



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO  
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
ACATLÁN

12  
Z E J

"TECNOLOGIA DE PROCESO SECO PARA LA  
ELBORACION DE CEMENTO PORTLAND  
PUZOLANA PUZ-1 UTILIZADO EN LA  
CONSTRUCCION DE OBRAS CIVILES"

TESIS

*Que para obtener el título de:*

INGENIERO CIVIL

*presenta*

**IGNACIO CRUZ GARCIA**



ACATLAN, MEXICO 1995

FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES "ACATLAN"  
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL

SR. CRUZ GARCIA IGNACIO  
ALUMNO DE LA CARRERA DE INGENIERIA CIVIL.  
P R E S E N T E :

DE ACUERDO A SU SOLICITUD PRESENTADA CON FECHA 19 DE AGOSTO DE 1993, ME COMPLACE NOTIFICARLE QUE ESTA JEFATURA DEL PROGRAMA TUVO A BIEN ASIGNARLE EL SIGUIENTE TEMA DE TESIS: "TECNOLOGIA DE PROCESO SECO PARA LA ELABORACION DE CEMENTO PORTLAND PUZOLANA PUE-1, UTILIZADO EN LA CONSTRUCCION DE OBRAS CIVILES". EL CUAL SE DESARROLLARA COMO SIGUE:

INTRODUCCION

- I.- GENERALIDADES
  - II.- MATERIAS PRIMAS
  - III.- ETAPAS DE LA FABRICACION DEL CLINKER
  - IV.- DEL CLINKER AL CEMENTO
  - V.- TECNICA DE PRUEBA
  - VI.- SEGURIDAD INDUSTRIAL
  - VII.- CONCLUSIONES
- BIBLIOGRAFIA

ASI MISMO FUE DESIGNADO COMO ASESOR DE TESIS EL SR. ING. HECTOR ARCE PAZ

PIDO A USTED TOMAR NOTA QUE EN CUMPLIMIENTO DE LO ESPECIFICADO EN LA LEY DE PROFESIONES, DEBERA PRESTAR SERVICIO SOCIAL DURANTE UN TIEMPO MINIMO DE SEIS MESES COMO REQUISITO BASICO PARA SUSTENTAR EXAMEN PROFESIONAL. ASI COMO DE LA DISPOSICION DE LA DIRECCION GENERAL DE SERVICIOS ESCOLARES EN EL SENTIDO DE QUE SE IMPRIMA EN LUGAR VISIBLE DE LOS EJEMPLARES DE LA TESIS, EL TITULO DE TRABAJO REALIZADO, ESTA COMUNICACION DEBERA IMPRIMIRSE EN EL INTERIOR DE LA TESIS.

SIN MAS POR EL MOMENTO, RECIBA UN CORDIAL SALUDO.

ATENTAMENTE  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
ACATLAN, EDO. DE MEX. A 20 DE JUNIO DE 1995



ING. CARLOS ROSALES AGUILAR  
JEFE DEL PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL

ENEP-ACATLAN  
JEFATURA DEL  
PROGRAMA DE INGENIERIA

TEMA : TECNOLOGIA DE PROCESO SECO PARA LA ELABORACION DE CEMENTO PORTLAND  
PUZOLANA PUZ-1, UTILIZADO EN LA CONSTRUCCION DE OBRAS CIVILES

INDICE	PAG.
INTRODUCCION.	
1.0. GENERALIDADES.	4
1.1. ANTECEDENTES.	4
1.2. DEFINICION.	6
2.0. MATERIAS PRIMAS.	12
2.1. COMPONENTES CALCAREOS.	14
2.2. COMPONENTES ARCILLOSOS.	18
2.3. CORRECTORES Y ADITIVOS.	20
2.4. PROPIEDADES, PRUEBAS: FISICAS Y QUIMICAS	25
3.0. ETAPAS DE LA FABRICACION DEL CLINKER.	29
3.1. PREPARACION DE LAS MATERIAS PRIMAS.	29
3.1.1. EXPLOTACION DE LA CANTERA.	31
3.1.1.1. VOLADURA.	33
3.1.1.2. MAQUINARIA Y EQUIPO.	57
3.1.2. TRITURACION.	76
3.1.3. PREHOMOGENEIZACION.	93
3.1.4. EL CRUDO.	98
3.1.5. MOLIENDA.	105
3.1.6. HOMOGENEIZACION.	127

3.1.7.	EL CLINKER.	133
3.1.7.1.	QUEMADO.	136
4.0.	DEL CLINKER AL CEMENTO.	154
4.1.	MOLINO DE CEMENTO.	154
5.0.	TECNICA DE PRUEBA.	161
5.1.	MUESTREO.	161
5.2.	PROPIEDADES, PRUEBAS: FISICAS Y QUIMICAS.	173
5.3.	CONTROL DE CALIDAD.	181
6.0.	SEGURIDAD INDUSTRIAL.	185
7.0.	CONCLUSIONES.	191

#### BIBLIOGRAFIA.

## INTRODUCCION.

El cemento es un polvo con finura comparable a la del talco, formado por diversos cristales y vidrios, que al mezclarse con el agua producen una jalea; excelente pegadura capaz de unir diversos fragmentos pétreos para formar un conglomerado moldeable, durable, resistente e impermeable a voluntad adaptable a miles de usos. Es un material insustituible por su versatilidad y bajo costo y es por ello que es utilizado con éxito en edificaciones de las más variada índole en todos los países del mundo.

En la agricultura y la ganadería, es usado en la construcción de presas, canales de riego y abrevaderos; en el sector de las comunicaciones, permite edificar puentes y carreteras para el autotransporte, durmientes y estaciones para los ferrocarriles; muelles, silos y bodegas para el transporte marítimo y el comercio exterior; pistas y terminales para el transporte aéreo; edificios, ductos y postes para la telecomunicación.

En los energéticos, se utiliza en la cimentación de pozos petroleros y en la construcción de presas hidroeléctricas; en el sector salud sirve para edificar clínicas, hospitales e instalaciones deportivas como canchas, pistas y albercas y en los espectáculos permite edificar estadios, cines y teatros.

Con respecto a la educación, se usa en la construcción de escuelas; en las grandes ciudades, hace posible la edificación de túneles para el sistema de transporte colectivo, la construcción de ductos para el drenaje profundo y de pasos a desnivel para peatones; en el sector productivo es utilizado para construir fábricas, talleres y oficinas; en el sector social, es el material más usado en la construcción de viviendas mono o multifamiliares y banquetas.

Los productos hidráulicos son usados desde tiempos remotos; los constructores romanos hicieron uso de los morteros puzolánicos, hechos a base de cales mezclados con cenizas volcánicas. En 1824 el inglés Aspdin patentó el "cemento Portland" moderno.

El desarrollo de la industria cementera en México se inicia con la fundación de tres fábricas: En Nuevo León (1906), y las dos siguientes en el estado de Hidalgo (1911).

Se le llama cemento Portland por la similitud en color que el cemento tenía con la piedra de la isla de Portland en Inglaterra.

Este es un conglomerante hidráulico con propiedades adhesivas, fabricado de materias primas calcáreas y arcillosas, obtenido cuando se entremuele finamente el "clinker de cemento Portland" con yeso. El cemento Portland Puzolana, es un conglomerante hidráulico, integrado por la mezcla íntima de cemento Portland y puzolana.

Como ya se mencionó las materias primas utilizadas para la fabricación de cemento Portland puzolana son las calizas (calizas oolíticas, calizas metamórficas, etc.) y las arcillas (esquistos, cenizas volcánicas, etc.); también se cuentan con materiales correctivos que se agregan a las materias primas para compensar los elementos deficitarios.

Existe una serie de pruebas y propiedades físicas y químicas, que determinan la calidad de las materias primas con respecto a su composición y reacción; las cuales tienen una influencia directa en la mezcla cruda. Una vez encontrada la mejor formulación de mezcla de materiales y teniendo a cada uno de ellos en sus depósitos correspondientes, triturados a la medida adecuada, se procede mecánicamente y por medio de la automatización a revolverlos y transportarlos a los molinos de harina cruda, en donde se muelen finamente. El polvo crudo que se recibe en los depósitos de almacenamiento es sometido a un proceso de homogeneización a fin de obtener un material físico y químicamente homogéneo antes de pasar a la calcinación. Durante el proceso de calcinación, el material crudo sufre cambios químicos para convertirse en el llamado "clinker", o sea el producto ya calcinado y que en realidad constituye el cemento. El control de calidad en este proceso se reduce a verificar una buena combustión de los combustibles.

El último paso en la fabricación del cemento Portland puzolana es la molienda final, que consiste en que el clínker calcinado y ya frío se somete nuevamente a molienda con la adición de una pequeña cantidad de yeso (natural sin calcinarse) y puzolana.

Independientemente de las pruebas de control de calidad que se realizan durante todo el proceso de fabricación, el control de calidad certifica la buena calidad por medio de una serie de pruebas químicas y físicas de las propiedades que debe tener el material que ofrece al usuario, garantizándole que cumple con los requisitos establecidos por las normas de calidad.



## 1. GENERALIDADES

### 1.1. ANTECEDENTES.

Los productos hidráulicos son usados desde tiempos remotos. Los constructores romanos hicieron uso de los morteros puzolánicos, hechos a base de cales, que al mezclarlas con cenizas volcánicas de Pozzuoli (vecindad de Roma) poseían una fuerza superior y eran capaces de endurecerse bajo la acción del agua dulce o salada.

Los griegos emplearon este material volcánico obteniéndolo en la isla de Thera (ahora Santorin). La mezcla romana tuvo una aceptación por un largo tiempo, por ser el único material para trabajar expuesto a la acción del agua.

El término "cemento" fué aplicado al mortero durante la edad media, sin embargo el término mortero se empleó desde el año de 1290. Por otra parte los descubrimientos modernos del cemento son atribuidos a John Smeaton que en 1756, hizo investigaciones sobre materias primas sometidas a condiciones severas para trabajar; al analizar y comparar las calizas de Aberthaw en Glamorgarn, Inglaterra y las calizas ordinarias, descubrió que las primeras trabajan mejor como morteros debido a que contenían una porción considerable de arcilla. Es en esta ocasión, en que por vez primera se reconocen las propiedades de la arcilla.

A principios del S. XIX en Francia L. J. Vicat, señaló las características en que podía obtenerse el producto : "calcinar una mezcla de tipo gis y de arcilla, pulverizadas en un molino húmedo". Este proceso es considerado el precursor del cemento Portland.

En 1824 el inglés Aspdin patentó aunque empíricamente el cemento Portland "moderno". Usó una caliza dura, la molió y la calcinó, después mezcló esta caliza con la arcilla; moliendola muy finamente agregándole agua, resultaba una pasta con la que formaba manualmente unas bolas y las calcinaba en un horno similar al usado para la caliza hasta que el ácido carbónico se secaba; la mezcla ya calcinada volvía

a molerla y batirla hasta que quedaba un polvo fino. Aunque el paso decisivo en el conocimiento científico de la constitución y mecanismo de endurecimiento del cemento Portland es atribuido a Henry Le Chatelier en 1887 y con los estudios de G.A. Rankin en 1915. En el año de 1826, Frost estableció en Inglaterra la primera fábrica de cemento y para el año de 1850 el mercado mundial de éste producto lo dominaron las cuatro fábricas existentes en éste país. Por ésta época comenzó Francia a fabricar cemento y en el año de 1855 se estableció en Alemania la primer fábrica de cemento. En el año de 1865 por primera vez en E.E.U.U. se importó cemento Portland y para el año de 1872 ya contaba con una fábrica.

A principios de éste siglo no se fabricaba cemento en México sólo se utilizaba como materia prima en fábricas y talleres (mosaicos y piedras artificiales), y para tapar goteras en los techos.

Esta industria debutó en México con dos intentos fallidos: Santiago Tlatelolco y en Dublán Hidalgo; por lo que éste producto se importaba de Inglaterra y de Bélgica, principalmente. El desarrollo de la industria cementera en México se inicia con la fundación de tres fábricas, con hornos rotatorios; la primera fué montada en 1906 en el estado de Nuevo León y las dos siguientes en el estado de Hidalgo en el año de 1911. La producción de éstas tres plantas, apoyó la construcción de las grandes obras que determinaron al principio del México actual. La estabilidad política y social del país determinó el crecimiento de la demanda de cemento y la industria correspondió con la apertura de nuevas fábricas.

## 1.2. DEFINICION.

Se le dió el nombre de cemento Portland por la similitud en color que el cemento tenía con la piedra de la isla de Portland, en Inglaterra.

Cemento Portland, es un conglomerante hidráulico con propiedades adhesivas, fabricado de materias primas calcáreas y arcillosas (cal, alúmina, fierro y sílice), obtenido cuando se entremuele finamente el "clínker de cemento Portland" con un 4 a 5 % de yeso.

Este producto es capaz de aglutinar en una masa con dimensiones estables a diversos materiales (grava, arena, tabique) al mezclarse con el agua, efectúa su endurecimiento; gracias a su propiedad de fraguado tanto en el aire como en el agua.

El clínker de cemento Portland, es el material sintético granular, resultante de la sinterización a una temperatura de 1450 °C., de materias primas calcárea y arcillosa previamente trituradas, proporcionadas, mezcladas, pulverizadas y homogeneizadas.

Los cementos hidráulicos están generalmente constituidos por compuestos químicos inorgánicos cristalinos, como son los silicatos y aluminatos de cal y pueden clasificarse en general como: Cementos naturales, cementos Portland y cementos de alta alúmina, como se representan en la fig. 1.

Con respecto al cemento Portland, existen diferentes tipos, de acuerdo a sus características que van ligadas a sus diversos usos. Entre las variables más importantes se encuentran la velocidad de endurecimiento, la velocidad de desprendimiento de calor y cantidad de calor desprendida durante la hidratación y la resistencia del cemento endurecido al ataque por soluciones de sulfatos; como se describe en la tabla I.

<b>CaO</b>		<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Cementos</b>
Oxido de calcio	+	Oxido de aluminio	Alumínicos
+			
SiO <sub>2</sub>			
Oxido de silicio			
<b>Cementos Portland</b>	+	<b>Adición Activa</b>	• Portland Puzolana
<b>Portland Tipo I</b>			• Portland de Escoria
<b>Tipo II</b>			de alto horno.
<b>Tipo III</b>			• Cemento para pozos petroleros.
<b>Tipo IV</b>		<b>Cementos especiales</b>	• Cementos de albañilería o morteros.
<b>Tipo V</b>			• Cementos expansivos.
<b>Blanco</b>			

FIG. 1.

Característica reforzada.	Tipo de cemento.	Portland		C. P. Puzolana	Mortero	Escoria
		I	II	I		
Alta resistencia rápida		+	+			
Resistencia normal		*	*	*		+
Resistencia al ataque químico			+	+		*
Adhesividad y plasticidad				+	*	
Bajo calor de hidratación			+	+		+
Economía		*	*	*	*	

TABLA 1.

Magnitud : . . + Buena \* Excelente

Como se observa en la fig. 1, el cemento Portland se clasifica en cinco tipos los cuales a continuación se describen.

-Tipo I . Común.- Para uso general en construcciones de concreto.

-Tipo II . Modificado.- Destinado a construcciones de concreto expuestas a una acción moderada de los sulfatos o cuando se requiere un calor de hidratación moderado.

-Tipo III . De rápida resistencia alta.- Es más fino que el cemento ordinario Portland, en cuanto a su composición química y mineralógica, contiene una mayor cantidad de alita, de aluminato y de yeso, que el cemento Portland. Este se utiliza como su nombre lo indica, para la elaboración de concretos en los que se requiera una alta resistencia a temprana edad.

-Tipo IV . De bajo calor.- Cuando se requiera un bajo calor de hidratación, lo cual se logra cambiando la composición química. En el caso de éste cemento el ritmo de desarrollo de resistencia, aumenta más despacio que en el caso de cemento Portland ordinario, especialmente en el clima frío. Con el tiempo, la resistencia llega a ser la misma. El cemento de bajo calor tiene mejores características de resistencia a los sulfatos que el cemento Portland ordinario.

-Tipo V . De alta resistencia a los sulfatos.- Cuando se requiere una alta resistencia a la acción de los sulfatos. Los cementos resistentes a los sulfatos se caracterizan por su bajo contenido de  $C_3A$ , estos se comportan de la misma manera que los cementos Portland en lo que a fraguado y endurecimiento se refiere. En concretos completamente compactados, éste cemento no es afectado por sulfatos en concentraciones normales, tiene características de bajo calor.

El cemento blanco puede ser clasificado como tipo I o tipo III, según satisfaga los requerimientos de la norma NOM-C- 1. de la industria de la construcción. Dado su bajo o nulo contenido de óxido férrico se

caracteriza unicamente por ser blanco y no gris. El cemento blanco se utiliza para fines arquitectónicos en concreto blanco o especialmente en lugares tropicales, para concreto en colores pastel. Para lograr mejores resultados, se debe utilizar un agregado apropiado ligeramente teñido.

El cemento Portland puzolana, se clasifica en dos tipos con un sólo grado de calidad:

-Cemento Portland puzolana Puz-1.- Para uso en construcciones de concreto en general.

-Cemento Portland puzolana Puz-2.- Para uso en construcciones de concreto en donde no son requeridas resistencias altas a edades tempranas.

El cemento Portland puzolana Puz-1, es el aglomerante hidráulico integrado por la mezcla íntima de cemento Portland y puzolana pudiendo adicionarse escoria granulada de alto horno y sulfato de calcio. La mezcla de cemento Portland y puzolana puede obtenerse directamente en la mezcla de estos dos materiales, o bien, mediante la molienda conjunta de clinker Portland, puzolana y sulfato de calcio; o de clinker Portland, sulfato de calcio, escoria granulada de alto horno y puzolana. La molienda y mezclado de estos productos, puede ser realizada por el productor, en el orden que el estime conveniente, cuidando que las proporciones del constituyente puzolánico debe encontrarse en la mezcla, del 15 al 40 % de la masa total.

El cemento aluminoso mostrado en la fig. 1, también llamado "de alta alúmina", se caracteriza por su color oscuro, una alta resistencia mecánica inicial, elevado calor de hidratación y una marcada resistencia al ataque químico; posee también propiedades refractarias.

Este es obtenido por medio de la fusión a elevada temperatura de una mezcla de caliza y bauxita; el material fundido. El alto ritmo de liberación de calor (cerca de 40 J/gr.h. durante las primeras 24 horas) hace necesario colocar este concreto en secciones delgadas y nunca en masas grandes. El aumento de temperatura produce grietas y afecta negativamente la resistencia. La principal desventaja del cemento de

caracteriza únicamente por ser blanco y no gris. El cemento blanco se utiliza para fines arquitectónicos en concreto blanco o especialmente en lugares tropicales, para concreto en colores pastel. Para lograr mejores resultados, se debe utilizar un agregado apropiado ligeramente teñido.

El cemento Portland puzolana, se clasifica en dos tipos con un sólo grado de calidad:

-Cemento Portland puzolana Puz-1.- Para uso en construcciones de concreto en general.

-Cemento Portland puzolana Puz-2.- Para uso en construcciones de concreto en donde no son requeridas resistencias altas a edades tempranas.

El cemento Portland puzolana Puz-1, es el aglomerante hidráulico integrado por la mezcla íntima de cemento Portland y puzolana pudiendo adicionarse escoria granulada de alto horno y sulfato de calcio. La mezcla de cemento Portland y puzolana puede obtenerse directamente en la mezcla de estos dos materiales, o bien, mediante la molienda conjunta de clinker Portland, puzolana y sulfato de calcio; o de clinker Portland, sulfato de calcio, escoria granulada de alto horno y puzolana. La molienda y mezclado de estos productos, puede ser realizada por el productor, en el orden que el estime conveniente, cuidando que las proporciones del constituyente puzolánico debe encontrarse en la mezcla, del 15 al 40 % de la masa total.

El cemento aluminoso mostrado en la fig. 1, también llamado "de alta alúmina", se caracteriza por su color oscuro, una alta resistencia mecánica inicial, elevado calor de hidratación y una marcada resistencia al ataque químico; posee también propiedades refractarias.

Este es obtenido por medio de la fusión a elevada temperatura de una mezcla de caliza y bauxita; el material fundido. El alto ritmo de liberación de calor (cerca de 40 J/gr.h. durante las primeras 24 horas) hace necesario colocar éste concreto en secciones delgadas y nunca en masas grandes. El aumento de temperatura produce grietas y afecta negativamente la resistencia. La principal desventaja del cemento de

alto contenido de aluminio consiste en la pérdida de resistencia que conlleva la conversión de los hidratos de aluminato bajo condiciones mojadas a temperaturas elevadas.

En lo que se refiere a la clasificación de cementos especiales, se tienen:

**Cemento petrolero.** Este se utiliza en la perforación de pozos petroleros y de gas, para controlar el flujo de aguas subterráneas para añadir resistencia y soporte al ademe de acero y para proteger a éste contra la corrosión. Han sido diseñados para fraguado y curación bajo condiciones de altas temperaturas y presiones de enlanchado en pozos de petróleo. Producen un barro de baja viscosidad y de fraguado lento, a los que se añade un aditivo y un retardador para reducir la fricción; se mantiene en estado de fluidez durante cuatro horas y después se endurece muy rápidamente.

La composición química de los cementos para pozos petroleros es muy similar a la de los cementos Portland tipos I, II y V.

**El cemento de albañilería o mortero.** Se emplea para pegar tabiques o rocas entre sí, así como tender los firmes de los pisos o los aplanados de los muros, por lo que las características de alta resistencia mecánica a la compresión o tensión, no constituye la cualidad más deseable.

Estos morteros contienen por lo general, de un 30 % a un 50 % de cemento Portland, al cual se le integra un plastificante (usualmente carbonato de calcio, arcilla o puzolana) finamente molido y pequeñas cantidades de aditivos orgánicos para realzar las propiedades de manejabilidad y adhesividad del cemento.

**Cemento expansivo.** Tiene como característica especial la de expandirse al fraguar, útil en la elaboración de concretos de encogimiento compensado, es decir completamente libre de agrietamientos.

Por otra parte el conglomerante hidráulico, es el material finamente pulverizado, que al agregarle agua, ya sea sólo o mezclado con arena, grava, asbesto u otros materiales similares tienen la propiedad de fraguar tanto en el aire como en el agua y formar una masa endurecida.



La escoria granulada de alto horno, es el producto no metálico esencialmente de silicatos y aluminosilicatos de calcio los cuales se producen simultaneamente con el hierro en los altos hornos y que se origina al enfriar rápidamente en agua, vapor o aire; el material fundido.

Con respecto a la puzolana es aquel material siliceo o sílico-aluminoso, que en sí posee poco o ningún valor cementante, pero que finamente molido y en presencia de humedad, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ordinaria, para formar compuestos con propiedades cementantes.

## 2.0. MATERIAS PRIMAS.

Las materias primas que se utilizan para la fabricación del cemento son en primer lugar y por su consumo las calizas que son carbonatos de calcio y mínima cantidad de magnesio y en segundo término materiales ricos en óxido de silicio que pueden ser barros, pizarras, tezontles, escoria de altos hornos, arcillas, margas. Considerando lo que químicamente es el cemento: silicatos de calcio, aluminio y hierro.

En el caso de que las materias primas de que se dispone no tengan la cantidad suficiente de estos elementos, es necesario adicionar una o dos materias primas, como el caso de hematitas, magnetitas o limonitas ricas en óxido férrico, sílicas que son ricas en silicio o caolines ricos en aluminio y a los cuales se denominan "correctivos".

Los cuatro principales elementos (sílice, aluminio, hierro y calcio) son los elementos más abundantes en la corteza terrestre a demás del oxígeno, como se mencionó ellos aparecen en muchos minerales, para la fabricación del cemento se debe seleccionar los más adecuados.

Hay tres posibilidades para producir una mezcla cruda que contiene estos cuatro elementos en las proporciones correctas:

- a) Piedra de cemento natural. Los cuatro elementos se encuentran en proporción correcta en la roca natural. Este es el caso ideal, pero extremadamente raro.
  - b) Cuatro componentes de la mayor pureza posible. Se mezclan en la proporción adecuada, la homogeneización y quemado de los componentes puros consume mucha energía.
  - c) La mezcla de diferentes componentes, existe una gran cantidad de variedades entre la piedra caliza y la arcilla como se muestra en la tabla
- 3] éstas rocas que contienen carbonatos de calcio y silicatos, deben.

ser mezclados en la proporción correcta. Esta es la forma más común de producir una mezcla cruda de cemento.

Teniendo en cuenta la pérdida de material bióxido de carbono y agua, que pueden esperarse en el curso de la fabricación, en la práctica se asume, por lo general que de 1.5 a 1.6 toneladas de materia prima son necesarias para producir una tonelada de clínker.

## 2.1. COMPONENTES CALCAREOS.

Los componentes calcáreos son aquellas rocas que contienen más del 75 % de carbonato de calcio, y pueden tomarse en consideración los siguientes materiales:

Caliza. Son materiales pétreos de dureza comprendida entre 1.5 a 3.5 de la escala de Mohs, correspondiendo las más duras a los períodos geológicos más antiguos. Aunque es adecuada la procedente de todas las formaciones geológicas para la fabricación de cemento Portland puzolana puz-1.

La caliza posee, por lo general, estructura cristalina de grano fino, su peso específico varía de 2.6 a 2.8. Solamente los yacimientos de caliza muy pura son de color blanco, usualmente contienen otros materiales pertenecientes a sustancias arcillosas o a minerales de hierro que influyen en su color, como ej. se mencionan a continuación algunos tipos.

Calizas oolíticas. Relativamente blandas, la composición química es uniforme en ciertos casos, pero con mayor frecuencia varía horizontalmente y en profundidad; de acuerdo con la naturaleza del depósito original y con algunas alteraciones geológicas más modernas, como fallas y plegamientos. Se le conoce una amplia gama de impurezas; entre las más importantes está la magnesia, los componentes de flúor, óxidos y sulfuros metálicos, fosfatos y ciertos materiales silíceos. Pueden encontrarse también arena, arcilla y pizarra, aunque no necesariamente perjudiciales.

Calizas metamórficas. Están distribuidas comúnmente en las plataformas continentales geológicamente antiguas. Han estado sometidas a procesos geológicos más intensos que los que motivaron la formación de fallas y plegamientos, relativamente recientes. Con frecuencia están toscamente cristalizadas, se trituran y muelen con relativa facilidad; con respecto a su composición química pueden variar en detalles con mucha rapidez, en profundidad y lateralmente. Este hecho es importante por cuanto afecta la distribución de las impurezas, como ocurre en el contenido en magnesio, pueden ocurrir intrusiones o

intercalaciones de esquistos, minerales de hierro y granito; una variedad de estas es el marmol, aunque sería antieconómico emplear marmol para fabricar cemento.

Calizas coralinas. Estas pueden ser magnesianas o silíceas.

Calizas secundarias. Son de origen geológico reciente, y se presentan con frecuencia como depósitos superficiales delgados incluso en nódulos en el suelo, pueden ser magnesianas, fosfatadas o silíceas y a menudo están contaminadas con arcilla. Ambas son de menor importancia pero se utilizan en la fabricación de cemento Portland puzolana puz-1.

Caliza de concha. Son depósitos de conchas marinas, que pueden ser dragados de los fondos del mar, de los lagos o de los ríos.

La creta. Comúnmente se encuentra en capas horizontales o ligeramente inclinadas, y tiene la característica de poseer una composición uniforme en un horizonte dado, aunque su contenido cálcico puede variar de un horizonte a otro. Las impurezas más normales son arena y nódulos de pedernal. Estos junto con otros materiales, llenan a veces cavidades verticales cilíndricas o cónicas, que se conocen con el nombre de concreciones.

La creta es, con frecuencia, relativamente blanda y puede reducirse con facilidad a un estado de fina división; su dureza se debe a una cristalización más moderno de calcita. La facilidad con que ésta puede molerse y el hecho de que, al ser extraída, puede contener una cantidad de agua del orden del 25 % lo cual explica la popularidad del proceso de vía húmeda de fabricación en los lugares en que existe la creta.

Calizas margosas. Son aquellas que van acompañadas de sílice y de productos arcillosos, así como de óxido de hierro; las margas forman el paso de transición a las arcillas. Geológicamente, son rocas sedimentarias originadas por la deposición simultánea de carbonato de calcio y de material arcilloso, la dureza de la marga es menor que la de la caliza, cuanto más elevada es su concentración en material

arcilloso, tanto menos dura se presenta; a veces las margas contienen sustancias bituminosas. El color de la marga depende del material arcilloso que contiene y varía desde el amarillo hasta el gris oscuro. Las margas son un excelente material para la fabricación de cemento, puesto que contienen el material calcáreo y arcilloso en estado homogeneizado.

Las margas cuya composición coincide con el crudo de cemento Portland, hallan un aplicación en el llamado "cemento natural", sin embargo es raro encontrar yacimientos en tales circunstancias. Según las relaciones entre componentes calcáreos y arcillosos en las materias primas se tiene en la tabla 3.

Tipo	CaCO <sub>3</sub> Contenido (%)
Caliza de alto porcentaje	96 - 100 %
Caliza margosa	90 - 96 %
Marga calcárea	75 - 90 %
Marga	40 - 75 %
Marga arcillosa	10 - 40 %
Arcilla margosa	4 - 10 %
Arcilla	0 - 4 %

TABLA 3. Tipos de calizas y arcillas.

Para la fabricación de cemento Portland, se prefiere una caliza con un 80 - 85 % de carbonato, a una caliza de alto grado de 90 - 95 % de carbonato. La primera es más fácil de moler y homogeneizar porque ya contiene algo de marga dispersa en la caliza, y requiere menos material arcilloso para formar una mezcla cruda de cemento.

A continuación se presenta un análisis químico de tres componentes calcáreos (tabla 4).

Denominación %	Caliza	Caliza de alto grado	Marga calcárea
Pérdida al fuego	42.90	42.90	30.60
SiO <sub>2</sub>	5.20	0.70	13.80
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.81	0.68	7.00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.54	0.08	4.60
CaO	48.60	54.50	38.40
MgO	1.90	0.59	1.30
SO <sub>3</sub>	0.05	0.25	0.43
K <sub>2</sub> O	0.33	0.01	0.86
Na <sub>2</sub> O	0.05	0.16	2.60
TiO <sub>2</sub>	0.06	0.01	0.21
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.01	0.02
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.05	0.01	0.29
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.04	0.01	0.25
Cl	0.02	0.01	0.01
F	0.01	0.01	0.01

TABLA 4. Análisis químico de 3 componentes.

## 2.2. COMPONENTES ARCILLOSOS.

Estos constan de minerales que contienen sílice, aluminio, hierro, y una titulación menor del 75 % de carbonato de calcio. Las arcillas en esencia son productos de meteorización de silicatos de los metales alcalinos y alcalinoterreos en particular de los feldspatos y micas, la parte principal de las arcillas está formado por hidrosilicatos de alúmina. La composición química de las arcillas varía desde aquellas que se aproximan a los minerales puros de arcilla hasta los que contienen agregados de hidróxido de hierro, sulfuro de hierro, carbonato de calcio. El hidróxido de hierro es el componente coloreante más frecuente de las arcillas, también pueden prestarle distintas coloraciones las sustancias orgánicas; la arcilla sin impurezas es blanca. Distintos tipos de arcilla se describen en seguida.

Esquistos. Se forman por una recristalización de los minerales en las arcillas endurecidas sedimentarias y que contienen mica; las partes expuestas a la Interperie son blandas, aunque la composición global es conveniente. Puede ocurrir a veces variaciones marcadas de tipo local en las proporciones relativas de alúmina, óxido de hierro y sílice; que dificultan el control del proceso. Los esquistos son con frecuencia ricos en alúmina y pueden tener también contenidos altos en álcalis y azufre.

Cenizas volcánicas. Son normalmente blandas, de grano fino y frías cuando se depositan. Procesos geológicos secundarios pueden producir a partir de ellas, materiales que varían desde una arcilla plástica a una roca endurecida, son frecuentes los altos contenidos de álcalis. Las rocas volcánicas incluyen las tobas y aglomerados volcánicos y las rocas verdes que son generalmente duras.

Margas. Estas pueden ser margas calcáreas como se ha mencionado anteriormente o margas arcillosas, dependiendo del grado de carbonato de calcio es como se clasifican.

En la tabla 5 se indica la composición química de diferentes arcillas que se utilizan en la fabricación de cemento Portland puzolana.



Denominación %	Esquistos	Marga	Arcilla
Pérdida al fuego	5.30	32.20	12.5
SiO <sub>2</sub>	64.10	22.70	45.90
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.60	3.90	23.90
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.10	2.40	15.50
CaO	1.80	32.90	0.72
MgO	2.90	3.30	0.33
SO <sub>3</sub>	0.03	0.95	0.03
K <sub>2</sub> O	2.70	0.59	0.01
Na <sub>2</sub> O	1.90	0.19	0.11
TiO <sub>2</sub>	0.67	0.39	0.84
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.05	0.04	0.20
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.18	0.03	0.06
Cl	0.01	0.01	0.04
F	0.01	0.01	0.01

TABLA 5. Análisis de componentes arcillosos.

### 2.3. CORRECTORES Y ADITIVOS.

Son compuestos correctores aquellos que entran en pequeñas proporciones para aumentar tan sólo la cantidad del óxido deficitario en la composición y deben ser, por ello, de alto título cada uno de los principales óxidos componentes: Caliza de alto grado para óxido de calcio (empleado frecuentemente como ablandador), arena o arenisca para proporcionar suficiente sílice, bauxita para corregir deficiencia en el contenido de alúmina, mineral de hierro o ceniza de pirita para óxido férrico. En la tabla 6 se presentan distintas composiciones de correctores.

Componente %	Bauxita	Cen. Pirita	Min. Hierro	Cen. Volante	Arena
Pérdida al fuego	15 - 20	-	5.0 - 12	0.2 - 4	0.2
SiO <sub>2</sub>	16 - 22	6.6 - 25	20 - 25	26 - 36	99.2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	44 - 58	2.0 - 16	3.0 - 9	6.5 - 9.5	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10 - 16	62 - 87	45 - 60	5.0 - 8.0	0.5
CaO	2.0 - 4.0	0.7 - 0.9	0.5 - 2.5	42 - 50	-
MgO	0.2 - 1.0	0.2 - 2.0	1.5 - 7.0	3 - 4	-
SO <sub>3</sub>	-	0.8 - 8.0	0.3 - 0.6	2.5 - 3	-
K <sub>2</sub> O	-	-	-	-	-
Na <sub>2</sub> O	-	-	-	0.8 - 3.5	-

TABLA 6. Análisis de componentes correctores.

Como se observa en la tala 6, los diferentes componentes correctores varían considerablemente en su composición, por lo que se escogerán según las necesidades requeridas y por consiguiente lograr una buena mezcla cumpliendo con las normas de calidad.

La ceniza volante, conocida también como ceniza de combustible pulverizado. Esta es la ceniza precipitada electrostáticamente de los humos escapados de las estaciones de fuerza motriz que funcionan a base de carbón, las partículas de ceniza volante son esféricas y son por lo menos de la misma finura que el cemento (aunque con menor número de partículas muy finas), de manera que la sílice esté lista para la reacción; su composición química depende de su origen. Las cenizas de carbón (antracita) normalmente sólo contiene algunos porcientos de CaO, pero mucho sílice y alúmina mientras que las cenizas de lignita son químicamente bastante parecidas a las escorias. Por lo tanto en la práctica se diferencian las cenizas volantes en pobres en CaO (antracita) y ricas en CaO (lignita).

La actividad puzolánica de la ceniza volante no admite duda, pero es necesario que tenga una finura y un contenido de carbón constantes; estos elementos son a menudo interdependientes puesto que las partículas de carbón tienden a ser más gruesas. Las actuales instalaciones de calderas producen ceniza volante con un contenido de carbón bajo (aprox. 3%) y valores más altos se han encontrado en cenizas volantes de plantas viejas. La importancia de la uniformidad de las propiedades de la ceniza volante no puede pasarse por alto, ya que de otra manera es difícil mantener la uniformidad del concreto resultante; debe señalarse que la ceniza volante puede afectar el color del concreto resultante.

Los aditivos son aquellas materias que se adicionan al clinker de cemento Portland, para que el cemento adquiera determinadas características tanto físicas como químicas. Los aditivos hidráulicos tienen la propiedad de reaccionar con la cal liberada durante la hidratación del clinker formando productos de hidratación similares a los productos de hidratación del cemento puro. Los aditivos más importantes que se pueden usar para la fabricación del cemento Portland puzolana son : Escorias siderúrgicas (escorias básicas y escorias ácidas), cenizas volantes (pobres en CaO y ricas en CaO), puzolanas (tobas volcánicas, rocas vítreas volcánicas, puzolanas de alto sílice, puzolanas artificiales). Aunque prácticamente las escorias básicas, las cenizas volantes pobres en CaO, las tobas volcánicas y las rocas vítreas volcánicas son las más usadas.

El yeso, éste se utiliza como retardante de fraguado, para conseguir lo que teóricamente se llama tiempo abierto, no inferior a 45 minutos antes del fraguado inicial. La correcta adición del yeso mejora y controla el fraguado del cemento Portland puzolana, eleva su resistencia y reduce su contracción por resecamiento. Esto es la adición del yeso mejora grandemente el comportamiento de dicho material, impidiendo la formación de compuestos que dificulten su más completa hidratación y endurecimiento. La adición del yeso varía entre 30 y 80 kg. por tonelada de clínker; se debe evitar que el calor por fricción en los molinos eleve la temperatura, pues si se pasara de 128 °C., se produciría la deshidratación del yeso, y en consecuencia, fraguado falso prematuro en el cemento.

La puzolana, es un material que aunque por sí mismo no sea aglomerante, contiene sustancias que a temperatura ambiente se combinan, con la cal en medio acuoso, para formar sustancias insolubles que poseen propiedades cementantes. La puzolana ayuda también a reducir el calor inicial de hidratación, mejora la resistencia a edad avanzada, el incremento de la resistencia a la reacción álcal-agregado y al ataque de sulfatos. A continuación se mencionan diferentes tipos de estas, la mayor parte de puzolanas son de origen volcánico, como son: La puzolana natural, rocas volcánicas y tierras diatomáceas; también se tienen productos artificiales o semiaartificiales, tales como las arcillas activadas, escoria de altos hornos, esquilos calcinados y "sílica fumes". Las puzolanas se clasifican según su origen en: Tobas volcánicas, consisten de zeolitas y material amorfo o de rocas con alto contenido de sílice, que han sufrido en la naturaleza una alteración química.

Rocas vítreas volcánicas, son productos de origen volcánico que han sufrido un enfriamiento extremadamente rápido. Consisten primordialmente de material amorfo o vítreo con una alta superficie específica que les da una gran afinidad a la reacción con la cal liberada del clínker. Económicamente estas rocas representan el grupo más importante de los aditivos hidráulicos naturales.

Los depósitos de esqueletos de algas (diatomitas), son los más conocidos de este grupo de aditivos naturales.

Las puzolanas artificiales, son rocas naturales que adquieren una actividad hidráulica sólo después de un calentamiento entre 400 y 800 °C. Las puzolanas consisten principalmente de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  con cantidades, que

contienen normalmente una gran cantidad de material amorfo y de materiales como olivino, piroxenas, hornblendas, feldespatos y una gran variedad de minerales de carácter accesorio. La parte amorfa se cristaliza con el tiempo (miles de años) a zeolitas y puede meteorizarse a minerales de arcilla (motmorilonita).

La actividad hidráulica de la mayoría de las puzolanas se debe al material amorfo, a los materiales activos (zeolitas) y a su gran superficie específica que favorece la reacción con el hidróxido de calcio. La presencia de álcalis, resulta en mayor superficie específica y por lo tanto en mayor actividad hidráulica. Tanto la composición química, como mineralógica sólo dan inclinación referentes a la actividad hidráulica, por lo que hay que determinar su actividad mediante ensayos de mortero y concreto armado. Un criterio de calidad que puede influir en el proceso, es el contenido de humedad. Una característica común de casi todos los aditivos hidráulicos ya sean productos naturales o productos artificiales, es su gran variabilidad química y mineralógica y por lo tanto sus propiedades hidráulicas.

Cabe señalar que al hablar de puzolanas en general, la sílice contenida debe ser amorfa, por que la sílice cristalina tiene reactividad muy baja.

Escoria de alto horno. Cuando una escoria de alto horno fundida al rojo vivo se enfría bruscamente con agua, se transforma en una masa de gránulos porosos de estructura vítrea, este material, constituye un material activo susceptible de ser incorporado al cemento Portland puzolana.

La mayor parte de las escorias siderúrgicas son escorias básicas granuladas que provienen de la fundición de hierro en altos hornos. Químicamente estas escorias consisten primordialmente de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  y  $\text{MgO}$ .

Otras escorias poco aptas para la fabricación de cemento Portland puzolana, provienen de las siderúrgicas de níquel, plomo, cobre, que son química y mineralógicamente diferentes a las escorias de la fundición de hierro. Normalmente contienen más sílice y aluminio y menos calcio. La actividad hidráulica de las escorias se debe a su composición química y mineralógica, así las escorias con alto índice de basicidad son más activas que las otras; mientras que gran cantidad de material cristalino reduce su actividad hasta cero en el caso de escorias completamente cristalizadas, o sea, sin material vítreo.

En la práctica se distinguen según el proceso de enfriamiento entre:

- Escoria granuladas, gran cantidad de material amorfo, mucha humedad.
- Escorias peletizadas, gran cantidad de material amorfo, mucha humedad.
- Escorias de enfriamiento lento, poco material amorfo, no apropiadas para la producción de cemento Portland puzolana.

Debe tomarse en cuenta que los factores determinantes, para la selección de los materiales son:

- Composición química y mineralógica.
- Influencia sobre el proceso de quemado.
- Influencia sobre la calidad del cemento.
- Posibilidad económica de suministro de material.

## 2.4. PROPIEDADES, PRUEBAS: FISICAS Y QUIMICAS.

La conducta durante la fabricación y las propiedades del cemento producido están influenciadas por la finura y grado de contacto de la mezcla de las materias primas y por la presencia en ellas de impurezas. Las diferencias en la granulometría y en la densidad de las materias primas componentes pueden originar segregaciones. La temperatura a la que se combinan satisfactoriamente las materias, es una función del tamaño máximo de partículas que existen en ellas, cuanto mayores sean las partículas, la temperatura requerida será más alta.

La naturaleza de las partículas mayores es también importante, granos grandes de cal o sílice producen zonas de clínker pobres en sílice o cal. La falta de cal va acompañada por una baja resistencia mecánica del cemento. El exceso de cal, por otra parte, entraña el riesgo de falta de estabilidad de volumen, es decir que puede producirse la expansión debida a la hidratación de cal, después de que el cemento ha fraguado. Este riesgo se hace particularmente grande con cal calcinada a alta temperatura, requerida en caso de cal gruesa.

La sílice libre, por ejemplo la arena resulta más difícil de combinar que los silicatos o aluminosilicatos. Este efecto es independiente del índice de sílice, de tal forma que una mezcla arenosa es más difícil de combinar que una mezcla arcillosa del mismo índice de sílice.

Así, la finura requerida para la combinación de los cuatro óxidos principales depende en gran parte de sus proporciones relativas en la mezcla y en particular de la forma en que se encuentra la sílice. Una combinación adecuada parecería requerir una homogeneidad razonable en la composición de la mezcla. Teóricamente sería lo ideal disponer cada partícula de un material en estrecho contacto con los números correspondientes de partículas de las otras materias primas. La exigencia en homogeneidad lleva consigo, primero, la necesidad de evitar la existencia de cal y sílice sin combinar, y en segundo lugar disminuye la posibilidad de alcanzar la combinación con una calcinación mínima.

Las impurezas principales que existen en las materias primas y que tienen efectos significativos sobre las propiedades del cemento son: La magnesia, los compuestos de flúor, los fosfatos, los óxidos de plomo y zinc, los álcalis y los sulfuros, entre otros.

La magnesia u óxido de magnesio, se considera perjudicial porque en el proceso normal, con velocidad de enfriamiento del clínker relativamente lenta, puede quedar en el cemento como periclasa, capaz de sufrir expansión en la hidratación mucho tiempo después de que el cemento esté endurecido; pudiendo desintegrar al mortero o concreto, cuando la cantidad de periclasa es superior al 5 % (como una precaución adicional se realiza un ensayo de estabilidad de volumen en autoclave) en el clínker, el cemento puede ser ya expansivo. Las escorias de alto horno contienen a veces mucho óxido de magnesio, si son elegidas para la fabricación hay que prestar atención a que permanezca dentro de los límites permisibles en el clínker. por lo general se encuentra en la caliza como dolomita.

El flúor. Se presenta normalmente en forma de fluoruro cálcico; en las materias primas produce disminuciones considerables en las propiedades mecánicas del cemento, siendo estas propiedades inferiores a las que se consiguen en ausencia del flúor. Por tanto al menos de que exista una necesidad especial a causa de su acción fundente, debe considerarse el flúor como un elemento no deseable y eliminario de las materias primas.

Los fosfatos, afectan adversamente la operación en el horno y en el fraguado y endurecimiento producido. Se ha demostrado que un contenido del 0.20 - 0.25 % en el cemento produce un óptimo efecto beneficioso sobre las propiedades mecánicas, pero que en más de un 0.5 % es perjudicial (tiene como consecuencia fuertes retrocesos).

Los óxidos de plomo y zinc, al igual que los compuestos de flúor, tienen una acción mineralizante o fundente; así se ha descubierto que un 1 % de óxido de zinc reduce del 7.5 al 2.7 % la cal no combinada en materias primas difíciles, calcinadas a 1500 °C. Ambos óxidos actúan de manera nociva sobre las

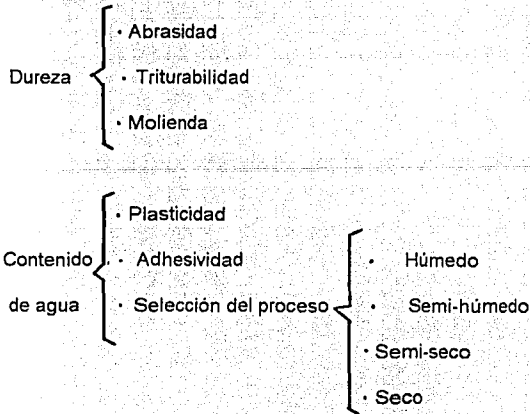


propiedades del cemento, afortunadamente para la fabricación del cemento, estos óxidos se concentran generalmente en zonas mineralizadas de caliza, que por lo general son rechazadas.

Los álcalis, afectan el funcionamiento de la planta y las propiedades del cemento acabado. Estos proceden principalmente de los materiales margosos y arcillosos en que están presentes en forma de inclusiones finamente dispersas en el seno de los feldespatos, de los restos de mica y mineral de illita, y en pequeña cuantía cuando se aplican combustibles sólidos, en las cenizas de carbón.

El fósforo, el contenido de este en la mayor parte de las materias primas naturales para el cemento es bajo. En el caso de que se utilicen materiales ricos en fósforo (residuos de la fabricación de ácido fosfórico), el límite permisible de fósforo en el clinker es del 2.5%, sin embargo contenidos más altos de un 0.5% ya pueden tener como consecuencia fuertes retrocesos, particularmente en las resistencias iniciales.

La composición mineralógica es decir, la estructura mineralógica en las materias primas del cemento influyen en :



Reactividad → Comportamiento al quemado

Aunque el proceso de elaboración del cemento es básicamente el mismo, en el se distingue como se observa varios tipos de proceso en cada uno de los cuales, se pueden tener diferentes grados de recuperación de calor en un sistema de calcinación; lo que da lugar a muy distintas eficiencias térmicas en ellos. Los hornos de proceso seco con precalentador de suspensión y precalcinador son los más eficientes, por su menor consumo de energía, es por ello el enfoque de estudio al proceso vía seca.

### 3. ETAPAS DE LA FABRICACION DEL CLINKER.

#### 3.1. PREPARACION DE LAS MATERIAS PRIMAS.

El objeto de preparación de las materias primas en el proceso seco es disponer , para la calcinación de un material apropiadamente dosificado, íntimamente mezclado (el polvo seco, llamado "grano molido crudo", se bombea al silo de mezclado y se hace un ajuste final en las proporciones de los materiales requeridos, para la manufactura del cemento), y de finura suficiente para asegurar que tiene en el horno la combinación deseada. La uniformidad de composición y la finura requerida se alcanzan a través de métodos que varían ampliamente, según la naturaleza de las materias primas.

La dosificación empieza muchas veces en la cantera; la apertura de canteras de las materias primas, se realizan a cielo abierto, llevando a cabo un desmonte previo de las zonas que según el plan previsto, han de ser las del comienzo de la explotación. Las rocas más duras, como las calizas, las pizarras y ciertas arcillas endurecidas, son fragmentadas por medio de voladuras, abriéndose plataformas escalonadas, según la topografía específica del terreno. Rocas más blandas, como la creta, margas, esquistos, arcillas pueden extraerse directamente por medio de excavadoras.

Todos los materiales obtenidos por la voladura, son depositados en la base de la cantera después del arranque, y son transportados a la operación siguiente donde, se trituran comúnmente en dos fases: trituración primaria y trituración secundaria. La roca triturada se muele después en molinos de bolas; los molinos son cilindros de acero recubiertos interiormente con placas de acero austenítico y divididos en su interior en dos o tres cámaras, los elementos molidores son bolas de acero al carbono, que llenan aproximadamente un tercio del volumen del molino.

Las molendas se clasifican en orden a:

- Rechazar el material grueso en el caso de una molenda en circuito abierto, o;
- obtener la deseada eliminación de partículas gruesas, sin una superproducción de finos y; sin rechazar material, en la molenda en circuito cerrado (realimentación).

Teniendo control cuidadoso de la alimentación de materias primas a los procesos de trituración y molienda, se obtiene, en una primera aproximación, la composición química deseada para la formación del clinker; la necesidad de una dosificación posterior depende del éxito alcanzado. En el proceso seco, la mezcla de polvo seco se suele homogeneizar en silos por una circulación inducida por fluidificación, esto es para obtener una mezcla íntima y uniforme.

La alimentación del crudo obtenido, es introducida a un precalentador para hacer más eficiente el funcionamiento del extremo superior del horno, al final de este es conectado un precalcinador el cuál aumenta aun más la temperatura del material, elevando la producción del horno. El material pasa al extremo superior (boca), desde la que es transportado por efecto de la pendiente y de la rotación del horno hacia el extremo inferior, más caliente. Las llamas producen en su proximidad la zona de combustión, en la que se forman los compuestos para la formación del clinker.

### 3.1.1. EXPLOTACION EN LA CANTERA.

El proceso de extracción depende de las condiciones geológicas del o de los bancos, de la naturaleza de la roca, de la altura de explotación prevista y de la futura utilización de los productos. Dependiendo de la topografía del área, una cantera se desarrollará como un ladera de montaña o como un tajo. Donde el área es montañosa y la roca sobresale, la cantera se desarrollara abriendo una cara en uno de los lados de la montaña. El punto de entrada es generalmente en una veta muy gruesa. Un punto conveniente se escoge para propiciar un nivel casi a raz del piso con tan sólo el suficiente declive para drenaje natural.

Cuando el terreno es casi plano, es necesario crear rampas hacia abajo hasta el yacimiento formando un tajo que esta totalmente debajo de la superficie del terreno circundante.

En material que corre libremente, como la arena suelta y seca, el único límite para la altura del banco es el impuesto por la seguridad. Si una formación puede permanecer con paredes verticales o sobresalientes, y se excava desde el fondo, el frente no deberá ser más alto de lo que la máquina puede alcanzar, ya que puede ser necesario desprender con el cucharón los pedazos que sobresalen, para evitar el peligro de los caídos. La mitad de esta altura usualmente es más conveniente y puede permitir una mayor producción, si la parte superior del banco no se mantiene cayendo a medida que la parte más baja del frente se corta.

Cuando se trabaja en roca, la altura del montón de la roca tronada es la que cuenta y no la del frente, la cantidad del asentamiento depende mayormente de la proporción entre la altura del frente y la profundidad a que se dinamita. Las alturas menores de la mitad de altura del pivote del brazo de ataque, puede hacer difícil llenar el cucharón.

Siempre que una formación que no se derrumbe sea demasiado profunda para una excavación conveniente, se extrae por capas. En el trabajo de pala estas se llaman escalones; estos pueden ser desde 2m. a 60m. de altura. El mejor lugar para iniciar el escalonamiento es en la parte superior, lo que a menudo no se toma en cuenta por otras consideraciones, de manera que el trabajo de una ladera puede iniciarse en el fondo o la mitad, corrigiendo su forma posteriormente. El ancho de un escalón desde la orilla hasta el pie de la roca sin tronar, deberá ser por lo menos, de 15m., los anchos mayores son mejores.

La maquinaria para carga utilizada en la excavación de una explotación a cielo abierto, puede dividirse toscamente en cargadores frontales, que dependen de la tracción en el piso del foso para la fuerza de excavación; las palas mecánicas con cucharón de brazo de ataque y los bulldozer, que trabajan hacia abajo del talud del banco.

La selección de la maquinaria dependerá de las características de la localización y excavación de las formaciones; del volumen del rendimiento requerido; del tipo de las unidades de acarreo o de transporte . Las máquinas grandes son apropiadas para las formaciones duras y gruesas y para elevada producción. La producción usualmente no aumenta en proporción directa a la potencia y al peso, ya que la construcción más maciza de las unidades más pesadas puede requerir velocidades menores y puede faltar espacio para una operación conveniente. Para cualquier excavación son esenciales las cuchillas afiladas para el mejor trabajo; en formaciones duras, los dientes separados apropiadamente darán mejores resultados que las cuchillas rectas. Es una buena práctica, aunque no siempre esencial, combinar adecuadamente el tamaño de las unidades de carga y acarreo.

### 3.1.1.1. VOLADURA

La voladura con explosivo tiene por objeto disgregar los bancos de roca y obtener una fragmentación en bloques de un tamaño que permita la manutención por los medios disponibles y la entrada en la trituradora primaria.

En los métodos actuales de voladura, la explosión no emplea más que el tiro sistemático, es decir, ordenado de tal forma que produzca a intervalos definidos una voladura en masa que permita asegurar un aprovisionamiento regular de la instalación de preparación de material. El tiro sistemático es llevado:

-Sea por barrenos profundos con frente en un solo escalón.

-Sea por barrenos de pequeña o media profundidad con frente en escalonado o bancos.

Los yacimientos homogéneos, de potencia elevada, con frente de gran anchura aplican normalmente la voladura con barrenos verticales profundos con o sin perforaciones horizontales de pie, (fig. 2). Los barrenos son realizados casi siempre con inclinaciones de  $10^\circ$  a  $15^\circ$  y perforando de 3 a 5 filas de barrenos al tresbolillo, con lo que se logra una mejor fragmentación.

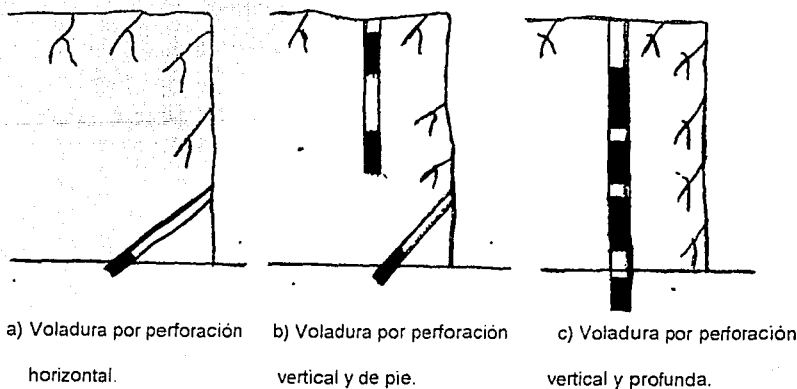


FIG. 2

Mientras que las canteras con bancos heterogéneos, con yacimientos de poca potencia o con frente de poca anchura, efectúan más bien la voladura por perforaciones de poca profundidad; en cuanto a las pequeñas canteras, se contentan a veces con voladuras con perforaciones horizontales en la parte baja del frente. En general la plantilla de voladura se determina por la geología del material a quebrar, la fragmentación requerida, el diámetro del barreno y la profundidad y tipo de explosivo.

**GEOLOGIA.** La geología del material a quebrar es el factor más importante para determinar el diseño total de la voladura. Existen algunas teorías que relacionan la velocidad sónica y la dureza de la roca utilizada para determinar la cantidad de explosivo requerida para quebrar el material. Para determinar estos factores, es necesario llevar a cabo numerosas pruebas de campo. En la mayoría de los casos, los resultados se basan en la suposición de que el material a quebrar es homogéneo. Los resultados de estas pruebas pueden ser usados como guía para ayudar a determinar el espaciamiento y bordes de los barrenos, la cantidad y tipo de explosivo requerida. Pero el análisis final de la determinación se basa en un factor de juicio obtenido a través de la experiencia.

En algunas ocasiones, el grado de penetración de la barrenación se utiliza como una guía para determinar la naturaleza de la roca. Este no es necesariamente un buen criterio en la dificultad de quebrar el material. En muchos casos una roca muy dura y quebradiza volará con menos dificultad que una roca suave y esponjosa.

Como ya se mencionó la estratificación de la formación es un factor muy importante en el diseño de la voladura; donde la estratificación consiste de vetas laminadas delgadas y horizontales, la roca generalmente puede quebrarse y ser fragmentada adecuadamente con bordos y espaciamientos lejanos y un consumo bajo de explosivos, si la formación es masiva con sólo unas cuantas laminaciones requerirá de bordos y espaciamientos cercanos y un consumo alto de explosivos.

Cuando la estratificación tiene un ángulo agudo de inclinación es ventajoso generalmente desarrollar la cara de la cantera con un ángulo no menor de 45° (y de preferencia 90°) de inclinación con respecto a la estratificación; frecuentemente, la dirección del desarrollo no es un factor controlable y la cara debe



desarrollarse paralela a la estratificación. En este tipo de desarrollo, los bordos y espaciamentos deben ser reducidos y la barrenación en ángulo que coincidirá con el ángulo de la laminación deberá considerarse muy seriamente.

**FRAGMENTACION.** El grado de fragmentación requerida esta relacionada con el tipo y tamaño de equipo de cargado y del tamaño y tipo de quebradora que se tenga disponible.

Frecuentemente un incremento en el consumo de explosivos mejorará la fragmentación a un grado más que compensar el costo adicional de los explosivos y la perforación con reducción en el mantenimiento del equipo e incremento en producción. Toda operación minera tiene: costos fijos que no varían apreciablemente con la producción ; y costos de operación incrementables que varían directamente con la producción. El costo incremental de cada fase de producción debe balancearse uno con otro para dar como resultado el costo por tonelada más bajo posible del producto terminado.

**DIAMETRO Y PROFUNDIDAD DEL BARRENO.** La geología de la formación es el factor principal en la selección del diámetro del barreno, debido a que es el único factor en el diseño total de la voladura que no puede ser alterado. Por lo tanto, la selección del tamaño del diámetro debe ser compatible con la geología. El método de operación y la selección del equipo son entonces determinados por la fragmentación deseada, y se obtiene a partir del diámetro del barreno en relación con el explosivo que se este utilizando.

La altura de la cara puede ser determinada por el espesor de la formación, pero la mayoría de las formaciones exceden los límites prácticos de espesor operable, el factor determinante en la selección de la altura de los bancos está basado en la seguridad.

El costo de los explosivos requeridos para quebrar una tonelada de roca no se afecta apreciablemente por la selección del diámetro de barreno. Sin embargo, la economía total de los costos de perforación, cargado de la voladura y quebrado si son afectados por la selección del diámetro del barreno. En formaciones masivas duras, el factor más importante que debe considerarse es la distribución de explosivos a lo largo del área de voladura.

Si se examina el mecanismo de la forma en que la roca es quebrada por una explosión, observaremos que al detonar un explosivo dentro de un barreno se produce en la roca una onda de choque. La magnitud y forma de esta onda que se mueve rápidamente en varios puntos de la roca depende de diversos factores : tipo de explosivo ; tipo de roca ; longitud de la columna de explosivo en relación al diámetro del barreno ; distancia del barreno ; número de puntos de cebado ; y relación de la velocidad de detonación a la velocidad de propagación de la onda en la roca. Es importante considerar que estas ondas salen muy rápido del barreno de la voladura, a velocidades de 10,000 a 20,000 pies por segundo dependiendo de la roca. La onda de propagación de rocas duras es más rápida que la propagación en rocas blandas. La mayoría de las fracturas producidas en la roca son radiales al barreno y están asociadas con la propagación de las ondas de choque .

Los astillamientos en la frente producidos por las ondas de tensión reflejadas producen muy poca fragmentación con los bordos normalmente utilizados en las condiciones de campo de las voladuras (fig. 3). Por lo que resulta obvio que los planos de fractura inherente de la veta en la roca son un factor importante para determinar la plantilla de la voladura. Si los planos de la fractura están ampliamente espaciados, las fracturas radiales producto de la propagación de las ondas de choque promovidas por los gases explosivos serán interrumpidas dando como resultado una fragmentación pobre.

Bajo estas condiciones el bordo y espaciamiento de los barrenos debe reducirse. Si los planos de fractura inherentes estan espaciados en forma cercana, el material puede quebrarse más fácilmente y con diámetros de barrenos mayores.

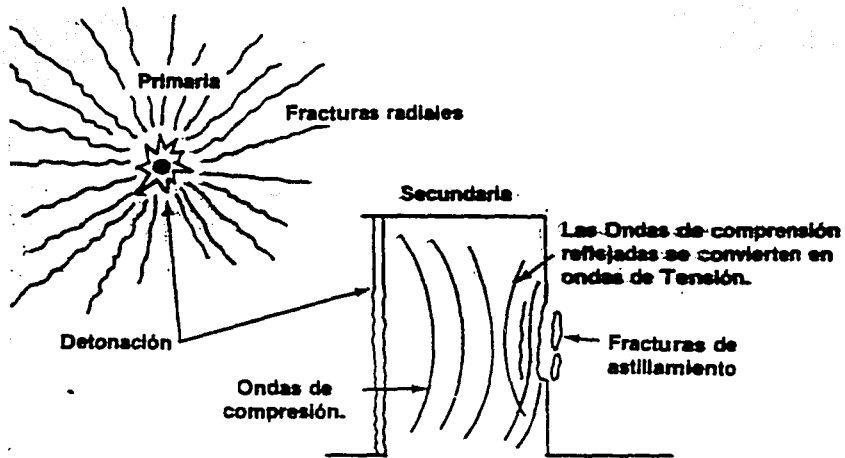


FIG.3

Las fracturas radiales producidas viajan a velocidades de 0.15 a 0.4 veces la velocidad de las ondas de choque. Esto significa que las fracturas pueden estar viajando a 8,000 pies por segundo, en rocas densas y macizas. En rocas con baja propagación de onda las fracturas desarrollan de 1,500 a 4,000 pies por segundo. Estudios sobre el mecanismo del movimiento de las rocas en las canteras han demostrado que el tiempo inicial del movimiento de la frente dependerá grandemente de la cantidad de bordo frente al barreno. Cuando se utilizan bordos de 8 a 20 pies, el movimiento inicial de la frente ocurrirá en menos de 15 milisegundos. La red de las fracturas se establece y el movimiento de roca en la frente principia en un período de tiempo después de la detonación aproximadamente igual a un milisegundo por pie de bordo en el barreno. El proceso de fragmentación ocurre en un tiempo relativamente corto, 5 a 15 milisegundos; la roca quebrada se mueve a una velocidad relativamente lenta de 50 a 100 pies por segundo es decir toma mucho mas tiempo, por lo que este tiempo juega un papel importante en el diseño de la voladura para obtener la fragmentación deseada.

La separación entre barrenos (H), como norma general, la obtendremos multiplicando por 1.3 la línea de menor resistencia (ver fig. 4):  $H = 1.3 D$

La altura de los bancos, puede ser muy variable, siendo la mas aconsejable la comprendida entre 12 y 20 m. Infiuye en la altura el talud, altura de carga de las máquinas cargadoras, capacidad de las perforadoras, tamaño del material a arrancar, y sobre todo la seguridad.

Diámetro de perforación oscila entre 40 mm., en la perforación a martillo de mano en pequeños rebajes, a 200 mm. en canteras grandes.

Sobreperforación, es conveniente dar una longitud mayor al barreno de la que se prevé en el arranque , ya que de no hacerlo así la voladura saldría defectuosa y con repiés. Como regla general, calcularemos la sobreperforación multiplicando por 0.3 la distancia D (línea de menor resistencia). Sobreperforación =  $0.3 D$

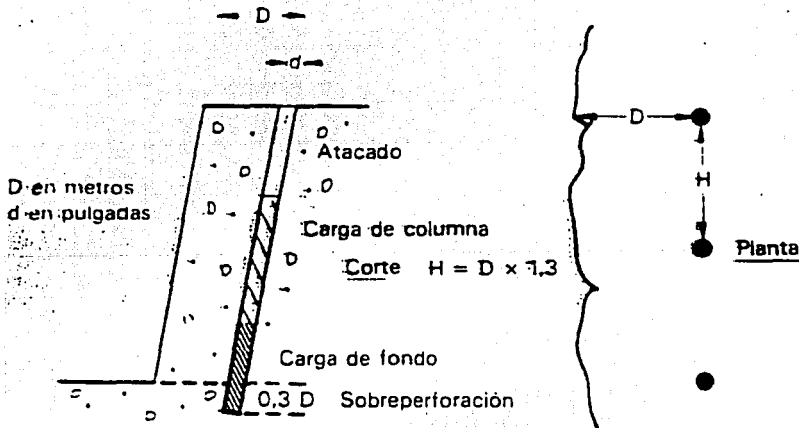


FIG.4

Es aconsejable dar una pequeña inclinación a los barrenos aproximadamente  $15^\circ$  con respecto a la vertical, ya que con ello obtenemos menos repés y una mejor fragmentación. Con respecto al consumo del explosivo, lógicamente es variable en cada caso particular; con una cierta aproximación se puede decir que se consume entre 300 y 400 gramos de explosivo por metro cúbico a arrancar.

#### PLANTILLAS DE BARRENACION.

Las plantillas más frecuentes usadas son cuadradas, rectangulares y en tresbolillo.

La plantilla cuadrada, tiene igual bordo y espaciamento ; los barrenos en cada fila estan alineados directamente detrás de los barrenos de la fila de enfrente (fig. 5).

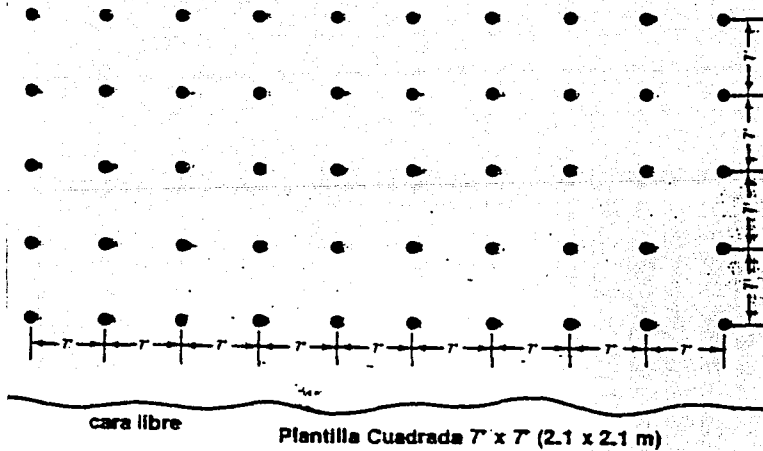


FIG.5

La plantilla rectangular, tiene bordo menor que el espaciamento. Los barrenos en cada fila están alineados detrás de los barrenos de la fila de enfrente. Fig. 6.

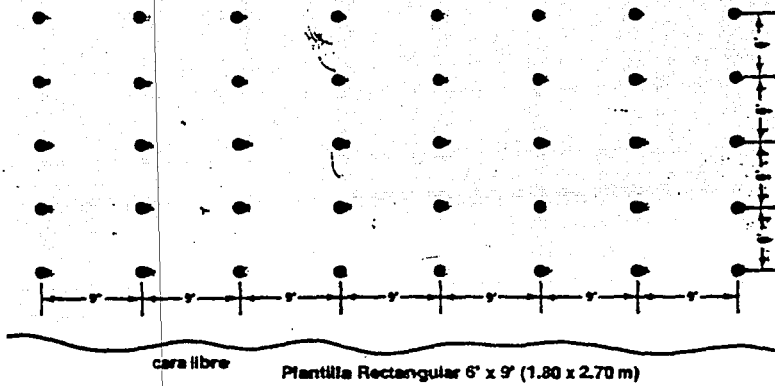


FIG. 6

La plantilla en tresbolillo puede tener también el bordo y espaciamento igual, sin embargo, es más usual con el bordo menor que el espaciamento. Los barrenos en filas alternadas están a la mitad de el espaciamento de la fila de enfrente (fig. 7), las plantillas en tresbolillo, generalmente requieren barrenos extras para lograr un banco uniforme a cada extremo de la voladura.

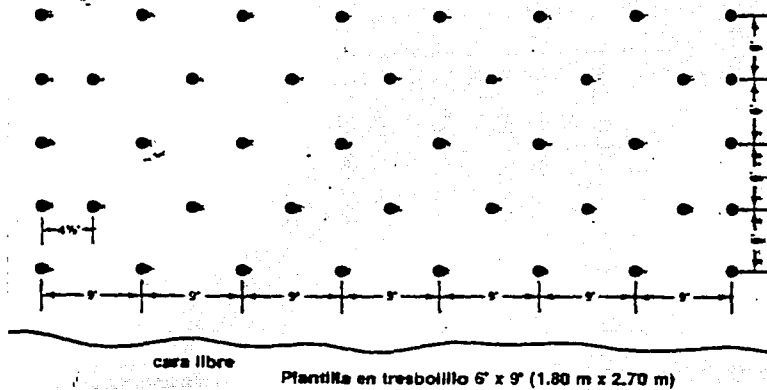


FIG. 7

Plantilla de retardo MS en "V". La plantilla en "V" puede aplicarse en la mayoría de las formaciones ; puede ser adaptada fácilmente a las plantillas cuadrada y rectangular.

Cuando se utiliza esta plantilla con una plantilla de barrenación cuadrada, el ángulo de movimiento es de 45° con respecto a la cara libre. Si se utiliza una plantilla de barrenación rectangular el ángulo de movimiento variará en relación con las dimensiones relativas de bordo y espaciamento.

Para determinar el ángulo de movimiento en relación con la cara abierta para una plantilla rectangular donde :

$b =$  bordo

$s =$  espaciamento

$a =$  ángulo de movimiento

$\tan a = b / s.$

Para determinar el bordo y espaciamento efectivos en relación con la dirección de movimiento donde :

es = espaciamiento efectivo

eb = bordo efectivo

es = b / sen a

eb = (s) (sen a).

En la mayoría de las formaciones el ángulo de movimiento no deberá ser menor de 15° con respecto a la cara libre. La plantilla de retardo MS-V frecuentemente es la plantilla más utilizada para diámetros de barreno de 3 1/2 a 5 pulgadas con profundidades hasta de 60 pies.

Plantilla de retardo MS ECHELON. Cuando el área de voladura está abierta en dos lados adyacentes en una esquina externa, la voladura debe diseñarse para utilizar este alivio adicional (fig. 8).

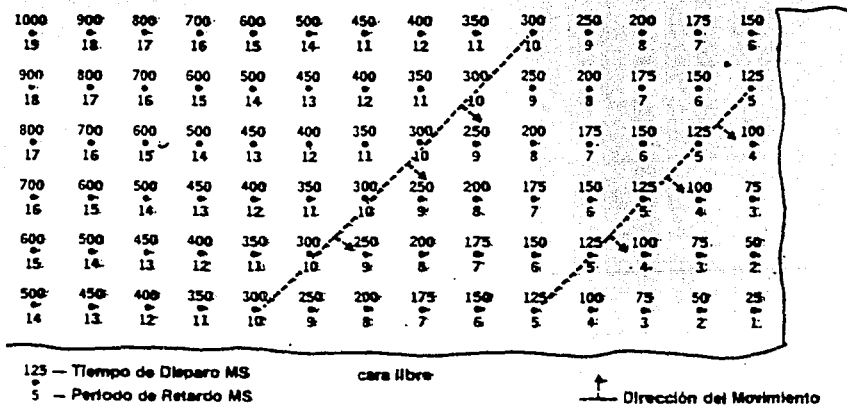


FIG. 8

Plantilla de retardo MS EN CANAL. Frecuentemente las canteras deben abrirse en terrenos de la ladera donde no hay suficiente área abierta frente al disparo para el movimiento asociado con las plantillas de



retardo MS -V o ECHELON. En estos casos la plantilla MS en canal puede ser utilizada para confinar el movimiento de la roca quebrada al área de la voladura, la única dirección de movimiento de los barrenos iniciales es vertical ( fig. 9 ).

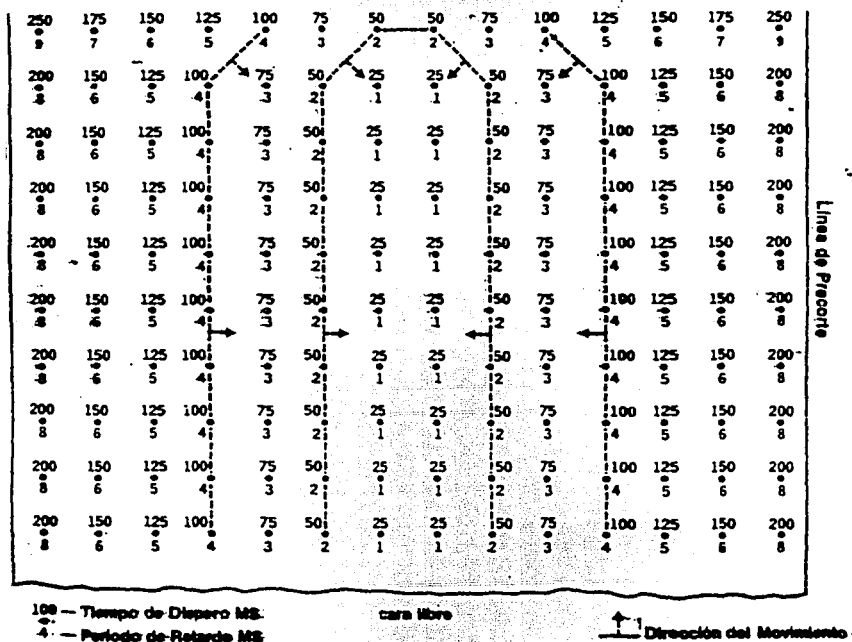


FIG. 9

Plantilla de retardo MS DE CARA PLANA. La plantilla de cara plana moverá el material quebrado más lejos de la cara y generalmente resultará en roca de mayor tamaño; esta plantilla debe utilizarse únicamente para condiciones especiales. Se utiliza casi siempre con una plantilla en tresbolillo a menos que bloques grandes de material se deseen, (fig.10).

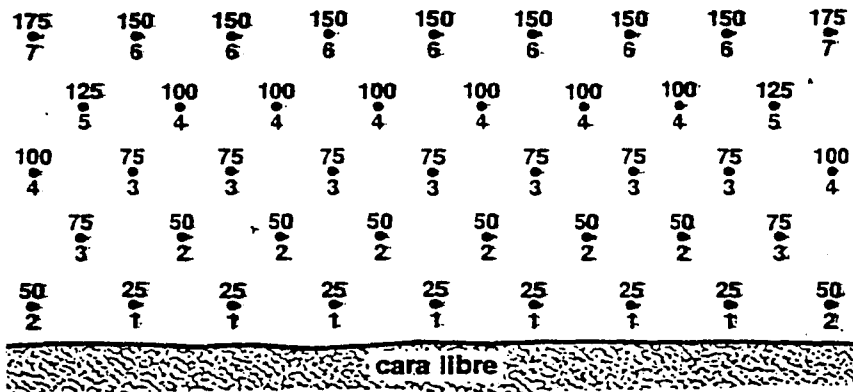


FIG. 10

Plantilla de retardo MS DE BARRENOS ALTERNADOS. Esta plantilla ha sido utilizada con éxito limitado en formaciones laminadas delgadamente con espaciamentos muy amplios. No es recomendable para la mayoría de las formaciones, (fig. 11).

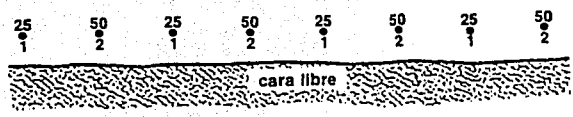


FIG. 11

## VOLADURA CON RETARDO DE MILISEGUNDO.

Aun cuando se dispara a una cara libre el tiempo de movimiento de la roca puede ser un factor muy importante. Esto es particularmente cierto en disparos con múltiples filas; con una o dos filas de barrenos el movimiento primario es directamente alejándose de la cara.

Al incrementarse el número de filas, el movimiento de la roca tenderá hacia la vertical, esto es causado por la baja velocidad de la roca quebrada reduciendo consecuentemente el alivio hacia la cara de la cantera. Esto puede contribuir a producir un fondo "apretado" así como roca en vuelo. Es una práctica común de varios pobladores el duplicar el tiempo de retardo en la última fila, esto proporciona un tiempo adicional para que la roca delante de la última fila pueda moverse hacia el frente o incrementar el alivio en la última hilera.

El tamaño del barreno, los espaciamentos y bordos, y la altura de la cara tienen un efecto importante en el número de hileras que pueden dispararse excesivamente sin un apilamiento excesivo o sin encontrar un fondo alto. Cuando la roca se quiebra esta ocupará un 25 % más de área, este factor de abundamiento podrá variar con el tipo de roca. En la mayoría de los casos el material sólo tiene dos direcciones para moverse, hacia el frente y verticalmente, obviamente un movimiento excesivo puede resultar una peligrosa roca en vuelo. Una voladura bien controlada, el movimiento hacia adelante de las hileras frontales no variará proporcionalmente con el bordo como lo marcado por el diámetro del barreno.

La ejecución de la voladura con explosivo comporta tres operaciones: Perforación para el explosivo, la carga de las perforaciones y el tiro. Las voladuras en masa para grandes alturas (40 a 60 ) se efectúan por líneas de perforaciones verticales profundas y paralelas al frente.

El plan de tiro comporta una o varias líneas de perforaciones (en la plantilla), la línea de menor resistencia, carne o piedra (D), es la distancia existente entre el frente libre y la primera línea de barrenos paralela a dicho frente, varía en cada caso particular y depende de muchos factores (tipo de explosivo, clase de roca, estratificación, diámetro de los barrenos, etc.). Para calcular práctica y rápidamente la línea de menor resistencia es muy eficaz la siguiente regla:

$$\text{Diámetro del barreno en pulgadas} = \text{Distancia al frente en metros.}$$

Plantilla de retardo MS- VOLADURA DE HUNDIMIENTO. Al abrir una nueva cantera o comenzar un nuevo levantamiento en una cantera ya existente, puede ser necesario hacer una voladura de hundimiento; esta varía del resto de las voladuras, pues no hay cara abierta para alivio. La dirección primaria del movimiento debe ser vertical. Debido a que el disparo completo estará "encajonado" es más probable que se produzca daño potencial por vibraciones y roca en vuelo, (fig. 12). En la mayoría de las formaciones es necesario disminuir el bordo y espaciamiento de los barrenos iniciales de la plantilla de retardo para abrir un área de alivio para los barrenos restantes.

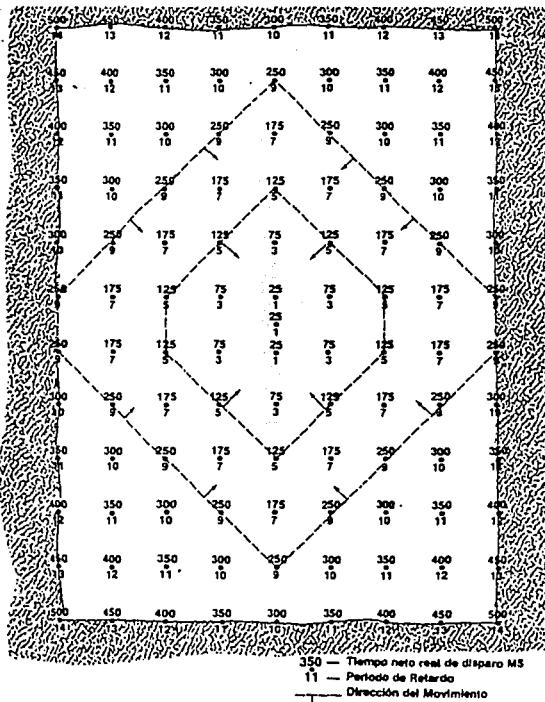


FIG. 12

Plantillas con CORDON DETONANTE. El cordón detonante y los conectores de retardo MS pueden ser usados en las mismas plantillas mostradas para las capsulas MS de retardo. El conector de retardo MS es un retardo de superficie que interrumpe la detonación del cordón por un período de tiempo determinado y reinicia posteriormente al cordón. Con el movimiento de tierra siempre están presentes cortes potenciales del cordón detonante.

## EXPLOSIVOS.

Los explosivos son sustancias químicas, generalmente en estado sólido, cuya rápida transformación en gases a temperatura elevada da lugar a un considerable y rápido aumento de volumen y temperatura. Los explosivos se transforman en gases de dos modos distintos: a la velocidad de unos metros por segundo, a lo que se denomina deflagración o a la de varios kilómetros por segundo, denominándose entonces, detonación.

Existen distintos y variados tipos de explosivo que se diferencian entre sí por su potencia, sensibilidad, estabilidad, velocidad de detonación, densidad, resistencia a la humedad, plasticidad, temperatura de explosión, producción de gases nocivos, entre otros. La selección del explosivo adecuado para un determinado trabajo depende de diversos factores: trabajo en exterior o subterráneo, existencia de atmósfera inflamable o explosiva, presencia de agua o humedad, tipo de roca o mineral a volar, grado de fragmentación que se desea, diámetro de los barrenos, etc.

Para provocar la reacción explosiva entre las diversas sustancias que componen un explosivo es preciso partir de una pequeña detonación inicial, cuya onda explosiva actúa como cebo iniciador y da lugar a la explosión principal. Esto se consigue con los denominados detonadores, colocados convenientemente en un cartucho llamado cebo, o bien, adosados a cordón detonante. Al hacer explosión el cartucho cebo o el cordón detonante en un barreno, lo hace también por simpatía el resto del explosivo.

Las operaciones de perforación, carga con explosivo y disparo de los barrenos se denomina pega o voladura.

### Características de los explosivos.

Las principales según su composición, son las siguientes:

Estabilidad química, cuando el explosivo se mantiene químicamente inalterado bajo determinadas condiciones de almacenamiento.

Velocidad de detonación, es la que nos indica la velocidad de la onda explosiva, esta velocidad en los explosivos industriales está comprendida entre 2000 y 6000 metros por segundo; existe el error de

considerar más eficaz un explosivo cuanto mayor es su velocidad de detonación, lo que no se ajusta a la realidad. En rocas blandas y elásticas (arcillas, margas, yesos), nos dará mejor resultado un explosivo de baja velocidad; por el contrario, en rocas muy compactas y cristalinas, como el granito, es aconsejable la utilización de explosivo de alta velocidad.

Aptitud a la propagación, define la facilidad de transmitir la detonación de un cartucho a otro, cuando están en contacto o existe un elemento que los separe; cuando la detonación de un cartucho provoca la de los inmediatos, se dice que lo efectúa por simpatía.

Potencia explosiva, nos indica la capacidad del explosivo para producir roturas mecánicas y consecuentemente arranque de la roca o mineral. Como tipo de referencia se toma el del explosivo goma pura, al que se le da un coeficiente 100.

Resistencia a la humedad, es una de las características más importantes en un explosivo; los explosivos a base de nitrato amónico, en general, son poco resistentes a la humedad, por el contrario, los que contienen nitroglicerina, por su impermeabilidad, se comportan mejor en ambientes húmedos o con agua, tal es el caso de las gomas.

Densidad de encartuchado, depende en gran parte de la granulometría de los componentes sólidos y materia prima utilizada en su fabricación. Por regla general los explosivos tipo goma y los hidrogeles (explosivos plásticos) son de alta densidad; por el contrario, los pulverulentos y en grano son mucho menos densos.

En barrenos largos es aconsejable que la carga de fondo sea efectuada con explosivo denso, mientras que el resto de la carga (de columna); requiere un explosivo de menor densidad.

Resistencia a las bajas temperaturas, los explosivos que contienen nitroglicerina pueden congelarse a temperaturas inferiores a 8° C., para evitarlo, los fabricantes le añaden como aditivo nitroglicol, con lo que disminuye su tiempo de congelación hasta los -20° C.

Explosivos más usuales.

Por su aspecto físico y presentación comercial los explosivos se clasifican en: gelatinosos, pulverulentos, anfos o nagos, hidrogeles y pólvoras.

Existe otro tipo de explosivos, llamados multiplicadores, que se emplean en las voladuras para iniciar convenientemente a los explosivos de baja velocidad, como los anfos y los hidrogeles, al objeto de que éstos alcancen su máxima velocidad de detonación y desarrollen toda su potencia. Los multiplicadores están fabricados con el explosivo denominado hexolita, de alta potencia y elevada velocidad de detonación (7500 m/s).

**Gelatinosos.** Su componente primordial es la nitroglicerina, junto con otras sustancias de soporte, normalmente se les conoce con el nombre de goma. Por su potencia, son muy utilizados para la carga de fondo de barrenos, parches cuando hay agua o mucha humedad y en general para el arranque y fragmentación de rocas muy duras y cristalinas. Su inconveniente principal es que son muy sensibles a los golpes y que se congelan con facilidad, convirtiéndose muy peligroso su manejo (nunca se debe de utilizar explosivos helados, hay que destruirlos).

**Pulverulentos.** Están compuestos por nitrato amónico, como base principal. Son bastante seguros a los golpes y choques; son sensibles a la humedad, por lo que no se debe utilizar en barrenos con agua o mucha humedad.

**Anfos.** Son una mezcla de nitrato amónico y un combustible líquido. Son muy insensibles a los golpes y precisan de otro explosivo (goma o cordón detonante) para producir su explosión; son muy sensibles a la humedad, por lo que nunca se puede utilizar en barrenos con agua. Tampoco es recomendable su utilización en barrenos de un diámetro inferior a 45mm. Normalmente se presenta a granel, en sacos de plástico de 25 kg.

Hidrogeles. Se componen de un agente oxidante y un combustible, dispersos en agua , formando un gel. Son bastantes seguros a la fricción y golpes, pudiéndose utilizar en barreno con agua; por su plasticidad son muy adecuados para obtener alta densidad en la concentración de explosivo, al rellenar totalmente el hueco del barreno. Se utilizan como equivalente o en sustitución de la goma. La representación comercial es en cartuchos pastosos.

Pólvoras. Son mezclas de azufre, carbón vegetal y nitrato potásico, principalmente. No detonan sino que deflagran ; para su explosión , estando confinadas, no precisan detonador, siendo suficiente el fuego a través de una mecha. Su acción es de empuje, más que rompedora, por lo que son muy aconsejables en el arranque de marmoles y rocas ornamentales en general, al objeto de evitar la rotura y rajamiento de los bloques.

La elección de un explosivo depende de las características del banco, de las condiciones atmosféricas , de las condiciones de perforación, de la fragmentación deseada en función de la utilización de la roca y los medios de carga y transporte.

El explosivo demasiado fuerte da una fragmentación excesiva de la roca con gran producción de polvo y proyecciones a gran distancia; si no es tan potente, origina una producción exagerada de grandes bloques. Se utilizan los explosivos fuertes en forma plástica para la roca con resistencia a la voladura elevada, y explosivos menos fuertes en forma pulverienta para el gres, caliza y otras rocas de débil resistencia de voladura.

La carga de las perforaciones, la cebadora y el medio de encendido, tienen una gran importancia sobre los resultados de la voladura.

La carga de las perforaciones, es la que se introduce en el barreno, según los cálculos previamente efectuados; esta carga, según el tipo de explosivo y de voladura, variará en su cantidad y colocación.



Normalmente se concentra en el fondo (carga de fondo), suele ser de un explosivo de alta potencia y densidad, normalmente se utilizan los hidrogeles; disminuyendo en potencia y cantidad hacia la superficie (carga de columna), efectúa la rotura de la parte superior del banco es de menor potencia y densidad que el empleado en la carga de fondo, los utilizados son los anfos. La carga, cuando se trate de explosivos encartuchados debe estar constituida por una fila de cartuchos en perfecto contacto; en caso de carga discontinua, se utilizará cordón detonante en toda la longitud del barreno. Si en el barreno hubiera coqueras no se debe cargar a granel, para evitar una peligrosa concentración del explosivo.

Cartucho cebo, es aquel en el que colocamos el detonador, para que provoque la explosión y haga detonar por simpatía el resto de explosivo confinado en el barreno. El cartucho cebo va siempre colocado con el detonador en dirección al resto de la carga explosiva. En la pega con mecha, irá siempre en la parte superior; en la pega eléctrica, en la parte superior o inferior, pero nunca en el medio de la carga. Sólo se puede utilizar un cartucho cebo por barreno; el detonador se introduce al cartucho con mucha precaución; el cartucho cebo se debe preparar inmediatamente a las operaciones de carga, no antes.

El medio de encendido es aquel que provoca la reacción explosiva entre las distintas sustancias que componen un explosivo, es preciso partir de una pequeña detonación, cuya onda explosiva actúe como cebo y dé lugar a la explosión principal. La acción de cebo se ejerce por medio de los detonadores, que son pequeñas cápsulas de aluminio o cobre, en cuyo fondo se encuentra comprimida una pequeña cantidad de fulminante de gran sensibilidad, capaz de entrar en acción bajo el efecto de la llama que produce la combustión de una mecha, o el paso de una corriente eléctrica a través de un filamento embebido en una masa de producto inflamable.

Existen dos tipos de detonadores: ordinarios y eléctricos. Los detonadores ordinarios, se inician por medio de las mechas lentas, que se engarzan al detonador; los hay séxtuples (No. 6) u óctuples (No. 8), según la cantidad de explosivo que contienen. La mecha debe entrar perfectamente hasta el fondo del detonante, introduciéndola con suavidad, sin girarla; los impactos y los roces sobre el fondo del detonador son muy peligrosos (ver fig. 13).

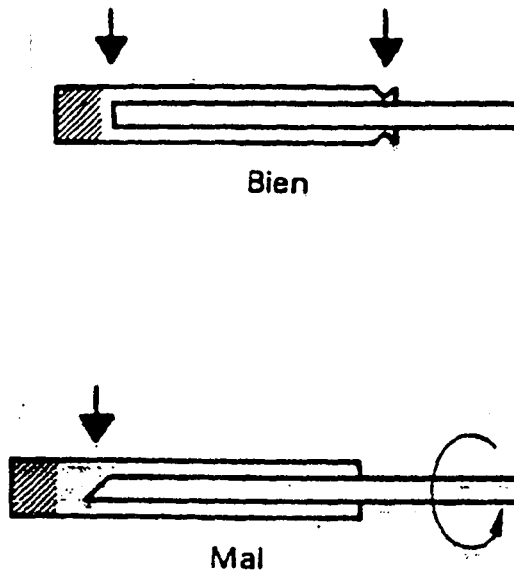


FIG. 13

En los detonadores eléctricos la explosión se produce al paso de la corriente eléctrica sobre un filamento introducido en una sustancia de materia inflamable. Los detonadores eléctricos están formados por un detonador óctuple ordinario al que se le adapta un artificio e inflamador en lugar de la mecha. Del detonador eléctrico parten dos hilos de cobre o de hierro, que se conectan con el resto de los detonadores de la voladura, formando un circuito por el que se envía la corriente eléctrica procedente de un explosor que los hace detonar.

En función del tiempo de detonación, se clasifican en: instantáneos, la explosión del detonador coincide con la de iniciación del inflamador; de retardo, en ellos el tiempo de detonación varía de un número al siguiente y al anterior en medio segundo; y de microretardo, el tiempo de detonación varía en milisegundos.

La mecha lenta u ordinaria, está formada por un núcleo de pólvora rodeado de varias capas de hilo alquitranado que le hacen más resistente. El límite de barrenos que se pueden disparar con mecha son seis; por lo que el uso de la mecha está en continuo desuso.

El cordón detonante es un explosivo de gran potencia y velocidad de detonación; es flexible e impermeable que contiene en su interior pentrita. La velocidad de detonación es del orden de 7,000 m/s, por lo que se utiliza el cordón fundamentalmente para transmitir a los explosivos la detonación iniciada por un detonador. El núcleo de pentrita va cubierto de varias envueltas de fibras textiles e hilados, con un recubrimiento exterior de PVC; con ello se le protege contra la humedad y esfuerzos de tracción y abrasión.

El cordón detonante tiene que estar muy bien adosado al detonador, en toda su longitud, y la carga de éste dirigida hacia la carga general del barreno. Si empalmamos distintos tramos de cordón detonante entre sí, todos detonan al mismo tiempo.

El retacado o atacado, es la parte superior del barreno sin explosivo, que se rellena de una materia inerte, bien apretada que asegura el confinamiento del explosivo para su mejor aprovechamiento, y evita el bocazo, que se produce cuando está mal atacado y el explosivo, al detonar, sale por la boca del barreno, en un efecto similar al de un cartucho de escopeta. La longitud debe ser igual al de la línea de menor resistencia del barreno (distancia al frente libre) y nunca inferior a 20 cm. El atacado se hará con materiales suficientemente plásticos (lo mejor arcilla húmeda), sin piedras, que no propaguen la llama y que sean antiestáticos.

Un punto muy importante son los sistemas de seguridad; la prevención de accidentes al usar explosivos es el resultado de programas cuidadosamente formulados y la aplicación de los mejores métodos; el consumidor de explosivos debe tomar en cuenta que tiene entre manos una fuerza muy potente y que existen varios artefactos para ayudarlo a controlar esa fuerza. Debe comprender que, mal controlada, puede matar o herir a él o a sus compañeros de trabajo.

Todos los explosivos son peligrosos y deben ser manejados y usados con cuidado por personas competentes y experimentadas, o bajo la vigilancia de estas; todas las personas que manejan explosivos tienen la responsabilidad de conocer y poner en práctica todas las medidas aprobadas de seguridad. Resulta imposible describir precauciones o métodos aprobados para todas y cada una de las situaciones que pudieran presentarse; en caso de duda es recomendable consultar al fabricante.

Por lo anterior se define que :

El término "explosivo" abarca todos y cada uno de los siguientes artículos: hidrogeles, agentes explosivos, pólvora negra, pólvora granulada, fulminantes (cápsulas, detonadores, estopines) regulares y eléctricos y mecha detonante.

El término "cebo" significa un cartucho en combinación con un fulminante regular o un fulminante eléctrico.

El término "fulminante (cápsula, detonador, estopín) eléctrico" abarca tanto los instantáneos como todos los tipos de retardo.

Apartir del conocimiento de lo anterior se mencionarán las siguientes "Instrucciones y Advertencias"; al transportar explosivos :

Siempre:

-Deberán acatarse rigurosamente las disposiciones y reglamentos de la Secretaría de la Defensa Nacional y de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes en vigor.

-Deberá asegurarse que todo vehículo destinado a transportar explosivos, reúna las condiciones requeridas por la Dirección General de Tránsito Federal dependiente de la S.C.T.

-Se obedecerán todas las leyes y los reglamentos federales, estatales y locales.

-Se asegurará que los vehículos utilizados para el transporte de explosivos estén en buenas condiciones de funcionamiento, que estén dotados de pisos de madera bien ajustados y sin grietas, o de algún metal que no produzca chispas. Los costados y los extremos deben ser lo suficientemente amplios para impedir la caída de la carga. La carga de un vehículo abierto debe cubrirse con una lona impermeable y resistente al fuego. Debe aislarse todos los alambres para prevenir los cortos circuitos, y cada vehículo debe estar marcado claramente para indicar al público la naturaleza de la carga que lleva.

-Se separarán los fulminantes comunes y eléctricos de otros explosivos, cuando sea permitido el transporte de estos artículos en un mismo vehículo.

-Deberá entregarse el explosivo en los polvorines o en algún otro lugar el cual esté localizado lejos de áreas populosas.

Nunca:

-Se permitirá que las cajas de explosivos estén en contacto con metal alguno, salvo el metal aprobado para las carrocerías de los vehículos. No deben transportarse sustancias metálicas, inflamables o corrosivas junto con explosivos.

-Se permitirá fumar en el vehículo ni se permitirá la presencia en el de personas no autorizadas o innecesarias.

-Nunca manejar los camiones conteniendo explosivos a través de ciudades, pueblos o villas, o estacionarlos cerca de lugares como restaurantes, garages o estaciones de gasolina a menos que esto no pueda ser evitado.

-Queme desperdicios, basura, o residuos que hayan estado en contacto con explosivos y si esto llegará a hacer, retire a todo el personal en un lugar seguro y cuide el área contra intrusos.

Por otra parte al almacenar explosivos:

Siempre:

-Deberán almacenarse los explosivos de acuerdo con las disposiciones de la Secretaría de la Defensa Nacional.

-Deberán ubicarse los polvorines en los lugares más aislados y estratégicos, respetando la tabla de distancias del reglamento de la Secretaría de la Defensa Nacional.

-Se observarán las leyes y reglamentos federales, estatales o locales para el almacenamiento de explosivos.

-Se guardarán los explosivos en polvorines limpios, secos, bien ventilados, razonablemente frescos, debidamente ubicados, sólidamente bien contruidos, resistentes a las balas y al fuego y con cerradura adecuada.

-Se consultará al fabricante si la nitroglicerina de explosivos deteriorados se a escurrido al piso del polvorín. El piso debe ser lavado con una solución aprobada para ello, a fin de insensibilizar la nitroglicerina.

-Deben construirse los polvorines en lugares alejados de construcciones, casas, edificios, carreteras o vías de ferrocarril, observando las distancias recomendadas por las leyes federales, estatales o locales.

**Nunca:**

-Se almacenarán fulminantes comunes o eléctricos o cebos con otros explosivos e una misma caja, receptáculo o polvorín. La mecha detonante nunca deberá ser almacenada juntamente con los fulminantes o cápsulas eléctricas.

-Se almacenarán explosivos, mecha o encendedores de mecha en un lugar humedo o mojado, ni cerca de aceite, gasolina, fluidos o soluciones para limpiar, calentadores, tubería de vapor, estufas u otras fuentes de calor.

-Se almacenarán en un polvorín ningún metal que produzca chispas, ni herramientas hechas de tales metales.

-Se debe fumar ni llevar fósforos, luces descubiertas u otra forma de fuego o llama dentro de un polvorín, ni cerca de el.

-Se permitirá la acumulación de hojas, hierbas, matorrales o basura dentro de un radio de 7.5 metros alrededor de un polvorín.

### 3.1.1.2. MAQUINARIA Y EQUIPO.

La clasificación de los equipos de maquinaria puede reducirse solamente a dos categorías:

- Equipos fijos y
- equipos móviles.

Los factores que influyen, en la elección del tipo de maquinaria entre otros son los siguientes:

- La tarea a realizar: por ejemplo en muchos casos la elección del equipo dependerá de las necesidades de movilidad y de transporte de los materiales, tanto horizontal como verticalmente;
- la capacidad del equipo: es importante el volumen del material a manejar en relación con el tiempo disponible en el programa de trabajo;
- la forma de realizarse el trabajo: la distancia y el sentido del transporte, la velocidad y la frecuencia del movimiento, la secuencia del movimiento, el estado del terreno;
- la comparación del coste con otras alternativas: es primordial que se analicen todas las alternativas posibles y que se evalúen sus respectivos costes.

#### Mantenimiento del equipo.

Para que el equipo sea eficaz debe funcionar en la forma para la que fué diseñado, simplemente para que justifique la inversión que implicó. Por supuesto, un equipo puede no estar en condiciones de trabajo y necesitar reparación para recuperarlas. Debe observarse que al no trabajar un equipo, no sólo se pierde el dinero que deja de generar, si no que, su paro por descompostura, resulta muy costoso si se toman en cuenta el operador y otros trabajadores y equipos interdependientes relacionados con su operación. Por estas razones importantes, es esencial mantener el equipo en buenas condiciones de trabajo, lo cuál constituye el propósito del buen mantenimiento.

Un programa de mantenimiento preventivo, comprende el procedimiento para seguir las medidas correctas que permiten conservar el equipo en buenas condiciones de trabajo.

Un buen programa de mantenimiento preventivo es una proposición que conviene considerar, sus beneficios pueden ascender a ahorros substanciales en las cuentas de reparación y un aumento considerable en la disponibilidad del equipo. La disponibilidad se refiere al período de tiempo en que el equipo es capaz de funcionar efectivamente; la disponibilidad se expresa generalmente como un porcentaje del tiempo total planeado para que trabaje el equipo. Un equipo confiable, mantenido adecuadamente, debe tener una disponibilidad mayor del 90 %; el equipo más antiguo puede tener una disponibilidad un poco más baja, pero ésta nunca debe ser menor del 80%, todo equipo cuya disponibilidad sea menor de esta cifra, debe reponerse y se diseña el programa activo de mantenimiento preventivo para mejorar la disponibilidad del equipo.

#### El tractor.

El motor es generalmente diesel; su potencia se especifica primero en potencia neta, que significa potencia en el volante con el motor moviendo todos los accesorios normales para la operación del tractor. Algunos fabricantes ocasionalmente se apartan de estas normas, y anuncian la potencia bruta sin accesorios. El segundo patrón de medida es la potencia en la barra de tiro, es una cifra menor que representa la potencia útil en la barra de tiro bajo cierto grupo de condiciones, después de deducir las pérdidas por rozamientos y deslizamientos. Esta es la forma general de especificar los tractores de propulsión mecánica directa. Los tractores de orugas con cambios de velocidad de potencia y/o convertidores de torsión se clasifican generalmente por el tiro en la barra a una velocidad especificada.

El peso y la potencia disponible de la máquina determina su capacidad de empuje; ningún tractor puede aplicar más empuje en kg. que el peso de la máquina más la fuerza máxima que suministre el tren de fuerza.



## Bulldozer.

Es el miembro menor de una clase de máquinas excavadoras que ordinariamente excavan y transportan el material al lugar de descarga y, a menudo, conforman tanto el corte como el terraplén en la misma operación.

Los bulldozer son tractores equipados con una hoja de empuje frontal, que puede levantarse o bajarse con un control hidráulico y que se utiliza para excavar y empujar.

La máquina se compone de dos secciones bien diferenciadas que comprenden:

-Una estructura de base constituida por un armazón soldado y robusto donde van los dispositivos de sujeción para la hoja dozer, las ruedas cabillas (motoras, dentadas) y los rodillos para las orugas, y los soportes para la estructura superior, y ;

-la superestructura que comprende el motor, la transmisión, el sistema hidráulico, la cabina.

Algunos modelos de esta maquinaria se muestran en la fig. 13a.

### TRACTORES DE CADENAS

Potencia en el volante: 52 a 575 kW (70 a 770 hp)

Modelos estándar

«Fabricado en Brasil»

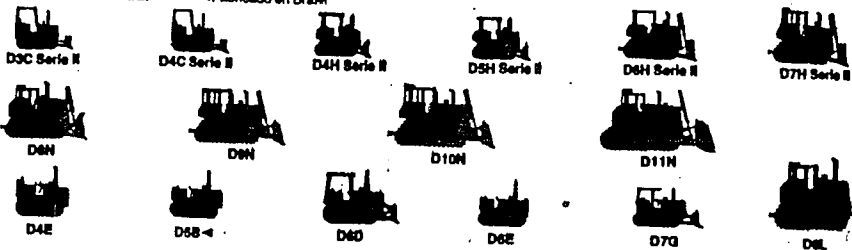


FIG. 13a

La carga mediante empuje de bulldozer es sumamente efectiva en los bancos altos con un declive suficientemente inclinado para permitirle el empuje de grandes cargas y que le permiten aún retroceder fácilmente. Los bulldozer se utilizan también para empujar el material del banco hasta el alcance de excavadoras, que son detenidas por afloraciones de roca en el pie, y mantener los bancos altos con taludes que eviten la socavación y derrumbe.

Para buena producción se requiere una adecuada relación entre la hoja topadora y el tractor, tomando en consideración primero la clase de trabajo que hará el tractor la mayor parte de su vida útil.

La mayoría de materiales se pueden mover con la hoja, su rendimiento varía con las características de cada uno, tales como las siguientes:

-Tamaño y forma de las partículas. Cuando más grandes sean las partículas, más difícil es la penetración de la cuchilla; y como las partículas de bordes cortantes se oponen a la acción natural de volteo que imparte la hoja empujadora, se necesita más potencia que para mover igual cantidad de tierra con partículas de bordes redondeados.

-Vacíos. Cuando no hay vacíos, o son muy pocos, la mayor parte de la superficie de cada partícula está en contacto con otras. Esto constituye una ligazón que debe romperse, un material bien graduado carece de vacíos y es generalmente muy denso, de modo que es difícil extraerlo del banco.

-Contenido de agua. En casi toda materia seca es mayor la ligazón entre las partículas, y es más difícil la extracción, y si está muy húmeda, pesa más y se necesita más potencia para moverla. Con un grado óptimo de humedad, es muy bajo el contenido de polvo y resulta muy fácil empujarla.

Los bulldozer van equipados con una hoja rígida de acero soldado y empujan el material hacia adelante, transmitiendo la fuerza de las orugas a la hoja por medio de dos fuertes brazos conectados a la estructura de base. La hoja está accionada por dos pares de cilindros hidráulicos. Un par de cilindros, conectados a los largueros, actúan sobre la inclinación de la hoja y, de esta forma, controlan la profundidad de excavación. El otro par va conectado a la estructura superior y sirve para subir o bajar la hoja, afectados de la excavación. Existen diversos tipos de hojas topadoras entre las que se encuentran:

-Hoja Recta. La mayoría de las hojas son curvas pero la sección perpendicular a la línea de empuje es recta, la curvatura hace que el material voltee sobre sí mismo. Cuando se siente que se levanta la parte trasera del bulldozer, es señal que la hoja empieza a hundirse; el ángulo y profundidad de la hoja se ajustan entonces para vencer la resistencia encontrada. El volúmen de material que puede ser movido hacia adelante por la hoja depende del tamaño y forma de la hoja. La distancia de empuje no debe sobrepasar 100m. puesto que la máquina resulta antieconómica para el movimiento de tierras a mayores distancias.

Es la hoja más adaptable de todas. Como es más pequeña que la hoja "U" o "SU", es más fácil de maniobrar, y puede empujar una gran variedad de materiales, tiene una buena penetración. El ángulo de ataque es ajustable controla la penetración de la hoja. Ver fig. 14a.

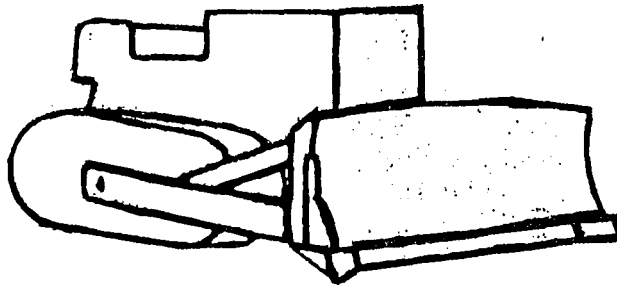


FIG. 14a

-Hoja PAT (orientable e inclinable a potencia). La versatilidad es su característica principal por poder desempeñar una gran variedad de trabajos: nivelación de acabado, relleno de zanjas, corte de zanjas en "V", formar camellones, esparcir rellenos, conformación de terrenos, desmonte ligero. Fig. 14b.

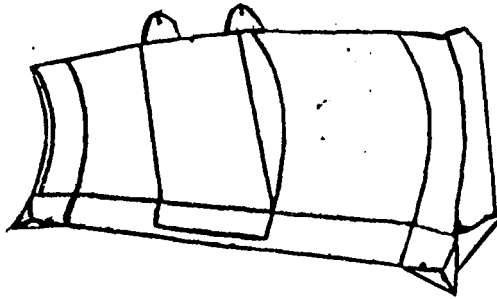


FIG. 14b

-Hoja orientable. Se puede situar en posición recta o en ángulo de 25° a la izquierda o a la derecha; el bastidor en "C" permite el montaje de otros accesorios (desmonte de tierras, de empuje). Está diseñada para derrame lateral del material, corte inicial de caminos, rellenos, apertura de zanjas entre otros (fig. 14c). No se recomienda esta hoja para aplicaciones severas ni para roca pesada.

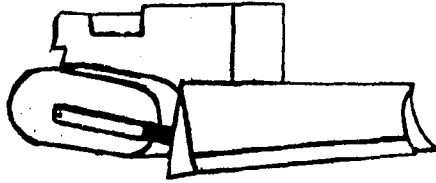


FIG. 14c

-Hoja Universal (JAEM). La hoja, en su sección transversal, tiene mucha mayor curvatura acercandose casi en una forma en "U", además los bordes exteriores están doblados ligeramente hacia adentro (flancos de 25°); con lo cual aumentan su capacidad, disminuyen los derrames (ver fig.14d). Pueden mover un gran volúmen de materiales livianos, no pegajosos. También se ofrece hojas U más pesadas para trabajos de recuperación con la hoja.

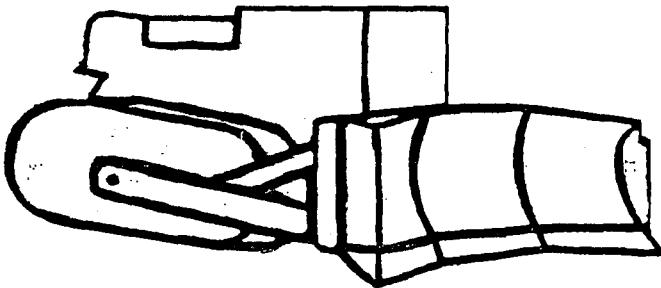
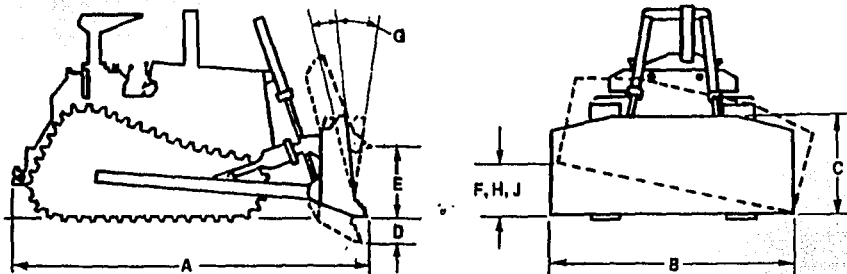


FIG. 14d

-Hoja Semiuniversal. Combina la buena penetración de la hoja recta y la mayor capacidad de la hoja universal con sus flancos de 25°.

Hojas de los Tractores de ruedas. Son rectas, con inclinación y ángulo de ataque hidráulicos.

A continuación se muestra un esquema de las dimensiones del tractor y la hoja.



- A Largo (hoja Recta)
- Hoja:
- B Ancho (con cantoneras estándar)
- C Altura
- D Profundidad máxima de excavación
- E Despeje sobre el suelo levantada completamente
- F Inclinación manual máxima
- G Ajuste máximo del ángulo de ataque
- H Inclinación hidráulica máxima
- J Inclinación hidráulica (tirante manual centrado)

#### Cargadores frontales.

Los cargadores frontales incluyen los tipos de oruga que pueden hacer un excavación bastante dura y un empuje pesado; las unidades montadas sobre cuatro ruedas motrices neumáticas son apropiadas para los bancos medianamente duros, y los cargadores de dos ruedas motrices para el material suave o suelto y para la operación en terreno duro.

Los cargadores montados sobre orugas se mueven fácilmente en las explotaciones de tamaño moderado, pero los montados sobre ruedas son superiores en velocidad y se desgastan menos a sí mismos y a los caminos mientras transitan.

El cargador frontal es un equipo tractor, montado en orugas o en ruedas, que tiene un cucharón de gran tamaño en su extremo frontal, el cucharón está instalado para excavar o cargar tierra o material granular, levantarlo, acarrearlo cuando sea necesario, y vaciarlo desde cierta altura. En la fig. 13f se muestran algunos modelos existentes en el mercado.

Los cargadores se diseñan con controles hidráulicos y extensores de los brazos, esto significa que gran parte del trabajo del cucharón lo hace el mecanismo que esta integrado en el tractor. Los cucharones varían en tamaño, desde 1/4 de yarda cúbica (.19m<sup>3</sup>), hasta más de 25 yardas cúbicas (19.1m<sup>3</sup>) de capacidad, con copete. Con el cucharón del cargador, que es un accesorio más permanente del tractor que una hoja empujadora, el diseñador de equipo puede asegurarse más de que exista un equilibrio cuidadoso entre el tamaño del cucharón y del tractor. El diseño toma en consideración la condición extrema de trabajo, o sea, la del cucharón lleno soportado en su posición elevada con los brazos totalmente extendidos hacia el frente del tractor. El mecanismo del cucharón de los cargadores se diseña para tener una altura de vaciado comprendida entre 2.40 y 4.50 m. arriba del plano sobre el que se mueve el tractor. Tal altura es proporcional al tamaño del cargador, esto hace posible que el cargador vacíe a un camión o unidad de acarreo adecuadamente equilibrado.

### CARGADORES DE RUEDAS

Capacidad del cucharón (colmado)\*\* 1,0 a 20 m<sup>3</sup> (1,3 a 26 yd<sup>3</sup>)

\*Hay disponible una disposición de alto levantamiento  
 \*\*Cucharón de Uso General.  
 -Hecho en el Brasil.



### CARGADORES DE CADENAS

Capacidad del cucharón (colmado)\*\* 0,8 a 2,6 m<sup>3</sup> (1,0 a 3,75 yd<sup>3</sup>)

\*Hay disponibles de cadena ancha.  
 \*\*Cucharón de Uso General.



FIG. 13f

La operación un cargador entre su posición de carga y la de vaciado, requiere por lo general de muchas maniobras; un cargador montado en tractor de orugas puede pivotar lentamente sobre sus bandas de orugas sin gran dificultad. Pero un tractor ordinario de dos ejes, montado sobre ruedas, necesita más espacio para maniobras. Esto a conducido a la unidad de tracción articulada más moderna; un cargador de armazón articulado tiene su articulación aproximadamente a la mitad de la distancia entre sus ejes. Su capacidad de giro se aumenta notablemente por el ángulo de más de 40° que puede girar el eje frontal a cada lado de la posición recta hacia adelante.

Con el cucharón elevado a una altura de vaciado, no tiene efecto alguno sobre las dimensiones laterales interfaciales al nivel del terreno, por ello generalmente se da la longitud del cargador sin incluir el cucharón

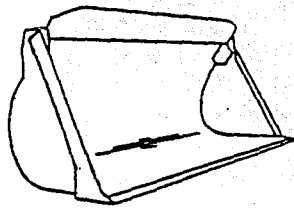
El radio de giro o de vuelta medido hasta la rueda trasera exterior de un cargador articulado, es aproximadamente igual a su longitud total excluyendo el cucharón; en general, no necesita más del doble de la longitud de la máquina ; para excavar, maniobrar y vaciar su carga.

#### Tipos de cucharas para la pala cargadora.

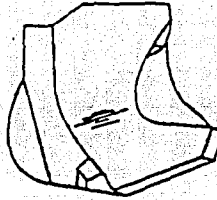
La cuchara para todo uso , cuchara universal, esta constituida por una chapa gruesa de alta resistencia mecánica y resiste al desgaste (fig.13g). El borde cortante sobresale hacia adelante y la instalación de dientes de acero mejora su acción de ataque.

La cuchara para roca está constituida por una aleación térmica de acero de alta resistencia mecánica y resistencia al desgaste. La cuchara tiene o bién un borde cortante en "V" (fig.13h) o bien un borde cortante en "V" modificada y laterales replegados para ayudar a la penetración en el corte (fig. 13i).

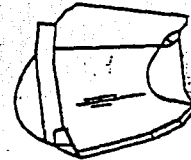




■ CUCHARA UNIVERSAL



■ CUCHARA PARA ROCA



■ CUCHARA PARA ROCA

FIG. 13g, 13h, 13i

Un frente de excavación puede ser atacado frontal o lateralmente. En caso de ataque lateral, la excavadora se mueve paralelamente a la superficie del frente de la excavación y, naturalmente, no puede realizar la carga de camiones más que por un sólo lado. En el método de ataque frontal, la excavadora ataca directamente el frente de la excavación hasta que la parte delantera de las orugas ha avanzado hasta el pie del vaciado; entonces, la excavadora da marcha atrás y maniobra para repetir la operación.

La productividad de un cargador frontal se calcula en metros cúbicos por hora. Puede determinarse, estimando la carga real medida en banco de material, y calculando el tiempo que toma el manejar cada cucharón lleno.

La producción real depende de la profundidad de la altura de corte; en la fig. 14e. se muestran los índices de producción cuando la máquina opera a profundidad óptima. Las excavadoras que trabajan cerca

de los límites del abanico de valores sufren una considerable disminución de su rendimiento, debido a que toman condiciones de trabajo ideales.

La producción máxima se alcanza cuando la relación altura / profundidad del frente permite llenar completamente la cuchará en un solo movimiento, desde el pié al borde superior del frente.

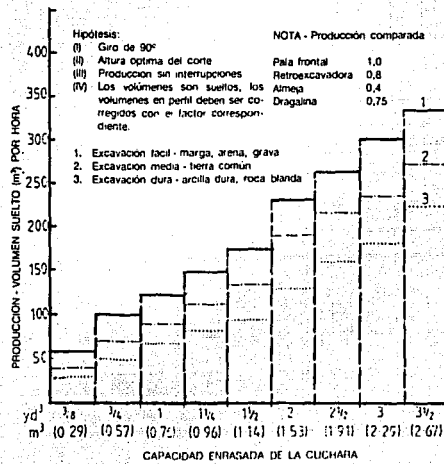


FIG. 14e

**Pala macánica.**

La pala con cucharón de brazo de ataque es el equipo normal para la excavación en bancos; aunque la carga más rápida la efectúa en material blando que colma el cucharón, puede mantener un buen rendimiento en material muy duro o tenaz. En proporción a su capacidad, son más costosas que los cargadores frontales, pero requieren menos reparación, ya que las orugas no se mueven durante el ciclo de excavación (ver fig 13j). Para obtener la máxima producción, es importante un corto arco de giro. El cucharón usualmente puede moverse desde la posición de ataque en el banco, hasta la altura y distancia

correcta para descargar en un camión con un giro de 30° a 45°, cualquier giro mayor requerido por la posición del camión hace más lento el ciclo de excavación.

### **Palas Frontales**

Peso en orden de trabajo 42 010 a 68 460 kg (92.530 a 150.790 lb)



235C



245B Serie II



E450



E650

FIG. 13j

La pala tiene su óptima utilidad cuando es necesario hacer excavaciones considerables en roca o en material consolidado de un banco cuya cara se sostiene relativamente vertical. Esta situación se presenta en los cortes de tierra de material rocoso o arcilloso; la frente del banco debe poder sostenerse por sí sola, por lo menos hasta una cuarta parte de la altura máxima de excavación de la pala; bajo estas condiciones, la pala es más productiva que el cargador frontal, ciertamente esto es válido, si el embanque es extenso y no obliga a la pala a moverse mucho para lograr una excavación de consideración.

Otra aplicación de la pala mecánica, es la excavación inicial del corte de una ladera para abrir un camino siguiendo la curva de nivel. En ese caso, el material excavado del lado superior del corte puede girarse y vaciarse sobre la misma ladera, al lado inferior del corte. Cuando el corte se vuelve demasiado ancho para

que la pala vacíe el material excavado hacia el lado bajo, puede usarse un tractor equipado con hoja de empuje para desplazarlo hasta la orilla del nivel de corte.

La cantidad de material que puede manejar en un período de tiempo dado, depende del tamaño del cucharón, de la velocidad de movimiento del miembro excavador en la dirección vertical, y de la velocidad de rotación de la superestructura en su mesa de giro horizontal.

El ángulo de giro necesario para el ciclo de excavación de la pala puede controlarse mediante una buena planeación. En un ciclo ordinario formado por excavación, giro de la carga, vaciado de la misma y giro de retorno para la carga siguiente, las cargas pueden vaciarse a un lado de la excavación o a unidades de acarreo para que la transporten.

Los cucharones de pala se miden por su capacidad enrasados, en yardas y fracciones de yarda. Su tamaño se puede comprobar con bastante precisión midiendo y multiplicando su longitud, anchura y altura, la inclinación de los costados, las curvas y extensión del borde pueden utilizarse para aumentar el resultado al siguiente cuarto de yarda.

La motoconformadora.

Un uso básico es, como lo sugiere su nombre, la conformación y nivelación final de toda la anchura de un camino. Esto comprende no sólo la base para la superficie del camino, sino también los acotamientos, las pendientes de los taludes laterales y las pendientes transversales desde la superficie del camino. Otro tipo de operaciones de caminos que las motoconformadoras realizan es el de mantenimiento de caminos de acarreo para otros equipos de movimiento de tierra o camiones; sirve para mover y compactar la tierra para lograr una superficie de recorrido razonable uniforme y eliminar las huellas longitudinales que se forman en los terrenos blandos sujetos a tráfico.

El sistema comprende una consola de mando en la que se fijan las metas, servo-válvulas para convertir las señales eléctricas enviadas por los elementos sensoriales en acciones hidráulicas, y un sistema

hidráulico para accionar los cilindros que mueven la hoja en forma automática. Diversos modelos de motoconformadoras se muestran a continuación.

**Potencia en el volante: 93 a 205 kW (125 a 275 hp)**



El camión.

La elección del sistema para el transporte de materiales después de su carga depende de muchos factores, entre los cuales: las condiciones locales; el volumen de material a transportar; el tipo de material; el tiempo disponible.

Los volquetes, dumpers y "fuera de camino", utilizados para el transporte del material de excavación son normalmente del tipo de vertido trasero, preferiblemente deben ser de tracción en las cuatro ruedas, para que sean capaces tanto de vencer las condiciones difíciles del terreno como de circular a relativamente altas velocidades en carreteras pavimentadas (en la fig. 14f. se muestran algunos modelos de estos camiones).

Los camiones se designan en función del número total de ruedas y de ruedas tractoras. Así, un camión 4x4 tiene cuatro ruedas y cuatro ruedas tractoras; un camión 8x4 tiene 8 ruedas de las cuales solamente 4

son tractoras, las otras 4 son libres. Alguans veces las ruedas van montadas por parejas, para soportar cargas elevadas. Un camión 4x4 puede tener eventualmente cuatro ruedas en el eje trasero y un total de seis camaras, pero su desigación sigue siendo 4x4.

#### Camiones de obras

Capacidad: 31,8 a 216 toneladas métricas — 36 a 240 toneladas cortas



#### CAMIONES ARTICULADOS

Capacidad: 18 a 36,3 toneladas métricas (20 a 40 ton cortas)

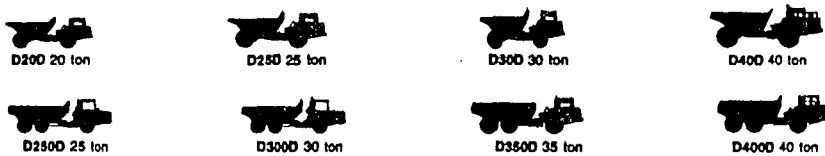


FIG. 14f

Los camiones para movimiento de tierras se usan principalmente para transportar el material a distancias entre 1 y 10 km., pero es posible su utilización para viajes más largos.

Después de terminar la operación de carga hay un corto espacio de tiempo perdido, mientras se posiciona el camión siguiente para su carga; evidentemente el tiempo de espera de la excavadora se reduce cuando aumenta el tamaño del camión, por el contrario, cuando el camión es pequeño disminuye el período de carga y aumenta el tiempo de espera. El tamaño óptimo de camión es muy difícil de determinar y depende mucho de las condiciones locales. En la práctica, el tamaño óptimo del camión suele estar entre 3 y 10 veces el tamaño de las cucharas cargadoras, siendo 5 un buen valor medio; pero la elección final del tamaño de camión depende mucho de la experiencia.

Para que el transporte sea económico, los caminos de arrastre no deben de presentar recodos o curvas, deben de tener una superficie de rodadura estable, y mantenida permanentemente en esta condición mediante continuo reperfilado.

#### Equipo.

Para poder excavar sobre roca, es necesario romperla o fraccionarla para que pueda ser manejada por los equipos de excavación. El fraccionado se lleva a cabo barrenando hasta cierta profundidad, y colocando explosivos dentro de la perforación, para hacerlos detonar.

Muchos factores afectan la selección del equipo; entre ellos están los siguientes:

- La naturaleza del terreno;
- la profundidad requerida de los agujeros;
- la dureza de la roca;
- las grietas o fracturas de la formación rocosa;
- El objeto de los agujeros, si son para dinamitado o exploración.

#### Martillo neumático.

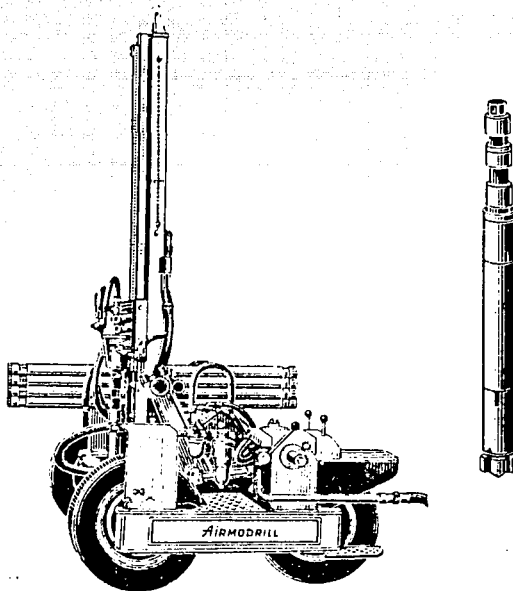
Los martillos neumáticos, son taladros de percusión que se sostienen con la mano, utilizados principalmente para la barrenación de agujeros. Se clasifican de acuerdo con su peso, por ej.: de 20 ó 25 kg. Una unidad de taladro completa consiste en un martillo, una barra de acero, y una broca.

A medida que el aire comprimido fluye a través del martillo, causa el movimiento recíprocamente de un pistón que a una velocidad hasta de 2,200 golpes por minuto, produce el efecto del martillo. La energía de este pistón se transmite a la broca a través de la barra del taladro. Una parte del aire fluye a través de un agujero en la barra del taladro, y en la broca, para sacar los detritos del orificio y para enfriar la broca. Para taladros húmedos, se utiliza agua en vez de aire para sacar los detritos del agujero.

Aunque los martillos pueden emplearse para taladrar agujeros de más de 6m. de profundidad, muy rara vez se utilizan en barrenos de más de 3m.

### Taladro de pistón.

Son perforadoras montadas sobre columnas que a su vez están montadas sobre ruedas o sobre orugas, para hacerlas móviles. Se usan para taladrar agujeros de 6m ó más de profundidad, tienen un mejor rendimiento que los martillos cuando se utilizan en terrenos donde les es posible operar. Pueden utilizarse para taladrar a cualquier ángulo desde el vertical hacia abajo hasta ligeramente arriba de la horizontal. Este taladro tiene un límite de profundidad práctico de aproximadamente 20m. El diámetro de la broca removible de carburo de tungsteno varía de 5<sup>1/4</sup> a 6 in. Se experimenta muy poca pérdida de diámetro durante la perforación.



### Taladro barrenador.

Es un taladro autoimpulsado, montado sobre un camión. La barrenación se lleva a cabo por medio de una broca de tres conos, del tipo rodillo, atornillada en la parte inferior de un tubo de perforación. A medida



que gira la broca en el agujero, se hace fluir hacia abajo un chorro continuo de aire comprimido para sacar los detritos y enfriar la broca.

Existen taladros para perforar agujeros de diferentes diámetros, con profundidades hasta de 90m. Este taladro es adecuado para hacer perforaciones en rocas suaves o semiduras, tales como la dolomita o la piedra caliza, pero no es adecuado para taladrar en las duras rocas ígneas. Tiene una columna normal de 9m. de longitud, para manejar tubos de 6m. de largo. Pero puede utilizarse una de 12m. para manejar tubos de 9m. de largo. Es impulsado con un motor diesel. Está equipado con un colector de polvo para sacar la piedra desintegrada a medida que sale del agujero. La velocidad de perforación se regula por medio de la presión que se suministra a través de dos cilindros hidráulicos de alimentación.

### 3.1.2. TRITURACION.

La primer trituradora que permitió el desmenuzamiento mecánico de roca se remota al año 1858. Esta trituradora de mandíbula, de la cual se han desarrollado nuestras actuales trituradoras de mandíbula con dos placas acodadas, fué inventada por un americano, Blake. Ulteriormente se construyeron máquinas para desmenuzar grandes rocas, fuera por medio de rotura, prensado, trituración o mediante una combinación de estos procedimientos de reducción, hasta obtener el tamaño requerido para la alimentación de los hornos.

Las materias primas para cemento obtenidas en cantera, por voladura, se han de desmenuzar a efectos de su elaboración ulterior. La subdivisión se realiza mediante trituradores y molinos; Se dispone de una variedad de procedimientos y de dispositivos que permiten la elección correcta de las máquinas para desmenuzar, las experiencias recogidas y el conocimiento exacto de todas las posibilidades de aplicación aún representan, para ello, un papel decisivo en la mayoría de los casos.

El término técnico "trituradora por lo general se refiere a máquinas para tratar materiales semiduros y duros, rocas, minerales y productos químicos, reduciendolos de un tamaño de 100 a 1.500 mm. (material de alimentación) a aproximadamente 5 a 300 mm.(producto).

Esta terminología no está sin embargo definida, ya que con frecuencia se utiliza el término "molino" para designar trituradoras de rodillo, de impacto y de martillo.

**Características de las trituradas.** Las trituradoras a compresión se utilizan generalmente para el desmenuzamiento de materiales duros y semiduros. El tamaño máximo del material de alimentación debe limitarse por regla general a un tamaño del 20 a 30 % más pequeño de las dimensiones de la boca de la trituradora; las maquinarias se caracterizan por su baja velocidad y por una relación de reducción comparativamente reducida (3:1 a 8:1). Debido a su baja velocidad, estas trituradoras tienen un desgaste también bajo, las máquinas a compresión elaboran un producto cúbico con un porcentaje reducido de material pulverizado. Un contenido de humedad de más del 5% en el material de alimentación provoca dificultades operativas (atascamiento), a excepción de la trituradora de rodillos que es más adecuada para materiales de alimentación "plásticos".

El grado de desmenuzamiento (n) es la relación de la mayor dimensión lineal del material antes de su subdivisión (D), a la mayor dimensión lineal del material desmenuzado (d). Por lo que el valor de (n) esta representado por:  $n = D_{\max} / d_{\max}$

Los trituradores previos que se aplican en la industria del cemento son de un grado desmenuzamiento, n, de 5 a 15 . A veces el desmenuzamiento de las materias primas discurre en dos o tres tramos , según las exigencias de estas.

La exigencia específica de trabajo en el proceso de desmenuzamiento, es decir, la energía aplicada por tonelada de material subdividido, es esencialmente más baja en la molienda grosera que en la molienda fina. Sin embargo, si se compara el trabajo aplicado con la superficie creada, se comprueba todo lo contrario.

La elección de las dimensiones de las bocas de alimentación de los trituradores de mandíbulas o de los de cono triturador, depende del tamaño en que se ofrecen las rocas como la capacidad de la cuchara de la excavadora ó de los camiones "fuera decamino"; estos factores se han de ajustar al caudal deseado del triturador.

La trituradora recibe los trozos de roca y los rompe en trozos más pequeños, para ello, la máquina se calibra para el tamaño máximo que se requiere. No obstante la roca se fragmentará en partículas de diversos tamaños , incluido el polvo, que pueden ser separados para un nueva trituración posterior o para su cribado y clasificación.

La trituradora se caracteriza por su relación de reducción, es decir por la relación entre la apertura de alimentación y el tamaño de salida.

Trituradoras primarias.

Trituradores de cono .

Los trituradores de cono , tambien llamados trituradores giratorios, desmenuzan el material entre un anillo de trituración estacionario, cónico y otro cono triturador que realiza un movimiento circular alrededor de un eje vertical apoyado por la parte inferior del cono rotatorio y dispuesto excéntricamente al cono estacionario.

En este caso, la trituración se realiza por compresión y también parcialmente por flexión. Estos trituradores se fabrican en dos modalidades:

Trituradores giratorios, también conocidos como trituradores Gates, en que el cono triturador y el anillo cónico de trabajo están dispuestos en oposición (fig. 14).

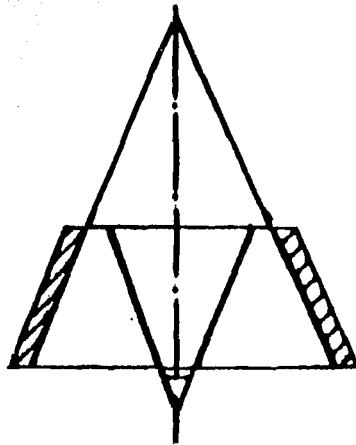


FIG. 14

Las partes principales de este triturador son el anillo estacionario de trituración (1) y el cono de trituración móvil (2) montado sobre el eje (3); el eje del triturador, llamado eje principal, está pendiente juntamente con el cono, de una suspensión oscilante de rótula esférica (4); esto es característico de la construcción del triturador giratorio, mediante un cojinete excéntrico (5) que acoge el extremo del eje movido por un engrane cónico (6), el cono de trituración recibe su movimiento circular tambaleante. El ángulo comprendido entre la vertical y el eje principal del triturador es de  $2^{\circ}$  a  $3^{\circ}$ ; el cono triturador, fijado al eje, se aproxima o se aleja periódicamente del cono estacionario; por ello el material interpuesto entre las dos superficies cónicas

recibe fuerzas de compresión que producen el desmenuzamiento. Haciendo notar que el eje de trituración no gira alrededor de su propio eje geométrico. La acción trituradora de los dos conos del triturador giratorio es representada en la fig. 15. Tiene una acción intermitente, la relación de reducción es de 5:1a7:1. Su aplicación es como trituradora primaria para materiales abrasivos muy duros con bajo contenido de humedad

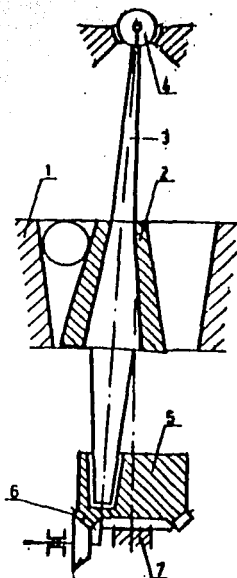


FIG. 15

La fórmula para decidir el más favorable número de vueltas del eje triturador giratorio, ajustada a los resultados prácticos, es la siguiente :

$$n = 470 \left( \frac{\text{tg } a_1 + \text{tg } a_2}{r} \right)^{1/2}$$

Donde:

$n$  = número de vueltas más favorable, por minuto.

$r$  = radio de la excentricidad del eje, en cm.

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

$a_1$  y  $a_2$  son los ángulos con la vertical de las generatrices del anillo y del cono, la suma de estos ángulos vale, aproximadamente,  $20^\circ$  a  $23^\circ$ . (ver fig. 16).

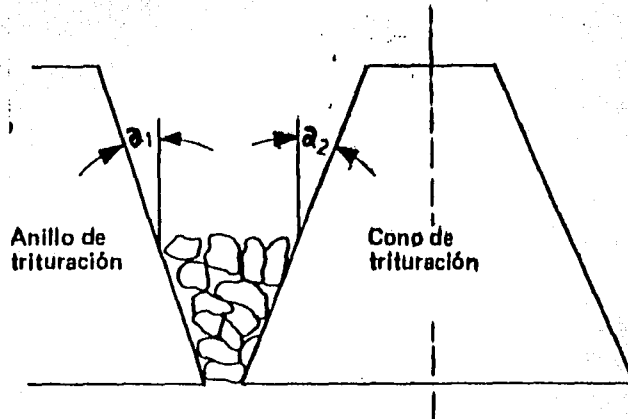


FIG. 16

El caudal de producción de un triturador giratorio se puede calcular según la fórmula de Giesking, en trabajo a tamaño grueso:

$$Q = (c) (g) (B) (S) (e) (n) (b) (n \text{ t/h})$$

donde:

$Q$  = caudal del triturador en t/h.

$c$  = factor dependiente de la presencia de finos en la alimentación y del carácter de la superficie de las placas de trabajo.

$g$  = densidad volumétrica en  $\text{kg/dm}^3$  del material triturado.

$B$  = perímetro de descarga en el triturador de cono, en cm.

$S$  = ancho de la abertura, en cm.

e = amplitud de la oscilación (radio de la excéntrica), en cm.

n = número de oscilaciones por minuto.

b = factor de corrección por razón del ángulo entre el anillo y cono de trituración con  $26^\circ = 1$ .

n = relación entre el caudal teórico y práctico, aproximadamente, 0,8 a 0,9.

	valores de c
Apilamiento natural.	(1.40) ( $10^{-4}$ )
Apilamiento con cribado previo.	(1.25) ( $10^{-4}$ )
Trozos grandes.	(1.00) ( $10^{-4}$ )

La designación del tamaño de los trituradores giratorios no es la misma en todas partes. En Alemania corresponde al diámetro D del anillo de trituración ; en U.S.A. la designación corresponde a (A) (B), como se representa en la fig. 17.

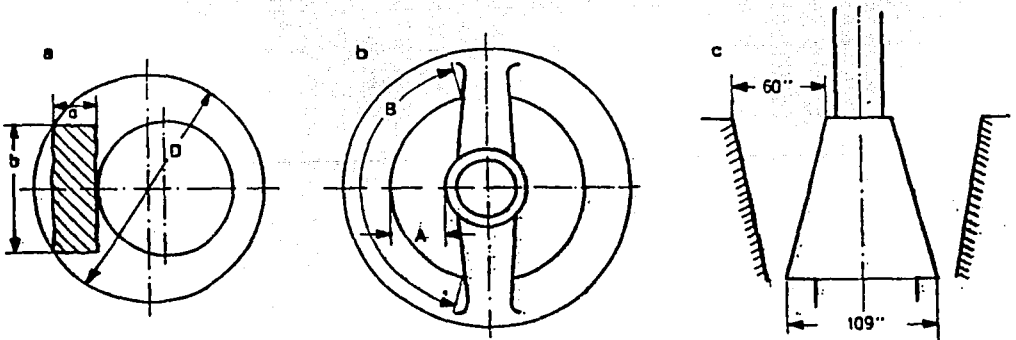


FIG. 17

Otro tipo de designación de las dimensiones de los trituradores cónicos utiliza la abertura de entrada y el diámetro de la base del cono; en el triturador giratorio, para el desmenuzamiento de materiales, se necesita una abertura mayor de  $1.25 (a) (b)$ . Es decir  $abertura > 1.25 (a)(b)$ .

Para fijar la abertura de salida, cuya dimensión crece por desgaste debido a rozamiento de los blindajes, o bien cuando sea necesario para conseguir granulometrías de características diversas, el eje principal de trituración, según el tamaño de éste, se puede desplazar, verticalmente, de 150 a 280 mm.

En la industria del cemento, estos ofrecen de dos a tres veces los caudales correspondientes a los trituradores de mandíbulas de iguales dimensiones de boca y abertura de salida; el triturador rotatorio no tiene movimiento vacío alguno y trabaja ininterrumpidamente durante el movimiento circular de su eje. Medido por el consumo de energía, el caudal del triturador giratorio por kwh es de 2.1 a 3.6 (en tamaños grandes), el del triturador de mandíbulas, esto explica que se empleen trituradores rotatorios cuando se trate de alimentarlos con trozos de dimensiones grandes.

En vacío, los trituradores giratorios consumen, aproximadamente, el 30% de la energía a plena carga, mientras que los de mandíbulas lo hacen en cuantías que varían del 45% al 50%. En los trituradores giratorios generalmente no aparecen trozos planos o alargados, por lo que sufren un mayor desgaste los blindajes. El triturador no necesita dispositivo especial para su alimentación; el material que se ha de triturar se puede arrojar directamente, generalmente por dispositivo de vuelco de grandes camiones, a la boca del triturador.

Los trituradores de cono o trituradores Symons, en los cuales el cono triturador y el anillo cónico estacionario están dispuestos en el mismo sentido de la conicidad.(fig. 18).



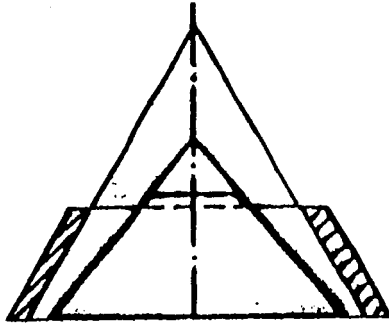


FIG. 18

Generalmente estos trituradores se utilizan como trituradores secundarios para materiales abrasivos muy duros; su relación de reducción es aproximadamente de 5:1. La diferencia principal entre estos trituradores y los giratorios consiste en que en los primeros el eje triturador no está dispuesto como órgano suspendido sino sólidamente unido por su parte inferior al mecanismo excéntrico. El extremo superior del eje está conformado como plato dispersor que recibe la alimentación y la distribuye a la cámara de trituración, para ser desmenuzada en el espacio definido entre el cono y el anillo cónico de trabajo por compresión; simultáneamente, el material en trituración avanza hacia la abertura de salida, como se observa en la fig. 19, la distancia entre las superficies de trabajo va disminuyendo en dirección a la abertura de salida. La longitud de esta abertura se designa por "l" y la distancia mínima en la abertura, por "d". Con ello el material que abandona el triturador es quebrado hasta la dimensión "d" y se cumple la condición de que todo el material ha de pasar por la dimensión más estrecha de la abertura. Esto significa que el tiempo que

ha de invertir todo trozo de material en recorrer la longitud "l" de la abertura de salida, ha de ser superior al que invierta el cono triturador en dar una vuelta alrededor de su excéntrica.

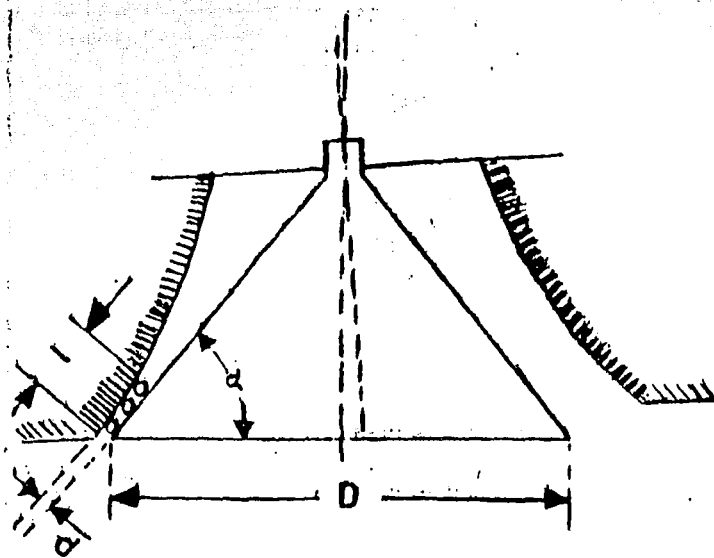


FIG. 19

Esto hace que la velocidad de los trituradores Symons sea superior a la de los trituradores giratorios. La designación del tamaño de los trituradores Symons se refiere al diámetro de la base del cono de trabajo "D".

Trituradora de mandíbulas, es un sistema sencillo pero eficaz, que tiene una forma rectangular en planta y triangular en su alzado lateral. Tres de sus lados son fijos mientras que el cuarto es una placa móvil, constituyendo así una especie de mandíbula; el material se introduce por la parte superior de la trituradora, pasa por su interior y sale por la parte inferior. Las mandíbulas están revestidas con blindajes de perfil dentado en fundición o a la coquilla o acero templado; el marco de la máquina es de acero fundido y esta

compuesto por placas de acero. Cuando los trituradores de mandíbulas se emplean como desmenuzadores previos, el ancho de sus dientes ha de variar entre 50-150 mm. en función del tamaño del material de alimentación; cuando se utilizan como trituradores secundarios tal dimensión varía entre 10-40 mm. Existen dos tipos de trituradoras de mandíbulas :

- De doble articulación. Sistema Blake. Trituración paralela por compresión entre la mandíbula estacionaria y la mandíbula móvil; tiempos idénticos de apertura y de cierre. Tiene una acción intermitente; tiene una relación de reducción: como trituradora primaria de 5:1 a 7:1 y como trituradora secundaria de 3:1 a 5:1. Su aplicación es en materiales abrasivos muy duros con bajo contenido de humedad y pequeñas capacidades.

- De simple articulación. Su método de operación es la trituración entre la mandíbula móvil y la mandíbula estacionaria, con tiempos iguales de apertura y cierre. Tiene una acción intermitente; la relación de reducción : como trituradora primaria es de 5:1 a 7:1 y como trituradora secundaria de 3:1 a 5:1. Se utiliza en materiales abrasivos muy duros con bajo contenido de humedad, mejor para inclusiones de materiales pegajosos, pero mayor desgaste que la trituradora de doble articulación.

El tamaño de la trituradora se designa por las dimensiones de la entrada superior.

Trituradora de rodillo. Su método de operación es la molturación tangencial entre el rodillo rotatorio dentado y la mandíbula dentada apoyada sobre resortes; tiene una acción continua y su relación de reducción es de 4:1 a 8:1. La aplicación es para materiales blandos. (fig.20).

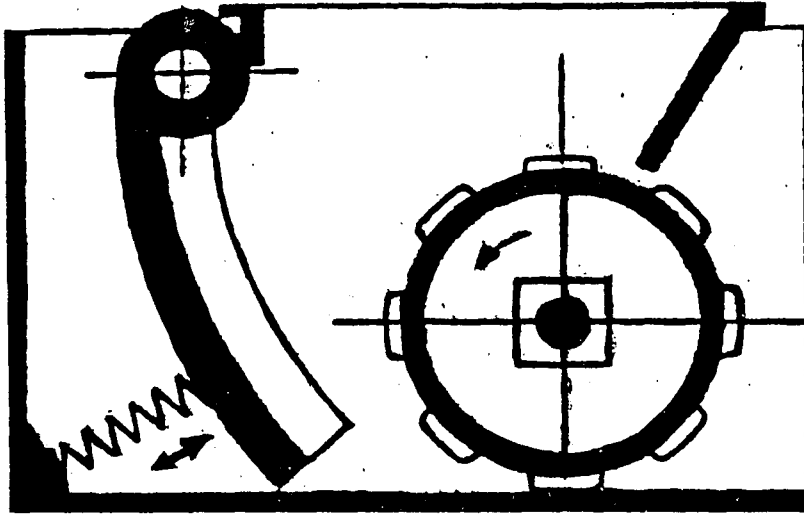


FIG. 20

Trituradora de doble rodillo. Tiene molturación y trituración tangenciales entre rodillos provistos con estrías, levas o dientes, un rodillo esta fijo, el otro apoyado sobre resortes, tiene una acción continua; tiene una aplicación especialmente adecuada para materiales pegajosos con inclusiones de sílex, guijarros. (fig. 21).

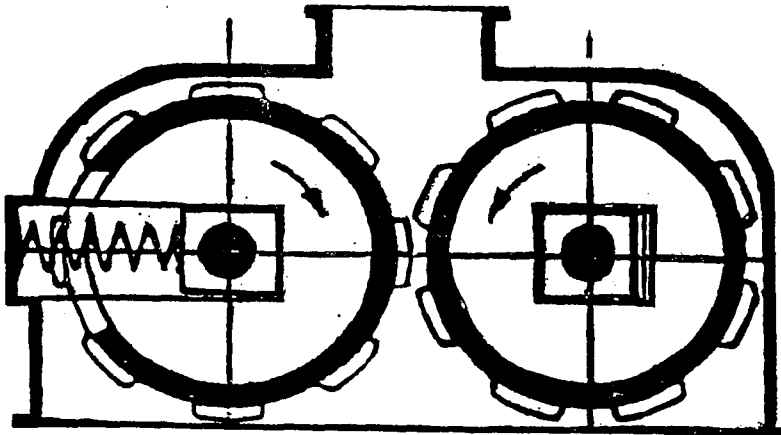


FIG. 21

### Trituradoras de impacto.

Las trituradoras de impacto se caracterizan por su funcionamiento rápido y continuo, así como por su elevada relación de reducción en comparación con las máquinas trituradoras a compresión. La velocidad de funcionamiento; velocidades circunferenciales de 30 a 40 m/s para las trituradoras de martillos, y de 30 a 50 m/s para las trituradoras de impacto, por lo que la energía de trituración depende de la energía periférica del rotor. Cada tipo de roca exige la correspondiente velocidad angular, para lograr el caudal máximo con el tamaño de grano más ventajoso, el material de alimentación debe tener un tamaño muy inferior a la abertura de alimentación (35 a 50 % más pequeño que las dimensiones de la boca) y ser introducido a un ritmo tal que no pueda causar atascos; así pues es necesario realizar un cribado previo para desviar las partículas excesivamente grandes (ver fig. 22).

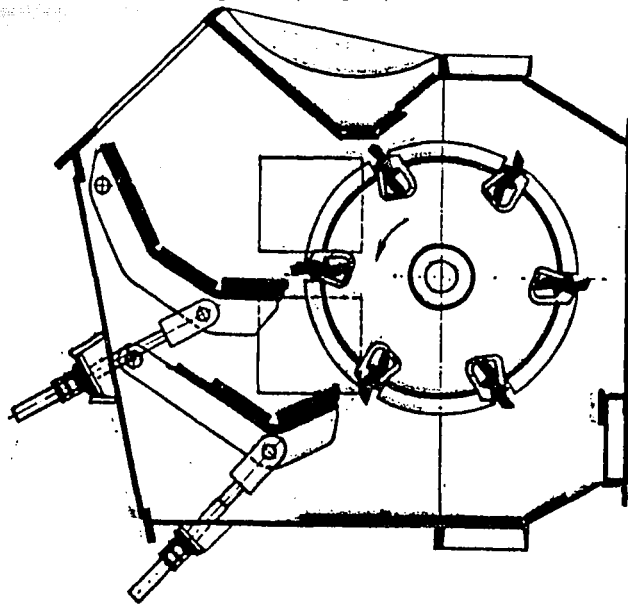


FIG. 22

El desmenuzamiento del material se realiza de acuerdo con los planos de exfoliación del material, por consiguiente, sólo se puede aplicar la trituración por choque a materiales pétreos quebradizos de dureza media, puesto que los materiales plásticos no se rompen mediante choque. En este tipo de máquinas pueden tratarse satisfactoriamente materias primas blandas y semiduras con un contenido de humedad de

hasta un 12% , contenidos de humedad superiores tienden a causar problemas. Materias primas con un contenido de cuarzo superior al 8% provoca un desgaste inaceptablemente elevado para estas trituradoras, compensandose con la relación de reducción de hasta 50:1. Con una sola trituradora de impacto puede lograrse el mismo tamaño de desmenuzamiento que con las trituradoras a compresión de unidades múltiples.

Trituradora de impacto de un solo eje, el material al ser golpeado por el martillo, rebota sobre unas placas rompedoras (estacionarias), barras o rejillas situadas por encima del rotor y así los trozos de roca se rompen en trozos más pequeños; aquí no hay parrilla de fondo y la cantidad de esquirlas que se producen depende fundamentalmente de la velocidad periférica (fig.23). Tiene una acción continua; es adecuada para materiales blandos y semiduros con un contenido de humedad de hasta un 12%; inadecuada para materiales abrasivos y/o pegajosos. Como no existe parrilla, no hay limitación en lo que concierne el tamaño máximo del producto; tiene una relación de reducción de hasta 50:1. La exigencia de la energía específica supone 0.45 - 0.75 kwh/t ; el desgaste total es de alrededor de 3 g/t de caudal; en esta cifra están incluidos los listones de percusión, las placas y barrotes para choque.

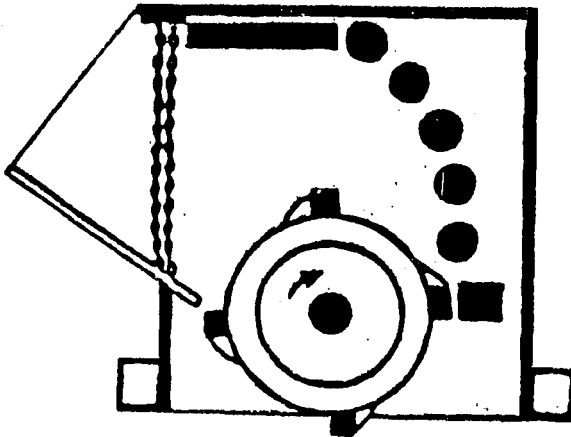


FIG. 23

### Trituradora de martillos.

La trituradora de martillos dispone de unos martillos unidos a un rotor, o varios rotores si se trata de un equipo grande, todos ellos situados dentro de una cámara robusta. Los martillos giran a gran velocidad, golpeando los trozos de material a medida que va entrando en la cámara, y rompiéndolos en trozos más pequeños; la base de la cámara va recubierta por un emparillado que hace que se produzca una trituración, en consecuencia con este sistema se producen más finos que con cualquier otro. El tamaño del equipo, se designa, por la dimensión de la abertura de la boca de alimentación; el tamaño de salida puede variarse sin más que ajustar la separación de las barras del emparillado. Se puede también obtener alguna variación en la capacidad de producción alternando la velocidad de los martillos.

De estos trituradores se tienen dos tipos:

-Trituradora de martillos de impacto de un solo eje, su operación es trituración y lanzamiento del material de alimentación contra un muro de impacto y molturación subsiguiente en las parrillas de descarga. Tiene una acción continua, su relación de reducción es de hasta 50:1, con una baja proporción de material grueso. Tiene una aplicación adecuada en materiales blandos y semiduros con contenido de humedad de hasta el 12% ; no sirve para materiales abrasivos y/o pegajosos. (fig.24).

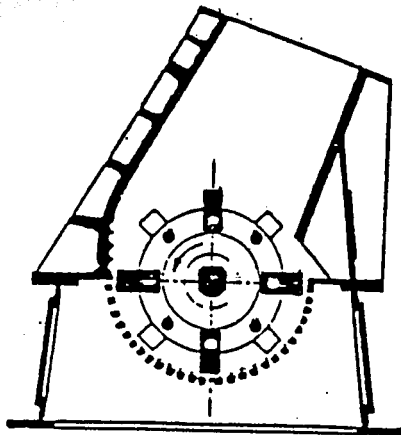


FIG. 24

-Trituradora de martillos de dos ejes. Su método de operación es por medio de martillos fijados sobre dos rotores girando en sentido contrario y un yunque en forma de V, con molturación subsiguiente en las parrillas de descarga. Tiene una acción continua, su relación de reducción es de hasta 50:1. Tiene una aplicación de reducción adecuada para materiales blandos y semiduros con un contenido de humedad de hasta un 12%, es inadecuada para materiales abrasivos y/o pegajosos. (fig.25).

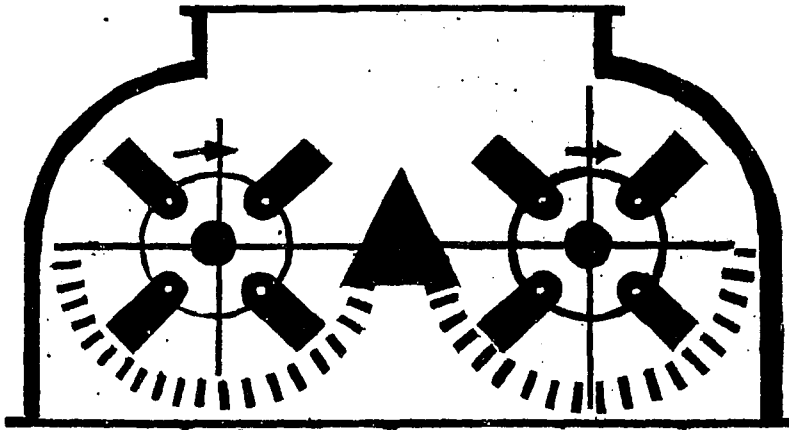


FIG. 25

La selección de las máquinas de preparación resulta más difícil si no se tiene experiencia sobre el material en cuestión y sólo se dispone de datos en base a muestras del núcleo. La prospección detallada de todos los componentes de la materia prima tiene por consiguiente gran importancia también para selección del equipo. El problema se hace todavía más complejo si se toma en cuenta que incluso para roca con propiedades químicas, mineralógicas y mecánicas conocidas no existe ningún método inequívoco para seleccionar un sistema de trituración que pueda desmenuzarla apropiadamente bajo condiciones



óptimas, por lo que la experiencia práctica es la base fundamental para la selección de un sistema de trituración y sus máquinas.

Las siguientes propiedades del material se consideran como los factores de influencia:

-Abrasidad, se refiere a los efectos del material sobre las herramientas de trituración y no a la resistencia y la abrasión de la roca. El contenido de sílice libre proporciona una indicación válida sobre la abrasidad de las materias primas adecuada para la industria cementera; en razón de ello, el contenido de sílice libre se ha convertido en uno de los más importantes criterios de selección para las trituradoras.

- Pegajosidad o plasticidad, de un material depende de la cantidad de minerales arcillosos dilatantes y del contenido de humedad. Como no se dispone de un método cuantitativo para determinar la pegajosidad de un material, su contenido de humedad se toma como dato indicativo.

-Triturabilidad, es probablemente el criterio de selección más difícil de cuantificar, se han efectuado ya varias tentativas para estrechar el ámbito de problemas y desarrollar procedimientos de control significativos e informativos, pero los resultados obtenidos han sido insatisfactorios y por ello, el diseño de un sistema de trituración continua siendo una cuestión de experiencia. La triturabilidad sirve ante todo para determinar las dimensiones de la trituradora. Las siguientes pruebas y criterios suministran indicaciones, sobre la triturabilidad: resistencia a la compresión, dureza de Mohs y prueba de "abrasión de Los Angeles". Otra propiedad que debe tenerse en cuenta al evaluar la triturabilidad es la estructura de las rocas en lo que concierne la estratificación, el espesor de las capas y las características de rotura.

-Distribución granulométrica del material de alimentación, la composición granulométrica del material introducido a la trituradora determina "rendimiento de trituración" requerido para obtener el producto deseado y sirve también para un cribado preliminar. En este contexto cabe mencionar el mayor tamaño que pueden tener las rocas con las que se alimenta una trituradora primaria.

-Especificaciones sobre el producto, en la industria cementera no se ponen muchas exigencias en lo que concierne la configuración de los granos de la materia prima triturada. El producto triturado debería presentar la mayor fineza posible y contener un mínimo de granos superdimensionados. Así cuando se

selecciona un tipo de trituradora, por lo general sólo es importante saber el tamaño máximo de los granos que toleran los equipos de desmenuzamiento subsiguientes.

Algunas de estas propiedades del material pueden medirse exactamente; para otras no existen técnicas de medición calificadas y su interpretación cuantitativa resulta más difícil.

### 3.1.3. PREHOMOGENEIZACION.

Elegidas las materias primas para obtener una composición adecuada es conveniente que sean técnicamente constantes en el transcurso de su producción, y de forma preferente, si es posible, para el material calizo que es el mayoritario. Esto se consigue con sistemas de prehomogeneización que permiten apilar este material.

La homogeneización de materia prima triturada en pilas al aire libre ha sido practicada desde hace mucho tiempo en la preparación de minerales. Es sólo recientemente que estas pilas de prehomogeneización se han introducido más y más frecuentemente en la homogeneización de materia prima en la industria del cemento, al construirse nuevas fábricas y en la modernización y extensión de fábricas existentes. Las pilas de prehomogeneización se usa para el almacenaje así como para la homogeneización de materia prima triturada.

Las siguientes consideraciones favorecen el uso de pilas de homogeneización como pilas intermedias de almacenaje (depósito tampón):

- las actividades en la cantera y las de la fábrica de cemento ya que no necesitan estar interconectadas las unas a las otras;
- racionalización evitando la necesidad de turnos de trabajo múltiples en la cantera y la operación de máquinas más grandes;
- reducción de ruido y polvo;
- se asegura un suministro regular de materia prima a los hornos más grandes usados hoy en día;
- mejor manejo del material pegajoso que en los silos;
- menos problemas en la automatización de los procesos preparatorios para materia prima.

Las consideraciones siguientes favorecen el uso de pilas de prehomogeneización para la materia prima:

- buen efecto de homogeneización si la instalación es bien planeada;
- se puede utilizar materia prima de depósitos no homogéneos;
- la premezcla de varios componentes de materia prima es posible;
- la extracción selectiva de material en la cantera es posible;

-se obtiene una calidad de cemento de mayor regularidad, un requisito cada día más importante.

#### Sistemas de pilas de prehomogeneización.

Todas las pilas de prehomogeneización funcionan con el mismo principio; hay 2 pilas de homogeneización. Una se construye depositándose el material en capas. En la otra, una máquina recolectora recoge secciones perpendiculares a las capas depositadas.

En el transcurso del tiempo, muchos tipos y sistemas de maquinaria han sido desarrollados con el objeto de cumplir con todos los conceptos teóricos lo mejor y lo más económicamente posible.

#### Maquinaria empiladora.

Carritos volcadores con tolva de descarga en una cinta transportadora instalada bajo el techo del edificio de almacenaje sólo puede utilizarse para pilas cubiertas. Máquinas empiladoras con aguilón lateral pueden utilizarse para pilas cubiertas y pilas al aire libre. La solución con los carritos volcadores que se operan a lo largo del caballete del techo tiene la desventaja que el material se segrega por la gran altura de caída. Además resulta una compactación del material depositado y la formación de polvo es muy alta. Esta desventaja puede eliminarse utilizando empiladoras con aguilón de altura regulable. Máquinas de este tipo son bastante anchas debido al contrapeso necesario para balancear el aguilón, y ocupan mucho espacio libre en el edificio de almacenaje. Un diseño de empiladora tipo pórtico tiene las ventajas de un aguilón de altura regulable y ocupa poco espacio (fig. 26). Sin embargo, hay que hacer arreglos especiales para que la empiladora y la recolectadora puedan cruzarse.

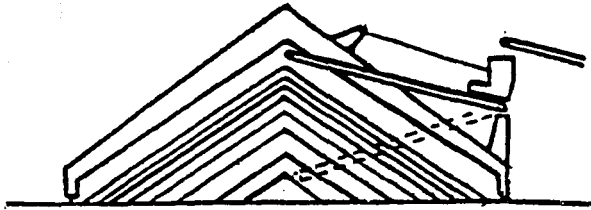


FIG. 26

Hay otra diferencia, en los sistemas de disposición tipo "cheurón" o tipo "windrow". Esta diferencia está en el sistema de mando para depositar el material en la forma "windrow" es bastante complicado y requiere un equipo de mando sofisticado; para depositar en la forma "cheurón", un sistema mucho más simple es suficiente.

El número máximo de capas para formar la pila depende de la capacidad de las empiladoras y de la velocidad máxima de las mismas. La velocidad máxima alcanzada es de 25 a 30 m/min, lo que permite hacer pilas de 400 a 500 capas.

Máquinas recolectoras de acción frontal.

Todas las máquinas recolectoras de acción frontal son equipadas con un sistema de manejo de material que permite recoger el material solamente al pie de la pila.

Un dispositivo de desalojamiento para bajar el material sobre la pendiente es necesario. El material contenido en una fina capa se mezcla al deslizarse bajando la pendiente. Para obtener un buen efecto de

homogeneización, el dispositivo de desalojamiento debe accionar sobre toda el área de corte. Existen máquinas equipadas con gradas o rastrillos, rascadoras de cables y cadenas para el desalojamiento del material. (fig. 27).

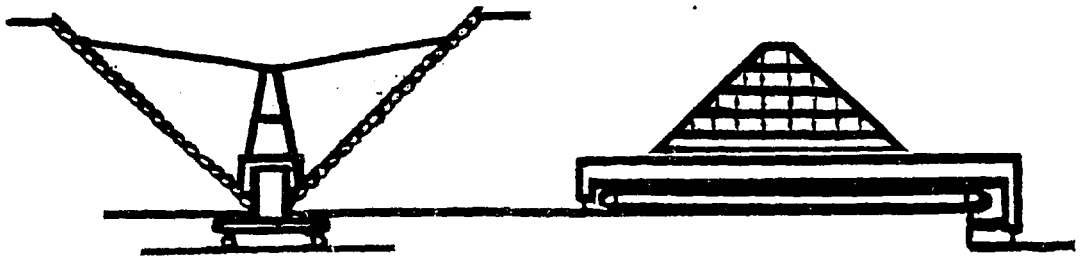


FIG. 27

Recolectadora tipo puente con rascador tipo grada.

Las rascadoras son generalmente de forma triangular con dientes reemplazables, los cuales pueden ser adaptados o ajustados al ángulo natural de la pendiente del depósito. El desalojamiento del material se obtiene por movimientos oscilantes del dispositivo.

La rascadora de cable consiste de 2 cables que pasan por poleas en la punta de la pila. Del otro lado los cables están fijados a un carrito el cual hace un movimiento de vaivén sobre la estructura del puente; de esta manera los cables actúan sobre toda el área de corte, similar al movimiento de un limpiaparabrisas. Para la utilización con materiales compactos, los cables son interconectados con vigas equipadas con

dientes, de esta manera el efecto de aflojamiento y desalojamiento puede aumentarse considerablemente, minimizando el desgaste de los cables.

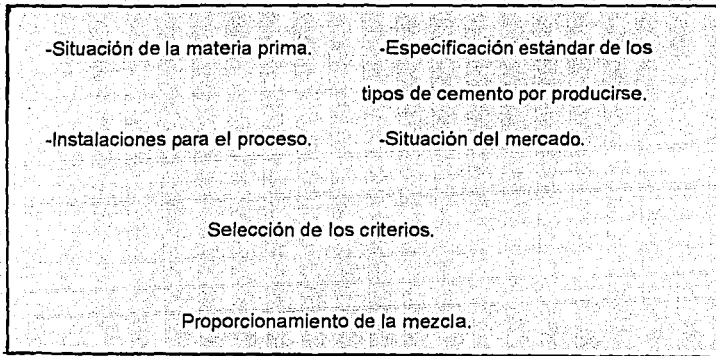
El más alto rendimiento obtenido con estas recolectoras tipo puente es de aproximadamente 500 m/h., existen puentes con una envergadura de más o menos 50 m.

Recolectora con rueda de cangilones montada sobre puente.

El dispositivo de desalojamiento es conectado al soporte de la rueda de cangilones y se mueve con ésta. La capacidad de extracción es virtualmente ilimitada. para mayores capacidades de extracción pueden montarse dos o más ruedas en un mismo puente.

### 3.1.4. EL CRUDO.

El diseño de una mezcla cruda no comprende sólo la dosificación de la mezcla sino también consideraciones de factores como especificaciones estándar de los tipos de cemento que se requieren producir, la situación del mercado y las instalaciones disponibles para el proceso.



La selección de los criterios dependerá de las especificaciones estándar. El diseño de las mezclas crudas no comprenderá solamente el proporcionamiento (cálculo), sino también incluye una evaluación de los resultados logrados. Este último aspecto comprende la optimización en lo que a costos y a materiales se refiere, es decir:

Selección de los criterios.

Proporcionamiento (cálculos).

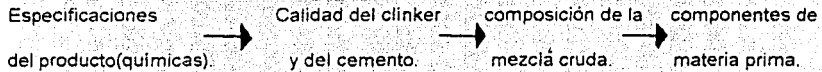
Evaluación, optimización.

Cualquier tipo de cemento tiene que estar en conformidad con las normas individuales de cemento de un país determinado. Las normas, incluyen normalmente la especificaciones químicas para el clinker y para



el cemento. Conjuntamente con los requerimientos físicos y los requerimientos en cuanto a resistencia, garantizan un potencial de calidad conveniente para el tipo correspondiente de cemento.

En cuanto a las materias primas, sólo son importantes los requerimientos químicos:



En otras palabras, las especificaciones del producto determinan la calidad del clinker y del cemento, lo mismo que a su vez determina la composición química de la mezcla cruda y, finalmente, la selección de los componentes de la materia prima.

La secuencia antes mencionada también puede ser invertida: una configuración dada de materia prima, con escasa libertad en cuanto al proporcionamiento de la mezcla cruda, puede darle al producto la posibilidad de producir solamente un único tipo determinado de clinker.

Requerimientos químicos.	Influencia sobre la materia prima.
min. SO <sub>3</sub>	Rechazo de los componentes con contenido de SO <sub>3</sub> (p.ej. esquistos con contenido de yeso)
min. MgO	Rechazo de los componentes con contenido de MgO (p. ej. caliza dolomítica)
min. alcali	Selección de materia prima con bajo contenido alcalino.
min. C <sub>3</sub> A	Selección de componentes con muy bajo contenido de aluminio y/o alto contenido de hierro.

Este cuadro indica la influencia de los requerimientos químicos sobre la selección de las materias primas.

La dosificación de las mezclas crudas para cemento Portland Puzolana Puz-1, se basa en la mayoría de los casos en los siguientes criterios específicos:

-MgO

-Stándar de cal o factor de saturación de cal.

-Módulo de silicios.

-Módulo de aluminios.

Las relaciones son los criterios químicos preferenciales para el proporcionamiento, ya que ofrecen la ventaja de expresar los principales parámetros químicos y los más importantes, tales como  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{CaO}$  en una sólo cifra.

Otros criterios importantes tales como el tipo y composición de los combustibles no deben ser pasados por alto. El fuel oil debe ser considerado como portador potencial de azufre.

Criterios adicionales que podrían influenciar el proporcionamiento de la mezcla tienen que ver con características de rendimiento, por ejemplo:

-Emisión mínima de polvo;

-aptitud a la cinterización;

-componentes extremos que afectan el rendimiento de la maquinaria,

o también con factores económicos, por ejemplo: Máximo rendimiento económico global;

-facilidad y simplicidad de las operaciones;

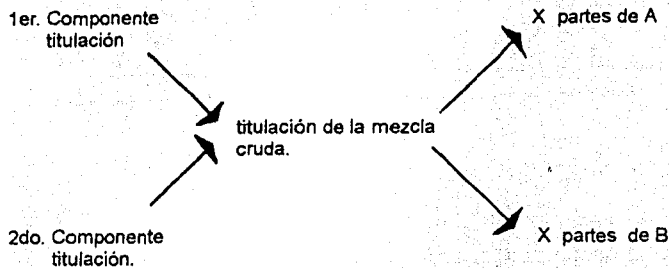
-mínima cantidad de componentes.

Sin embargo, las características de rendimiento pueden normalmente ser controladas a partir de los requerimientos químicos "normales" para mezclas crudas de cemento. Los factores económicos, por otra parte, tienen la misma importancia que los requerimientos químicos.

Principios y métodos para dosificación de mezclas.

El proporcionamiento o cálculo de mezclas crudas potenciales para cemento puede realizarse de diferentes maneras:

Patrón en "X", representa una estimación lineal de dos componentes de materia prima, seleccionando el valor de titulación previsto (contenido total de carbonatos) de la mezcla cruda potencial como base.



Este análisis de la mezcla cruda tiene que ser comprobado con relación a los requerimientos de las especificaciones estándar.

Calculadora programable, las calculadoras producen normalmente una sola solución, de posiblemente varias soluciones existentes. Obviamente este método es la mejor manera de obtener una solución rápida.

Optimización mediante computadora, proporciona la solución óptima de entre una serie de soluciones posibles, considerando los factores de precios como variables. Cuando las materias primas disponibles no pueden satisfacer los requerimientos especificados para la mezcla cruda, se produce una aproximación aproximada y otra correcta que toma en consideración los constituyentes que faltan.

Los cálculos de mezcla se basan normalmente en materia seca. En la práctica, hay que considerar también los contenidos de humedad natural de los componentes de materia prima; esto puede generar cambios en las proporciones originales de la mezcla cruda.

Principios para la evaluación de mezclas crudas.

Básicamente, la evaluación de los componentes de materias primas y de las mezclas crudas parten de los mismos principios. La única diferencia consiste en la comparación inmediata de la composición

química de una mezcla cruda con las especificaciones estándar de los productos para los cuáles se pretende utilizar.

Las posibles combinaciones de diferentes rocas utilizadas en mezclas crudas pueden ser clasificadas como tipos de mezclas. Variadas importantes son:

- Caliza arcillosa (marga) que tiene la composición de un cemento natural. La homogeneización óptima se encuentra realizada dentro de la textura misma de la roca; las reacciones pueden efectuarse fácilmente, inclusive con una mezcla cruda de grano grueso;
- la misma roca en condiciones metamórficas contiene, en vez de minerales de arcilla, silicatos cristalizados; bajo condiciones similares desde cualquier otro punto de vista, la reactividad es menor que en el primer caso y existe una alta probabilidad de que se produzca formación de polvo durante los procesos de preparación y sinterización;
- contraria a los casos antes mencionados, es la combinación de la caliza pura con arcilla pura. Para lograr un contacto estrecho entre arcilla y silicato, ambos componentes tienen que ser molidos finos y homogeneamente. Según el tipo de minerales de arcilla, las mezclas pueden ser más o menos reactivas;
- otro tipo de mezcla consiste en la combinación de caliza relativamente pura, caliza arcillosa y arenisca. El cuarzo introducido por la presencia de arenisca reducirá la aptitud a la molienda y la cocción hasta cierto punto. Se pueden presentar problemas cuando existe la presencia de minerales menos reactivos en los otros componentes.

Las combinaciones de rocas que se utilizan realmente pueden ser relacionadas fácilmente con uno de estos tipos de mezclas. La situación se complica cuando se utilizan aditivos tales como ceniza de pirita, mineral de hierro o bauxita. Si una composición de una mezcla cruda potencial no satisface las especificaciones de un determinado tipo de cemento, se deben ponderar las siguientes medidas:

- Modificaciones de los criterios del proporcionamiento (factor de saturación de cal, módulo de silicios, contenido de  $C_3A$  o de  $Al_2O_3$ , etc.);
- selección de los materiales correctivos necesarios (silice, arena, etc.);
- substitución de componente.

Una evaluación normal de la mezcla cruda, efectuada como medida de rutina, incluye, como una de sus partes más importantes, el examen de la composición mineralógica.

Minerales	Efectos en cuanto a la tecnología.
Aragonita ( $\text{CaCO}_3$ )	molienda en : seco, formaciones de costras e incrustaciones en el molino y alto consumo de energía.
Cuarzo ( $\text{SiO}_2$ )	molienda : abrasión, desgaste y alto consumo de energía. cocción : reduce aptitud a sinterización.
Feldespato	cocción : reduce aptitud a sinterización, baja reactividad.
Minerales arcillosos.	
Montmorilonita.	preparación : absorción de agua, características pegajosas.
Ilita.	cocción : mejora aptitud de sinterización.
Caolinita.	producción de polvo : amortigua producción de polvo.
Mica.	Características de costra: favorece costras y formación de incrustación
Paligorskita.	
Minerales de buena cristalinidad.	baja reactividad, requieren mayor cantidad de energía para su transformación.
Minerales de buena cristalinidad.	alta reactividad, requieren menor cantidad de energía para su transformación.

Las etapas que se consideran como la parte final del diseño una mezcla son la preparación, el examen y la evaluación de los resultados de pruebas efectuadas en el laboratorio.

La preparación correcta de las mezclas crudas para laboratorio, con miras a las pruebas, es el requisito previo para obtener resultados confiables de pruebas y para evaluaciones subsiguientes. Es tan importante como la misma toma de muestras y, por ende, debería insistirse en que ambos procesos deben ser realizados respetando reglas y procedimientos de control estrictamente definidos.

Las características y el comportamiento de la materia prima o de la mezcla cruda de cemento durante las diferentes etapas del proceso de producción no pueden nunca ser anticipados única y exclusivamente en base a los resultados de las pruebas y las conclusiones de las investigaciones en laboratorio. Las pruebas en laboratorio presentan la desventaja de que muchos parámetros importantes a nivel tecnológico tales como la atmosfera del horno, preparación a escala industrial, etc., nunca pueden ser simulados o reproducidos a escala de un laboratorio. Los resultados de las pruebas efectuadas en laboratorio permiten sin embargo reconocer e interpretar tendencias, en las que un amplia variedad de resultados individuales aseguran una evaluación final más confiable.

A fin de asegurarse de que los resultados de laboratorio corresponden lo más estrechamente posible a conclusiones de la práctica industrial, se deberán comprobar y comparar regularmente el diseño de los métodos de las pruebas de laboratorio y los demás aspectos tales como límites, posibilidad de reproducción, etc.

El control de la harina cruda, se hace por medio de sistemas automatizados y computarizados, en donde por medio de muestreadores automáticos se está tomando una muestra continua en el molino y también de modo automático cada 20 minutos se le envía al laboratorio que la homogeneiza y toma una muestra para preparar una pasta que llega al aparato de rayos X, el cual la analiza totalmente, hace la transformación a la composición que debe tener el clinker, o sea el material crudo ya calcinado por medio de la computadora, y al mismo tiempo calcula la composición mineralógica de los silicatos y aluminatos de calcio.

Para el control físico del grado de molienda, o sea que las partículas del polvo también sean uniformes en su tamaño, el sistema de molienda está dotado de un clasificador de polvo, en donde las partículas finas son enviadas a los depósitos de almacenamiento y las gruesas son llevadas nuevamente al molino, estableciéndose un circuito cerrado de molienda y uniformidad en la finura del material.

### 3 1 5. MOLIENDA

Ha pasado mucho tiempo desde la época en que los romanos hacían la molienda en vasija, hasta lograr los sistemas modernos de molienda con capacidad de hasta 400 a 500 t/h.

En el siglo XIX se desarrollaron los sistemas de molienda del crudo en escala industrial. El molino tubular se introdujo entre 1890 a 1900 y posteriormente se lograron molinos de gran tamaño de aproximadamente 5.0m. de diámetro por 20m de longitud, conforme se utilizan en las fábricas modernas de cemento.

Entre 1920 y 1940 se desarrolló el molino de rodillos para la molienda del carbón, y actualmente se utiliza con mucho éxito en la molienda del material crudo del cemento. Entre 1960 y 1970 se instaló el molino autógeno en diversas plantas para la molienda de materiales muy húmedos y aglutinantes, este ya se usaba anteriormente en la industria minera. Otros sistemas, como los molinos vibratorios o los molinos planetarios se utilizan en casos especiales, y sólo cuando se trata de capacidades reducidas.

Conjuntamente con el desarrollo de los hornos de proceso seco, también la molienda cambió más y más del proceso húmedo al seco de la materia prima. La utilización del calor de escape de los sistemas de hornos para propósitos de secado hizo más económica la molienda seca que la húmeda.

El propósito de la molienda del crudo es preparar una mezcla homogénea de la materia prima en las proporciones químicas adecuadas de finura uniforme, y de graduación adecuada del tamaño de las partículas para asegurar las condiciones deseadas de clinkerización en el horno.

#### Propiedades de la materia prima y calidad del producto.

Distribución del tamaño de las partículas de la materia prima. Los diversos sistemas de molienda son contruidos para un tamaño máximo del material de alimentación, además del tamaño máximo, también tiene importancia la granulometría del material de alimentación. Es posible evitar, por un lado, la alimentación del molino con piezas demasiado grandes, usando trituradoras con parrillas y por otro lado, una gran cantidad de material suficientemente fino, instalando separadores antes del molino.

Comportamiento de molienda. Describe la función entre las fuerzas de molienda aplicable, recurriendo a ver las propiedades de materia prima. Por ejemplo, para materiales duros, no pueden aplicarse las fuerzas de fricción, debido a que los instrumentos para la molienda sufren un desgaste excesivo. No obstante, las fuerzas de fricción siempre están presentes como fuerzas de trituración secundarias en todos los sistemas de molienda.

Contenido de humedad de la materia prima. Además de considerar el contenido de humedad mínimo y máximo es esencial investigar el contenido de humedad predominante, especialmente para los sistemas de molienda de proceso seco.

Finura del producto. Como regla general característica, pueden darse las siguientes especificaciones para la finura del producto:

$$R_{200 \mu m} = 1 - 2 \%$$

$$R_{90 \mu m} = 10 - 15 \%$$

donde el límite superior de 200 $\mu$ , es el más importante.

En caso de existir sílice libre en la mezcla del crudo puede necesitarse un molino más fino del crudo para mejorar las condiciones de quemado.

Contenido de humedad residual (material crudo). Con el fin de lograr buenas características de flujo de la harina cruda en los deslizadores neumáticos y en las salidas de los silos se debe tratar de alcanzar un contenido de humedad del 0.5 a 1.0% para la molienda en seco.

Homogeneidad del producto. A pesar de que la homogeneización se logra principalmente premezclando la materia prima y con homogeneización en los silos después de la molienda, existe también posibilidad de reducir las variaciones a corto plazo de la alimentación de crudo, dentro del sistema de molienda.



Se han desarrollado diversos sistemas de molienda para satisfacer, por un lado, los requisitos concernientes al producto y por otro, para adecuarlas a las diferentes propiedades de la materia prima. A continuación se mencionan algunos diseños básicos de molinos.

#### Molino tubular.

Los molinos tubulares son los tipos usados más comúnmente en la industria del cemento. Estos son cilindros de acero rotatorios donde la reducción del tamaño del material se realiza mediante el movimiento de cuerpos molidores. La rotación del cilindro del molino eleva los medios de molienda a una altura óptima necesaria para la molienda. Esta se realiza debido al impacto y a la fricción entre los medios de molienda, los cuales chocan entre sí, así como también entre los medios de molienda y el revestimiento.

El cilindro mismo del molino está dividido por diafragmas en dos o tres compartimientos (fig. 28).

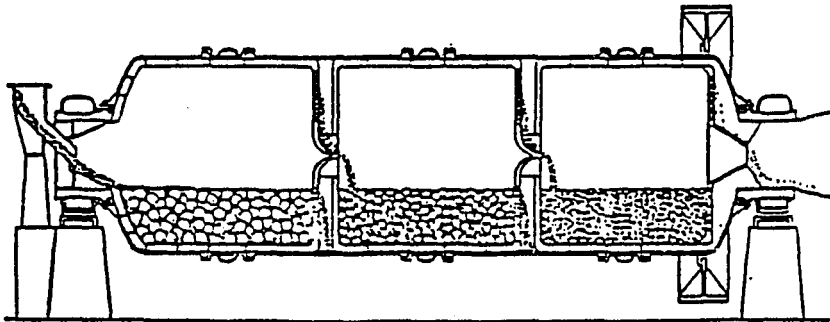
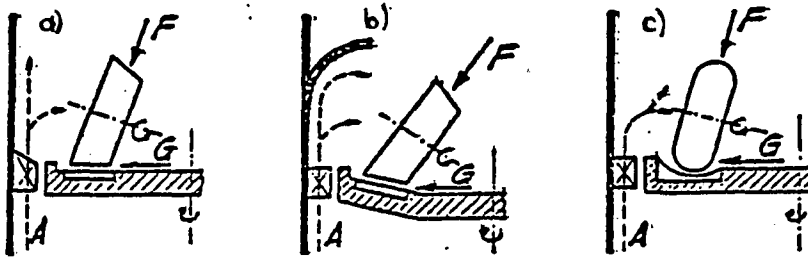


FIG. 28

Molino de rodillos.

En los molinos de rodillos el material se muele debido principalmente a las fuerzas compresoras entre un conjunto de rodillos y una mesa de molienda horizontal rotatoria. Resortes o sistemas hidráulicos presionan los rodillos contra la mesa. (fig. 29).



a) Loesche, Lopulco.

A) Flujo de gas para secado.

b) Raymond, ETV.

G) Materia prima.

c) Rfeiffer.

F) Fuerza de tensión.

FIG. 29

#### Molino autogeno.

La materia prima en sí misma realiza la molienda, esto quiere decir que las partículas del material actúan como cuerpos molienda. Debido al diseño especial del molino, como su gran diámetro, velocidad relativamente alta y el uso de revestimientos especiales se logra el gran impacto y las fuerzas de fricción que se aplican entre las partículas. El producto aún grueso del molino autógeno se vuelve a moler posteriormente en un molino a bolas convencionales.

Las partes internas de un molino tubular están protegidas por medio de placas de blindaje resistentes al desgaste. Las placas de blindaje deben ser de tal forma diseñadas que su reposición sea fácil y que la transmisión de energía del motor del molino al proceso de molienda sea óptimo.

La forma y calidad del material de las placas de blindaje deben satisfacer las exigencias de tiempo de vida (costos de desgaste), y de interacción con los elementos molturadores (eficiencia de molienda). El tipo y calidad de material de las partes internas de un molino, así como el dimensionamiento de los elementos molturadores dependen básicamente de los criterios siguientes:

- Tipo de material a moler (materia prima, cemento.);
- tamaño del material de alimentación, contenido de humedad;
- molturabilidad y aptitud a la trituración;
- tipo de molino (número de compartimientos, tipo de descarga, circuito abierto o cerrado.);
- dimensiones del molino.

#### Tipos de elementos internos del molino.

El proceso de molienda en un molino tubular se efectúa por la interacción entre las partes internas del molino y los elementos molturadores. A fin de mantener la eficiencia de molienda a lo largo del molino se requiere una graduación de los medios molturadores. Esto se logra subdividiendo al molino en un compartimiento de molienda de gruesos y un compartimiento de molienda de finos, separadas una de la otra por diafragmas ranurados.

En la siguiente fig. se muestra un corte transversal de un molino de dos compartimientos, indicándose las placas de blindaje individuales.

Las placas de blindaje para compartimientos de molienda de gruesos y de finos debe resistir las fuerzas de impacto causadas por el levantamiento continuo de los cuerpos molturadores, así como el desgaste causado por la fricción entre los cuerpos molturadores, el material y las placas mismas.

El material elegido debe satisfacer los requerimientos siguientes:

- Endurecimiento homogéneo y composición estructural homogénea;
- alta resistencia contra choques repetidos y alta resiliencia;
- tasa de desgaste baja, sin deformaciones ni roturas.

El desarrollo tecnológico en el campo de la metalurgia ha desembocado en la existencia de una amplia variedad de materiales de blindaje con propiedades muy diversas. Los tipos más comunes son:

Acero al manganeso.

composición química : 12 - 14 % Mn.

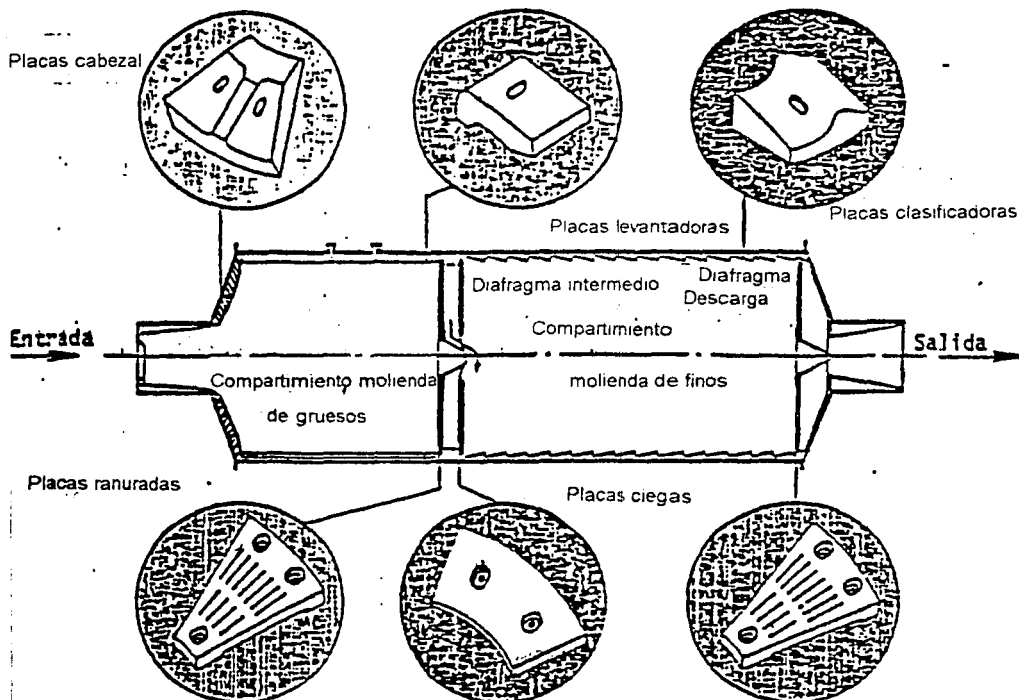
dureza de superficie inicial : 20 - 25 HRC.

Durante la operación, el impacto de los elementos molturadores aumenta la dureza de superficie hasta 40 HRC. En molinos grandes, las placas de blindaje de acero de manganeso se deforman con frecuencia y la corteza del molino puede ser dañada; por lo tanto, las placas de blindaje al manganeso se recomiendan únicamente para molinos pequeños.

Al bajo cromo:

composición química : 2.0 - 3.0 % Cromo.  
0.5 - 0.6 % Carbón.

dureza : 40 - 42 HRC.



Las placas al bajo cromo son menos sensibles al impacto que las placas al manganeso, y pueden por ello ser usadas en molinos grandes.

Al alto cromo:

composición química :    12 - 25 %    Cromo.  
                                  1.2 - 2.5 %    Carbón.

dureza                    :    50 - 55 HRC.

resistencia a la tracción : 900 - 1200 N/mm<sup>2</sup>

resiliencia                :    4 - 10 J/cm<sup>2</sup>

Las placas de blindaje al alto cromo constituyen el material más resistente al desgaste y se utilizan para molinos pequeños y grandes. Dependiendo del compartimiento de molienda de que se trate, pueden aplicarse las calidades de material siguiente:

-Compartimiento de molienda de gruesos: dureza baja y resiliencia alta.

-Compartimiento de molienda de finos: dureza alta y resiliencia baja.

La dureza de las placas destinada a un compartimiento de molienda de gruesos es, en general, algo menor a la dureza de las bolas molturadoras respectivas.

Diseño de placas de blindaje:

Placas levantadoras, se utilizan en el compartimiento de molienda de gruesos y, en molinos menos modernos, también en el compartimiento de molienda de finos. En el compartimiento de molienda de gruesos, la placa debe levantar y dejar caer nuevamente a los elementos molturadores de tal modo que el impacto sea suficientemente fuerte como para quebrar las partículas grandes del material. Los elementos molturadores no deben ser levantados demasiado alto, ya que en tal caso, algunos de ellos caerían sobre las placas directamente, aumentando de este modo el desgaste de las placas de blindaje y de los elementos molturadores.

El espesor de las placas del molino depende del diámetro del molino y fluctúa entre 30 y 70mm. Las placas son generalmente de forma rectangular y con pesos correspondientes entre 50 y 150 kg. En la fig. 30 se ilustran algunos de los tipos de placas levantadoras más conocidos.

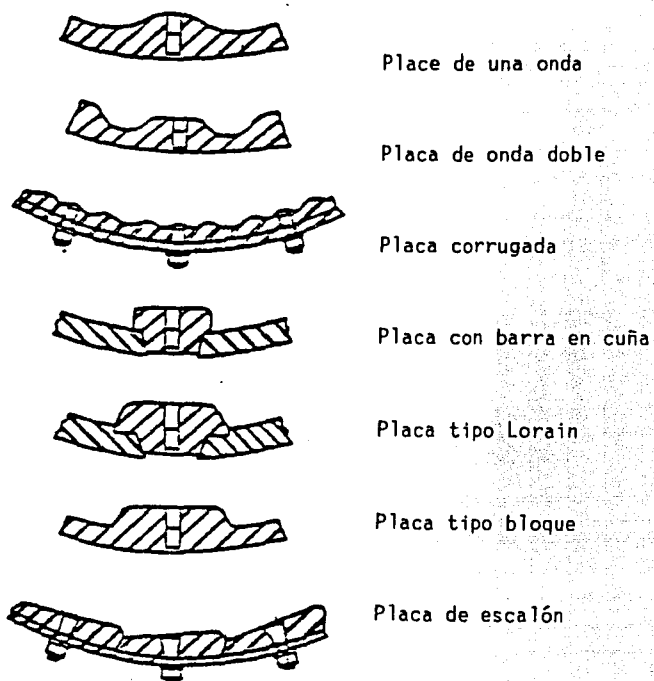


FIG. 30

La longitud y el ancho de las placas de blindaje ha sido estandarizado (DIN 24111) como sigue:

- Ancho de la placa : 304 - 308 mm. (dependiendo del diámetro del molino);
- distancia del hueco para perno : (314 mm.) (250 mm.);
- longitud de la placa : 247 mm. un perno  
(fig. 31) 494 mm. dos pernos

Placas clasificadoras, los compartimientos para molienda de finos están frecuentemente equipados con placas clasificadoras; estas placas segregan automáticamente a los elementos molidores, es decir, dirigen los elementos molidores grandes hacia el extremo del compartimiento donde está la entrada, con un decrecimiento progresivo del tamaño de las bolas al acercarse las mismas al extremo de salida del molino. Las formas de las placas clasificadoras, tal y como son usadas en los compartimientos de

molienda de finos, produce la clasificación de las bolas según el tamaño de las bolas a lo largo del compartimiento del molino.

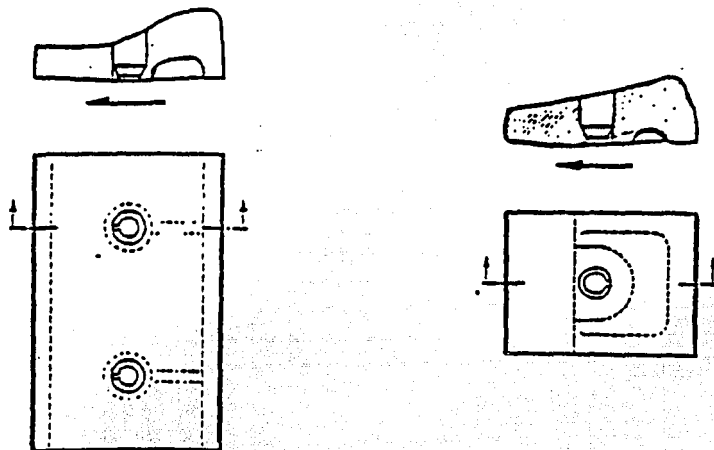


FIG. 31

#### Fijación de las placas de blindaje al molino.

Las placas del molino son fijadas a la corteza del molino, ya sea por uno o por dos pernos como se muestra en la fig. 32. Con reducir el número de pernos, puede también asimismo recurrirse al montaje de placas atornilladas en cantidad reducida, utilizando placas con pernos y placas sin pernos. Como lo indica su nombre, la placa sin pernos es autotransportante.

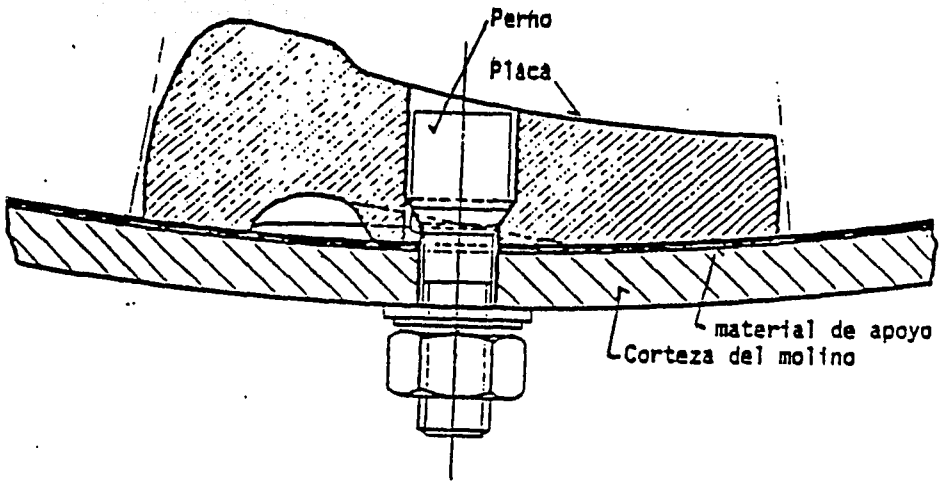


FIG. 32

Primero se forra la mitad inferior del molino, y las placas finales son apuntaladas con clavijas; después se da un giro al molino afin de facilitar la instalación de las placas en la otra mitad del mismo, ver fig. 33.

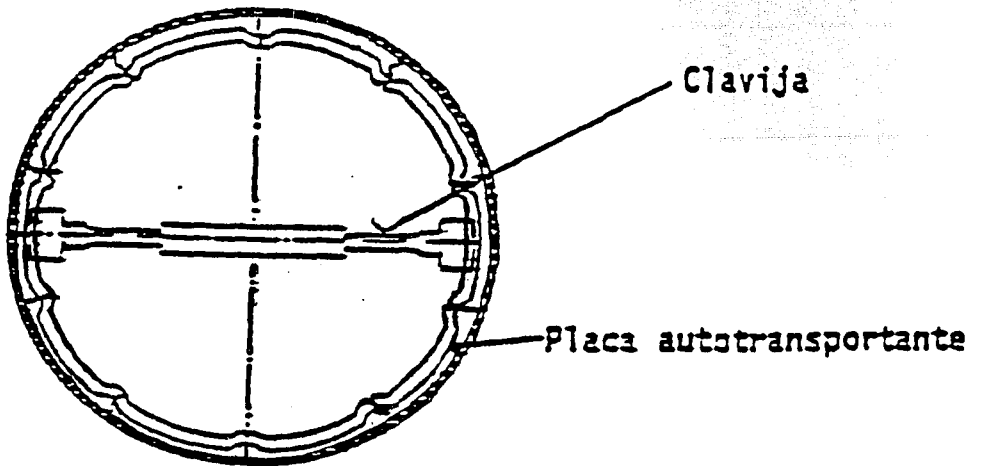


FIG. 33



La instalación de placas autotransportantes o de placas atornilladas en cantidad reducida ofrece las ventajas siguientes comparada con la instalación de placas convencionales:

- Más larga vida de la placa gracias a la eliminación del hueco de fijación, mismo donde generalmente se inicia el desgaste;
- eliminación del rompimiento de pernos, lo que causa con frecuencia paradas del molino;
- eliminación del goteo en la corteza del molino causada por pernos flojos.

La instalación de blindajes sin pernos debe ser invariablemente controlada por un supervisor experimentado del proveedor del equipo, a fin de evitar un colapso de las placas.

Con respecto a la tasa de desgaste y tiempo de vida, cabe esperar los tiempos de vida detallados a continuación para placas "al alto cromo":

Compartimiento de molienda de gruesos:

Cemento : 25,000 - 30,000 h.

(3,000 cm<sup>2</sup>/g, n = 75% )

bolas de 90 mm. máximo.

Harina de crudo : 30,000 - 40,000 h.

12 - 14 % R 90 u, 2 - 4 % de cuarzo.

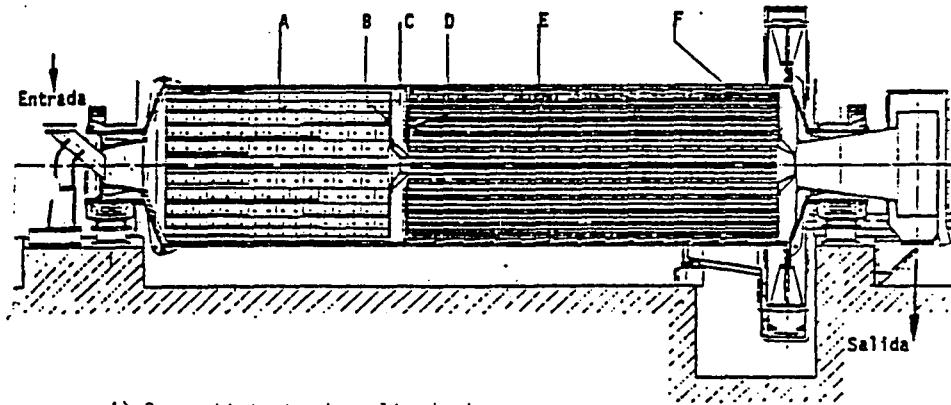
Compartimiento de molienda de finos:

Asumiendo condiciones similares a las mencionadas en lo que se refiere a finura y tamaño de las bolas, cabe esperar un tiempo de vida aproximadamente el doble al asignado al compartimiento de molienda de gruesos.

Diafragma intermedio y de descarga.

La función de los diafragmas intermedios es separar los diferentes tamaños de los elementos molidores para los compartimientos de molienda gruesa y fina. El material molido en el primer compartimiento pasa a través de las ranuras del diafragma intermedio y entra al siguiente compartimiento

de molienda para abandonar después el molino a través del diafragma de descarga, como se muestra en la fig. 34.



- A) Compartimiento de molienda de gruesa
- E) Compartimiento de molienda fina
- B) Placa ranurada
- C) Elevadores                      Diafragma intermedio
- D) Placa ciega
- F) Diafragma de descarga con placas ranuradas

FIG. 34

Aparte de la tarea antes mencionada de subdividir el molino, los diafragmas, intermedio y de descarga, tiene también una función de retención del material grueso en el compartimiento de que se trate, es decir, el material debe ser suficientemente molido en el compartimiento de gruesos antes de abandonar éste para ser transferido al compartimiento de molienda de finos.

Dependiendo en el tipo y diseño del molino, se aplican varios tipos de diafragmas:

-Diafragma sencillo. Se instalan como separación entre el compartimiento de molienda de gruesos y el de molienda de finos en molinos de tamaño reducido. El diafragma sencillo también se aplica como diafragma de descarga en molinos de descarga central.

-Diafragma abierto. Se instalan como elementos de separación entre los compartimientos de secado y de molienda. Las placas ranuradas deben ser suficientemente grandes como para permitir la transferencia de los gases de secado a través del molino.

-Diafragmas dobles. Estos consisten de placas ranuradas en la parte de la entrada y de placas ciegas en la parte de la salida. Además, el diafragma está equipado con elevadores a fin de levantar el material de un compartimiento al otro. La parte central del diafragma está abierta, a fin de permitir un paso suficiente de aire de ventilación y de secado a través del molino.

-Diafragma de descarga. Son instalados a la salida de los molinos de descarga final; los diafragmas de decarga, con frecuencia, también están equipados con elevadores similares a los de los diafragmas dobles.

Tanto el diafragma intermedio como el de descarga causan con frecuencia una operación insatisfactoria del molino, por las razones siguientes:

- Calidad del material de las placas ranuradas inapropiada, lo que reduce su tiempo de vida;
- atascamiento del diafragma por bolas rotas o por grumos del material;
- pérdida considerable de presión debida a la reducida superficie libre para el aire de ventilación del molino;
- tiempo de retención del material demasiado corto o demasiado largo en el compartimiento de molienda, debido a un diseño inadecuado de las ranuras.

El diafragma es el punto más débil del molino, por lo que al tiempo de vida se refiere, que son aproximadamente 10,000 horas. A fin de evitar los problemas mencionados, el molino y los diafragmas deben ser inspeccionados a intervalos regulares para limpiar o reajustar el diafragma.

En la parte de la entrada del molino los diafragmas están provistos de las llamadas "placas ranuradas", hechas de acero resistente al desgaste. El ancho de las ranuras depende de :

- El material a moler;
- tamaño mínimo y máximo de las bolas;
- longitud del compartimiento;
- volúmen de aire de ventilación del molino.

Las ranuras del diafragma de descarga son, con frecuencia, más anchas que las del diafragma intermedio.

Los molinos de crudo con volúmenes grandes de secado requieren ranuras más grandes a fin de disminuir la pérdida de presión.

Las placas ranuradas pueden estar hechas de acero especialmente endurecido y resistente al desgaste o de materiales al alto cromo, con una dureza de superficie de 55 - 60 HRC.

Dependiendo del material, pueden esperarse las siguientes tasas de desgaste y tiempos de vida:

Materia prima : 1.5 g/t            10,000 - 15,000 h.  
( 10% R 90 u, 17 kwh/t).

Clinker :            0.85 g/t            8,000 - 10,000 h.  
( 2,800 cm<sup>2</sup>/g, 30kwh/t).

La carga de bolas de un molino consiste de bolas molturadoras de varios tamaños y de diferentes calidades de material.

La molienda de gruesos se realiza, normalmente, con bolas de entre 50 y 100 mm. mientras que la molienda de finos se efectúa con bolas de entre 15 y 50 mm. Los tamaños máximo y mínimo de las bolas y la composición de estos tamaños depende de varios factores, entre ellos:

- Tamaño máximo del material de alimentación a ser molido;
- finura del producto ;
- diámetro del molino, longitud del molino;
- molturabilidad y estructura mineralógica del material de alimetación;
- sistema del molino (circuito abierto/cerrado, número de compartimientos, carga circulante).

Dependiendo del proceso de molturación y de la etapa de molienda de que se trate, las bolas deben resistir:

- Las fuerzas de impacto de las bolas mismas (especialmente en la molienda de gruesos con bolas),

Con el fin de mantener una producción constante y óptima, debe realizarse con mucho cuidado la selección de los tamaños adecuados de las bolas así como la calidad del material respectiva.

Elementos molturadores forjados. Estos elementos molturadores se usan para molienda para metales no demasiado abrasivos.

composición química: 0.5 - 1.0 % C  
0.8 - 1.2 % Mn  
0.8 - 12 % Cr

dureza de superficie : 35 - 42 HRC (decreciente en dirección al centro de la bola).

Elementos molturadores de alto cromo. Son los elementos molturadores más resistentes al desgaste. La tasa de desgaste ha sido reducida únicamente en aprox. 20 - 50 %. Dependiendo del material a moler y del compartimiento de que se trate, se aplican las siguientes calidades:

Compartimiento de molienda de gruesos (alta resiliencia).

Materia prima : 12 % Cr, 2% C, 58 - 60 HRC

Clinker : 17 % Cr, 2 - 2.5 % C, 60 - 61 HRC

Compartimiento de molienda de finos (baja resiliencia).

Materia prima :

12 % Cr, 3 % C , 62 -63 HRC

Clinker :

Considerando las calidades de material mencionadas se puede esperar las siguientes tasas específicas de desgaste.

Harina cruda : 17 kwh/t, 10 - 15 % R 90 um.

Clinker : 30 kwh/t, 3000 cm<sup>2</sup>/g.

Existe una variedad de sistemas de molienda en seco. Estos consisten, casi sin excepción de molino de circuito cerrado combinados frecuentemente con el secado dentro del sistema del molino.

Aún cuando parece obvio el uso de gases de escape no es sólo para propósitos de secado, sino también (debido a su gran volumen) para el transporte de material esta ventaja tiene que pagarse con los costos elevados de energía.

La selección de un sistema de molienda-secado no sólo debe basarse en las propiedades de la materia prima y en la calidad del producto, sino también en el consumo de energía respectivo, el requisito de espacio y en los costos de inversión. Desde al punto de vista operacional también tiene que considerarse los requisitos de mantenimiento, las posibilidades de automatización así como la disponibilidad y confiabilidad del sistema a seleccionarse. A continuación se describen algunos sistemas de secado de molienda.

#### Sistemas de molienda-secado con transporte mecánico del producto.

##### Molino corriente con elevador de cangilones.

El molino con elevador de cangilones consta de dos o más compartimientos de molienda en circuito cerrado con un separador dinámico. Los elevadores de cangilones transportan el material molido hacia el separador donde se le separa en producto terminado (finos) y en el grueso, lo que es alimentado a la entrada del molino en la fig. 35 se muestra la disposición típica.

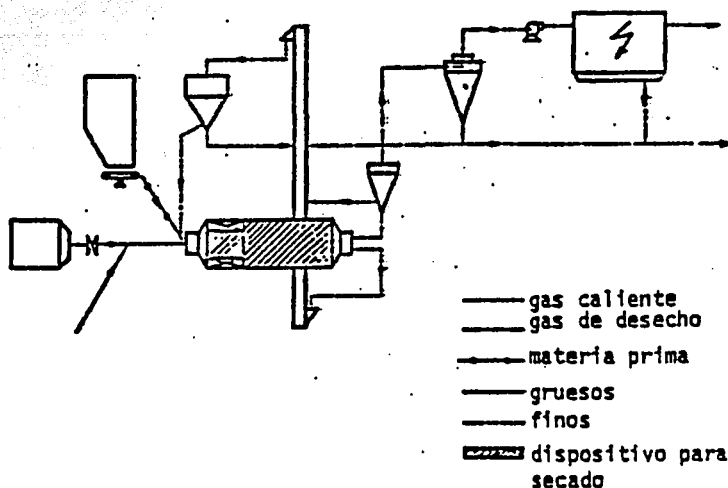


FIG. 35

De acuerdo a los aspectos de molienda, un molino de un sólo compartimiento puede recibir una alimentación máxima de 10 a 15 mm.; la subdivisión en dos compartimientos de molienda (gruesa y fina) permite una alimentación de granos algo más grande de 15 a 20 mm. Puede utilizarse el molino de un sólo compartimiento para materiales de fácil molienda que contienen gran parte de material fino. Un molino de dos compartimientos debe usarse únicamente para materiales duros o semiduros para evitar la molienda excesiva del material.

La sección libre de los muñones del molino limitan la circulación de los gases de secado a través del molino. Se puede aumentar la capacidad de secado si se equipa el molino con un compartimiento de secado integrado. Se han desarrollado diseños especiales con el fin de reducir la carga térmica, así como también las pérdidas de presión. Los molinos han sido equipados con un compartimiento de secado adelante del muñón de entrada, permitiendo de ésta manera que los gases que deben pasar el muñón sean menos voluminosos. En la fig.36 se muestra un molino con rodamiento de zapata deslizador, eliminando de ésta manera completamente el muñón del extremo de la alimentación.

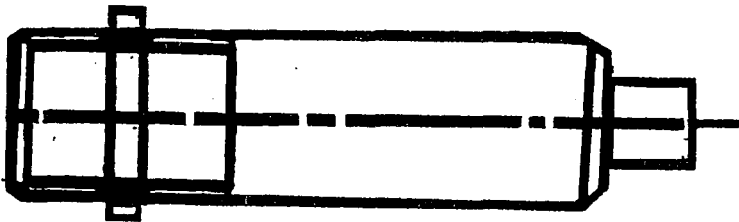


FIG. 36

Capacidad de secado	Con compartimiento de secado	Sin compartimiento de secado
Temperatura del gas 620k	3 - 5 % H <sub>2</sub> O	1 - 2 % H <sub>2</sub> O
Temperatura del gas 1070k	6 - 8 % H <sub>2</sub> O	no se usa.

Molino de elevador de cangilones con secado en el separador.

Este molino es similar al molino con elevador de cangilones corriente descrito anteriormente, pero las materias primas se alimentan al separador y no al molino como se muestra en la fig. 37.

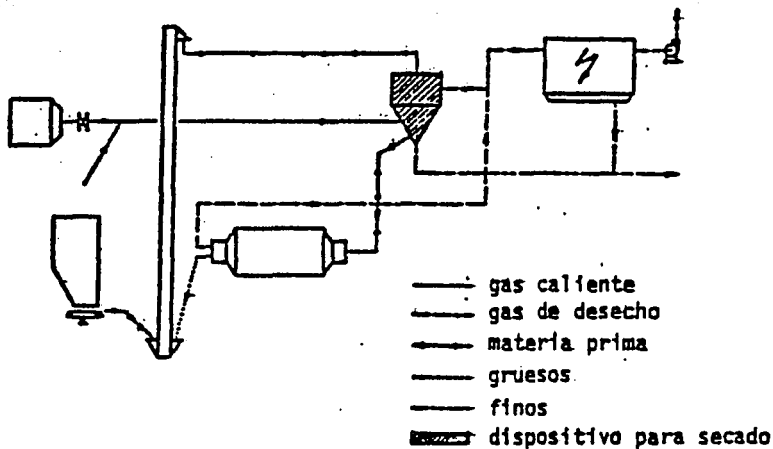


FIG. 37

La materia prima inyectada al separador no debe exceder los 10mm., es decir, tiene que triturarse previamente. El separador elimina las partículas finas contenidas en el material y sólo se alimentan los residuos a un molino relativamente corto de uno o dos compartimientos.

El secado en el separador alivia al molino de la carga térmica pero, debido al caudal limitado de gas a través del separador no ofrece gran capacidad de secado. Si hay interrupciones en el sistema de alimentación del separador puede producirse sobrecalentamiento del eje principal del separador.



Su capacidad de secado:

Temperatura del gas para secado 620 k : 2 - 3 % H<sub>2</sub>O

Temperatura del gas para secado 1070 k : 6 - 7 % H<sub>2</sub>O

Si existen aspectos abrasivos en la materia prima el desgaste en el separador puede ser un grave problema.

Sólo se debe escoger este sistema si se puede garantizar el tamaño máximo de alimentación necesario, y si hay una gran cantidad de materia fina en el material de alimentación.

Molino de descarga central (Doble rotador).

El molino de descarga central está compuesto de un compartimiento para molienda fina y gruesa combinado con una separación intermedia. Se descarga el material molido a través de las aberturas periféricas que se encuentran en el centro del molino entre los compartimientos de molienda fina y gruesa. Los residuos del separador pueden alimentarse sea al primer o al segundo compartimiento, mostrado en la fig. 38.

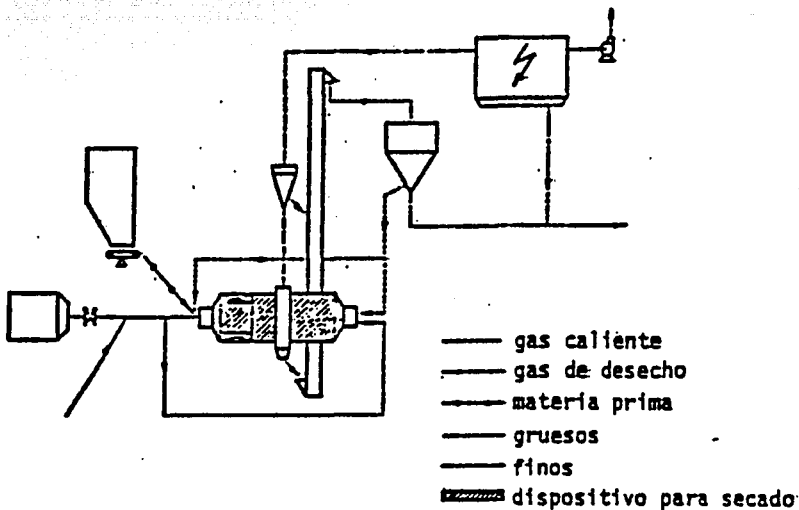


FIG. 38

La subdivisión de la molienda permite adaptar los compartimientos de molienda según los requisitos de molienda fina o gruesa, dando como resultado una utilización óptima de energía y por consiguiente un

menor consumo de energía específica. El molino es menos sensible a los efectos de las variaciones de molidurabilidad, al tamaño del material de alimentación y además el riesgo de la molienda excesiva es menor.

El tamaño normal de alimentación es cerca de 30 mm, pero puede aumentar hasta 50 mm, para material con buen índice de molidurabilidad. La descarga central de este molino permite introducir gases de secado desde ambos lados, de manera que la cantidad de gases puede ser el doble en comparación con un molino de descarga corriente. Si el molino está equipado con un compartimiento de secado puede aumentarse considerablemente la capacidad de secado.

	Con compartimiento de secado	Sin compartimiento de secado
Temperatura de gas	620k	1070k
	6 - 7 % H <sub>2</sub> O	12 - 13 % H <sub>2</sub> O
Temperatura de gas	620k	no se usa
	1 - 2 % H <sub>2</sub> O	

El molino de descarga central, aun siendo una instalación de por sí algo compleja, ha resultado ser un sistema fácil y confiable para operar, no obstante, los requisitos de espacio y los costos de inversión son más bien altos. (fig. 39).

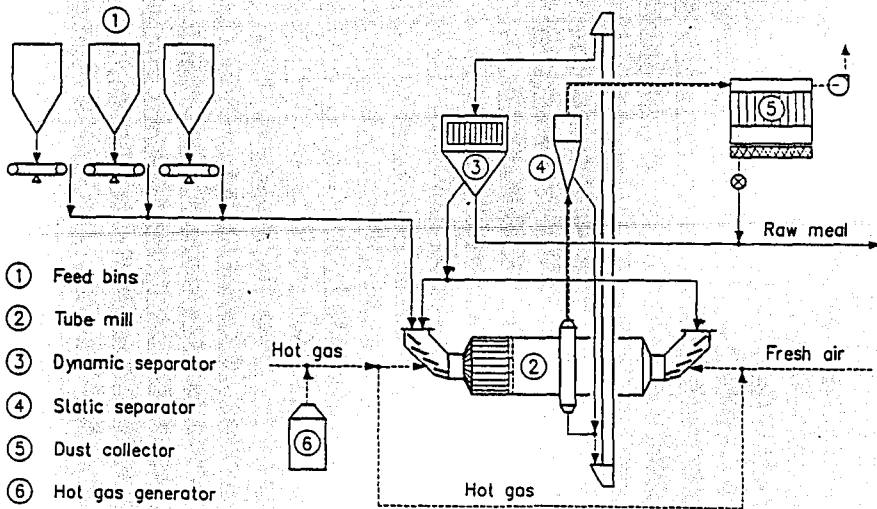


FIG. 39

Sistemas de molienda- secado con transporte neumático del producto.

Molino corriente con barrido de aire.

La materia prima entra al molino conjuntamente con la corriente de gas a través del muñon de entrada. El material es presecado en el compartimiento de secado integrado y se muele en el compartimiento de molienda. El material del molino es transportado por la corriente de gas y se separa en separador estático; los gruesos se alimentan al molino. Fig. 40.

La velocidad relativamente alta del gas dentro del molino permite sólo un bajo grado de llenado del 26% aproximadamente. Si se aumenta demasiado el grado de llenado, la corriente de aire llevaría demasiadas partículas gruesas fuera del molino. El calibre máximo de alimentación, por lo tanto, debe mantenerse preferentemente a 15 - 20 mm. Si el tamaño de alimentación excede de 20 mm., un mayor consumo, de energía específica debe esperarse.

El molino con barrido de aire es muy conveniente para grandes volúmenes de gas, aumentando así considerablemente la capacidad de secado en comparación con molino corriente con elevador de cangilones. El molino está generalmente equipado con un compartimiento de secado integrado.

Capacidad de secado	Con compartimiento de secado	Sin compartimiento de secado
Temperatura de gas 620k	10 % H <sub>2</sub> O	3 - 5 % H <sub>2</sub> O
Temperatura de gas 1070k	20 % H <sub>2</sub> O	no se usa

El principio de transporte neumático aplicado en el molino con barrido de aire requiere más energía que en los molinos de manejo mecánico de material.

Todos los sistemas de molienda deben ser operados de tal forma que se obtenga la producción requerida así como la calidad de producto deseada, tomando especialmente en cuenta los costos relevantes de producción. Apesar de que existe un caudal considerable de experiencias acerca de la operación de molinos tubulares se observa con frecuencia que los molinos no son operados a su eficiencia máxima. Si se toma en cuenta la multitud de combinaciones posibles para sistemas de molienda, resulta evidente que difícilmente se pueden establecer instrucciones generales acerca de como operar y mantener un sistema

de molienda. Por lo que resulta importante realizar pruebas de funcionamiento e inspecciones a intervalos regulares, para implantar posibles mejoras, con lo que se obtiene y garantiza un funcionamiento óptimo del molino.

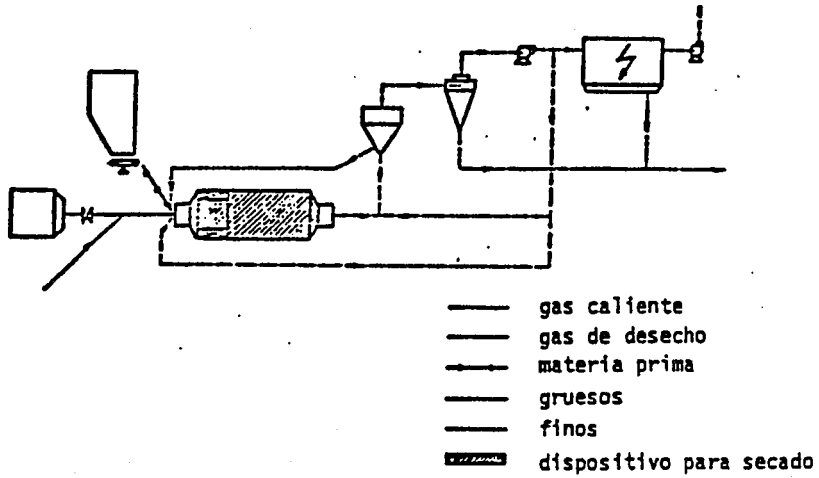


FIG. 40

### 3.1.6. HOMOGENEIZACION.

El polvo crudo que se recibe en los depósitos de almacenamiento es sometido a un proceso de homogeneización a fin de obtener un material física y químicamente homogéneo antes de pasar a la calcinación, para lo cuál el control de calidad dará su visto bueno antes de su empleo.

Las investigaciones sobre lo que pasa dentro de un silo son difíciles visto que una observación directa del flujo no es posible. El camino único para obtener una información útil es el comparar la concentración en la entrada y en la salida del silo. Para este fin una perturbación bien definida de uno de los componentes en la entrada, debe ser producido combinando el porcentaje de este componente en la mezcla cruda. Debe ser un componente que tenga una composición bastante constante y que no entre en la mezcla en cantidades grandes, por ejemplo el óxido de hierro. Así se puede entonces comparar la concentración en la entrada y en la salida

Los silos de homogeneización se clasifican de acuerdo con el principio de trabajo:

- Silos de homogeneización por carga;
- silos de homogeneización continua con reboso;
- silos de homogeneización continua por mezcla.

En lo siguiente algunos de los más utilizados silos están tratados; los datos técnicos representan un valor aproximativo.

#### Silos de homogeneización por carga.

Una instalación típica consiste de dos silos de almacenamiento y dos silos de homogeneización. Los silos de homogeneización están localizados en la parte superior, los de almacenamiento en la parte inferior de la construcción; los silos de homogeneización tienen una capacidad de 6 a 11 horas de producción del molino de crudo. Los silos se llenan alternativamente y en el tiempo que uno es llenado el otro es homogeneizado. La descarga del material generalmente necesita de 2 a 3 horas.

Sistema "octant" de Polysius. Los sistemas utilizados más frecuentemente son los de aereación por cuadrante o por octantes, como lo muestra la fig. 41.

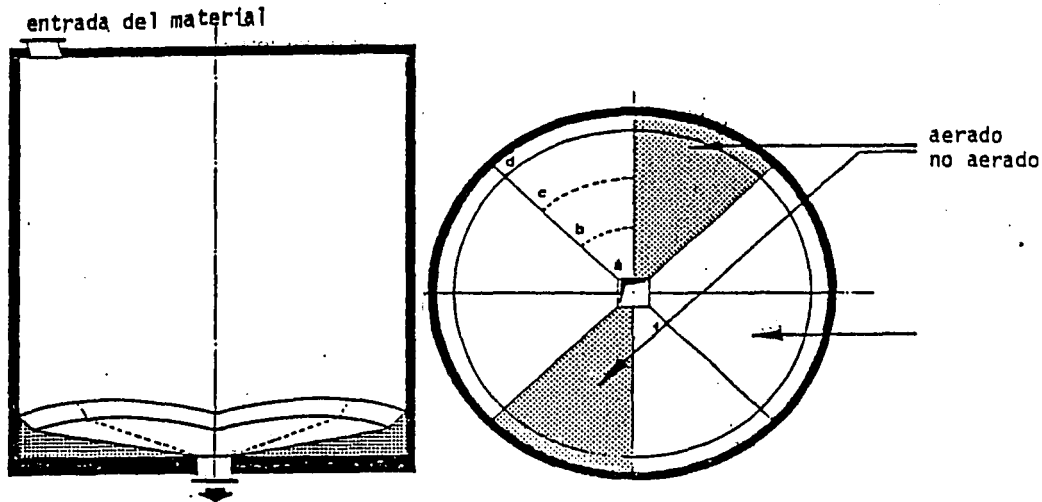


FIG. 41

El fondo del silo consiste de 8 sectores de los cuales solamente dos opuestos son aereados al mismo tiempo. Los sectores están divididos en segmentos, en los cuales cantidades diferentes de aire pueden ser introducidas; cada par de sectores es aereado durante 10 minutos y la homogeneización de la carga toma 40 minutos.

Otros sistemas de aereación. Otros sistemas de homogeneización por carga trabajan en una manera semejante, que a continuación se describen:

-Método cuadrante de Fuller, el fondo del silo es subdividido en cuadrantes; tres compresores trabajan simultáneamente de los cuales dos en el sector activo y uno en los 3 sectores pasivos. Después del tiempo determinado otro sector se utiliza como sector activo;

-sistema FLS (embudo), se trata de una instalación semejante a los silos de homogeneización por carga; sin embargo no hay aereación. En la fase de llenado de un silo, el crudo es almacenado en forma de capas,

durante la descarga se forma un embudo y el material de las diferentes capas se mezcla. la eficiencia de homogeneización depende del ángulo que forma el crudo en el silo; con ángulo grande se obtiene una eficiencia mayor. Teniendo en cuenta que el material entrante es bastante fluido generalmente el ángulo es muy pequeño; por esta razón se deben prever por lo menos 2 silos en serie de manera que el efecto de homogeneización sea doble.

Silos de homogeneización por carga fuerón construidos con una capacidad máxima de 5000t., la relación diámetro/altura es generalmente 1/ 1.2 (altura se refiere a la altura del material en el silo). El consumo de energía en estos sistemas depende fuertemente del tiempo de homogeneización y tambien del arreglo del sistema de aereación; generalmente el consumo varía entre 0.3 y 0.6 kwh/t. Los valores más bajos se obtienen con el sistema "octant".

Sistema de homogeneización continuo con reboso.

El sistema con reboso usualmente consiste de la combinación de un silo de homogeneización y un silo de almacenamiento. El silo de homogeneización tiene normalmente una capacidad de 6 a 10 horas de producción del molino de crudo y la relación diámetro/altura es 1/1.2. El principio se muestra en la fig. 42.

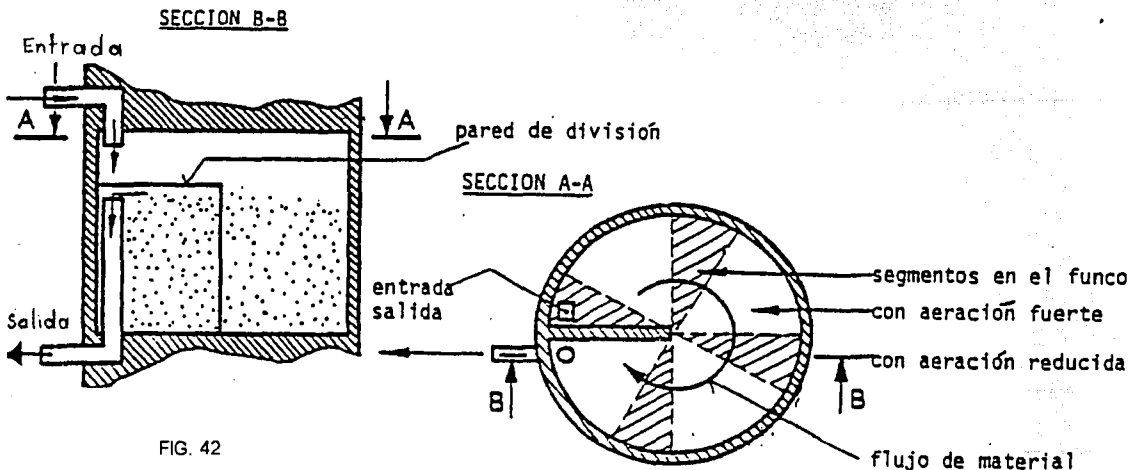


FIG. 42

Mediante segmentos en el fondo del silo aereados diferencialmente crudo es mezclado y transportado del lado de entrada al lado de salida de la pared de división.

El consumo de energía en el sistema descrito es generalmente mayor que el sistema trabajando por carga, se han obtenido valores de 1.2 kwh/t aproximadamente.

Silos de homogeneización continua.

El diseño moderno de sistemas de homogeneización continuo consiste de un silo único el cual sirve para la homogeneización y el almacenamiento; en vez de mezclarse el material por aereación, la mezcla se hace durante la descarga creando un flujo en forma de un embudo. Fig. 43.

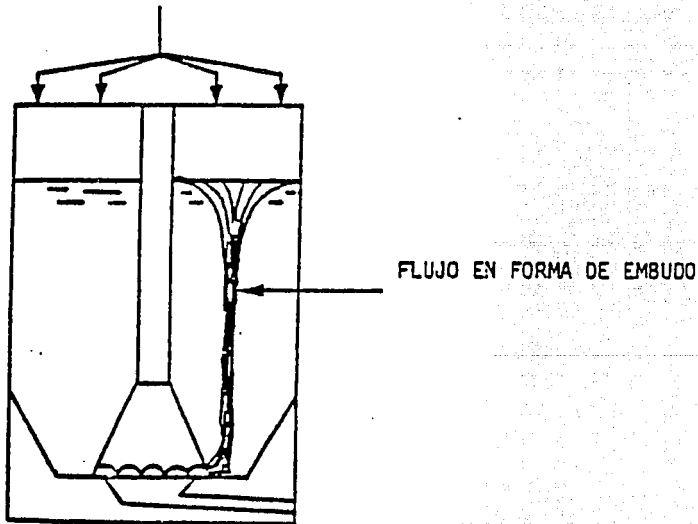


FIG. 43

Por consiguiente un efecto de homogeneización suficiente solamente puede ser obtenido manteniendo un grado de llenado del silo relativamente alto, con un grado de llenado bajo el efecto de homogeneización es insuficiente; el silo debe ser llenado por lo menos al 30%.



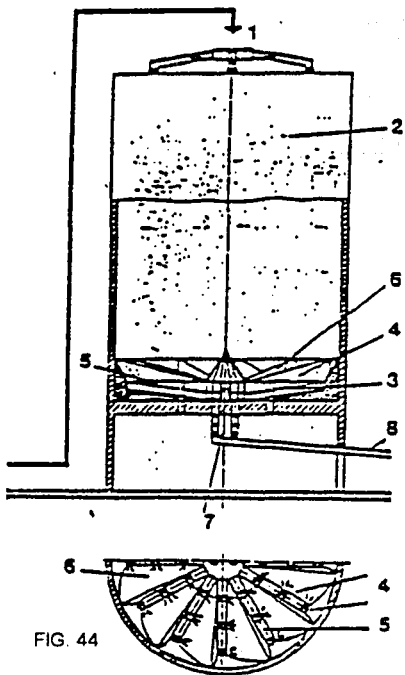
Polysius sistema continuo.

El fondo del silo consiste de canales inclinados y aereados, el número de canales depende del diámetro del silo. Cada canal tiene aproximadamente tres aberturas, el resto del canal está cubierto. Las aberturas más grandes están del lado de la pared del silo, el área entre los cuales está ligeramente inclinado y equipado con aereadores, (ver fig.44). La entrada del material está trasladada de fase en 90° respecto, a la salida.

El material se retira del silo por uno o dos canales. La homogeneización se hace por:

- Formación de flujos en forma de embudo arriba de las aberturas del canal de descarga;
- por rotación del canal de descarga.

Silos de este tipo se han construido con capacidades de hasta 7500 toneladas. La relación diámetro/altura normalmente es de 1/1.5; el consumo específico de energía es de 0.2 kwh/t aproximadamente. La eficiencia de homogeneización es del orden de 1/2 a 1/5 (llenado de silo mínimo 30 %).



1. Sistema de alimentación
2. Silo de homogeneización continua
3. Canal de descarga
4. Aberturas al canal de descarga
5. Coverturas del canal de "
6. Aeras aereadas con inclinaciones unilaterales
7. Equipo de extracción de dosificación
8. Transporte hacia el horno

FLS sistema de flujo controlado.

La idea básica del sistema es que toda la columna de material en el silo debe tenerse en movimiento y que una distribución adecuada del tiempo de retención del material que entra y que sale debe alcanzarse a fin de obtener un efecto bueno de homogeneización, ver fig.45.

El material que entra en el silo se distribuye uniformemente, el fondo del silo consiste de 42 segmentos triangulares y puntos de descarga. Los segmentos triangulares están parcialmente cubiertos con aereadores los cuáles se pueden aerear independientemente. El material se retira de las 7 descargas con un flujo controlado y se lleva a una cámara de mezclado neumática debajo del silo.

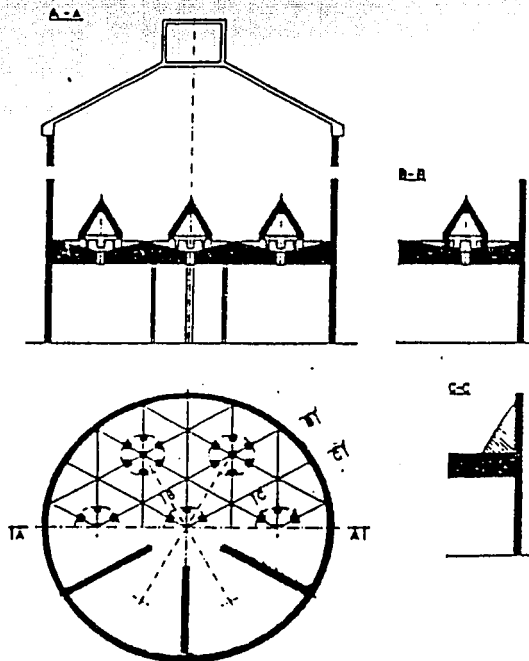


FIG. 45

Tiene un consumo de energía 0.3 kwh/t, eficiencia de homogeneización 1:10 con un grado de llenado mínimo de 50 %.

### 3.1.7. EL CLINKER

El clinker es un producto intermedio en la manufactura del aglutinamiento del hidráulico conocido como cemento Portland Puzolana. Mediante un tratamiento térmico simple, una mezcla de minerales naturales no-hidráulicos, calcita, cuarzo, arcillas y feldespato, es transformada en una mezcla íntima de minerales hidráulicamente activos alita, belita aluminata y ferrita; por lo que el clinker se le considera como una roca sintética. El tratamiento térmico de calentamiento y enfriamiento responsable para esta "metamorfosis" se llama clinkerización y, es realizada en los hornos rotatorios.

Para describir completamente el camino de la clinkerización es necesario considerar los siguientes aspectos:

- la secuencia básica de las reacciones;
- la composición química y mineralógica del crudo;
- la naturaleza química y mineralógica de los productos intermedios.

Secuencia básica de las reacciones.

Durante el calentamiento y enfriamiento en el proceso de formación del clinker ocurre una serie compleja de reacciones dentro del horno rotatorio, que muestra un amplio espectro de mecanismos de reacción. Con respecto a las primeras reacciones participantes que ocurren durante el proceso de formación se tiene:

crudo	reactantes + productos	alita + belita	clinker
	+	+	enfriado
(20°C)	productos intermedios (450-1300°C)	caldo (1450°C)	

La mezcla cruda no se transforma en el clinker final por sometimiento rápido a la temperatura de clinkerización requerida. El proceso de formación de clinker, tiene lugar en un rango amplio de temperaturas y durante el mismo coexisten frecuentemente mezclas complejas de productos reactantes,

intermedios y finales; aún después de ser alcanzada la temperatura máxima de aproximadamente 1450 °C debe transcurrir un determinado tiempo antes que se produzca clínker de calidad aceptable.

La secuencia de reacciones en un horno rotatorio se representa a continuación:

Rango de temperatura °C.	Tipo de reacción.
Calentamiento:	
20 - 100	Evaporación de H <sub>2</sub> O libre.
100 - 300	Pérdida del agua físicamente absorbida.
400 - 900	Remoción del agua estructural (grupos H <sub>2</sub> O y OH) de los minerales de arcilla.
> 500	Cambios de estructura en los minerales silíceos.
600 - 900	Disociación de los carbonatos.
> 800	Formación de belita, productos intermedios, aluminato y ferrita.
> 1250	Formación de fase líquida
> 1260	Formación de fase líquida
Aprox. 1450	Completamiento de la reacción y recristalización de alita y belita
Enfriamiento:	
1300 - 1240	Cristalización de la fase líquida en aluminato y ferrita.

#### Características mineralógicas y químicas de los crudos.

Las mezclas están compuestas por minerales muy diferentes y, adicionalmente, su composición química varía dentro de cierto rango. A pesar de estas diferencias, se produce clínker de cemento Portland puzolana compuesto por los mismos minerales hidráulicamente activos de todas estas mezclas. El hecho que tal diversidad de mezclas permita obtener el mismo producto final subraya la complejidad del proceso de transformación.

## Productos intermedios.

La clinkerización no tiene lugar en un sólo paso directo de los minerales naturales a los finales, sino que pasa a través de productos intermedios. A pesar de que los productos del equilibrio final son alita, belita, aluminato, y ferrita, la formación de estos minerales puede explicarse:

Razones para la formación de productos intermedios:

- los productos intermedios se forman preferentemente por reacciones cinéticamente más rápidas.
- los productos intermedios resultan de reacciones en zonas localizadas en el horno es decir donde se obtuvo un equilibrio local pero no total.
- los productos intermedios son realmente los del equilibrio a la temperatura y atmosfera de gas dadas, pero no a la temperatura final de clinkerización.

Sin embargo el producto intermedio más importante no es cristalino sino la fase líquida que se forma a partir aproximadamente de 1250 °C y que luego forma productos cristalinos, principalmente aluminato y ferrita al enfriarse.

### 3.1.7.1. QUEMADO

El cemento, como lo conocemos hoy en día, tiene actualmente más de 200 años de edad, habiendo sido "inventado" por el Inglés John Smeaton en 1756. Se coccionaba en hornos de botella. El más conocido Inventor de cemento Portland fué Joseph Aspdin quien patentó su proceso de cocción en 1824. El también utilizó hornos de cúpula con una altura aproximada de 11m., un diámetro de 5m., y una producción de 15 t. por carga , cada una de las cuales requería varios días para ser producida. EL consumo de combustible se elevaba al 50 % del peso del clínker en carbón, lo que corresponde a 15,500 kj/kg clín.

En 1880 se dió un importante paso hacia adelante con el desarrollo de hornos verticales de trabajo continuo que permitian una economía de calor mucho mayor, tal como el "horno de 2 pisos Dietzsche" fig.46.

A partir de 1877 se realizaron experimentos con hornos rotatorios y en 1897 Hurry y Seaman en América desarrollaron la primera unidad de este tipo capaz de trabajar exitosamente.

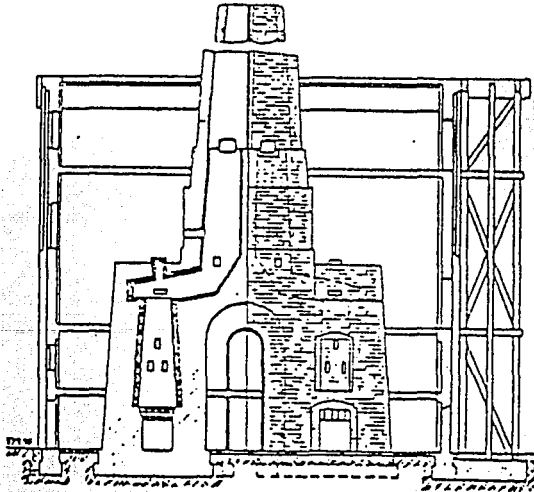


FIG. 46

Estos primeros hornos rotatorios fueron hornos de vía húmeda con una capacidad diaria de 50 a 100 ton. Su consumo de calor fue muy elevado, aproximadamente 30 % del clínker en carbón, 9,500 kJ/kg cli., tenía una emisión de polvo increíble (usualmente más de un tercio de la producción total). A fin de disminuir el consumo de calor se instalaron sistemas de cadenas en hornos de vía húmeda con el objeto de mejorar la transmisión de calor durante el secado.

Se requirieron casi 30 años más hasta que pudo lograrse una nueva reducción sustancial de las pérdidas de energía calorífica gracias a una disminución del contenido de agua del material de alimentación y un mejor intercambio de calor en la zona de precalentamiento y calcinación. En 1930 un oficial del ejército del zar, Dr. Lellep, efectuó un paso importante en esta dirección desarrollando el precalentador de parrilla transportadora, alimentado con nódulos húmedos.

Esta invención fue adoptada por Polysius y recibió el nombre de horno LEPOL. Algunos años más tarde hubo una patente checa de un precalentador de crudo por ciclón y en 1953, Kloeckner-Humboldt-Deutz SA en Alemania instaló el primer sistema con precalentador de crudo por suspensión. A partir de este momento este tipo de horno se hizo predominante en razón de la economía de calor que permitía, y hoy en día sólo en casos especiales se eligen otros sistemas. En años anteriores, la razón principal para la selección de la vía húmeda era que la única forma de lograr una homogeneización efectiva del crudo molido era en forma de pasta. Con el desarrollo de técnicas especiales para la homogeneización de material seco tales como pilas de prehomogeneización, silos de cámaras mezcladoras; este factor pudo ser eliminado.

Utilizando una idea más bien antigua, desde el año de 1966 fabricantes de maquinaria para la producción de cemento, especialmente japoneses, han diseñado varios sistemas de hornos precalcificadores que operan en forma satisfactoria. La calcinación se efectúa ya en el sistema precalentador donde está instalado el hogar secundario. De tal forma es posible diseñar sistemas de hornos con una parte rotatoria comparativamente reducida pero con una capacidad muy alta, superior a 8,000 t/d.

## Calcinación del crudo.

Entre todas las reacciones que se producen durante la cocción de clínker, la calcinación (conocida igualmente como descarbonatación; ver fig.47) requiere la mayor cantidad de energía : la disociación de los carbonatos , en el primer lugar carbonatos de calcio de acuerdo con la reacción  $\text{CaCO}_3 + \text{calor} = \text{CaO} + \text{CO}_2$  en el crudo requiere aproximadamente 1.3 Mj/kg. de crudo, lo que corresponde a 2.0 Mj/kg cli. Las curvas DTA ilustran muy bien la importancia de la calcinación dentro del proceso de cocción del clínker (fig. 48).

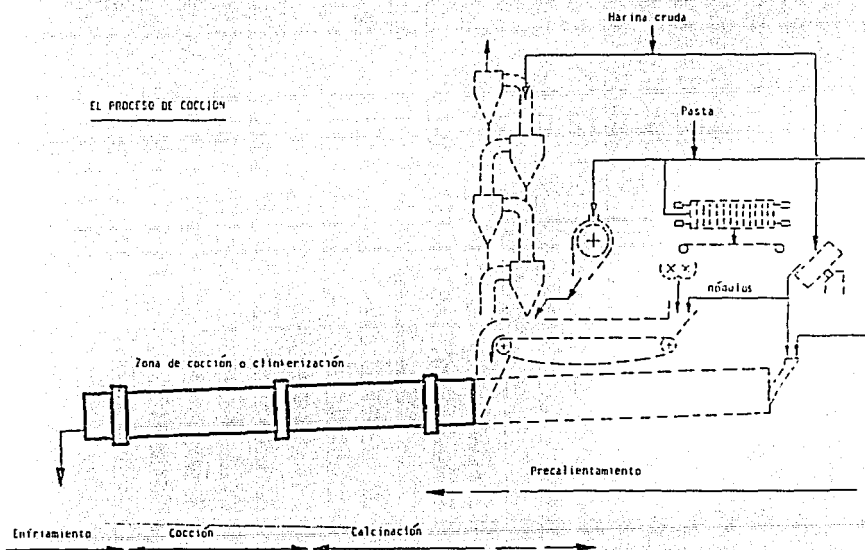


FIG. 47

Durante el proceso de calentamiento de un crudo, la calcinación, en lugar de producirse inmediatamente a una temperatura bien definida, arranca a unos 600 - 700 °C y finaliza entre los 900 y 1000 °C, siguiendo una así llamada "curva S" (fig. 49). La forma y posición exactas de esta curva varían de un crudo a otro. No solamente la temperatura, sino también el tiempo de retención del crudo es un parámetro importante de la calcinación. Mientras que la transferencia de calor del gas al crudo en suspensión en una etapa de



precalentador transcurre en una fracción de segundo, la calcinación completa a una temperatura de unos 900 °C en suspensión requiere un tiempo de reacción comprendido entre 2 y 12 segundos. No obstante dado que sólo debería producirse entre el 90 y el 95% de la calcinación en el precalcinador para evitar todo problema de atascamiento , se ha comprobado que es suficiente un tiempo de residencia de 1 a 3 segundos.

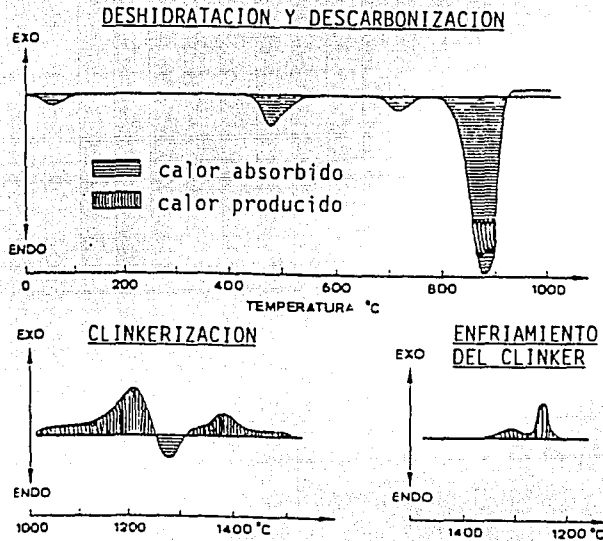


FIG. 48

El objetivo de proceso común a todos los sistemas PC consiste en mantener el crudo en suspensión durante unos pocos segundos a una temperatura comprendida entre 850 y 900°C, en un recipiente estacionario, sin que se produzcan atascamientos.

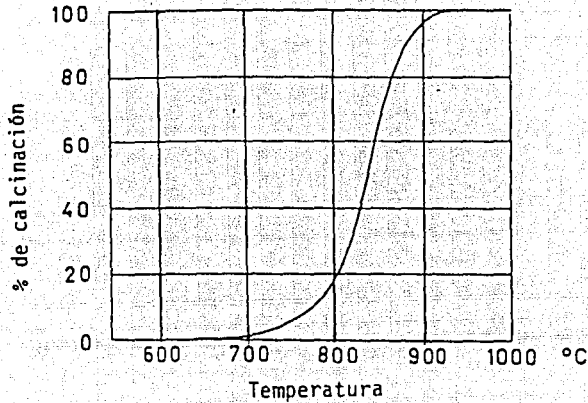


FIG. 49

Actualmente para la cocción del clinker existen cuatro tipos de proceso básicamente diferentes, pero de frecuente aplicación todos ellos:

- El proceso seco, alimentado con harina cruda seca ( $C < 1\%$ );
- el proceso semi-seco, alimentado con nódulos húmedos ( $10\% < C < 12\%$ );
- el proceso semi-húmedo, alimentado con nódulos prensados ( $17\% < C < 21\%$ );
- el proceso húmedo, donde una pasta de material crudo se bombea dentro del horno ( $25\% < C < 40\%$ ).

Se pueden distinguir dos grupos principales de sistemas :

- Hornos largos con o sin sistemas precalentadores internos;
- hornos cortos con precalentadores externos, p. ej. precalentadores por suspensión, parrillas o precalentadores de pasta externos.

Los consumos específicos típicos que se conocen, demuestran que la eficiencia térmica de la cocción se ve influenciada en alto grado por el contenido de agua del material con el que se alimenta el horno. El consumo de combustible de los hornos de vía húmeda es aproximadamente dos veces superior al de los hornos precalentadores por suspensión de vía seca (como se puede observar en la fig. 50).

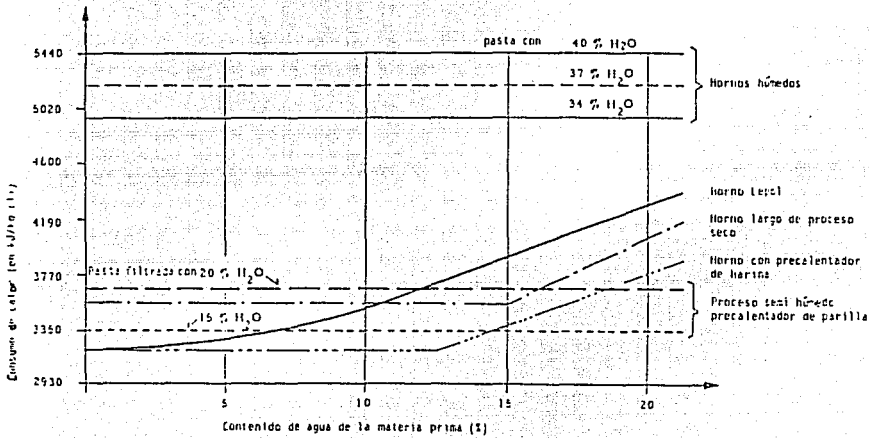


FIG. 50

La selección de un proceso de clinkerización puede verse influenciada por los siguientes factores principales:

- Material crudo:
  - contenido de humedad;
  - composición (elementos-traza);
  - molturabilidad;
- instalación de la planta y costos operativos;
- Requisitos especiales que debe cumplir la calidad del clinker;
- aspectos relativos a la protección ecológica;
- standard técnico del país.

Pero no sólo cabe tener en cuenta la situación actual, sino también el posible futuro desarrollo de todos estos factores.

Otra razón para que antiguamente diera la preferencia al proceso húmedo era la producción de cemento con bajo contenido de álcali (contenido de álcali  $< 0.6\%$ ). En los hornos de vía húmeda también son más fáciles de controlar los problemas de circulación difíciles, pero ya existen una serie de posibilidades, como son el hogar secundario, las instalaciones by-pass, los sistemas de aire terciarios, que permiten resolver estos problemas también en hornos precalentadores por suspensión.

Horno precalentador de crudo por suspensión.

Durante los últimos años, los hornos precalentadores por suspensión se convirtieron en las máquinas más importantes para la producción de clínker, el material de alimentación utilizado para este sistema es harina cruda seca, preparada en una planta de molturación y secado, a cuyo efecto se aprovechan los gases de escape del horno como medio de desecación. Acto seguido molido y desecado se homogeniza y a continuación se introduce en el precalentador.

Como se desprende de la denominación del sistema, el crudo queda en suspensión en la corriente de gases del horno donde tiene lugar una transmisión de calor extremadamente eficaz. Podemos distinguir entre intercambios de calor a contraflujo o en flujo concurrente. El primer grupo está representado por las etapas verticales y el segundo por los ciclones (como se muestra en la fig. 51).

En las etapas verticales de suspensión a contraflujo el material crudo cae a través de la corriente de gas ascendente. El intercambio de calor tiene lugar durante el tiempo de retención del crudo en el sistema, a consecuencia de los efectos de retrocombinación (turbulencia).

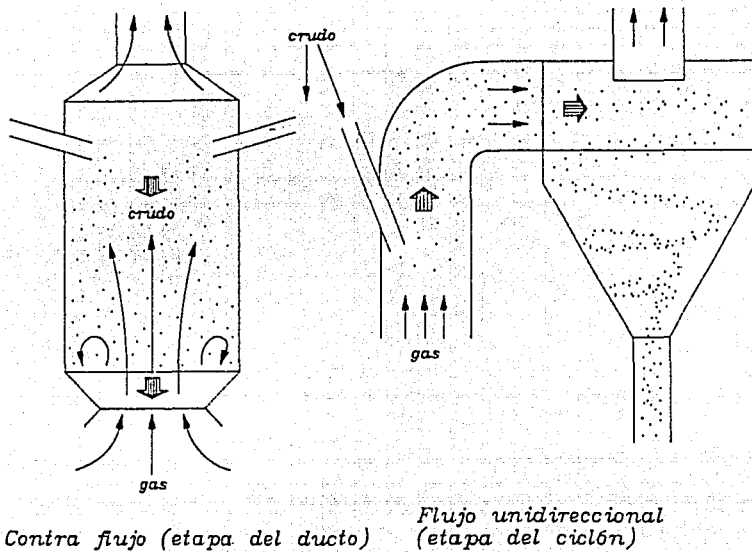


FIG. 51

En las etapas de ciclón, la harina cruda se introduce en el conducto de gas de entrada. El intercambio de calor tiene lugar durante el transporte neumático del crudo a través de este conducto en flujo cocurrente con el gas. Acto seguido un ciclón separa las partes sólidas de las gaseosas, ambas partes presentan aproximadamente la misma temperatura, lo que sería el resultado óptimo para intercambiadores de calor en flujo concurrente.

Pre calentadores de ciclón.

Hornos pre calentadores de cuatro etapas.

Este tipo de horno es uno de los sistemas con menor consumo de combustible . Se ofrece en varias configuraciones con capacidades de hasta 4,500 t/d. La mayor parte de ellos son combinaciones de etapas de ciclón individuales o dobles ; por ello, los datos operativos de todos estos sistemas son más o menos los mismos:

Consumo específico de calor:

unidades pequeñas: 3,350 - 3,550 kJ/kg. cli.

unidades mayores : 3,150 - 3,350 kJ/kg. cli.

Temperatura del gas a la salida del horno : 320 - 350 °C.

Volúmen del gas a la salida del horno : aprox. 1.5 Nm<sup>3</sup>/kg. cli.

Caída de presión a lo largo de todo el sistema : 5,000 - 6,000 N/m<sup>2</sup>.

Formación de polvo en el horno con relación a la producción de clínker : 5 - 10 %.

Cámara de transición :

Temperatura del gas en el horno : aprox. 1,100 °C.

Temperatura del material : aprox. 800 °C.

A la salida del horno, el gas tiene todavía una temperatura suficientemente elevada como para secar material crudo con un contenido de humedad de hasta un 8% si el molino funciona durante todo el tiempo de operación del horno. Desde este punto de vista, la temperatura relativamente elevada del gas de salida no puede ser considerada totalmente como una pérdida, ya que sin ella se requeriría la instalación de un hogar auxiliar para el secado del material crudo.

El sistema precalentador está instalado en una torre de acero o de concreto que por lo general alcanza una altura de 60 a 70 m. por encima de la boca del horno.

El precalentador de cuatro etapas es más propenso a problemas de circulación ; si hay una concentración excesiva de componentes en circulación cabe esperar que en el sistema precalentador se presenten problemas de obturación. Tales inconvenientes normalmente pueden resolverse aplicando una de las medidas siguientes, o ambas al mismo tiempo:

-Instalación de un "sistema by-pass", lo que significa que parte de los gases calientes son retenidos de la boca del horno al objeto de reducir la concentración de componentes en circulación dentro del horno; los gases extraídos, lo mismo que el polvo, no entren en el proceso.

-Instalación de un segundo hogar por debajo del ciclón inferior a fin de cambiar el perfil de la temperatura.

La instalación de un sistema de hogares secundarios permite asimismo la construcción y operación de hornos precalentadores con capacidades superiores a 8,000 t/d. por línea de producción. Con el objeto de mantener las dimensiones de los hornos dentro de los límites todavía razonables, el aire de combustión para el hogar secundario se conduce del enfriador de parrilla a la torre de precalentamiento a través de un conducto separado para aire terciario.

Las figuras 52 y 53 son esquemas básicos del sistema precalentador convencional de cuatro etapas para el cual se usan exclusivamente etapas de ciclón. Para líneas de producción de más de 2,000 t/d. por regla general se instalan dos líneas de precalentamiento paralelas para evitar que el efecto de separación de los ciclones se vea reducido a consecuencia del mayor diámetro (ver fig. 54).

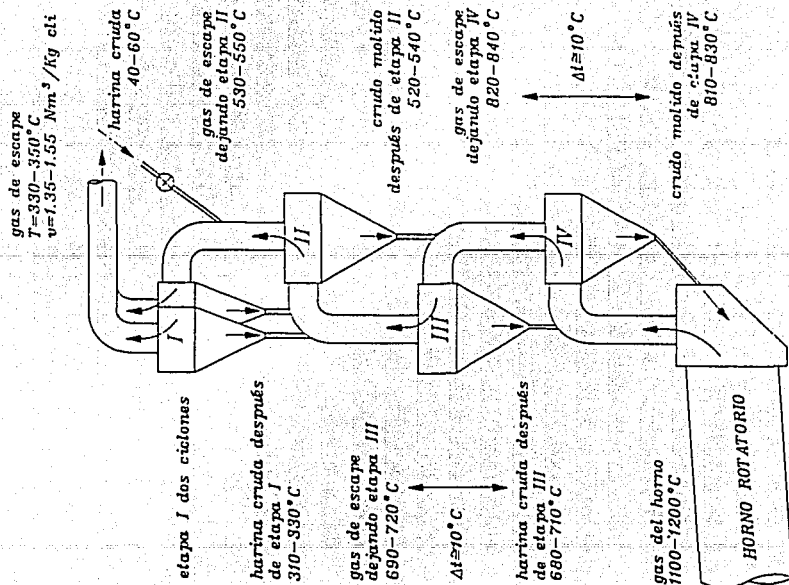


FIG. 52

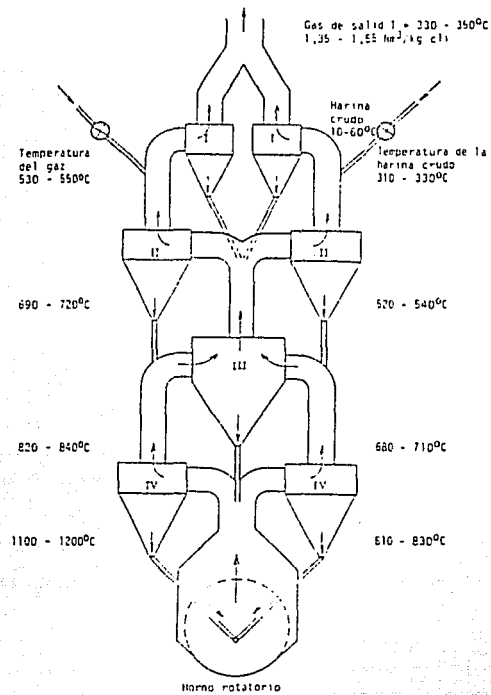


FIG. 53

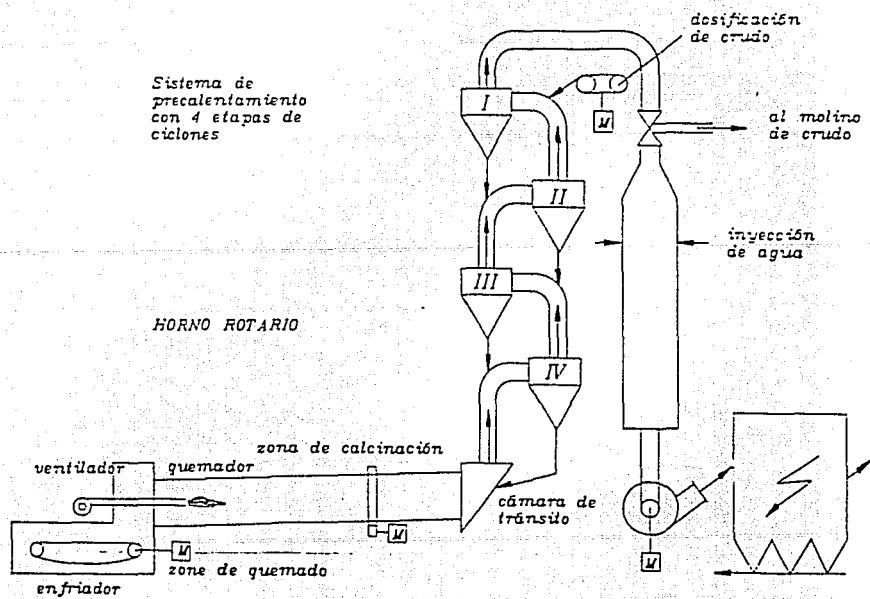


FIG. 54



La combustión en el precalcinador transcurre en condiciones totalmente diferente ya que:

- la temperatura del entorno de la combustión está comprendida entre 850 y 900 °C (temperatura de la llama del hogar principal: aprox. 2.000 °C);
- algunos sistemas PC (sistemas in-line) utilizan una mezcla aire-gas para la combustión (hogar principal: aire puro:primario y secundario), mientras que otros utilizan aire puro (sistemas off-line y de linea separada);
- en todos los sistemas PC, el crudo precalentado está suspendido en el aire de combustión o en una mezcla de aire-gas respectivamente a fin de absorber el calor liberado, manteniendo así la temperatura a un nivel comparablemente bajo. Se deberá evitar a toda costa la sinterización del material, ya que en caso contrario se producirían atascamientos en la etapa de precalcinador.

La combustión completa no siempre se obtiene enseguida y se requiere una cierta experiencia para conseguir un resultado óptimo. Entre los diferentes parámetros que influyen el comportamiento de la combustión los más importantes son los siguientes:

- buena mezcla del combustible con el oxígeno disponible. (esto es difícil conseguir con calcinadores in-line). La dispersión óptima del combustible en el flujo de gas (combustible líquido, atomización) es esencial;
- el tiempo de retención para la combustión ha de ser suficiente. La combustión deberá completarse en la etapa PC. En caso contrario, ella continuaría en la etapa siguiente (postcombustión), donde el nivel de temperatura es más bajo y, por consiguiente, menos favorable para la calcinación (vease fig. 49). Esto tiene el resultado de una utilización no óptima de calor, lo que conduce finalmente a un consumo de combustible más elevado;
- la configuración del flujo de la mezcla aire-gas (es decir aire terciario) ha de ser favorable para la combustión;
- la distribución del crudo en la zona de combustión deberá ser óptima, es decir que deberá causar la distorsión mínima de la combustión.

De acuerdo con la experiencia, se sabe que unas concentraciones de crudo demasiado elevadas pueden impedir seriamente la combustión completa.

Con la introducción del conducto de aire separado para el aire de combustión destinado al calcinador, se introduce el término de aire terciario.

Aire primario : Aire introducido vía quemador de horno.

Aire secundario : Aire del enfriador a la zona de cocción del horno.

Aire terciario : Aire del enfriador al PC para combustión.

La introducción de combustible entre la entrada del horno y el ciclón de fondo (como hogar secundario o vía precalcinador) aumenta necesariamente el nivel de temperatura. Las temperaturas de salida del gas de la etapa más baja de un horno de precalentador simple es solamente 790 a 820 °C, mientras que en hornos de precalcinador, esta temperatura aumenta en algunas decenas de grados de 840 a 870 °C. Por consiguiente, la temperatura de salida del precalentador es algo más elevada, lo que tiene como resultado una pérdida de calor mayor.

El primer precalcinador industrial fué construido por Humboldt-Wedag, en 1966. Es natural que el horno de precalcinador (PC) fuera desarrollado a partir de un horno de precalentador de suspensión simple (SP). Las características del proceso de ambos sistemas de horno SP y PC son prácticamente similares, con la diferencia principal de que en el caso del horno PC, el 50% al 60% del combustible (calor) se introduce a través de una cámara situada entre la entrada del horno y el ciclón de fondo. Esto permite adaptar los requerimientos de calor del proceso de manera más uniforme, lo que tiene como resultado unas mejoras significativas.

Durante la cocción de clinker de cemento en un horno con precalentador de suspensión, aproximadamente los 2/3 del calor total consumido, o sea unos 2,000 kJ/kg, se necesitan para la disociación del  $\text{CaCO}_3$ , lo que se conoce igualmente como calcinación.

La idea de la precalcinación consiste en dejar que este proceso transcurra antes de que el crudo entre al horno rotatorio, introduciendo dicha parte de combustible al reactor estacionario.

Debido a que el aire de combustión (aire terciario) se extrae a través de un conducto separado paralelo al horno, directamente del enfriador, el horno rotatorio funciona a una carga térmica específica y flujo de gas significativamente más bajos.

Las ventajas principales de la precalcincación son:

- operación de horno más estable por un control de horno mejor vía dos puntos separados de alimentación y de control de combustible;
- funcionamiento de horno más estable debido a las condiciones controladas del crudo a la entrada del horno;
- carga térmica reducida de la zona de cocción;
- disponibilidad de horno más elevado;
- duración de vida más prolongada del revestimiento refractario de la zona de cocción;
- mayor capacidad con dimensiones de horno determinadas, lo que significa horno más pequeño para una capacidad determinada;
- condiciones más favorables en relación con los problemas de elementos circulantes;
- emisiones de NOx más bajas.

El criterio de diseño principal, clave para la combustión completa, es el tiempo de retención del gas: 2 a 3.5 s. como mínimo, dependiendo de la reactividad del combustible, 0.5 a 1 s. más para calcinadores in-line. Los sistemas en los que un 10 al 20% del combustible se introduce al conducto de subida se considerarán como hogares secundarios (SF) y no precalcincadores.

Disposiciones básicas de sistemas de precalcincación.

El primer precalcincador utilizó aire de combustión que se extraía a través del horno como aire en exceso. Esta tecnología se mantuvo durante varios años y se conoce como sistema AT (aire por todo el horno). Sin embargo, en realidad sólo se podía introducir hasta un 35% de combustible al precalcincador, lo que limitaba sus ventajas. El tipo AT no se considera ya, por consiguiente, como precalcincador; se utiliza más

bien para hogares secundarios adonde un grado de calcinación elevado en la entrada del horno no sea el objetivo principal. Ver fig. 55.

Actualmente, todos los precalcinadores son sistemas AS que utilizan aire terciario extraído de la cubierta del horno o del techo del enfriador y que se extrae por un conducto de aire terciario separado, paralelo al horno, al calcinador. Esto significa que los enfriadores planetarios no son compatibles con la tecnología de la precalcincación (es decir sistemas AS).

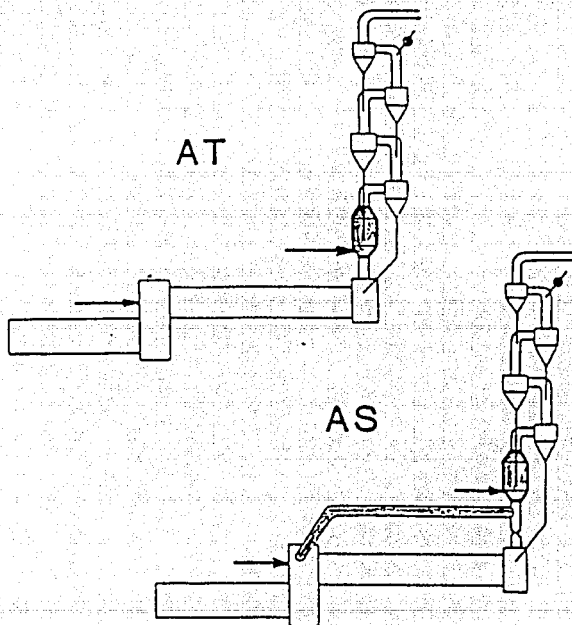
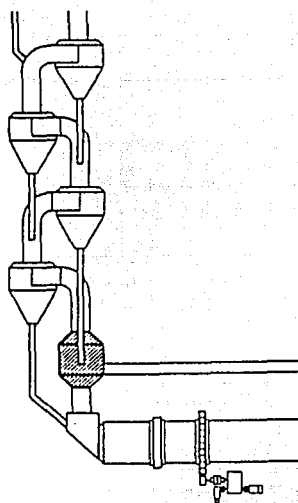


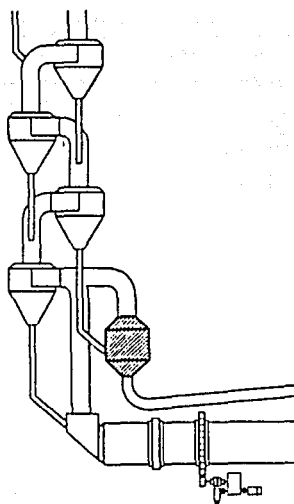
FIG. 55

Calcinadores in-line, off-line y de línea separada.

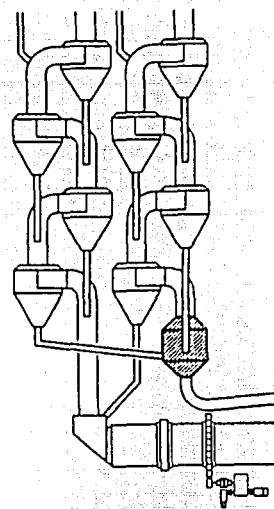
Este criterio se refiere a la posición del precalcinador en la instalación de sistema de horno y se ilustra en la siguiente figura.



In-line



Off-line



Línea separada

Los calcinadores in-line se instalan en el flujo de gas de escape del horno, lo que significa que la combustión se desarrolla en una mezcla de aire y de gas de horno. Este precalcinador puede considerarse como conducto de subida de horno prolongado.

Los calcinadores off-line se instalan fuera del flujo de gas de escape del horno. La combustión se desarrolla en aire puro (terciario), el cuál es igualmente responsable para la elevación del crudo.

Los calcinadores de línea separada son calcinadores off-line con líneas de precalentadores separadas.

Los hornos rotatorios son las máquinas más simples dentro de las usuales en la producción de cemento. El horno rotatorio consiste en un tubo cilíndrico alargado, revestido interiormente con dos capas de material refractario: Una de sílico-aluminoso aislante superpuesta con refractarios sílico-aluminosos con un 40 % de  $Al_2O_3$  en la zona de calcinación y otra de refractarios básicos, magnesianos y cromo- magnesianos, para la zona de clinkerización. La longitud de los hornos oscila entre los 60 y 90 m. Los diámetros, entre 3 y 6 m. y las pendientes para conseguir el avance del material por rotación, varían entre el 2 y 5 %. Se apoyan sobre bandas concéntricas y accionados con sistemas de regulación de velocidad entre las 1.5 y 3.5 r.p.m., según el grado de inclinación. El tiempo de permanencia del material en el interior del horno varía según las r.p.m. y la inclinación, pero se aproxima a 1 minuto por metro. En el extremo de salida del horno se introduce el quemador, generalmente con fuel, el cual atraviesa el cabezal de cierre del horno y posee, además, la entrada de aire para la combustión: Primario, o aire frío, con tiro forzado, y aire secundario precalentado, procedente del enfriador del clinker.

#### Hornos largos de vía seca.

Estos existen con o sin equipos de intercambio de calor internos, como cadenas o cruces (acero o cerámica). El primer tipo es muy antieconómico por tener un consumo de calor superior a 5,100 kJ/kg. clí. y pérdidas de polvo muy elevadas; su única ventaja podría radicar en su simplicidad y en su insensibilidad frente a graves problemas de circulación.

La pérdida de presión a lo largo de los hornos largos de vía seca oscila entre 300 y 500 N/m<sup>2</sup> en función de las instalaciones internas.

Las dimensiones de los hornos se determinan enteramente utilizando cifras empíricas y por comparación con instalaciones ya existentes.

Los principales criterios para el dimensionamiento de hornos son los siguientes:

- a) clinker producido por m<sup>3</sup> de volumen del horno (t/d. m<sup>3</sup>);
- b) clinker producido por sección transversal (m<sup>2</sup>) en la zona de clinkerización;
- c) carga térmica por sección transversal en la zona de clinkerización (kJ/s. m<sup>2</sup>).

La carga térmica específica por sección transversal es el factor limitativo para un sistema moderno de horno, porque para una cierta relación longitud/diámetro, típica para cada tipo de horno, esta es proporcional a la carga térmica sobre la superficie del revestimiento interno, lo que es uno de los principales factores que influyen sobre la vida de los ladrillos.

Por otro lado, los valores límites de todos los tres factores no son todavía conocidos; cada proveedor parece tener sus propias reglas para el dimensionamiento de hornos. Tampoco se han derivado fórmulas teóricas para calcular el tamaño de un horno sobre una base analítica.

Si bien por un lado un horno rotatorio debería ser diseñado lo más barato posible, por el otro lado tiene que ser rígido y garantizar un desgaste mínimo del revestimiento. Esta condición puede ser cumplida si la deformación de la carcasa del horno se reduce a un límite tolerable. Investigaciones al respecto han demostrado que por lo general se permite una ovalidad relativa máxima de 0.3 %. Esta ovalidad puede ser dividida en dos magnitudes:

- a) ovalidad del anillo de rodadura de llanta debido a fuerzas externas;
- b) ovalidad de la carcasa del horno debida a deformaciones a causa de su propio peso en anillos de rodadura sueltos y debido a temperaturas altas.

En consecuencia, a fin de mantener la ovalidad del horno dentro de límites tolerables deben cumplirse las dos condiciones siguientes:

- los anillos de rodadura deben tener la suficiente rigidez;
- la holgura entre los zapatos del anillo y el anillo de rodadura debería ser mínima durante la operación; La siguiente table muestra algunos valores prácticos:

	LLANTA No.			
	1	2	3	4
Juego, temperatura de funcionamiento (mm.)	3 - 4	3 - 4	4 - 6	5 - 6
Juego máximo (mm.)		10 - 15		

Es recomendable utilizar zapatos de anillo atornillados porque estos permiten adaptar nuevamente la holgura por debajo del anillo si este se ensanchó durante la operación.

#### 4. DEL CLINKER AL CEMENTO.

##### 4.1. MOLINO DE CEMENTO.

Un fraguado demasiado rápido puede ser contrarrestado agregándole al cemento yeso. El yeso no tan sólo afecta el fraguado sino que también influye otras características del cemento, tales como la molturabilidad, el almacenamiento, las resistencias, la compresión y la estabilidad del volumen.

Durante el desmenuzamiento y, por lo tanto también durante la molienda se convierte la mayor parte de la energía mecánica en energía térmica; sólo una pequeña parte de la energía se utiliza para:

- romper fuerzas de cohesión (enlaces físicos);
- romper enlaces químicos;
- deformar partículas (energía de activación).

La energía térmica provoca la deshidratación del yeso especialmente durante la molienda; debido a las altas temperaturas en el molino de cemento el yeso comienza a deshidratarse. La deshidratación del yeso no sólo depende de la temperatura sino también del tiempo de exposición a cierta temperatura, por lo cual en la práctica no existe una temperatura debajo de la cual no existe deshidratación o encima de la cual comienza la deshidratación.

La inyección del agua es frecuentemente usada para reducir la temperatura en el molino de cemento y así evitar la deshidratación del yeso. El efecto del vapor de agua sobre las propiedades del cemento depende de su composición química y de su finura.

Normalmente los cementos con poco aluminato y álcalis y con una finura inferior a  $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$  son poco afectados, su potencial para desarrollar resistencias no cambia. Para evitar cualquier deterioración del potencial del cemento por inyección de agua se deben considerar los siguientes puntos:



Evitar inyección de agua en el primer compartimiento si la temperatura en el diafragma es menor de 110 °C

Inyección de agua en el compartimiento final debe ser ajustado así que la temperatura del cemento varía entre 115 - 130 °C.

El punto de rocío del aire a la salida del molino no debe sobrepasar 70 °C. En el caso de que el molino está combinado con un filtro electrostático el punto de rocío debe estar entre 60 y 70 °C.

Durante el proceso de producción de cemento, la molienda de clinker requiere el mayor consumo de energía eléctrica. Este consumo de energía depende directamente de la finura del producto terminado.

La selección de un sistema de molienda depende básicamente de la calidad de cemento requerida y del respectivo consumo de energía eléctrica. Los requerimientos de calidad del cemento, tales como distribución del tamaño de las partículas y superficie específica, deben ser satisfechos.

Los sistemas y características de molienda del cemento son semejantes a las de molienda del crudo (enunciadas en el epígrafe 3.1.5.0.).

Todos los sistemas de molienda deben ser operados de tal forma que se obtenga la producción requerida así como la calidad de producto, tomando especialmente en cuenta los costos relevantes de producción.

El arranque de un molino nuevo debe llevarse a cabo en varias etapas:

-Etapa 1. Operación en seco del equipo auxiliar y del accionamiento del molino, sin material y sin carga de bolas, a fin de verificar las funciones mecánicas y eléctricas del sistema. El molino debe ser girado durante más de 8-12 horas, para evitar daños en la corteza y en el blindaje del mismo.

-Etapa 2. Llenado de 50 - 60 % del peso nominal de la carga de bolas, es decir 50 - 60 % de cada tamaño propuesto por el proveedor. El tamaño máximo de bolas, de preferencia, no debe exceder 60 mm. El molino es operado con esta carga durante 100 - 150 horas. En molinos grandes debe observarse un grado mínimo de llenado de 21 - 22 %, para evitar daños al blindaje del molino, es decir la primera carga de bolas debe representar 70 - 75 % de su peso nominal únicamente.

-Etapa 3. Operación del molino por otras 200 - 300 horas con aproximadamente 80 - 85 % de su peso nominal de bolas.

-Etapa 4. Operación del molino con el peso nominal de la carga de bolas.

Durante cada etapa, el funcionamiento mecánico y eléctrico del sistema debe ser cuidadosamente verificado. Para después de las etapas 2 y 3 se recomienda tomar muestras dentro del molino tubular para controlar su eficiencia de molienda.

Generalmente , después de la etapa 4 se llevan a cabo pruebas de funcionamiento para verificar las garantías otorgadas por el proveedor del sistema.

La operación normal podría definirse como la "operación continua del sistema sin fluctuaciones importantes en la calidad del cemento ni en la producción del molino". Una vez que el sistema del molino es arrancado y después del cumplimiento de las garantías de funcionamiento, deben describirse los parámetros más importantes de operación en un instructivo de operación, que incluyen básicamente los puntos siguientes:

-Secuencias de arranque y parada del sistema del molino (incluyendo el transporte de clínker y de cemento);

-composición de la carga de bolas, posicionamiento del separador (carga circulante, velocidad del ventilador);

-rango de temperaturas posibles y de presiones en puntos determinados del circuito.

-tipo de intervalo de las inspecciones del flujo de material, funcionamiento mecánico, muestreo.

Los datos de operación deben ser anotados en registros de operación, mismos que sirven, por un lado, como bases para el mejoramiento del sistema de molienda y por otra parte suministran la información necesaria a los reportes mensuales de operación.

Durante la operación normal, el sistema de molienda está ajustado de tal forma que se mantenga una calidad de producto constante, es decir, los diferentes parámetros de control se ajustan (manual o automáticamente) de acuerdo con los análisis de control de calidad realizados con muestras tomadas dentro del circuito de molienda.

Las variaciones pequeñas dentro del sistema, o el cambio a otros productos o calidades de producto se controlan básicamente por medio de los ajustes siguientes:

Ajuste	Cambio
Cantidad de alimentación.	Granulometría del material de alimentación al separador
Separador.	Granulometría del material fino y material de rechazo en el separador
Volúmen de ventilación.	Granulometría del polvo del filtro.

Existe una gran cantidad de posibles perturbaciones que pueden conducir a una operación anormal del molino. Sin embargo, las perturbaciones con más frecuencia observadas durante la operación de un molino se resumen enseguida. Sin embargo, no se limita a conocer las posibles causas de una perturbación determinada, sino ejecutar la acción adecuada para corregir las irregularidades. Dicha acción depende, además del tipo de sistema de molienda, tipo de control y de las interconexiones con otros departamentos.

Perturbaciones de operación posibles.	
Perturbación	Causas posibles
<b>Sonido del molino</b> -sonido sordo -sonido alto	-molino sobrecargado -no hay suficiente material en el molino
<b>Producto de descarga del molino</b> -demasiado grueso  -demasiado fino	-molino sobrecargado -separador obstruido -material de alimentación al molino demasiado grueso  -volúmen de alimentación fresca al molino demasiado baja -carga circulante alta -tamaño del material de alimentación demasiado pequeño -separador insuficientemente ajustado
<b>Presión a la salida del molino</b> -demasiado alta  -demasiado baja	-entrada al molino obstruida -diafragma obstruido  -demasiado poco material en el molino -diafragma roto
<b>Temperatura del cemento</b> -demasiado alta	-temperatura del clínker demasiado alta -bajo volúmen de aire de ventilación -molino sobrecargado -adherencias en las bolas
<b>Producción del molino</b> -demasiado baja	-carga de bolas inadecuada o desgaste de las bolas -cambio en la molturabilidad del clínker

Las puebas de funcionamiento pueden llevarse a cabo en los siguientes casos:

- Después del arranque del molino, para verificar los valores de las garantías;
- funcionamiento pobre del sistema;
- costos de operación o de mantenimiento altos;
- aplicación de técnicas nuevas (p.ej. aditivos para la molienda );

-aumento de la capacidad en conexión con otros departamentos (p.ej. producción del horno o capacidad de despacho del cemento).

Los resultados de las pruebas defuncionamiento pueden ser expresados en términos de eficiencia, estos deben ser tan completos como sea posible, a fin de permitir comparaciones con pruebas posteriores. Durante cada prueba deben así mismo efectuarse inspecciones visuales de la condición mecánica y operacional del equipo principal, con el propósito de obtener la información requerida para realizar una evaluación completa.

La eficiencia de molienda en un molino tubular no depende exclusivamente de la composición apropiada de la carga de bolas, sino que exige el cumplimiento de varios otros requisitos:

Granulometría y molturabilidad del material de alimentación.

Tipo de molino y tipo de elementos internos del molino.

Grado de llenado y velocidad del molino, asociado a la forma de las placas de blindaje.

Tipo de diafragmas, diseño de las ranuras y ancho de las mismas.

Comportamiento de la molienda en lo que se refiere a la formación de adherencias y aglomeraciones.

Longitud de la molienda asociada a la carga circulante.

Volúmen del aire de ventilación.

Temperatura o contenido de humedad en el material.

La producción del molino puede ser medida de varias formas. Estas dependen principalmente de los sistemas de alimentación y de las posibilidades de medir la cantidad de cemento producido.

Alimentadores de pesas (weighfeeder):

La cantidad de material alimentado al molino puede ser calculada a partir de la posición sobre el alimentador de pesas (generalmente kg/m) y de la velocidad de la cinta (m/sec).

Alimentadores de cinta:

En este caso la alimentación al molino se obtiene del peso por unidad de longitud de la cinta, mismo que es constante (esto debe ser medido) y de la velocidad de la cinta, que es variable.

El producto puede ser almacenado en un silo por un tiempo determinado. Este método depende de la exactitud con la cuál puede medirse el material depositado en el silo. Se asume que el material en el silo tiene una densidad constante.

El consumo específico de energía debe ser medido durante cada prueba de funcionamiento. En esta tarea se recomienda verificar el medidor de kw, volts, y Ampere para asegurar la obtención de información confiable.

## 5. TECNICA DE PRUEBA

### 5.1. MUESTREO.

Para el diseño de un procedimiento aceptable de muestreo, se deberán establecer los siguientes criterios:

- Determinación de la cantidad básica de material (p.ej.vol. del silo, cantidad de cemento vendido);
- estimación del tamaño mínimo de cada muestra individual (indicaciones: aprox. 1kg. para harina cruda, para material grueso 30 - 40 veces el peso del grano más grueso, pero un mínimo de 5 kg.);
- variabilidad del material del cual se deben tomar muestras y en base a ello, el intervalo de toma de muestras.
- definición de la precisión global deseada del muestreo.

En cuanto al lugar del muestreo y a su técnica, se debe diferenciar entre:

- Toma de muestra de un material estático (muestreo estático) y ;
- toma de muestra de un material en flujo (muestreo dinámico).

Se debe evitar en lo posible el muestreo estático, ya que esta técnica complica la toma de muestras representativas. Para el control de proceso y de producción, se recomienda siempre el muestreo dinámico.

Las principales técnicas de muestreo de campo son:

- muestreo de puntos o de recorte;
- muestreo de canal, de trinchera o de pozo;
- polvo de perforaciones.

Para elaborar muestras representativas de camiones, pilas, etc., se requieren procedimientos especiales.

El muestreo para control de producción y del proceso incluye:

- material de grano grueso (muestras de grava);

- harina cruda y cemento;
- combustibles, agua, gases.

Los sistemas de muestreo se combinan generalmente con equipos de homogeneización, cuarteo, transporte y preparación automática de muestras, a fin de incrementar la rapidez y la precisión de los controles.

Una selección de procedimientos e instalaciones de muestreo ampliamente utilizado para material fino y grueso para el control de calidad se encuentra en las siguientes figuras.

#### Muestreo manual para control de producción y calidad

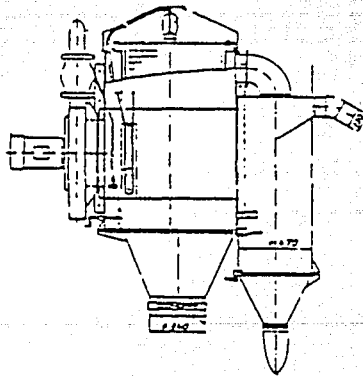


FIG. 56 Muestreo de polvo de pozo de perforación: el procedimiento: adecuado requiere un colector de polvo combinado con el equipo de perforación.





FIG. 57 Esquema para la toma de muestras en una pila de material mezclado.

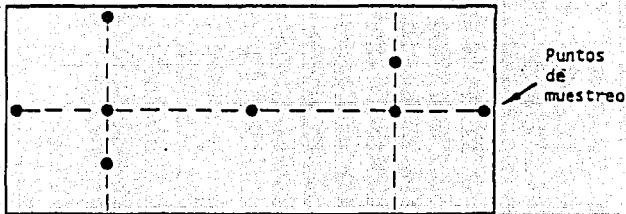


FIG. 58 Esquema para la toma de muestras de material en un camión.

La toma de muestras, tal como se indica en las figs. 57 y 58 no debe limitarse a la superficie del material, sino que se debe utilizar un sacamuestras tubular para recoger material en profundidad.



FIG. 59 Sacamuestras tubular ranurado para cemento a granel.

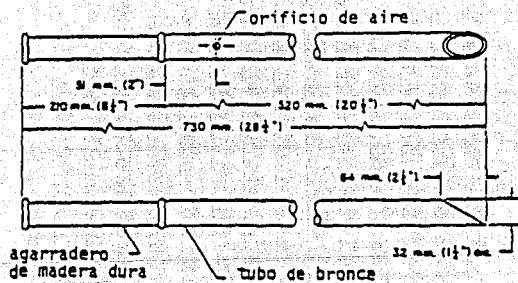


FIG. 60 Sacamuestras tubular para cemento ensacado.

Uim.	T i p o		
	1	2	3
A	250	100	75
B	60	20	5
C	250	100	46
D	200	80	50
E	100	40	30
F	150	120	80
L	220	220	120
h	200	150	70
h	100	70	60
Смешант	0	10	20

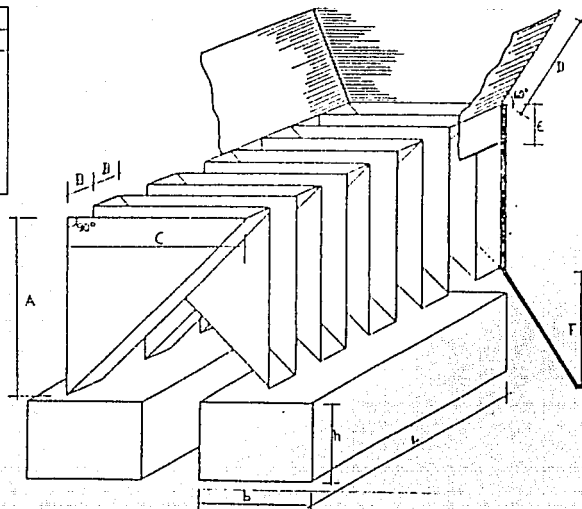


FIG. 61 Separador de muestras tipo Riffle.

Muestreo automático para el control de producción.

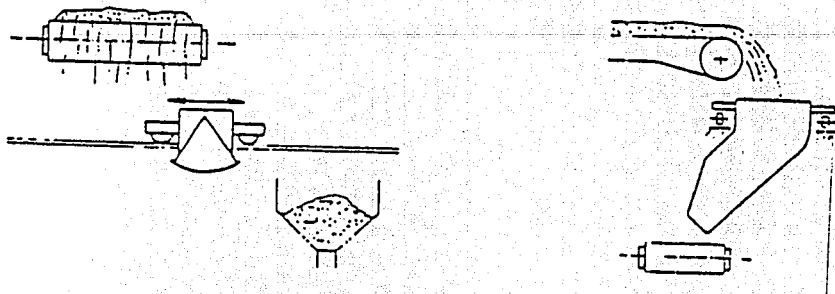


FIG. 62 Material triturado, sacamuestras de caída.

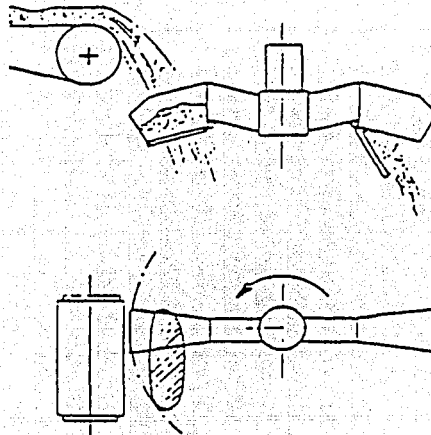


FIG. 63 Material grueso y fino, sacamuestras rotativo.

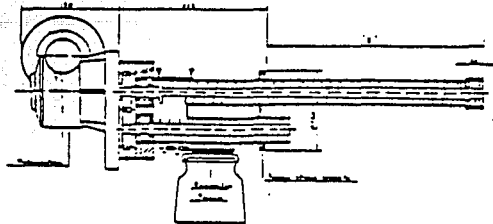
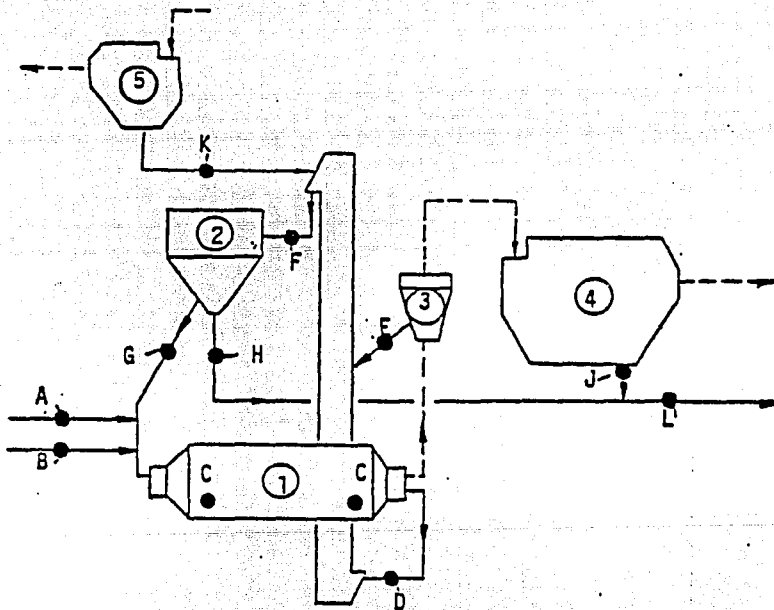


FIG. 64 Sacamuestras de tornillo (corte transversal), para muestras de harina cruda.

### Muestreo dentro del sistema del molino.

Para evaluar el funcionamiento del sistema de molienda es de gran importancia conocer las granulometrías de las corrientes de material que circulan por circuito de molienda. Durante la operación normal resulta suficiente con tomar muestras de producto final (dichas muestras se toman aprox. cada 60 min.)

La fig. 65 indica puntos de muestreo, dentro del sistema del molino.



- (1) Molino tubular. (2) separador dinámico. (3) Separador estático. (4) Colector de polvo para el molino tubular. (5) Colector de polvo para el equipo auxiliar.

FIG. 65.

Los siguientes valores sirven de guía en lo que se refiere a análisis de tamiz y a peso de las muestras:

Punto de muestreo.	Peso de la muestra.	Análisis de tamiz requerido.
A/B material de alimentación	10 kg. cada muestra.	30, 25, 16, 8, 4, 2, 1 mm.
C molino tubular	(más adelante se describe)	
D descarga del molino	0.5 kg.	30, 60, 90, 150, 200 um.
E mat. rechazo del separador estático.	0.5 kg.	" " " " " "
F mat. alimentación al separador	0.5 kg.	4,8,15,20,30,60,90,150,200 um.
G mat. rechazo separador	0.5 kg.	" " " " " " "
H finos separador	0.5 kg.	" " " " " " "
J polvo del filtro	0.5 kg.	igual que para muestras D y E
K polvo del filtro	0.5 kg.	" " " " " " "

Con el fin de obtener un muestreo representativo (muestras F a K) se recomienda tomar muestras cada media hora durante 6 - 12 horas aproximadamente. Entonces pueden homogeneizarse las muestras individuales y dividirse al tamaño requerido de 0.5 kg. para el análisis del tamiz.

La granulometría del producto final, no depende únicamente del funcionamiento del molino tubular o del separador, sino también en forma particular del sistema de desempolvamiento de que se trate. Esta es la razón por la cuál también es necesario tomar muestras del material dentro del sistema de molienda.

La eficiencia de molienda puede estimarse tomando muestras de la descarga del molino. Sin embargo, el "muestreo longitudinal" dentro de los compartimientos de molienda sigue siendo la mejor manera de lograr dicho objetivo. Esta prueba requiere bastante tiempo y exige una parada del molino por algunas horas. De esto se deriva que es de extrema importancia la preparación cuidadosa de la prueba, a fin de

minimizar el tiempo de parada del molino y para asegurar la validez de los resultados de las pruebas. Para lograr esto se debe cumplir los requisitos siguientes :

El molino debe ser operado bajo condiciones estables por lo menos durante 10 - 12 horas previas a la prueba.

Los datos del funcionamiento previo a la prueba deben ser registrados y deben tomarse muestras dentro del sistema.

Deben tenerse listos el material y equipo requeridos para el muestreo, tal como las latas de metal, equipo de iluminación, cintas métricas palas, etc.

Tanto el molino como todo el equipo auxiliar deben pararse al mismo tiempo, para asegurar que las condiciones prevalecientes dentro del sistema no son alteradas.

El procedimiento para el muestreo se describe como sigue:

El tamaño de la muestra debe ser suficientemente grande como para garantizar la representatividad del muestreo de material en la sección respectiva. Normalmente basta 1.0 - 2.0 kg. por muestra.

Las muestras deben ser tomadas a la entrada, a la salida y a todo lo largo de cada compartimiento. Las distancias entre dos puntos de muestreo no deben exceder 1.0 m.

Para obtener muestras representativas también debe recogerse material a lo largo del diámetro. De preferencia, el material no debe obtenerse directamente de la superficie, sino que deben retirarse algunas bolas para tomar material dentro de la carga de bolas.

El muestreo debe incluir tomas de material de alimentación al molino (clinker, yeso, puzolana) y de las descargas del mismo.

En forma paralela al muestreo debe también llevarse a cabo las mediciones e inspecciones siguientes:

Nivel y distribución del material en cada compartimiento.

Grado de llenado tanto de la carga de bolas como del material.

Distribución de la carga de bolas a lo largo del eje del molino.

Inspección de la condición mecánica de bolas, placas de blindaje y diafragmas.

Para cada muestra se realiza el siguiente análisis de tamiz.

Muestras del primer compartimiento:

es decir: 16.0, 10.0, 6.0, 2.5, 1.25, 0.20, 0.090, 0.060 mm.

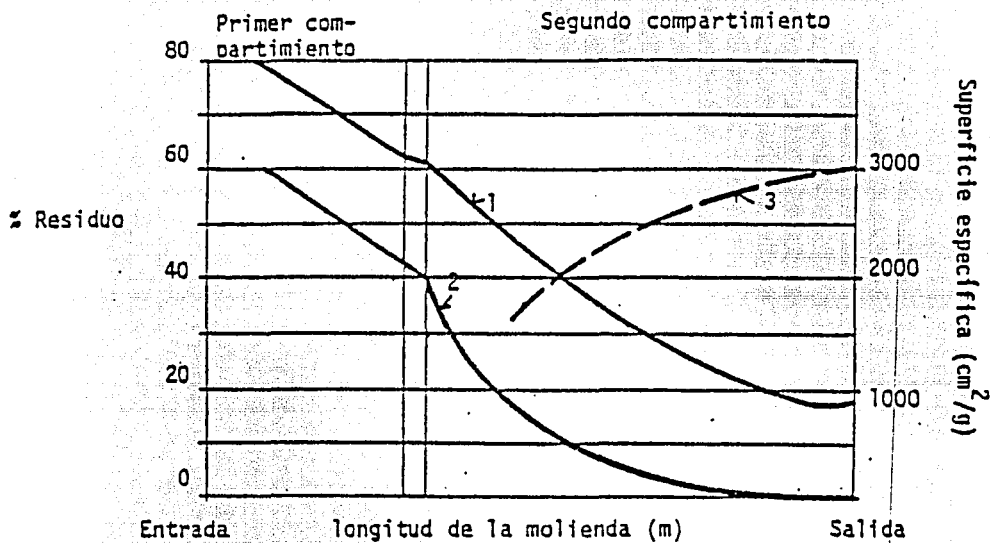
Muestras del segundo compartimiento:

es decir: 1.25, 0.20, 0.090, 0.060 mm. y Blaine.

Los resultados, o sea, el % acumulativo retenido en los diferentes tamizes se registran en una gráfica contra la posición longitudinal de la muestra en el molino. El valor Blaine es también registrado en dicha gráfica.



Una curva típica de tamizado para un molino de dos compartimientos y operando en circuito cerrado es la siguiente.



- 1: % de residuo en tamiz 90  $\mu\text{m}$ .
- 2: % de residuo en tamiz 200  $\mu\text{m}$ .
- 3: Superficie específica en  $\text{cm}^2/\text{g}$ .

La evaluación e interpretación de las curvas de tamizado longitudinal es, en buena medida, una cuestión de experiencia. Aparte de la forma de las curvas deben tomarse en cuenta los niveles relevantes del material o cualquier otro cambio en las condiciones de operación.

En lo que se refiere a residuos de tamiz enfrente de los diafragmas, se recomiendan los valores siguientes para un molino de dos compartimientos y operando en circuito cerrado:

Antes del diafragma intermedio: 12 - 25 % > 0.5 mm.

máx. 3 % > 2.0 mm.

Antes del diafragma de descarga: 20 - 30 % > 0.2 mm.

máx. 5 % > 0.5 m

Tanto la distribución como el nivel del material en ambos compartimientos, de preferencia, debe ser:

Primer compartimiento: Las bolas deben ser apenas visibles, a la entrada puede observarse una acumulación de material.

Segundo compartimiento: Las bolas deben estar cubiertas por una capa de material de apróx. 20 - 30 mm. Las bolas precisamente enfrente del diafragma de descarga deben ser visibles.

Los requerimientos en cuanto a composición y rendimiento del cemento se encuentran planteados en las normas de cemento. Las normas han sido establecidas considerando el estado actual de los conocimientos y son revisadas constantemente.

Generalmente las normas comprenden definiciones en base a métodos experimentales, prácticas recomendadas, clasificaciones y especificaciones.

Un método experimental cubre un muestreo y describe el procedimiento experimental subsiguiente utilizado para determinar los resultados del material por especificarse. Una especificación es la formulación correcta de una serie de requerimientos que un material, un producto o un sistema debe satisfacer.

Cuando sólo se especifican el rendimiento o los resultados se pueden admitir productos de diferentes composiciones. De este modo, se promueven las mejoras o las sustituciones por productos nuevos.

## 5.2. PROPIEDADES, PRUEBAS: FISICAS Y QUIMICAS.

La composición del clinker ofrece algunas indicaciones acerca de las propiedades del cemento, su influencia en cuanto al ritmo de la reacción de hidratación y, por ende, en lo que a ritmo de fraguado y de endurecimiento del cemento se refiere. La composición del clinker controla la cantidad y la proporción del calor generado por la hidratación y la resistencia del cemento contra el ataque de los sulfatos; por lo que se especifican valores limitantes.

La influencia de la composición del clinker en cuanto a las propiedades físicas más importantes del cemento se enuncian en seguida:

**Requerimiento de agua.** El requerimiento de agua de una pasta normal (standard) de consistencia normal dependerá en primer lugar del contenido de aluminatos y de álcalis del clinker y de la fineza del cemento. La relación entre el requerimiento de agua de una pasta normal y la composición del cemento no puede ser aplicada al concreto, ya que existe una relación más bien débil entre el requerimiento de agua de una pasta y el requerimiento de agua de concreto. El efecto del cemento en cuanto a consistencia del requerimiento de agua de concreto es bastante reducido en comparación con la importancia de los demás factores, tales como la arena, agregados y temperatura. Un excepción constituye el concreto con corto tiempo de mezclado, donde un cemento con fraguado falso podría dificultar seriamente la consistencia del concreto.

**Tiempo de fraguado.** El ritmo de endurecimiento o el tiempo de fraguado "Vicat" de la pasta normal es influenciado significativamente por la composición del clinker. Los sulfatos y los fosfatos del clinker generalmente retrasan el tiempo de fraguado del cemento, mientras que los aluminatos y las fluorinas lo reducen.

Resistencia. El ritmo de desarrollo de la resistencia de mortero o de concreto depende del tipo (o de la composición) del cemento. La tendencia general de los cementos con un lento ritmo de endurecimiento es la de tener una resistencia final ligeramente más elevada. El desarrollo de resistencia de un mortero o de un concreto depende de la composición del clínker, de la siguiente manera:

- Silicato de calcio. Los diferentes ritmos de hidratación de  $C_3S$  y de  $C_2S$  afectan el ritmo de endurecimiento de una manera significativa: una regla general pero práctica supone que el  $C_3S$  contribuye más al desarrollo de la resistencia durante las primeras cuatro semanas, y el  $C_2S$  después.

- Aluminatos y ferritas. El aluminato como la ferrita contribuyen a la resistencia del cemento en una menor medida, pero influyen significativamente el proceso de hidratación de los silicatos, afectando de este modo indirectamente el ritmo de endurecimiento.

- Entre los componentes menores, los sulfatos alcalinos son los que ejercen la principal influencia en cuanto al ritmo de endurecimiento.

- Características del clínker fuera de la composición química. Especialmente las condiciones de cinterización y de enfriamiento influyen el ritmo de endurecimiento de una composición particular del clínker. Frecuentemente clinkers de la misma composición química resulta con resistencias diferentes, mientras que clinkers de diferente composición química dan la misma resistencia. Las propiedades del cemento tales como se encuentran comprobadas por métodos de ensayos normalizados, no producen el mismo efecto que un concreto.

Resistencia a los sulfatos. Del concreto depende en primer lugar del contenido de  $C_3A$  del clínker. Las fases de ferrita ( $C_4AF$ ) afectan la resistencia a los sulfatos en una menor medida, cuanto más alto el contenido de  $C_3A$  del clínker, más susceptible será el hormigón a la corrosión de los sulfatos.

El ritmo de corrosión sulfática también depende de :

- composición del concreto, particularmente la relación agua/cemento;
- edad del concreto en el momento de la primera exposición a los sulfatos;
- duración y modo de la exposición a los sulfatos.

Las demás propiedades del concreto (resistencia a la congelación y al deshielo, permeabilidad, formación de grietas, merma y deslaminamiento) sólo se encuentran influenciadas en poca medida por la composición del clínker y la calidad del cemento.

El cemento Portland puzolana , debe satisfacer las especificaciones químicas mostradas en la siguiente tabla:

Compuestos y características	Cemento Portland		C. P. Puzolana	
	I	II	PUZ-1	PUZ-2
Oxido de magnesio (MgO) máx. %	5.0	5.0	5.0	5.0
Anhidro sulfúrico (SO <sub>3</sub> ) máx. %				
cuando (3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) es 8% o menor	3.0	3.0	5.0	5.0
cuando (3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) es mayor de 8%	3.5	-	-	-
Pérdida de calcinación máx. %	3.0	3.0	8.0	8.0

Propiedades químicas opcionales. Los requisitos opcionales pueden ser aplicables sólo en el caso de que el comprador así lo especifique, considerándose el cemento como especial.

Características.	Cementos Portland		C. P. Puzolana	
	I	II	PUZ-1	PUZ-2
Aluminato tricálcico máx. % ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ) *	-	-	8 Para resistencias moderadas a los sulfatos.	
Aluminato tricálcico máx. % ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ) *	-	-	5 Para alta resistencia a los sulfatos	
Suma de silicato tricálcico y aluminato tricálcico máx. % **	-	58	8 para calor de hidratación moderado	

\*Independientemente de las características indicadas para el clínker Portland, la puzolana empleada, debe ser compatible con el mismo clínker.

\*\* Este valor límite se aplica cuando se requiere calor de hidratación moderado y no se solicite la determinación del calor de hidratación.

Diariamente se verifica el análisis químico del cemento en su composición elemental, que es óxido de silicio, óxido de aluminio, óxido de hierro, óxido de calcio, óxido de magnesio, anhídrido sulfúrico, óxido de sodio, óxido de potasio, residuo insoluble (sílice que no reacciona en la calcinación); estos valores y por medio de los cálculos de Bogue, se calcula la composición mineralógica que realmente tiene el cemento, con el porcentaje del contenido de estos compuestos se puede valorar la calidad del producto. Tomando en cuenta que las pruebas físicas son consecuencia de la misma composición química.

Las normas de calidad exigen que los cementos cumplan con determinados valores en las pruebas, que les son aplicadas, certificandose con esto la calidad. Las pruebas físicas oficiales son las siguientes:

-Finura, aun cuando existen métodos para medir la finura del cemento , el método más aceptado es el de "superficie especifica por el método de permeabilidad al aire" denominado Blaine, se mide en  $\text{cm}^2/\text{gr}$  y que consiste en tomar el tiempo que tarda al aire en pasar a través de una masa de cemento compactado a determinada presión, lógicamente mientras más fino sea el cemento mayor será el tiempo que tarde en pasar el aire y viceversa.

-Tiempo de fraguado, el fraguado se refiere a un cambio del estado fluido al estado rígido, aunque durante el fraguado la pasta adquiere cierta resistencia, para efectos prácticos es conveniente distinguir el fraguado del endurecimiento, pues este último se refiere al incremento de resistencia de una pasta de cemento fraguado. El tiempo de fraguado puede ser medido utilizando el aparato de Vicat; para determinar el fraguado inicial se utiliza una aguja con un diámetro de  $1.13 \pm 0.05$  mm. Esta aguja penetra en la pasta de consistencia normal, colocada en un molde especial, bajo un peso establecido; cuando la pasta ha endurecido lo suficiente para que la aguja penetre sólo hasta, un punto distante alrededor de  $5 \pm 1$  mm. de la base, se dice que se ha producido el fraguado inicial se expresa por medio del tiempo transcurrido desde el momento en que se agrega agua de mezclado al cemento. El fraguado final se determina por medio de una aguja similar adoptada a un aditamento metálico ahuecado, de forma tal que deje un borde circular de corte de 5mm. de diámetro colocado a 0.5 mm. detrás de la punta de la aguja, se dice que se ha llevado a efecto el fraguado final cuando la aguja bajada lentamente hacia la superficie de la pasta, se imprime sobre ella, pero los bordes de corte circular no pueden hacerlo. El tiempo de fraguado final se calcula desde el momento en que se agrega agua de mezclado al cemento.

-Resistencia a la compresión, esta prueba se realiza por medio de unos prismas cúbicos de 5.08 cm. de lado que se hacen con un aparte de cemento y 2.75 partes de arena silicosa (que es la misma que se utiliza en todos los laboratorios y que sirve de patrón conservandose en ambiente de humedad y temperatura controlada), tales prismas se van rompiendo a diversas edades: 24 horas, 3 días, 7 días, y 28

días de ser elaborados. En toda la industria cementera cualquiera que sea el tipo de cemento se hacen pruebas suficientes para las cuatro edades ya especificadas y en ocasiones hasta 3 meses, 6 meses y 1 año para poder seguir el desarrollo de las curvas de resistencia, las pruebas sirven como auxiliares en control de investigación.

-Sanidad, expansión al autoclave, esta prueba consiste en unas barras de cemento puro que después de 24 horas de fraguado son sometidas a una presión de vapor de  $21.12 \text{ kg/cm}^2$  (300 psi), y temperatura de  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  durante 3 horas. Esta prueba se realiza para determinar si el clinker fué bien calcinado y la cal viva como óxido de calcio se encuentra en una misma proporción, ya que de lo contrario al hidratarse la cal a esa presión y temperatura lo hace con un aumento de volumen que deforma la barra de muestra y en algunos casos llega a desintegrarse; cuando esto sucede se considera que este lote de cemento es perjudicial en su empleo. En el caso del cemento puzolana puz-1, no existe por lo general tal expansión debido a ciertas propiedades con que cuenta la puzolana.

Actividad puzolánica, en esta prueba se valora la actividad puzolánica de un material, comparando la resistencia a la compresión de un mortero elaborado con cemento Portland y otro en el que se sustituye parte de este cemento por el material a probar.

Fraguado falso, el yeso hemihidrato, en cantidad de un 7 a 10 % fragua a los pocos minutos hidratándose, y produce endurecimiento que aunque con poca resistencia, llega a frenar o impedir incluso la mezcla del concreto que se prepara.

Calor de hidratación, se expresa generalmente en cal/gr. se obtiene midiendo la diferencia entre calor desprendido en un calorímetro por la disolución de un cemento anhidro en una solución ácida de ácido fuerte, y el del mismo cemento hidratado en pasta pura, en un plazo convenido. El calor de hidratación del cemento producido por la aportación de los calores parciales de cada uno de los componentes del clinker.



A continuación se muestran las especificaciones físicas de acuerdo a NOM-C-1 y NOM-C-2.

Características	Cemento Portland		C. P. Puzolana	
	I	II	PUZ-1	PUZ-2
Cantidad retenida por método húmedo en criba F 0.045, máximo por ciento.	-	-	18.0	18.0
Finura, superficie específica cm <sup>2</sup> /g. método de permeabilidad al aire.				
Valor promedio mínimo.	2800	2800	3000	3000
Valor mínimo en cualquier muestra.	-	-	2800	2800
Sanidad, (prueba en autoclave) expansión máxima en por ciento.	0.80	0.80	0.50	0.50
Tiempo de fraguado (M. Vicat).				
fraguado inicial (min) no menos de	45	45	45	45
fraguado final (hor) no más de	8	8	7	7
Resistencia a la compresión kg/cm <sup>2</sup> . en cubos de mortero 1:2.75 en masa valores mínimos:				
a las 24 horas	-	-	-	-
a los 3 días	130	105	130	102
a los 7 días	200	175	200	153
a los 28 días	-	-	255	204
Índice de la actividad de la puzolana empleada con el cemento portland % del testigo a 28 días mínimo = 75 %.				

Las pruebas físicas opcionales, son realizadas si el comprador las requiere, dependiendo de las especificaciones del proyecto, llevandose un acuerdo mutuo entre comprador y vendedor. Estas son mencionadas a continuación.

Características	Cemento Portland		C. P. Puzolana	
	I	II	PUZ-1	PUZ-2
Fraguado falso, penetración final, mínimo %	50	50	50	50
Calor de hidratación a los :				
7 días , en cal/gr. máx.	-	70	70	70
28 días, en cal/gr. máx.	-	80	80	80
Inhibición de la reacción alcalí - agregado. expansión producida en el mortero a la edad de:				
14 días máx. %	-	-	0.02	0.02
90 días máx. %	-	-	0.05	0.05

### 5.3. CONTROL DE CALIDAD.

Desde el punto de vista económico existe una calidad óptima o calidad "correcta", tanto para el productor (costos de producción) como para el consumidor (precio del producto) de cemento, que se define por la relación entre calidad y costo o precio del producto. Es un compromiso entre las tareas del productor y del consumidor. Esto significa que deberían hacer un esfuerzo de encontrar esa solución intermedia óptima entre los costos de operación del productor y los requerimientos de calidad y los precios previstos por el consumidor, siempre tomando en cuenta el producto final que es el concreto. A esta actividad se le conoce como "planificación de calidad", incluyendo tanto la determinación de las medidas adecuadas en la producción desde las materias primas hasta la molienda y la distribución y aplicación del producto final.

El productor de cemento invierte un capital enorme en instalaciones y máquinas para triturar, mezclar, moler y homogeneizar los materiales disponibles. Y para lograr el control de estas instalaciones, se hacen esfuerzos considerables, implementando instrumentos modernos y computadoras no sólo para proyectos de plantas nuevas sino también para programas de rehabilitación de instalaciones existentes. Es evidente que se requiere un instrumento de eficacia similar para controlar de manera continua la selección y la dosificación de las materias primas (mezcla económica) y su transformación en el producto especificado, es decir un "control de calidad" desde las materias primas por los productos intermedios hasta el producto final.

Este control de calidad persigue dos objetivos:

-En combinación con el control de proceso, el control de calidad sirve para optimizar la producción; el control de la interacción entre material y máquina es de suma importancia, particularmente para el sistema de hornos donde la fluidez de las operaciones depende en gran medida de la calidad de la harina cruda;

-al mismo tiempo este control de calidad debe guiar la combinación de las materias primas y los productos intermedios hacia la calidad correcta del producto final, calidad determinada por el proceso de planificación de calidad.

La combinación de estos dos elementos, planificación y control de calidad, se llama "garantía de calidad".

Los pasos anteriores a las pruebas, los métodos de prueba, la interpretación correcta de los resultados y el proceso de toma de decisión constituyen la base de una garantía de calidad. O en otras palabras se requiere de un sistema completo de instrumentos, no solamente de pruebas químicas y físicas:

-Los objetivos y las metas en cuanto al nivel de calidad y de uniformidad (valor medio, valor máximo, desviación estándar) deben ser establecidos por la administración de acuerdo a la política de la compañía;

-se requiere de una interpretación inequívoca de los resultados de las pruebas, es decir : debe ser independiente de la opinión del analista. Esto es posible solamente cuando se establecen procedimientos claramente bien definidos de procesamiento de datos y de evaluación. Es uno de los campos donde los sistemas automáticos y las computadoras suelen tener mucho éxito. En base a los objetivos y a las metas de calidad de la compañía, se deben establecer límites de control y de alarma, como criterios válidos de decisión para tener seguridad de que tanto el proceso como el producto se encuentren permanentemente bajo control.

Un sistema bien concebido y eficaz de control de calidad, se deberán tomar en consideración una serie de principios:

-Un buen sistema de control de calidad significa "prevenir más que curar". Por lo tanto, los sistemas de control deben ser establecidos de tal manera que medidas correctivas pueden ser tomadas antes de que el proceso sea afectado y/o material inservible sea producido;

-los programas de control deben ser estructurados para reconocer ante todo aquellas características que afectan significativamente la eficiencia del proceso, el costo del producto y su rendimiento. Por lo tanto se deben tomar en cuenta cuales son los factores de alto riesgo y de alto costo;

-cada programa particular deberá ser actualizado periódicamente en base a los datos de la retroalimentación de información y los avances tecnológicos. Además, un programa de control de calidad debería tener suficiente flexibilidad para acomodar cambios en las condiciones, tanto del lado del consumidor (mercado, normas) como del lado del productor (materia prima, instalaciones, personal). Esto requiere información continua y análisis de la situación en los campos de producción y de aplicación del producto.

Los métodos de toma de muestras y de pruebas deben ser seleccionados racionalmente de acuerdo a los propósitos de la medición y a las condiciones vigentes. Estos procedimientos deben ser verificados continuamente (ver fig 66).

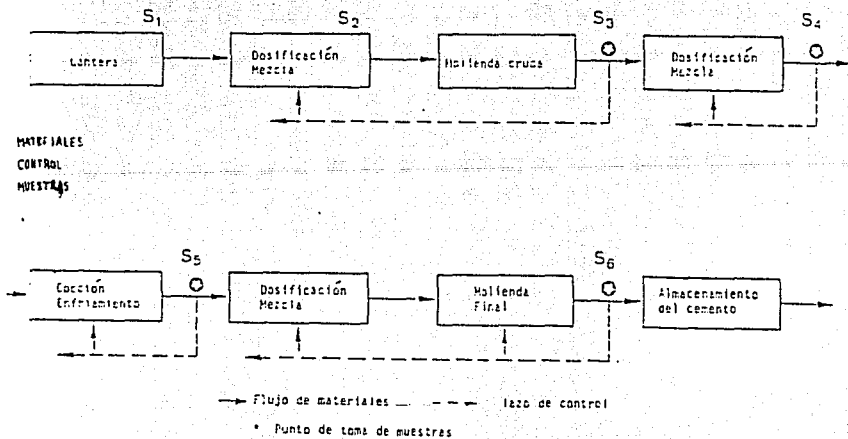


FIG. 66 Programa de control para el flujo del proceso el muestreo y los lazos de control.

El equipo automatizado y las computadoras se aplican con éxito en las siguientes secciones de control:

-Planificación y operaciones en canteras pueden ser controladas por computadora a fin de aprovechar al máximo las materias primas disponibles. Esto resulta particularmente interesante en casos donde la materia es difícil en cuanto a calidad y/o cantidad;

-donde los principales componentes de la materia no pueden ser separados nitidamente, química o estratigráficamente, la mezcla cruda se prepara muchas veces en una prehomogeneización integrada. Para minimizar las cantidades de materiales correctivos y por ende también, los costos de inversión para instalaciones de almacenamiento y de dosificación, se requiere a menudo un sistema sofisticado de muestreo y de pruebas para lograr la mezcla deseada mediante operaciones controladas de canteras y pre-mezclado;

-el control de molienda y la integración de silos de homogeneización continuos mediante computadora, combinando con espectros de fluorescencia de rayos X, en función off- u on-line, es prácticamente un sistema estándar. Muchas veces se considera este sistema como el mismo corazón del control anticipado de calidad y del control de proceso, especialmente con relación a la importancia que se da a la reducción de energía y de consumo de ladrillos dentro del sistema de hornos;

## 6. SEGURIDAD INDUSTRIAL.

Los factores de mayor relevancia en la incidencia de los riesgos de trabajo son de orden técnico, humano y administrativo. El aspecto técnico involucra las instalaciones, equipos, herramientas, materiales y procesos, donde el trabajo se efectúa.

El aspecto humano implica los conocimientos, experiencia, capacidad, habilidades, motivos y actitudes de los recursos humanos.

Y por último el factor administrativo hace las veces de enlace entre los recursos humanos y los aspectos técnicos de la producción, es decir, traza los planes, implementa la organización, provee los procedimientos y las normas, y realiza el control de las operaciones dirigidas a la obtención de sus objetivos.

De la acertada combinación de estos tres elementos, puede resultar el éxito en el cumplimiento de las metas de una empresa o el fracaso con todas sus consecuencias, entre las que se encuentran los riesgos de trabajo.

La filosofía de la administración está orientada a los resultados deseados más que a las actividades. La fijación de los objetivos y la ayuda para alcanzarlos deben de tomarse en cuenta. Las personas trabajan para los objetivos, no sólo para desempeñar determinadas actividades, este enfoque es más aplicable a los cambios tecnológicos, así como al ambiente y las condiciones culturales.

Funciones administrativas. El proceso de administrativo engloba en sí mismo cuatro funciones interdependientes entre sí que dan orden y sentido a la tarea de realizar cualquier actividad.

Planeación. La política debe partir de la dirección de la empresa y ser una orientación escrita que fije la frontera y proporcione los límites y direcciones generales en las cuales se desenvuelven las acciones de seguridad. La política es de suma importancia y es de acuerdo con ella que los otros planes se desarrollan, incluyendo procedimientos, métodos, estándares, presupuestos y programas. Debe ser una guía amplia, elástica, y dinámica que indique el área en la cual deban tomarse las decisiones.

Los objetivos de seguridad son las metas que nos proponemos y nos señalan la dirección de nuestros esfuerzos y acciones. Estos objetivos deben estar identificados de tal forma que nos permitan identificar el éxito o el fracaso final. Los objetivos deben fijarse por escrito, lo cual impedirá que dos personas los entiendan de diferente manera. Deben contener el objetivo general de la planta, el del departamento y el individual de cada persona. Con esto, cada uno de los participantes tiene una noción clara del papel que juega él y su departamento en los objetivos de seguridad de la compañía.

Los objetivos deben ser de tal naturaleza que sean posibles de alcanzar y al mismo tiempo que estimulen a alcanzarlos o a superarlos. Puede esperarse un efecto negativo si los objetivos establecidos son muy fáciles o muy difíciles de alcanzar, es decir, que estén fuera de la realidad.

El procedimiento es la serie de tareas eslabonadas que forman el orden cronológico y la forma establecida de ejecutar los trabajos de seguridad. Los procedimientos deben ser específicos y hechos a la medida para lograr que el trabajo se realice. Estos deben dar información sobre como debe hacerse el trabajo y quien debe realizarlo. Debe presentar la mejor forma de hacer las cosas desde el punto de vista del tiempo, esfuerzo y gastos con respecto a los objetivos.

Por otro lado el método nos da las herramientas para saber como, en donde, cuando y con qué vamos a realizar cada una de las actividades de seguridad que nos ha fijado el procedimiento.

Los estándares son las unidades de medida que serán establecidos como un criterio o nivel de referencia. Estos son importantes en la programación cronológica, en la determinación de los requisitos y para la interrelación de los recursos básicos de la empresa. Son la herramienta de medición porque registran el número de veces que una actividad debe llevarse a cabo y nos proporcionan el nivel de desempeño de cada integrante o cada departamento en alcanzar los objetivos planeados.

Contando con que todos los aspectos mencionados con anterioridad han sido revisados y decididos, se pasa a la elaboración del programa de seguridad, el cual debe incluir el uso futuro de los diferentes recursos, estableciendo la secuencia de las acciones registradas y la cronología para el logro de los objetivos fijados.



La organización, reúne todos los recursos básicos en forma ordenada y acomoda a las personas en un esquema aceptable para que puedan desempeñar las actividades de seguridad requeridas. Debe ser pensada para que la gente trabaje junta con eficacia hacia el logro de los objetivos. Sin embargo es de gran importancia que el acto de organizar de como resultado una estructura de la organización que pueda considerarse como el marco de trabajo que retiene unidas las diversas funciones de acuerdo con un esquema que sugiera orden, arreglo lógico y funciones armoniosas. Para que sea efectiva la organización cada uno de los niveles de la estructura debe conocer específicamente cuales son las actividades que va a desempeñar, a quien le informa y quien le reporta a él. El organigrama y el manual de seguridad (conteniendo los procedimientos e instructivos) son las herramientas comunes de la organización formal.

Las funciones de cada uno de estos niveles son las entidades principales alrededor de las cuales se construye la estructura organizativa efectiva. Dentro de la organización del sistema de seguridad se requiere autoridad, esta condiciona las acciones y el comportamiento de todo miembro del sistema, y representa un eslabón vital que une varias unidades, haciendo así posible el trabajo efectivo colectivo de todo el personal. La autoridad se ejerce tomando decisiones y viendo que se cumplan. El cumplimiento se puede lograr por varias formas: persuasión, sanciones, coerción y restricción. Cada una de ellas aplicables según la persona o la situación.

**Ejecución y dirección.** La ejecución enfatiza trabajar con personas, despertar su entusiasmo, su deseo, y sus energías hacia el logro de los objetivos mutuos. Para el éxito de los planes, es fundamental el conocimiento de las condiciones actuales que afectan al personal, la fe y la confianza en cada empleado y trabajador y la aceptación del hecho de que la disposición y capacidad para que cada persona se desempeñe con entusiasmo, es la condición para el éxito. Por lo general se obtienen esfuerzos favorables tratando al personal como a seres humanos fomentando su crecimiento y desarrollo, instalandoles el deseo de superarse y reconociendo el trabajo bien hecho.

La dirección es la relación en la cual una persona, o sea el dirigente influye en otros para que trabajen juntos voluntariamente en tareas relacionadas para lograr lo que el dirigente desea. La influencia del dirigente es de dos tipos. Primero, está su propio desempeño que afecta directamente el nivel de

desempeño del grupo. Segundo, está el comportamiento y las acciones que emprende para afectar la estabilidad del grupo y la satisfacción de los miembros.

Debe entenderse que las actividades de seguridad son parte integral del trabajo de cualquier persona, no una carga extra como generalmente se tiende a considerar, ya que toda persona con posición de mando tiene la responsabilidad de la protección del personal y los equipos y materiales a su cargo.

Los objetivos de la capacitación deben enfocarse a fortalecer los planes y objetivos. Debe ser dirigida a todos y cada uno de los integrantes del sistema de seguridad, impartiendo conocimientos que ayuden a desarrollar habilidades administrativas y técnicas y fomenten actitudes positivas.

**Control.** Para determinar si los esfuerzos están dando resultados para alcanzar los objetivos, se requiere la evaluación de los resultados. Si los resultados no van de acuerdo con lo esperado, entonces se aplican medidas correctivas. Esta vigilancia y corrección, en su caso, constituyen la tarea de control.

El control incluye la vigilancia activa de seguridad para tenerla dentro de los límites definidos, ayuda a asegurar que lo planeado se ejecute. Se puede considerar que el control está formado por un mecanismo que descubre y corrige las variaciones importantes entre los resultados obtenidos y las actividades planeadas.

### Equipo de protección personal

El equipo de protección personal juega un papel muy importante en el programa preventivo de seguridad industrial.

**Protección de ojos.** Existe equipo específico para la protección contra la posibilidad que los ojos sean golpeados por objetos duros y pequeños, expuestos a vapores irritantes, rociados por líquidos, irritados por la exposición a la energía radiante, tal como los rayos ultravioleta, producidos por el arco eléctrico que se produce en operaciones de soldadura eléctrica.

Protección de la cara y los ojos. En algunas operaciones es necesario seleccionar una protección que cubra la totalidad de la cara, en algunos casos se requiere que la protección de la cara sea lo suficientemente fuerte para salvaguardar los ojos. Las protecciones para la cara están generalmente suspendidas de una banda que rodea la cabeza y pueden ser articuladas de forma que al levantarlas y bajarlas se haga con facilidad. En la mayoría de los casos el material protector es de plástico y no debe tener fallas que molesten al usarlo, con efectos de visión distorsionada.

Protección de los dedos, manos y brazos. Más de una tercera parte de las lesiones incapacitantes ocupacionales que se producen afectan estos miembros. Existe una gran variedad de equipos adecuados para muchas operaciones especializadas, pero el más común es el guante, el cual se deberá seleccionar para cada trabajo en particular. Los guantes no se recomiendan para operadores de máquinas por la posibilidad de que el guante sea cogido por una parte rotatoria.

Protección de pie. La protección normal para los pies utilizada en la industria son las botas con punta metálica de construcción robusta y sólida, mismas que deben resistir una carga estática de 2500 lib. (1758 kg.) o resistir una carga de impacto equivalente a 50 lib. (22.7 kg.), que cae a la altura de 1 pie (.305).

Protección del oído. Aún cuando la mayor parte del sonido llega al oído interno a través del canal auditivo y esta energía sonora puede ser bloqueada mediante un protector en la oreja, una parte importante del sonido puede ser transmitida por los huesos del cráneo. Los dispositivos para la protección del oído no pueden reducir el sonido que llega al oído interno en más de aproximadamente 50 db. Existen tres tipos generales de protectores del oído:

- Tapón, puede ser moldeable en forma suave, materiales plásticos duros, confortables para acomodarse en el canal auditivo del usuario;
- almoadilla o dona, estos son dispositivos que se mantienen en posición sobre las orejas por medio de bandas que cruzan la cabeza y pueden estar fabricadas en goma, metal y goma;
- casco, el cual ya trae integrada la almoadilla o goma.

Protección respiratoria. Los fabricantes ofrecen una amplia variedad de equipos protectores de la respiración; cada tipo es adecuado para una o varias aplicaciones. Un procedimiento recomendado para decidir cual es el tipo adecuado de dispositivo requiere lo siguiente:

- ¿cuál es el nombre del contaminante contra el que hay que protegerse?
- ¿cuáles son las propiedades químicas, físicas y toxicológicas?
- ¿cuanto tiempo podrá ser utilizado por día?

## 7.0 CONCLUSIONES

El cemento es uno de los materiales básicos para la actividad de la construcción, las aplicaciones del cemento van desde la cimentación hasta la construcción de pisos, columnas y techos y sus cualidades lo hacen ser producto indispensable y sin sustituto en la construcción de viviendas, canales, presas y muchas otras obras que benefician a la sociedad.

El cemento está constituido por compuestos químicos inorgánicos cristalinos, en los cuales predomina el elemento calcio, combinado ya sea con el silicio, que aparece en forma de silicatos de calcio característicos de los cementos Portland.

Los cementos puzolánicos generalmente rinden resistencias mecánicas inferiores a las del Portland tipo I a edades tempranas, pero lo igualan y aun superan a edades largas. Por otra parte son más delicados en el curado, pero generan menor calor de hidratación y resiste mejor al ataque de agentes químicos agresivos. Los cementos puzolánicos pueden elaborarse con cualquiera de los tipos de cemento Portland (aunque se prefieren los tipos I y II) y son además, perfectamente compatibles con ellos, es decir, se pueden mezclar en cualquier proporción o colocar sobrepuestos deados de concreto preparado con uno y otro cemento sin que se tenga el menor signo de rechazo.

Las principales materias primas que se emplean en la elaboración del cemento son la piedra caliza y la arcilla. La naturaleza ha sido prodiga en México, teniendo con abundancia estos materiales, los cuales se encuentran razonablemente distribuidos en el territorio nacional, permitiendo un abastecimiento regular y confiable en todos los rincones del país. Además de la caliza y la arcilla, también se utiliza yeso, puzolana, mineral de hierro, arena y caolín.

En el proceso de fabricación de cemento se manejan grandes volúmenes de materiales sólidos cuya transformación implica, necesariamente, una reducción del tamaño de las partículas,

mediante operaciones repetidas de trituración y molienda. En todas estas operaciones, así como en las de secado y calcinación, se generan inevitablemente emisiones de partículas sólidas suspendidas en el aire o arrastradas por los gases de combustión.

Se hace la observación que ninguno de los materiales integrados en el proceso de fabricación de cemento son, en sí mismos, tóxicos o dañinos para la salud.

En el proceso de fabricación se consumen también volúmenes muy considerables de energía eléctrica para mover el pesado equipo de trituradoras, molinos, hornos, elevadores, bandas y ventiladores. En cada tonelada de cemento se consumen aproximadamente 150 kWh.

Todas las materias primas son trituradas a un tamaño aproximado de 5 cm o menor y son depositadas en patios de materiales ya con un análisis químico promedio, el cual sirve de base para hacer el cálculo de mezclas que se debe utilizar. Se emplea un sistema mecánico de "prehomogeneización" que consiste en seleccionar los materiales de diferentes composiciones químicas del modo más uniforme posible, ya que en cada caso varía el método que se realiza.

En esta parte del proceso donde el laboratorio de control de calidad debe prestar más atención ya que de su buena composición química y buena homogeneización depende el que se obtenga un producto que reúna las características deseadas, no solo en sus propiedades, sino en su comportamiento de producción. En esta parte del proceso todavía es factible hacer correcciones en su composición y si se logra obtener una harina bien controlada, en el resto del proceso es relativamente mínima la intervención, ya que únicamente se reduce a una supervisión complementaria y sencilla.

La reducción del tamaño granulométrico de las materias primas dosificadas componentes del crudo, se realiza en molinos de bolas provistos de sistemas "secadores" con aires precalentados por intercambiador, con objeto de evitar al efecto perjudicial de su eventual contenido de humedad. Los molinos son cilindros

de acero recubiertos interiormente con placas de acero austénico y divididos en su interior en dos o tres cámaras. Cuenta con elementos molidores que son bolas de acero al carbono, que llenan aproximadamente un tercio del volumen del molino.

Para la máxima utilización de la energía, la relación de la carga de los cuerpos molidores a la del material que se ha de moler debe estar coordinada entre sí y ciertamente teniendo en cuenta la finura de la molienda, esa relación ha de ser tanto mayor cuanto mayor sea la finura del material molido. Para aprovechar mejor los huecos entre las bolas, éstas son de distintos tamaños, tanto en molinos de varias cámaras como en los de una sola.

Como 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 % solo a la molienda. 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, vibración, rendimientos del motor y del molino, elevación del material en el molino.

Los hornos de proceso seco con precalentador de suspensión y precalcinador son los más eficientes, en lo concerniente a consumo calorífico, con ellos se llega a producir clínker con 750 kcal/kg, esto es, 75 % por encima del calor teóricamente indispensables.

Con el sistema de precalcinador (en el ciclón que entrega el material al horno), se consigue un aumento considerable del valor de descarbonatación del crudo a la entrada del horno y se facilita así el proceso de clinkerización.

La combustión del fuel permite establecer un gradiente de temperatura en el interior del horno, donde la temperatura máxima corresponde a la zona de la llama, entre los 3 y los 10 m, a partir de la salida del

clinker del horno. En esta zona, donde tiene lugar la clinkerización, se produce el valor máximo del intercambio calorífico llama-clinker

Los hornos de cemento requieren de una gran cantidad de energía calorífica cuya fuente principal en nuestro país se encuentra en el combustóleo o en el gas natural, ya que el carbón no abunda en el territorio nacional. Para producir una tonelada de cemento se consumen de 100 a 150 litros de combustóleo o su equivalente en gas natural.

Es importante e indispensable realizar un estricto control de calidad en cada uno de los procesos que se sigue durante la elaboración del cemento Portland puzolana iniciándose este desde la extracción de la materia prima, hasta el producto final ya terminado para ser entregado para su consumo, certificándose que se cumplen todos las especificaciones. Es importante hacer la observación de que el control de calidad que se hace en la fabricación del cemento, no solamente tiene la finalidad de lograr un buen producto que cumpla con las normas, sino también está relacionado con la producción para lograr una mayor eficiencia del equipo así como su conservación, ya que la composición química de los materiales, finura, dureza, etc. tiene mucho que ver en el rendimiento de los hornos y molinos, consumo de combustible y energía eléctrica, conservación del revestimiento de los hornos entre otros.

El control de calidad debe vigilarse durante las 24 horas del día y todos los días del año, esto se debe a que la producción es continua y a los grandes volúmenes de materiales que se mueven en la producción, pues esta no se hace por lotes como suele suceder en la mayoría de las industrias de transformación, debido a la variación constante de las materias primas utilizadas, el control de calidad siempre sucede a la producción y no la antecede.

Por otra parte la seguridad industrial, es un punto muy importante en el proceso de fabricación del cemento, ya que el objetivo es darle al trabajador las herramientas necesarias y básicas para evitar accidentes, haciendo especial énfasis en las consecuencias de estos, erradicando a su vez los vicios y comportamientos negativos.



## **BIBLIOGRAFIA**

**MANUAL PARA EL USO DE EXPLOSIVOS.**

**COMPANÍA EDITORIAL CONTINENTAL S.A. 1973**

**LA QUIMICA DE LOS CEMENTOS.**

**H.F.W. TAYLOR TRAD. CASTELLANO DR. ROSSI**

**EDICIONES URMO BILBAO**

**EL CEMENTO PORTLAND Y OTROS AGLOMERANTES.**

**F. GOMA**

**EDITORES TECNICOS ASOCIADOS S.A. BARCELONA 1979**

**MANUAL TECNOLOGICO DEL CEMENTO.**

**WALTER H. DUDA**

**EDITORES TECNICOS ASOCIADOS S.A. 1977**

**MOVIMIENTO DE TIERRAS.**

**NICHOLS HERBERT JR.**

**EDITORIAL CONTINENTAL**

**MAQUINARIA Y METODOS MODERNOS EN CONSTRUCCION.**

**FRANK HARRIS**

**EDITORIAL BELLISCO E HIJOS 1992**

METODOS PLANEAMIENTO Y EQUIPOS DE CONSTRUCCION.

R.L. PEURIFOY

EDITORIAL DIANA 1973

REVISTA IMCYC.

VOL. 25 NUM. 200/ENE- 1988

MINERO-NOTICIAS.

JULIO-AGOSTO 1988

NORMAS OFICIALES MEXICANAS.

INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION

DUPONT, S.A. DE C.V.

DEPARTAMENTO DE EXPLOSIVOS

HOMERO 206- 9o. PISO

PLANTA CEMENTOS APASCO.

SEMINARIO DE CEMENTO MEXICO, 1993

HOLDERBANK ADMINISTRACION Y ASESORIA, S.A.

TECNOLOGIA DEL CONCRETO.

NEVILLE.

TOMO I

MANUAL DE RENDIMIENTO CATERPILLAR.

PUB. CAT. PREPARADA POR CATERPILLAR INC.

PEORIA, ILLIONS, E.U.A. 1991

EQUIPOS DE EXTRACCION Y PREPARACION DE MINERALES.

JEAN COSTES

EDITORES TECNICOS ASOCIADOS, S.A. BARCELONA

VOLADURA DE ROCAS.

LANGEFFORS-KIHLSTROM.

EDITORIAL URMO. PRIMERA EDICION EN ESPAÑOL.