

**Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez".  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Química**

**TRABAJO DE DIPLOMA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO**

**Título: Estudio de los procesos de trituración  
de clinker y cemento en los molinos de bolas  
de la Empresa "Cementos Cienfuegos S.A.".**

**Autora: Yesenia López Cueto  
Tutor: Dr. C. Rafael Antonio Goytisoló Espinosa.  
Consultante: Ing. Orlando Manuel Stable Rodríguez.**

**Curso: 2013-2014**



# **Pensamiento**

Pensamiento



*No se necesita un químico que haya aprendido esta ciencia tan solo leyendo libros, sino uno que lo haya comprendido por ejercitarse con dedicación en este arte...*

# Agradecimientos



*"Agradezco a todas las personas que creyeron en mí y apostaron porque llegaría al final:*

*A mi madre, Nora Cueto, que es la persona que más ha luchado porque mi sueño se convierta en realidad*

*A mi padre, mis suegros y al resto de mi familia que también aportaron su granito de arena*

*A mi tutor Rafael Antonio Goytisolo Espinosa que es la persona que más me ha ayudado y con su amor ha logrado que varias de mis compañeras y yo lleguemos al final de este largo camino por el que tanto hemos pasado*

*A mis compañeros Rosalí, Beatriz Alina, Eli, Beatriz y Delvis que fueron capaces de soportarme durante 5 años incondicionalmente*

*A mis queridas becadas que tanto compartimos juntas momentos malos y buenos*

*En especial a mi novio amado, Ediel Laza Cabrera, que no por mencionarlo de último deja de ser importante, solo que a pesar de conocerme hace poco tiempo ha sabido quererme y comprender que en estos momentos nada es más importante que terminar mi tesis."*

# **Dedicatoria**

Dedicatoria



*"Dedico esta tesis a mi madre por ser la persona que más amo en el mundo, a mi novio por saber quererme y por apoyarme tanto en estos momentos difíciles para mi, y en especial a mi hermana por ver en mi un ejemplo de dedicación y superación y para que algún día llegue más lejos que yo."*

# Resumen



Para la molturación del crudo y del cemento se emplean los molinos tubulares o combinados. En los molinos de crudo se alimenta la arcilla, la marga, el hierro, y otras materias primas que lleve la composición del crudo que a producir con la granulometría necesaria en cada caso. En los molinos de cemento se alimentan el clinker y el yeso bajo una granulometría de 0 a 25 mm, mediante adecuados aparatos alimentadores. Los trozos de tamaño mayor deben ser reducidos a menores dimensiones por propia trituración. El molino combinado para cemento corresponde, por su construcción del molino semejante para crudo. Se construyen molinos desde 1,20 a 4,40 m de diámetro y hasta 16 m de longitud. Acerca de la potencia necesaria, número de revoluciones, grado de llenado, tamaño de las bolas, etc. existen recomendaciones similares para la molturación del crudo y del cemento, El material a moler debe ser introducido en el molino en estado seco, y el molino debe estar bien ventilado, con lo que se eliminan los inconvenientes procedentes de la humedad del aire atmosférico. En el presente trabajo se profundiza en los parámetros fundamentales de regulación de un molino de crudo y de cemento con el objetivo de lograr una determinada eficiencia, capacidad de producción, un determinado nivel de molturación, contemplando además aspectos como potencia consumida, velocidad de giro, etc. Se aspira en la continuidad de la Investigación a establecer un algoritmo de cálculo y un software que pueda ser empleada para la Empresa "Cementos Cienfuegos S.A." en la regulación de sus molinos para la explotación.

Palabras clave: clinker, cemento, molino

# ***Abstract***



For grinding of raw and cement mills combined tubular or used. In the raw mill clay, marl, iron, and other commodities bearing the composition of the crude oil to produce the required particle size in each case is fed. In the cement mills clinker and gypsum under a grain of 0-25 mm are fed by feeders suitable devices. The larger pieces should be reduced to smaller self grinding. The combined cement mill corresponds for construction of such a raw mill. Mills are built from 1.20 to 4.40 m in diameter and up to 16 m in length. About the power required, number of revolutions, degree of filling, ball size, etc.. Similar recommendations exist for oil milling and cement grinding material should be added to the dry mill, and the mill should be well ventilated, so that the drawbacks from atmospheric air moisture are removed. In this paper elaborates on the basic parameters of regulation of a raw mill and cement in order to achieve a certain efficiency, production capacity, a certain level of grinding, also considering aspects such as power consumption, speed, etc. Aspirated into the continuity of Research to establish an algorithm and software that can be used for the Company "Cementos Cienfuegos SA" in regulating its mills to operate.

Keywords: clinker, cement, mill.



Introducción .....	1
Capítulo I: DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE CEMENTO .....	7
1.1 Breve historia del empleo del cemento como material de construcción.....	7
1.2 Materias Primas empleadas en la producción de cemento. ....	9
1.3 Traslado, Preparación y Almacenaje de las Materias Primas. ....	9
1.4 Equipos fundamentales de la Planta de Trituración y secado y diagrama de flujo.....	12
1.5 Dosificación y molienda de crudo. ....	14
1.6 La producción de Clinker. ....	17
1.7 La producción de cemento. ....	19
1.8 Sistemas de desempolvado fundamentales. ....	20
1.9 Sistemas auxiliares para la producción.....	20
1.10 Tipos de Cemento.....	21
1.11 Propiedades generales del cemento. ....	27
1.12 Aplicaciones. ....	27
1.13 Riesgos Medioambientales de la Producción de Cemento.....	28
1.14 Conclusiones Parciales del Capítulo I. ....	30
Capítulo II: La trituración y la molienda en la producción de cemento. ....	32
2.1 La reducción del tamaño de las materias primas en la producción de cemento.....	32
2.2 Conceptos y Definiciones.....	33
2.3 Molienda de materias primas. ....	33
2.4 Secado y Molienda del Crudo. ....	35

2.5 Molienda del Clinker para la producción del cemento. ....	36
2.6 La molienda en molinos de bolas y de barras dentro del proceso de producción de cemento. ....	39
2.7 Estructura de los molinos de bolas y de barras en la producción de cemento. ....	40
2.8 La fabricación de cemento en la ciudad de Cienfuegos y comportamiento de los molinos de bolas. ....	41
2.9 Conclusiones Parciales del Capítulo II. ....	46
Capítulo III: CÁLCULO O SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS FUNDAMENTALES PARA LA EXPLOTACIÓN EFICIENTE DE LOS MOLINOS DE BOLAS. ....	48
3.1 Parámetros importantes en la eficiencia de la molienda en molinos de bolas. ....	48
3.2 Determinación de la velocidad de giro óptima del molino. ....	48
3.3 Modelo matemático para calcular la velocidad óptima de giro del molino. ....	50
3.4 Distribución de los cuerpos moledores en la sección del molino. ....	53
3.5 Número de choques de las bolas por vuelta. ....	53
3.6 Carga de bolas en los molinos. ....	54
3.7 Partes internas de un Molino de bolas y protección contra el desgaste producido por las bolas: ....	58
3.8 Cálculo de la Potencia Demandada por el Molino de Bolas. ....	72
3.9 Cálculo de la Capacidad de producción del Molino de Bolas. ....	73
3.10 Conclusiones Parciales del Capítulo III. ....	74
Conclusiones. ....	75
Recomendaciones. ....	76
Bibliografía. ....	77
Anexos	

### Introducción

Los Molinos de Crudo y de Cemento de las tres líneas de producción de la Fábrica de Cemento "Karl Marx" de Cienfuegos fueron fabricados en la antigua RDA por la firma VEB ZAB DESSAU VEB STEK MAGDEBURG en el año 1976. Se montaron en la línea en los años 1979 a 1980 con fecha de puesta en marcha de la Planta 16 de febrero de 1980.

Estos equipos están destinados para la molturación de materiales tales como: caliza, marga, arcilla, feldespato y cal requeridos en la producción del clinker y del cemento y constan de un cuerpo o tambor cilíndrico con revestimiento interior de placas de blindaje que constituyen la cámara de molturación, dos grupos de apoyo integrados por los "trunium" de entrada y de salida y sus respectivos cojinetes de deslizamiento hidrostáticos, con tejas de fricción de 180° y sus pedestales y por el sistema de accionamiento del tipo doble accionamiento periférico compuesto por los respectivos motores eléctricos, reductores planetarios, arboles de transmisión y el reductor final cilíndrico de dientes rectos bifurcado. Constan además de dos estaciones de lubricación para los puntos de apoyos, una para los reductores planetarios del accionamiento y otra para el reductor final de la transmisión.

Durante los más de 30 años de explotación de la Empresa, han sido estos molinos los equipos donde más averías se han producido. En el mes de Febrero del año 1986 se produjo la primera avería en el molino No. 1 al producirse la fractura de un grupo de tornillos de la brida de acoplamiento trunium de salida-tambor. En esa ocasión se procedió al restablecimiento de los tornillos averiados y al cambio de la teja de fricción de esta chumacera.

Durante la segunda mitad del año 1986 y principios del 1987 el molino trabajó al 50% de su capacidad producto de la falla del reductor planetario del accionamiento izquierdo y la no existencia en la fábrica de repuesto para el mismo, manteniéndose el molino funcionando con el accionamiento derecho.

## INTRODUCCIÓN

Con el restablecimiento de los dos accionamientos, el molino continuó operando a su capacidad nominal hasta el mes de mayo del año 1991 en que motivado por las condiciones del Período Especial en Cuba fue detenida la producción de la línea hasta finales del año 1995 en que se decidió la puesta en marcha de la misma para poder satisfacer los compromisos de la fábrica de producir en el año 1996, 300 000 toneladas de cemento adicionales con relación a la producción del año 1995.

A finales de 1995 y durante el proceso de puesta en marcha de la línea N° 1 se produjo la falla del cojinete de apoyo correspondiente al trunium de salida del molino de crudo por arrastre y desprendimiento del recubrimiento de fricción de la superficie del metal del cojinete. Durante el restablecimiento del cojinete se detectaron un conjunto de grietas en la superficie de deslizamiento del mismo cuyo origen se desconocía y que fueron las causantes del arrastre del metal.

En el proceso de inspección del molino en su conjunto se detectó una desalineación entre los apoyos del mismo y una deformación plástica del eje geométrico del tambor, elementos estos cuyo origen también se desconocía pero que podían haber influido en la aparición de las grietas del "trunium".

Se cuestionaba si el prolongado período de parada del molino, en el cual gran parte de este tiempo el mismo se mantuvo con la carga de bolas en su interior, podía haber determinado algún proceso que diera origen a las grietas detectadas.

Durante la investigación se descubrieron otros deterioros que podrían aportar elementos acerca de la falla del trunium como son: desgaste de la superficie del encaje y de la pestaña de centraje de la brida de unión trunium de salida-tambor, aplastamiento de la superficie de los orificios de los pines radiales de la brida, desgaste o aplastamiento de la superficie de asiento de un grupo de tuercas de los tornillos de la brida.

La actual Empresa Mixta "Cementos Cienfuegos S.A." surgió a partir de la antigua Fábrica de Cementos "Karl Marx" sobre la base de negociaciones que se iniciaron en el año 2000 con la parte extranjera y a mediados del año 2001 se inició la

## INTRODUCCIÓN

inversión consistente en una rehabilitación general de la antigua Empresa de Cementos “Karl Marx” y el montaje de equipamiento prácticamente nuevo en la Línea No. 3. Estas inversiones abarcaron también la rehabilitación de la Línea No. 2. Los objetivos de la rehabilitación de los Molinos de Crudo eran por un lado elevar la eficiencia de los mismos y por otro elevar su confiabilidad. Este Trabajo fue realizado por varias Empresas Contratistas, la Empresa Geominera Pinar fue la que ejecutó el mayor por ciento de los trabajos de rehabilitación del Molino. Las comprobaciones, rectificaciones y ajuste del “trunium” de salida los ejecutó la Empresa GECA Cienfuegos Cementos Cienfuegos S.A.

Durante la rehabilitación se ejecutaron los siguientes trabajos técnicos:

- Cambio de los árboles de transmisión con acoplamientos dentados originales que transmitían la potencia desde ambos motores hasta el árbol piñón del reductor final por otros también con acoplamientos dentados del tipo Flexident, pero estos últimos diseñados por la Firma CMD Transmissions – Engrenages & Reducteurs.
- Se invirtió la catalina de la transmisión final cariada y desgastada por uno de los flancos para que trabajara por el flanco contrario. Esta operación se había realizado anteriormente en la Empresa en el año 1995 pero en el Molino No. 1.
- Se cambió el “trunium” de entrada del Molino por uno fabricado por la Firma KHD Humboldt Wedag AG.
- Se cambió también el “trunium” de salida.
- Se cambiaron 12 hiladas del Molino por “liners” con un nuevo diseño, suministrados por la Firma Magotteaux.
- Se cambió el blindaje de las paredes de entrada y de salida en el interior del molino por placas suministradas por la Firma Magotteaux.
- Cambio del Sello de Salida del Molino por una propuesta realizada por la Firma KHD Humboldt Wedag AG.
- Reparación de la Doble Péndulo de entrada del material al Molino.
- Reparación de los Reductores.

## INTRODUCCIÓN

- Cambio de los Motores Auxiliares.
- Rehabilitación de los cuatro sistemas hidráulicos de baja y alta presión de los dos Cojinetes Hidrostáticos de los puntos de apoyo del Molino.
- Rehabilitación de las Doble Péndulos de alimentación al Molino.

En el mes de noviembre del 2004 comienza a trabajar el molino después de concluida la rehabilitación. En esa ocasión se hicieron las correspondientes mediciones de vibraciones y los trabajos de ajuste recomendados por la Firma KHD Humboldt Wedag AG. Durante todo el mes de Noviembre y Diciembre se fueron haciendo mediciones y correcciones en el ajuste de los piñones de la transmisión final del Molino, hasta que comenzó a operar normalmente.

A finales del año 2005 se produjo la fractura de varios dientes del piñón del reductor final de la transmisión del Molino, lo que provocó la detención de esta línea con las consiguientes pérdidas económicas. La observación del aspecto externo de la fractura permitió definir que se trataba de una falla clásica de fatiga. (Birger J.A. et. al., 1986). Este piñón es solidario al árbol y es una pieza que pesa varias toneladas. Ante esta Situación Polémica la Dirección de la Empresa solicitó los Servicios del Colectivo de Mecánica Aplicada de la Universidad de Cienfuegos para esclarecer las causas de la falla y establecer las recomendaciones necesarias para su solución. Durante la investigación preliminar realizada se formuló la Hipótesis de que la causas fundamentales de la falla podían ser dos: 1. La presencia de cargas suplementarias sobre el árbol a causa de la presencia de los acoplamientos dentados que transmiten la carga del motor a este reductor. 2. Problemas de desalineación del piñón con relación a la catalina no totalmente resueltos durante el montaje y ajuste del molino.

Esas cargas suplementarias de los acoplamientos fueron precisamente la causa de la avería del árbol de ese propio piñón del Molino en el año 1997. En esa ocasión el grado de deterioro de los dientes del acoplamiento era tal que la carga se concentraba en unos pocos dientes provocando enormes fuerzas suplementarias sobre el árbol que en condiciones normales debían ser mucho más pequeñas.

El **Problema Científico** a resolver es que en la Fábrica de Cemento existen otros tres molinos de cemento de similar construcción, de aquí que el esclarecimiento de los parámetros de regulación para una operación eficiente y el conocimiento de las causas de todas las averías detectadas en los molinos puedan contribuir a evitar que deterioros similares pudieran presentarse en los restantes molinos de la fábrica, con el consiguiente ahorro de recursos y al mismo tiempo contribuir a que fallas similares no se produjeran en otras fábricas del país.

Con estos antecedentes se ha formulado la siguiente **Hipótesis**

Resulta posible, procesando la información existente en la literatura especializada, establecer metodologías de cálculo para la regulación de los molinos de crudo y de cemento con el objetivo de lograr una determinada capacidad de producción, un determinado nivel de molturación, contemplando además aspectos como potencia consumida, velocidad de giro, etc.

En la Investigación se emplearán los siguientes **Métodos Científicos**:

1. Método Hipotético – Deductivo al elaborar el Problema Científico y las posibles soluciones del mismo, la Hipótesis y los Objetivos General y Específicos para darle cumplimiento.
2. Método Analítico – Sintético, este es el Método Fundamental empleado en la Investigación: Mediante el análisis se evaluarán las expresiones para el cálculo de los distintos factores incidentes en la operación y regulación de los molinos de clinker y de cemento y mediante la síntesis se integrarán todos los efectos diferentes analizados, para obtener las metodologías de cálculo deseadas.
3. Métodos Matemáticos, se utilizarán Modelos Matemáticos simples para evaluar los distintos factores incidentes en la regulación de los molinos de crudo y de cemento con el objetivo de lograr una determinada capacidad de producción un determinado nivel de molturación, contemplando además aspectos como potencia consumida, velocidad de giro, etc.

La presente investigación tiene como **Objetivo General** el siguiente:

Establecer metodologías de cálculo para la determinación de los parámetros fundamentales de la explotación de los molinos de bolas con el objetivo de lograr una determinada capacidad de producción un determinado nivel de molturación, contemplando además aspectos como potencia consumida, velocidad de giro, etc.

### **Objetivos específicos.**

1. Investigar en la literatura las particularidades de diseño, construcción y explotación de los molinos de crudo y de cemento con vistas a poder establecer las ecuaciones para su cálculo y regulación.
2. Establecer las ecuaciones de cálculo de los parámetros para la regulación de molinos de bolas con el objetivo de lograr una determinada capacidad de producción un determinado nivel de molturación, contemplando además aspectos como potencia consumida, velocidad de giro, etc.

## Capítulo I: DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE CEMENTO

### *1.1 Breve historia del empleo del cemento como material de construcción.*

El uso de materiales de cementación es muy antiguo; los egipcios utilizaban yeso calcinado impuro, los griegos y los romanos empleaban al principio caliza calcinada que es un tipo de roca sedimentaria constituida principalmente por carbonato de calcio. Posteriormente, se hicieron mezclas de cal con agua, arena y piedra triturada o ladrillo y tejas quebradas; este fue el primer concreto de la historia (Cementos, 2013).

Los griegos empleaban la cal mezclándola con arena lo que los llevo a descubrir ciertas arenas de origen volcánico, molidas y mezcladas con la cal producían morteros (mezclas firmes y resistentes a las aguas dulces o marinas), para esto empleaban una piedra volcánica que llamaban tierra de Santorin en recuerdo a la isla en la cual fue descubierta. Cuando los romanos conquistaron a los griegos, estos últimos les transmitieron el conocimiento que tenían sobre los morteros. Los romanos edificaron estructuras que aún permanecen hasta nuestros días como muestra de la durabilidad de sus construcciones y de sus morteros: este pueblo descubrió una arena volcánica de color rojo en un lugar llamado Pazzoli, cerca del volcán Vesubio; dicha arena, que llamaron puzolana, contiene compuestos de silico-aluminatos que se combinan con la cal para formar un cementante que endurece bajo el agua, es decir, una cal hidratada.

Si la puzolana no estaba disponible o había que traerla de muy lejos, los romanos trituraban ladrillos y así proveían de sílice al mortero.

A principios de siglo XIX las investigaciones del ingeniero francés J.L Vicat y el constructor ingles J Aspdin conducen al descubrimiento de un cemento mejorado al que se llamo “Cemento Portland” porque se asemejaba a una piedra gris muy oscura que se encuentra en la isla de Portland, Inglaterra.

## CAPITULO I: DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE CEMENTO

El prototipo del cemento moderno fue obtenido en 1845 por Isaac Johnson quien quemó una mezcla de arcilla y caliza hasta lograr la formación de clinker con lo cual se produjo la reacción necesaria para la formación de un compuesto fuertemente cementoso.

La producción de cemento está relacionada directamente con el desarrollo de los países, ya que es uno de los materiales que en mayor o menor grado ha contribuido a conformar el perfil actual de las ciudades, vías de comunicación y los lugares donde vivimos y trabajamos. Este material no solo es impulsor de industrias como la de productos de cemento, sino también fuente de una demanda para los servicios y productos de otras industrias, como son las empresas de transporte, las suministradoras de combustible y energía eléctrica, las proveedoras de sacos para envasar cemento, las productoras de maquinaria y refacciones dentro y fuera del país.

Hoy en día el cemento es la cola o "conglomerante" más barato que se conoce. Mezclado adecuadamente con los áridos y el agua forma el hormigón, una roca amorfa artificial capaz de tomar las más variadas formas con unas prestaciones mecánicas a compresión muy importantes. Las resistencias a tracción pueden mejorarse con la utilización de armaduras (hormigón armado). El vocablo "clinker" da nombre al producto intermedio en la fabricación del cemento, principal componente de este último. Se trata del producto obtenido por calcinación a 1.500°C de una mezcla de caliza y arcilla. Este producto producía, al deslizarse por los hornos rotatorios, un ruido "clink, clink,..." del que toma el nombre onomatopéyico de "clinker". El cemento, constituye el elemento básico para el desarrollo de las construcciones en un país, según ha ido evolucionando el país también se ha aumentado la demanda de cemento. Es una producción industrial que en Cuba comenzó a desarrollarse a principios del siglo XX y en todo momento mostró un incremento, tanto su producción como su consumo, así como a medida que aumentaba la producción disminuían las importaciones y aumentaban las exportaciones.

### ***1.2 Materias Primas empleadas en la producción de cemento.***

Para la producción de cemento se requiere del empleo de las materias primas fundamentales (caliza, marga y arcilla y correctores), que dan origen al clínker y el uso posterior de aditivos (yeso y zeolita), las cuales al triturarse y molturarse con éste resultan en el producto final, cemento, el cual puede ser de varios tipos, según la resistencia a la compresión. Existiendo así, cemento de resistencia normal, media y cemento de alta resistencia. La caliza y la marga son los materiales que se utilizan en mayor cantidad y contienen un alto por ciento de Carbonato de Calcio, además Oxido de Alúmina, sílice, potasio, sodio. Para producir el cemento se necesita una composición química que los elementos de la marga y la caliza, por sí solos no poseen en la cuantía porcentual exigida, lo cual obliga a tener que introducir una materia prima adicional, la arcilla; que incorpora la alúmina, la sílice y el óxido férrico deficitarios en los primeros para el completamiento de dicha composición. La caliza es extraída por explosivos, transportada, triturada y almacenada. La marga también es extraída a voladura, posteriormente transportadas, trituradas, secadas, almacenadas y finalmente dosificadas. Los correctores se extraen con Buldozer (generalmente) y son transportados a la fábrica siguiendo el mismo curso que la marga.

### ***1.3 Traslado, Preparación y Almacenaje de las Materias Primas.***

La caliza, marga, el feldespato, la toba y el perdigón son transportados por camiones desde las canteras respectivas hasta la Planta de Trituración y Secador donde estas materias Primas se trituran en determinado grado y se secan para facilitar su transportación hasta la fábrica y disminuir el consumo de energía en todo el proceso productivo. Una vez seca la materia prima fina, se incorporan por medio de las bandas transportadoras existentes hacia el almacén de materia prima.

Dentro del nuevo concepto de operación, todos los materiales (caliza, caliza margosa, marga y perdigón) deberán ser secados y triturados en el área de la trituradora primaria existente, en operaciones intermitentes. Una criba de alta

## CAPITULO I: DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE CEMENTO

eficiencia se instalada como regla antes de la tolva de alimentación de la trituradora primaria para separar los finos (granulometría menor que 75 mm), que serán alimentados directamente al secador rotatorio ubicado en esta área. En la Figura 1.1 se muestra un plano completo de la Planta de Trituración del Empresa Cementos "Cienfuegos S.A." donde se pueden apreciar los camiones que trasladan y voltean las materias primas, el transportador alimentador el cual transporta estas materias primas hasta la Criba y de esta, los pedazos más grandes caen a lo que se conoce como el hueco donde un molino de martillos tritura los pedazos grandes de estas materias primas que no pasaron por los orificios de la criba vibratoria.(Goytisoló et. al.2006). El resto que si pasó por los orificios de la Criba, es transportado directamente al Horno Secador. La materia Prima triturada en esta Planta es transportada a través de transportadores soterrados hasta el Horno de Secador Rotatorio ubicado en la propia Planta de Trituración y Secado

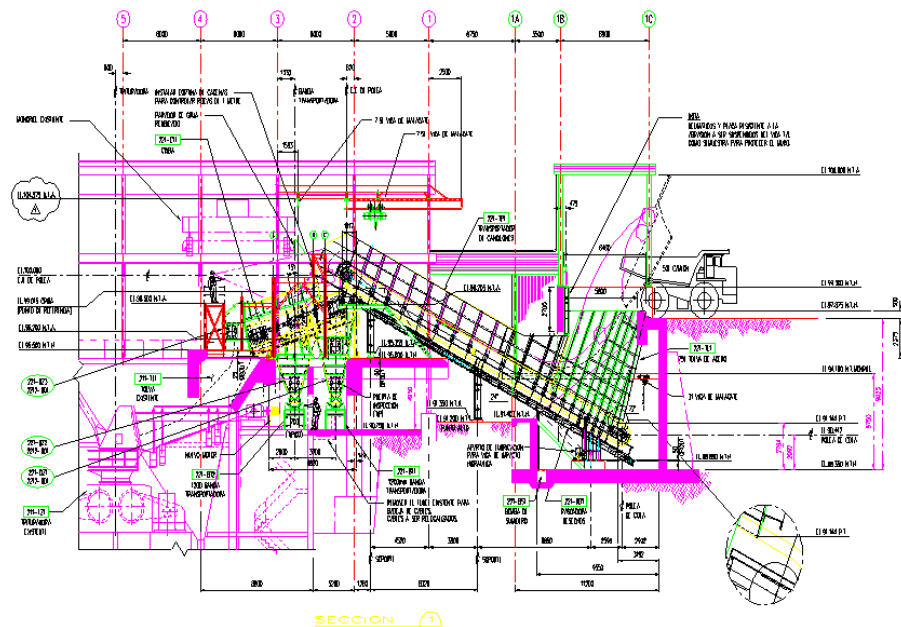


Figura 1.1 Plano de la Planta de Trituración de la Empresa "Cementos Cienfuegos" S.A. Fuente: Goytisoló et. al. 2006)



**Figura 1.2 Foto de la Planta Real de Trituración de la Empresa "Cementos Cienfuegos" S.A. Fuente: Goytisoló et. al. 2006)**

Las materias primas trituradas, son conducidas por bandas transportadoras hasta los seis silos de caliza (2 por línea). En el caso de la marga y el perdigón, toba y feldespató, son transportados inicialmente hasta la fábrica por medio de las bandas para caliza y conducidos a la nave para materiales secos por medio de la banda transportadora 291-BTA de 500 T/h. Una vez dispuestos en la nave de materia prima seca, la marga y el hierro son transportados por las bandas 311-BT1 – 311-BT6 hacia las tolvas de almacenaje intermedio para la dosificación de crudo. El desempolvado en el área de trituración se realiza mediante 2 separadores ciclónicos 291-VR1 y VR2, a la salida del secador se encuentra instalado el filtro de mangas 221-FT1 y en cada torre de transferencia de las bandas transportadoras hasta la fábrica se instalaron filtros de mangas con niveles de emisión máxima de  $20 \text{ mg/m}^3\text{N}$  de polvo. En la Figura 1.3 se muestra una Vista General de la Planta de Trituración y Secado.



**Figura 1.3 Vista General de la planta de Trituración y Secado. (Fuente: (Romero y Martínez, 2011))**



**a)**



**b)**

**Figura 1.4 Transportadores de Banda (a) que transportan la Materia Prima hasta los Silos de Almacenaje (b) de las Materias Primas. (Fuente: (Romero y Martínez, 2011))**

### ***1.4 Equipos fundamentales de la Planta de Trituración y secado y diagrama de flujo.***

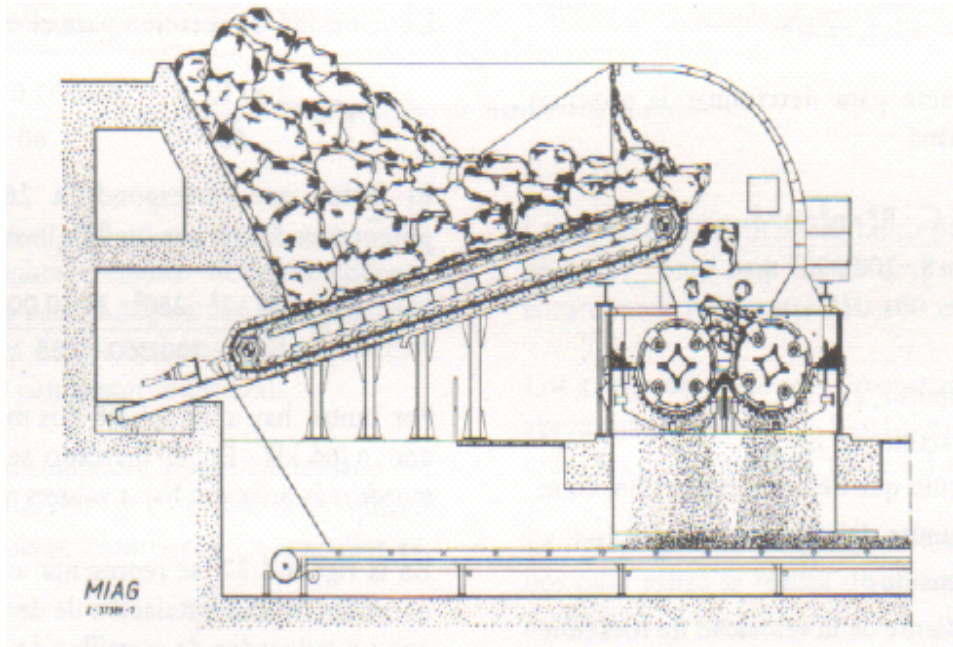
- **Equipos fundamentales**

Los equipos fundamentales de la Planta de Trituración y Secado son:

- Criba de alta eficiencia de 500 t/h
- Trituradora de martillos de doble rotor. Dimensiones: 2000 x 2000 mm, Capacidad: 600 T/h (Figura 1.5)
- Desempolvado: Batería de 2 ciclones en paralelo. Filtros de mangas.

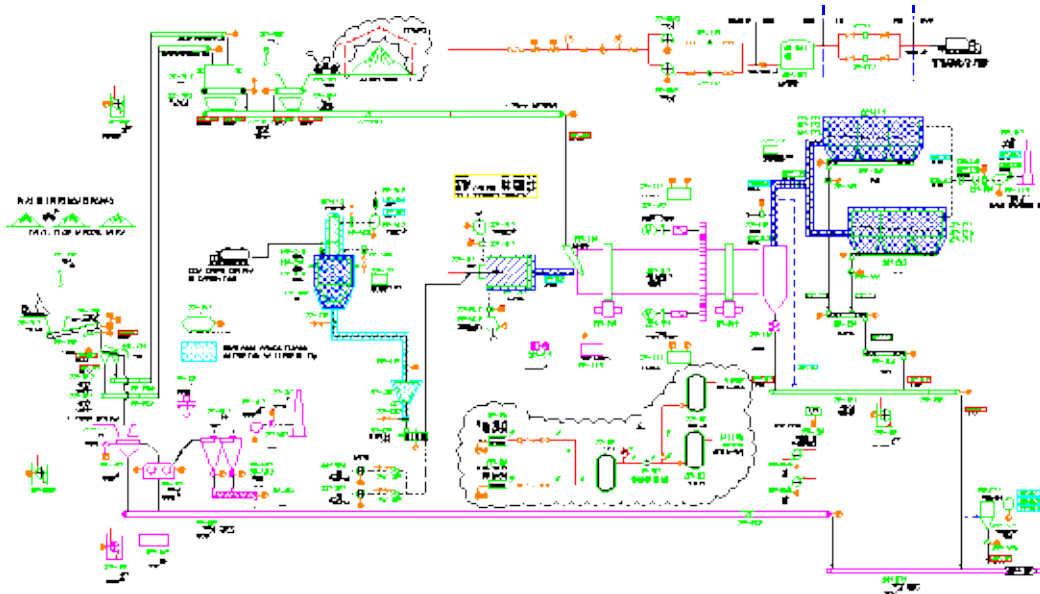
## CAPITULO I: DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE CEMENTO

- Nivel de emisión de polvo de los ciclones: 20 mg/m<sup>3</sup>N Flujo de aire para casa de bolsa del secador: 371 000 m<sup>3</sup>/h
- Nivel de emisión de polvo: 50 mg/m<sup>3</sup>N
- Secador de tambor rotatorio. Dimensiones: Diámetro: 5 m. Longitud: 34 m.
- Capacidad: Perdigón: 250 T/h, Marga: 300 T/h.



**Figura 1.5 Esquema de la Trituradora de Martillos de doble rotor similar a la de la Empresa "Cementos Cienfuegos S.A. (Fuente:(Romero y Martínez, 2011)**

En la Figura 1.6 se muestra el Diagrama de Flujo de la planta de Trituración y secado de Materias Primas, donde están ubicados estos equipos. (Romero y Martínez, 2011)



**Figura 1.6 Diagrama de flujo de la Planta de Trituración y Secado de materias primas. Fuente: (Romero y Martínez, 2011)**

### ***1.5 Dosificación y molienda de crudo.***

La caliza desde las instalaciones del secador se envía a los silos 293-3S2; 293-3S1 mediante las bandas transportadoras 291-BT7, 291-BT8 y 291-BT9. La marga, el perdigón y la zeolita se envían al almacén mediante las bandas 291-BT7, 291-BTA y 291-BTD. Mediante las bandas 311-BT1, 311-BT2, 311-BT3, 311-BT4, 311-BT65 y 311-BT6 se envía la marga y el perdigón a las tolvas 313-S1,S2; las que son dosificadas y conducidos juntos a la caliza hasta la estación de molienda de crudo (ver Plano P I.4.2.2-1)

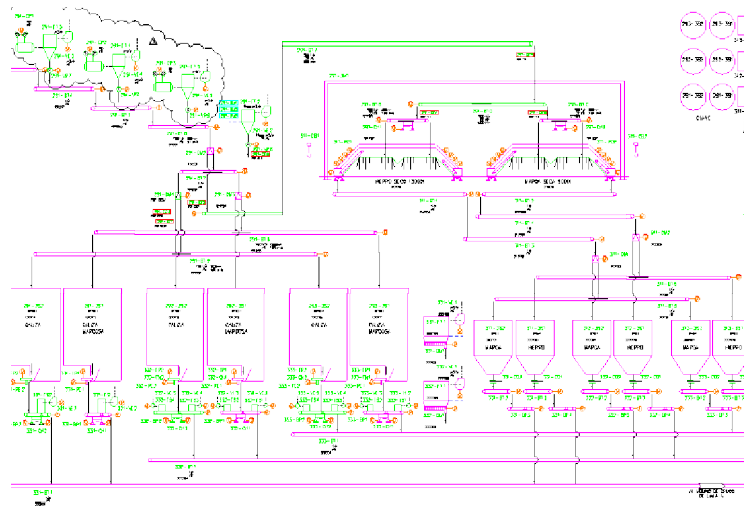
La materia prima dosificada, mediante la banda 333-BT13 se envía al triturador secador de impacto (333-TB1), el grueso pasa al molino y el polvo de arrastre para al separador 333-SP1, el grueso pasa al el molino de bolas (361-MB1) (Planos 11306-3014-003) y el fino pasa a la batería de ciclones 363-CI1; CI2, CI3, CI4, CI5, el materia separado pasa al sinfín 393-GU1 y el aire pasa a la torre estabilizadora 423-TA1 donde se enfría y se envía al electrofiltro 423-PE1, el material separado se incorpora mediante los sinfines 423-GU8 al elevador 423-TY5 de ahí en cascada al elevador 433-EC1, donde se envía mediante los sinfines

## CAPITULO I: DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE CEMENTO

433-AZ3 y 433-AZ4 a la salida del ciclón 433-Z13 situado en el precalentador 443-PR1 (ver Plano P I.4.2.2-2 ).(Romero y Martínez, 2011)

Posteriormente, por descarga neumática mediante gases calientes provenientes del horno el producto de la molienda, se conduce al sistema de separación (363-SP1), retornando el material grueso al molino y el de finura adecuada pasa a la batería de ciclones separadores 363-C17, C18, C19, CIA, CIB, CIC donde se separa la harina cruda como producto terminado, los gases de arrastre con polvo pasan a la torre estabilizadora siguiendo el mismo recorrido que el anterior. Por medio del elevador de cangilones 393-EC1 (ver Plano I.4.2.2-3) la harina cruda es transportada a los silos de mezcla u homogeneización 393-3S2, 3S1, que en su parte inferior son silos de almacenaje. A la entrada del elevador de cangilones se encuentra instalado el toma muestra automático 393-MU1 para la determinación de la composición química de la harina antes de los silos.

En la Figura 1,7 se muestra el Diagrama de Flujo de la dosificación de materias primas y en la Figura 1.8 el Diagrama de Flujo de la molienda de crudo.



**Figura 1.7 Diagrama de flujo de la dosificación de materias primas.(Fuente: (Romero y Martínez, 2011)**

# CAPITULO I: DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE CEMENTO

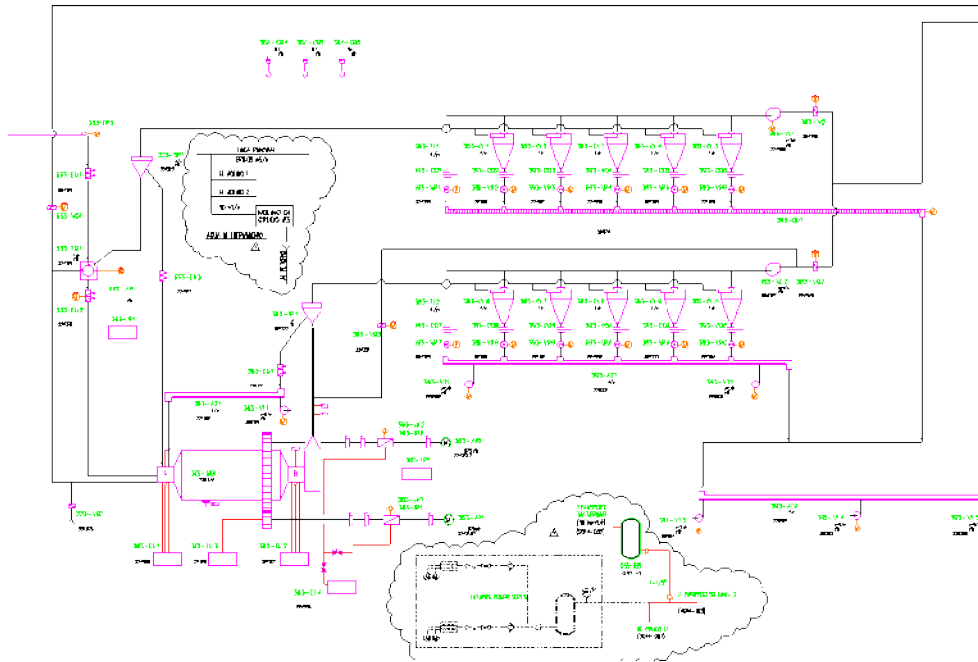


Figura 1.8 Diagrama de flujo del área de molienda de crudo. Fuente: (Romero y Martínez, 2011)

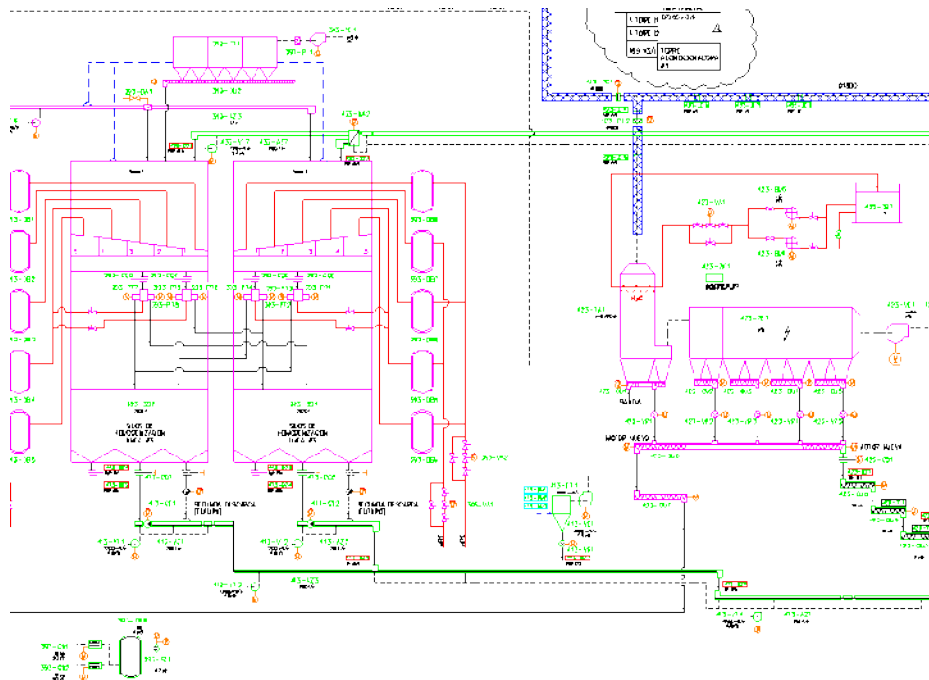


Figura 1.9 Diagrama de flujo del área de almacenamiento y homogenización. Fuente: (Romero y Martínez, 2011)

### ***1.6 La producción de Clinker.***

Combinados en unas determinadas proporciones, los óxidos de calcio, silicio, aluminio y hierro son llevados a un horno rotatorio, en el cual avanza en contracorriente con los gases producidos por la combustión de carbón, petcoke o combinación de ambos, y crudo cubano. El calor suministrado por los gases de combustión provoca la descarbonatación del Carbonato de Calcio, que así se descompone en CaO y CO<sub>2</sub>, la pérdida de agua de constitución de la arcilla que proporciona la alúmina y sílice, la fundición de óxidos de hierro y la elevación de temperaturas hasta los 1 700 °C aproximadamente. Alcanzadas estas condiciones los óxidos se combinan en distintas formas entre sí, con lo cual se obtiene el clinker, como producto fundamental a la salida del horno.

De los silos de almacenaje, los elevadores de cangilones 423-TY5 y 433-EC1 conducen la harina homogeneizada a la parte superior del precalcinador (Goytisoló et. al. 2009), donde comienza a ponerse en contacto con los gases calientes provenientes de la combustión (petcoke) en los ciclones 443-ZI1, ZI2, ZI3, y ZI4 y ZI5 terminando su cocción en el en el horno rotatorio 463-HR1 donde ocurre la clinkerización,

La fuente de calor del horno es el petcoke, durante el proceso normal y durante la arrancada se utiliza el diesel para el precalentamiento por un tiempo de 8 – 10 horas. El producto que sale del horno ya es clinker que debe ser enfriado por el enfriador de parrillas 473-EB1 que utiliza aire a temperatura ambiente y pasa por un intercambiador tipo radiador con ventiladores. .

La mezcla de aire caliente y polvo de clinker desde la cabeza del enfriador pasa al enfriador tubular 473-EA1 donde es enfriado hasta una temperatura inferior a los 70 °C, pasando posteriormente al filtro 473-FT1 donde se separa el clinker del aire incorporándose mediante el sinfín 493-GU9, y GUA al transportador de placa 493-TC1, (ver Plano I.2.2.3-2). Posteriormente el clinker es transportado por la cadena de arrastre y elevador de cangilones 493-EC1 a silos 493-3S2 y 493-3S1 y mediante la banda 493-TC2 al elevador de cangilones 492-EC1 a los silos 492-3S2 y 492-

# CAPITULO I: DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE CEMENTO

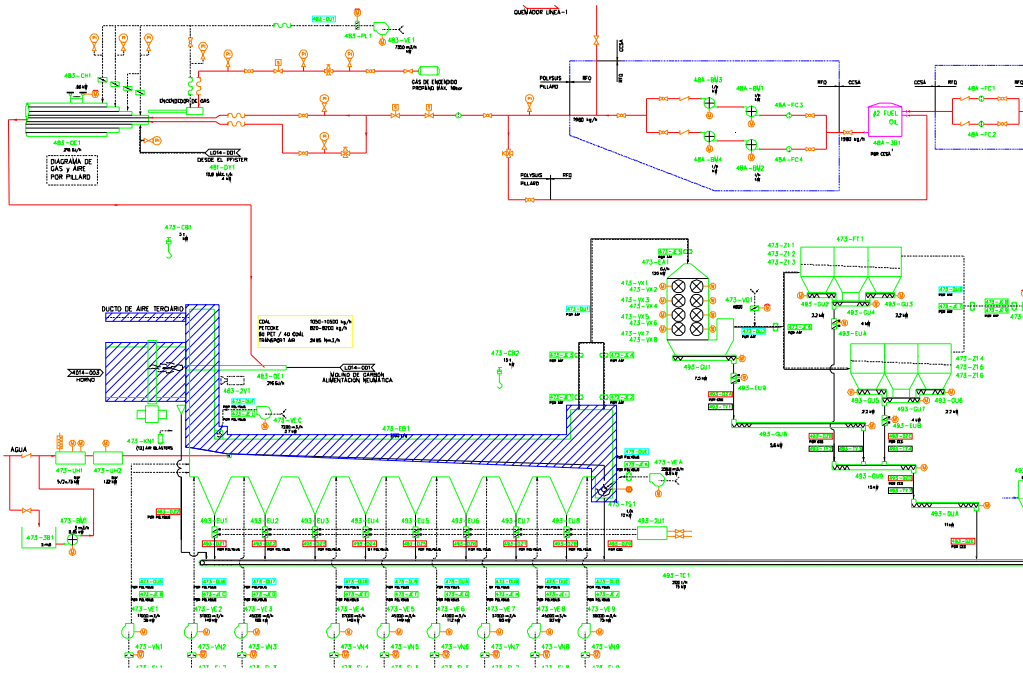


Figura 1.10 Diagrama de flujo del proceso de producción de clinker. Fuente: (Romero y Martínez, 2011)

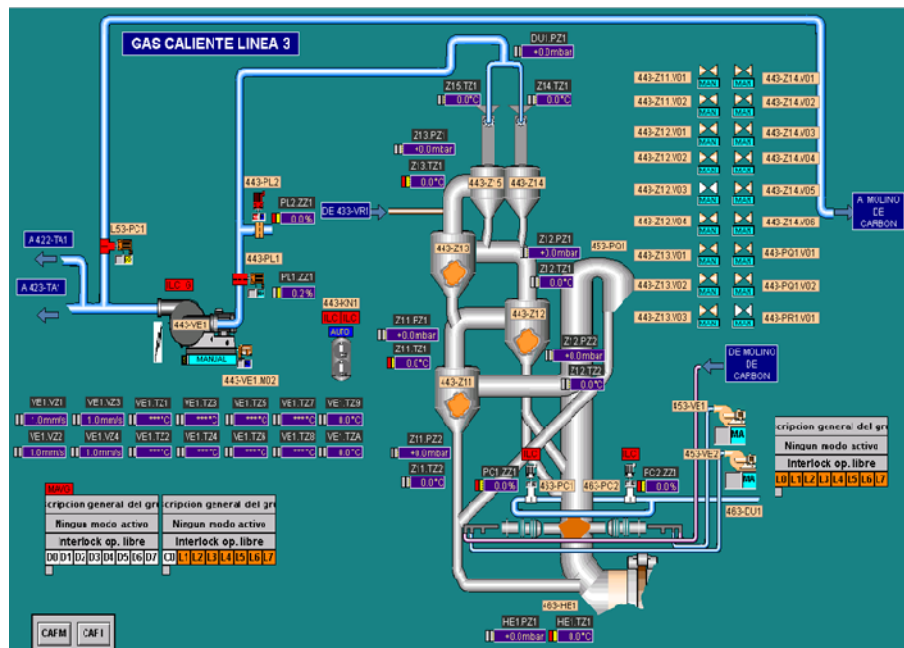


Figura 1.11 Diagrama de flujo del precalcinador de clinker. Fuente: (Goytisolo et. al. 2009)

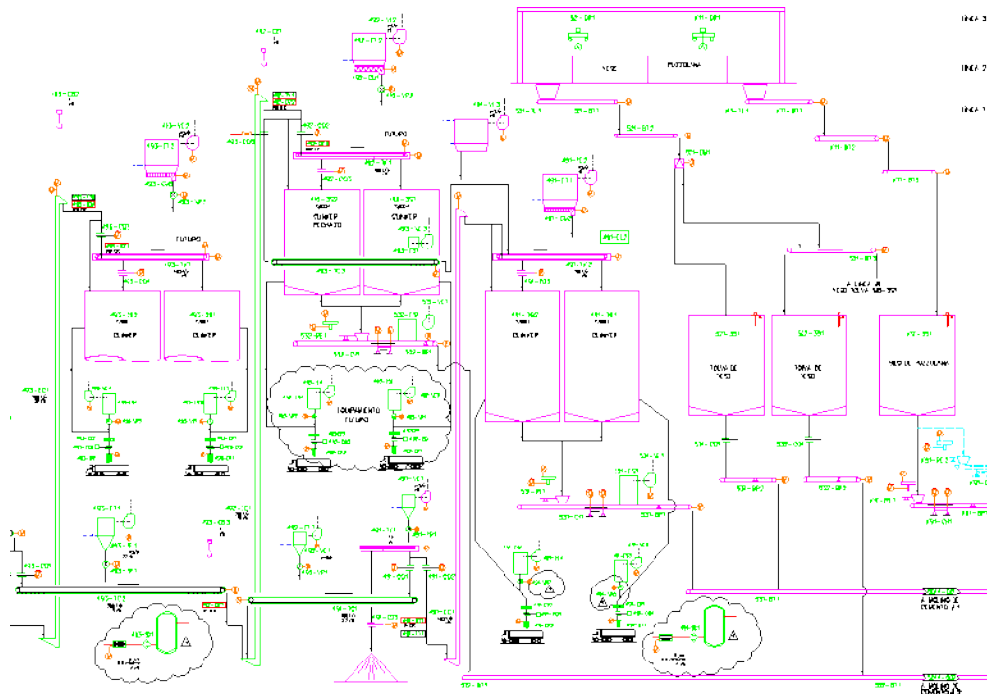


Figura 1.12 Diagrama de flujo del almacenamiento de clinker. Fuente: (Romero y Martínez, 2011)

### ***1.7 La producción de cemento.***

Al final del proceso, el clinker producido en el horno se muele y mezcla, normalmente en molinos de bola, junto con yeso. También es usual agregar otros componentes a la mezcla, tales como zeolita, cenizas, consideradas como adiciones activas, o calizas.

De los silos 492-3S2 y 492-3S1 el clinker se extrae mediante las desensiladora 531-RE1 (con sistema de desempolvado) a la banda 531-BT1 donde se dosifica

## CAPITULO I: DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE CEMENTO

los aditivos y se envía al los molino de cemento 561-MB1 junto con yeso para su molienda y la obtención de cemento Pórtland. A la salida del molino los gruesos son nuevamente enviados al molino mediante el elevador 661-EC1 y los finos pasan a los ciclones separadores 561-MC1, los finos son enviados mediante el sinfín 561-GU1 a las tolvas 591-3B1 y de ahí a los silos de cementos mediante las bandas 591-BT1 y BT2; la mezcla de gases y polvo generado en los ciclones pasan al electrofiltro 561-PE1 donde son finalmente separados enviándose los gases a la chimenea 561-3K1 y los finos se incorporan a las tolvas 591-BT1 y BT2.

El producto final transportado a silos de almacenaje es posteriormente despachado a granel o en bolsas para medios de transporte automotor o por ferrocarril. Para el llenado de bolsas se cuenta con 3 máquinas ensacadoras

### ***1.8 Sistemas de desempolvado fundamentales.***

- Electrofiltros: Sistema combinado de molino de crudo-horno y molinos de cemento.
- Filtros de mangas: Silos de homogeneización, transporte de harina, transporte de clinker (cadenas de arrastre y elevadores), transporte de cemento, carga de cemento a granel y en bolsas, dosificación de materias primas.
- Baterías de ciclones: Enfriadores de clinker.

### ***1.9 Sistemas auxiliares para la producción.***

- Planta de generación de vapor (caldera). Salió fuera de servicio al introducirse el carbón.
- Estación de compresores y sopladores para aire comprimido
- Planta de tratamiento de agua para uso industrial
- Sistema de recepción, almacenaje y trasiego de petróleo crudo nacional y fuel oil. Se pondrá fuera de servicio al introducirse el carbón más el petcoke.

### ***1.10 Tipos de Cemento.***

El clinker de cemento es en esencia un conglomerante formado a partir de una mezcla de caliza y arcilla calcinadas y posteriormente molidas, que tiene la propiedad de endurecerse al contacto con el agua. Hasta este punto la molienda entre estas rocas es llamada clinker, El cemento, por otro lado, es un conglomerante formado principalmente a partir de una mezcla de clinker y yeso, aunque también a esa mezcla se le puede adicionar diferentes aditivos siempre que su inclusión no afecte las propiedades del cemento, como por ejemplo la zeolita. En las fábricas se producen diferentes tipos de cemento. Mezclado con agregados pétreos (grava y arena) y agua, crea una mezcla uniforme, maleable y plástica que fragua y se endurece, adquiriendo consistencia pétreo, denominada hormigón (en España, parte de Suramérica y el Caribe hispano) o concreto (en México y parte de Suramérica). Su uso está muy generalizado en construcción e ingeniería civil.

Se pueden establecer dos tipos básicos de cementos:

1. De origen arcilloso: obtenidos a partir de arcilla y piedra caliza en proporción 1 a 4 aproximadamente;
2. De origen puzolánico: la puzolana del cemento puede ser de origen orgánico o volcánico.

Existen diversos tipos de cemento, diferentes por su composición, por sus propiedades de resistencia y durabilidad, y por lo tanto por sus destinos y usos. Desde el punto de vista químico se trata en general de una mezcla de silicatos y aluminatos de calcio, obtenidos a través del cocido de calcáreo, arcilla y arena. El material obtenido, molido muy finamente, una vez que se mezcla con agua se hidrata y solidifica progresivamente. Puesto que la composición química de los cementos es compleja, se utilizan terminologías específicas para definir las composiciones.

- **El cemento Portland**

El tipo de cemento más utilizado como aglomerante para la preparación del hormigón es el cemento Portland, producto que se obtiene por la pulverización del clinker portland con la adición de una o más formas de yeso (sulfato de calcio). Se

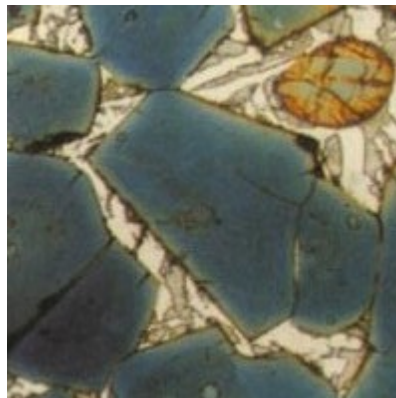
## CAPITULO I: DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE CEMENTO

admite la adición de otros productos siempre que su inclusión no afecte las propiedades del cemento resultante. Todos los productos adicionales deben ser pulverizados conjuntamente con el clinker. Cuando el cemento portland es mezclado con el agua, se obtiene un producto de características plásticas con propiedades adherentes que solidifica en algunas horas y endurece progresivamente durante un período de varias semanas hasta adquirir su resistencia característica. El proceso de solidificación se debe a un proceso químico llamado hidratación mineral.

Con el agregado de materiales particulares al cemento (calcáreo o cal) se obtiene el cemento plástico, que fragua más rápidamente y es más fácilmente trabajable. Este material es usado en particular para el revestimiento externo de edificios.

### Normativa

La calidad del cemento portland deberá estar de acuerdo con la norma ASTM C 150. En Europa debe estar de acuerdo con la norma EN 197-1. En España los cementos vienen regulados por la Instrucción para recepción de cementos RC-08, aprobada por el Real Decreto 956/2008 de 6 de junio. Los cementos portland especiales son los cementos que se obtienen de la misma forma que el portland, pero que tienen características diferentes a causa de variaciones en el porcentaje de los componentes que lo forman.



**Figura 1.13 Imagen al microscopio del cemento portland férrico.**

El portland férrico está caracterizado por un módulo de fundentes de 0,64. Esto significa que este cemento es muy rico en hierro. En efecto se obtiene

## CAPITULO I: DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE CEMENTO

introduciendo cenizas de pirita o minerales de hierro en polvo. Este tipo de composición comporta por lo tanto, además de una mayor presencia de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (óxido ferroso), una menor presencia de  $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$  cuya hidratación es la que desarrolla más calor. Por este motivo estos cementos son particularmente apropiados para ser utilizados en climas cálidos. Los mejores cementos férricos son los que tienen un módulo calcáreo bajo, en efecto estos contienen una menor cantidad de  $3\text{CaOSiO}_2$ , cuya hidratación produce la mayor cantidad de cal libre ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Puesto que la cal libre es el componente mayormente atacable por las aguas agresivas, estos cementos, conteniendo una menor cantidad, son más resistentes a las aguas agresivas que el plástico.

- **Cemento blanco.**

Contrariamente a los cementos férricos, los cementos blancos tienen un módulo de fundentes muy alto, aproximadamente 10. Estos contienen por lo tanto un porcentaje bajísimo de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . El color blanco es debido a la falta del hierro que le da una tonalidad grisácea al Portland normal y un gris más oscuro al cemento férrico. La reducción del  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  es compensada con el agregado de fluorita ( $\text{CaF}_2$ ) y de criolita ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ), necesarios en la fase de fabricación en el horno. Para bajar la calidad del tipo de cemento que hoy en día hay 4: que son tipo I 52,5, tipo II 52,5, tipo II 42,5 y tipo II 32,5; también llamado pavi) se le suele añadir una cantidad extra de caliza que se le llama clinkerita para rebajar el tipo, ya que normalmente el clinker molido con yeso sería tipo I

- **Cementos de mezclas**

Los cementos de mezclas se obtienen agregando al cemento Portland normal otros componentes como la puzolana. El agregado de estos componentes le da a estos cementos nuevas características que lo diferencian del Portland normal.

- **Cemento puzolánico.**

Se denomina puzolana a una fina ceniza volcánica que se extiende principalmente en la región del Lazio y la Campania, su nombre deriva de la localidad de Pozzuoli, en las proximidades de Nápoles, en las faldas del Vesubio. Posteriormente se ha generalizado a las cenizas volcánicas en otros lugares. Ya Vitruvio describía cuatro tipos de puzolana: negra, blanca, gris y roja.

## CAPITULO I: DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE CEMENTO

Mezclada con cal (en la relación de 2 a 1) se comporta como el cemento puzolánico, y permite la preparación de una buena mezcla en grado de fraguar incluso bajo agua.

Esta propiedad permite el empleo innovador del hormigón, como ya habían entendido los romanos: El antiguo puerto de Cosa (puerto) fue construido con puzolana mezclada con cal apenas antes de su uso y colada bajo agua, probablemente utilizando un tubo, para depositarla en el fondo sin que se diluya en el agua de mar. Los tres muelles son visibles todavía, con la parte sumergida en buenas condiciones después de 2100 años.

La puzolana es una piedra de naturaleza ácida, muy reactiva, al ser muy porosa y puede obtenerse a bajo precio. Un cemento puzolánico contiene aproximadamente:

- 55-70% de clinker Portland
- 30-45% de puzolana
- 2-4% de yeso

Puesto que la puzolana se combina con la cal ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), se tendrá una menor cantidad de esta última. Pero justamente porque la cal es el componente que es atacado por las aguas agresivas, el cemento puzolánico será más resistente al ataque de éstas. Por otro lado, como el  $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$  está presente solamente en el componente constituido por el clinker Portland, la colada de cemento puzolánico desarrollará un menor calor de reacción durante el fraguado. Este cemento es por lo tanto adecuado para ser usado en climas particularmente calurosos o para coladas de grandes dimensiones.

Se usa principalmente en elementos en las que se necesita alta impermeabilidad y durabilidad.

- **Cemento siderúrgico.**

La puzolana ha sido sustituida en muchos casos por la ceniza de carbón proveniente de las centrales termoeléctricas, escoria de fundiciones o residuos obtenidos calentando el cuarzo. Estos componentes son introducidos entre el 35 hasta el 80%. El porcentaje de estos materiales puede ser particularmente elevado, siendo que se origina a partir de silicatos, es un material potencialmente

## CAPITULO I: DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE CEMENTO

hidráulico. Ésta debe sin embargo ser activada en un ambiente alcalino, es decir en presencia de iones  $\text{OH}^-$ . Es por este motivo que debe estar presente por lo menos un 20% de cemento Portland normal. Por los mismos motivos que el cemento puzolánico, el cemento siderúrgico tiene mala resistencia a las aguas agresivas y desarrolla más calor durante el fraguado. Otra característica de estos cementos es su elevada alcalinidad natural, que lo rinde particularmente resistente a la corrosión atmosférica causada por los sulfatos.

Tiene alta resistencia química, de ácidos y sulfatos, y una alta temperatura al fraguar.

Cemento de fraguado rápido [editar · editar código]

El cemento de fraguado rápido, también conocido como "cemento romano ó prompt natural", se caracteriza por iniciar el fraguado a los pocos minutos de su preparación con agua. Se produce en forma similar al cemento Portland, pero con el horno a una temperatura menor (1.000 a 1.200 °C).<sup>1</sup> Es apropiado para trabajos menores, de fijaciones y reparaciones, no es apropiado para grandes obras porque no se dispondría del tiempo para efectuar una buena colada. Aunque se puede iniciar el fraguado controlado mediante retardantes naturales (E-330) como el ácido cítrico, pero aun así si inicia el fraguado aproximadamente a los 15 minutos (a 20 °C). La ventaja es que al pasar aproximadamente 180 minutos de iniciado del fraguado, se consigue una resistencia muy alta a la compresión (entre 8 a 10 MPa), por lo que se obtiene gran prestación para trabajos de intervención rápida y definitivos. Hay cementos rápidos que pasados 10 años, obtienen una resistencia a la compresión superior a la de algunos hormigones armados (mayor a 60 MPa).

- **Cemento aluminoso.**

El cemento aluminoso se produce principalmente a partir de la bauxita con impurezas de óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), óxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) y óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ). Adicionalmente se agrega óxido de calcio o bien carbonato de calcio. El cemento aluminoso también recibe el nombre de «cemento fundido», pues la temperatura del horno alcanza hasta los 1.600 °C, con lo que se alcanza la fusión

## CAPITULO I: DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE CEMENTO

de los componentes. El cemento fundido es colado en moldes para formar lingotes que serán enfriados y finalmente molidos para obtener el producto final.

El cemento aluminoso tiene la siguiente composición de óxidos:

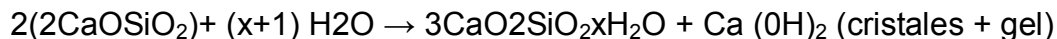
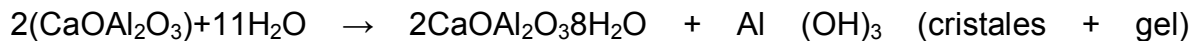
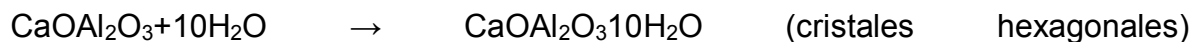
- 35-40% óxido de calcio
- 40-50% óxido de aluminio
- 5% óxido de silicio
- 5-10% óxido de hierro
- 1% óxido de titanio

Su composición completa es:

- 60-70%  $\text{CaOAl}_2\text{O}_3$
- 10-15%  $2\text{CaOSiO}_2$
- $4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$
- $2\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{SiO}_2$

Por lo que se refiere al óxido de silicio, su presencia como impureza tiene que ser menor al 6 %, porque el componente al que da origen, es decir el ( $2\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{SiO}_2$ ) tiene pocas propiedades hidrófilas (poca absorción de agua).

Reacciones de hidratación



Mientras el cemento Portland es un cemento de naturaleza básica, gracias a la presencia de cal  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , el cemento aluminoso es de naturaleza sustancialmente neutra. La presencia del hidróxido de aluminio  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , que en este caso se comporta como ácido, provocando la neutralización de los dos componentes y dando como resultado un cemento neutro.

El cemento aluminoso debe utilizarse en climas fríos, con temperaturas inferiores a los 30 °C. En efecto, si la temperatura fuera superior, la segunda reacción de

hidratación cambiaría y se tendría la formación de  $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (cristales cúbicos) y una mayor producción de  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , lo que llevaría a un aumento del volumen y podría causar fisuras.

### ***1.11 Propiedades generales del cemento.***

- Buena resistencia al ataque químico.
- Resistencia a temperaturas elevadas. Refractario.
- Resistencia inicial elevada que disminuye con el tiempo. Conversión interna.
- Se ha de evitar el uso de armaduras. Con el tiempo aumenta la porosidad.
- Uso apropiado para bajas temperaturas por ser muy exotérmico.
- Está prohibido el uso de cemento aluminoso en hormigón pretensado. La vida útil de las estructuras de hormigón armado es más corta.
- El fenómeno de conversión (aumento de la porosidad y caída de la resistencia) puede tardar en aparecer en condiciones de temperatura y humedad baja.

El proyectista debe considerar como valor de cálculo, no la resistencia máxima sino, el valor residual, después de la conversión, y no será mayor de 40 N/mm<sup>2</sup>. Se recomienda relaciones  $A/C \leq 0,4$ , alta cantidad de cemento y aumentar los recubrimientos (debido al pH más bajo).

Propiedades físicas del cemento de aluminato de calcio [editar · editar código]

- Fraguado: Normal 2-3 horas.
- Endurecimiento: muy rápido. En 6-7 horas tiene el 80% de la resistencia.
- Estabilidad de volumen: No expansivo.
- Calor de hidratación: muy exotérmico.

### ***1.12 Aplicaciones.***

El cemento de aluminato de calcio resulta muy adecuado para:

- Hormigón refractario.

## CAPITULO I: DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE CEMENTO

- Reparaciones rápidas de urgencia.
- Basamentos y bancadas de carácter temporal.

Cuando su uso sea justificable, se puede utilizar en:

- Obras y elementos prefabricados, de hormigón en masa u hormigón no estructural.
- Determinados casos de cimentaciones de hormigón en masa.
- Hormigón proyectado.

No resulta nada indicado para:

- Hormigón armado estructural.
- Hormigón en masa o armado de grandes volúmenes.(muy exotérmico)

Es prohibido para:

- Hormigón pretensado en todos los casos.

Usos comunes del cemento de aluminato de calcio.

- Alcantarillados.
- Zonas de vertidos industriales.
- Depuradoras.
- Terrenos sulfatados.
- Ambientes marinos.
- Como mortero de unión en construcciones refractarias.
- Carreteras

### ***1.13 Riesgos Medioambientales de la Producción de Cemento.***

Las emisiones liberadas a la atmósfera, son el principal riesgo de la industria cementera. Las emisiones más significativas, están asociadas al funcionamiento del horno utilizado para la fabricación de clínker. Los principales contaminantes generados son óxidos de nitrógeno (NO y NO<sub>2</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y partículas. Adicionalmente, se emiten también partículas al medio de forma difusa, durante las labores de extracción, transporte, manipulación y almacenamiento de materias primas.

## CAPITULO I: DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE CEMENTO

En los últimos años, se han comenzado a utilizar combustibles “alternativos” a los convencionales, como residuos con poder calorífico adecuado. En estos casos, pueden generarse emisiones de otros contaminantes como dioxinas, furanos, metales pesados, HF y HCl. (Soriano Baeza, 2010)

En las operaciones, que se pueden considerar, propiamente, como parte del proceso de fabricación de cemento, es posible distinguir los siguientes riesgos medioambientales:

- Emisiones de partículas, como consecuencia de las reacciones de transformación de las materias primas en el horno, y del funcionamiento de los enfriadores de clínker.
- Emisiones de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_2$  y  $\text{NO}$ ), asociadas a las altas temperaturas registradas en el horno. Éstos compuestos se generan a partir de la reacción con oxígeno, tanto del  $\text{N}_2$  del aire, como del presente en el combustible.
- Emisiones de  $\text{SO}_2$  generadas a partir del azufre que entra en el proceso formando parte de materias primas y combustibles. De ellas sólo un 30% de las aportadas por las materias primas será liberada a la atmósfera, mientras que el resto será retenido en el clínker gracias a las altas temperaturas y tiempo de residencia.
- Emisión de  $\text{CO}_2$  procedente de la descarbonatación de la caliza, y en menor medida, de la combustión. Pueden originarse asimismo, emisiones de  $\text{CO}$ , relacionadas con un alto contenido en materia orgánica, ó con una combustión incompleta.
- Emisión de  $\text{CO}_x$  durante las primeras fases de la combustión, debido a la volatilización de las materias primas al entrar en contacto con los gases calientes.
- Emisión de Hg y Tl, contenidos en materias primas o combustible, debido a su elevada volatilidad, que hace difícil su fijación al clínker.

## CAPITULO I: DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE CEMENTO

- Emisiones de dioxinas y furanos, aunque no es común, podrían originarse cuando los combustibles ó las materias primas poseen un alto contenido en materia orgánica, y se une a este hecho la presencia de cloro.
- Emisión de HCl y HF, asociada al uso de combustibles orgánicos. En el caso de tratamiento de residuos, el control de estos contaminantes junto con el de dioxinas, furanos y metales, garantiza el buen funcionamiento del horno.
- Emisiones de polvo y partículas como consecuencia de labores de molienda, manipulación y tratamiento de materias primas.
- Emisiones de partículas, generadas durante la eliminación de residuos inertes.
- Ruido asociado a labores de extracción de materias primas (perforaciones, voladuras, excavaciones).
- Ruido provocado por los molinos de materias primas y clínker, debido a la fricción de sólidos en su interior.
- Ruido provocado por las conducciones de gases y por los sistemas de enfriamiento de clínker (ventiladores).

En la Tabla 1.1 se muestra una evaluación de los riesgos medioambientales en la Producción de Cemento, calificados de 1 (mínimo riesgo) a 10 (máximo riesgo) (Ver anexo #2).

### ***1.14 Conclusiones Parciales del Capítulo I.***

1. Las instalaciones tecnológicas de Cementos Cienfuegos S.A. se encuentran ubicadas cerca de los yacimientos de las materias primas por lo que los costos de transportación por este concepto son mínimos.
2. Las cercanías a centros poblacionales y de interés económico han obligado a invertir cuantiosos recursos financieros en la instalación y mantenimiento de los sistemas de desempolvado y la disminución de los impactos ambientales negativos

## CAPITULO I: DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE CEMENTO

3. El proceso de producción del cemento de que se utiliza es de base seca, en la que se utiliza los últimos avances tecnológicos en el mundo, referido a la utilización de combustibles ecológicos con bajo contenido de azufre (petcoke) e instalaciones de alta eficiencia energética.
4. La producción del cemento es un proceso de producción continuo en el que se combinan los procesos físicos y químicos de manera eficiente para transformar las materias primas y combustibles en los productos finales de clinker y cemento.
5. El proceso de molienda de crudo recibió una atención especial en nuestra práctica ya que el mismo constituye un elemento crítico en el proceso general de la producción de clinker por cuanto es el encargado de producir la harina homogenizada con parámetros que garantizan el normal funcionamiento del proceso de clinkerización.
6. Variaciones tecnológicas en el proceso de molienda de crudo podrán traer consecuencias ambientales desfavorables en la emisión de CO<sub>2</sub> ya que será necesaria descarbonatar mayor cantidad de harina para producir la misma cantidad de clinker.
7. La quema de aceites usados en los hornos de cemento constituye la variante más adecuada de tratamiento de estos desechos peligrosos, que garantizan su destrucción total, minimizando las emisiones de gases nocivos. Al mismo tiempo contribuye al ahorro de portadores energéticos (combustibles fósiles) y a la disminución de los costos de producción.

## **Capítulo II: La trituración y la molienda en la producción de cemento.**

### ***2.1 La reducción del tamaño de las materias primas en la producción de cemento.***

La reducción de las materias primas a polvo fino, convencionalmente llamado harina, es un paso necesaria para conseguir una mezcla homogénea para que durante su cocción en el horno, sea capaz de convenirse rápidamente en clinker sin presencia de cal libre.

Generalmente, la reducción de tamaño de las materias primas se realiza, por lo menos, en dos etapas principales: reducción preliminar o trituración y reducción fina o molienda. En lo industria del cemento no es fácil establecer una distinción entre cada etapa de acuerdo con el tamaño de partícula del producto de la trituración. En la práctica el tamaño límite dependo del grado de reducción asequible por un triturador a un determinado rendimiento y en última instancia, del desarrollo tecnológico de las máquinas.

El término trituración, en su más común acepción, se refiere al proceso de reducción por oí cual un material se rompe hasta un tamaño de partícula conveniente para su admisión a la etapa siguiente, en este caso la molienda. La distinción establecida entre trituración y molienda no impide que, tanto en una como en ambas etapas, se puedan intercalar uno o varios escalones particulares. Hoy día, después del análisis de la posibilidad de reducir el número de máquinas empleadas, la trituración se entiende por la reducción del tamaño de los materiales de, aproximadamente, 50 mm a 20 mm. Dicho producto triturado se reduce en la etapa siguiente a un tamaño de partícula inferior a 0,2 mm, con lo cual reúne las condiciones propias do la harina cruda, siendo apta para la alimentación del horno.

## ***2.2 Conceptos y Definiciones.***

Antes de pasar a la descripción de los procedimientos actuales de trituración y molienda conviene formular algunas definiciones previas de conceptos asociados al tema.

- **Reducción en una sola etapa** es la operación por la cual el material se reduce a la finura deseada mediante la acción de una sola máquina la cual puede funcionar en circuito abierto o en circuito cerrado.
- **Reducción en etapas múltiples** es cuando se realiza por medio de dos o más máquinas, dispuestas en serie, constituyendo cada una de ellas una etapa en el proceso de reducción y pudiendo, asimismo, cada etapa funcionar en circuito abierto o cerrado.

En la reducción en circuito abierto, el material pasa una sola vez a través de la máquina, mientras que en la reducción en circuito cerrado el material de salida de la máquina se separa, mediante un tamiz o un clasificador (este último, generalmente es un separador de aire), en partículas finas y gruesas, regresando las últimas a la máquina para una posterior reducción. El Grado de reducción es un criterio frecuentemente adoptado para la apreciación del campo de aplicación de las máquinas trituradoras. Se define por la razón entre la mayor dimensión lineal del material de alimentación y la mayor dimensión lineal del producto triturado.

## ***2.3 Molienda de materias primas.***

Para lograr un crudo de composición química homogénea, es de gran importancia, que las materias primas que alimentan el molino se pesen y dosifiquen con la mayor exactitud posible. Esto es esencial para conseguir un buen funcionamiento del horno y para obtener un Clinker de alta calidad. La medición y dosificación es también un factor importante de cara a la eficiencia energética del sistema de molienda. El equipo más común de pesaje y dosificación usado en la alimentación de materias primas a los molinos consta de tolvas intermedias por producto, llenadas desde el parque de materias primas o por alimentación exterior, extracción de las tolvas con básculas dosificadoras y un alimentador de banda para introducir el material al molino.

## CAPITULO II: LA TRITURACIÓN Y LA MOLIENDA EN LA PRODUCCIÓN DE CEMENTO.

- **Molienda de materias primas en los sistemas de vía seca y semiseca.**

Las materias primas, en proporciones controladas, se muelen y se mezclan juntas para formar una mezcla homogénea con la composición química requerida. Para los sistemas de horno seco y semiseco, los componentes de las materias primas se muelen y se secan hasta lograr un polvo fino, haciendo uso principalmente de los gases calientes de salida del horno y/o del aire de salida del enfriador de clínker. Para las materias primas con alto contenido de humedad, y en los procesos de arranque, puede necesitarse un hogar auxiliar para proporcionar calor adicional.

Los sistemas más usuales de molienda en seco son:

- Molino de bolas con descarga central
- Molino de bolas, barrido por aire
- Molino vertical de rodillos
- Molino horizontal de rodillos (sólo hay unas pocas instalaciones hasta ahora).

Otros sistemas de molienda, menos frecuentemente empleados son:

- Molino de bolas con descarga final en circuito cerrado
- Molino en circuito abierto
- Prensa de rodillos, con o sin secador triturador.

La finura y la distribución granulométrica de las partículas de crudo que salen del sistema de molienda son de la mayor importancia para el subsiguiente proceso de calcinación. El patrón fijado para estos parámetros se alcanza mediante el ajuste del separador empleado para la clasificación del producto que sale del molino. En la molienda de vía seca, se emplean separadores de aire.

- **Molienda de materias primas, en los sistemas de vía húmeda o semihúmeda**

Los hornos de vía húmeda o semihúmeda emplean la molienda húmeda. Los componentes de las materias primas se muelen junto con agua añadida para formar una pasta. Para lograr la finura requerida de la pasta, que cumpla con las demandas de calidad, suelen utilizarse los sistemas de molienda en circuito

cerrado. La pasta que sale del proceso de molienda, requiere posteriormente una mezcla y homogeneización para lograr la óptima composición del crudo, antes de ser enviada al horno. La pasta se almacena en balsas, tanques o bien en silos.

### ***2.4 Secado y Molienda del Crudo.***

Según el proceso empleado, la molienda se realiza en seco o en húmedo. En el caso de la vía seca, la humedad del crudo impone limitaciones técnicas en la molienda y es por ello necesario un secado previo del crudo.

El secado necesita unos gases que pueden tener diversas procedencias. En los sistemas vía seca generalmente los gases de escape del horno realizan bien el secado,

en su totalidad, apoyados simplemente por los gases procedentes del hogar del horno..

No obstante, en algunas instalaciones que han sufrido una importante transformación en el tiempo, los gases del horno siguen expulsándose a la atmósfera, previo paso por electrofiltros y en otros directamente a la atmósfera y todo el calor necesario para el secado se genera en un hogar auxiliar.

La molienda del crudo se puede efectuar en varios escalones o en un molino único con varios compartimientos. La elección del sistema de molienda puede realizarse según los esquemas básicos:

- **Molienda en circuito abierto**, en el que el material que abandona el molino ya no retorna al mismo. El elevado consumo energético y su poca flexibilidad al tratar de variar la finura del producto hacen que tienda a abandonarse.
- **Molienda en circuito cerrado**, en el cual un sistema de separación establece dos flujos, uno de gruesos que retornan al molino y otro de finos que se incorporan al proceso principal.

En los procesos vía húmeda la molienda de la pasta, que por supuesto no requiere aporte adicional de calor, se realiza en molinos similares a los de vía seca. Para la molturación del material crudo se necesita entre un 20% y un 50% de la energía

## CAPITULO II: LA TRITURACIÓN Y LA MOLIENDA EN LA PRODUCCIÓN DE CEMENTO.

eléctrica total del proceso. Además en algunos procesos se requiere también energía térmica para el secado del material, alcanzándose en vía semiseca el 7% aproximadamente del consumo global. El acabado final se obtiene en un molino de bolas, normalmente dividido en varios compartimentos, destinándose el primero al secado y los restantes a moliendas de progresiva finura.

Cuando la molienda se realiza en más de una etapa, normalmente dos, el crudo es secado y triturado previamente en una machacadora que admite gases calientes, pasando posteriormente al molino de bolas donde se completa el secado y se alcanza la granulometría deseada. En algunas instalaciones la machacadora es sustituida por un secador «flash» que en su parte inferior lleva acoplado un molino de martillos para desmenuzar los tamaños gruesos.

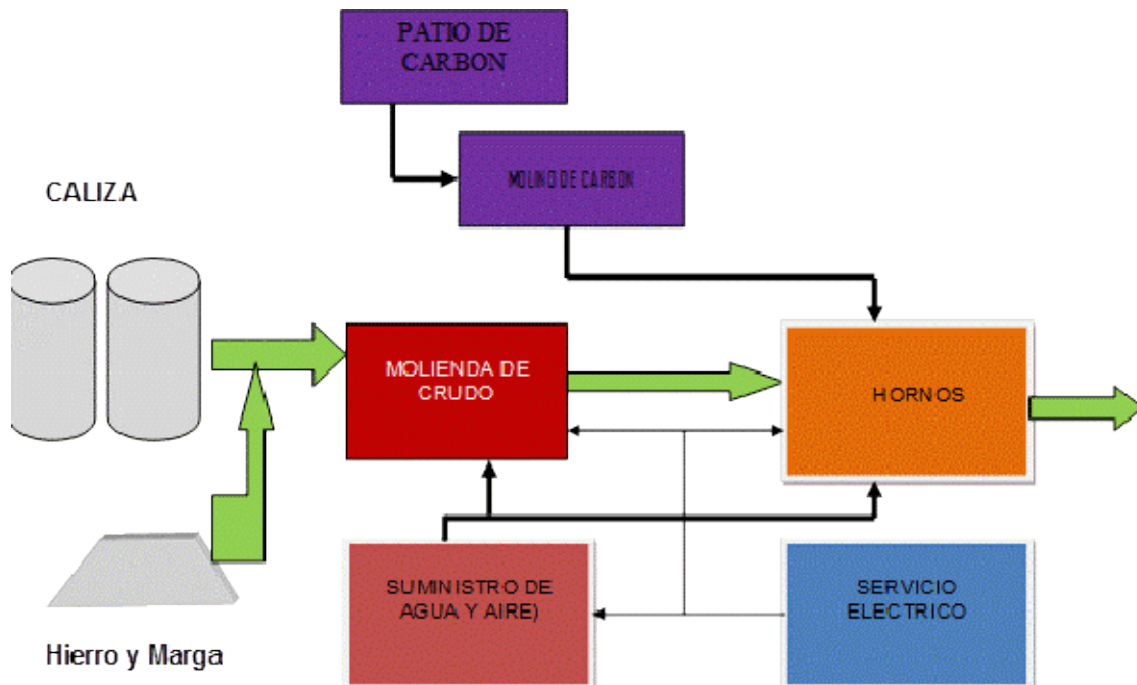
En el caso de utilizar gases de escape del horno en el secado, un balance de calor, teniendo en cuenta el volumen y temperatura de éstos, la humedad del crudo y el propio calor de fricción, permite deducir el volumen de gases necesarios.

Además de los consumos eléctricos y la posibilidad de utilizar gases de horno hay otros criterios importantes que definen el sistema de molienda a utilizar, como características del material, inversión, espacio, mantenimiento, por lo que es difícil tratar de generalizar unos criterios que permitan definir cuál es el sistema adecuado.

### ***2.5 Molienda del Clinker para la producción del cemento.***

En la Figura 2.1 se muestra el Proceso General de Producción del Clinker (Gálvez e. et. al. 2009) El Clinker es un producto previo para la producción del cemento que se produce en un proceso de alimentación de las materias primas, molienda en los molinos de crudo, pre calcinación, cocción en los hornos de clinker y posteriormente enfriado para su almacenamiento en silos.

## CAPITULO II: LA TRITURACIÓN Y LA MOLIENDA EN LA PRODUCCIÓN DE CEMENTO.



**Figura 2.1 Proceso General de Producción del Clinker. Fuente: (Gálvez E. et al. 2009)**

El Clinker a su salida del enfriador es enviado a los correspondientes silos, de donde es extraído y mezclado con el yeso y las restantes adiciones, en la calidad y proporciones adecuadas al cemento que se desea fabricar. La mezcla dosificada de componentes es molida hasta la granulometría necesaria. Usualmente, no son requeridos en esta fase del proceso aportes de energía térmica ya que el propio calor residual del Clinker y el desarrollo por fricción son suficientes para eliminar la humedad de las adiciones. Hay que destacar que el consumo eléctrico de la molienda es muy importante pudiendo llegar como media al 40% de la energía eléctrica suministrada a la Planta.

La molienda se puede efectuar, igual que el crudo, por:

- **Circuito abierto:** la premolienda y el refinado se efectúan en un solo molino, normalmente dividido en dos cámaras, estando la última dotada de un clasificador de bolas. Las dificultades de este sistema son, la disipación del calor latente del Clinker y de molturación, lo que requiere una fuerte

## CAPITULO II: LA TRITURACIÓN Y LA MOLIENDA EN LA PRODUCCIÓN DE CEMENTO.

ventilación del molino e incluso la inyección de agua, y la dificultad del cambio rápido a otras finuras distintas a la prefijada.

- **Circuito cerrado:** la instalación va dotada de un separador, siendo la disposición del conjunto similar a la de molienda de crudo. El separador hace posible la regulación de finura dentro de ciertos límites. Los molinos suelen ser de dos cámaras: al igual que en el caso anterior es necesario eliminar una gran cantidad de calor, aunque aquí se vea favorecido este hecho por la posibilidad de utilizar mayores caudales de aire, pero puede seguir siendo necesaria una inyección de agua. Normalmente se emplea el circuito cerrado puro, no el doble rotatorio ya que no se observan ventajas apreciables en el segundo sistema y tiene en contra un mayor costo de instalación.

Salvo en lo referente al aprovechamiento de los gases no existen diferencias esenciales entre los sistemas de molturación del crudo y del Clinker. Aquí está más acentuada la utilización de molienda en circuito cerrado, por las mayores exigencias de la granulometría del cemento.

En la industria de cemento, los procesos de molienda presentan un elevado ahorro potencial, habiéndose resistido no obstante su regulación a las metodologías de control tradicionales. Alrededor del 75% del total de la energía eléctrica invertida en la producción del cemento corresponde a la molienda de las materias primas y del cemento.

Los molinos de volteo son máquinas de elevado consumo y muy bajo rendimiento. Solamente una cantidad inferior a la décima parte de la energía eléctrica suministrada es empleada propiamente en el desmenuzamiento de los materiales. En consecuencia más del 90% de la energía consumida se derrocha durante este proceso y es disipada básicamente en forma de calor, ruido o vibración. La fase final del ensacado no ofrece mayor interés respecto al consumo energético.

### ***2.6 La molienda en molinos de bolas y de barras dentro del proceso de producción de cemento.***

En la referencia (Duda, 1977) se trata con profundidad todo el proceso de producción de cemento y en particular lo referente a la molienda de crudo y de cemento. Se plantea por ejemplo que: casi el 85% del total de la energía invertida en la producción de cemento, corresponde al desmenuzamiento y a la molienda de las materias primas y del cemento; aproximadamente el 75% sólo a la molienda. El nivel del grado de eficiencia de la molienda es objeto de controversia, según la definición que se adopte. De acuerdo con interpretaciones muy diversas, la energía que el molino requiere para transformarla en trabajo de desmenuzamiento queda situada entre el 2% y el 20%; el resto se distribuye en rozamiento de las partículas entre sí, rozamiento de las partículas con las paredes del molino, ruido, calor, vibraciones, pérdidas en el motor y en la transmisión y en el propio molino, por ejemplo energía para la elevación del material en el molino, etc. (Campos J.C. 2006)

El grado de utilización de la energía suministrada, teóricamente, ofrece más interés en el proyecto de diseño de los dispositivos de molienda, que para la explotación práctica, en la cual la energía aplicada a la molienda se puede considerar baja en relación con las ventajas del resultado tecnológico que con ella se obtiene.

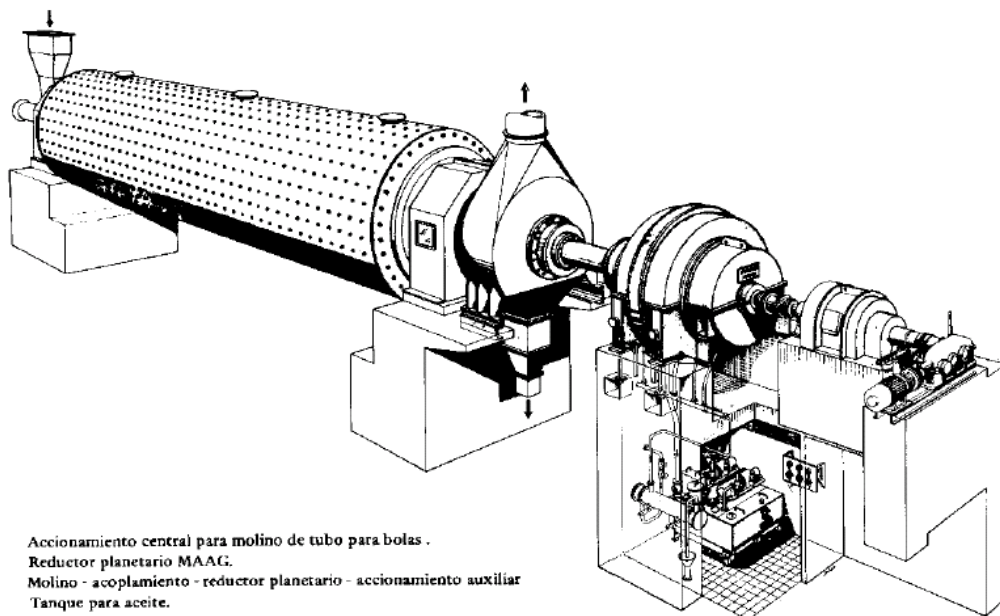
Los molinos de bolas y los molinos de barras se diferencian por la relación de la longitud del cilindro a su diámetro. En los molinos de barras la relación de longitud a diámetro es de 3:1 hasta 6:1; en los molinos de bolas es menor, un poco mayor que 2:1.

Los molinos de bolas y de barras son cilindros de acero, rotatorios, en donde se realiza el desmenuzamiento del material por el movimiento de los cuerpos moledores. Por el giro del cilindro del molino, el mantón formado por los elementos moledores y el material se eleva hasta una altura óptima para su acción molturadora. La molienda se realiza por choque y rozamiento entre los cuerpos moledores y las paredes blindadas del molino.

### ***2.7 Estructura de los molinos de bolas y de barras en la producción de cemento.***

Los molinos de bolas o de barras pueden ser de simple accionamiento central o de doble accionamiento periférico o bifurcado.

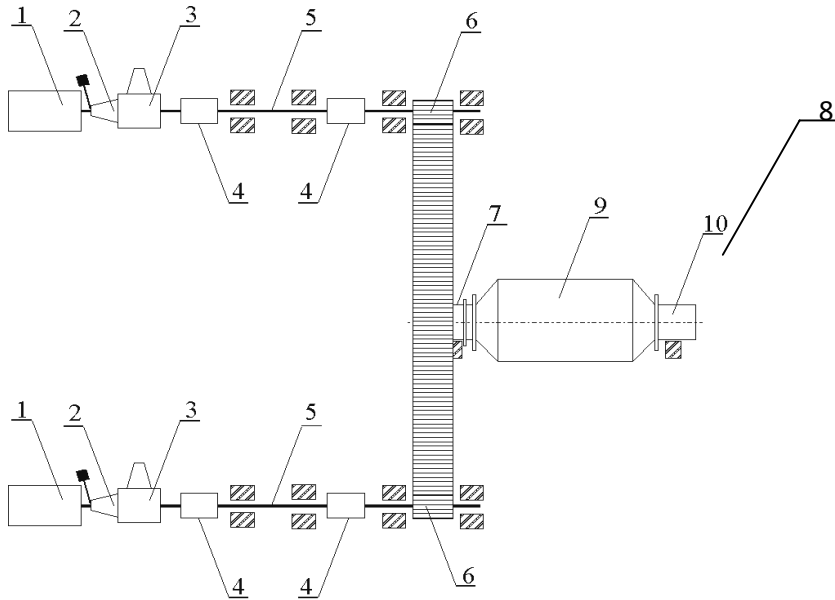
Los primeros son más simples pero la capacidad de transmisión de carga es menor dada la estructura de la transmisión. En la Figura 2.2 se muestra un molino de accionamiento central. En la Figura se pueden apreciar los pernos que sujetan las placas interiores de blindaje en toda la periferia del tubo.



**Figura 2.2 Molino de bolas con accionamiento central. Fuente: (Mc Cabe W.L. et al. 1998)**

Para equilibrar las cargas en la transmisión del molino al tambor se utilizan con más frecuencia los molinos con doble accionamiento periférico. En la Figura 2.3 se muestra el esquema de uno de estos molinos empleados en la molienda de crudo en la Empresa de Cemento “Karl Marx” de Cienfuegos.

## CAPITULO II: LA TRITURACIÓN Y LA MOLIENDA EN LA PRODUCCIÓN DE CEMENTO.



**Figura 2.3** Partes componentes del molino de crudo original con esquema de doble accionamiento periférico. Fuente: (Goytisolo et. al. 1997)

1 - Motores eléctricos, 2 - Embragues, 3 - Reductores planetarios, 4 - Acoplamientos dentados, 5 - Árboles de transmisión, 6 - Piñones del reductor final, 7 - Trunium de salida, 8 - Catalina, 9 - Tambor del molino, 10 - Trunium de entrada.

### ***2.8 La fabricación de cemento en la ciudad de Cienfuegos y comportamiento de los molinos de bolas.***

En el mes de Junio de 1975, se confeccionó el expediente de Tarea de Inversión para la Fábrica de Cemento de Cienfuegos, donde se planteó la localización del lugar destinado para la construcción de las instalaciones, la red de comunicación vial necesaria a construir, las fuentes de abasto de agua y las soluciones necesarias a gestionar para la fábrica. También fueron analizados los indicadores tales como los requerimientos de abastecimiento de materias primas y factores socio - económicos para la ejecución y puesta en marcha de la industria.

El 8 de marzo de 1980 comienza la explotación del primero de los tres hornos de la Fábrica de Cemento de Cienfuegos, lo cual permitió un aumento considerable en la producción nacional de este renglón. La Fábrica de Cementos "Karl Marx", fue inaugurada por el Comandante en Jefe Fidel Castro Ruz y el presidente de la RDA "Eric Honeker". La Fábrica la conformaban tres líneas paralelas de

## CAPITULO II: LA TRITURACIÓN Y LA MOLIENDA EN LA PRODUCCIÓN DE CEMENTO.

producción con una capacidad instalada de 1 500 000 ton/año de clinker (tres Hornos rotatorios de 500 000 ton/año de clinker), con tecnología de producción de vía seca que se mantiene hasta hoy.

Los Molinos de Crudo y de Cemento de las tres líneas de producción de la Fábrica de Cemento "Karl Marx" de Cienfuegos fueron fabricados en la antigua RDA por la firma VEB ZAB DESSAU VEB STEK MAGDEBURG en el año 1976. Se montaron en la línea en los años 1979 a 1980 con fecha de puesta en marcha de la Planta 16 de febrero de 1980. Estos equipos están destinados para la molturación de materiales tales como: caliza, marga y arcilla requeridos en la producción de cemento y constan de un cuerpo o tambor cilíndrico con revestimiento interior de placas de blindaje que constituyen la cámara de molturación, dos grupos de apoyo integrados por los "trunium" de entrada y de salida y sus respectivos cojinetes de deslizamiento con tejas de fricción de 180° y sus pedestales y por el sistema de accionamiento del tipo doble accionamiento periférico compuesto por los respectivos motores eléctricos, reductores planetarios, arboles de transmisión y el reductor final cilíndrico de dientes rectos bifurcado. Constan además de dos estaciones de lubricación para los puntos de apoyos, una para los reductores planetarios del accionamiento y otra para el reductor final de la transmisión. En la Figura 1.8 se muestra un esquema de los Molinos de Crudo de la Empresa de cemento "Karl Marx" con doble accionamiento periférico.

En el mes de Febrero del año 1986 se produjo la primera avería en el molino No. 1 al producirse la fractura de un grupo de tornillos de la brida de acoplamiento trunium de salida-tambor. En esa ocasión se procedió al restablecimiento de los tornillos averiados y al cambio de la teja de fricción de esta chumacera.

Durante la segunda mitad del año 1986 y principios del 1987 el molino trabajó al 50% de su capacidad producto de la falla del reductor planetario del accionamiento izquierdo y la no existencia en la fábrica de repuesto para el mismo, manteniéndose el molino funcionando con el accionamiento derecho.

Con el restablecimiento de los dos accionamientos, el molino continuó operando a su capacidad nominal hasta el mes de mayo del año 1991 en que motivado por las

## CAPITULO II: LA TRITURACIÓN Y LA MOLIENDA EN LA PRODUCCIÓN DE CEMENTO.

condiciones del Período Especial en Cuba fue detenida la producción de la línea hasta finales del año 1995 en que se decidió la puesta en marcha de la misma para poder satisfacer los compromisos de la fábrica de producir en el año 1996, 300 000 toneladas de cemento adicionales con relación a la producción del año 1995.

A finales de 1995 y durante el proceso de puesta en marcha de la línea N° 1 se produjo la falla del cojinete de apoyo correspondiente al trunium de salida del molino de crudo por arrastre y desprendimiento del recubrimiento de fricción de la superficie del metal del cojinete. Durante el restablecimiento del cojinete se detectaron un conjunto de grietas en la superficie de deslizamiento del mismo cuyo origen se desconocía y que fueron las causantes del arrastre del metal.

En el proceso de inspección del molino en su conjunto se detectó una desalineación entre los apoyos del mismo y una deformación plástica del eje geométrico del tambor, elementos estos cuyo origen también se desconocía pero que podían haber influido en la aparición de las grietas del "trunium".

Se cuestionaba si el prolongado período de parada del molino, en el cual gran parte de este tiempo el mismo se mantuvo con la carga de bolas en su interior, podía haber determinado algún proceso que diera origen a las grietas detectadas.

Durante la investigación se descubrieron otros deterioros que podrían aportar elementos acerca de la falla del trunium como son: desgaste de la superficie del encaje y de la pestaña de centraje de la brida de unión trunium de salida-tambor, aplastamiento de la superficie de los orificios de los pines radiales de la brida, desgaste o aplastamiento de la superficie de asiento de un grupo de tuercas de los tornillos de la brida. (Goytisoló, 1997)

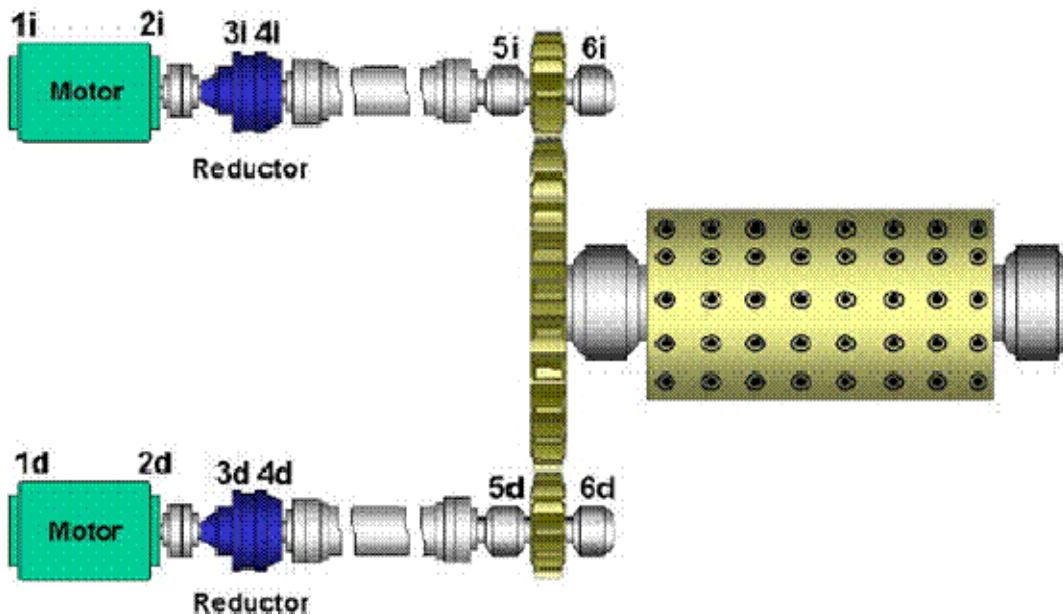
La actual Empresa Mixta "Cementos Cienfuegos S.A." surgió a partir de la antigua Fábrica de Cementos "Karl Marx" sobre la base de negociaciones que se iniciaron en el año 2000 con la parte extranjera y a mediados del año 2001 se inició la inversión consistente en una rehabilitación general de la antigua Empresa de Cementos "Karl Marx" y el montaje de equipamiento prácticamente nuevo en la Línea No. 3. Estas inversiones abarcaron también la rehabilitación de la Línea No. 2. Los objetivos de la rehabilitación de los Molinos de Crudo eran por un lado

## CAPITULO II: LA TRITURACIÓN Y LA MOLIENDA EN LA PRODUCCIÓN DE CEMENTO.

elevar la eficiencia de los mismos y por otro elevar su confiabilidad. Este Trabajo fue realizado por varias Empresas Contratistas, la Empresa Geominera Pinar fue la que ejecutó el mayor por ciento de los trabajos de rehabilitación del Molino. Las comprobaciones, rectificaciones y ajuste del "trunium" de salida los ejecutó la Empresa GECA Cienfuegos Cementos Cienfuegos S.A.

Durante la rehabilitación se ejecutaron los siguientes trabajos técnicos:

- Cambio de los árboles de transmisión con acoplamientos dentados originales que transmitían la potencia desde ambos motores hasta el árbol piñón del reductor final por otros también con acoplamientos dentados del tipo Flexident, pero estos últimos diseñados por la Firma CMD Transmissions – Engrenages & Reducteurs.
- Se invirtió la catalina de la transmisión final cariada y desgastada por uno de los flancos para que trabajara por el flanco contrario. Esta operación se había realizado anteriormente en la Empresa en el año 1995 pero en el Molino No. 1.
- Se cambió el "trunium" de entrada del Molino por uno fabricado por la Firma KHD Humboldt Wedag AG.
- Se cambió también el "trunium" de salida.
- Se cambiaron 12 hiladas del Molino por "liners" con un nuevo diseño, suministrados por la Firma Magotteaux.
- Se cambió el blindaje de las paredes de entrada y de salida en el interior del molino por placas suministradas por la Firma Magotteaux.
- Cambio del Sello de Salida del Molino por una propuesta realizada por la Firma KHD Humboldt Wedag AG.
- Reparación de la Doble Péndulo de entrada del material al Molino.
- Reparación de los Reductores.
- Cambio de los Motores Auxiliares.
- Rehabilitación de los cuatro sistemas hidráulicos de baja y alta presión de los dos Cojinetes Hidrostáticos de los puntos de apoyo del Molino.
- Rehabilitación de las Doble Péndulos de alimentación al Molino.



**Figura 2.4** Partes componentes de la transmisión del molino de crudo y ubicación de los piñones después de la rehabilitación realizada por la Empresa Mixta.

1. Motores eléctricos, 2 - Embragues, 3 - Reductores, 4 - Árboles de transmisión, 5 y 6 – Puntos de apoyo de los árboles –piñones del reductor final. Fuente: (Goytisoló et. al. 2009)

En el mes de noviembre del 2004 comienza a trabajar el molino después de concluida la rehabilitación. En esa ocasión se hicieron las correspondientes mediciones de vibraciones y los trabajos de ajuste recomendados por la Firma KHD Humboldt Wedag AG. Durante todo el mes de Noviembre y Diciembre se fueron haciendo mediciones y correcciones en el ajuste de los piñones de la transmisión final del Molino, hasta que comenzó a operar normalmente.

A finales del año 2005 se produjo la fractura de varios dientes del piñón del reductor final de la transmisión del Molino, lo que provocó la detención de esta línea con las consiguientes pérdidas económicas. La observación del aspecto externo de la fractura permitió definir que se trataba de una falla clásica de fatiga. Este piñón es solidario al árbol y es una pieza que pesa varias toneladas. Ante esta Situación Polémica la Dirección de la Empresa solicitó los Servicios del

## CAPITULO II: LA TRITURACIÓN Y LA MOLIENDA EN LA PRODUCCIÓN DE CEMENTO.

Colectivo de Investigación en Mecánica Aplicada de la Universidad de Cienfuegos para esclarecer las causas de la falla y establecer las recomendaciones necesarias para su solución. Durante la investigación preliminar realizada se formuló la Hipótesis de que la causas fundamentales de la falla podían ser dos:

1. La presencia de cargas suplementarias sobre el árbol a causa de la presencia de los acoplamientos dentados que transmiten la carga del motor a este reductor.
2. Problemas de desalineación del piñón con relación a la catalina no totalmente resueltos durante el montaje y ajuste del molino.

Esas cargas suplementarias de los acoplamientos fueron precisamente la causa de la avería del árbol de ese propio piñón del Molino en el año 1997. En esa ocasión el grado de deterioro de los dientes del acoplamiento era tal que la carga se concentraba en unos pocos dientes provocando enormes fuerzas suplementarias sobre el árbol que en condiciones normales debían ser mucho más pequeñas.

El comportamiento productivo de la Fábrica ha ido en ascenso. El año 2007 cerró con una producción superior al Millón de toneladas de clinker y se implantaron nuevos record históricos de producción para un mes. En el año 2009 se alcanzó la mayor producción registrada desde su reestructuración llegando al millón ciento seis mil toneladas de clinker.

### ***2.9 Conclusiones Parciales del Capítulo II.***

1. Para la trituración de las materias primas, el Clinker y el cemento se utilizan fundamentalmente molinos de bolas, aunque existen otras alternativas de molienda menos utilizadas.
2. Existen dos tipos básicos de accionamiento de los Molinos de Bolas: El accionamiento Central y el Doble Accionamiento Periférico o Bifurcado. Este último es mucha más eficiente pues compensa las cargas sobre el árbol del molino y reduce las pérdidas por fricción.
3. Los Molinos de Bolas de la Empresa "Cementos Cienfuegos S.A." han presentado serios Problemas desde su puesta en marcha, en ocasiones por

## **CAPITULO II: LA TRITURACIÓN Y LA MOLIENDA EN LA PRODUCCIÓN DE CEMENTO.**

errores de diseño, con más frecuencia por errores de mantenimiento (Operación con excesivo desgaste) o incorrecta operación por problemas de averías o desalineaciones excesivas. De aquí la necesidad de conocer los parámetros idóneos para una operación eficiente de los Molinos.

## **Capítulo III: CÁLCULO O SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS FUNDAMENTALES PARA LA EXPLOTACIÓN EFICIENTE DE LOS MOLINOS DE BOLAS**

### ***3.1 Parámetros importantes en la eficiencia de la molienda en molinos de bolas.***

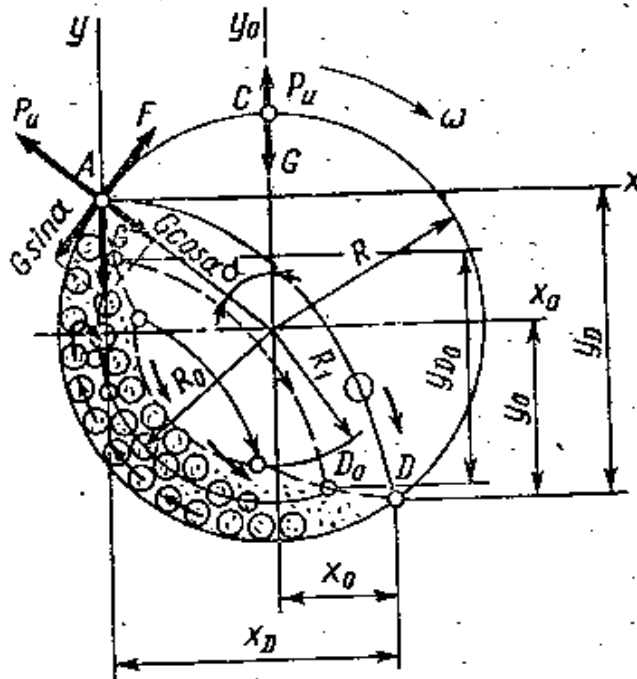
A efectos de la eficiencia del molino son de importancia las magnitudes siguientes:

- a. Velocidad de rotación óptima correspondiente al diámetro del molino.
- b. Cantidad y tipo de los cuerpos moledores
- c. Mínimo desgaste en las placas de blindaje.
- d. Tamaño del recinto de molienda.
- e. Molturabilidad del material.

### ***3.2 Determinación de la velocidad de giro óptima del molino.***

La velocidad de giro del tambor del molino determina la efectividad de la trituración del material. La misma se determina del análisis de la trayectoria del movimiento de las bolas durante el giro del tambor. Durante la rotación del molino el material a triturar y la carga de bolas del molino ocupan una posición excéntrica en el interior del tambor tal como se muestra en la Figura 3.1.

**CAPITULO III: CÁLCULO O SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS FUNDAMENTALES PARA LA EXPLOTACIÓN EFICIENTE DE LOS MOLINOS DE BOLAS**



**Figura 3.1 Posición excéntrica del material y de las bolas en el molino y trayectoria parabólica de caída sobre el fondo del tambor.**

Para cada molino de tambor de bolas o de barras existe una velocidad de giro que se conoce como crítica. Si la velocidad de giro es grande el material y las bolas suben pegados a la pared por la acción de la fuerza de inercia  $P_u$  hasta una determinada altura en el segundo cuadrante de la izquierda tal como se muestra en la Figura y entonces cuando la componente radial de la fuerza de inercia es menor que la componente radial del peso de las bolas esta se desprenden de la pared y realizan entonces el vuelo parabólico que permite que las bolas golpeen el material en el fondo del molino y lo triturén. La velocidad de giro máxima para la cual las bolas no se desprenden de la pared se conoce como Velocidad Crítica ( $\omega_{crit}$  o  $n_{crit}$ ). En la referencia (Andreev E.S., 1961) se da la siguiente expresión para la velocidad crítica:

$$n_{crit} = 30 / \sqrt{R} \text{ rpm} \quad (3.1)$$

Donde R es el radio interior del molino en m.

### CAPITULO III: CÁLCULO O SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS FUNDAMENTALES PARA LA EXPLOTACIÓN EFICIENTE DE LOS MOLINOS DE BOLAS

La velocidad de giro debe ser menor que la crítica. En la referencia (Silenok, 1969) se da un coeficiente  $\psi$  que representa la relación entre la velocidad de giro del molino y la velocidad crítica:

$$\Psi = n/n_{\text{crit}} \quad (3.2)$$

Los valores del coeficiente  $\psi$  se obtienen de la combinación de la máxima potencia del impacto con la mínima fricción. Las investigaciones experimentales confirman que ese coeficiente debe variar entre los límites:

$$\Psi = 0,78 + 0,94 \quad (3.3)$$

Sin embargo en la práctica los explotadores de los molinos, para garantizar una adecuada reserva con relación a la velocidad crítica utilizan:

$$\Psi = 0,75 \quad (3.4)$$

En (Silenok, 1969) se da esta expresión para calcular la velocidad de rotación del molino:

$$n = \Psi \frac{42,3}{\sqrt{D}} \text{ rpm} \quad (3.5)$$

Después de la selección de los parámetros del motor y de los reductores de la transmisión, la velocidad real de giro del molino puede diferir de la velocidad calculada por la expresión anterior, sin embargo la diferencia nunca debe ser mayor que: más o menos un 1 %.

#### ***3.3 Modelo matemático para calcular la velocidad optima de giro del molino.***

En la referencia (Bauman, V.A., 1991) se demuestra la expresión general para calcular la velocidad de giro del molino. Si la velocidad de giro es grande el material y las bolas suben pegados a la pared por la acción de la fuerza de inercia  $P_u$  hasta una determinada altura en el segundo cuadrante de la izquierda tal como se muestra en la Figura y entonces cuando la componente radial de la fuerza de inercia es menor que la componente radial del peso de las bolas esta se desprenden de la pared y realizan entonces el vuelo parabólico. La velocidad de

### CAPITULO III: CÁLCULO O SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS FUNDAMENTALES PARA LA EXPLOTACIÓN EFICIENTE DE LOS MOLINOS DE BOLAS

giro máxima para la cual las bolas no se desprenden de la pared se conoce como Velocidad Crítica ( $\omega_{crit}$ ) y se determina del equilibrio de fuerzas en el punto C:

$$m \cdot \omega_{crit}^2 \cdot R > m \cdot g \quad (3.6)$$

De donde se deduce que para que las bolas puedan realizar su vuelo parabólico necesario para triturar el material en el fondo, debe cumplirse que:

$$\omega_{crit} < \sqrt{g/R} \quad \text{rad/s} \quad (3.7)$$

Donde:

$g$  – aceleración de la gravedad en  $m/s^2$ .

$R$  – radio interior del tambor del molino en  $m$ .

La velocidad de giro óptima límite del tambor se determina de la condición para la cual las bolas se separan de la pared en un punto A que se corresponde después del vuelo parabólico con el punto D límite extremo donde se ubica el material sobre la superficie inferior del tambor. Si las bolas se separan más arriba de ese punto A no golpearan material alguno en el fondo y no se producirá la trituration.

En el punto A sobre una bola cualquiera actúan la fuerza peso vertical  $G$ , cuya componente en la dirección radial es  $G \cdot \cos \alpha$  y la tangencial  $G \cdot \sin \alpha$ . Actúa además la fuerza de fricción tangente a la superficie de contacto  $F$ . Para que la bola se desprenda de la superficie la componente radial del peso de la bola debe ser mayor que la fuerza de inercia. O sea:

$$G \cdot \cos \alpha > P_u \quad (3.8)$$

$$\text{De donde:} \quad m \cdot g \cdot \cos \alpha > m \cdot \omega^2 \cdot R \quad (3.9)$$

Finalmente la velocidad de giro del tambor deberá cumplir la condición:

$$\omega < \sqrt{g \cdot \cos \alpha / R} \quad (3.10)$$

Después que la bola se desprende de la superficie en el punto A, realiza un movimiento parabólico hasta el punto D. Las coordenadas de esa trayectoria parabólica son:

$$x = v \cdot t \cdot \cos \alpha \quad y \quad y = v \cdot t \cdot \sin \alpha - gt^2/2 \quad (3.11)$$

Donde  $t$  es el tiempo de vuelo en  $s$ .

Colocando en estas ecuaciones la velocidad periférica  $v$  en función de la velocidad angular de giro del tambor:

### CAPITULO III: CÁLCULO O SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS FUNDAMENTALES PARA LA EXPLOTACIÓN EFICIENTE DE LOS MOLINOS DE BOLAS

$$V = \omega \cdot R = R \cdot \sqrt{g \cdot \cos \alpha / R} \quad (3.12)$$

Se obtiene simultaneando las ecuaciones, la ecuación de la trayectoria parabólica:

$$y = x \cdot \tan \alpha - [x^2 / (2 \cdot R \cdot \cos^2 \alpha)] \quad (3.13)$$

Las coordenadas del punto D con relación a un sistema de referencia ubicado en el centro del tambor cumple la condición:

$$X_o^2 + Y_o^2 = R^2 \quad (3.14)$$

Como se puede apreciar de la Figura 2.1:

$$X_o = X_D - R \cdot \sin \alpha \quad y \quad Y_o = Y_D - R \cdot \cos \alpha \quad (3.15)$$

Sustituyendo  $X_o$  y  $Y_o$  en la ecuación anterior y utilizando la ecuación de la trayectoria parabólica se puede obtener la ordenada del punto D con relación al A:

$$Y_D = -4R \cdot \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha \quad (3.16)$$

Como se aprecia de esta ecuación, la distancia  $Y_D$  depende de  $R$  que es constante para un molino dado y del ángulo que depende de la posición del punto A y del ángulo  $\alpha$  que forma su normal con relación a la vertical. Si se deriva  $Y_D$  con respecto a  $\alpha$  y se iguala la derivada a cero se puede obtener el valor de  $\alpha$  para el cual la distancia  $Y_D$  es máxima y por lo tanto para la cual se produce el mayor impacto sobre el fondo del tambor y por ende el mayor efecto de trituración.

Derivando se obtiene:

$$Y'_D = 8 \cdot R \cdot \sin \alpha \cdot \cos^2 \alpha - R \cdot \sin^3 \alpha = 4 R \cdot \sin \alpha \cdot (2 \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) = 0 \quad (3.17)$$

Como ni  $R$ , ni  $\alpha$  son cero, tiene que ser cero el término entre paréntesis. O sea:

$$2 \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha = 0 \quad (3.18)$$

$$\tan \alpha = 2 \quad (3.19)$$

Lo cual se corresponde con el ángulo  $\alpha = 54^\circ 40'$

$$\omega_{opt} < \sqrt{g \cdot \cos \alpha / R} = \sqrt{g \cdot \cos 54^\circ 40' / R} = 2,38 / \sqrt{R} \text{ rad/s} \quad (3.20)$$

Donde  $R$  debe estar en m.

Si se expresa esta velocidad en rpm se obtiene:

$$n_{opt} = 2,38 / \sqrt{R} \cdot (60 / 2 \cdot \pi) = 22,73 / \sqrt{R} \text{ rpm} \quad (3.21)$$

Expresada en función del diámetro del tambor esta expresión queda como:

$$n_{opt} = 32,14 / \sqrt{D} \text{ rpm} \quad (3.22)$$

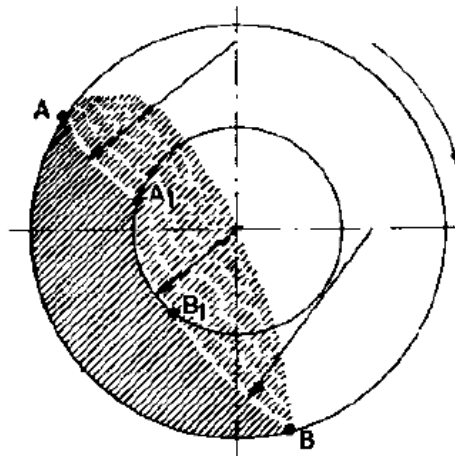
### CAPITULO III: CÁLCULO O SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS FUNDAMENTALES PARA LA EXPLOTACIÓN EFICIENTE DE LOS MOLINOS DE BOLAS

Este valor coincide con la dada por (Silenok, 1969) para  $\psi = 0,76$

En la referencia (Duda, 1977) se trata con profundidad todo el proceso de producción de cemento y en particular lo referente a la molienda de crudo y de cemento.

#### ***3.4 Distribución de los cuerpos moledores en la sección del molino.***

En la Figura 3.2. se muestra la distribución de los cuerpos moledores en la sección durante el proceso de molienda. La superficie rayada con líneas continuas muestra las bolas, que serán elevadas por el giro del molino, mientras que la superficie rayada con líneas de trazo discontinuo representan las bolas que caen, para un ángulo de elevación de aproximadamente  $\alpha = 54^{\circ}40'$ . Simultáneamente están siendo elevadas, en números redondos el 54% de las bolas y cayendo el 46 %.



**Figura 3.2 Distribución de los cuerpos moledores en la sección del molino**

#### ***3.5 Número de choques de las bolas por vuelta.***

Investigaciones exhaustivas han demostrado que, durante una vuelta del molino, las bolas realizan ciclos de trabajo que varían entre 1.79 hasta 2.85, lo cual significa que, por ejemplo, para carga de bolas del molino de 3 401 138 bolas se producen  $3\ 401\ 138 \times 1.79$  impactos por vuelta

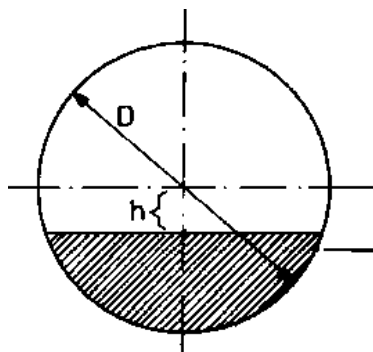
### CAPITULO III: CÁLCULO O SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS FUNDAMENTALES PARA LA EXPLOTACIÓN EFICIENTE DE LOS MOLINOS DE BOLAS

del molino, estos datos para un molino de dimensiones 3.5 X 10.3 m y carga de bolas de molienda.

(Joisel A., 1962) desarrolló una fórmula para calcular el número de choques que recibe un grano de material sometido a molienda. Según ella, el material que se está moliendo, en un molino de 2 m de diámetro X 10 m de longitud, permanece en el molino durante 30 minutos. De los resultados de su análisis obtuvo que el número de choques que recibe la partícula durante ese tiempo, se estima en 6 choques de bola. Esto se debe a que, en el molino, las bolas chocan a menudo entre sí en lugar de hacerlo contra los granos de material. Por otro lado en (Barta, R., 1961) se afirma que, en el molino, sólo una milésima parte de los choques de bolas realizan trabajo de desmenuzamiento efectivo; el resto de sus choques son movimientos en vano.

#### ***3.6 Carga de bolas en los molinos.***

Según (Lewenson, L. B., 1988) el llenado óptimo de los molinos debe ser tal que  $h = 0.16 D$  (véase la Figura 2.3).



**Figura 3.3 Llenado de cuerpos molidores según Lewenson.**

El grado de llenado de los molinos es la relación entre el volumen del apilamiento de las bolas, y el volumen de trabajo del molino. El

### **CAPITULO III: CÁLCULO O SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS FUNDAMENTALES PARA LA EXPLOTACIÓN EFICIENTE DE LOS MOLINOS DE BOLAS**

grado de llenado varía entre el 25 % y el 45 %. Por debajo del 25 % de llenado, los cuerpos moledores se deslizan sobre el blindaje del molino; por encima del 45 % de llenado se originan dificultades en las trayectorias de caída de los cuerpos moledores.

Los grados de llenado habituales son:

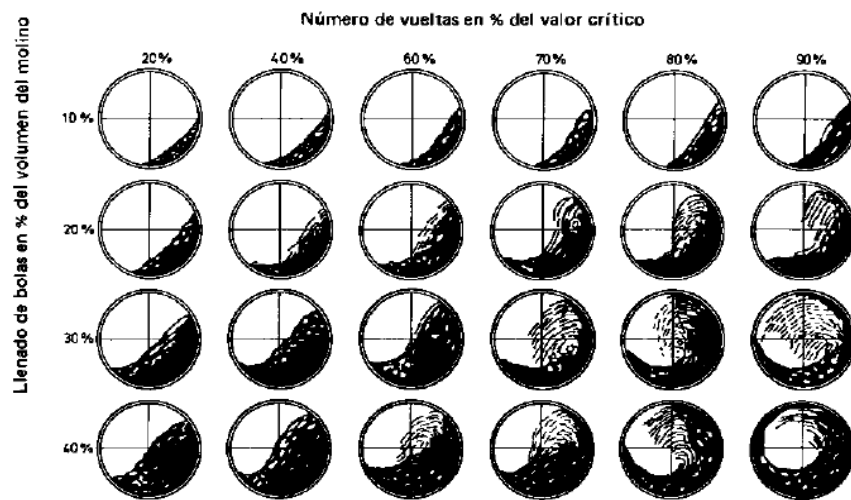
- Para bolas de acero: 28 - 45 %.
- Para cylpebs: 25 – 33 %.

Para molinos de tres cámaras son usuales los grados de llenado:

- Para la cámara I: 30 %
- Para la cámara II: 27 %
- Para la cámara III: 24 %.

En la Figura 3.4. se muestra el movimiento de los cuerpos moledores en los molinos de bolas para distintas velocidades y diferentes grados de llenado. La representación muestra que, en general, para grados de llenado pequeños, sólo para velocidades de 60-70 % de la velocidad crítica, se logra un movimiento con lanzamiento de bolas y con ello una intensa acción demolidora por los cuerpos molturadores, mientras que para grados de llenado altos, los cuerpos moledores realizan un trabajo de rozamiento más intenso.

### CAPITULO III: CÁLCULO O SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS FUNDAMENTALES PARA LA EXPLOTACIÓN EFICIENTE DE LOS MOLINOS DE BOLAS



**Figura 3.4. Movimiento de las bolas y del material en función del grado de llenado y del valor de la velocidad de giro con relación a la crítica.**

En la Producción de Cemento de la Empresa "Cementos Cienfuegos S. A." se cuenta con 2 molinos de bolas de crudo los cuales tienen un diámetro de 4 m y un largo de 12 m, con una carga de bolas aproximada de 188 t. Los molinos de cemento cuentan con dos cámaras, una primera cámara de molienda de gruesos (o reducción primaria), donde se encuentran las bolas de mayor diámetro, las cuales realizan un movimiento de cascada, causada por la fuerza centrífuga y el blindaje (Láinez levantadores). Una vez triturado, el material pasa a través de una rejilla hacia la otra cámara de molienda de finos (en esta cámara se le da el acabado en la granulometría al cemento, que debe ser aproximadamente un 5 -10 % de residuo en tamiz de 90  $\mu$ m), las bolas de esta cámara son de un diámetro mucho más pequeño que las de la primera cámara. En las Tablas 3.1 y 3.2 se dan sus respectivas Cargas de Bolas

**CAPITULO III: CÁLCULO O SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS FUNDAMENTALES PARA LA EXPLOTACIÓN EFICIENTE DE LOS MOLINOS DE BOLAS**

<b>Tabla 3.1 Carga de bolas de los Molinos de Cemento de la Empresa "Cementos Cienfuegos S. A."</b>					
<b>Carga de bola del Molino de Cemento 1</b>			<b>Carga de bola del Molino de Cemento 2</b>		
1era cámara			1era cámara		
Diámetro (mm)	Propuesta Bon (t)	Real	Diámetro (mm)	Propuesta Bon (t)	Real
90	20	17	90	18	10
80	18	20	80	16	16
70	12	9	70	14	16
60	6	10	60	6	6

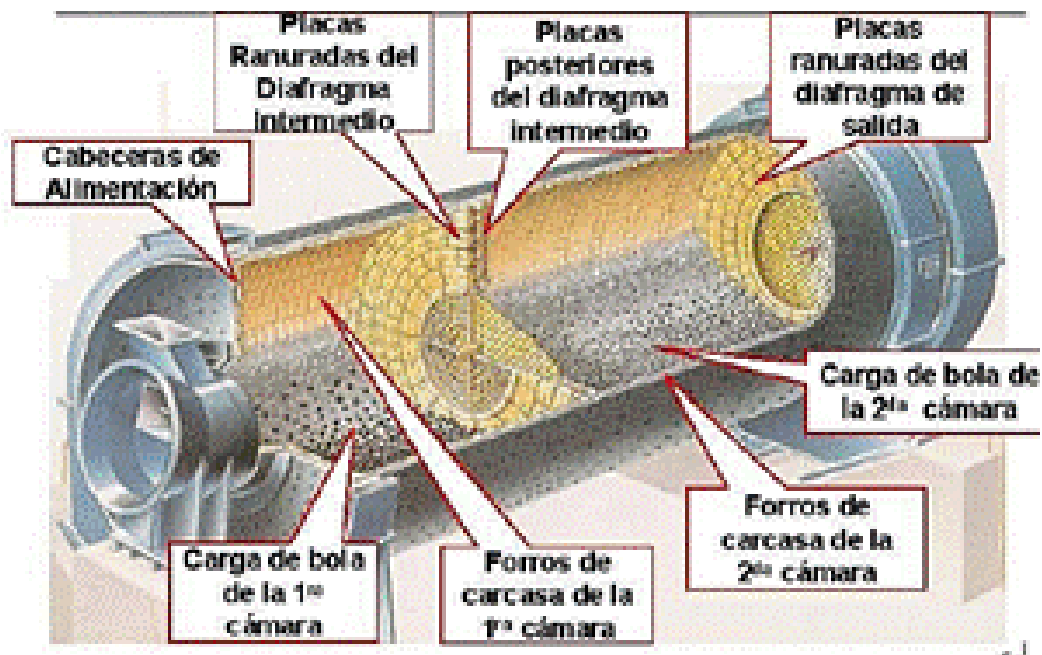
<b>Tabla 3.2 Carga de bolas de los Molinos de Cemento de la Empresa "Cementos Cienfuegos S. A."</b>					
<b>Carga de bola del Molino de Cemento 1</b>			<b>Carga de bola del Molino de Cemento 2</b>		
2da cámara			2da cámara		
Diámetro (mm)	Propuesta Bon (t)	Real	Diámetro (mm)	Propuesta Bon (t)	Real
60	8	8	60	8	8
50	6	7	50	8	8
40	6	6	40	6	8
30	20	16	30	20	20
25	30	33	25	30	32

### CAPITULO III: CÁLCULO O SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS FUNDAMENTALES PARA LA EXPLOTACIÓN EFICIENTE DE LOS MOLINOS DE BOLAS

20	38	38	20	40	24
17	24	24	17	20	12

#### ***3.7 Partes internas de un Molino de bolas y protección contra el desgaste producido por las bolas:***

En la Figura 3.5 se muestran las partes internas de un molino de bolas.



**Figura 3.5 Partes Internas de un Molino de bolas y placas y forros de blindaje protectoras contra el desgaste provocado por las bolas.**

Las partes interiores del Molino de Bolas son:

- Cabeceras de alimentación.
- Forros de la Carcasa Blindada del 1er Compartimiento.
- Placas de Blindaje del Diafragma Intermedio.
- Forros de la Carcasa Blindada del 2do Compartimiento.

### CAPITULO III: CÁLCULO O SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS FUNDAMENTALES PARA LA EXPLOTACIÓN EFICIENTE DE LOS MOLINOS DE BOLAS

- Placas de Blindaje del Diafragma de Descarga o de Salida.
- Carga de Bolas.
- **Características y función de las Cabeceras de Alimentación.**

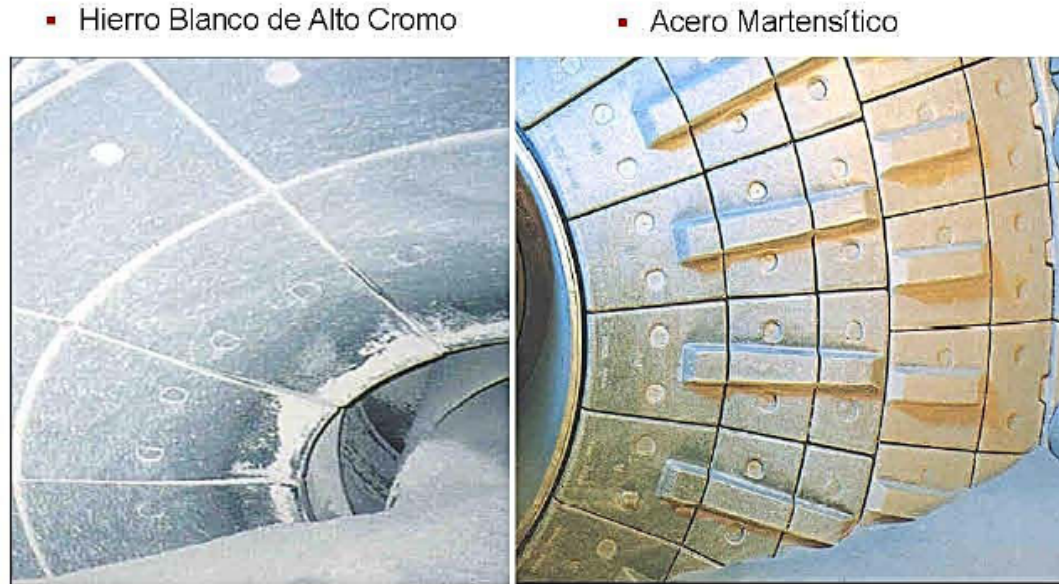
En la Figura 3.6 se muestra la estructura, el material y las funciones de las Cabeceras de Alimentación. Estas cabeceras son de acero aleado de alto cromo, resistentes al impacto y al desgaste. El blindaje está compuesto por pétalos y un anillo central también compuesto por segmentos circulares, todos fijados mediante pernos al cuerpo del molino. Los mismos se desgastan por la acción erosiva de las bolas y se monitorean sistemáticamente tanto los pernos de fijación como el espesor de las placas de blindaje de manera que éstas nunca tengan un espesor menos de 25 mm.



Figura 3.6 Estructura, material y funciones de las Cabeceras de Alimentación. (Fuente: Polysius Cemento, 2013)

### CAPITULO III: CÁLCULO O SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS FUNDAMENTALES PARA LA EXPLOTACIÓN EFICIENTE DE LOS MOLINOS DE BOLAS

En la Figura 3.7 se muestra otra vista de los blindajes de las cabeceras de alimentación y otros materiales utilizados.



**Figura 3.7 Otra vista de los blindajes Protectores de las Cabeceras de Alimentación. (Fuente: Polysius Cemento, 2013)**

Las Cabeceras de Alimentación se recomienda inspeccionarlas periódicamente midiendo los espesores de los anillos interiores y exteriores de los segmentos (De 2 a 3 placas por anillo). Los límites para la sustitución se dan en la siguiente Tabla

**Tabla 3.3 Recomendaciones para la Inspección Periódica de los espesores de las Cabeceras de Alimentación**

ALEACIÓN	DISEÑO	ESPESOR INICIAL TÍPICO	ESPESOR TÍPICO MÍNIMO EN EL REEMPLAZO
Acero Perlítico o Martensítico (2% a 7% Cr)	Elevadores Radiales Atornillados (3/4 a la carcasa del molino)	2.5" a 3" (64-76 mm)	1" (25 mm)
Hierro blanco de alto cromo (11% a 25% Cr)	No elevadores radiales (perfil liso)	3.5" a 4" (80-100 mm)	1.5" a 2" (35-50 mm)

### CAPITULO III: CÁLCULO O SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS FUNDAMENTALES PARA LA EXPLOTACIÓN EFICIENTE DE LOS MOLINOS DE BOLAS

- **Forros de Blindaje de la Carcasa de la 1ra Cámara.**

El Blindaje de la 1ra Cámara de molturación protege la carcasa del molino del desgaste que provoca el proceso de molienda y por su forma ondulada activa el proceso de molienda. Se fabrica de acero aleado de alto cromo y se monitorea frecuentemente controlando el desgaste, ya que el excesivo desgaste afecta la eficiencia del molino.

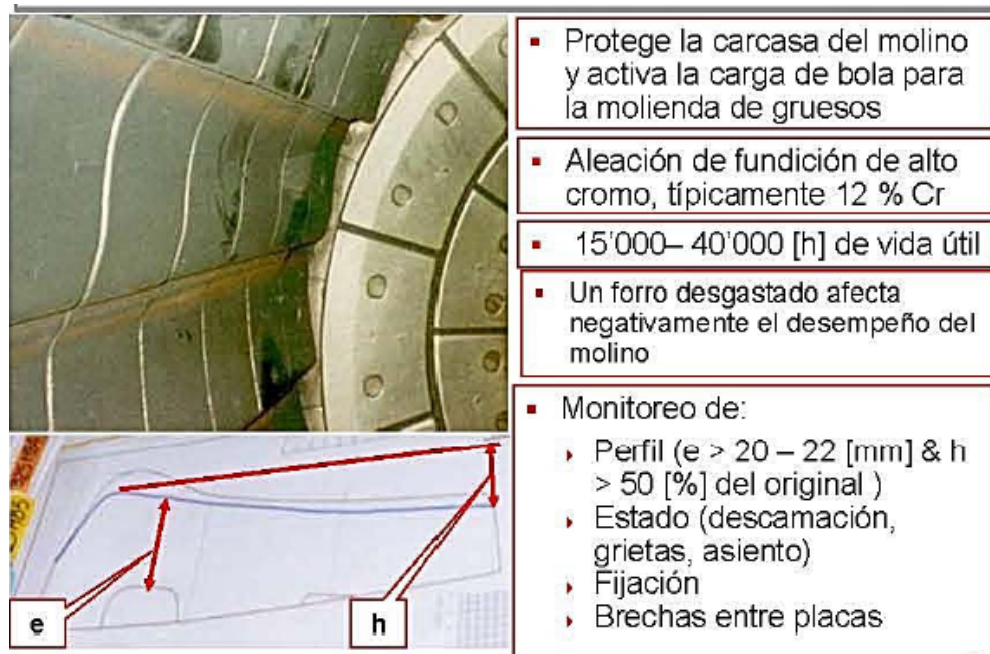


Figura 3.8 Vista de los blindajes Protectores de la Carcasa de la 1ra Cámara. (Fuente: Polysius Cemento, 2013)

### CAPITULO III: CÁLCULO O SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS FUNDAMENTALES PARA LA EXPLOTACIÓN EFICIENTE DE LOS MOLINOS DE BOLAS

En las Figuras 3.9 y 3.10 se muestran los dos diseños típicos de las placas de blindaje de la 1ra Cámara de los molinos de Bolas: Tipo Monostep y Tipo Duolift.

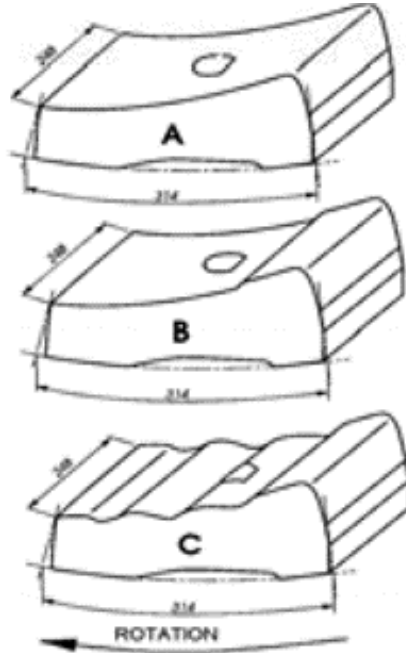


Figura 3.9 Diseño de los blindajes Protectores de la Carcasa de la 1ra Cámara Tipo Monostep. (Fuente: Polysius Cemento, 2013)

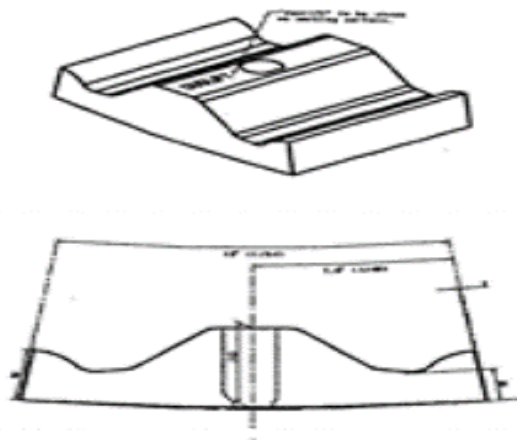


Figura 3.10 Diseño de los blindajes Protectores de la Carcasa de la 1ra Cámara Tipo Duolift. (Fuente: Polysius Cemento, 2013)

### CAPITULO III: CÁLCULO O SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS FUNDAMENTALES PARA LA EXPLOTACIÓN EFICIENTE DE LOS MOLINOS DE BOLAS

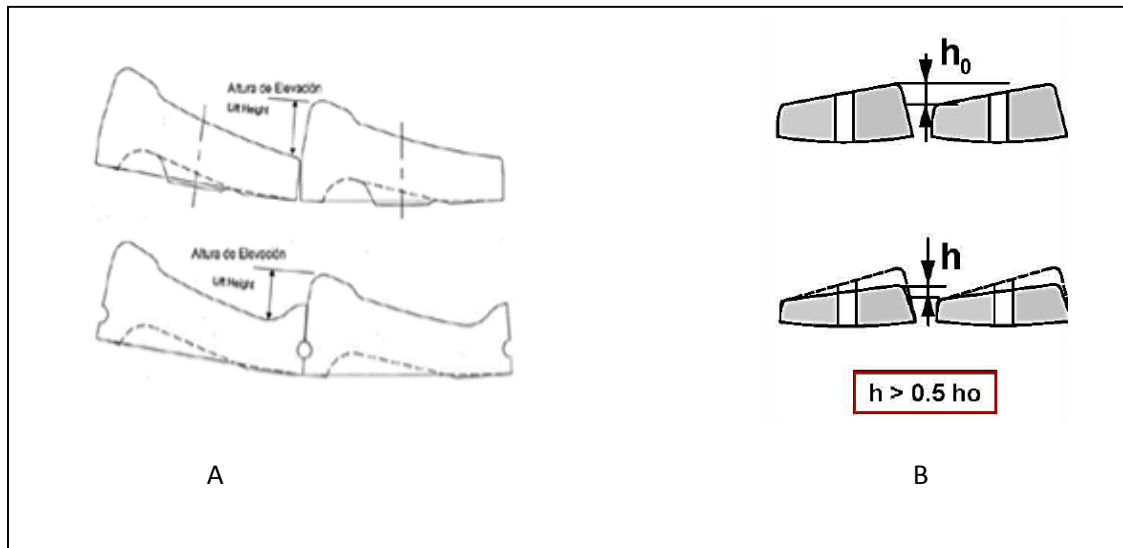
- **Características de los blindajes tipo Tipo Monostep**
  - Para taladrar la carcasa con estándar DIN (I.e. longitud típica de placa 12" en dirección circunferencial)
  - La altura original de elevación varía en base a la velocidad del molino, nivel de bolas, etc.
  - Según disminuye la altura / ángulo de elevación, disminuye el efecto de trituración (se puede verificar con una auditoría de parada de trituración)
  - Generalmente se reemplaza cuando la altura de elevación alcanza aproximadamente 50 mm o cuando el efecto de la trituración reducida no puede compensarse más con el ajuste de la carga de bolas.



**Figura 3.11 Forros de Blindaje Tipo Monostep nuevos y desgastados en la misma cámara. (Fuente: Polysius Cemento, 2013)**

El control del desgaste en este tipo de Blindaje se realiza, tanto para las placas empernadas como las que no llevan perno, midiendo la altura de elevación (Figura 3.12). Se reemplazan cuando la altura de elevación es menor que 50 mm.

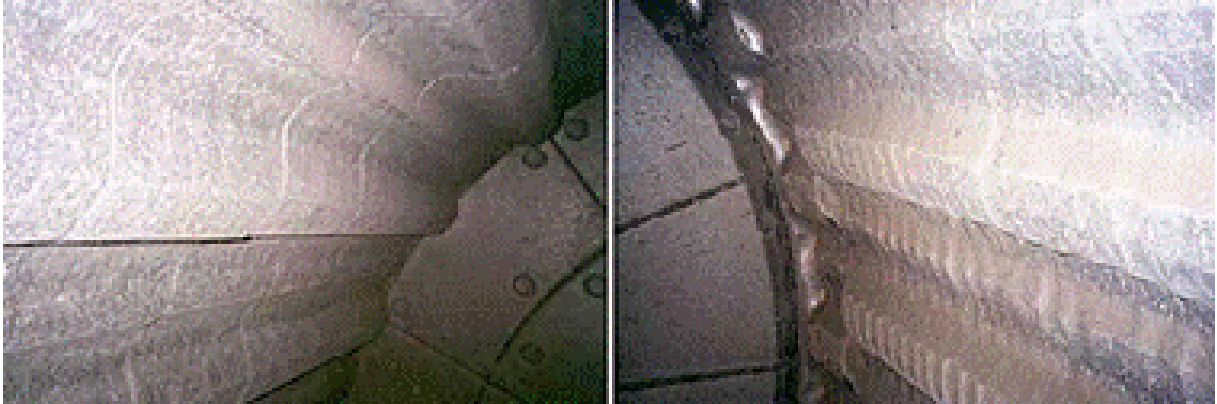
### CAPITULO III: CÁLCULO O SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS FUNDAMENTALES PARA LA EXPLOTACIÓN EFICIENTE DE LOS MOLINOS DE BOLAS



**Figura 3.12 Medición de la Altura de Elevación para controlar el desgaste.**  
a) Placas sin perno. b) Placas emperradas. (Fuente: Polysius Cemento, 2013)

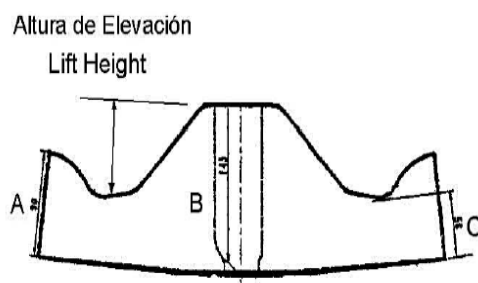
- **Características de los blindajes tipo Tipo Duolift.**
  - Para taladrar la carcasa con estándar de U.S. (i.e. longitud típica de placa 18.8" en dirección circunferencial)
  - La altura original de elevación varía basada en la velocidad del molino, nivel de bola, etc.
  - Según disminuye la altura / ángulo de elevación, disminuye el efecto de trituración.
  - Generalmente reemplazado cuando el espesor es lo bastante bajo para que haya riesgo de rotura en el valle (20 mm)
  - También debería revisarse el efecto de trituración con un muestreo de parada de trituración durante la vida útil.

### CAPITULO III: CÁLCULO O SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS FUNDAMENTALES PARA LA EXPLOTACIÓN EFICIENTE DE LOS MOLINOS DE BOLAS



**Figura 3.13 Forros de Blindaje Tipo Duolift nuevos y desgastados después de 4 años. (Fuente: Polysius Cemento, 2013)**

El control del desgaste en este tipo de Blindaje se realiza también, tanto para las placas empernadas como las que no llevan perno, midiendo la altura de elevación (Figura 3.14). El espesor en el pico de la onda corta (A), el pico de la onda larga (B) y el valle (C), usualmente pueden medirse cerca al pozo de inspección (también se usa el medidor ultrasónico de espesor).

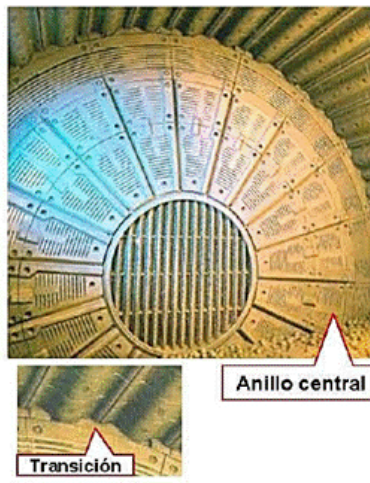


**Figura 3.14 Medición de la Altura de Elevación para controlar el desgaste. (Fuente: Polysius Cemento, 2013)**

- **Características de las placas de blindaje del Diafragma Intermedio.**
  - Retiene el material grueso en la 1ra cámara.
  - El material es aleación de acero al cromo medio típicamente 7 % Cr.
  - 9 000 a 18 000 h de vida útil.
  - El desgaste afecta el desempeño del molino

### CAPITULO III: CÁLCULO O SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS FUNDAMENTALES PARA LA EXPLOTACIÓN EFICIENTE DE LOS MOLINOS DE BOLAS

- Obstrucción de ranuras
- Brechas entre placas
- Monitoreo de:
  - Espesor ( $> 20$  [mm])
  - Fijación
  - Brechas entre placas ranuradas.
- Asegurar la transición apropiada al forro de la carcasa. (Figura 3.15).



**Figura 3.15 Placas de blindaje del Diafragma Intermedio.**

**(Fuente: Polysius Cemento, 2013)**

- Es importante que las ranuras estén orientadas en la dirección del transporte de materiales.
- Esto permite que los spitzers de Clinker sean empujados luego de ser captados en el borde frontal.

### CAPITULO III: CÁLCULO O SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS FUNDAMENTALES PARA LA EXPLOTACIÓN EFICIENTE DE LOS MOLINOS DE BOLAS



Figura 3.16 Placas de blindaje del Diafragma Intermedio.

(Fuente: Polysius Cemento, 2013)

- **Aspectos fundamentales de la Inspección del Diafragma Intermedio.**

#### **No existencia de ranuras de gran tamaño.**

- Las ranuras de gran tamaño evitarán la optimización de la segunda carga del compartimiento (el tamaño original de la muesca debería ser 1/4" en la mayoría de los casos)
- Si las rejillas son muy gruesas, el ancho de la ranura será muy ancho para el tiempo de vida de las rejilla

#### **No existencia de brechas.**

- Las brechas permitirán que el material de gran tamaño pase al segundo compartimiento (el armazón se desgasta si las rejillas se mueven).

#### **No ranuras taponadas.**

- Las ranuras taponadas evitarán el flujo de aire en un molino con un diafragma sin una apertura central.

#### **Forros y tamiz de paso de aire:**

- El espesor mínimo puede ser medido con una cinta a través de las

### CAPITULO III: CÁLCULO O SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS FUNDAMENTALES PARA LA EXPLOTACIÓN EFICIENTE DE LOS MOLINOS DE BOLAS

ranuras (rejillas interiores y exteriores)

- Revisar que no existan pernos sueltos o flojos..

Tabla 3.4 Recomendaciones para la Inspección Periódica de los espesores de las Placas de blindaje del Diafragma Intermedio.

ALEACIÓN	DISEÑO	ESPESOR INICIAL TÍPICO	ESPESOR MÍNIMO TÍPICO EN EL REEMPLAZO
Acero Martensítico (7% a 10% Cr) DIAFRAGMA MAGOTTEAUX	Elevadores Radiales Añadidos (3/4 a carcasa del molino)	2" (50 mm)	3/4" (20 mm)
Acero Perlítico (2% Cr) DIAFRAGMA OEM	Con o sin elevadores radiales	2" a 2.5" (50-64 mm)	3/4" (20 mm)

#### Características de las Placas Posteriores del Diafragma Intermedio.

- Cierra la parte posterior del diafragma
- Típicamente aleación de fundición de alto cromo 12 % Cr
- 15000 - 35000 h vida útil
- El (los) anillo(s) central(es) ayudan a reducir el número de placas a ser reemplazadas enseguida
- Monitoreo de:
  - Espesor ( > 20 [mm])
  - Fijaciones
- Asegurar la transición apropiada entre las placas y el forro de la carcasa

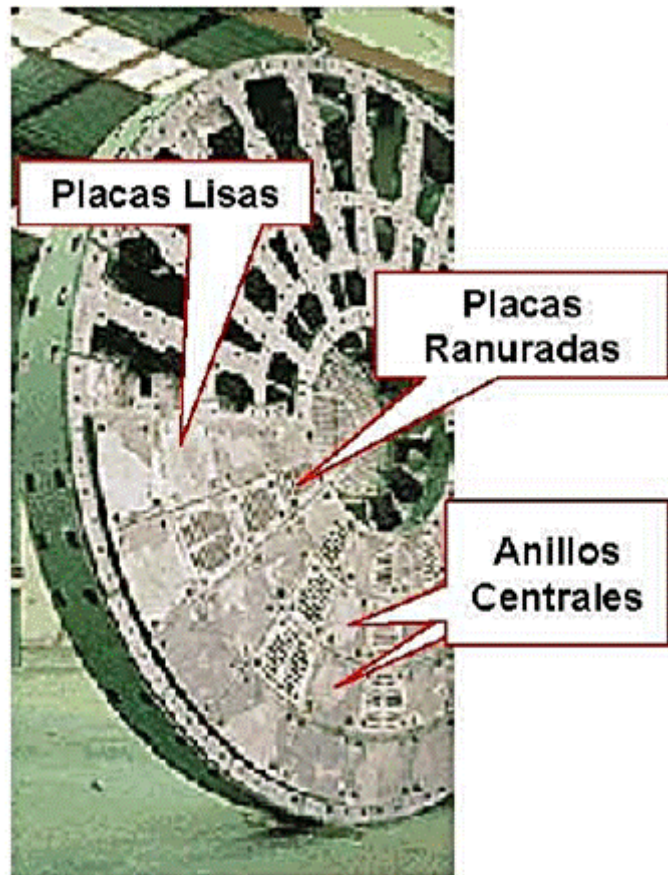
#### Inspección de las Placas Posteriores Intermedias.

- El espesor mínimo se debe medir con un medidor ultrasónico de espesor

### CAPITULO III: CÁLCULO O SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS FUNDAMENTALES PARA LA EXPLOTACIÓN EFICIENTE DE LOS MOLINOS DE BOLAS

(placas interiores y exteriores).

- Revisar pernos sueltos.



**Figura 3.17 Placas de blindaje posteriores del Diafragma Intermedio.**

(Fuente: Polysius Cemento, 2013)

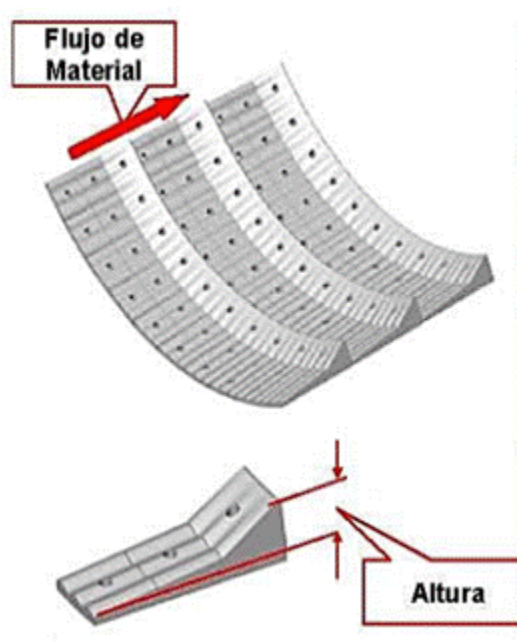
- **Forros de Blindaje de la Carcasa de la 2da Cámara.**

**Particularidades de estos forros de blindaje.**

- Protege la carcasa del molino, clasifica la carga de bola por talla, y la activa para la molienda de tinos

### CAPITULO III: CÁLCULO O SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS FUNDAMENTALES PARA LA EXPLOTACIÓN EFICIENTE DE LOS MOLINOS DE BOLAS

- El material es Aleación de Fundición de alto cromo típicamente 12 -13 % Cr
- 30 000 – 60 000 h de vida útil
- El perfil del forro influye en:
  - La clasificación de la carga de bola.
  - El desempeño del molino.
- Monitoreo de:
  - Perfil
  - Clasificación de la altura del escalón (> 75 [%] del original)
  - Fijaciones



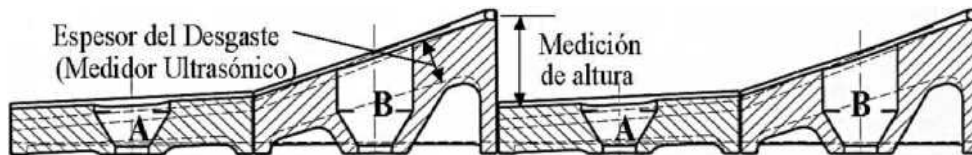
**Figura 3.18 Placas de blindaje de la 2da Cámara.**  
(Fuente: Polysius Cemento, 2013)

- Inspecciones de Forro de la 2da Cámara.
- El espesor restante se puede medir con un medidor de espesor

### CAPITULO III: CÁLCULO O SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS FUNDAMENTALES PARA LA EXPLOTACIÓN EFICIENTE DE LOS MOLINOS DE BOLAS

ultrasónico.

- La altura de la placa baja a la placa alta también se puede medir y comparara la altura original
- Usualmente reemplazado 1/2" antes del desgaste a través de la cavidad debajo de las placas altas o cuando ya no está clasificando



**Figura 3.19 Medición de la Altura de Elevación para controlar el desgaste en las Placas de Blindaje de la 2da Cámara.**

(Fuente: Polysius Cemento, 2013)

- **Placas ranuradas de diafragma de salida.**
- Elimina el material de la carga de bola.
- Aleación de fundición de alto cromo típicamente 12 -13 %Gr
- 12000-36000 [h] de vida útil
- Afectan el desempeño del molino
  - Obstrucción de ranuras
  - Brechas entre placas
  - Ranuras más pequeñas que en el diafragma intermedio
- **Monitoreo de Inspección del blindaje del diafragma de salida**
- Espesor ( > 20 mm)
- Fijación. Revisar pernos sueltos.
- No Brechas entre placas Ranuradas.
- No ranuras de gran tamaño. Las ranuras deberían ser 5/16"; la mitad

### CAPITULO III: CÁLCULO O SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS FUNDAMENTALES PARA LA EXPLOTACIÓN EFICIENTE DE LOS MOLINOS DE BOLAS

del tamaño de la bola más pequeña.

- Los spitzers de clinker deben salir del segundo compartimento.
- Las ranuras del segundo compartimento deberían ser más anchas que las ranuras del diafragma intermedio.
- El almacén está desgastado, sí las rejillas se mueven

#### 3.8 Cálculo de la Potencia Demandada por el Molino de Bolas.

Según (Silenok S.G; 1969) la Potencia demandada por un molino de bolas de puede calcular por la expresión:

$$P = \frac{G \cdot D^2 \cdot \psi \cdot \varphi}{k} \quad (3.23)$$

Donde:

G - Masa de los cuerpos moledores (carga de bolas) en t

$\varphi$  - Grado de llenado del volumen interior del molino con la carga de bolas en %.

D - Diámetro interior del molino en m.

$\psi$  - Velocidad de giro del molino en % del valor crítico.

k - Relación del radio de la capa interior del molino en función de los valores en % de  $\varphi$  y  $\psi$  Los valores de e hallan de la Figura 3.20

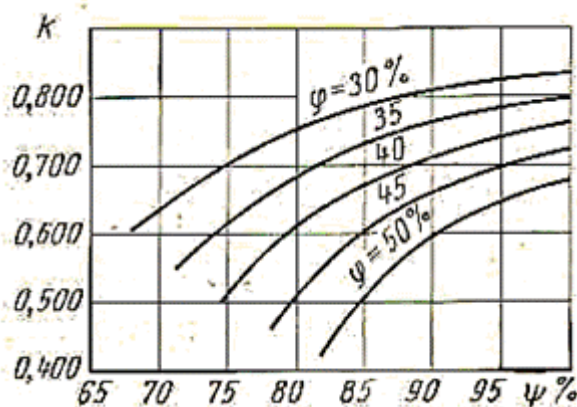


Figura 3.20 Gráfico para la obtención del valor del coeficiente k en función de los valores en % de  $\varphi$  y  $\psi$

El peso de la carga de bolas en t se calcula por la expresión:

### CAPITULO III: CÁLCULO O SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS FUNDAMENTALES PARA LA EXPLOTACIÓN EFICIENTE DE LOS MOLINOS DE BOLAS

$$G = 0.785D^2L\phi\gamma \quad t \quad (3.24)$$

Donde:

L - Longitud de la cámara de trabajo del molino en m.

$\gamma$  – Peso específico del material de las bolas del molino en  $t / m^3$

La potencia requerida en el motor se calcula dividiendo la potencia N entre la eficiencia de todos los elementos: Reductores, acoplamientos, cojinetes de rodamientos, cojinetes de deslizamiento, embragues, etc. insertados entre el motor y el tambor del molino. O sea:

$$N_0 = \frac{N}{\eta} kW \quad (3.25)$$

#### ***3.9 Cálculo de la Capacidad de producción del Molino de Bolas.***

Después de establecer los parámetros geométricos del molino (D, L N y n) se puede determinar la capacidad de producción del molino, en toneladas por hora, por la siguiente expresión (Silenok S.G; 1969):

$$Q = 6.45V\sqrt{D}\left(\frac{G}{V}\right)^{0.8}qkk_N t/h \quad (3.26)$$

Donde:

$V = 0,785 D^2 L =$  Volumen útil interior del molino en  $m^3$ .

D – Diámetro interior del molino en m.

G – Carga de bolas en t.

q – capacidad específica del molino en t por cada kW – h de potencia útil.

k – Coeficiente de corrección en función de la finura de la trituración.

$k_N$  – Coeficiente de utilización de la Potencia del Molino.

El coeficiente k se determina de la siguiente Tabla en función del % de la finura con relación al tamaño de la partícula que pasa por el tamiz No. 008.

### CAPITULO III: CÁLCULO O SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS FUNDAMENTALES PARA LA EXPLOTACIÓN EFICIENTE DE LOS MOLINOS DE BOLAS

**Tabla 3.5 Coeficiente de corrección en función de la finura de la molturación**

% de la malla del tamiz No. 0,08	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
k	0.59	0,65	0,71	0,77	0,82	0,86	0.91	0,95	1,0	1,04

#### ***3.10 Conclusiones Parciales del Capítulo III.***

1. Se establecieron las ecuaciones necesarias para la determinación de la velocidad crítica del molino.
2. Se Estableció el Modelo Matemático para calcular la velocidad de giro óptima del molino.
3. Se establecieron las recomendaciones existentes para seleccionar el grado de llenado de las bolas en el molino.
4. Se estableció el comportamiento de la carga de bolas en el interior del molino en función del grado de llenado y en función del % de la velocidad de giro con relación a la crítica.
5. Se establecieron todo un conjunto de recomendaciones para el control sistemático del desgaste en los distintos tipos de placas de blindaje del molino de manera que no se afecte la capacidad de molturación del molino por el excesivo desgaste.
6. Se establecieron las ecuaciones y parámetros necesarios para calcular la potencia demandada por el molino y la requerida en el motor del molino.
7. Se estableció finalmente como calcular la Capacidad de molienda de un molino de Bolas en función de sus dimensiones y parámetros de explotación.

# Conclusiones



## Conclusiones

1. Se elaboró un amplio estudio en la bibliografía acerca de todo el proceso de fabricación de Clinker y cemento, los diferentes esquemas de flujo y se precisó el papel que juega en todo el proceso la trituración de materias primas, clinker y cemento en los Molinos de Bolas.
2. Se profundizó en todos aquellos aspectos específicos de la trituración y la molienda durante la producción de cemento. Para la trituración de las materias primas, el Clinker y el cemento se utilizan fundamentalmente molinos de bolas, aunque existen otras alternativas de molienda menos utilizadas. Los molinos de bolas en la producción de cemento generalmente son de doble accionamiento periférico o bifurcado, ya que este es mucho más eficiente y racional pues compensa las cargas sobre el árbol del molino y reduce las pérdidas por fricción y avería que se pueden producir en el molino por violar este principio de compensación de las cargas como ha ocurrido en la Empresa de cemento Cienfuegos.
3. Los Molinos de Bolas de la Empresa "Cementos Cienfuegos S.A." han presentado serios problemas desde su puesta en marcha, en ocasiones por errores de diseño, con más frecuencia por errores de mantenimiento (Operación con excesivo desgaste) o incorrecta operación por problemas de averías o desalineaciones excesivas. De aquí la necesidad de poder calcular los parámetros idóneos para una operación eficiente de los Molinos.
4. Se establecieron las ecuaciones necesarias para la determinación de la velocidad crítica del molino, la velocidad de giro óptima. Se establecieron las recomendaciones existentes para seleccionar el grado de llenado de las bolas en el molino y su comportamiento en función de la carga de bolas en el interior del molino para los diferentes grados de llenado y en función del % de la velocidad de giro con relación a la crítica. Se establecieron todo un conjunto de recomendaciones para el control sistemático del desgaste en los distintos tipos de placas de blindaje del molino de manera que no se afecte la capacidad de molturación del molino por el excesivo desgaste.
5. Se establecieron las ecuaciones y parámetros necesarios para calcular la potencia demandada por el molino y la requerida en el motor del molino y cómo calcular la capacidad de molienda de un Molino de Bolas en función de sus dimensiones y parámetros de explotación.

# **Recomendaciones**

Recomendaciones



## **Recomendaciones**

1. Se recomienda en la continuación de la Investigación elaborar un Algoritmo de Cálculo y un Software para calcular de forma automatizada todos los parámetros de explotación y regulación de un Molino de Bolas.
2. Aplicar dicho Software al cálculo de todos los parámetros de los molinos de la Empresa de Cemento "Cementos Cienfuegos S. A." para poder evaluar su estado real de regulación y comportamiento.



## Bibliografía

- Barta, B. (1961). *Chemie a Technologie Cementu*. Prague.
- Bauman, V., Klushastsev, V., & Martinov, V. (1981). *Equipamiento mecánico de la industria de materiales de la construcción*. Moscú: Mashinostroenie.
- Birger, J., Shorr, B., & Schneidierovich, R. (1986). *Calculo de la resistencia de piezas de máquinas*. Moscú: Mashinostroenie.
- Cabe, W. (1998). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*.
- Campos Avella, J. (2006). *Ahorro de Energía en la Industria de Cementos*. Colombia.
- Canales, C. (2004). *Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España de Fabricación de Cemento*. Ministerio de Medio Ambiente.
- Cárdenas, A., & López, B. (2005). *Comportamiento del Molino de Crudo No. 2 posterior a su puesta en marcha después de su rehabilitación*. Empresa Cementos Cienfuegos S.A.
- Castro, D. (2005). *Transporte de momentum y calor, teoría y aplicaciones a la ingeniería de proceso*. México.
- Cementos Cienfuegos S.A. (2009). *Manual de Clinker*.
- CMD Flexident Senior. (2000). *Engrenages y Reucteurs. Projet Extension Gamme*.
- Dubbel. (1980). *Manual del Constructor de Maquinas*. Barcelona: Labor S.A.
- Duda, W. (1977). *Manual tecnológico del cemento*. Barcelona: Editores Técnicos Asociados S.A.
- Gálvez, E., Puerto, J., & Cabrera, L. (2009). *Manual de Operaciones*. Cementos Cienfuegos S.A.
- Goytisoló, R. (2007). *Análisis de las Causas de la Falla por Fatiga de los Dientes del Piñón del Molino de Crudo de la Empresa de Cemento "Cienfuegos S.A."*. Informe de Investigación.

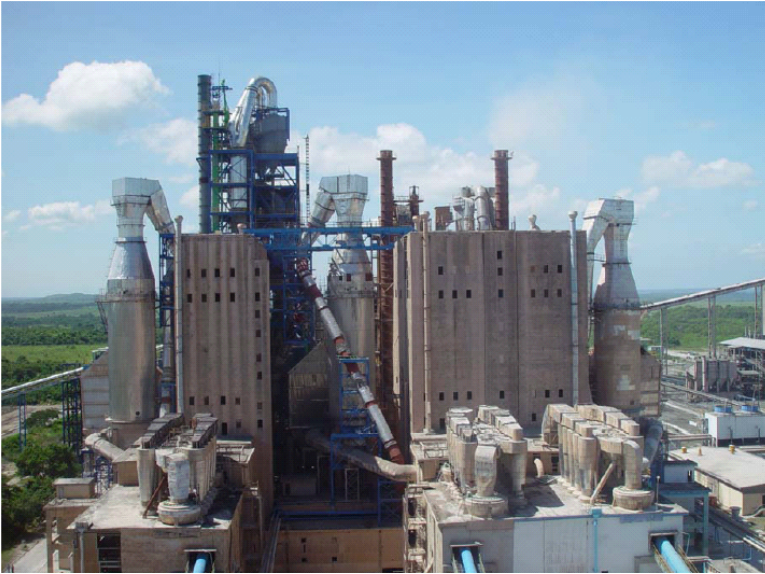
# Bibliografía



- Goytisoló, R. (2006). Análisis y Solución de la Avería de la Criba de la Planta de Trituración y Secado de la Empresa ‘Cementos Cienfuegos S.A. Informe de Investigación.
- Goytisoló, R. (1997). Análisis y Solución de la Avería del “Trunium” del Molino de Crudo No. 1 de la Empresa de Cemento “Karl Marx”. Informe de Investigación.
- Goytisoló, R. (2009). Evaluación de la fractura, rediseño y recuperación del árbol del ventilador de gases calientes de la Línea No. 3 de la Empresa de “Cementos Cienfuegos S.A.” Informe de Investigación.
- Joisel, A. (1962). *Fractures in Brittle Materials Resulting from Size Reduction, Symposium on Size Reduction, Verlag Chemie, Weinheim.* Germany.
- Lewenson, L., Prejgerson, G., Droblenie, I., & Grochocznie. (s.d.). Comminution and Classifying of Minerals.
- Pavlov, K. (1981). *Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnología química.* Moscú: MIR.
- Perry, J. (1986). Chemical Engineers’ Handbook.
- Piloto, G. (2005). Rotura de dientes del piñón de la transmisión izquierda del Molino 362 MB – 1 de la Planta Cementos Cienfuegos S. A.
- Polysius Cemento. (2013). Engineering made by Polysius. Catálogo Industrial.
- Rodríguez, L. (2005). Rotura de dientes del piñón de la transmisión izquierda del Molino.
- Romero Cabrera, J. L., & Martínez García, R. (2011). Proceso de Producción de Cemento. Informe Especialidad Química Industrial.
- Silenok, S. (1969). *Equipamiento mecánico para la producción de materiales de la construcción.* Moscú: Mashinostroenie.
- Soriano Baeza, M. (2010). Cemento y Desarrollo Sostenible.
- Taylor, D. (1988). *Fundamentals of Soil Mechanics.* New York: John Wiley and Sons.

## Anexos

Anexo 1: Fig. 1: Vista de las instalaciones de molienda y homogenización de crudo.



**Anexo#2: Tabla 1.1 Evaluación de los riesgos ambientales en la producción de cemento**

**Anexos**



No	Actividad	Aspecto	Impacto	Evaluación				
				Severidad	Frecuencia	C. Normas	Efecto	Total
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>MATERIAS PRIMAS</b>								
1	Descarga de combustible	Derrame de diesel por accidente	Contaminación de área	1	0	0	0	1
2	Descarga de combustible sólido	Derrame de combustible sólido	Contaminación del área del molino de carbón	2	1	0	0	3
3	Transporte de material por bandas	derrame de material	contaminación del aire con polvo	1	3	0	0	4
4	Trituración de las materias primas	ruido	contaminación sónica	3	3	2	1	9
5	Secado de las materias primas	emisión de polvo	contaminación del aire con polvo	1	2	0	1	4
<b>DOSIFICACIÓN DE CRUDOS</b>								
6	Dosificación de materias primas	emisión de polvo	contaminación del aire con polvo	1	2	0	1	4
7	Molienda de crudo	emisión de polvo	contaminación del aire con polvo	1	2	0	1	4
8		ruido	contaminación sónica	3	3	2	1	9
9	Transporte de harina a silos	emisión de polvo	contaminación del aire con polvo	1	2	0	1	4

<b>PIROPROCESO</b>								
10	Precalentador	emisión de polvo	contaminación del aire con polvo	1	4	0	2	7
11		consumo de combustible	emisión de COx, NOx	1	4	0	2	7
12		descarbonatación	emisión de COx	3	4	0	1	8
13		consumo de electricidad	consumo de combustible	1	4	0	0	5
14	Horno	consumo de combustible	emisión de COx, NOx	2	2	0	2	6
15		consumo de electricidad	consumo de combustible	1	2	0	0	3
16	Enfriador	consumo de electricidad	consumo de combustible	1	4	0	0	5
17		derrames de clinker	Contaminación del área	1	2	3	1	7
<b>ALMACENAMIENTO DE CLINKER</b>								
18	Elevador de cangilones	derrames de clinker	Contaminación del área	2	2	2	1	7
19	Descarga de clinker a camiones	derrames de clinker	Contaminación del área	1	2	2	1	6
20		emisión de polvo	contaminación del aire con polvo	1	2	0	1	4
<b>MOLINO DE CEMENTO</b>								
21	Molienda de cemento	emisión de polvo	contaminación atmosférica	2	3	2	1	8
22		derrames de cemento	contaminación del área	1	1	0	1	3
23	Descarga de cemento a granel	derrames de cemento	Contaminación del área	1	1	0	1	3

24		emisión de polvo	contaminación del aire con polvo	1	1	0	1	3
<b>TRANSPORTE DE PRODUCTO TERMINADO Y COMBUSTIBLES</b>								
25	transporte de clinker	derrames de clinker	Contaminación de la carretera hasta el puerto	1	1	0	3	5
26		emisión de polvo	contaminación del aire con polvo	1	0	0	1	2
27	transporte de combustible desde el puerto a CCSA	derrames de combustible sólido	Contaminación de la carretera desde el puerto	2	1	0	3	6
28		emisión de polvo de petcoke	contaminación del aire con polvo de petcoke	1	1	0	1	3
<b>PUERTO</b>								
29	descarga de petcoke y carga de clinker	derrames de clinker	Contaminación de la zona de embarque	1	1	0	3	5
30		emisión de polvo	contaminación del aire con polvo zona de embarque	1	1	0	1	3
31		derrames de combustible sólido	Contaminación de la zona de embarque	1	1	0	3	5
32		emisión de polvo de petcoke	contaminación del aire con polvo de petcoke la zona de embarque	1	1	0	1	3
<b>LAGUNA DE OXIDACIÓN</b>								
33	tratamiento de residuales	vertido de contaminantes	contaminación de la cuenca caonao	0	1	0	1	2

ALMACEN DE CARBÓN								
34		emisión de polvo de petcoke	contaminación atmosférica	2	3	0	2	7
35	trasiego de combustible	derrames de combustibles	contaminación del terreno aledaño	1	1	0	1	3
36		derrames de combustible sólido en aguas de escorrentías	contaminación de las aguas de escorrentías	1	1	2	2	6
MANTENIMIENTOS								
37	ejecución de mantenimientos	generación de desechos sólidos peligrosos	contaminación del terreno aledaño	3	2	0	0	5
38		generación de desechos líquidos peligrosos	contaminación de las aguas de escorrentías	3	2	0	0	5
LABORATORIO								
39	Análisis de Laboratorio	generación de ruido	contaminación sónica	2	2	0	0	4
		emisión de vapores corrosivos	contaminación del aire	3	1	0	0	4
		emanaciones de polvo		2	1	0	0	3
		consumo de agua y electricidad.	consumo de combustible	0	2	0	0	2
		generación de desechos sólidos (probeta de muestras, materias primas, Harina, Clinker y cemento)	contaminación del terreno aledaño	1	2	0	0	3
generación de desechos peligrosos (combustible, lubricantes y	contaminación del terreno aledaño	2	1	0	0	3		

# Anexos



		etilenglicol)						
		Emisión de radiaciones ionizantes	aumento de la tasa de dosis ambiental	1	0	0	0	1
		Generación de desechos líquidos	contaminación de los efluentes líquidos a la laguna	1	1	0	0	2
<b>OFICINAS</b>								
40	trabajo de oficinas	consumo de agua y electricidad.	consumo de combustible	2	1	0	0	3
		generación de desechos peligrosos (cartuchos de fotocopiadoras, impresoras)	contaminación del terreno aledaño	1	1	0	0	2
		Generación de desechos líquidos	contaminación de los efluentes líquidos a la laguna	1	1	0	0	2