO_3 : denominación utilizada para referirse al carbonato de calcio, comúnmente referido como caliza.

CO_2 : molécula que se forma de la combinación de un átomo de carbono por dos e oxígeno conocida como dióxido de carbono.

Clinker : es el resultado de la reacción química que sufre las materias primas para la fabricación de cemento durante su cocción dentro de hornos rotatorios cuya temperatura alcanza los 1400 grados centígrados en la zona mas caliente.

Densidad : relación entre la masa de un material contenido en un volumen específico

Fineza : cantidad de material expresada en porcentaje que pasa por un tamiz de abertura definida en micrones.

Grado de llenado: los hornos rotatorios no están completamente llenos en su sección transversal y esta tampoco es constante. A la relación del arrea ocupada por el material al área libre de la sección transversal del horno se le conoce como grado de llenado del horno.

Na_2O : óxido de sodio, resultado de la combinación de dos átomos de sodio por uno de oxígeno.

PF : abreviatura de perdida al fuego. Usualmente utilizado para referirse a la perdida de peso que sufre la caliza en el proceso de calcinación.

Trefoil : disposición de ladrillos refractarios que dividen el flujo de aire y material en varios canales aumentando de esa manera el área de transferencia de calor. Su apariencia es similar a la de una cruz metálica.

Introducción

La cal viva y cal hidratada han jugado un papel importante en la evolución de la industria, en los últimos siglos, y recientemente sus aplicaciones siguen creciendo. Algunas de las aplicaciones donde se utilizan estos materiales son:

- Estabilización de suelos
- Construcción
- Manufactura del acero
- Purificación del agua
- Desulfurización de gases de combustión
- Producción de azúcar
- Tratamiento de aguas de desecho
- Industria del papel

Cumplir con las exigencias de cada una de estas industrias requiere disponer de varias instalaciones que puedan ser acondicionadas para producir productos de diferentes características o bien disponer de un equipo lo suficientemente flexible para cumplir con esta misión. Es por esto, que la industria de la cal viva ha dividido la fabricación de la misma en dos procesos.

- Fabricación de cal viva mediante un horno vertical
- Fabricación de cal viva mediante un horno rotativo

Este último es el objetivo de este estudio. Conjuntamente se evaluarán las principales bondades y deficiencias de cada uno de los tipos de hornos modernos para la fabricación de cal.

Las instalaciones requeridas para producir cal en un horno rotativo son similares o casi idénticas a las necesarias para fabricar clinker. Es por eso que el presente estudio evalúa la factibilidad de convertir un horno largo vía seca utilizado en la fabricación de clinker a un horno de cal viva.

Los hornos rotativos en la fabricación de cal pueden presentar más de una configuración dependiendo de las características de la caliza, la explotación programada de la cantera, las propiedades deseadas de la cal, composición del combustible a utilizar, etc.

Justificación

Cementos Progreso, S. A. es una compañía dedicada a la fabricación de cemento y cal en la industria guatemalteca, utilizando para cumplir dicha misión dos plantas; una ubicada en el perímetro metropolitano y la otra, en el departamento El Progreso. Ambas plantas cuentan con hornos verticales para llevar a cabo la producción de cal viva y hornos rotativos para la fabricación de "clinker".

Debido al crecimiento de la industria local, que reclama cales de diferentes características químicas y físicas, poseer una instalación flexible es imprescindible. Es por eso que el presente estudio pretende evaluar la conversión de un horno rotativo de "clinker" de la planta La Pedrera a un horno rotativo de cal que cumpla con las necesidades cambiantes de la industria guatemalteca.

Para tal efecto el horno 61 de clinker de La Pedrera es evaluado desde el punto de vista técnico y financiero comparado con la instalación de un horno nuevo tipo vertical para cubrir el mercado de cal química.

1. Objetivos

1.1 General

Convertir una de las instalaciones ya existentes en la Planta La Pedrera dedicadas a la fabricación de cemento a la fabricación de cal, la cual debe cumplir con las características físicoquímicas que la industria guatemalteca y centroamericana reclama.

1.2 Específicos

- Evaluación de las instalaciones actuales del horno 1 de la Planta la Pedrera.
- Evaluación de las modificaciones necesarias para producir cal en un horno diseñado para la fabricación de "clinker".
- Evaluación de la materia prima para la producción de cal.
- Establecer qué diseño es el más apropiado en la producción de cal en La Pedrera.
- Considerar los diferentes pasos de modificación e inversión en la producción de cal viva en un horno rotativo sencillo, con precalentador y con enfriadora de contacto.

2. Metodología

1. Estudio del proceso de fabricación de cal viva e hidratada.
2. Evaluación de los recursos físicos con los que se cuentan actualmente en la Planta La Pedrera, específicamente el del horno 1 de "clinker".
3. Estudio de las ventajas y desventajas de los hornos rotativos y de los hornos verticales en la fabricación de cal viva para la industria.
4. Especificación de los equipos necesarios para la conversión de un horno de "clinker" a cal.
5. Estudio de la conversión del horno 1 de clinker a horno de cal con precalentadores y enfriadora de contacto.
6. Estudio de impacto ambiental de las instalaciones que serán utilizadas en la fabricación de cal.
7. Descripción de una prueba a nivel industrial de la producción de cal en el horno 1 de La Pedrera.

3. DESARROLLO DEL PROYECTO

Para entender el proceso de fabricación de cal este se dividirá en tres grandes secciones:

- La sección de extracción de materia prima
- La sección de calcinación
- La sección de hidratación.

Un diagrama del proceso se observa en la figura No. 1

3.1 EXTRACCIÓN DE LA MATERIA PRIMA:

La explotación de las canteras rompiendo la rocas en una forma segura y económica y luego ser transportada para una reducción posterior de tamaño es lo que constituye la primera etapa en la fabricación de cal.

Usualmente, la explotación de una cantera incluye los siguientes aspectos:

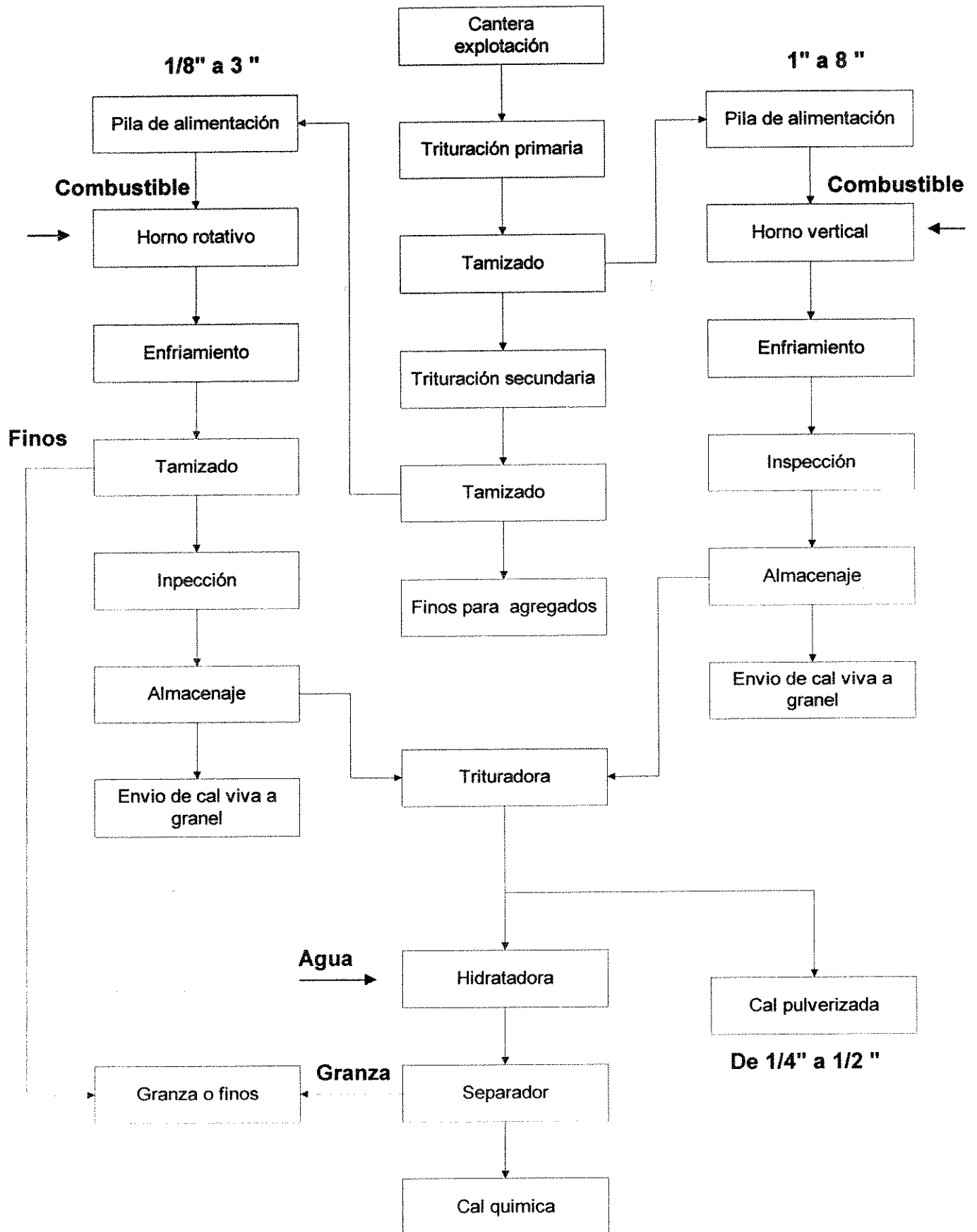
- Equipo de transporte adecuado, camiones, cargadores, tractores, bandas transportadoras etc.
- Equipo de barrenación: de acuerdo a las características de la cantera la planeación de la explotación de la misma puede hacerse usando tractores o bien barrenando para hacer voladuras con explosivos.
- Equipo de explosivos y auxiliares: una vez determinado que los explosivos son necesarios para la explotación de la cantera la adquisición del equipo de detonación y protección es el siguiente paso a considerar, así también el equipo para reducir de tamaño las piezas de sobretamaño obtenidas del proceso de explotación de la cantera.

Uno de los parámetros más importantes por considerar es la fragmentación de la piedra obtenida de la cantera. Este parámetros como se estudiará más adelante influencia la operación de los hornos y en algunas ocasiones determina si un tipo o bien otro es utilizable para la cantera.

La distribución de tamaño depende del diseño de la perforación, la correcta selección de los explosivos, la correcta distribución de los agujeros y la secuencia de la detonación.

Figura No. 1

PROCESO DE FABRICACION DE CAL



Una planta típica de fabricación de cal requiere del orden de 200 mil a 400 mil toneladas al año de piedra caliza en el rango de granulometría especificado de acuerdo al tipo de horno utilizado para la calcinación.

El siguiente diagrama muestra las actividades de explotación de una cantera de caliza. Figura No. 2

3.1.1 REDUCCIÓN DE TAMAÑO:

El proceso de reducción de tamaño de la piedra extraída de la cantera se lleva a cabo mediante trituradoras. El número de trituradoras o el tipo de trituradoras a usar en la industria de la cal dependen del radio de reducción necesario para la etapa de calcinación y las características físicas de la roca a reducir de tamaño.

En la industria de la cal se encuentran cinco tipos de trituradoras :

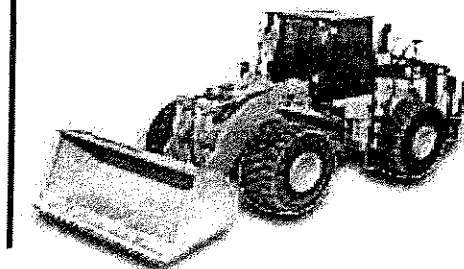
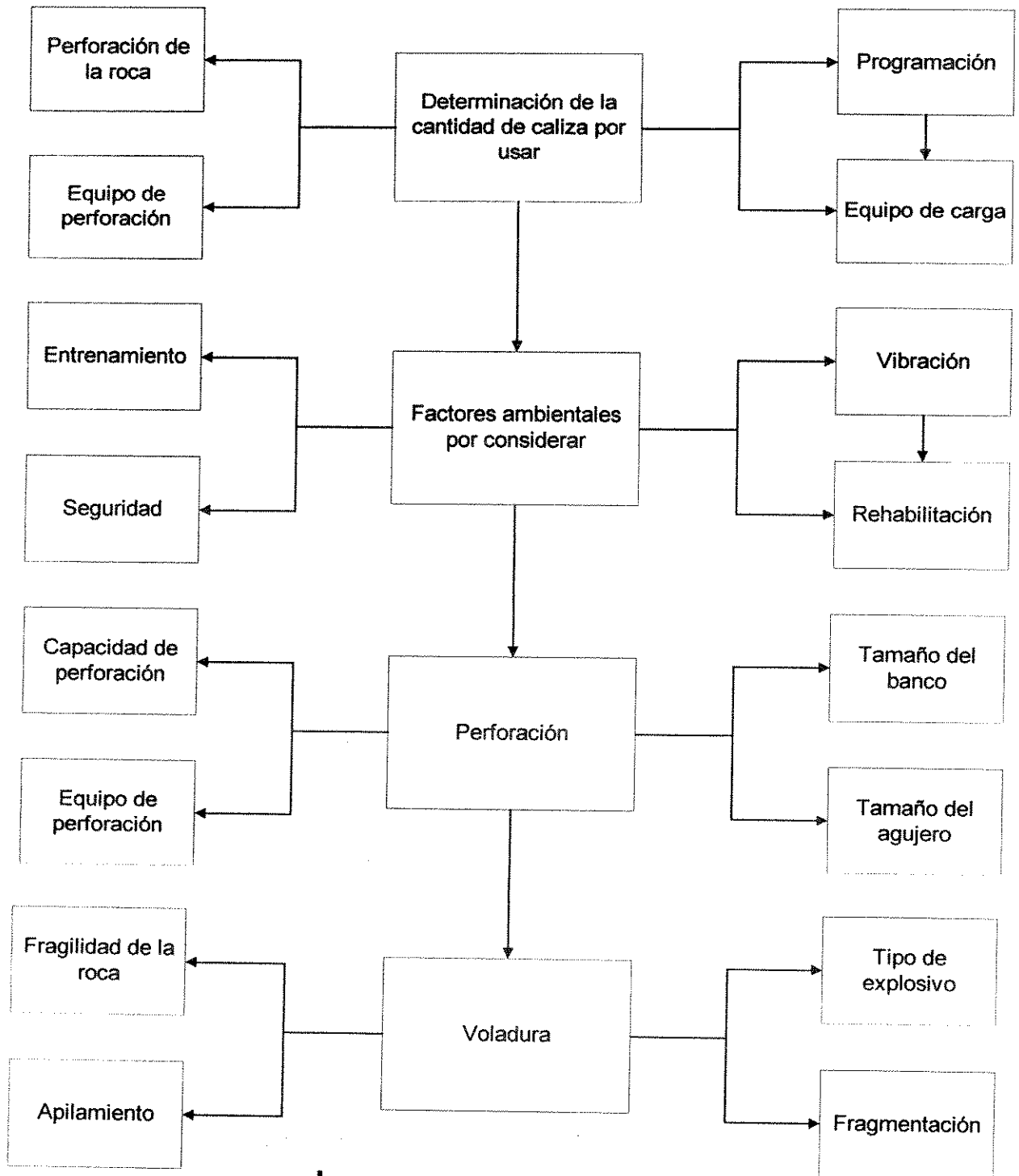
- Trituradora de impacto
- Trituradora de martillos
- Trituradora tipo roller
- Trituradora giratoria
- Trituradora de mandíbulas.

3.1.1.1 Trituradora Giratoria

Este tipo de trituradora utiliza una cabeza de trituración en la forma de un cono truncado es cual esta montado sobre un eje. La parte superior esta montada sobre un sistema flexible que le permite un movimiento circular en la parte baja. Este movimiento es el que crea el fenómeno de trituración en el cono y el sistema de corazas alrededor del cono. El principio de reducción de tamaño es por compresión entre el cono y las corazas.

Figura No. 2

Proceso de explotación de una cantera en la industria de cal.



3.1.1.2 Trituradora tipo cono

En este tipo de trituradoras el movimiento del cono permite que piezas de roca caigan libremente por la gravedad y luego son atrapadas en la parte baja cuando el cono vuelva a su posición original.

El radio de reducción de las trituradoras de cono oscila en el rango de:

Usadas como trituradoras secundarias 6 a 8 : 1

Usadas como trituradoras terciarias 2 a 3 : 1

3.1.1.3 Trituradora de Mandíbulas

Consisten de una parte fija y una quijada móvil encerradas en una cajuela que crea la cámara de trituración. La sección transversal entre la parte fija y la parte móvil de la quijada se reduce a medida que se acerca al final de la descarga de la cámara de trituración. El método de reducción de tamaño en una trituradora de quijada es por compresión. Estas trituradoras pueden ser de dos o una quijada.

3.1.1.4 Trituradoras tipo rodillo

Una trituradora de rodillos consiste de dos soportes pesados de uno o dos rodillos. Cada rodillo es manejado por un sistema de tracción en forma de V. Cada rodillo cuenta con dientes de diferente tamaño o número dependiendo de la aplicación del rodillo. Un rodillo usado para la trituración primaria requiere dientes de mayor tamaño y más espaciados. En tanto que un rodillo usado para la trituración secundaria requiere de dientes de menor tamaño y más cercanos. Su aplicación principal es en manejar materiales pegajosos o bien de características plásticas o con muchas arcillas. Tienen la ventaja sobre las otras trituradoras que la cantidad de finos que producen es mucho menor, haciendo la siguiente etapa de tamizado menos difícil.

Tres fenómenos de reducción de tamaño toman lugar en estas trituradoras:

Impacto en los dientes de los rodos

Corte de la piedra por el esfuerzo entre el diente y la parte fija o el otro rodo.

Compresión entre los rodos o el rodo y la coraza fija

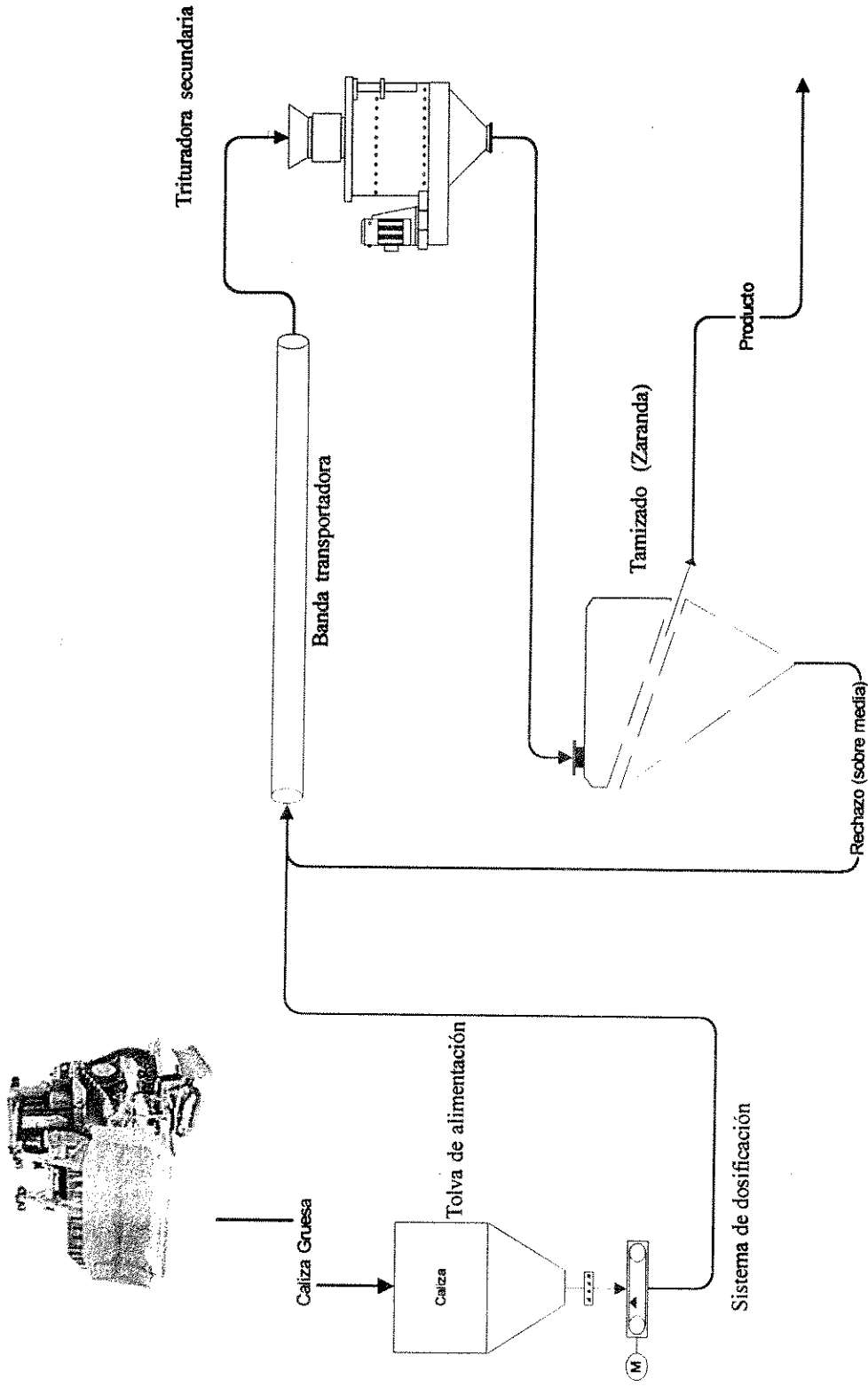
3.1.1.5 Trituradoras de Impacto

En este sistema se tiene un eje central que tiene varios martillos , los cuales giran a altas revoluciones. Las rocas entrantes la trituradora son golpeadas por los martillos en contra de la estructura de corazas . Esta acción puede repetirse varias veces en el paso del material. Un grupo de barras de acero ubicadas en la parte baja de la sección de martillos llevan a cabo la selección entre el material de tamaño adecuado o de sobretamaño.

3.1.2 Tamizado

Se conoce con este nombre al método de controlar el tamaño mas grande de la piedra obtenida de un proceso de triturado, de tal forma que el material de sobremedida es retornado a la trituradora. Para controlar el circuito el material debe permanecer en la cámara de triturado hasta que este se reduzca en tamaño adecuado. El resultado es que la proporción de material sobremolido y de finos en el producto es mayor y por lo tanto la eficiencia es menor con el correspondiente aumento de costo. Usualmente, un sistema de trituradoras, usualmente la trituradora primaria trabaja en circuito abierto produciendo un material de tamaño adecuado para la siguiente etapa, en tanto que las trituradoras secundarias y terciarias trabajan en circuito cerrado. Figura No. 3

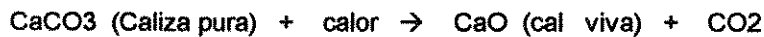
Diagrama de reducción de tamaño en circuito cerrado



<p>Circuito cerrado de trituración.</p>	<p>Figura No. 3</p>
<p>Titlo :</p>	<p>Diagrama de reducción de tamaño</p>
<p>Ref. :</p>	

4. TEORÍA DE CALCINACIÓN

La calcinación de la caliza es un proceso químico sencillo de tipo reversible, donde al ser sometida al efecto del calor el carbonato de calcio y magnesio se descompone para producir la cal viva. La reacción se puede describir de acuerdo a la siguiente ecuación estequiométrica:



Para que las anteriores reacciones tomen lugar se deben de considerar tres factores que afectan la cinética de la descomposición de la caliza.

1. La temperatura de disociación.
2. Tiempo a mantener la temperatura de disociación.
3. Remoción del dióxido de carbono generado.

4.1 Temperatura de disociación

El fenómeno de disociación toma lugar gradualmente de la parte externa de la piedra hacia adentro. Usualmente, la penetración de disociación se mueve a velocidad constante en todas las direcciones.

La temperatura requerida para que el proceso de descomposición del carbonato de calcio y magnesio tome lugar dependen de varios factores:

La composición química de la caliza: la temperatura de disociación para el carbonato de calcio y magnesio es diferente, siendo para el Carbonato de Calcio puro del orden de 900 C y de 480 C para el carbonato de magnesio. Debido a que la cantidad de los carbonatos de caliza o magnesio en una caliza cambian la temperatura de disociación también cambia.

La presión a la cual toma lugar la disociación: estudios llevados a cabo por Linzell (*) demostró que la temperatura de disociación se ve dramáticamente afectada por la presión del sistema.

Mientras mayor presión exista en el sistema mayor temperatura se necesitara para llevar a cabo el proceso de disociación. Gráfica No. 4

La cantidad de CO₂ presente en la atmósfera: A medida que el proceso de descarbonatación procede la cantidad de CO₂ en la atmósfera de combustión aumenta, al punto que la temperatura necesaria para continuar con la reacción debe de aumentarse, un aumento de la concentración de CO₂ requiere mayor temperatura de disociación. Gráfica No. 5

4.2 Tiempo de calentamiento

Este es el parámetro mas importante a considerar en la fabricación de cal, porque este afectara las características del producto terminado. Mientras mas alta se la temperatura de quemado y mas prolongado el periodo de calcinación la cal que se obtenga tendrá alta densidad, poca porosidad y baja reactivada química.

4.3 Remoción del CO₂ generado

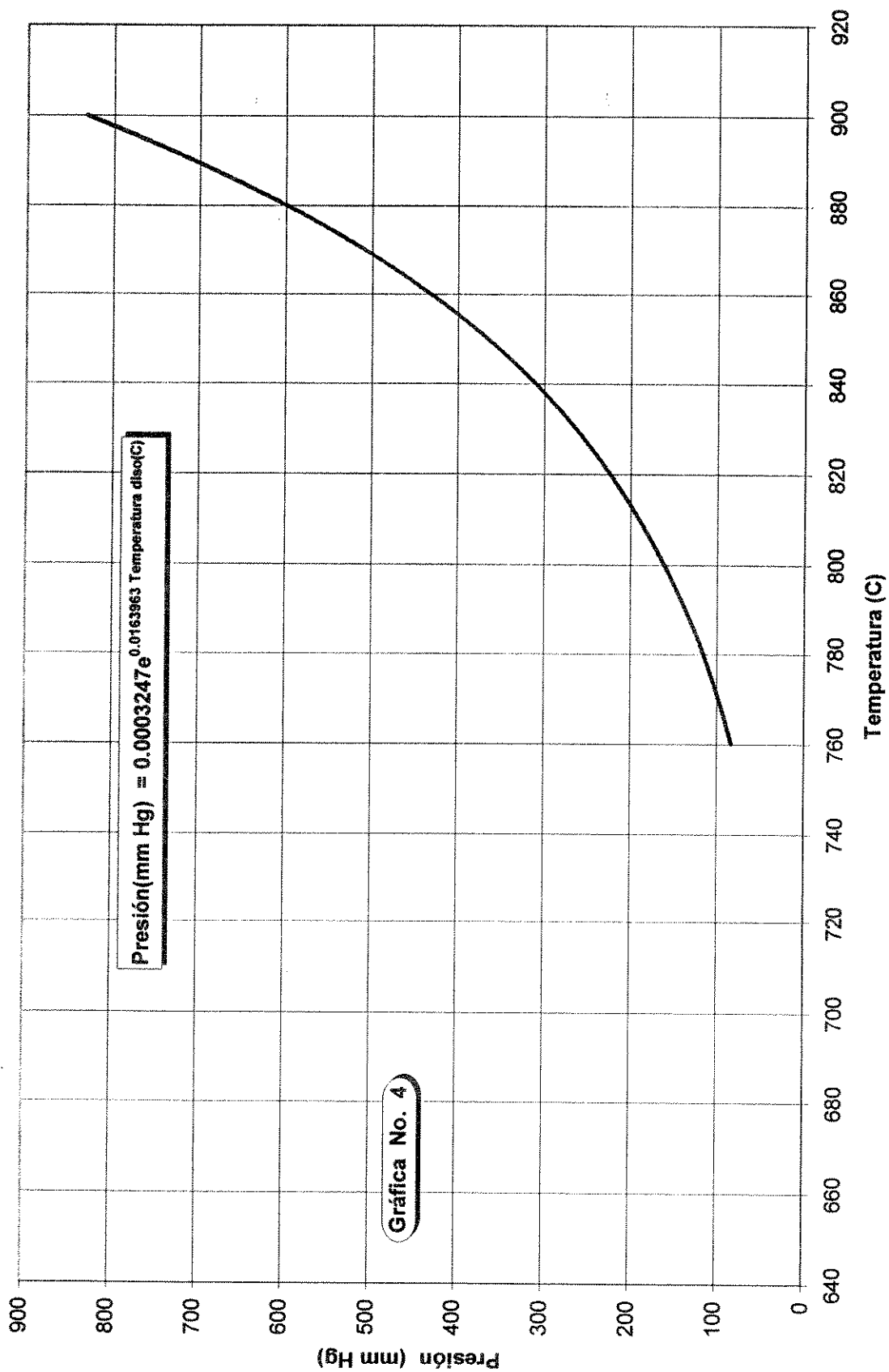
El aspecto importante a considerar es la estructura cristalina de la caliza, porque esta influencia el tiempo necesario para que el fenómeno de disociación tome lugar. Una caliza con una matriz cristalina definida (calcita o mármol) tiene problemas en eliminar el CO₂ de la parte interna, debido a que no existen poros o fisuras por donde este pueda escapar. Caso contrario ocurre con una caliza que contenga fisuras, o impurezas de materia orgánica que permitan la presencia de poros por donde el CO₂ pueda escapar. Es por esto que las estructuras cristalinas usualmente requieren mayor temperatura de disociación que las estructuras amorfas y en algunos casos el fenómeno de decrepitación aparece.

5. FENÓMENO DE DECREPITACIÓN

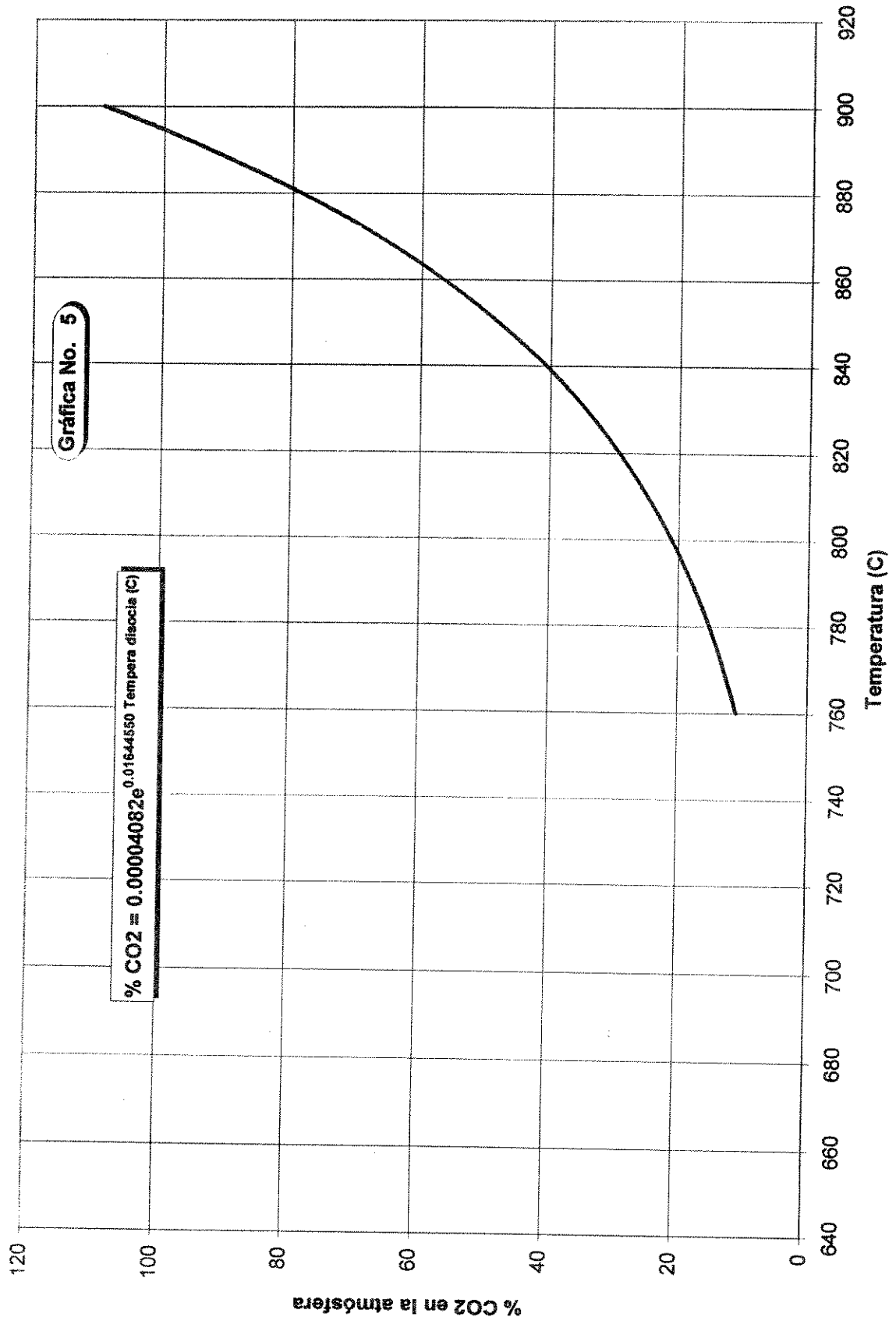
Cuando una caliza es sometida al efecto de calcinación el calor adicionado produce esfuerzos en la estructura cristalina, causando la fractura de ellos. Este fenómeno de ruptura de los cristales es lo que se conoce con el nombre de decrepitación.

El nivel de decrepitación de los cristales se maximiza con los de mayor dimensión lineal y con algunos cristales muy grandes se desintegran convirtiéndose en polvo. Este producto en algunas aplicaciones no se puede vender y ocasiona serios problemas al proceso de calcinación.

Influencia de la presión en la temperatura de disociación del CaCO3



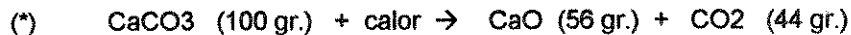
Influencia de la composición de la atmósfera en la temperatura de disociación del CaCO₃



6. PÉRDIDA DE PESO DE LA CALIZA

Cuando el proceso de calcinación toma lugar la descomposición térmica de la caliza elimina el CO₂ con el consiguiente fenómeno de pérdida de peso.

En forma estequiometrica se puede definir de la siguiente manera par el caso de una caliza 100% carbonato de calcio:



Estos 44 gramos es lo que se conoce como pérdida al fuego.

Para el caso de 100 % carbonato de magnesio la ecuación queda definida de la siguiente manera:



Es por esto que mientras mayor sea el contenido de Carbonato de Magnesio, mayor será la pérdida al fuego de la caliza cuando se convierta a cal.

7. RECARBONATACIÓN DE LA CAL

Calcinación completa o eliminación total del CO₂ de la caliza es en la practica imposible de obtener debido al fenómeno conocido como recarbonatacion. No importa que tanta temperatura se le aplique a la caliza al punto de que no quede carbonato en el interior de la misma; sin embargo, en la superficie existirá el fenómeno de absorción debido al ambiente enriquecido de CO₂ proceso de la combustión y la descarbonatación. Que tanto se encuentra presente este fenómeno de recarbonatación dependen de las condiciones de operación del horno, tales como:

- excesiva temperatura en algunas zonas del horno,¹
- mala distribución de los gases en el interior del horno,
- falta de ventilación en el horno, y
- tiempo de retención muy prolongado en el interior del horno.

¹ (*) Ver glosario

8. Granza

La presencia de CO₂ en la cal viva adicionalmente al fenómeno de recarbonatación, se debe a la aparición de material calizo cercano al centro de la piedra de cal conocida como granza.

Químicamente hablando, la presencia de la granza no es deletérea, pero es rechazada por muchos consumidores ya que es considerada como una impureza de la cal viva. Valores de granza en la industria pueden variar desde 0.5 % hasta 8 % dependiendo de la aplicación de la cal o de las regulaciones del consumidor. Cuanto más pequeño sea el valor exigido para la granza mayor riesgo de sobrequemar la cal existe.

Algunas consecuencias que favorecen la aparición de granza son:

- Tamaño de la piedra a usar
- La distribución de gases en el interior del horno
- La necesidad de producir una cal altamente reactiva.

9. ALTA VRS. BAJA TEMPERATURA DE CALCINACIÓN

Un aumento en la temperatura tiene una mayor influencia en la velocidad de disociación que el tiempo de retención. De tal forma que un aumento de 50 °F en influncian el nivel de calcinación mas que 2 a 10 hrs de tiempo de retención.

La temperatura óptima para obtener la máxima eficiencia de calcinación varia dependiendo del tipo de piedra y puede ser determinada únicamente por experimentación. Sin embargo, esta temperatura debe de balancearse con el de la temperatura óptima para obtener la máxima calidad de cal, que usualmente no coinciden. Generalmente la diferencia entre una y otra es del orden de 100 a 500 °F.

Usualmente el dilema es eliminado al quemar a una temperatura intermedia entre la óptima de calcinación y la óptima de calidad. Valores clásicos para la temperatura de calcinación y óptima de calidad son los siguientes:

Tabla No. 1: Temperatura de calcinación de acuerdo a la calidad de la caliza a utilizar.

TIPO DE PIEDRA	TEMP. ÓPTIMA DE CALCINACIÓN	TEMP. ÓPTIMA CALIDAD
Caliza de alta pureza	1350 °F	1000 °F
Dolomita	1250 °F	950 °F

10. REDUCCIÓN DE TAMAÑO

Al someter la caliza al proceso de calcinación el tamaño original de esta aumenta al principio del proceso de calcinación pero disminuye drásticamente a medida que se aumenta el proceso de descarbonatación y la temperatura a la que se encuentra sometida. No todas las calizas se reducen de igual forma, los principales aspectos necesarios a considerar para evaluar el comportamiento de la caliza son:

- Calizas con estructuras de cristales grandes: que son las que presentan la mayor reducción de tamaño cuando son calcinadas.
- Calizas con cristales pequeños o medianos: que presentan muy poco cambio en el tamaño original de la caliza después de ser calcinada.
- Presencia de Na_2O (*) favorece la reducción de tamaño de la piedra
- La composición química de la atmósfera donde se lleva a cabo el proceso de calcinación, mayor contenido de CO_2 favorece el proceso de reducción del tamaño de la cal.
- Impurezas, cuanto mayor cantidad de materia orgánica está presente en la piedra caliza, mayor es el grado de reducción de tamaño cuando se calcina.

La siguiente fórmula es utilizada para la determinación del cambio en volumen de una caliza después de ser calcinada.

$$S = \frac{(100 / DS - (100 - L) / DL)}{DS} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde:

S = % de Reducción de tamaño L = Perdida al fuego de la caliza

DS= Densidad de la caliza

DL = Densidad de la cal viva

10.1 POROSIDAD Y DENSIDAD

Factores como la porosidad, densidad y la distribución de los poros tienen una profunda influencia en las propiedades del producto que se obtiene, tales como:

- Reactividad de la cal viva
- Distribución de partículas y la superficie resultante del proceso de hidratación de la cal viva

El siguiente cuadro muestra el efecto de la distribución de los poros en el proceso de calcinación.

Tabla No. 2: Muestra el efecto de la porosidad de la caliza en la reducción de tamaño

TIPO DE CALIZA	REDUCCIÓN DE TAMAÑO
CALIZA DE ALTA POROSIDAD	POCA REDUCCIÓN DE TAMAÑO
CALIZA DE BAJA POROSIDAD (DENSE)	MUY ALTA

Los estudios llevados a cabo con relación al tiempo de retención de la caliza sometida al proceso de calcinación durante 1 a 4 horas tiene muy poco efecto en la porosidad, superficie y reactividad.

Otro parámetro a considerar en la reducción de tamaño de la caliza es el tamaño del poro, mientras más pequeño es el tamaño del poro menor efecto de reducción de tamaño se tendrá.

Puesto que la reducción de la piedra caliza cambia con el proceso de calcinación, la densidad de la cal obtenida al final del proceso también es un indicativo de las características de la cal.

Para la cal viva se puede utilizar los siguientes valores como referencia:

Cal sobre quemada	2.5 a 3 gr/cm ³
Cal altamente reactiva	1.72 a 1.96 gr/cm ³

10.2 EFECTO DEL TAMAÑO DE LA PIEDRA

Debido a que el proceso de disociación penetra gradualmente de la superficie hacia el interior de la piedra, mayor tamaño de piedras son mas difíciles de calcinar uniformemente y requieren mayor tiempo.

10.2.1 **Tamaños de piedra superior a seis pulgadas** son particularmente difícil de calcinar. Para poder eliminar el CO₂ de dichas piedras, altas temperaturas son necesarias para genera la suficiente presión de CO₂ en el interior de la estructura cristalina para escapar en forma de gas. Frecuentemente este tipo de tratamiento térmico causa sobre quemado en la parte exterior de la piedra con lo cual se reduce de tamaño y cierre de poros y fisuras. Debido a lo anterior una cal sobrequemada de poca densidad y poca reactividad se tendra en la parte externa de la piedra, pero en su interior se tendra una porcion sin calcinar (granza).

10.2.2 **Distribución granulométrica de la alimentación** es otro parámetro que tiene efectos en la calidad que se obtiene del proceso. Las partículas más pequeñas tienden a calcinarse mas rápido y a una temperatura inferior que las piezas más grandes, debido a que el CO₂ tiene una menor distancia que viajar en un menor tamaño. Esta temperatura que calcinan adecuadamente las pequeñas piedras solo calcinaran la superficie de las piedras más grandes. Por otro lado, si las piedras grandes son adecuadamente calcinadas luego las piedras pequeñas estaran sobrequemadas debido a la mayor temperatura y mayor tiempo de retención.

11. ESFUERZO DE CALCINACIÓN

Se define como la cantidad de tiempo, temperatura de calcinación y transferencia de calor necesaria para convertir una piedra de caliza en cal. Esta relación puede expresarse en forma matemática:

$$\text{Esfuerzo calcinación } \propto (\text{Espesor promedio de la piedra})^2 \quad \text{Ecuación (2)}$$

Así por ejemplo, una piedra de 4 pulgadas de espesor necesita 4 veces más esfuerzo de calcinación que una piedra de 2 pulgadas de espesor. Espesor de la piedra y no ancho o largo son los criterios usado en la influencia del esfuerzo de calcinación.

Otro efecto de una distribución granulométrica de alimentación muy variada es el de la combustión. Las partículas pequeñas se colocan entre los espacios vacíos que dejan las piedras mas grandes en hornos verticales. Esto resulta en poca circulación y una mala distribución en la zona de calcinación.

Cabe mencionar que una distribución granulométrica estrecha y consistente puede, potencialmente, mejorar el fenómeno de calcinación mas que cualquier otro factor de los estudiados con anterioridad.

12. INFLUENCIA DE LAS IMPUREZAS DE LAS ROCAS

Dos fuentes de impurezas participan en el fenómeno de calcinación, el primero proveniente de la caliza (o dolomita) que se utiliza, el segundo proveniente del combustible que se utiliza. Estas impurezas no solamente diluyen la habilidad de la cal, sino que también afectan adversamente la reactividad, particularmente cuando la cal es calcinada a altas temperaturas.

Dentro de las impurezas de mayor relevancia se tiene al sílice y al azufre:

Cuando el sílice entra en contacto a alta temperatura con la cal cuya superficie esta empezando a ser calcinada las moléculas mas reactivas de CaO reaccionaran químicamente con el Sílice para formar silicatos de calcio dando como consecuencia cierre de poros y por consiguiente poca reactividad de la cal.

Por su parte el azufre es probablemente el mas intrigante para los fabricantes de cal. Su procedencia es tanto la caliza utilizada como el tipo de combustible utilizado. Este elemento es, generalmente, absorbido de los gases de combustión en la forma de SO₂ en la parte externa de la superficie de la cal, formando sulfitos y sulfatos de calcio. Cuando el azufre procede de la caliza se comporta de igual manera.

13. RECAPITULACIÓN

En el proceso de quemado de la caliza para obtener cal existen numerosas variables críticas las cuales no se pueden considerar individualmente sino como un conjunto que afectan las características del producto que se obtenga. Estas variables sumarizadas son:

- Calidad de la piedra
- Características físicas (cristalinidad y tamaño de poro)
- Tendencia a la decrepitation
- Cantidad y calidad de las impurezas
- Tamaño de la piedra y su graduación
- Grado de calcinación
- Tiempo de calcinación
- Temperatura de calcinación
- Reactividad química de la cal
- Reducción de tamaño (densidad y porosidad)
- Calidad y tipo de combustible
- Recarbonatación

14. TIPOS DE HORNOS PARA LA FABRICACIÓN DE CAL VIVA

En la industria moderna de fabricación de cal viva se pueden encontrar cuatro tipos diferentes de hornos :

- Homo vertical
- Homo largo rotatorio.
- Homo rotatorio con precalentador
- El calcinador flash

Los primeros tres diseños serán objeto de análisis de tal forma que se conozcan desde un enfoque técnico las características de cada proceso.

Previamente a discutir las características operacionales de un horno de cal se discutirá el fenómeno de transferencia de calor en el proceso de calcinación a nivel industrial.

14.1 Transferencia de calor en un horno vertical

La teoría de calcinación ha demostrado que la manera mas eficiente de producir cal de alta calidad es aplicar una cantidad considerable de calor al inicio de la calcinación , dado que la caliza se encuentra en forma de carbonatos y no se tendrá ninguna pérdida de calidad, mientras que al final del proceso de calcinación debe existir una disminución de la cantidad de calor a suministrar. Teniendo en cuenta lo anterior se puede analizar el funcionamiento de los hornos verticales. Figura No. 6

Existen en la industria dos tipos de hornos verticales:

- 14.1.1 Hornos verticales a contracorriente: En estos hornos los gases calientes de combustión y el aire de enfriamiento ingresan por la parte baja del horno. Esta zona usualmente corresponde a la de parte final de calcinación. Este proceso ocasiona que la cal al final de la zona de calcinación sea quemada de una manera muy fuerte y con el peligro de crear una cal sobrequemada, especialmente en aquellos puntos donde la distribución de los gases de combustión y el aire de enfriamiento no sea homogénea.

Diagrama de la operación de hornos en la fabricación de cal.

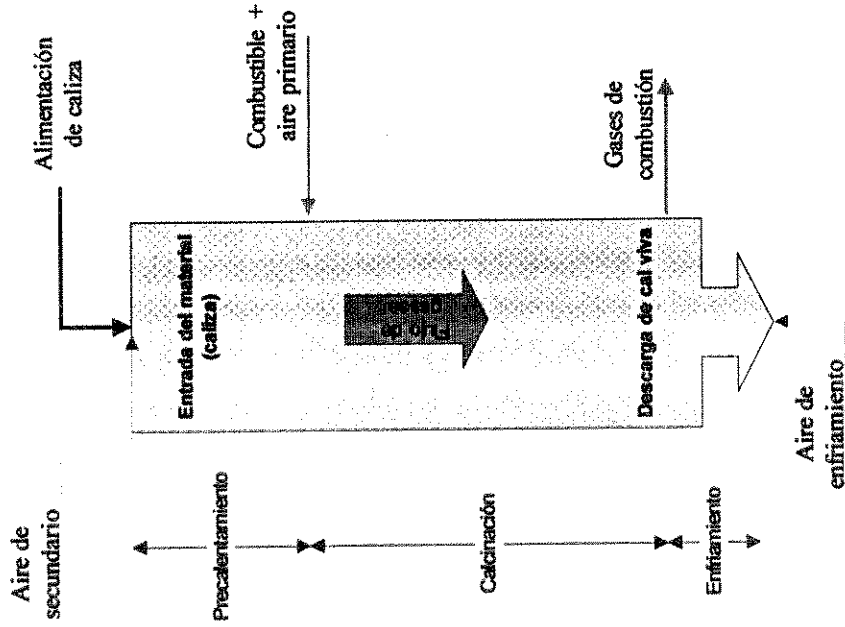


Diagrama : Horno vertical de flujo paralelo

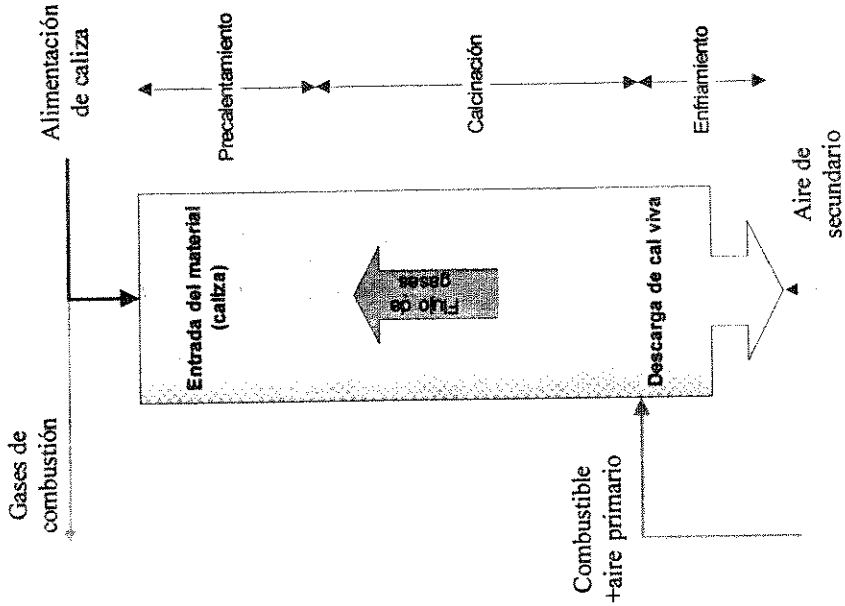


Diagrama : Horno vertical a contracorriente

Proceso de calcinación	Figura No. 6
	Título : Intercambio de calor proceso de calcinación
	Ref. :

Otro fenómeno adicional de los hornos de contracorriente es el de baja transferencia de calor del aire de combustión en la zona de enfriamiento. La entalpia de la cal limita la temperatura ocasionando que calor sensible escape con las piedras de cal y por consiguiente una producto a la descarga con una temperatura muy alta para muchas aplicaciones industriales.

Por último, cabe mencionar que la transferencia de calor de los gases calientes en la parte superior es muy pobre ocasionando pérdidas considerables de energía en los gases de desecho del proceso de calcinación.

- 14.1.2 Hornos verticales de corriente paralela regenerativos: en los hornos verticales regenerativos los gases calientes ingresan por la parte superior del horno en donde existe la mayor diferencia de temperatura con la piedra caliza. Una diferencia pequeña de la temperatura de los gases y la cal al final de la zona de calcinación es la que se obtiene, creando las condiciones ideales para la producción de cal viva suavemente quemada. En cuanto a la recuperación de calor de los gases de combustión, éstos se hacen pasar por la zona de calcinación y recalentamiento de la segunda sección del horno cargada con piedra fría, causando una ligera descarbonatacion en la parte baja de la zona de calcinación y transfiriendo el calor a la piedra de la zona de precalentamiento, el cual será utilizado cuando el proceso se revierta (suministro de petróleo a la otra sección del horno). Es precisamente este fenómeno el que hace a los hornos verticales regenerativos económicos en el consumo de energía térmica. Otro parámetro a considerar es la posibilidad de seleccionar la cantidad de aire en exceso que se utiliza en la combustión el cual afecta por supuesto la longitud de la flama. Una mayor cantidad de aire de combustión crea una flama mas corta, en tanto que una cantidad menor de aire provoca una flama mas larga. Por otro lado, el aire de enfriamiento es introducido a presión por la parte baja del fondo del horno acondicionando la cal a una temperatura inferior a los 100 °C, permitiendo de esta forma ser utilizada para aplicaciones diversas inmediatamente. Un diagrama de un horno regenerativo se observa en figura No. 7.

Diagrama de la operación de un horno regenerativo vertical

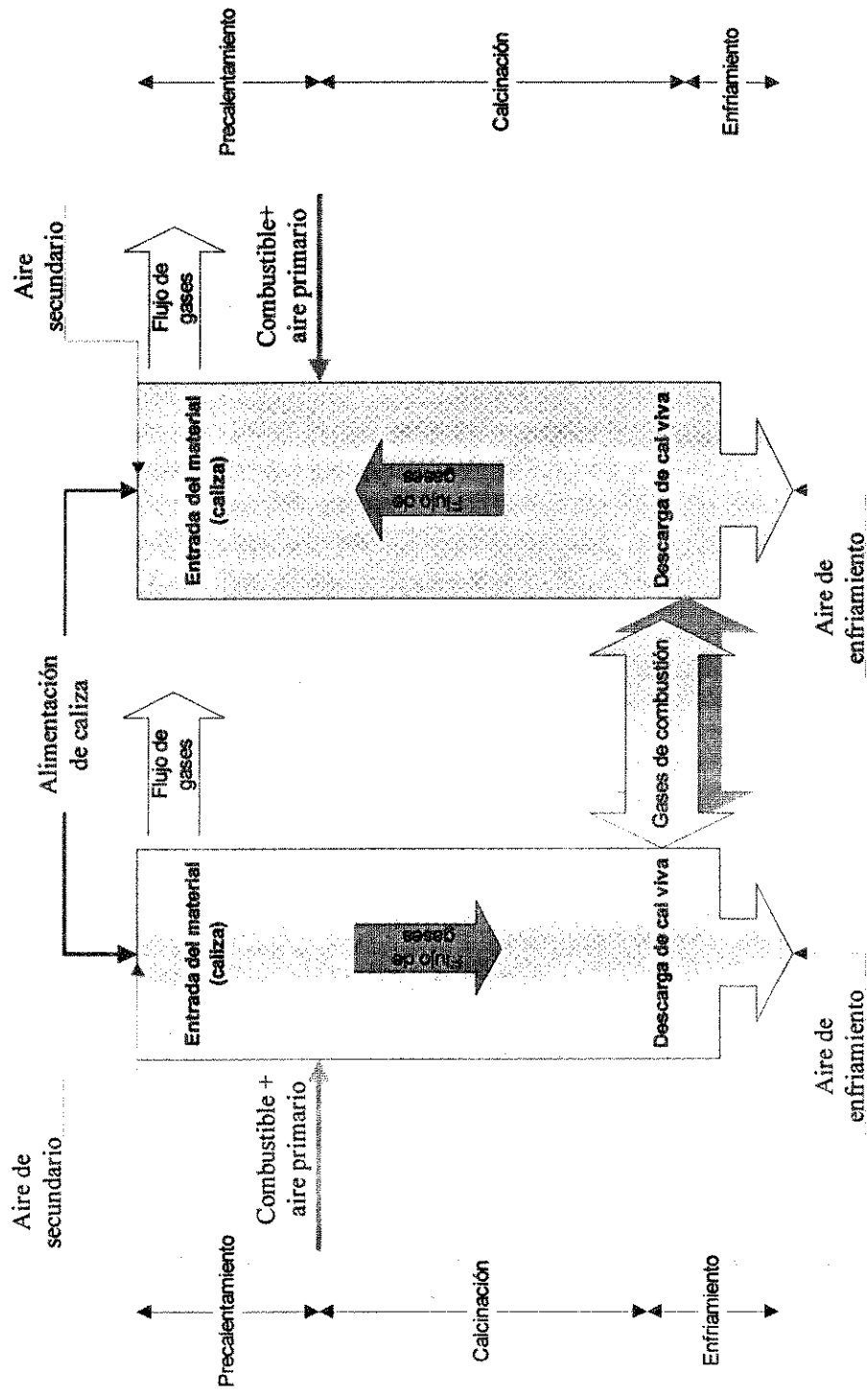


Diagrama : Horno regenerativo vertical

Hornos verticales para la fabricación de cal.	
	Figura No. 7
Título :	
Horno regenerativo vertical	
Ref .	

14.2 OPERACIÓN DE UN HORNO ROTATORIO

Este tipo de horno es el más popular en los Estados Unidos y su funcionamiento es similar al de un horno de "clinker". En este horno la caliza es alimentada en la parte posterior a través de un chifle que está integrado a la recámara del horno. El flujo de material y de gases es a contracorriente, pudiéndose definir en el horno tres secciones básicas.

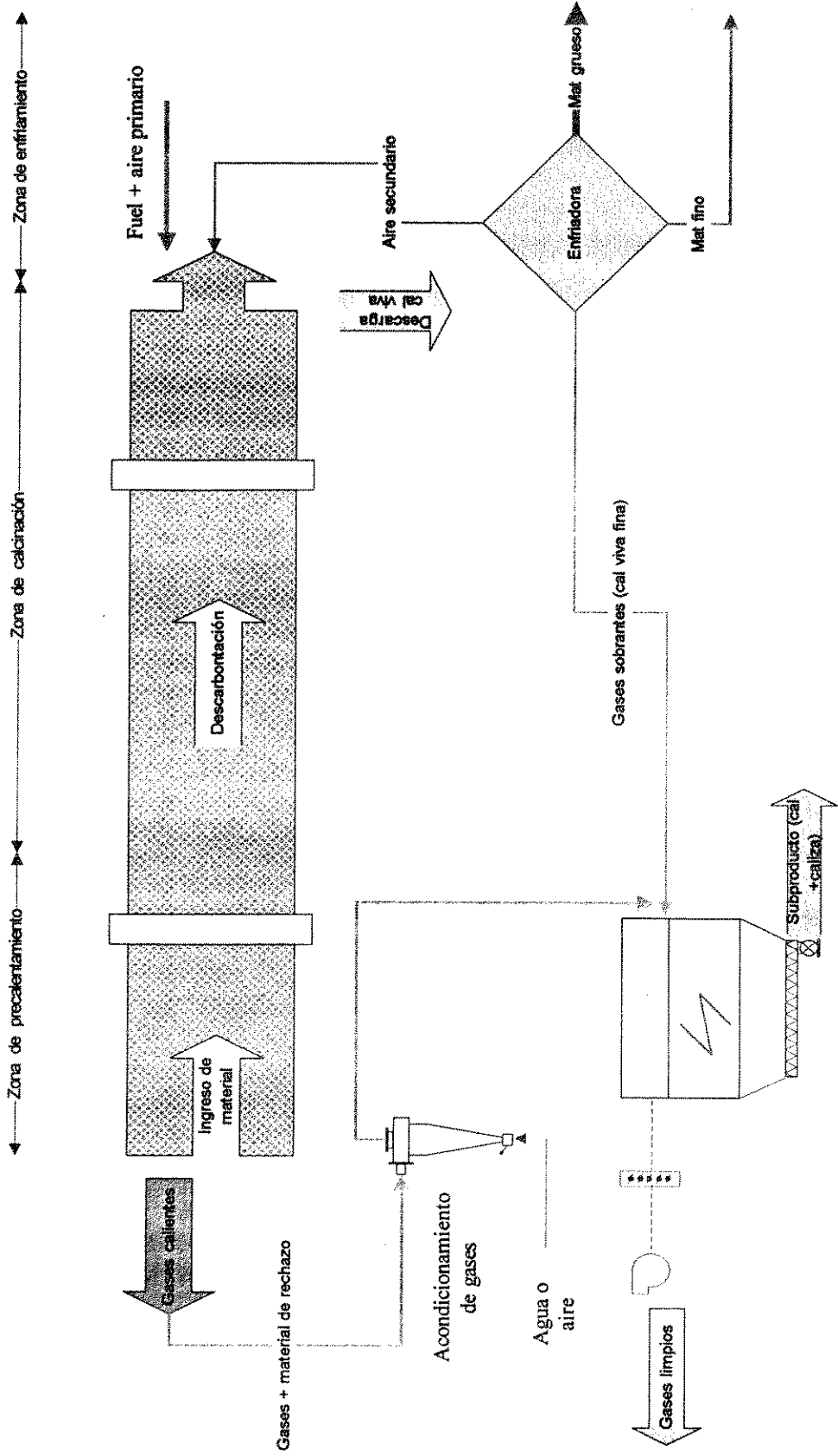
- Zona de precalentamiento
- Zona de calcinación
- Zona de enfriamiento.

A medida que el material avanza por el horno este se segrega creando tres zonas bien definidas que dependen del tamaño de las partículas. Las más grandes tienden a colocarse en la parte externa de la carga de material, lo más cercano al ladrillo y en la parte superior, mientras que las partículas medianas y más pequeñas tienden a moverse en el centro de la cama de material. El grado de llenado(*) de estos hornos se encuentra en el orden del 10 al 12 % y usualmente, se construyen anillos de retención en el interior del horno en cada una de las zonas previamente enunciadas con el objeto de aumentar el tiempo de retención en el horno. Para mejorar el efecto de mezcla y de transferencia de calor de los hornos rotativos se disponen de arreglos tales como cruces de intercambio de calor, levantadores, trefoils (*) etc., de tal forma que la alimentación pueda tener una distribución granulométrica más amplia y una mejor calidad del producto. Debido al diseño de tipo contracorriente la cal producida en estos hornos puede tender a ser sobrequemada, especialmente cuando no se toman las medidas operativas adecuadas en el control de la temperatura dentro del horno o bien en la distribución granulométrica de la alimentación. Un diagrama de este horno se puede ver en la figura No. 8

14.3 OPERACIÓN DE UN HORNO ROTATORIO CON PRECALENTADOR

El horno rotatorio con precalentador es un horno que combina las características de un horno vertical a contracorriente y un horno largo rotatorio. El material es alimentado por la parte superior del precalentador donde este sufre el proceso de precalentamiento en el caso de las piezas más grandes y de calcinación en el caso de las más pequeñas. El material es dosificado al horno rotatorio

Diagrama de un horno rotatorio largo utilizado para la fabricación de cal



Horno largo utilizado en la fabricación de cal	Figura No. 8
Ref. :	Titulo :
	HORNO ROTATORIO LARGO

a través de un sistema neumático que las dosifica al interior del tubo del horno, donde las piezas se segregan

de acuerdo a su tamaño tal como se describió en el tema de horno rotatorio largo, protegiendo de esta manera las piezas ya calcinadas en el centro de la cama de material y las mas grandes son calcinadas a lo largo del horno.

Debido al continuo movimiento que sufre la cama de material en el interior del horno rotatorio las impurezas absorbidas en el precalentador especialmente las referentes a cenizas y azufre provenientes de los combustibles son eliminados y un producto de mejor calidad es ofrecido. Un diagrama de este tipo de horno se aprecia en la figura No. 9.

14.4 CALCINADOR FLASH

El principio de operación de este horno es similar al de las torres de precalcinación y precalentamiento utilizadas en la industria del cemento y no será objeto de análisis en este reporte.

15. ANALISIS COMPARATIVO DE LOS HORNOS VERTICALES VRS. HORNOS ROTATIVOS

Basado en los aspectos técnicos del proceso de calcinación y las características de los hornos verticales y rotativos a continuación se lleva a cabo un análisis técnico de ambas opciones, la discusión se lleva a cabo en orden de importancia para la selección del proceso.

Para llevar a cabo esta comparación se usaran las siguientes siglas.

Horno vertical a contracorriente :	HVC
Horno vertical regenerativo:	HVR
Horno largo rotatorio:	HLR
Horno rotatorio con precalentador:	HRP

Diagrama de un horno rotativo con precalentador utilizado para la fabricación de cal

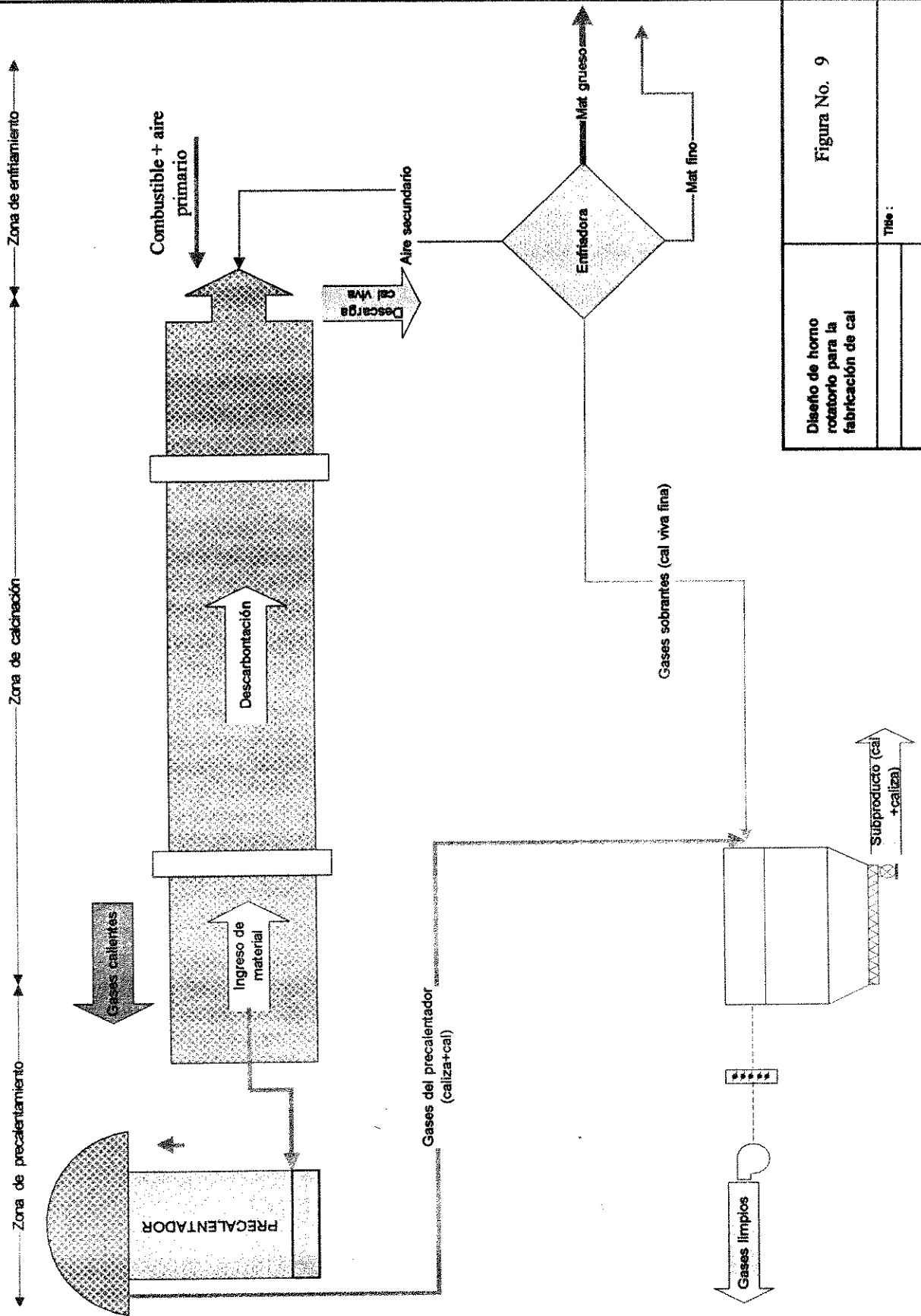


Figura No. 9

Diseño de horno rotatorio para la fabricación de cal

Title :

Horno rotatorio con precalentador

Ref. :

15.1 CALIDAD DE LA PIEDRA

Los requerimientos del mercado de la cal química reclama un producto de alta pureza y características físicas y químicas bien definidas. El siguiente cuadro muestra los aspectos comparativos de las cuatro opciones anteriores:

Tabla No. 3: Influencia de la caliza en cada tipo de horno conocido para la fabricación de cal viva.

Característica	HVC	HVR	HLR	HRP
Físicas caliza cristalinidad y poro	Sobre quemado Baja reactividad	Moderado nivel de quemado	Sobre quemado	Moderado nivel de quemado
Decrepitación (pulverización)	Cal no homogénea nivel alto de obstrucciones	Cal no homogénea nivel alto de obstrucciones, mala distribución de gases.	Mayor carga de polvo del filtro, problemas en enfriadoras, cal sobrequemada	Problemas de flujo de gases del precalentador, problemas en las enfriadoras material de poca aceptación en el mercado químico
Impurezas	Peligro de incrustaciones (sílice), baja reactividad de la cal	Peligro de incrustaciones (sílice), baja reactividad de la cal moderadamente	Cal con baja reactividad	Cal con baja reactividad y peligro de incrustaciones en el precalentador

15.2 TAMAÑO DE LA PIEDRA Y SU DISTRIBUCION GRANULOMETRICA

El siguiente parámetro en la comparación de sistemas de calcinación es el del tamaño de piedra a alimentar. Cada sistema tiene su preferencia por el tamaño de alimentación a utilizar porque cada sistema es único en la manera como transforma la piedra a cal viva.

Para dicha comparación se tiene la siguiente tabla:

Tabla No. 4 : Influencia del diseño del horno en la granulometria de alimentación.

TIPO HORNO	HVC	HVR	HLR	HRP
Tamaño	3/8 a 8 "	3/8 a 8 "	mesh 7 a 2 ½ "	3/8 a 2 ½ "
Distribución de tamaño	3 : 1	3 : 1	4 : 1	5 : 1
Distribución preferida	2 : 1	2 : 1	3 : 1	4 : 1

Al revisar el procedimiento de fabricación de cal una parte importante del proceso es la planeación de la cantera, es precisamente acá donde de acuerdo al cuadro anterior las ventajas o desventajas de utilizar cualquiera de los sistemas influyen la selección de un horno. Para canteras donde el nivel de utilización debe ser mayor del 60% de piedra caliza disponible, los hornos largos y específicamente los hornos largos con precalentador son los más utilizados debido a la flexibilidad de quemar distribuciones granulométricas con mayor rango. Con calizas de menor tamaño los hornos verticales son los menos adaptados debido a que una disminución en la granulometría de alimentación obliga a que la producción y consumos de energía sean mayores o bien a cambiar el tamaño original del diseño del horno.

15.3 GRADO DE CALCINACIÓN

Los tipos de cal producidos en cada uno de los hornos mencionados da lugar a la siguiente clasificación :

- Cal reactiva,
- Cal de reactividad media y
- Cal sobre quemada.

De las anteriores la primera es la más buscada y objetivo de la mayoría de las industrias de fabricación de cal. Pero no todos los hornos están diseñados para obtener dicha calidad, conjuntamente con los dos parámetros previamente mencionados el producto se verá influenciado.

Tabla No. 5 : Tipos de cal que se pueden producir en los diferentes arreglos de hornos de cal.

TIPO HORNO	HVC	HVR	HLR	HRP
Cal reactiva	Parte intermedia de la piedra	Parte intermedia y externa	Parte intermedia y externa piedras grandes	A lo largo de toda la distribución granulométrica
Cal mediana reactividad	Parte intermedia y externa de la piedra	Parte externa	Parte externa y piedras de mediano tamaño	Parte intermedia o piedras grandes
Cal sobre quemada	Parte externa y piedra pequeñas	Parte externa o piedras pequeñas	Parte externa de las piedras grandes	Parte externa de la piedras de mayor tamaño
Granza	Parte central de las piedras (5-12 %)	Parte central de las piedras (5 - 10 %)	Piedras pequeñas de cal (1 a 5 %)	Piedras de mayor tamaño (0.8 a 2 %)

15.4 TIEMPO DE CALCINACIÓN

El tiempo necesario para llevar a cabo el proceso de calcinación varía de un tipo de horno a otro y por lo tanto la flexibilidad con la que se puedan obtener productos de calidades diferentes para aplicaciones diversas. El siguiente cuadro enmarca los tiempos para llevar a cabo el proceso de calcinación en los cuatro tipos de hornos estudiados.

Tabla No. 6: Tiempo esperado de calcinación para cada arreglo de horno.

TIPO HORNO	HVC	HVR	HLR	HRP
Tiempo calcinación (hrs)	18 a 24 hrs	24 hrs	3 a 4 hrs	8 a 12 hrs
Flexibilidad Productos de diferente calidad	Poco flexible	Poco flexible	Muy flexible	Flexible

15.5 TIPOS DE COMBUSTIBLES

Los hornos para la fabricación de cal aceptan en nuestros días cualquier tipo de combustible sólido, líquido o gaseoso. Sin embargo, las influencias en el proceso y la calidad del producto obtenido no son las mismas. El cuadro siguiente muestra la influencia de los combustibles en el proceso de fabricación de cal.

Tabla No. 7: Flexibilidad de los hornos para quemar más de un tipo de combustible.

TIPO HORNO	HVC	HVR	HLR	HRP
Carbón	Absorción de cenizas y Azufre	Absorción de cenizas y azufre	Cal de alta pureza	Absorción de cenizas y azufre en las piedras pequeñas
Fuel oil	Absorción de azufre	Absorción de azufre	Cal de alta pureza	Absorción de azufre en piedras pequeñas
Gas	Cal de alta pureza	Cal de alta pureza	Cal de alta pureza	Cal de alta pureza

15.6 GENERACION DE SUBPRODUCTOS

Todos los hornos generan subproductos cuyas cantidad y características dependen del tipo de horno, caliza, combustibles, sistema de enfriamiento y sistema de recolección de polvo.

El siguiente cuadro muestra los subproductos obtenidos de los diferentes hornos de calcinación:

Tabla No. 8: Muestra los subproductos generados en cada tipo de horno de cal.

TIPO HORNO	HVC	HVR	HLR	HRP
Subproducto cal fina y carbonato	Poco material se recolecta en el filtro (4 %)	Poco material se recolecta en el filtro (2 %)	Cal se recolecta en el filtro (8-10%)	Cal se recolecta en el filtro (6-8%)
Cal fina de enfriadora	No hay	No hay	Enfriadora de parrilla y contacto	Enfriadora de parrilla y contacto

16.0 COMPARACIÓN DE UN HORNO VERTICAL VRS. UN HORNO ROTATORIO INVERSIÓN DE CADA UNO

La decisión a favor de un sistema de calcinación vertical o bien el uso de un horno rotatorio es compleja y exhaustiva. La utilización de los hornos es bien polarizada alrededor del mundo. En Europa prefieren los hornos verticales mientras que Norte América los hornos rotatorios largos o con precalentador. Aquí se presentan tres opciones para la fabricación de cal viva en Cementos Progreso.

- Horno regenerativo Maerz
- Horno rotatorio largo en La Pedrera
- Horno rotatorio con precalentador en La Pedrera.

16.1 Horno regenerativo Maerz: (DETALLE DE LA INVERSIÓN)

El horno cotizado para la planta de San Miguel es un horno de flujo paralelo tipo regenerativo para quemar bunker y carbón con una capacidad nominal de 200 toneladas por día de cal viva.

El proyecto no solamente considera la necesidad de un horno vertical nuevo, sino una línea completa diseñada para el despacho de la cal producida en forma de hidrato. En este estudio únicamente será evaluada la sección de calcinación.

No. 1 HORNOS MAERZ

6.0 MILLONES US \$

16.2 HORNOS ROTATORIOS LARGOS EN LA PEDRERA

Las instalaciones de La Pedrera son utilizadas para la fabricación de clinker fueron evaluadas con el objeto de producir cal, específicamente el horno 61. El uso de estas instalaciones en la

fabricación de cal requiere modificaciones menores fácilmente programables y ejecutables a un costo por tonelada muy bajo.

Debido al tamaño del mercado hasta la fecha evaluado el homo 61 de La Pedrera es el candidato óptimo. La figura No. 10 muestra la situación propuesta en la producción de cal viva.

La capacidad estimada para este sistema es de doscientas toneladas de cal viva al día y de veinte toneladas de subproducto (mezcla caliza - cal) recolectado en el filtro electrostático.

Los rubros de inversión considerados son:

No. 2	GRAN TOTAL	400 MIL US \$
-------	------------	---------------

El resto de las instalaciones permanecen de igual forma como hasta ahora. El ladrillo refractario instalado en el homo cumple con los requisitos de esta primera etapa.

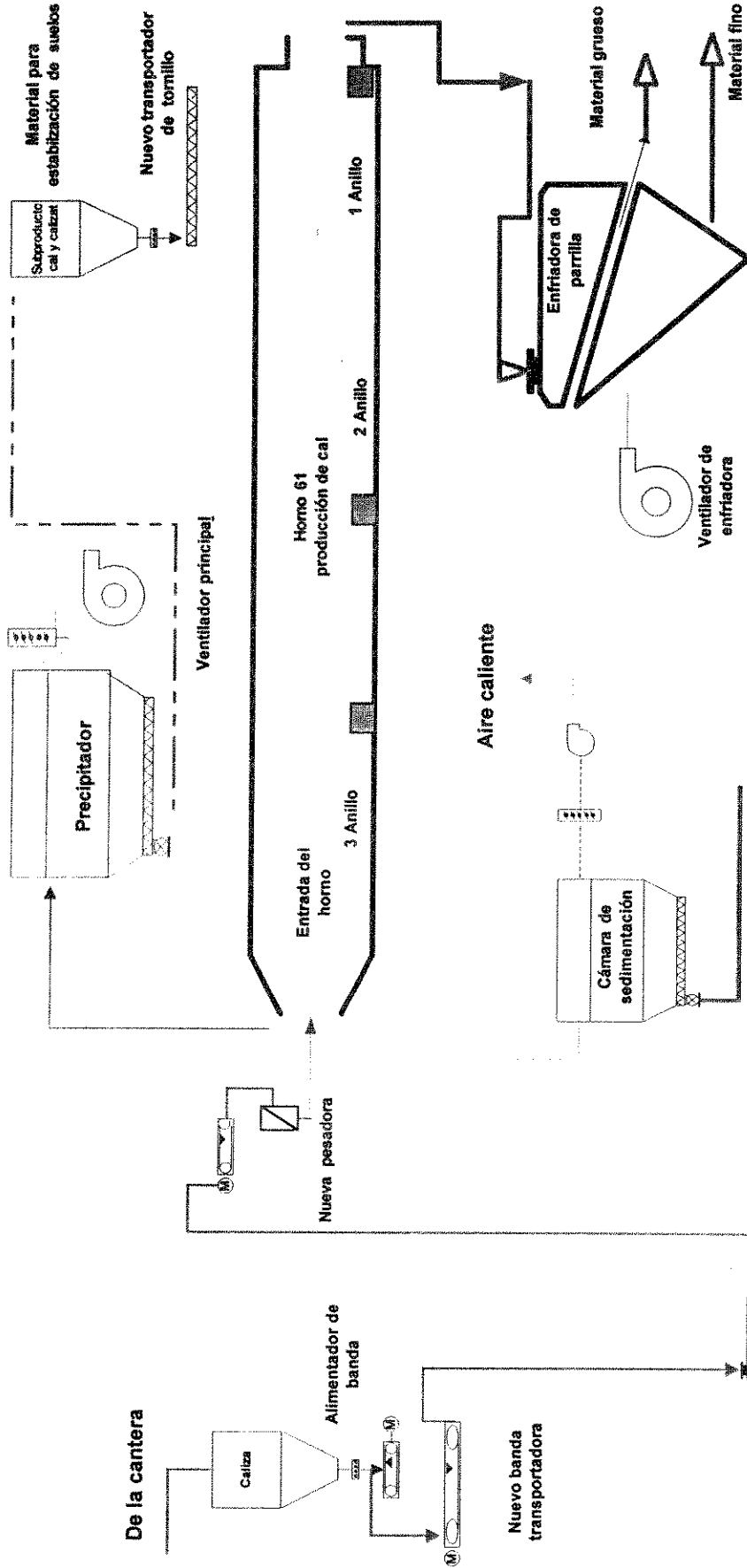
- Ladrillo aislante en la zona de entrada
- Ladrillo poligonal en la zona de precalentamiento
- Ladrillo básico en la zona de calcinación.

16.3 HORNO ROTATORIO CON PRECALENTADOR

La fase de utilización del homo 61 de La Pedrera en la fabricación de cal, también se enfoco desde el punto de vista una conversión del sistema actual a un homo rotatorio conprecalentador, homo que combina las bondades del homo vertical en cuanto al consumo energético y las del homo rotatorio en cuanto a las características del producto a obtener y la flexibilidad de producir cales de diferentes calidades.

La evaluación es dividida en tres pasos de inversión que pueden llevarse a cabo por separado, cada uno de ellos enfocado a optimizar el consumo de energía térmica del sistema.

Diagrama propuesto para la fabricación de cal horno rotatorio La Pedrera



Cambios a realizar en las instalaciones actuales horno 61 La Pedrera

- 1) Remover gusano de alimentación
- 2) Instalar dos nuevas bandas transportadoras
- 3) Instalar una tolva de alimentación de la caliza
- 4) Instalar un cargador de banda
- 5) Instalar un transportador de tomillo para el producto del filtro
- 6) Instalar una zaranda para tamizado final de la alimentación del horno

Rechazo de caliza
menor de 3/4 "

Horno 61 La Pedrera		Figura No. 10	
Draw. :		Title :	
Date :		Modification:	horno 61
Scale :			27/05/97
Ref. :			

16.3.1 Precalentador del horno

El diseño propuesto para el precalentador del horno 61 considera una alimentación de piedra caliza de 3/8" a 3" con los siguientes rubros:

No. 3	PRECALENTADOR	3.000 MILLONES US \$
-------	---------------	----------------------

La instalación de un precalentador de esta naturaleza en el horno 61 de la pedrera conlleva dos cambios, el primero en la capacidad del sistema y el segundo en el consumo de energía del sistema.

16.3.2 Enfriadora de Contacto

En el proceso de calcinación las enfriadoras sirven para dos funciones, la primera para enfriar la cal a una temperatura que sea posible manejarla en un transportador y en segundo para recuperar el calor de la cal y transferirlo al aire secundario utilizado en el proceso de combustión.

El sustituir una enfriadora planetaria o de parrillas por una enfriadora de contacto es debido a la alta eficiencia de recuperación de calor de esta unidades comparadas con las enfriadoras normalmente usadas en la industria del cemento.

El detalle de los costos de sustituir una enfriadora de parrillas por una enfriadora de contacto son:

No. 4	ENFRIADORA	1.500 MILLONES US \$
-------	------------	----------------------

16.3.3 Uso del Carbón en el horno 61 de La Pedrera

Una de las principales ventajas de los hornos rotatorios es la facilidad de operación con combustibles sólidos tales como carbón y "pet coque". Por otro lado los hornos verticales resultan ser menos flexibles en cuanto a la quema de combustibles sólidos y su operación es mas difícil de controlar.

En el siguiente cuadro se presentan los principales rubros a considerar en la instalación de un molino vertical y una pequeña galera para quemar carbón en el horno de cal 61 La Pedrera.

No. 5 MOLINO DE CARBON 1.200 MILLONES US \$

El gran total para el proyecto de la cal en el horno 61 de La Pedrera dividido en las 3 secciones anteriores se presenta en el cuadro siguiente:

Tabla No. 9: Costos aproximados de la inversión en la conversión de un horno rotatorio.

No. 1	PRECALENTADOR	3.000 MILLONES US \$
No. 2	ENFRIADORA DE CONTACTO	1.500 MILLONES US \$
No.3	MOLINO DE CARBON	1.200 MILLONES US \$
	GRAN TOTAL	5.700 MILLONES US \$

Cada una de las inversiones previamente enumeradas conlleva un cambio la producción del equipo o en el consumo energético del proceso. El siguiente cuadro enmarca los cambios esperados por cada uno de los cambios llevados a cabo en el proceso de producción de cal en el horno 61 de La Pedrera.

Tabla No. 10: Consumos energéticos de los diferentes arreglos de hornos.

	PROCESO DE CALCINACION	CONSUMO DE ENERGIA	PRODUCCION
No. 1	Horno largo sin precalentador	2400 a 2000 Kcal/kg cal	200 ton/dia cal
No. 2	Horno con precalentador	1450 a 1350 Kcal/kg cal	300 ton/dia cal
No.3	Horno con enfriadora de contacto	1300 a 1350 Kcal/kg cal	300 ton/dia cal
No.4	Horno con molino de carbón	Costo directo de producción mas bajo.	

17. ENFRIADORAS PARA EL PROCESO DE FABRICACIÓN DE CAL EN HORNOS ROTATIVOS

Las enfriadoras utilizadas en la industria de la cal cuyo proceso de calcinación esta basado en la producción de cal en un horno rotativo tiene las siguientes funciones básicas:

- Recuperar el calor de la cal utilizando este aire precalentado como aire secundario en el proceso de combustión.
- Facilitar el manejo de la cal a una temperatura que permita almacenarla y transportarla sin ningún problema.
- Clasificación preliminar de la cal producida en el horno.

Dentro de las enfriadoras estas se pueden dividir en tres grupos dependiendo de cual es el principio de operación de las mismas:

- Enfriadora de parrillas.
- Enfriadora rotativa.
- Enfriadora planetaria.

Para poder comparar los sistemas de enfriamiento de la cal se utiliza a eficiencia térmica de enfriamiento como medida, que matemáticamente esta definida como:

$$\text{Eficiencia térmica} = \frac{\text{Calor contenido en el aire de secundario}}{\text{Calor contenido en la cal a la descarga del horno}}$$

Cabe mencionar que la anterior formula es aplicable siempre y cuando los hornos que se comparan trabajan bajo las siguientes características:

- Condiciones idénticas de consumo de calor
- La misma cantidad de aire en exceso
- La misma relación de aire primario a secundario.

17.1 Enfriadora de parrilla

En este tipo de enfriadora la cal forma una cama de material la cual es transportada a lo largo de una parrilla dotada de diferentes mecanismos que le permiten movimiento. El aire de enfriamiento es soplado abajo de la parrilla usando para ello un grupo de ventiladores pasando a través de la cama de cal en contra corriente. Solamente una parte de este aire puede ser utilizado como aire secundario, el resto debe ser desempolvado y desechado.

De todos los tipos de enfriadoras este tipo permite la mayor independencia de operación entre el homo y la enfriadora, permitiendo que la temperatura del aire secundario y la temperatura de la salida de la cal sean constantes. Esta flexibilidad en la operación de la enfriadora resulta de la facilidad para ajustar la velocidad del material en la zona de enfriamiento y la cantidad de aire que se utiliza para tal propósito.

Un modelo simplificado para las enfriadoras de parrilla que permite evaluar la temperatura de la cal a la descarga y la cantidad de aire necesario para tal efecto es la siguiente:

$$T_{cal} - T_{amb} = \exp(-V_{air} / 0.77)$$

$$T_{cal} \text{ in} - T_{amb}$$

Donde:

$$T_{cal} = \text{Temperatura de la cal a la salida de la enfriadora } (^{\circ}\text{C})$$

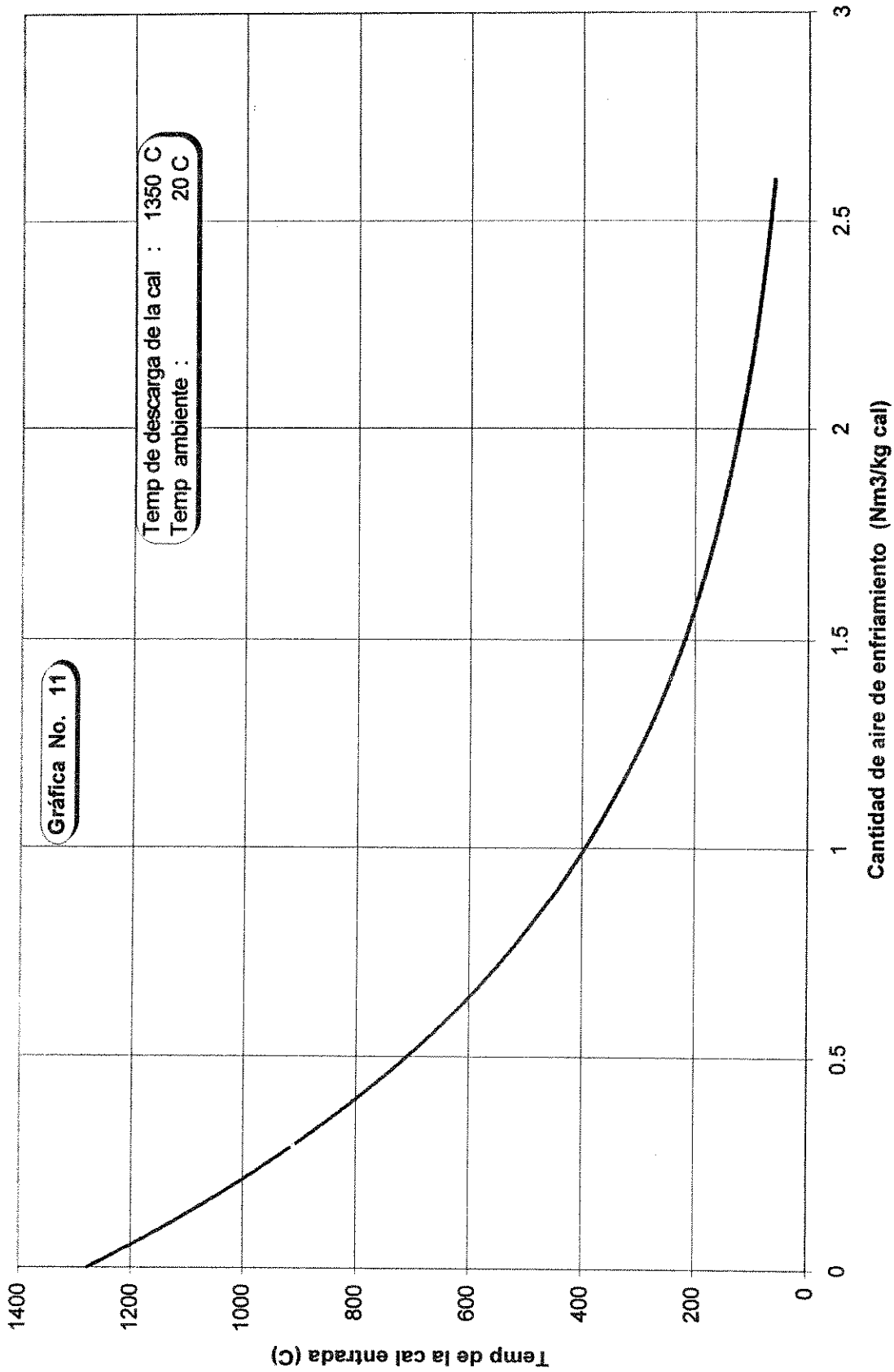
$$T_{cal} \text{ in} = \text{Temperatura de la cal a la entrada de la enfriadora } (^{\circ}\text{C})$$

$$T_{amb} = \text{Temperatura ambiente } (^{\circ}\text{C})$$

$$V_{air} = \text{Cantidad de aire de enfriamiento } (\text{Nm}^3/\text{kg de cal})$$

El comportamiento de esta variable puede apreciarse en la gráfica No. 11.

Enfriamiento de la cal en una enfriadora de parrillas



Dentro de las enfriadoras de parrilla existen dos tipos:

- Enfriadoras reciprocantes
- Enfriadoras de movimiento. Estas últimas no serán objeto de estudio

17.1.1 ENFRIADORAS RECIPROCANTES

La parrilla consiste en un grupo de hileras de platos de acero, donde cada hilera se mueve en forma alternada hacia adelante hacia atrás de tal forma que la cal sea transportada y enfriada al mismo tiempo. Ver figura No. 12

Estas enfriadoras son construidas para grandes capacidades hasta 1000 t/día de cal viva.

La principal ventaja de este sistema es la flexibilidad de control:

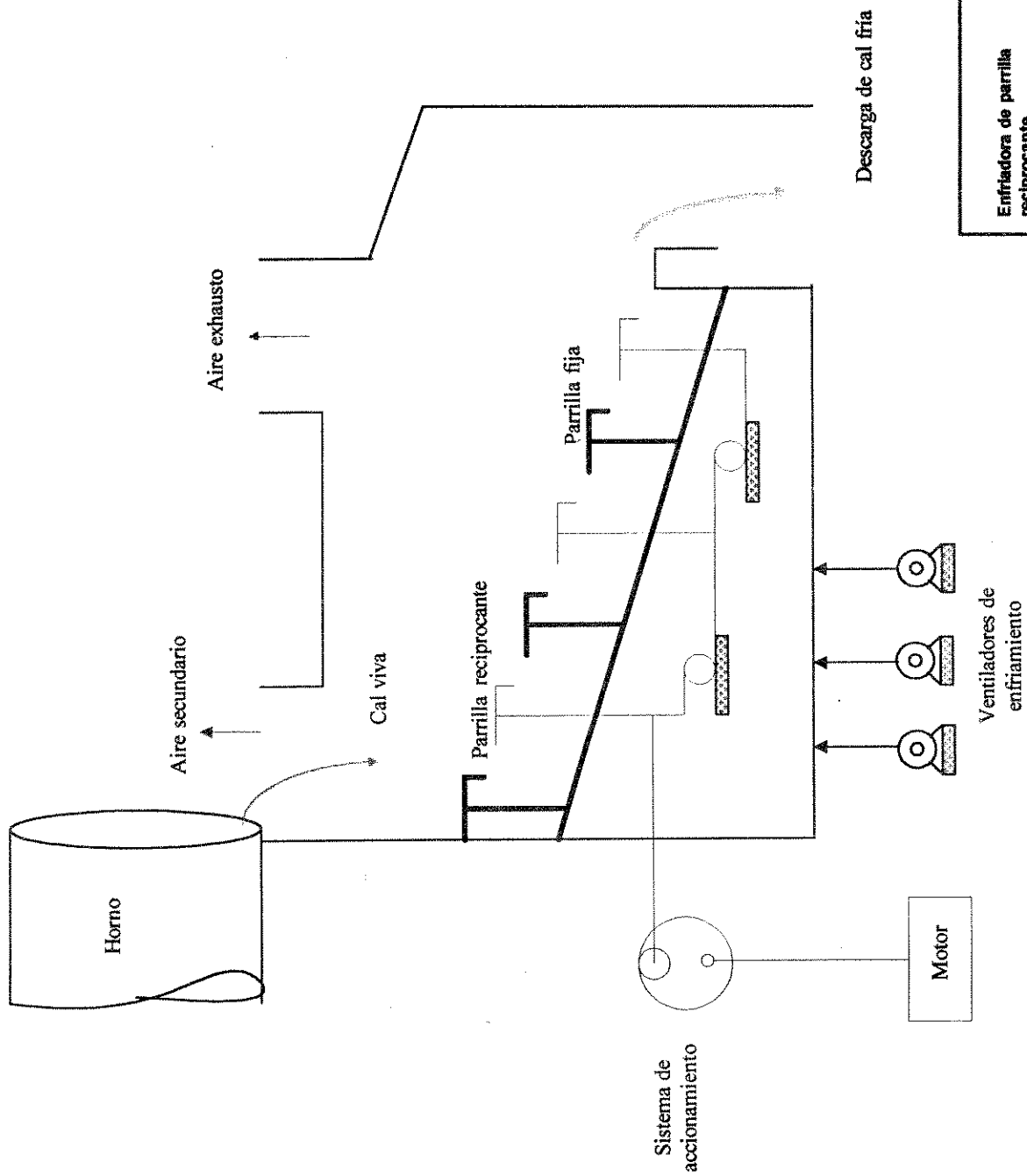
Velocidad de la enfriadora: para prevenir que el tamaño de la cama sobre la enfriadora se exceda al punto que la presión necesaria para atravesar la cama de material sea muy grande la velocidad del material se puede cambiar, de esta forma la resistencia de la cama de material se mantiene constante.

Cantidad de aire necesaria para el enfriamiento: debido a la disposición de varios ventiladores dotados cada uno con su respectivo damper el ajuste del aire necesario para cada compartimiento puede ser bien establecido.

La presión en la zona de la cabeza del horno: si la presión en la zona de la cabeza del horno aumenta, el ventilador de aire exhausto de la enfriadora puede aumentar la abertura del damper permitiendo de esta manera la cantidad de aire secundario al sistema constante. De igual manera se puede ajustar si la presión del sistema aumenta en dirección opuesta.

Una de las principales desventajas de este sistema es que requiere desempolvar el aire caliente que no es utilizado como aire de combustión. Usualmente filtros electrostáticos, ciclones o colectores de mangas son utilizados para este propósito. Teniendo especial cuidado de la temperatura de operación del aire de enfriamiento.

Diagrama de operación de una enfriadora de parrilla reciprocante



Enfriadora de parrilla reciprocante	Figura No. 12
	Title :
	Ssitema de enfriamiento
	Ref. :

17.2 ENFRIADORA ROTATIVA

Una enfriadora rotativa consiste básicamente rotativo similar al de un horno de cal.

La cal es alimentada a través de un chifle y luego es enfriada por medio de aire mientras esta es transportada en contra corriente hacia la descarga de la misma. Los tubos están equipados con levantadores para mejorar la eficiencia térmica. Cerca de un 70 % de la enfriadora esta cubierta con refractario.

Este diseño es el mas simple y el mas antiguo utilizado tanto en la industria del cemento como el de la cal. La velocidad de giro de la enfriadora esta en el mismo orden que la del tubo del horno y la relación de longitud a diámetro de la enfriadora es aproximadamente de 10.

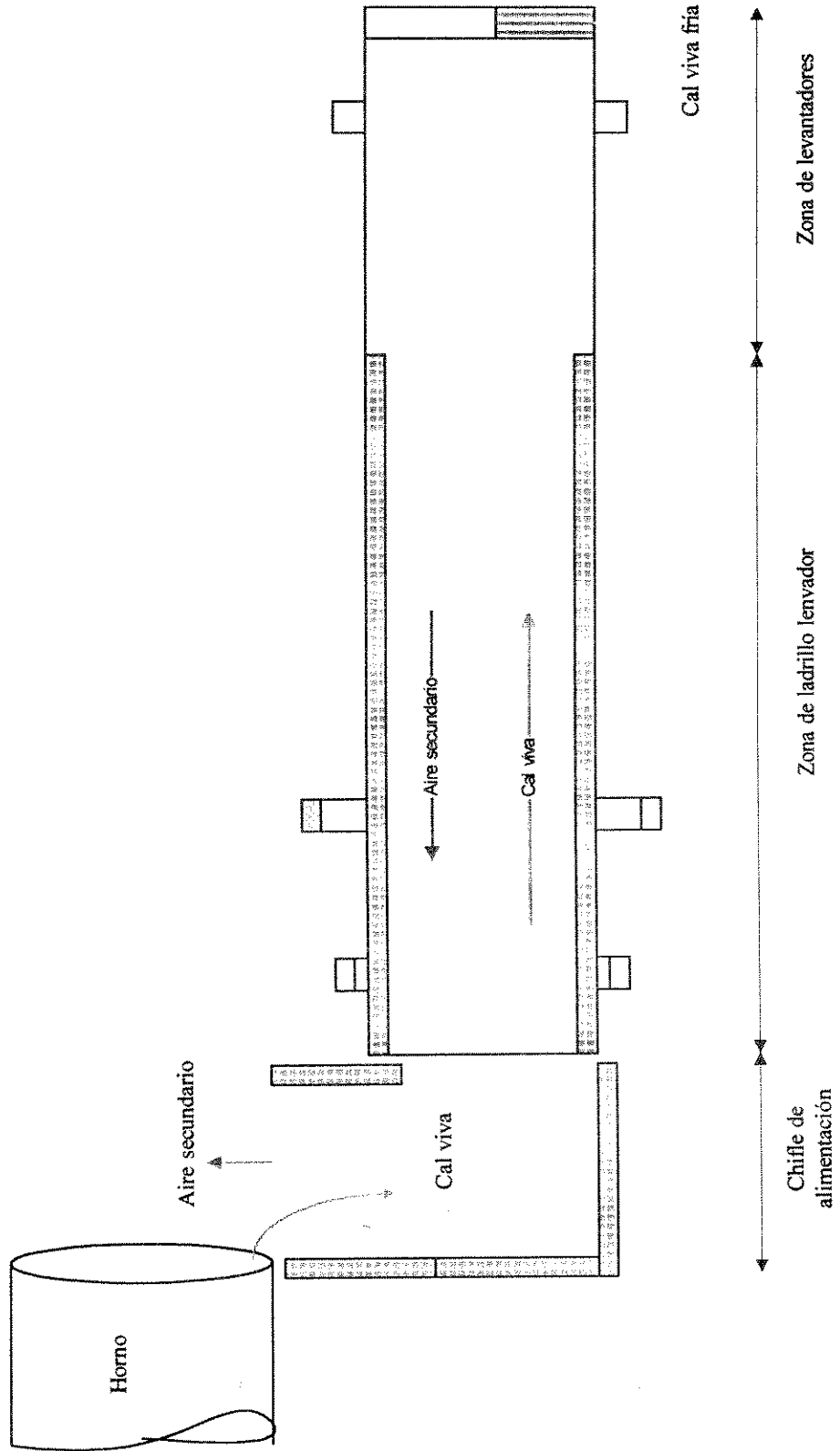
El ángulo de inclinación de la enfriadora es superior a la del horno y usualmente su valor es de 5%.

Un parámetro importante a considerar en las enfriadoras rotativas es el diseño de los internos, debido a que no deben ocasionar el rompimiento de la cal viva o bien la generación de polvo de cal que reingrese al proceso. Su uso es generalizado para aquellas cales que presenten problemas de decrepitation de la piedra, donde las aplicaciones de enfriadoras de parrillas no es posible debido a la obstrucción de las parrillas. Ver figura No. 13

17.3 ENFRIADORAS PLANETARIAS

Las enfriadoras planetarias están basadas en el mismo principio de la enfriadora rotativa. Sin embargo la diferencia principal de las enfriadoras planetarias es el numero de tubos individuales. Usualmente el flujo de cal es dividido en 9 o 10 tubos los cuales están acomodados alrededor de la circunferencia de la descarga del tubo del horno. Puesto que la conexión de las enfriadoras esta directamente conectada al tubo del horno este sistema no requiere un motor adicional para el accionamiento. En estos sistemas el enfriamiento de la cal empieza en el interior del tubo del horno alrededor de 1.5 a 2.5 veces el diámetro del horno, dependiendo de la posición del quemador donde la temperatura baja unos 200 grados centígrados. Luego la cal entra al sistema de enfriadoras donde es enfriada a contracorriente. La cantidad de aire usado para el enfriamiento, es la estrictamente necesaria como aire secundario de combustión. El aire es calentado aproximadamente a 700 grados centígrados y la cal es descargada a unos 120 grados centígrados. Esto, usualmente, es una

Diagrama de operación de una enfriadora rotativa



Enfriadora rotativa	Figura No. 13
Title :	Sistema de enfriamiento
Ref. :	

temperatura muy alta para el manejo de la misma. Sin embargo, al igual que las enfriadoras tipo rotativo estas son de especial ayuda en aquellas cales cuya tendencia es a decrepitar después de haber sido calcinadas. Una cantidad considerable de calor es transferida al medio ambiente debido a que de un 50 a 75 % de la enfriadora no esta recubierta con refractario.

Una buena operación depende fuertemente del arreglo y el tipo de levantadores que posea la enfriadora, así como el arreglo general dentro de esta. Otro parámetro a considerar en las enfriadoras de esta naturaleza, es la distribución de material a cada una de ellas. Usualmente, las enfriadoras planetarias tienden a distribuir el material de una manera irregular, ocasionando que la carga térmica de las enfriadoras no sea homogénea y por consiguiente la temperatura de la cal a la descarga cambia considerablemente. Otro fenómeno no deseado es la generación de polvo en cales fines que reingresan al sistema creando ciclos de polvo que no favorecen el proceso de calcinación y aumenta el fenómeno de abrasión en la zona de los codos y laterales del quemador.

Un diagrama de la enfriadora planetaria es similar al mostrado para la enfriadora rotativa tal como se muestra en la figura No. 13.

17.4 ENFRIADORA DE CONTACTO O ENFRIADORA VERTICAL

Una enfriadora de esta naturaleza puede operar sin general exceso de aire y a la vez ofrece una condición ideal de transferencia de calor basado en el principio de flujo a contra corriente.

La experiencia ha demostrado que este tipo de dispositivo es el mas eficiente en la recuperación de calor y enfriamiento de la cal. Sin embargo existen algunas limitaciones tales como:

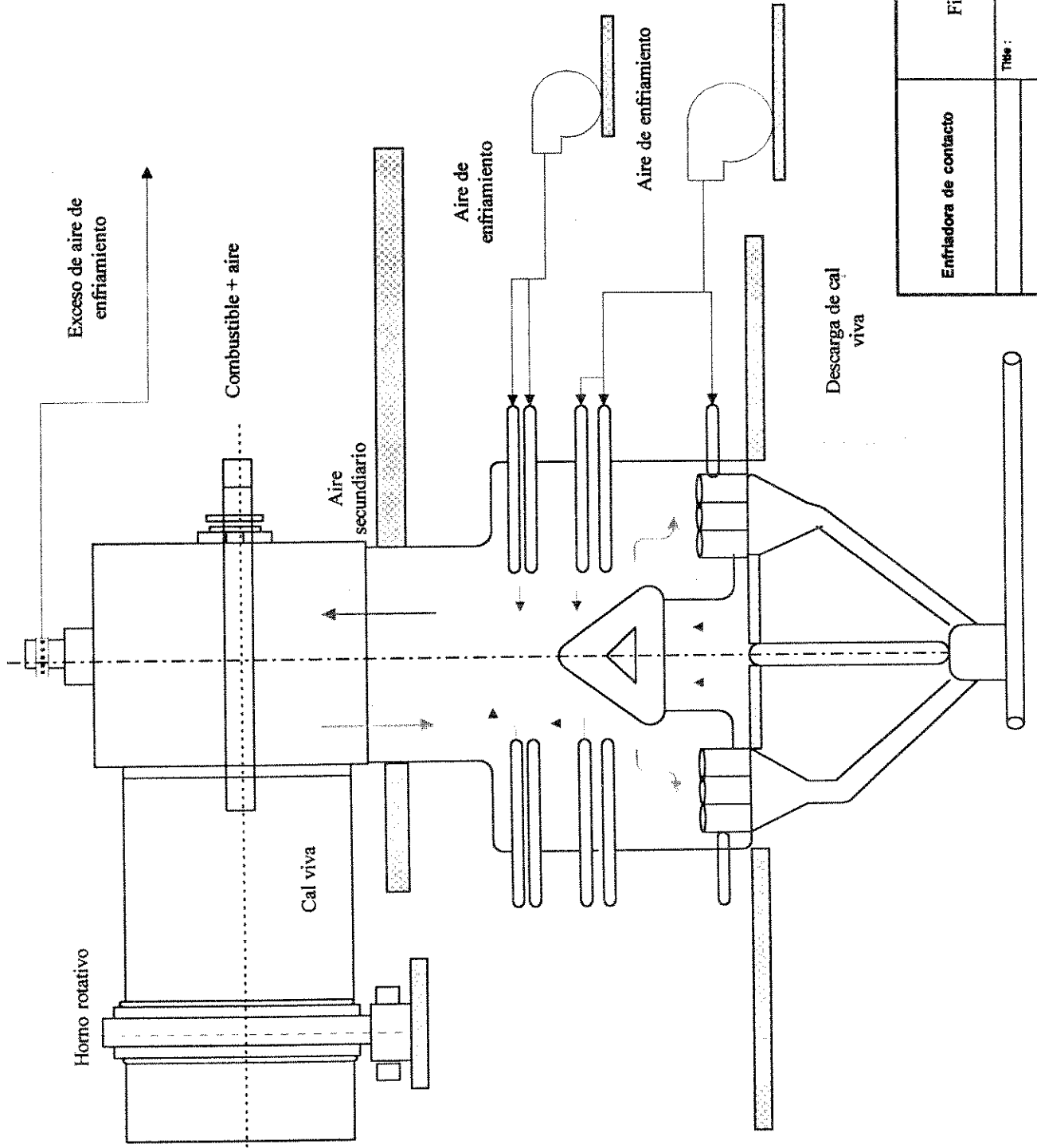
La uniformidad de la granulometria de la descarga. La presencia de finos o fluctuaciones en la granulometria de alimentación, ocasionan variaciones en la eficiencia de la enfriadora.

Adicionalmente, si la caliza tiende a decrepitar el fenómeno de circulación de aire de enfriamiento se agravara al punto de no poder operar con esta enfriadora.

La cantidad de aire requerido para el proceso como aire secundario regula la cantidad de aire de enfriamiento, si por cualquier razón el horno entra en condiciones anormales la enfriadora tendrá problemas en acondicionar la cal a una temperatura adecuada para su manejo.

Requiere ventiladores grandes para vencer la presión del material a enfriar. Esto repercute en el consumo de energía eléctrica del sistema. Ver figura No. 14.

Diagrama de operación de una enfriadora de contacto



Enfriadora de contacto	Figura No. 14
	Título: Sistema de enfriamiento
Ref.:	

18.0 CONDICIONES ACTUALES DEL HORNO ROTATIVO DE LA PEDRERA

Para la fabricación de "clinker" en un rotativo existen diferentes arreglos dependiendo de las características de la alimentación y el proceso de intercambio de calor entre la materia prima y los gases de combustión. Cuatro arreglos básicos se encuentran en la industria del cemento para fabricar "clinker" (*)

- Homo largo vía húmeda
- Homo largo vía seca
- Homo con precalentador
- Homo con precalcinador.

De los anteriores únicamente el primero y segundo tienen la facilidad de ser acondicionados para producir cal en lugar de clinker.

El horno de la planta La Pedrera pertenece al grupo número dos haciendo su conversión a la fabricación de cal fácil y de bajo costo. Para determinar cuál de las instalaciones ya existentes pueden ser utilizadas en la fabricación de cal se analizan las existentes y las adicionales para cumplir con los requerimientos de fabricación de cal de alta reactivada.

Los principales componentes de un horno de clinker pueden dividirse en los siguientes grupos:

1. Sistema de transporte de alimentación
2. Sistema de transporte de producto
3. Sistema de filtración
4. Sistema de enfriamiento
5. Sistema de transferencia² de calor (tubo del horno)
6. Sistema de alimentación de combustible.

² (*) Ver glosario

Para entender cada uno de los equipos y sus modificaciones se hace un análisis comparativo de la función en ambas unidades:

18.1 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

El sistema de alimentación ha sido diseñado en la industria de clinker para manejar un material fino. Cuya fineza (*) es menor de los 170 micrones.

Por otro lado, en la industria de la cal de acuerdo a las características deseadas en el producto terminado su alimentación puede ir desde las 3 pulgadas hasta $\frac{3}{4}$ de pulgadas. Las características de alimentación son totalmente diferentes y deben ser reemplazadas por completo, pueden ser reutilizado el sistema de transporte de material de finos procedentes del filtro.

18.2 SISTEMA DE TRANSPORTE DEL PRODUCTO

Ambos materiales tienen características similares al momento de ser descargados del tubo del horno y posteriormente de la enfriadora. El transporte final a través de cadenas de arrastre no es el más recomendado debido al continuo golpe de la cadena y la piedra de cal que tiende a generar una cantidad fina de cal, en algunas aplicaciones no utilizada. Se recomienda que el transporte final se lleve a cabo usando bandas transportadoras de hule con caídas bien diseñadas que reduzcan la cantidad de finos a generar.

Sin embargo, el sistema actual de transporte puede ser utilizado, teniendo en cuenta lo ya mencionado.

18.3 SISTEMA DE FILTRACIÓN

El proceso de recolección de finos requiere de uno o dos filtros, dependiendo del arreglo de la enfriadora de cal. En el horno 61 de la planta La Pedrera el arreglo es de enfriadora de parrilla, esto requiere el uso de dos colectores.

El colector principal del polvo que se mueve en los gases de combustión es un filtro tipo electrostático, el cual requiere del acondicionamiento de gases mediante la dosificación de agua antes de que el polvo pueda ser colectado. Su eficiencia es cercana al 99 % y la resistividad del polvo de cal al polvo de mezcla son similares. Esta instalación puede ser utilizada sin ningún problema para llevar a cabo el proceso de recolección de los finos (usualmente constituidos por caliza y cal viva fina) sin mayor reacondicionamiento del sistema.

El colector de la sección de la enfriadora por otro lado es de tipo cámara de sedimentación, con una eficiencia del 95 % en la zona de recolección de gruesos. Esto es aceptable para la industria de la cal, siempre y cuando la generación de finos procedentes del proceso de decrepitación no sea considerable. Si la cantidad de finos arrastrados por el aire de enfriamiento de la cal es considerable se debe evaluar la instalación de un filtro de bolsas en esta zona, teniendo especial cuidado de ubicar un damper que permita el ingreso de aire frío antes de llegar al filtro.

18.4 SISTEMA DE ENFRIAMIENTO

El sistema de enfriamiento del clinker se puede llevar a cabo usando enfriadoras planetarias, de parrillas, rotativas o de contacto. El sistema del horno 61 cuenta con una enfriadora de parrilla que puede ser utilizada sin ninguna modificación para el enfriamiento de la cal. La cantidad de finos generados en la cal viva, puede originar que el uso de este enfriador no sea el adecuado. Debe considerarse los otros tipos de enfriador, dependiendo de la eficiencia buscada y de las características del producto.

18.5 SISTEMA DE TRANSFERENCIA DE CALOR (TUBO DEL HORNO)

Las características del tubo del horno para la fabricación de cal y "clinker"^{(*)3} es idéntica con la excepción del recubrimiento interno del horno.

Un horno de "clinker" presenta un arreglo de ladrillo refractario que le permita manejar cinco zonas de conversión de la mezcla en "clinker":

Zona de precalentamiento

Zona de calcinación

Zona de formación de fase líquida

Zona de sinterización

Zona de enfriamiento

Cada una de ellas se encuentra sometida a un perfil de temperatura y a ciertos cambios químicos que ocurren en la mezcla. Por otro lado en la industria de la cal solo tres zonas están enmarcadas:

Zona de precalentamiento

Zona de calcinación

Zona de enfriamiento

Una nueva redistribución del ladrillo refractario será necesaria en el horno en la siguiente campaña de remplazo de ladrillo. Por otro lado la configuración interna del ladrillo debe de favorecer el mezclado de las piezas de diferente tamaño dentro del horno. Un sistema de levantadores, cruz de intercambio de calor o ladrillo poligonal puede considerarse como alternativa.

Este constituye el rubro de mayor inversión debido a los altos costos del ladrillo refractario.

³ (*) Ver glosario

18.6 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE COMBUSTIBLE

El sistema actual de alimentación de combustible en el horno 61 de La Pedrera es a través de un sistema de bombas de alta presión que permite manejar combustibles líquidos tales como el bunker y aceite quemado. El acondicionamiento del combustible es llevado a cabo usando un banco de intercambiadores de calor y una caldera de aceite térmico para precalentar el combustible. Un sistema auxiliar de calentadores eléctricos se encuentra en "Stand By" en caso de cualquier falla del sistema de aceite térmico. En esta primera etapa de conversión del horno a cal no es necesario realizar ninguna modificación en el sistema de combustible, dado que las intenciones es producir cal usando bunker como combustible principal hasta que algún combustible sólido lo sustituya.

Un diagrama de las condiciones actuales y del sistema propuesto para la conversión se aprecia en la figura No. 10.

19. PROCESO DE HIDRATACIÓN DE LA CAL VIVA.

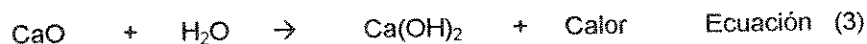
La cal producida en hornos rotativos tiene su aplicación principal en la industria que busca una cal química cuya venta se planifica hacerla en la mayoría de los casos a granel. Sin embargo, algunas aplicaciones requieren de un producto con características químicas y físicas diferentes conocido como cal hidratada.

La cal hidratada o hidrato de cal es el producto que se obtiene de la reacción química del óxido de calcio (cal viva) y el agua. El producto de esta reacción son hidróxidos de calcio y magnesio, en proporciones que dependen de la composición química de la caliza utilizada para la fabricación de cal o bien de las condiciones de calcinación a las cuales fue sometida la caliza.

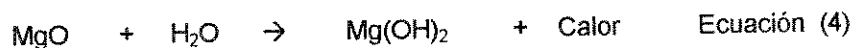
Dependiendo del grado de quemado la cal viva y el método de hidratación se pueden tener cantidades diferentes de óxidos no hidratados.

Las reacciones pueden describirse como siguen para los dos óxidos principales presentes en la cal viva:

Hidratación de cal con alto contenido de óxido de calcio:



Para el caso del óxido de magnesio la reacción queda descrita de la siguiente manera:



Esta última reacción procede lentamente en hidratadoras convencionales y se presenta como un óxido no hidratado o parcialmente hidratado al momento del uso de la cal.

19.1 Descripción del proceso de hidratación

Hidratación se puede definir como un proceso donde cantidades estequiométricas de agua y cal se mezclan en un reactor para formar un producto, cal hidratada, que usualmente es un polvo fino de poca densidad y que contiene menos de 1 % de humedad residual.

Los pasos del proceso de hidratación de la cal viva se enumeran a continuación:

19.1.1 Paso 1

El material extraído del horno de cal es reducido de tamaño usando para ello una trituradora, similar a las descritas en la sección de extracción de materia prima que permita tener un material pequeño con mucha superficie específica y con una velocidad de reacción mayor que la de piezas mayores a ½ pulgada cuando se mezclen con el agua de hidratación. Una vez reducidas de tamaño son almacenadas para el siguiente paso.

19.1.2 Paso 2

La cal viva ya reducida de tamaño es dosificada a un mezclador de alta velocidad donde es mezclada con la lechada procedente de la torre de acondicionamiento de los vapores generados por el proceso. Acá se origina una masa de cal y agua que dan inicio al proceso de hidratación de las piezas más pequeñas en tanto que las más grandes deberán pasar al siguiente paso del proceso. La cantidad de agua a agregar es la estequiométrica requerida por el proceso de hidratación de óxido de calcio de acuerdo a las reacciones previamente enumeradas.

19.1.3 Paso 3

La masa de cal y agua entran a la hidratadora donde la hidratación del resto de material toma lugar usando la diferencia de densidad existente entre la cal viva y la cal hidratada. La cal ya hidratada migra a la superficie de la hidratadora mientras que las piezas de cal viva más pesadas se asientan en el fondo de la hidratadora, donde encuentran un ambiente húmedo y caliente que favorece el fenómeno de hidratación.

El principal parámetro de control de la hidratadora es el del tiempo de retención en ella el cual puede cambiar dependiendo de la reactividad de la cal, la fineza de la cal, la temperatura de la cal y el contenido de grana presente en la cal.

El vapor de agua procedente del hidratador es trasladado a una chimenea donde las partículas finas arrastradas por el vapor son atrapadas por una cortina de agua creada por chorros a presión presentes a lo largo de la chimenea. El resto de vapor que logra escapar del sistema sale al ambiente llevando consigo menos de 100 mg/Nm³ de cal hidratada. La lechada que contiene el agua condensada y la cal fina son trasladados al mezclador para su reutilización.

19.1.4 Paso 4

El material que sale del hidratador es trasladado a un separador donde se lleva a cabo la clasificación de partículas finas o producto (usualmente constituidas por hidróxido de calcio puro) y las partículas gruesas o rechazo (usualmente granza) que no cumplen con las características de finezas específicas.

Estas partículas gruesas, usualmente, son constituidas por hidróxido de calcio no hidratado, carbonato de calcio que no reacciono pueden ser dosificados al sistema o bien desechados del mismo como un subproducto de la fabricación de cal, esto dependiendo de las características especificadas para la cal hidratada por parte del cliente.

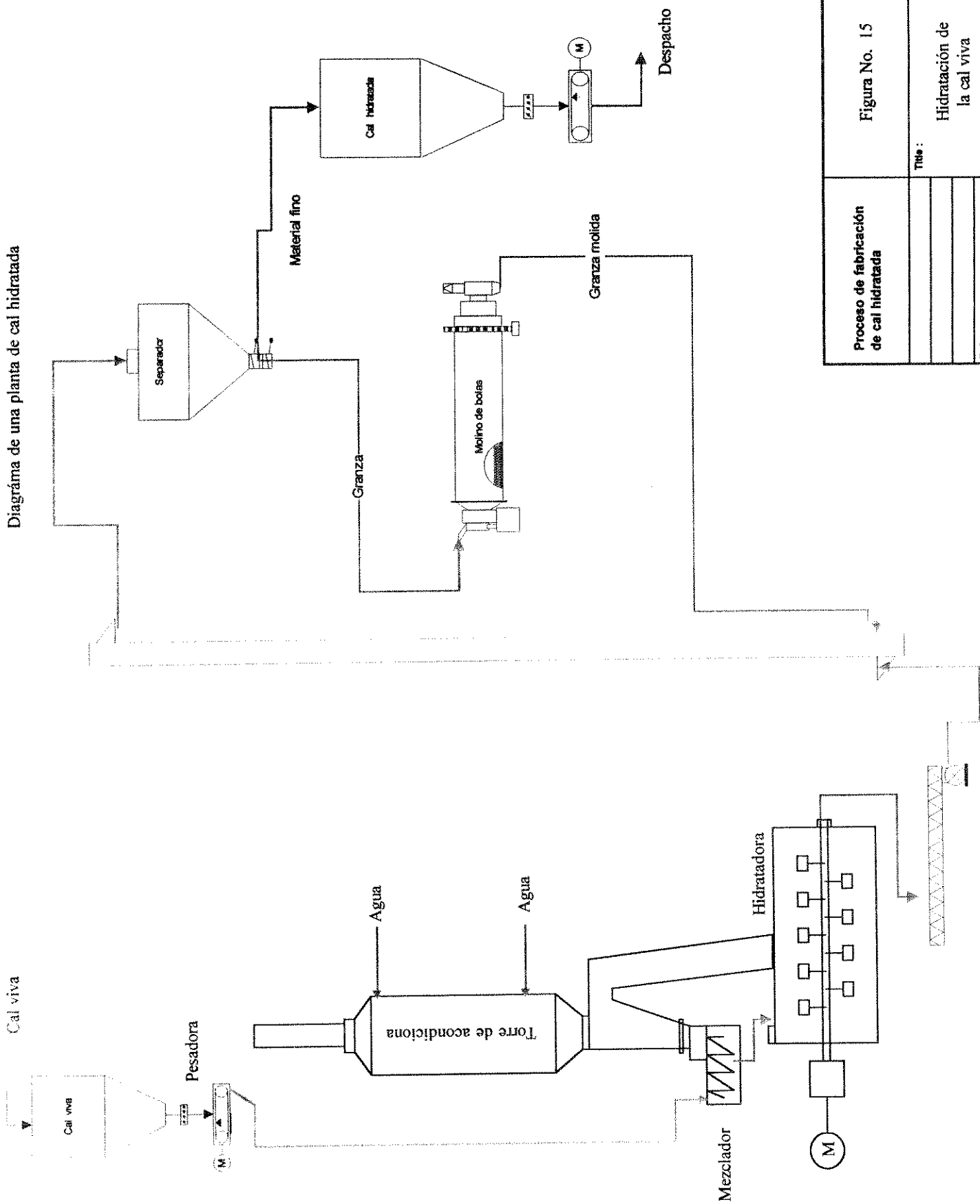
Si se reprocesa este material el siguiente paso es la reducción de tamaño de estas piezas no hidratadas (granza) usando para ello un molino de bolas. Aquí el material es reducido de tamaño para después ser trasladado al separador.

19.1.5 Paso 5

El último paso en la fabricación de cal hidratada es la sección de almacenaje y despacho, el cual puede ser en bolsas o bien a granel usando tanques para su traslado.

Un diagrama del proceso de hidratación se observa en la figura No. 15.

Diagrama de una planta de cal hidratada



Proceso de fabricación de cal hidratada	Titulo :
	Ref. :

Figura No. 15

Hidratación de la cal viva

CONCLUSIONES

1. La evaluación de la fabricación de cal para la industria guatemalteca demuestra un potencial de crecimiento que justifica la modificación de un horno rotatorio de "clinker" a la fabricación de cal viva de alta flexibilidad.
2. La mejor utilización de las canteras de caliza consumiendo la mayoría de lo extraído y generando menor subproductos indican que el horno rotatorio es el más indicado para la fabricación de cal viva.
3. La calidad de la piedra caliza a utilizar en el proceso de calcinación debe ser cuidadosamente evaluada previo a la instalación de cualquier unidad de calcinación.
4. La generación de subproductos en la producción de cal viva con un horno rotativo con alto potencial de aprovechamiento crea nuevas expectativas de mercado para la industria de la cal.
5. La fabricación de una cal de mayor calidad para aplicaciones químicas necesita de un horno con la capacidad de producir los tres tipos de cal que demanda la industria, sin la generación de productos, tales como la granza.
6. El uso de combustibles sólidos de menor costo en hornos rotativos beneficia la economía nacional con un producto de menor costo y de calidad superior.
7. El uso de instalaciones ya ubicadas y la generación de empleo de estas instalaciones debe impulsarse a nivel nacional.

RECOMENDACIONES

Basado en el estudio se recomienda llevar a cabo el siguiente plan de acciones encaminado a fortalecer la industria de la cal a nivel nacional:

1. Llevar a cabo una prueba a nivel industrial de la producción de cal viva en un horno rotativo y verificar la calidad, la aceptación del cliente de este nuevo producto y los costos de operación estimados para este producto.
2. Utilizar instalaciones ya existentes de La Planta la Pedrera que de lo contrario se convertirían en chatarra así como aprovechar la experiencia acumulada en el personal a cargo de la operación de los hornos .
3. Explorar con calidades diferentes de cal el mercado centroamericano y verificar el nivel de aceptación y necesidad real existente de un producto de diferentes características físicas y químicas.
4. Preparar la industria guatemalteca para el fenómeno de globalización que se está dando a nivel mundial.

Bibliografía

1. FERENCO CORPORATION. Conversion of cement kiln to lime kiln. USA: Copyright, 1997.
2. KENNEDY VAN SAUN. Lime calcining and hydrating systems. Alemania: Copyright, 1996.
3. KEENAN, J.H. Thermodynamic properties. USA: John Wiley & Sons, 1963.
4. DUDA, W. H. Cement Data Book. Alemania: Bauverlag GmbH Wiesbaden, 1982.
5. PERRY'S. Chemical Engineers Handbook. USA: Mc. Graw - Hill, 1984.
6. FRIEDMAN S.J. Theory of Calcination. USA: Copyright, 1949.
7. WORLD CEMENT. "The Cement Industry No. 1". Technical Journal. USA: s.d.e., 1997.
8. KURT PERAY. The Rotary Cement Kiln. USA: Chemical Publishing Co, 1989.
9. DENNIS WRIGHT. Basic Programs for Chemical Engineers. USA: Van Nostrand Reinhold, 1986.

