



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

---

---

**FACULTAD DE QUIMICA**



EXAMENES PROFESIONALES  
FAC. DE QUIMICA

LA IMPORTANCIA DE LA PREHOMOGENEIZACION  
Y LA HOMOGENEIZACION EN EL CRUDO DEL  
CEMENTO PORTLAND.

**TESIS MANCOMUNADA**

**Que para obtener el Título de  
INGENIERO QUIMICO**

**presentan:**

MARIO FRANCISCO SANCHEZ ALMEIDA

MARCO ANTONIO RAMIREZ OBREGON.

**1982**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

# TESIS CON FALLA DE ORIGEN

## CONTENIDO

	Pag.
Prefacio	1
Sección	
I Introducción.	2
Exploración de Canteras	2
Preparación	3
Calcinación	4
Cemento	6
Control de Procesos	7
II Generalidades	9
III Métodos de Prehomogeneización	14
Realización de Apilamiento longitudinal	16
Método Chevron	16
Método Windrow	18
Apilado Circular	21
Desapilado Longitudinal	23
IV Métodos de Homogeneización	31
Proceso Fuller	33
Proceso Polysius	38
Proceso por Franjas	40
Proceso Geiser	40
Proceso Moller de Corriente en Cizalla	40
Sistema IBAU de Cámara Central	42

	Pág.
V.- Expresiones Matemáticas Usadas en la Homogeneización	44
Proceso del Desvío Máximo	44
Proceso de la Desviación Normal	48
Control de la Homogeneización por ordenador	53
VI.- Parte Experimental	60
VII.- Conclusiones	75
VIII.- Bibliografía	81

**PREFACIO.**

El propósito principal de esta tesis, es presentar un análisis de los beneficios que se obtienen al llevar a cabo un mezclado óptimo de las materias primas para crudo de cemento.

En los capítulos 1 y 2, se hace un bosquejo general de la evolución que ha tenido la industria del cemento y de las principales variables que se manejan en el control del proceso.

En los capítulos 3 y 4, se mencionan los métodos de prehomogeneización y homogeneización más comunes en la industria cementera.

En los capítulos 6 y 7, se trata de demostrar mediante el análisis general de los factores que influyan, en la homogeneización de las materias primas para crudo de cemento, que es rentable la adquisición de los equipos e instalaciones para la misma.

## 1.- INTRODUCCION

El cemento es el principal ingrediente del concreto, el cual actualmente ocupa el segundo lugar de los materiales para construcción usados por el hombre.

La industria del cemento está dividida en pequeñas unidades, en virtud del hecho de que los costos de transportación de las materias primas y del producto terminado, constituyen una gran parte del costo total de la operación.

Las plantas productoras de cemento han sido tradicionalmente situadas, cerca de las fuentes de materias primas.

Los incrementos en los costos de energía, han forzado a los manufactureros a concentrar sus actividades dentro de pequeñas y grandes unidades de producción, así como a cambiar de procesos húmedo a proceso seco.

El proceso de cemento puede ser dividido en cinco operaciones básicas:

- 1.- Obtención de materias primas (explotación de canteras).
- 2.- Preparación de materias primas.
- 3.- Cocción de las materias primas crudas para formar el clinker.
- 4.- Molienda de clinker con yeso (cemento).
- 5.- Control de proceso.

1.1 EXPLOTACION DE CANTERAS.- Las materias primas usadas en la elaboración de cemento son básicamente caliza, arcillas y pizarras.

La caracterización de las materias primas que toman parte en el proceso de elaboración de cemento es muy importante debido a que:

a) El equipo moderno de trituración, secado, molienda y muy especialmente el de calcinación requiere de una composición muy constante en las materias primas, si se quiere alcanzar altos niveles de eficiencia.

b) Los elementos de menor concentración como álcalis, cloruros y azufre, pueden causar taponamientos y estrangulamientos en el precalentador de un horno, así como forrado excesivo del mismo. La presencia de estas sustancias en la mezcla cruda, puede decidir la selección del tipo de proceso que será utilizado.

c) Las especificaciones de calidad y los requisitos del consumidor, tienden cada día a limitar más y más, la variación en la composición química del cemento.

d) La línea de producción moderna tiende a incrementar las capacidades y consecuentemente a incrementar las cantidades de material explotado, triturado, molido y homogeneizado.

Todos estos factores aunados al incremento en la población y consecuentemente su utilización de las zonas rurales, para la construcción industrial y habitacional, han aumentado la dificultad de tener depósitos lo suficientemente grandes de calidad deseada para la producción de cemento.

La selección de los mejores depósitos de materias primas, es en la actualidad casi imposible y la explotación de depósitos no homogéneos, con grandes fluctuaciones en la composición química es necesaria.

1.2 PREPARACION.- En los últimos años se ha enfatizado el paso de proceso húmedo a proceso seco en la calcinación del crudo, debido a la necesidad de ahorrar energéticos.

Básicamente en el proceso húmedo las materias primas se encuentran suspendidas en agua, en forma de pasta, después de haber

sido trituradas y molidas. La ventaja de este sistema es que el transporte y la homogeneización de una pasta, es más fácil que en proceso seco. La desventaja, es que de cualquier modo las materias primas tienen que ser secadas en el horno, lo que hace necesaria una mayor longitud del mismo y un consumo mayor de combustible.

Por otro lado, el proceso seco requiere homogeneizar un material que haya sido triturado y clasificado desde la cantera, con otros materiales para formar una mezcla. Esta mezcla será alimentada a un molino de bolas, para darle las características físicas necesarias de finura y viscosidad.

Para minimizar la posibilidad de interrupciones costosas en la calcinación y asegurar una composición constante en el clinker producido, obviamente se necesita una mezcla cruda extremadamente invariable en su composición. Para obtener esta consistencia, es esencial tener un análisis lo suficientemente confiable y rápido, considerando que el tiempo de residencia del material dentro del molino, fluctúa entre 30 y 60 minutos, dependiendo de su Molturabilidad. Para un mejor control, el tiempo de muestreo y obtención de resultados debe ser los más corto posible.

1.3 CALCINACION.- Esta etapa constituye la cocción de las materias primas, dentro de un horno rotatorio para formar el clinker. El horno que es un tubo cilíndrico de acero, está forrado en toda su longitud con una capa de refractario. Dicho horno está montado de tal forma que tiene una inclinación de 3.0% aproximado con respecto a la horizontal y gira sobre su eje a una velocidad entre 1 y 2.5 r.p.m.

El material crudo o alimentación es dosificado por un extremo del horno, mientras el calor se suministra por el otro. Los gases de combustión son llevados a través del horno por un

ventilador, puesto a tiro inducido hasta la entrada de alimentación. En hornos con precalentador, el material pasa a través del sistema en unos 30 minutos, mientras que los gases pasan a contracorriente en cuestión de segundos.

En proceso húmedo los hornos tienen longitudes hasta de 130 metros y la operación puede ser dividida en 4 zonas:

1.- ZONA DE SECADO.-Normalmente conocida como la sección de cadenas, debido a que esta sección del horno se reviste con cadenas y está situada en la parte inicial del horno del lado de la alimentación. Aquí se elimina el agua de la pasta alimentada.

2.- ZONA DE DESCARBONATACION. El contenido de óxido de calcio (CaO) en el crudo alimentado, está en forma de carbonato de calcio  $\text{CaCO}_3$ ). En esta zona el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), es eliminado para convertir el carbonato de calcio a óxido de calcio.

3.- ZONA DE CALCINACION. En esta sección del horno las temperaturas son del orden de  $1400^\circ \text{C}$ ., las reacciones que ocurren son bastante complejas y difíciles de conocer en su totalidad, debido a que son formados muchos compuestos de los óxidos presentes.

4.- ZONA DE ENFRIAMIENTO.- Después de la zona de calcinación y hasta la descarga de horno, el clinker se empieza a enfriar; después del horno se tiene un enfriador, el cual es un sistema de recuperación de calor, que a la vez que enfría el clinker suministra aire caliente para la combustión.

En el proceso semiseco, la alimentación está constituida por nódulos que contienen alrededor de 11% de agua. Los nódulos son alimentados a un precalentador de parrilla. Desde esa parrilla el material pasa a un horno mucho más corto que el de

proceso húmedo, a donde el material llega seco y parcialmente descarbonatado.

En el proceso seco, la alimentación que es un polvo de cierta finura y seco, pasa a través de un precalentador, constituido por ciclones, en contra corriente con los gases calientes provenientes del horno, el cual es bastante corto.

1.4 CEMENTO.- El clinker formado en el horno es una mezcla compleja de silicatos y aluminatos, que cuando es mezclado y molido con un pequeño porcentaje de yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ ) a un polvo fino menor que 200 mallas, el producto es entonces llamado cemento.

De acuerdo a los estudios por difracción de rayos X, se ha encontrado que las principales fases en el clinker son:

Alita	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	( $\text{C}_3\text{S}$ )
Belita	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	( $\text{C}_2\text{S}$ )
Aluminato tricalcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	( $\text{C}_3\text{A}$ )
Alumino-ferrito tetracalcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	( $\text{C}_4\text{AF}$ )

La alita es la fase formada al reaccionar la belita con óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) y está normalmente presente como cristales monoclinicos. Ocasionalmente, contiene algo de alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y periclasa ( $\text{MgO}$ ) en solución sólida, es la responsable de las resistencias del cemento a edades tempranas.

La belita existe en cuatro formas alotrópicas  $\alpha$ ,  $\alpha'$ ,  $\beta$  y  $\delta$  trigonal, rómbica, monoclinica y rómbica respectivamente en la estructura cristalina. Las 3 primeras proporcionan resistencias tardías en el cemento ). Abajo de las condiciones de equilibrio de transformación de fases durante un enfriamiento, demasiado lento el clinker puede contener predominantemente la fase  $\delta$  que no proporciona resistencia en el cemento.

El  $C_3A$  tiene estructura cúbica y sus características cementantes son pobres.

El  $C_4AF$  no afecta las propiedades mecánicas del cemento de manera significativa a los niveles normales de concentración.

1.5 CONTROL DEL PROCESO.-El objetivo del producto de cemento es manufacturar un cemento que pueda ser usado para elaborar concreto, que tenga una resistencia mecánica deseable, en conjunto con las propiedades físicas requeridas. La medición de estos parámetros durante el proceso de elaboración, es imposible debido a que el cemento ofrece su máxima resistencia a periodos bastante largos de tiempo, que pueden ser hasta de meses; cuando menos a 28 días.

Sin embargo, los análisis directos de fase en clinker son imprácticos debido a lo complejo de la naturaleza de la matriz y a las grandes variaciones en las fases de los componentes.

Debido a esto, el control del proceso ha sido llevado a través de parámetros tales como tamaño de partícula del material alimentado al horno, temperaturas, tiempos de residencia y análisis químicos de las materias primas usadas para producir cemento. El conocimiento de estos parámetros proporciona una idea de la composición de la fase resultante del clinker y por consiguiente las propiedades mecánicas y físicas del cemento.

Una clave en los parámetros de control es el llamado Factor de Saturación de Cal (F.S.C.) del crudo alimentado, el cual expresa la composición química como un módulo, esto es:

$$F.S.C = \frac{\% \text{ CaO}}{2.8 \% \text{ SiO}_2 + 1.1 \% \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0.7 \% \text{ Fe}_2\text{O}_3} \times 100$$

Estos valores requieren ser controlados con una exactitud mayor del 1%.

En orden de importancia, para este factor el material puede ser analizado como  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Además normalmente se requieren determinar los contenidos de  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$  y  $\text{SO}_3$ .

El cemento una vez procesado es enviado a los lugares de consumo en camiones tolva ( a granel ), furgones de ferrocarril y camiones de carga (envasado en bolsas de 50 kg., generalmente).

## 2.-GENERALIDADES.

Inicialmente las fábricas de cemento procesaban cantidades de materias primas relativamente pequeñas, en las que el principal componente mostraba considerables oscilaciones en su contenido en  $\text{Ca CO}_3$  (Carbonato de Calcio), por lo que era posible reducir en alguna proporción las dispersiones mediante la extracción selectiva de los materiales en la Cantera. Cuando progresivamente, se incrementaron las capacidades de producción en las fábricas de cemento, la selección de materiales en las Canteras mostró que era antieconómico, por esta razón se tuvo que considerar la operación de homogeneizar la caliza y eventualmente otras materias primas por diversos métodos. Desde 1905, ya estaban en marcha métodos de regularización de materias primas de algunos minerales, así como en otras industrias y más tarde los puso en práctica la industria del cemento.

En los sistemas de preparación del crudo de cemento por vía húmeda, importaba la formación de una pasta dosificada, mantenida en agitación continua por medios mecánicos, en la cual la segregación de los minerales resultaba ser prácticamente nula. Exigían una tecnología sencilla, segura y económica, ya que la mayor parte del transporte se realizaba por gravedad. Permitían el empleo de carbones con su humedad natural, elevados contenidos de azufre y cenizas.

Las materias primas, tenían una pequeña proporción de álcalis, constante que no formaba costras en los precalentadores, ni provocaba la formación de anillos sobre el revestimiento del horno rotatorio. Los equipos de anticontaminación eran pequeños y de bajo costo. El proceso era generalmente estable y el consumo de energía eléctrica caía dentro del límite razonable.

En la época del petróleo barato y carbón abundante, su contribución en los precios de costo, no era un gravamen excesivo el enorme consumo de combustible que exigía el secado de las pastas. La elaboración lenta de las pastas era bastante compatible con la modesta capacidad de producción de las fábricas de aquella época. Aunque se alcanzaban bajas finuras, el cemento obtenido era satisfactorio y cumplía con el ritmo de la construcción civil de entonces.

No obstante, con el paso del tiempo la coyuntura industrial tuvo cambios radicales. El agua potable disponible escaseó y su porvenir se presentó incierto. Los incrementos salariales y las cargas sociales acompañadas de otras partidas, como el tratamiento de las aguas residuales y los equipos contra la contaminación atmosférica, acrecentaron el problema. Así mismo, las normas industriales de control de calidad de los productos fueron siendo cada vez más severas.

Paralelamente, los yacimientos altos en caliza fueron escaseando, de tal manera que Canteras abandonadas por su bajo contenido de caliza fueron reactivadas, realizando la concentración de carbonatos por flotación o por centrifugación. Cementos de baja calidad, fueron molidos hasta límites de  $6000 \text{ cm}^2/\text{g.}$ , de área superficial para poder competir con éxito en el mercado. Todo ello, abrió a las Empresas una gran variedad de materias primas, anteriormente poco apreciadas.

La competencia en la Industria Cementera y las crecientes exigencias del mercado de la construcción, determinaron la implantación de gigantescas fábricas, en las cuales la vía húmeda por sí misma resultaba totalmente inadecuada. Pero lo que puso fin a los procesos húmedos, fué el alza del combustóleo y del carbón.

A partir de entonces no hubo otra alternativa. Era preciso me jo ra r los Precalentadores verticales y el rendimiento térmico de los hornos rotatorios. Era necesario, recuperar la entalpía excedente de di ch os hornos y de los enfriadores de clinker. Se debía ampliar la explotación de las Canteras hasta los estratos de menor riqueza en carbonatos, y por encima de todo, era in di s p e n s a b l e la homogeneización del crudo.

El mayor obstáculo en las operaciones por vía seca siempre lo ha constituido la extrema facilidad de segregación de las ma te ri as primas en el curso de la preparación de la mezcla que al i m e n t a a los hornos. Por otro lado, la técnica de homogeneización de los polvos no constituía ninguna novedad. Sin embargo, homogeneizar a razón de 500 tons./día, una caliza cuyo contenido en  $\text{CaCO}_3$  (Carbonato de Calcio) varía en un 10% o más, re p r e s e n t a efectivamente un desafío difícil. Llevarlo a una va ri ac i ó n inferior a 0.2%, parecería aún más difícil. Y no obstante, la prehomogeneización permitiría aumentar a los silos de cargas suficientemente uniformes en su composición química. Para que dicha variación se redujera a menos de 0.2%.

En los apilados por capas alternas, lo que se constituye es al fin y al cabo un yacimiento artificial dentro de la fábrica, comparable con los mejores que pudiéramos encontrar en la na t u r a l e z a. En algunos casos, el secado comienza en la Trituradora; en otros, tan solo durante la molienda. El uso de la entalpía excedente antes de su escape por la chimenea, permitirá en suma crear un lecho deshidratado, alto en caliza o bien conseguir su secado dentro del molino.

Si se considera ahora que el rendimiento térmico de los hornos rotatorios con precalentador, se duplicó en relación con los de vía húmeda y que consumos térmicos de 750 Kcal/kg de clinker se presentaron con mayor frecuencia, gracias a la cocción de material homogeneizado, se habrá llegado a materializar el

ahorro de energía conseguido hoy por hoy en la fabricación del cemento portland.

Esta economía no provino de la dirección financiera de las empresas cementeras. No tuvo su origen en recursos extraídos del mercado de títulos o en hábiles maniobras realizadas en la bolsa de valores. No derivó de la aplicación de algún modelo económico pregonado. Muy al contrario, fué promovida únicamente por el equipo, por la nueva tecnología del proceso de fabricación y por sus controles electrónicos. En pocas palabras emergió del campo de la ingeniería industrial.

No debe extrañar por consiguiente, que el estudio del equipo, máquinas y reguladores automáticos explique y justifique el resto. Tan solo después de estudiar el equipo se podrá llegar a conclusiones fundadas.

### 3.- METODOS DE PREHOMOGENEIZACION.

La prehomogeneización se puede dividir en dos grupos principalmente:

- 3.1 Prehomogeneización conjunta de las materias primas componentes.
- 3.2 Prehomogeneización particular de los componentes individualizados.

La prehomogeneización de las materias primas componentes exige composición química equilibrada. La dosificación de los componentes se realiza antes de llevarlos al lecho de mezcla. La desigual granulometría de los componentes, puede originar segregación que conduce a variaciones en composición del crudo en relación a su valor correcto durante grandes intervalos de tiempo. Con este método no se obtienen tan buenos resultados, como con la prehomogeneización de los componentes individualizados y también se aplica menos.

La prehomogeneización individual de los componentes es el método más empleado en la industria del cemento para regularizar la composición. Los componentes prehomogeneizados individualmente se aportan al proceso, de acuerdo a la proyectada composición química y se llevan al molino mediante dispositivos del tipo de recipientes alimentadores o de básculas dosificadoras. El análisis químico del material que sale del molino proporciona información, acerca de las correcciones que eventaulmente se hayan necesidad de realizar.

La mayoría de las veces solo se somete a prehomogeneización el componente principal del crudo para cemento, es decir; la caliza. En múltiples casos los componentes arcillosos o margosos son químicamente homogéneos, aunque hay fábricas de cemento que se ven obligadas a someterlos a prehomogeneización. Otros componentes del crudo, tales como el cuarzo o minerales de

hierro, son casi homogéneos y no requieren prehomogeneización alguna. Si se utilizan en la fabricación de cemento de escorias de alto horno es así mismo ventajoso someterlas a prehomogeneización.

Para la formación de lechos de mezcla, son adecuados materiales desmenuzados hasta 25 mm. La calidad del lecho de mezcla viene determinada por el tipo de material y el modo de realizar el apilamiento. La formación de lechos de mezcla se suele practicar a lo largo de un eje longitudinal, mientras el vaciado se efectúa transversalmente. Cuando no hay espacio suficiente, se procede a formar las pilas en forma circular. Sin embargo las pilas circulares representan costos de inversión del 30% al 40% más elevado, que para una pila longitudinal comparable a aquellas.

A fin de que los silos de homogeneización del crudo funcionen normalmente deberán recibir de los molinos una mezcla de composición uniforme. De modo que en su alimentación se recomendará siempre que sea posible una variación de carbonatos menor de 1.5%. Por otra parte, para que los molinos envíen al silo de homogeneización una mezcla tan exacta, será preciso alimentarlos con ellas.

En la práctica esto significa que será necesario alimentarlos con caliza o mezcla prehomogeneizada.

Se podrá ver que una caliza cuya composición en  $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$  varíe o fluctúe en un 10%, después de la prehomogeneización quedará limitada a una variación entre 1.0% y 1.5%, que será muy adecuada para una homogeneización posterior.

La prehomogeneización de hecho puede realizarse con cualquiera de los componentes del crudo, pero teniendo en cuenta que el  $\text{CaCO}_3$  es el componente principal (80% aproximadamente), en cantidad y en calidad, el control del crudo suele efectuarse

a través del mantenimiento de su porcentaje en la mezcla, lo más común es limitar la caliza en los apilados de prehomogeneización.

Los apilados de la prehomogeneización presentan varias ventajas. Ante todo, evitan la construcción de silos de mezcla o de materias primas para la alimentación de los molinos. Permiten un buen aprovechamiento de las calizas medias, que en tiempos anteriores estaban vetadas en la explotación de las Canteras. También permiten correcciones de última hora en la composición de la mezcla, facilitando al químico responsable, su difícil labor. La molienda y secado simultáneo de la mezcla quebrantada procedente de la pila, se efectúa en condiciones mucho más favorables, por la uniformidad de la composición, de la granulometría y de la humedad que presenta. Esto conduce a una mayor producción del molino a igual consumo de energía. Asimismo los silos de homogeneización funcionan con un alto rendimiento y superior confiabilidad. Por consiguiente, entregarán a la etapa más elevada del precalentador del horno, un polvo finísimo, invariable en su composición, humedad y finura. El horno así alimentado tendrá una mayor estabilidad operacional y alcanzará la máxima producción de que es capaz, con el menor consumo de energía específico, no habrá formación de anillos y serán bajos los gastos de mantenimiento.

### 3.2.1.- REALIZACION DE APILAMIENTO LONGITUDINAL.

a) METODO CHEVRON.- La forma más usual de apilamiento longitudinal es la que tiene una estructura de cubierta a dos aguas. El material se apila en capas sobre la longitud total del lecho de mezcla. Supongamos que este apilado se realice por estratos de espesores diferentes, de tal modo que la sección transversal de la pila, contenga la proporción ponderal

escogida para cada componente. Con estas condiciones se habrá construido un depósito, en cualquiera que sea la sección transversal, su composición media no diferirá de la composición media de otra sección. Por lo tanto, el depósito formado tendrá una composición química media idéntica a la de sus secciones transversales. Si el desmonte del depósito se hiciera por cortes paralelos, o sea por secciones transversales de cortes paralelos, la desapiladora suministrará entonces, continuamente mezclas idénticas de los distintos minerales que componen la pila. Esta es la técnica característica de la prehomogeneización. El tamaño de la pila varía según la capacidad de molienda. En general, debe bastar para el consumo de una semana o más.

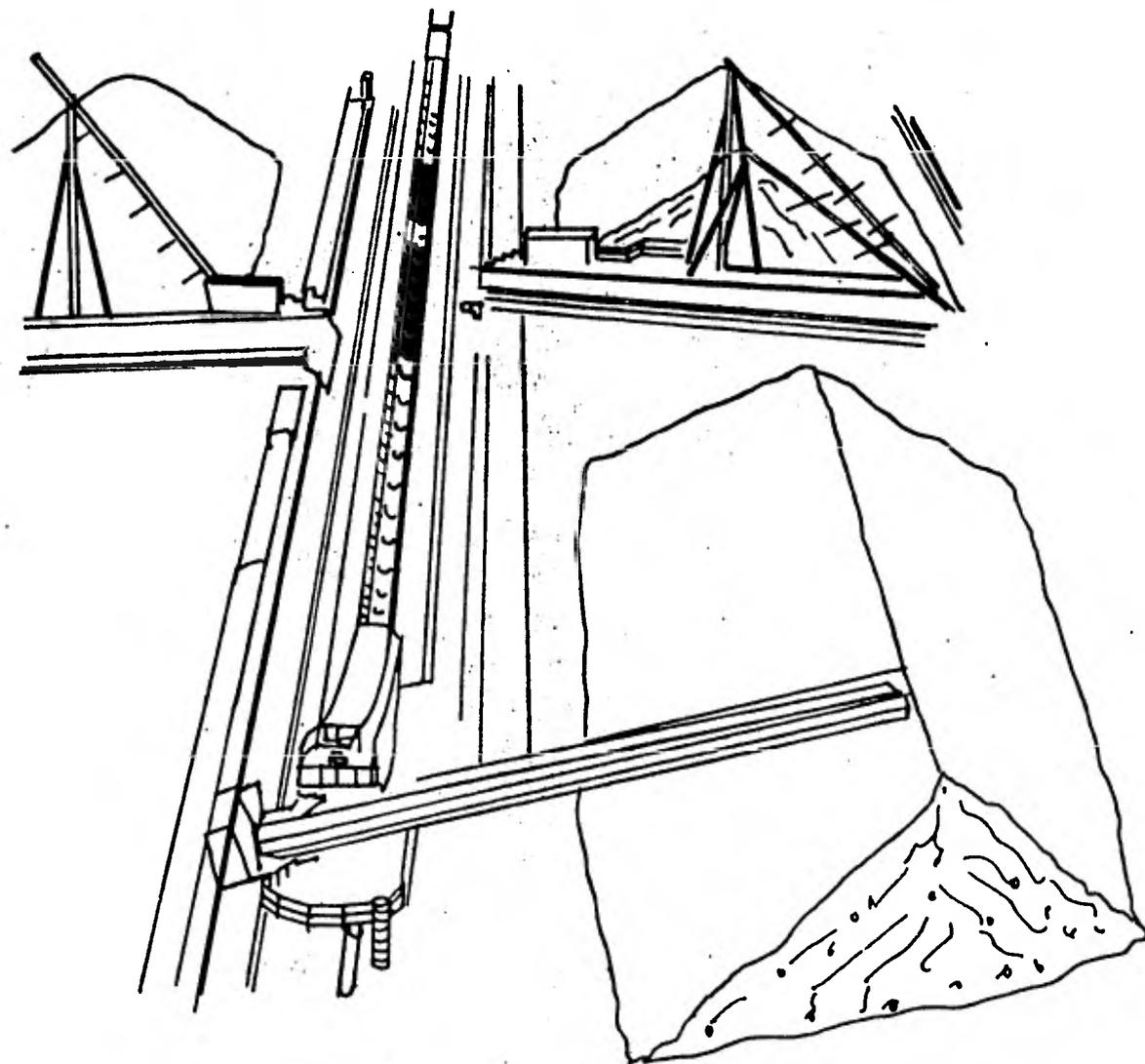
En el apilado longitudinal se opera con una pluma apiladora, que se desplaza sobre carriles rectos y deja caer desde la punta las materias primas formadoras del depósito. Sobre la pluma se desplaza una banda o cinta transportadora, alimentada o no por una tolva que por su parte se reabastece continuamente por otros transportadores del mismo género. La punta de la lanza se desplaza sobre la cresta rectilínea de la pila, paralela al eje de simetría. Esta será su única línea de descarga. El inconveniente principal de este método lo constituye el hecho de que el material grueso, se acumula junto a la base de la pila, originando cierta segregación.

Si ya formado un apilado por el método Chevrón, puede avanzar la punta de la lanza para formar una segunda línea de cresta, paralela a la anterior, o alineada con ésta y se repite la maniobra cuantas veces sea necesario, se tendrá apilado por fajas laterales o fajas alineadas que son métodos bastante usados.

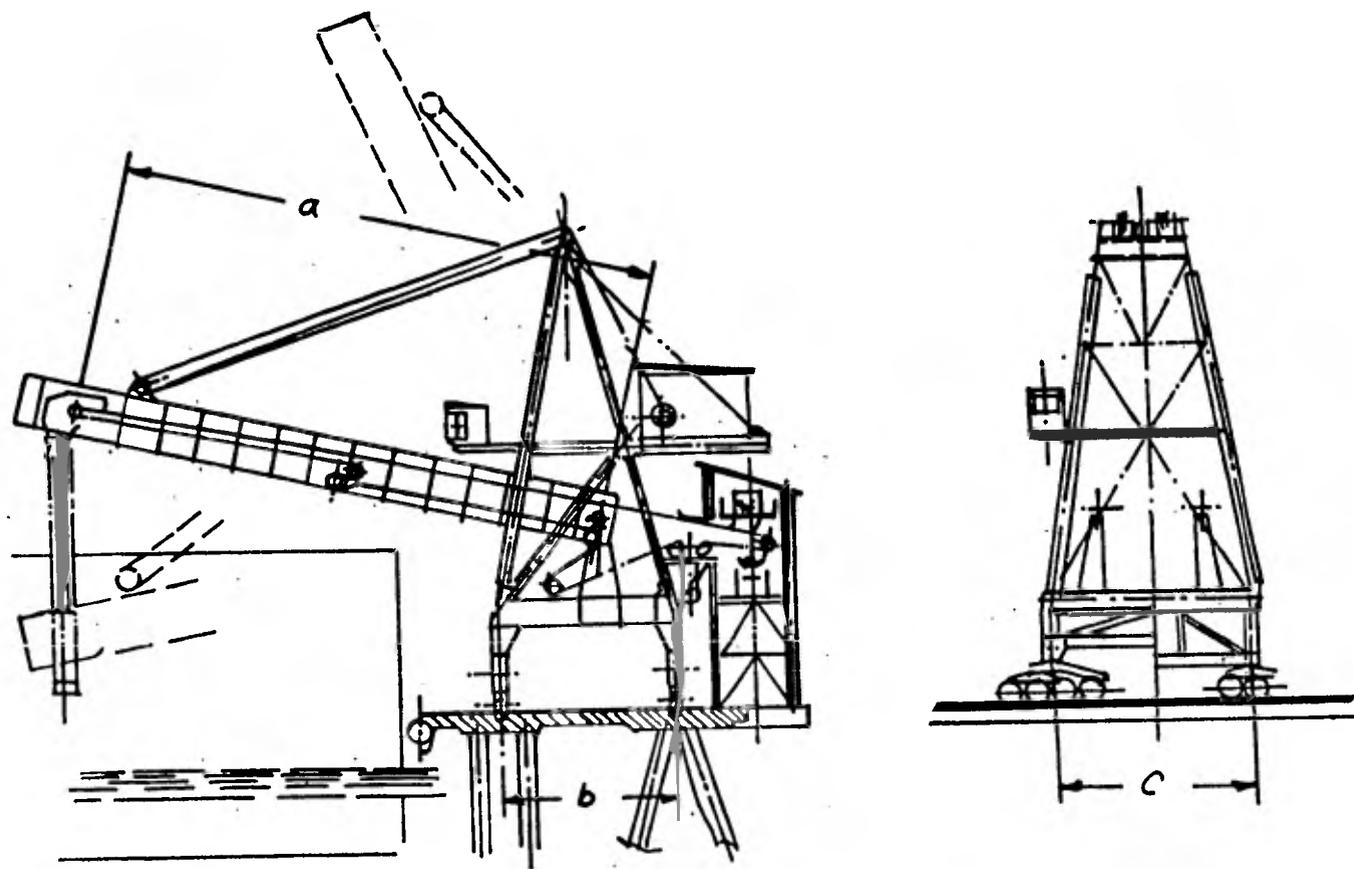
b) METODO WINDROW.- Cuando se forman las capas horizontales por hileras sucesivas, se aplica el método Windrow, que dise-  
mina en la pila la piedra gruesa, que en el caso del método  
Chevrón se encontrará junto al suelo. Según aumenta el número  
de hileras disminuirá la segregación, que tiene lugar durante  
la posición del material. Pero el apilado se vuelve oneroso  
en cuanto al consumo de energía y en horas de trabajo del ope-  
rador, a causa de las diferentes líneas de cresta que exige.

Existen recursos como el apilador alternado, que exigen un  
desplazamiento en vaivén de la punta de lanza en cada reco-  
rrido, pero no suelen compensar el tiempo y la energía que en  
ellos se invierte. Una solución intermedia y de buena acepta-  
ción, resultante de la combinación de los dos métodos chevrón  
y windrow, proporciona secciones transversales con menor gra-  
do de segregación.

Ambos apilados se pueden realizar a cielo abierto o bajo cu-  
bierta, según lo exijan las condiciones climatológicas del lu-  
gar.



**FIG 1.- APILADO LONGITUDINAL**



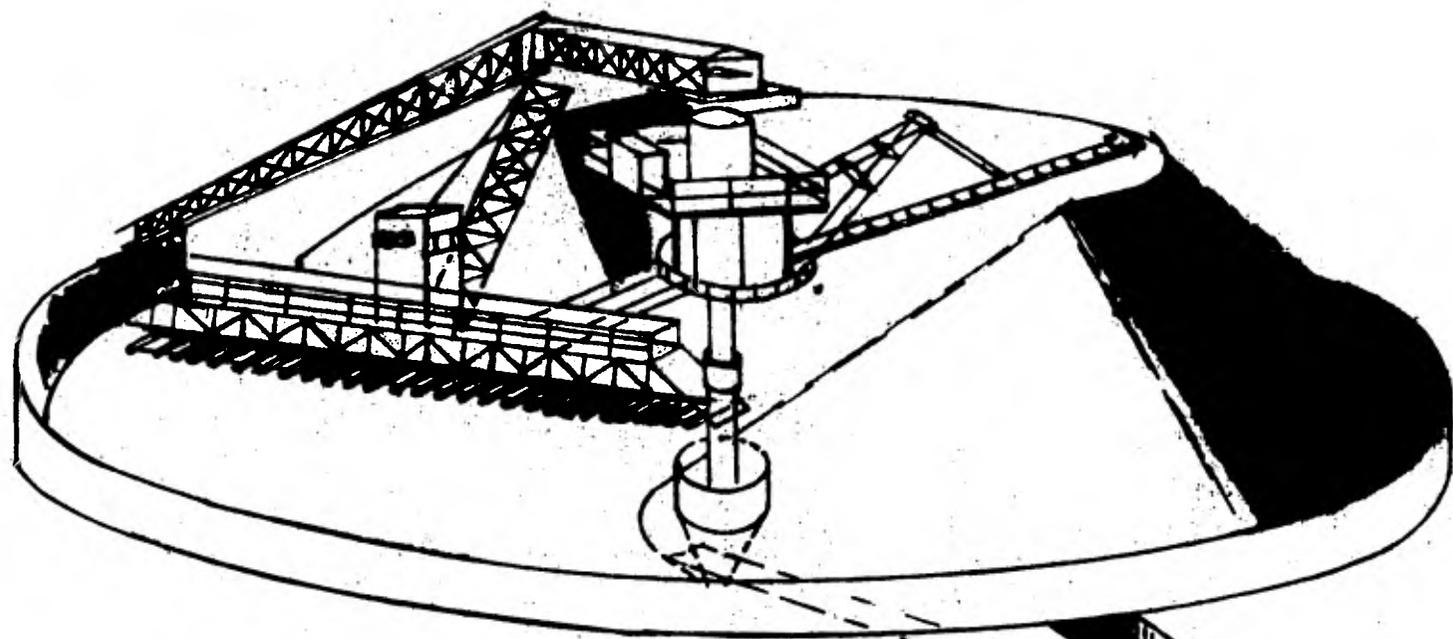
*Fig. 2*  
**ESTRUCTURA CARACTERISTICA DE LAS APILADORAS QUE DESPLAZAN SOBRE CARRILES RECTOS**

### 3.2.2.- APILADO CIRCULAR.

En fábricas de cemento situadas en las cercanías de un perímetro urbano, donde los terrenos están altamente valorizados, es frecuentemente optar por el apilado en arco, bien sea a cielo abierto en climas secos, o bien bajo cubierta. La apiladora de lanza y la desapiladora rascadora giran ambas alrededor de una torre central de apoyo, que también lleva el alimentador de la tolva subterráneo, que sirve al transportador de la descarga. El alimentador situado en el subsuelo, podrá ser helicoidal o de cinta. Entre la tolva y el transportador de la alimentación, a cargo de la desapiladora, vierte rítmicamente por medio de vibraciones electromagnéticas.

En el apilado circular bajo cubierta, la estructura recomendable es una cúpula, o domo, provista de una abertura superior, por donde penetra el transportador que alimenta la apiladora. El transportador, según la granulometría del material, podrá ser una cinta o una tubería neumática. La apiladora, ya mencionada, será adaptable a una de esas soluciones y dará continuidad al flujo mientras gira alrededor del eje de simetría de la cúpula. Se puede decir, que hay un gran número de apiladoras para instalar bajo cúpula. Son capaces de formar dos, y aún 3 pilas, en arco de círculo, bien sea por el método chevrón, o por el método de fajas laterales. En las instalaciones para caliza, el transportador suele ser de cinta, girando alrededor de la suspensión central mientras disminuye la grava.

En el desapilado de la tolva inferior, recibirá de la desapiladora-rascadora, la mezcla prehomogeneizada y la conducirá al transportador subterráneo. Sin embargo, aquí la desapiladora está obligatoriamente dotada de filtros de sacos o de mangas junto a la columna central. En este caso la apiladora



*Fig 3.*  
*APILADO CIRCULAR A CIELO ABIERTO.*  
*DETALLE DE LA DISPOSICION DEL MATERIAL*

y la rascadora, funcionarán automáticamente sin estar sincronizadas o dependencia entre ellas.

El apilado en arco de círculo también podrá realizarse mediante apiladora-desapiladora, provista de lanza con pala rotativa de cuchara, popularizada con el nombre de Stacker-Reclaimer. Para funcionar como apiladora, la pala rotativa se despalza a uno de los lados de la lanza, con el auxilio de un motor proyectado para este fin. En la punta de la lanza ya despejada se monta una tolva para conectar el chorro de caliza que vierte el transportador de cinta, sirviendo a la rueda de cucharones. Sin embargo, en las fábricas de cemento portland, la preferencia por estos equipos, se inclina tan solo a su empleo como recogedor.

### 3.2.3.- DESAPILADO LONGITUDINAL.

El desapilado longitudinal, como también el apilado se podrá efectuar con la recogedora-rascadora, apoyada en una de sus extremidades quedando la otra suspendida por un cable de acero, que le permite diferentes ángulos de ataque.

No obstante, el desapilado más en boga es el que se efectúa con una rascadora montada sobre un puente rodante, sobre el cual se puede deslizar en una y otra dirección.

El puente rodante que sirve de soporte, por su parte se apoya por ambos extremos sobre carros provistos de ruedas que se desplazan sobre carriles de perfil especial. Un armazón en forma de rejilla, construido con cables de acero y perfiles del mismo metal, se fija en el frente de ataque de la desapiladora. La rejilla forma un ángulo de igual magnitud al ángulo del reposo del material apilado. Su función es doble. No tan solo reduce el resbalamiento del agregado sobre el cual avanza, sino que también lo conduce para que se deslice hasta la base del puente rodante, donde será recogido por una cade-

na arrastradora o por un tapiz rodante con este fin. La desapiladora-rascadora de dicho tipo, opera con calizas de una granu- lometría comprendida entre 0 mm y 100 mm y a razón de 1000 tons/ hora. En instalaciones a cielo abierto la cadena o la cinta transportadora discurren por abajo del suelo, siendo alimenta- das por una de las extremidades del puente.

En puentes semejantes a los descritos, la recogedora podrá es- tar construída por una o dos palas rotativas de cucharas, gi- rando dentro de la rejilla y devastando la pila de abajo a arriba.

La grava así desmontada se vierte en la cinta transportado- ra, que corre por la parte superior del puenté y alimenta otras cintas o tapices rodantes para extracción de la recolecta. La rejilla está provista de un ajuste y las cucharas pueden ocu- par una posición inversa con el puente desplazándose en uno y otro sentido. Los fabricantes ofrecen capacidades de hasta 500 tons/hora.

Por el muestreo de la piedra apilada en la prehomogeneización, se puede conocer su contenido de calcita y húmedad. Desapilada mecánicamente sigue por un transportador de cinta hasta la na- ve de molienda de crudo, después de haber recibido las adicio- nes necesarias de sus correspondientes silos o tolvas. La mo- lienda y el secado simultáneos de la mezcla de materiales ca- lizos, arcillosos, etc., tiene lugar en molinos barridos por gases calientes, recuperados del precalentador del horno rota- torio.

La pala rotativa de cucharas, montada en punta de lanza, que se une a la reja de desmonte de pila, también se usa en fábri- cas de pequeña envergadura. Este tipo de desapiladora tiene movimientos limitados en sentido lateral.

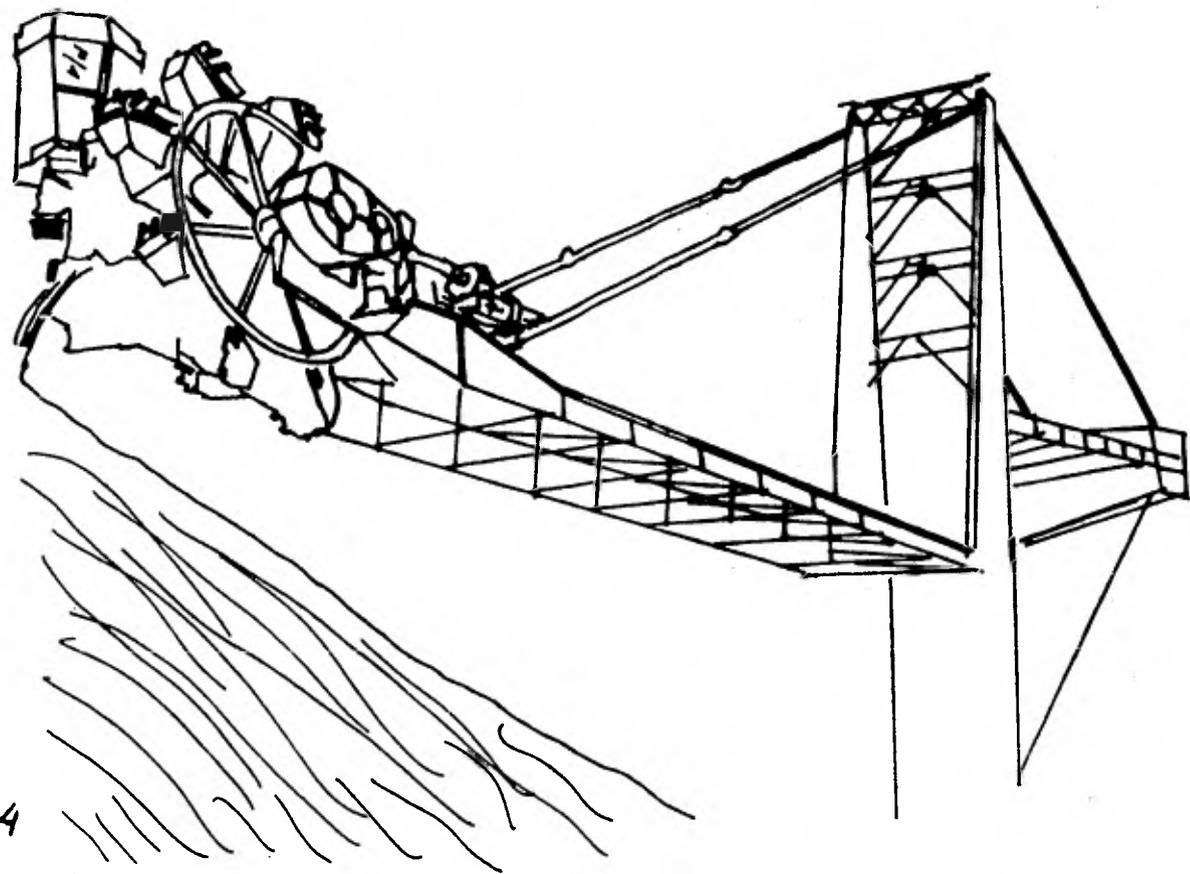


Fig. 4

APILADORA-DESAPILADORA, CON LANZA ROTATIVA DE CUCHARAS.

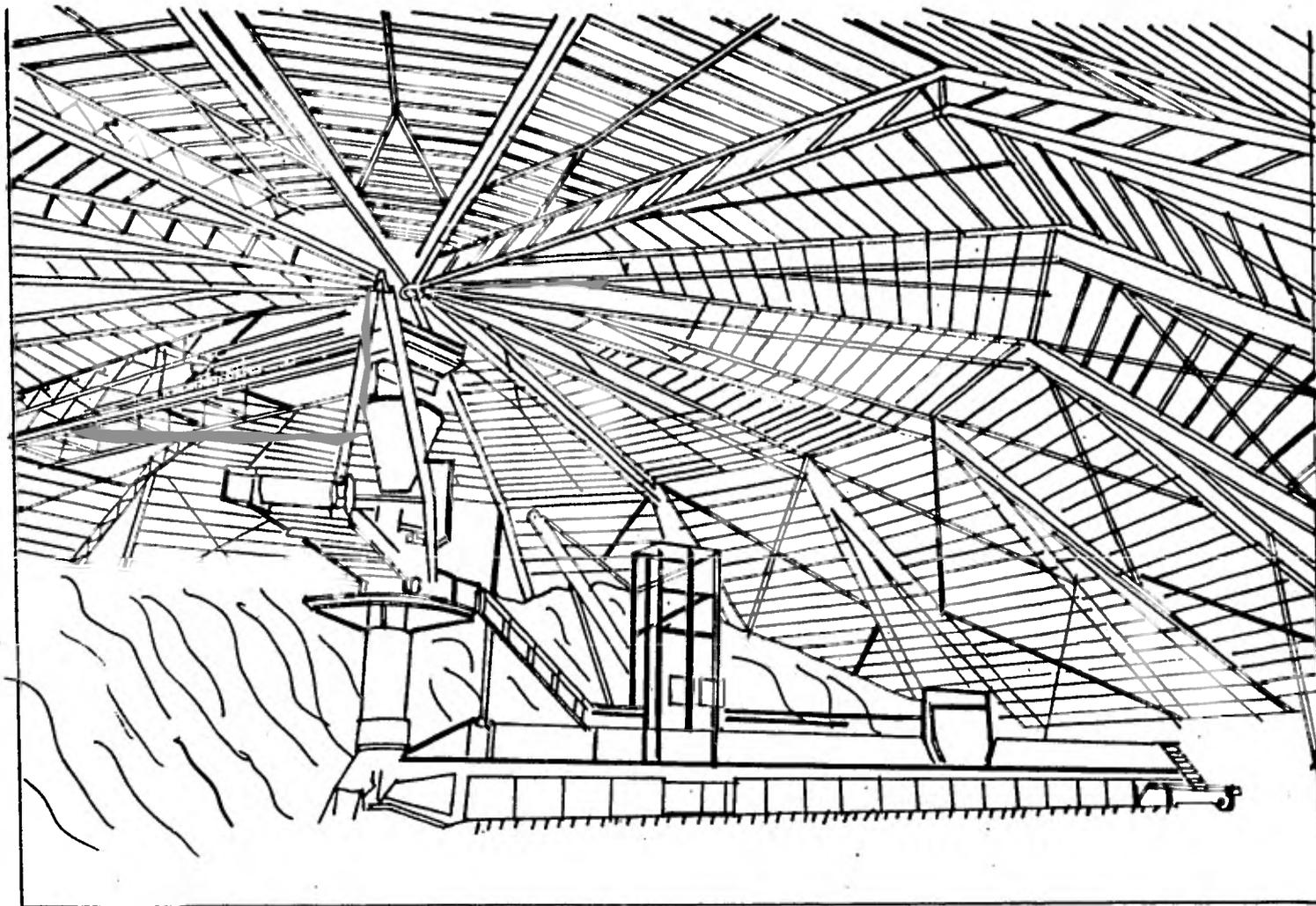


Fig. 5

DESAPILADORA DE LANZA, CON PALA DE CUCHARAS Y RECORRIDO LONGITUINAL, FUNCIONANDO BAJO CUBIERTA,

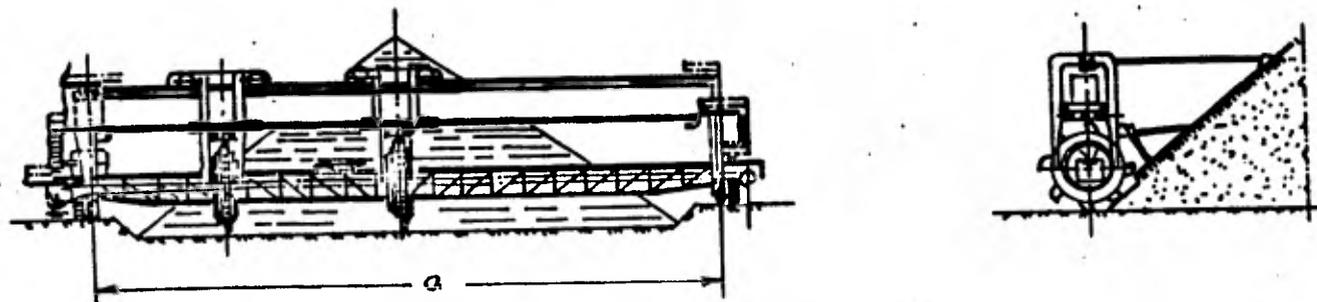
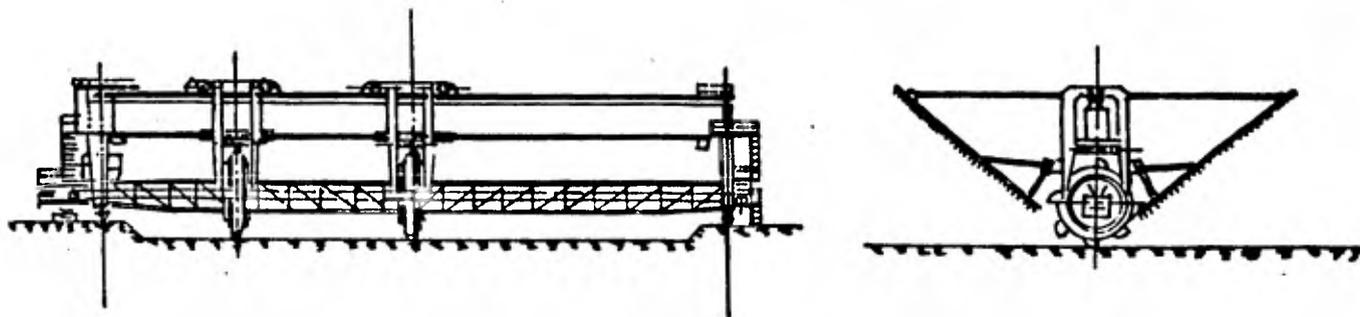


Fig. 6  
DESAPILADORA SENCILLA SOBRE PUENTE RODANTE  
CON PALAS ROTATIVAS DE CUCHARAS, FUNCIONANDO A CIE  
LO ABIERTO.



*Fig.- 7*

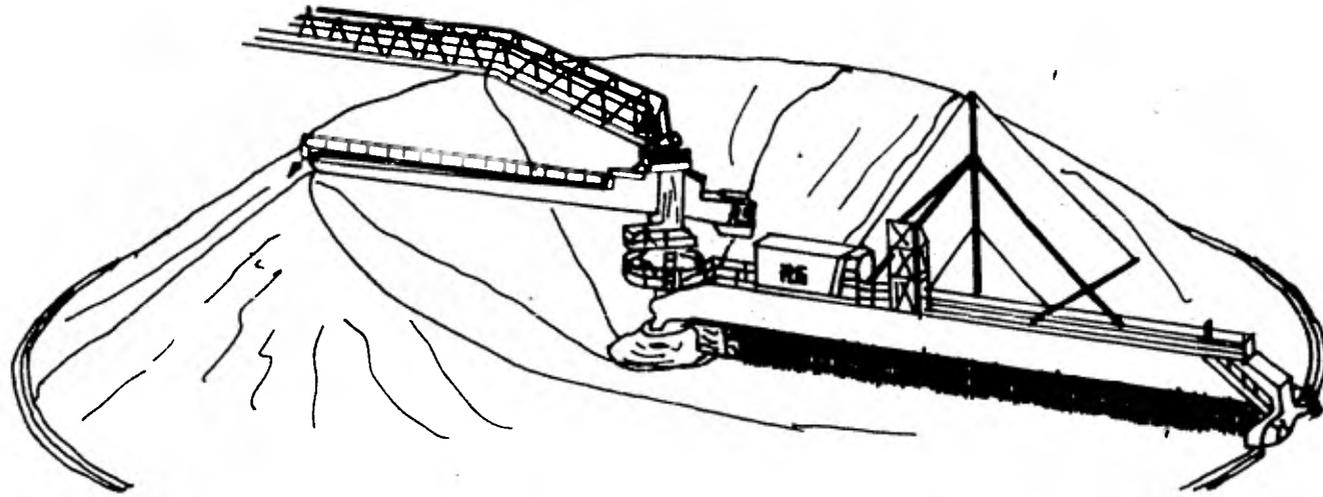
*DESAPILADORA DOBLE SOBRE PUENTE RODANTE  
CON PALAS ROTATIVAS DE CUCCHARAS, FUNCIONANDO A  
CIELO ABIERTO.*

### 3.2.4.- DESAPILADO CIRCULAR.

En el desapilado en arco de círculo, la desapiladora-rascadora y la apiladora giran ambas alrededor de la torre central de apoyo.

Si la desapiladora es de lanza, con la pala rotatoria de cucharas, esta última girará a 7 rpm. y lanzará el material recogido sobre la caja de alimentación de la cinta transportadora la cual a su vez, la descargará en la tolva central alimentadora de los transportadores que deben conducirlo a su destino. La rueda de cucharas siempre exige contrapeso en el ástil opuesto, y en montajes de gran envergadura el operador está en una cabina de mandos o controles en lo alto, donde se agrupa el control eléctrico, transformadores, relés, central de aire comprimido, central hidráulica, pánéles de conexiones eléctricas, etc., que exigen un apreciable consumo de energía eléctrica.

En el plano clásico de situación de las modernas fábricas de cemento, el sistema transportador alimentado por la desapiladora termina siempre por descargar la caliza prehomogeneizada en lo alto de los silos de carbonatos. Otro tanto sucederá con la arcilla seca, con el mineral de fierro, con la arena finamente molida y según el tipo de cemento que se produzca con la escoria granulada de altos hornos, con las cenizas volantes y con las adiciones menores recomendadas para el crudo. Cada uno de estos componentes tendrá su propio silo, mayor o menor; según necesidades, servido por un elevador de cangilones o por transporte neumático. Los silos descargarán en alimentadores de control gravimétrico del flujo. Estos alimentadores verterán el componente propio sobre una gran cinta transportadora de la mezcla cruda que alimentará al molino.



*Fig 8 APILADO CIRCULAR A CIELO ABIERTO. DETALLE DE LA DESCARGA, DETALLE DEL MATERIAL DESAPILADO.*

#### 4.- METODOS DE HOMOGENEIZACION.

Desde hace tiempo se sabe que los sólidos finamente molidos, cuando se sumergen en corrientes de aire de baja presión, adquieren características hidráulicas. Fluyen entonces sin sedimentación sensible en el interior de los aerodeslizadores y no se estratifican, aunque sean en grandes recipientes con tal que la corriente de aire les sea suministrada de un modo continuo y uniforme; sin necesitar así la agitación mecánica, onerosa en consumo de energía y en la reposición de piezas móviles desgastadas.

El elemento básico del proceso de homogeneización neumática es la caja de aireamiento, fig. No. 9. Se construye de hierro fundido y es revestida de lona porosa o de otro textil, habiendo también de material cerámico poroso. El diámetro de los poros oscila entre 70 a 90 micras.

El componente ppal. de las cajas de dispersión de aire son las placas cerámicas porosas. Estas tienen unas dimensiones de 250 por 250 - hasta 400 mm para espesores de 20 a 30 mm.

El diámetro de los poros ofrecen una permeabilidad de  $0.5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ min}$ , la resistencia a la tracción de las placas cerámicas es de  $40 \text{ kg}/\text{cm}^2$  y a la compresión  $60 \text{ kg}/\text{cm}^2$ . También se han fabricado placas microporosas de metales fundidos. De composiciones diversas, y se han informado acerca de variedades de aireación compuestas por dos capas de material cerámico. Estos bloques de dos capas no necesitan bastidores, pueden colocarse a presión directamente sobre concreto fresco, que forma el fondo de los silos; en todos los casos, los bloques de dos capas de cajas de aireamiento han de estar provistas de tuberías para aire a presión, estas consisten en conexiones en "T" que van entre una caja y otra que llenen el compartimiento de debajo del cuerpo poroso para atravesarlo con presiones neumáticas entre 0.2 y 0.8 atm.

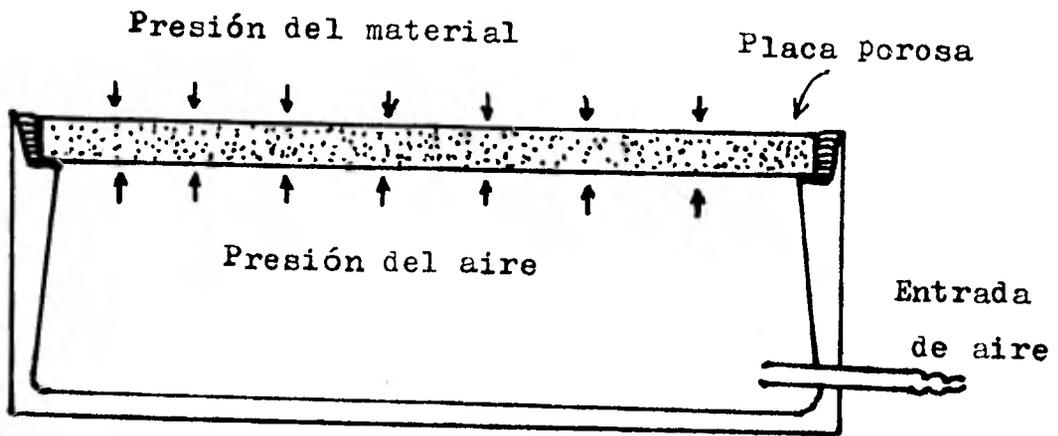


fig. No. 9. Caja de aireación

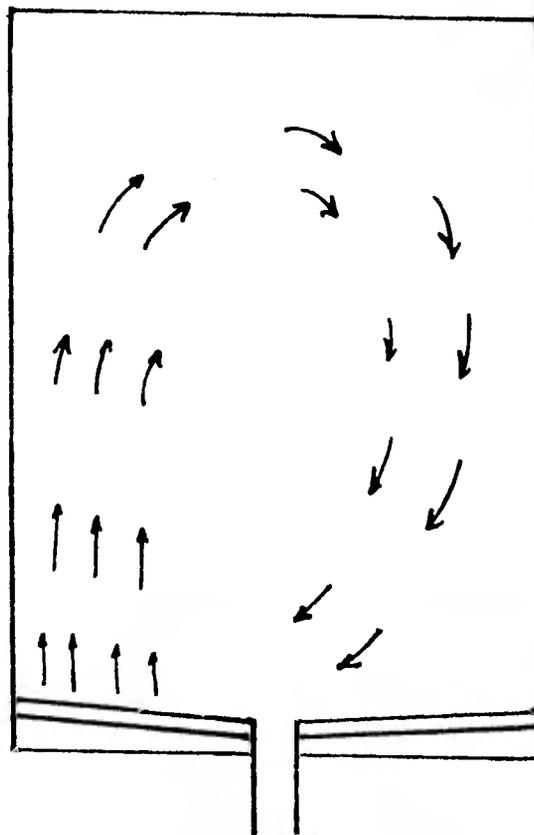


fig. No. 10. Silo de homogeneización que muestra las corrientes que se forman al airear una parte.

La permeabilidad de la caja regula el consumo de aire comprimido, que va de 0.3 a 3.0 m<sup>3</sup>/min. Por m<sup>2</sup> de fondo de silo.

Estas cajas se colocan en el fondo de un silo cilíndrico como se ve en la fig. No.10. El aire comprimido se ve forzado a pasar por la masa de polvo y aire con propiedades fluentes, capaz de asegurar también la descarga por gravedad a los silos de almacenamiento, sin abovedamientos ni obstrucciones de cualquier tipo.

Suponiendo que el fondo del silo, forrado con dichas cajas se encuentra dividido en cuadrantes, de los cuales tres reciben aire a presión de 1.6 kg/cm<sup>2</sup> y el cuadrante activado recibirá aire de homogeneización de 2.2 kg/cm<sup>2</sup>. Entonces la columna de polvo que está encima del cuadrante activado se volverá menos densa y subirá; al mismo tiempo, las columnas sobre los cuadrantes restantes, más densas, tenderán a bajar y ocupar los espacios ocupados por la columna activada. Repitiéndose esta operación los cuatro cuadrantes del fondo del silo, la circulación vertical proporcionará un alto grado de fluidificación y de homogeneización a costa de una cantidad mínima de aire insuflado. En la práctica moderna, el cuadrante activado recibe el aire comprimido en pulsaciones para mejor rendimiento del sistema.

Este proceso desarrollado originalmente por Fuller Company bajo el nombre Air Merge, ha sufrido algunas variaciones por parte de Polysius, Muller y otros que dividen el fondo del silo en zonas, polígonos, etc. Estos procesos se han desarrollado en los últimos veinte años.

#### 4.1.- PROCESO FULLER.

También se le conoce con el nombre de Sistema por Cuadrante. En este caso, las cajas de dispersión en el fondo del silo, están reunidas en cuadrantes de los cuales cada uno de la serie actúa como cuadrante de mezcla según cierta secuencia,

mientras que los otros tres lo hacen como cuadrantes de aireación. El volumen de aire para la mezcla alcanza un 75%, mientras que para aireación es el 25% del aire total que suma entre 15 y 20 m<sup>3</sup> por tonelada de crudo.

El material forma una columna muy aireada y de poca densidad por encima del cuadrante de mezcla; el material sobre los cuadrantes de aireación más denso penetra constantemente en la columna de material ligero y lo desplaza hacia arriba, con lo cual se establece una circulación vertical y permanente del material.

Cada cuadrante se alimenta con aire para mezcla a intervalos de tiempo previamente fijados, con lo que se alcanza una homogeneización casi perfecta del crudo.

A veces, por causa de las propiedades del crudo es más ventajoso introducir el aire de mezcla por pulsaciones en vez de hacerlo de modo continuo; introduciendo el aire de esa manera se consigue un grado de fluidificación más alta y mejor movilidad en el crudo para la misma cantidad de aire. La pulsación suministra una distribución del aire más amplia y regular.

La energía eléctrica y aire para la homogeneización del crudo, dependen de las fluctuaciones de la composición a la entrada del sistema, así como del valor deseado. Estos factores prolongan o acortan el tiempo de mezcla y el caudal de aire necesario.

Las desviaciones al valor correcto fijado como contenido de carbonato de calcio en función del tiempo de mezcla se ven presentados en la figura No.11.

La tendencia actual consiste en realizar una amplia prehomogeneización de los componentes del crudo, lo que reduce las fluctuaciones de la composición de aquél en la entrada a homogeneización. La mayoría de las veces se toma el % de CaCo<sub>3</sub>

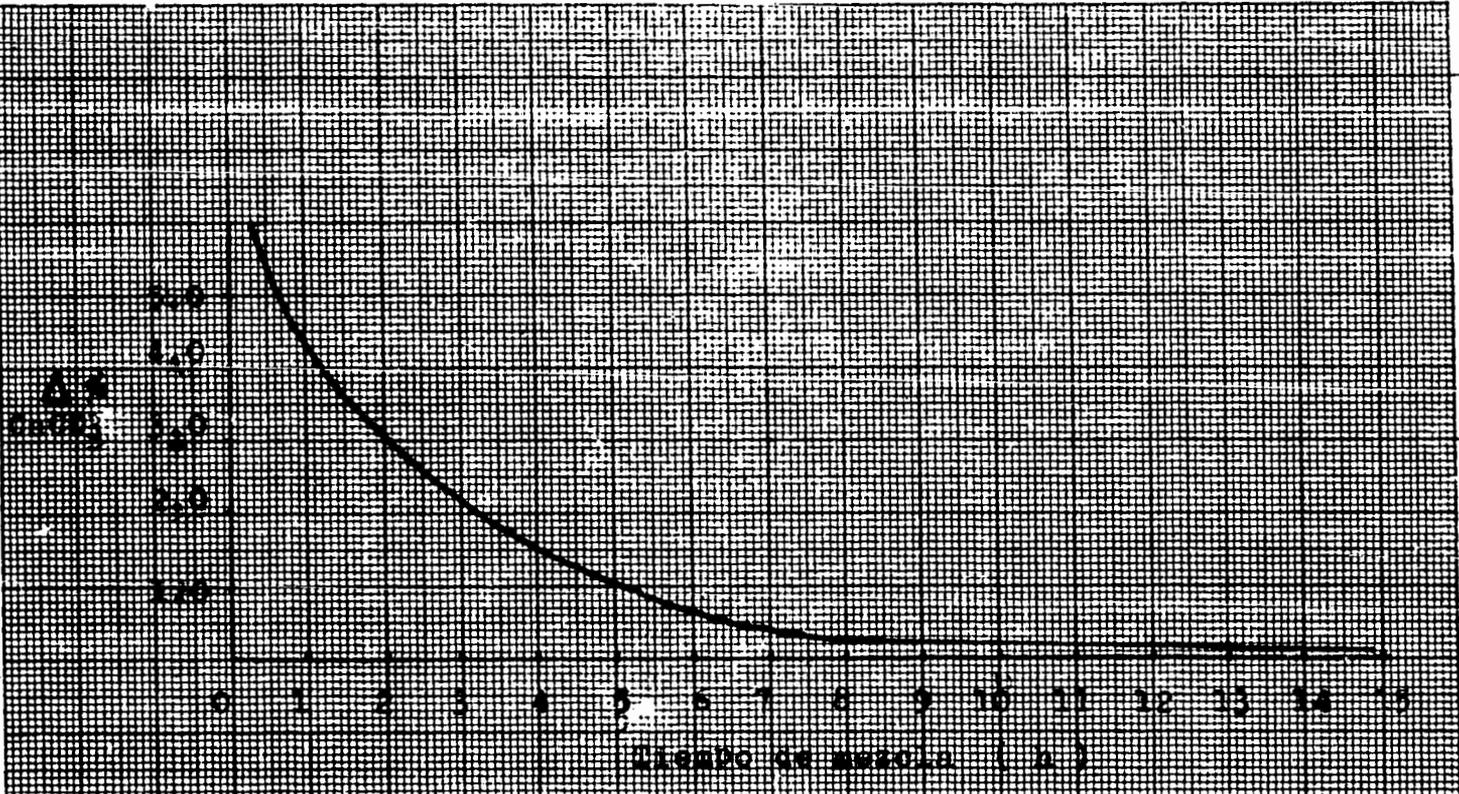


Fig. No. 11. Disminución de la concentración de  $\text{CaCO}_3$  del valor promedio fijado, dentro al tiempo de mezcla.

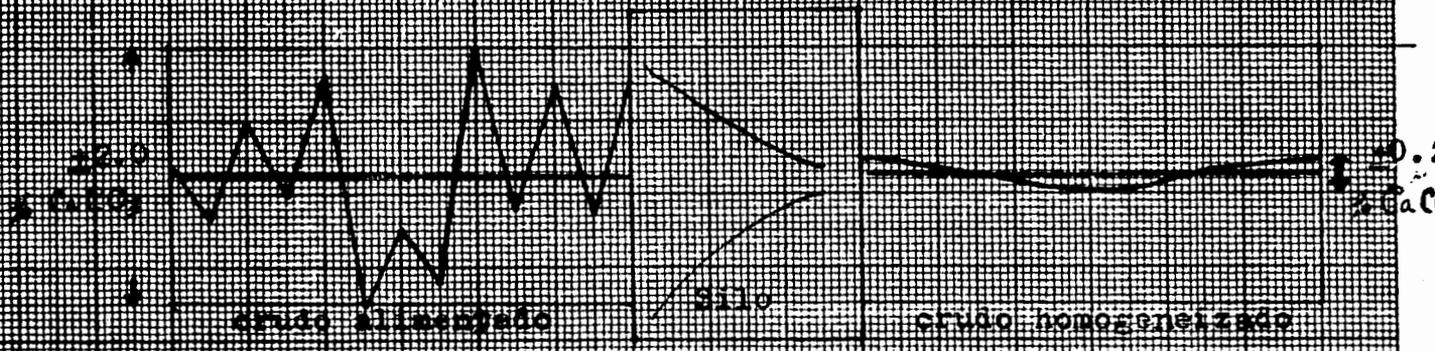


Fig. No. 12. Fluctuaciones en el contenido de  $\text{CaCO}_3$  antes y después de la homogeneización.

como indicador. Con el sistema de cuadrantes es posible rebajar osilaciones del  $\text{CaCO}_3$  en el crudo, desde  $m^+ 2\%$  hasta  $\pm 0.2\%$  como se representa en la figura No.12 .

El aire necesario para la homogeneización es de 15 a 20  $\text{m}^3$ /ton de crudo, variando con el tamaño y la altura del silo de mezclas es de 2 a 2.2  $\text{kg}/\text{cm}^2$ , el aire de aireación tiene una presión de 1.6  $\text{kg}/\text{cm}^2$ .

Este sistema se puede usar por lotes o contínuo. Para la homogeneización por lotes se necesitan dos silo, uno de ellos se utiliza pra homogeneizar el crudo de llegada, mientas que el contenido homogeneizado del otro silo se vacía en un silo almacén con la alimentación del horno. La operación comienza durante el acceso del crudo al silo de mezcla, después de llenado éste, la operación continúa durante una hora; el tiempo de llenado de un silo y su capacidad corresponde a la producción de los molinos del crudo de 6 a 12 horas. En el proyecto de nuevas plantas se han de considerar las previsibles variaciones en la composición del crudo así como la capacidad de la molienda del crudo; los mayores silos de homogeneización conocidos, tienen capacidad de 3,300 tons de crudo.

La disposición de construcción recientemente introducida que instala los silos de mezcla encima del silo almacén, acorta de manera importante el tiempo de vaciado de los silos de mezcla.

La homogeneización contínua se puede realizar en un solo silo; la característica de este método estriba en la salida del silo de mezcla, por "Derrame" del crudo homogeneizado, para ello la pared del silo tiene un orificio para la salida que funciona como tal, a través de ella sale tanto crudo homogeneizado, como material nuevo entra al silo, el cual desplaza al material que se descarga.

También es posible la homogeneización contínua con dos silos de mezcla conectados en serie, procedimiento que se representa en la figura No.13 .

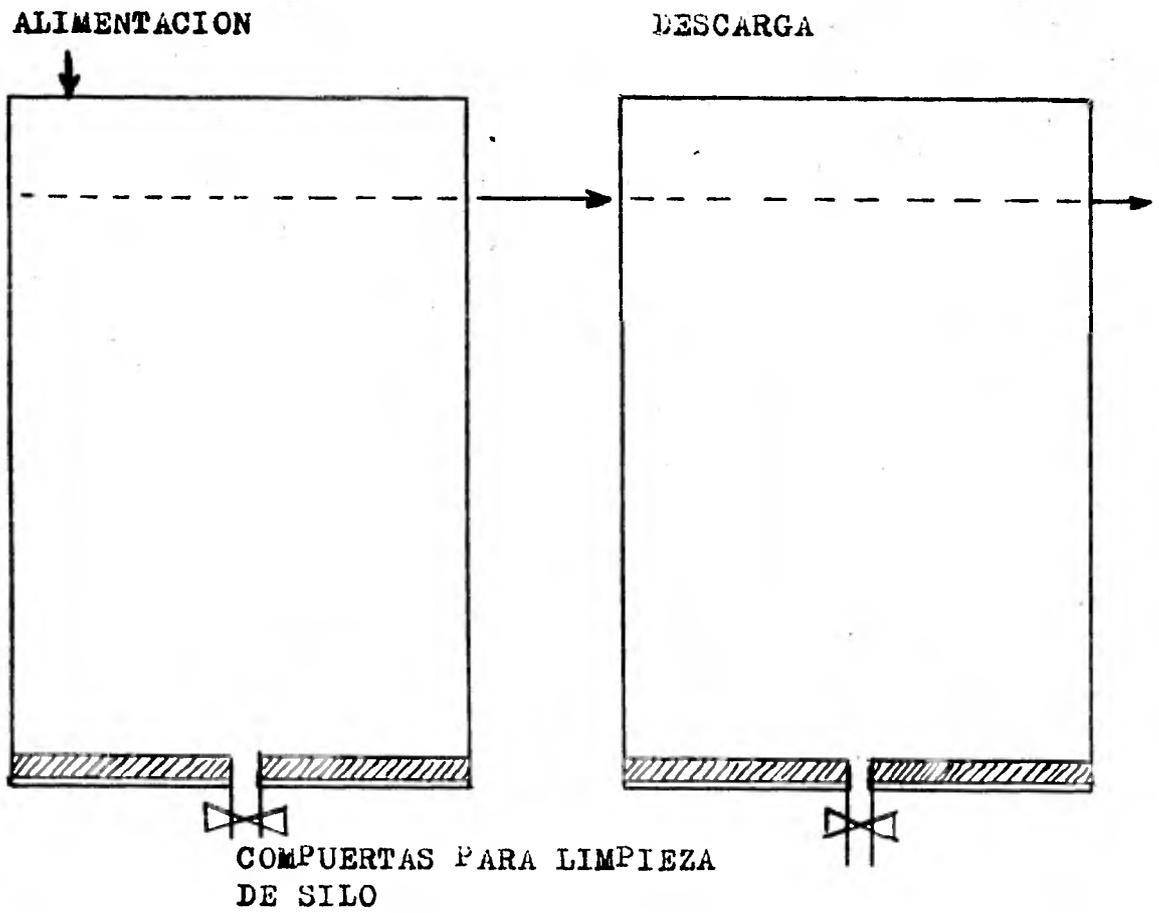


FIG. NO. 13

DOS SILOS DE MEZCLA EN SERIE PARA HOMOGENEIZACION CONTINUA

En caso de grandes fluctuaciones de calidad se utilizan hasta tres silos conectados en serie; con condiciones normales con tres silos de mezcla apenas se consigue mejor homogeneización que con dos silos.

La homogeneización por lotes se aplica cuando las desviaciones del material varían dentro de límites alejados y son de ciclo temporal largo, si se ha de aplicar la homogeneización continua, las oscilaciones deben ser pequeñas y de ciclo temporal corto, lo cual equivale a decir que la homogeneización continua es más apropiada para material ya prehomogeneizado.

La homogeneización por aire por cuadrantes, se puede realizar en silos de cualquier diámetro, pero teniendo en cuenta que la altura del silo debe ser entre 1 y 1.5 veces el valor del diámetro.

Es muy usual el silo de 12 m de diámetro y 17 m de altura, las dimensiones para grandes producciones son de 14 m de diámetros y 18 m de altura.

Las paredes de concreto armado de los silos de homogeneización tienen de 30 a 45 cm de espesor. Se prefieren los silos de fondo plano porque garantizan una distribución más regular del aire; en los silos de fondo inclinado, el aire se difunde en forma irregular ya que en las puntas el espesor de la capa de material es menor y el exceso de aire corre por el canal que se establece en tales puntas y queda menor disposición de aire en las partes en que las cajas de dispersión del aire están cubiertas con una mayor columna de material.

#### 4.2.- PROCESO POLYSIUS

Este proceso consiste básicamente en sectores, figura 14. Se airean simultáneamente dos sectores opuestos diametralmente y un campo circular en el centro del fondo del silo (1) y (3). El campo circular (5) está constantemente aireado, du-

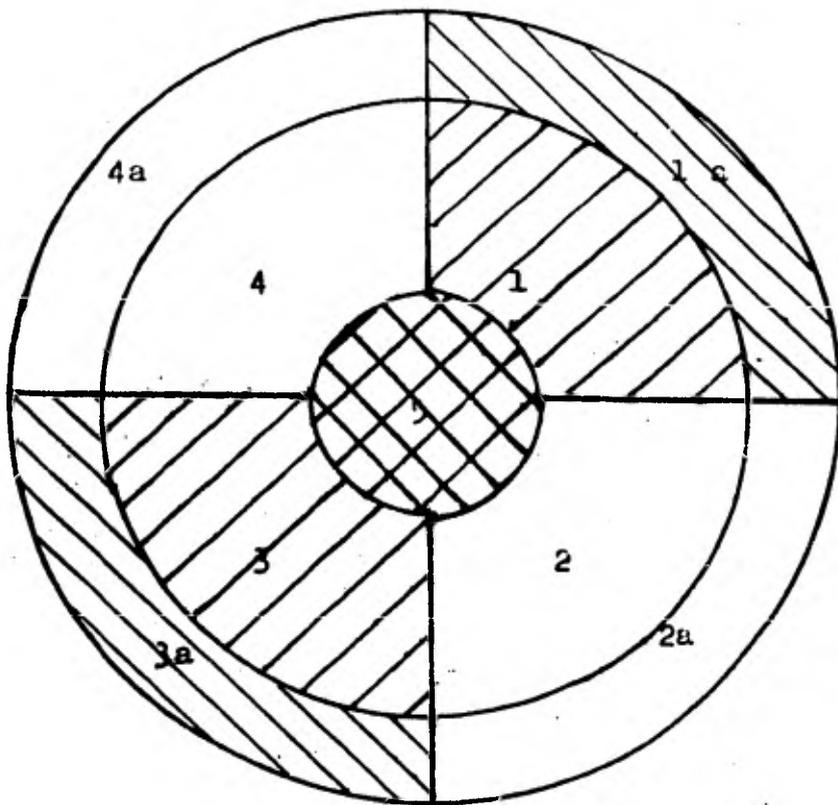


FIG. No. 14 AIRACION POLYSIUS DE FONDO DE SILO

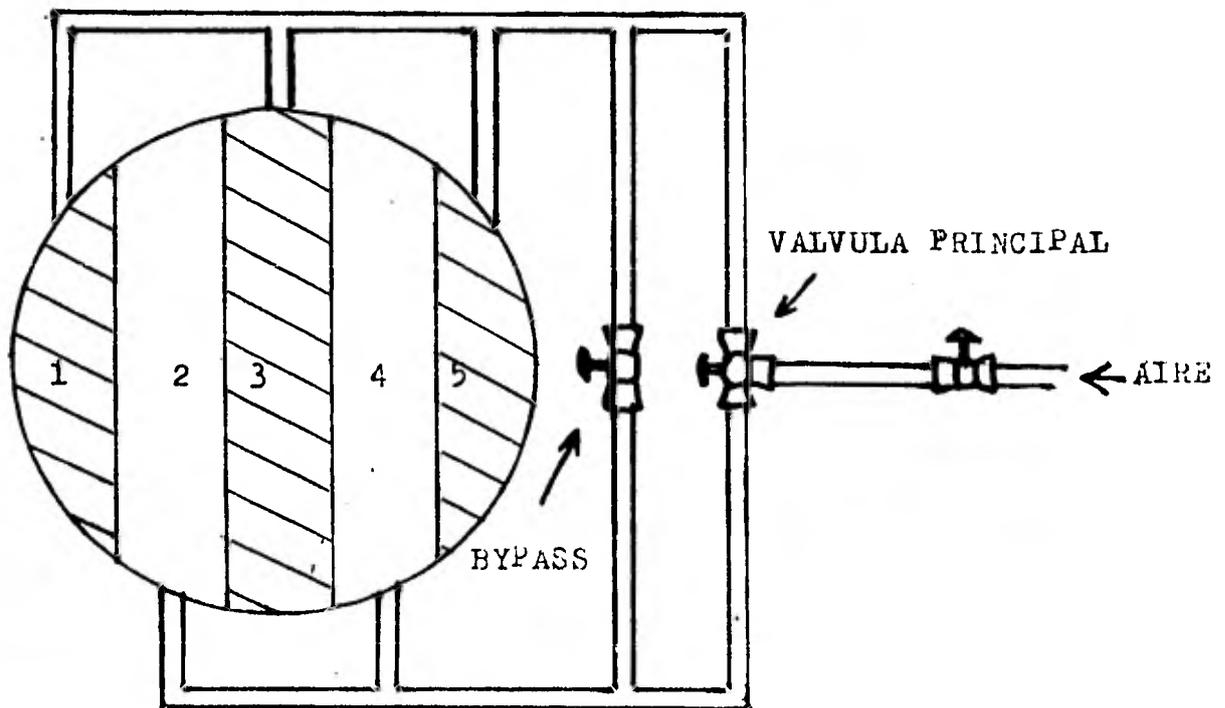


FIG. No. 15 AIRACION DEL FONDO DE SILO POR FRANJAS

rante ese tiempo, al resto de los sectores no se les da aire; después de un intervalo de tiempo preestablecido se conectan los sectores 2 y 4. Este sistema está subdividido en 9 campos de aireación que pueden alimentarse con diferentes cantidades de aire.

#### 4.3.- PROCESO POR FRANJAS.

En este caso, la superficie del fondo del silo de mezcla está dividido en cinco franjas de mezcla.

Las franjas 1, 3 y 5, así como las 2 y 4 forman dos grupos cada uno de los cuales representa el 50% de la superficie de aireación. A ambos grupos se les airea alternativamente en forma automática, de este modo la mitad del silo permanece siempre inactiva, la aireación alternada genera un desplazamiento constante del material contenido del silo y por ello se produce la homogeneización.

#### 4.4.- PROCESO GEISER.

Este sistema funciona de modo parecido al de las franjas, sólo que en este caso el fondo del silo está dividido en cinco anillos concéntricos circulares, como se presenta en la figura No 16.

La operación con aire de mezcla y de aireación para soplar las partículas de crudo, se efectúa aireando alternativamente dos grupos de franjas, el 1, 3 y 5; y el 2 y 4, generando un movimiento constante de material dentro del silo.

#### 4.5.- PROCESO MOLLER DE CORRIENTE EN CIZALLA.

Este sistema consiste en subdividir el fondo del silo en cuatro campos de aireación, en todo momento sólo uno de los campos dispuestos a la periferia del silo está siendo aireada de modo intenso; en este intervalo el resto de los campos está siendo aireado, sólo para soltar las partículas del cru

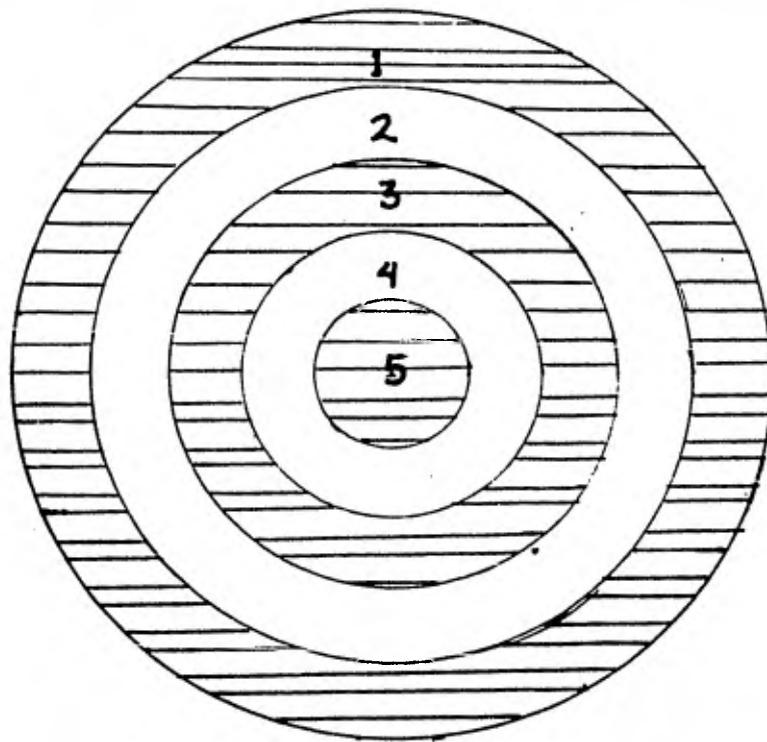


FIG. no. 16 AIREACION DE FONDO DE SILO POR ANILLOS

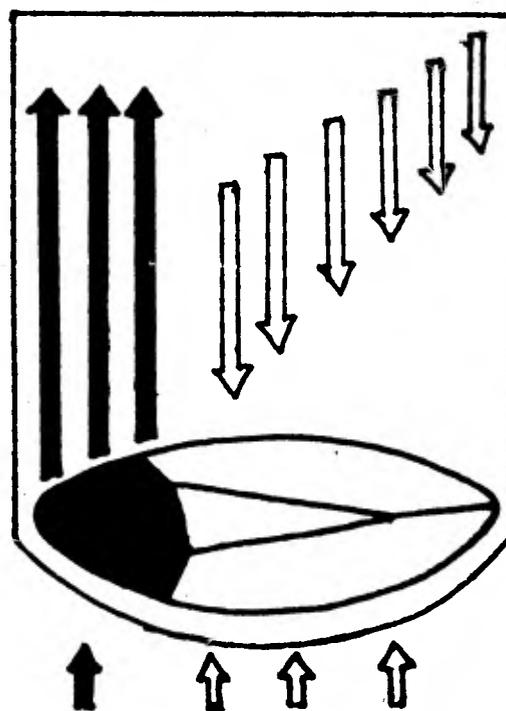


FIG. NO. 17 AIREACION DE FONDO DE SILO POR CORRIENTES CORTANTES

do. Esto origina un movimiento turbulento de la mezcla de crudo aire, de modo que se crea un movimiento en cizalla dirigido hacia abajo en el resto de los campos. El modo de actuar de este proceso de homogeneización se ve en la figura No 17.

#### 4.6.-SISTEMA IBAU DE CAMARA CENTRAL.

Este proceso continuo de mezcla, utiliza los silos simultáneamente como depósito para alimentación de crudo y homogeneización. La mezcla es realizada en el vaciado de tal modo, que los estratos formados por ingreso en el silo de material molido, fluyen juntos unos con otros a modo de trombas y con ello se mezclan.

Seis ó hasta ocho secciones del fondo del silo (6) son aireadas unas a continuación de otras y simultáneamente es abierta la correspondiente válvula dosificadora (4) para la salida del material. Esta ordenación de la operación es realizada, según intervalos de tiempo preestablecidos, para lograr que el proceso de mezcla y vaciado ocurra de manera regular en la totalidad de la sección del silo.

Un soplador de pistón rotatorio (5) genera el aire de fluidización. La exigencia de energía es de 0.1 a 0.2 kwh/ton de crudo.

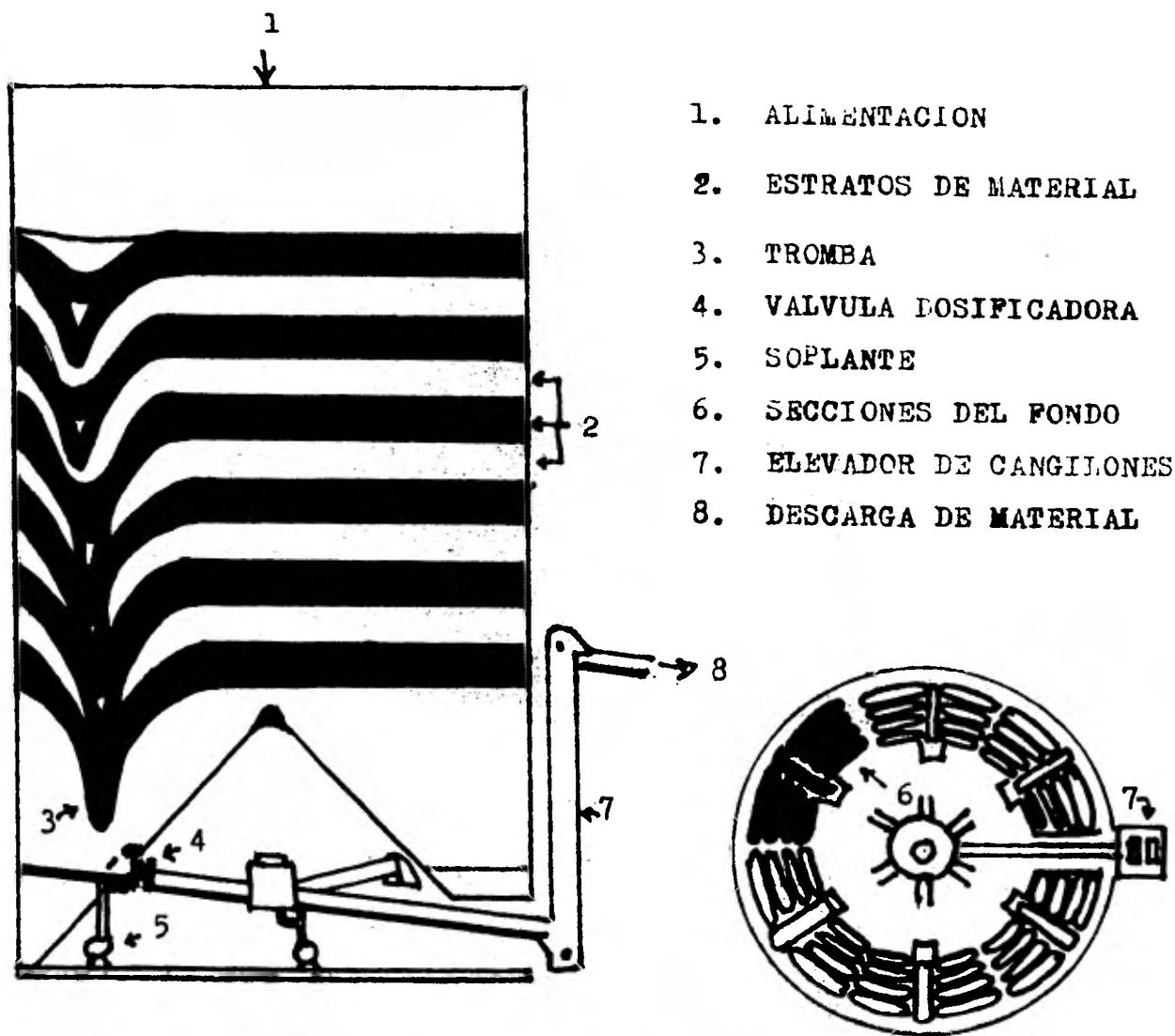


FIG. 18 ESQUEMA DEL SILO DE CAMARA CENTRAL IBAU

## 5.- EXPRESIONES MATEMATICAS USADAS EN LA HOMOGENEIZACION.

Existen dos criterios para medir la falta de homogeneidad de una mezcla de polvo, que presentan un fundamento matemático aceptable. Las demás constituyen expresiones numéricas empíricas de operación aplicada al arte de la mezcla.

Los criterios aceptables se llaman respectivamente, procedimiento del desvío máximo y proceso del desvío patrón.

### a) PROCESO DEL DESVIO MAXIMO.

Es el más antiguo de los dos y parece se desarrolló en Estados Unidos para su aplicación en la agitación intermitente, entonces en boga; posteriormente se extendió al control de la homogeneización continua, en silos, funcionando por rebosamiento.

Al tratar del crudo del cemento portland, el desvío se comprobará en relación a un valor medio del porcentaje de CaO a mantenerse. Este porcentaje se fija ante el análisis de clinker resultante; en estas condiciones la práctica enseña que el desvío no podrá ser mayor de  $\pm 0.2\%$  de CaO. Este proceso no exige técnicas estadísticas, como los demás criterios modernos de control tecnológico, se funda en un determinado tipo de operación, para un determinado tipo de equipo.

En los silos de homogeneización por lotes, puede comenzar de 2 a 4 horas antes de estar el silo completamente lleno, prosiguiendo por dos horas más ya con el silo cargado al máximo; así el tiempo total de la agitación neumática variará de 4 a 6 horas.

Al operar con dos silos iguales, mientras uno se va llenando el otro descarga a un ritmo constante, el crudo homogeneizado. Suponer C, la capacidad del silo en tons, Q el caudal de alimentación (producto de la molienda de crudo ton/h) y R la

magnitud que dá la capacidad del silo en horas de producción, se tiene:

$$R = \frac{C}{Q} (h) \dots 1$$

Para la homogeneización por lotes un silo de  $R = 12$  era en 1970 considerado suficiente, pues para  $C = 12 Q$ , suponiendo la producción del molino de crudo de 200 tons/h, la capacidad útil del silo de homogeneización sería  $C = 2400$  tons.

Se admite un diámetro límite de 12.0 m y por masa volumétrica más alta en el crudo alrededor de  $1200 \text{ kg/m}^3$  para  $H$  máxima  $1.5 D$  resultará para altura máxima  $H = 18.0$  m y por lo tanto  $C_{\text{máx}} = V \cdot Me = (2036) (1.2) = 2443$  tons.

Donde  $V =$  volumen del silo  $\text{m}^3$  y  $Me =$  Masa Volumétrica del crudo  $\text{ton/m}^3$ .

El diámetro límite de 12 m exigiría unos 150 Hp o sea unos 112 Kw de potencia en los compresores, lo que equivale al máximo admisible desde el punto de vista económico.

Para la homogeneización continua, un silo de 15 h trabajando con el mismo molino (200 ton/h) daría:

$$C = 15 Q = 3000 \text{ ton}$$

Suponiendo:  $Q_t =$  tons de CaO en el silo al final del tiempo  $t$ .

$V =$  Capacidad del silo (tons) entonces:

$\frac{Q_t}{V} =$  período del tiempo considerado

$B_0 =$  % CaO en la nueva alimentación inicial del período

$B_1 =$  % CaO en la nueva alimentación final del período.

$C = B_1 - B_0 =$  al cambio ocurrido en la concentración de la nueva alimentación

$A =$  % CaO al inicio del período

$R =$  Tamaño del silo en h

$P =$  Período de tiempo h (transcurrido entre muestra  $B_0$  y  $B_1$ )

e = Base de log naturales

se tiene por lo tanto:

$$D = B_0 - \frac{CR}{P} \left[ 1 - (e)^{-\frac{P}{R}} + A (e)^{-\frac{P}{R}} + C \dots \% \right] \dots 2$$

En donde D, da el % de CaO (o de otro compuesto de la mezcla), existente en el interior del silo al final período de tiempo considerable. Se observa que el tamaño del silo R y el período P. son muy importantes en este cálculo. En la figura No. 19 se ve el funcionamiento de silos en serie de tres, dos y de un sólo silo. En las ordenadas se tiene el desvío máximo en % de CaO y aparecen tres curvas a la operación en tres, dos y un silo. Al trazar desde la ordenada una paralela al eje de las abscisas, ella intercepta a las tres curvas en los puntos  $R = 5$ ,  $R = 8$  y  $R = 30$  para 0.2% de CaO: esto indica que un silo único de 30 horas ó un par de silos de 8 h ó tres silos de 5 h cada uno, se pueden usar para esa homogeneización.

La primera solución es inejecutable, excepto para los molinos pequeños y económicos, pues con  $C = 30 Q$  los molinos de 200 t/h necesitarían silos de  $C = 6000$  tons lo que excede en mucho la cantidad de 2,400 ton que es el máximo admisible económicamente.

Dos silos en serie de 8 h c/u, representan una capacidad del orden de  $C = 8 \times 200 = 1,600$  tons tres silos indican  $C = 5 \times 200 = 1000$  t. Por lo tanto para homogeneizar el crudo de clinker portland, operando por rebozamiento con desvío máximo de 0.2% de CaO en el último silo, la solución más económica será la que utilice dos silos de 8 h c/u.

Ninguna de estas curvas es genérica, por el contrario, son específicas para determinada instalación; igualmente conviene resaltar que la expresión No.2 se basa en el valor de dos muestras recogidas al principio y al final.

La operación por rebozamiento hace que todos los silos funcionen permanentemente llenos, por lo que deben vaciarse una vez al año para inspección.

Desvío total (dispersión) en % CaO del  
crudo clinkerizado.

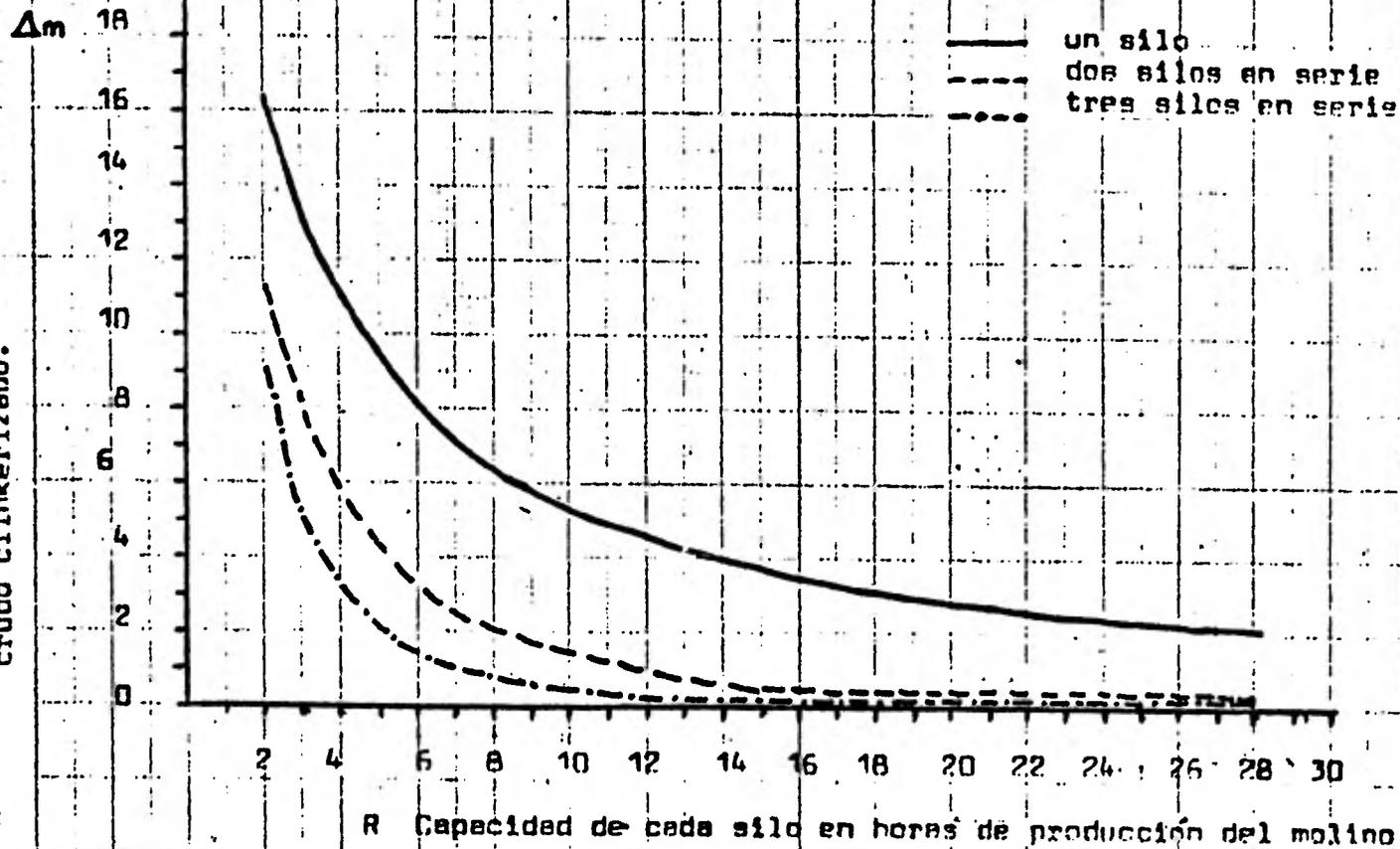


Fig. No. 19 FUNCIONES USADAS PARA LA ELECCION DEL SISTEMA DE SILOS DE TAMAÑO R PARA UN DETERMINADO DESVIO  $\Delta_m$  ADMITIDO COMO LIMITE, EN EL %CaO DEL CRUDO DE CEMENTO, EN LA HOMOGENEIZACION FINAL DE ESTOS SILOS.

## 6.- PROCEDIMIENTO DE LA DESVIACION NORMAL.

Este proceso fue desarrollado en Europa para la homogeneización continua: El estudio del Ing. H.Klein, de Polysius, divulgado en 1962, ilustra bastante al respecto.

Según ensayos realizados en silos Polysius, se llegó a la conclusión de que se podían adoptar las expresiones matemáticas concernientes a la mezcla de polvos por medios mecánicos de E.Rose y Vw-Weydanz, a la homogeneización neumática.

Klein fijó la curva de la fórmula  $p = e^{-at+b}$ ...%. Para esta blecer que los valores medidos de % de CaO presentarían una distribución Gaussiana tan exacta cuanto mayor fuera el número de muestras; aunque las muestras sólo pueden recogerse al principio y al final de la operación, el número de muestras será mayor cuanto más frecuente se observe la variación de % de CaO en el crudo. En la aplicación de esta técnica se admite constante el volúmen de la carga, la cantidad de aire insuflado y la manera en que penetra ese aire en el silo.

Este proceso propone fijar la carga óptima del silo para mezcla eficaz, esto es, la altura de llenado en que la cantidad de carga mezclada por unidad de tiempo alcance su máximo; de este modo queda abierta una puerta para definición numérica del rendimiento del silo y para la comprobación de la eficiencia real del equipo neumático usado.

La distribución normal del % de CaO dentro del silo, según la curva de Gaus, no puede; evidentemente ser medida, por lo tanto lo que el desvío patrón expresa es el estado de deshomogeneidad que en él impera, según las muestras tomadas antes y después del período considerado, haya o no la distribución Gaussiana.

Por la técnica de Klein, el desvío merece ser definido primero como se comprende representado por la siguiente función ex

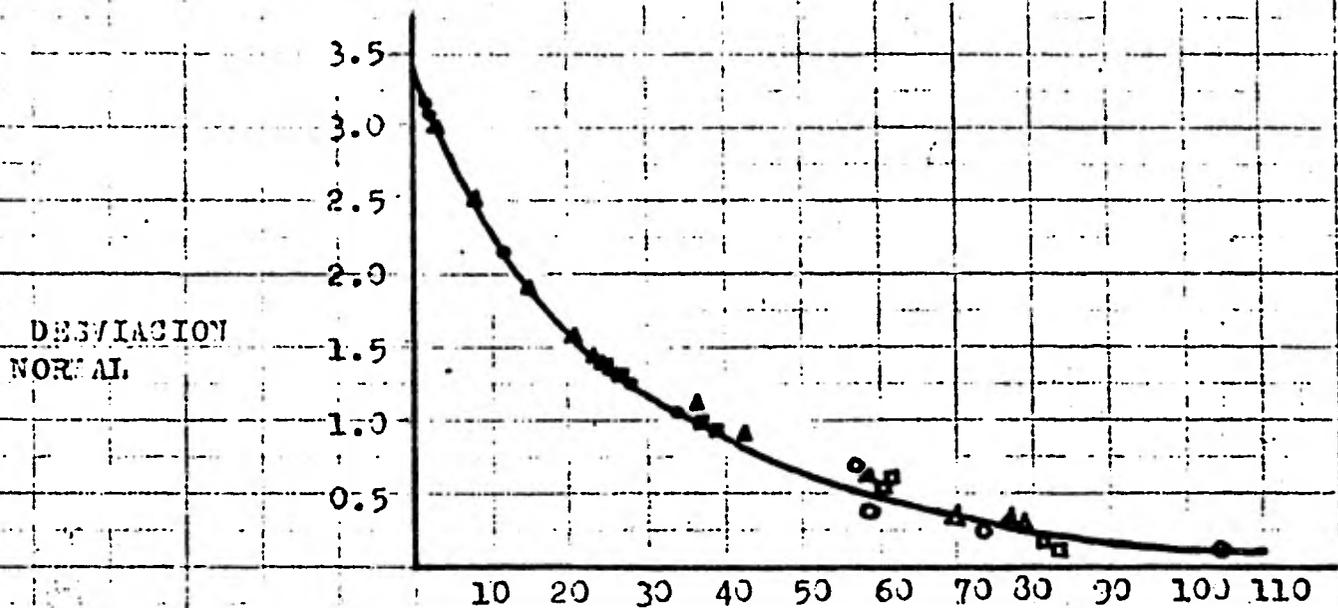


FIG. NO. 20 HOMOGENEIZACION DEL CRUDO DE BLENTO EVALUADA POR LA DESVIACION NORMAL DEL % DE CaO, EN FUNCION DEL TIEMPO DE AGITACION PNEUMATICA t (min.)

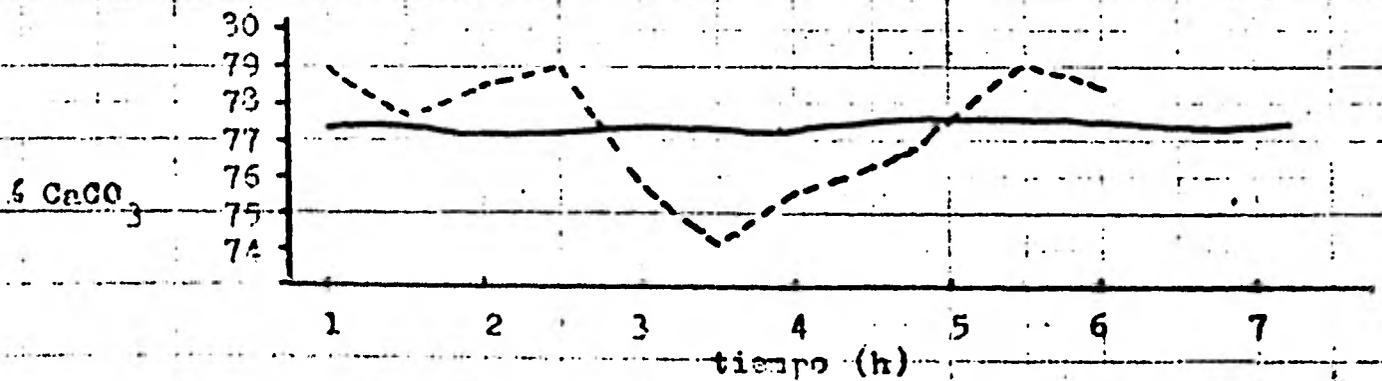


FIG. NO. 21 HOMOGENEIZACION DEL CRUDO DE BLENTO EVALUADA POR LA VARIACION DEL % CaCO<sub>3</sub> (ORDENADAS), EN FUNCION DEL TIEMPO t (ABSCISAS) EN HORAS.

$$\text{ponencial } p = (e)^{-at + b} \quad \dots(3)$$

Donde e, es la base de los logaritmos naturales a y b son constantes y t es el tiempo de agitación neumática.

b es fácil de determinar:

$$\ln \Delta p = -at + b$$

para t=0

$$b = \ln \Delta i \quad \dots(4)$$

Donde  $\Delta i$  es el desvío patrón inicial, que es función de la naturaleza de la cantera de caliza, de la precisión de la estequiometría puesta en práctica, de la segregación habida durante la prehomogeneización, etc. Alcanzará su valor mínimo cuando la prehomogeneización sea eficaz.

"a" representa la pendiente de la curva, es decir, mide la intensidad de la agitación neumática y la velocidad con que se realiza, así "a" es función de  $\Delta i$  y de  $\Delta f$  (desvío patrón final).

En forma empírica, después de muchos ensayos el valor de "a" denominado por Klein, factor de mezcla, se definió como:

$$a = \frac{1}{t} \ln \frac{\Delta i}{\Delta f} \quad \dots(5)$$

Conocida "a", el tiempo "t" de agitación neumática podrá preverse para unas determinadas dimensiones de silo y su carga. En la práctica se efectúa una determinación estadística de desvío patrón medio de cada mezcla ( $\Delta p$ ) fijándose acto seguido el tiempo "tm" medio de agitación, en torno del cual incidirán las correcciones para cargas específicas del silo. También por vía experimental se comprobó que el tiempo "t" aumenta con el tonelaje de carga del silo.

Al hacer una gráfica con todos los valores con el tiempo "t" en minutos de agitación neumática en las abcisas y el desvío patrón  $\Delta p$  en % en las ordenadas, la función número 3 aparece

en la curva de la gráfica No. 20.

En el trazado de la curva con valores reales obtenidos de las muestras, convendrá escoger el mayor  $i$ , susceptible de ocurrir; en este caso 3.5% y el tiempo de agitación no va más allá de 110 min.

Los símbolos representados; círculos, triángulos y cuadrados que señala la curva, se refieren a mezclas sometidas a operaciones de 60, 45 y 30 min. respectivamente, cuando son negros, corresponden a muestras tomadas al comienzo de la operación  $i$ , y cuando son blancos, a las tomadas al final de la operación  $f$ .

Para la mejor determinación de "A". se escoge el valor más alto admitido para  $y$  y el menor posible para "t" a fin de evitar la imprecisión característica de el tramo asintótico de la curva.

El desvío patrón debe entenderse como el valor numérico del resultado de la mezcla en homogeneización y será función de la cantidad de aire insuflado y del modo como se introduce en el silo, de la cubicación de la carga en el interior del silo, del tiempo consumo en la turbulencia a que se somete la carga en fin, del valor de  $i$ .

La figura No. 21 muestra las variaciones del contenido del  $\text{CaCO}_3$  en el crudo del cemento, determinadas en muestras tomadas cuando el silo en llenado estaba sin agitación, las líneas de trazos de la poligonal indican un mínimo de 74.5% y un máximo de 79.1% en el interior del silo. En la línea continua se da el contenido de  $\text{CaCO}_3$  después de la agitación neumática; se entiende que dicho contenido debía mantenerse a 77.2% de  $\text{CaCO}_3$ .

En el proyecto de equipo y del sistema de toma de muestras Polysius admite una distribución Gaussiana de los valores medidos, aunque en el muestreo final de laboratorio por combina

ción de muestras individuales, se diluye el error analítico introducido. Sin embargo, en el control de la mezcla por ordenador, mediante fluorescencia de Rayos X, la tecnología aplicada a la homogeneización es independiente de los recursos de evaluación que se acaban de resumir.

### C.- CONTROL DE LA HOMOGENEIZACION POR ORDENADOR.

La homogeneización del crudo controlada por ordenador se aplica a silos de homogeneización continua, especialmente a la homogeneización sin almacenaje en silo único de descarga continua.

De las variables a controlar, la más importante se refiere a la composición química de las muestras, tomadas y analizadas sin interrupción. Los analizadores por Rayos X alcanzan un alto grado de rapidez y precisión. Por regla general los reguladores analógicos de funcionamiento automático, cumplen con la mayor parte, si no con la totalidad de las exigencias de regulación mecánica. El ordenador, tan sólo presentará resultados técnicos y económicos satisfactorios cuando su presencia sea realmente imprescindible.

Después de laboriosos estudios estadísticos que decidirán sobre el número de programas a memorizar será posible fijar el tamaño y el precio del ordenador. Entre los ordenadores especialmente concebidos para el control de la homogeneización del crudo del cemento, deben citarse los que integran los sistemas PRODAC, de Westinghouse; KEG de Humboldt y POLAB de Polysius. Humboldt usa el espectrómetro de canal múltiple, que se basa en la dispersión de las radiaciones que emite cada sustancia.

Se dice que una sustancia es fluorescente cuando, debidamente excitada, es capaz de emitir radiaciones. Los Rayos X constituyen una reacción excitadora, absorbida por la sustancia que, seguidamente, remite una radiación secundaria, aprovechada por el analizador. A este procedimiento se le llama análisis por fluorescencia de Rayos X.

En la hipótesis de que la fábrica de Cemento disponga de control centralizado por ordenador, el proceso de homogeneización constituirá tan sólo uno de los sectores integrado en el sis-

tema que lo gobierna todo. De este género es el sistema POLCID. Los proyectistas de cementos portland especiales, o de características específicas, obtenidos de materias primas corriente--mente usadas en la producción del cemento portland recurren a los determinantes de tercero y cuarto orden, algoritmo preferido por la mayoría. Es el caso por ejemplo, del cálculo del cemento portland de bajo calor de hidratación o de tipo IV de la norma NOM C-150, los componentes del cual tienen por valores típicos los siguientes:

$$C_3S. . . 26\%; \quad C_2S. . . 50\%; \quad C_3A. . . 5\% \quad C_4AF. . . 12\%$$

La finura, por el turbidímetro de Wagner, debe ser de 1900  $\text{cm}^2/\text{g}$ . En la práctica, el cálculo de %  $C_4AF$  se obtiene por diferencia.

Entonces, basándose en la proporción de los componentes, se determinan los valores del factor de saturación del cal, del módulo de silicio (MS) y del módulo de alúmina (MA); cuyas expresiones y valores medias más frecuentes para el portland normal figuran en seguida:

$$FSC = \frac{100 (\%CAO)}{2,8 (\%SiO_2) + 1,1 (\%AL_2O_3) + 0,7 (\%Fe_2O_3)}$$

Portland corriente:

$$95\% = FSC = 98\%$$

$$MS = \frac{\% Si O_2}{\% AL_2O_3 + \% Fe_2O_3}$$

Portland corriente:

$$2,4 = MS = 2,7$$

$$MA = \frac{\% AL_2O_3}{\% Fe_2O_3}$$

Portland corriente:

$$1,5 = MA = 2,5$$

Se observa que FCS expresa, el % el grado de saturación de cal en la mezcla, cuanto más homogénea sea la mezcla cruda, tanto más FSC, MS, y MA se mantendrán constantes.

La gran ventaja del ordenador no se limita a la velocidad con que calcula los porcentajes correspondientes de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{CaO}$  que caracterizan la mezcla, sino también al hecho de memorizar la amplitud y la frecuencia de las variaciones constatadas, o sea, de constatar las tendencias del proceso, otro tanto se hace con el tiempo de llenado del silo, función de su volúmen y de la producción efectiva del molino del crudo.

El algoritmo usado por el ordenador es también el sistema de ecuaciones a resolver por determinantes. Para poder regular la mezcla a través de los tres módulos, FSC, MS y MA, será preciso partir de cuatro componentes del crudo, como son, por ejemplo la caliza, la arcilla, la arena y el mineral de hierro. Para prehomogeneizar la caliza y la arcilla.

Un diagrama simplificado del control de la homogeneización por medio de una computadora, viene representado en la figura No. 22. El diagrama tiene un valor didáctico por resumir el flujo principal en el control automático de la mezcla. Los símbolos que en él aparecen expresan lo que sigue:

- 1.- Valores exigibles de FSC, MS y MA en la mezcla cruda del silo.
- 2.- Valores correspondientes del % de  $\text{CaO}$ , %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , %  $\text{SiO}_2$  y %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  que deberá tener el crudo en el silo.
- 3.- Muestra de la mezcla de alimentación del silo, tomada en la conducción neumática de descarga del molino M.
- 4.- Porcentajes reales de los mismo óxidos en el crudo del silo según la calculadora Cs, que también nos da la carga instantánea del silo, o tan solamente su grado de llenado.

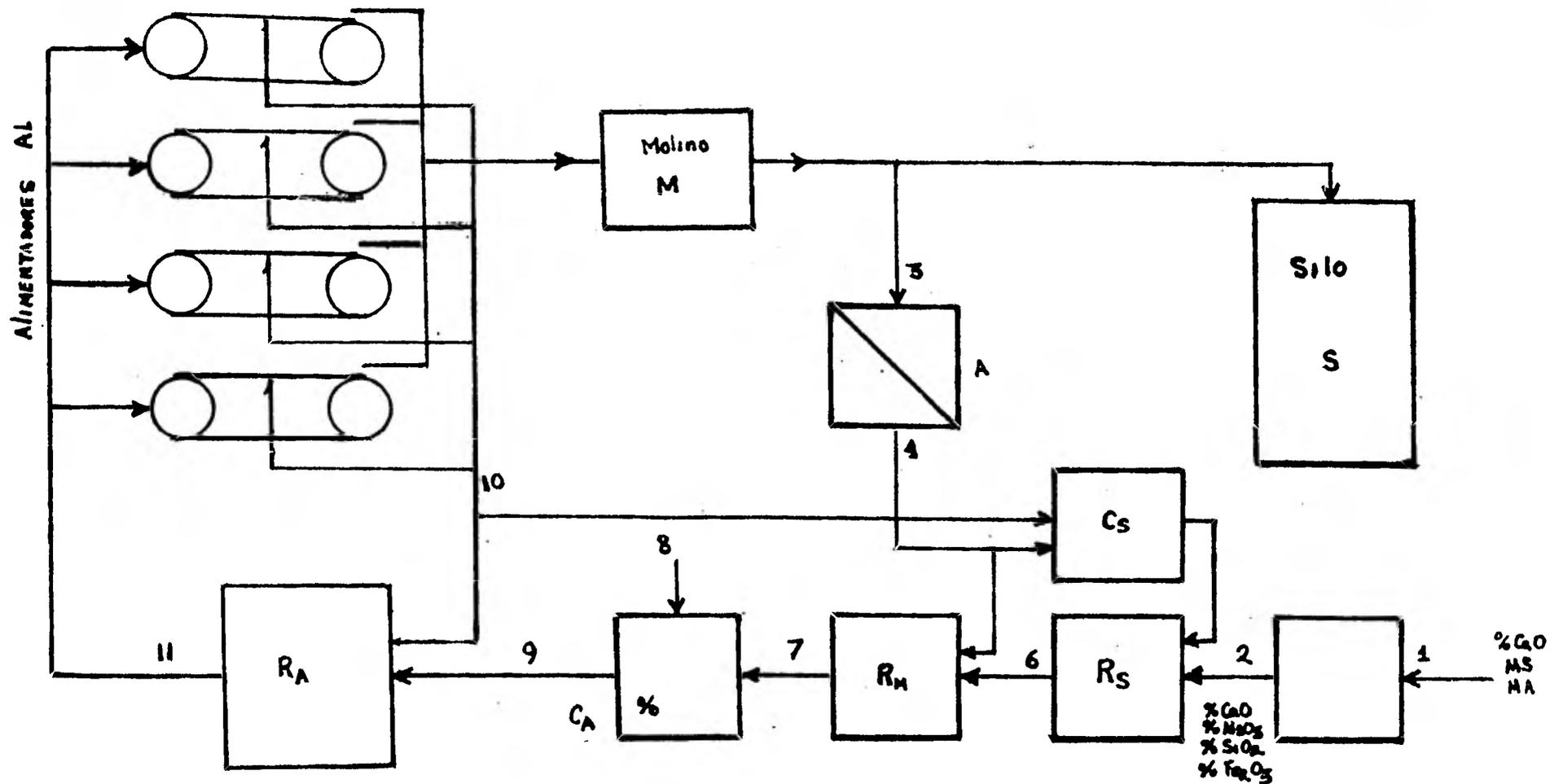


Fig. No 22 Diagrama simplificado del control de la homogeneización por ordenador, basado en la invariabilidad de la composición química de la mezcla cruda con que se alimenta el horno rotativo.

- 6.- Porcentaje de los óxidos referidos, que se debe exigir al crudo en la descarga del molino M, según Rs, regulador del crudo que está en el silo S.
- 7.- Porcentaje de los referidos óxidos, que se debe exigir en la alimentación del molino M, después de fijados por el regulador Rm, que las determina a la vista de las proporciones de óxidos constatadas a la descarga del molino.
- 8.- Alimentación del sistema de control automático con los porcentajes de óxidos hallados en las cuatro materias primas que entran por los alimentadores AL, de control ponderal.
- 9.- Nuevos valores ponderables exigibles en la descarga de cada alimentador AL, calculados por Ca y comunicados a Ra.
- 10.-Valores ponderales de las descargas de cada alimentador AL, del molino de crudo, medidos en cada uno de ellos y comunicados a Ra y Cs.
- 11.-Ajuste final de los alimentadores Al por el regulador Ra que fija los nuevos caudales de descarga de cada uno para corrección de los porcentajes de óxidos en la composición de la mezcla.

Si el sistema está funcionando bien, los óxidos, es decir, el % de CaO, % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, % SiO<sub>2</sub> y % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, se mantendrán con variaciones mínimas y, así los módulos FSC, MS y Ma, que los fijaron, no variarán de modo sensible.

por consiguiente, se encontrará que el silo se irá alimentando con una mezcla de composición química homogénea.

En el circuito final, el ciclo de regulación consume dos minutos y la operación total no gastará comunmente más de 17 minutos. El ordenador u ordenadores, serán alimentados con las restantes informaciones químicas y mecánicas necesarias.

En el caso de que los cuatro alimentadores AL, se reduzcan a tres, o sea, en mezclas ternarias para la alimentación del molino, es posible considerar muchas veces que dos de los materiales poseen una composición invariable. Las arenas y el mineral de hierro, por ejemplo varían muy poco. Entonces, con el auxilio de todas las pesadas instanténeas, y además, con el análisis químico del crudo descargado por el molino, se calcula la composición del tercer material, a cada instante. Realizado esto, la regulación de los alimentadores quedará simplificada.

El control por ordenador descansa totalmente en el grado de confiabilidad del muestreo y del análisis por Rayos X.

Siendo el sistema completamente automático, el crudo finamente pulverizado, fluyendo en una tubería vertical, penetra por las ranuras de una tolva de captación que lo intercepta en toda la sección transversal del tubo. Un transportador de gusano conduce esta muestra a la cámara de mezcla, de donde el exceso regresa al conducto principal. La muestra así separada representa en verdad un gran número de tomas, mezcladas en el interior de la cámara.

Entonces es recibida por un conjunto de dispositivos que preceden a la homogeneización del conjunto, siguiéndose la separación de una parte, para encapsular. Cerrada la cápsula en el interior de un cartucho, se transporta éste por medios neumáticos, a la estación repectora, ya dentro del laboratorio de fábrica. Siendo igualmente automática la estación receptora, el cartucho será abierto y limpiado mecánicamente, cerrado y seguidamente, enviado de regreso a la estación emisora. El contenido del cartucho se descargará en un molino de finos, por medios mecánicos y del molino a una prensa de pastillas, luego, pasa al analizador de Rayos X. Como se ha descrito, opera el POLAB 111. No obstante es muy corriente que

la manipulación sustituya al automatismo, después de la llegada del cartucho al laboratorio de la fábrica. En este caso, el manipulador abre el cartucho y lo vierte al molino de finos, que invertirá de 2 a 5 mins para moler el contenido de la muestra. Extraída esta última del molino, el operador la lleva a la prensa y por último, retira las pastillas y las va introduciendo al analizador de Rayos X.

En estos sistemas, el molino de finos recibe la muestra con partículas de 200 micras y los reduce a menos de 30 micras. Esto es porque el tamaño de partículas, o sea la finura del polvo de la pastilla, tiene un marcado efecto en la intensidad de la radiación secundaria emitida por el Si y por el Ca, aunque no sucede lo mismo con el Al. En el curso del análisis por fluorescencia de Rayos X.

El analizador está alimentado por pastillas de 40 mm de espesor. Pasados 90 seg los porcentajes de óxidos, de FSC, MA y MS aparecen impresos por el ordenador.

El sistema completo permite poner a la disposición de la fábrica un gran número de programas, estadístico analítico de regulación, de localización de fallas en el sistema, etc.

## 3 .- PARTE EXPERIMENTAL.

Esta parte es desarrollada en Cementos Tolteca, S.A., Planta Atotonilco, situada en Atotonilco de Tula, Hgo. La cual cuenta con canteras de Arcilla y Caliza propias, el tercer componente de la mezcla cruda, que allí se procesa, y que es el mineral de fierro, es suministrado por fuentes externas.

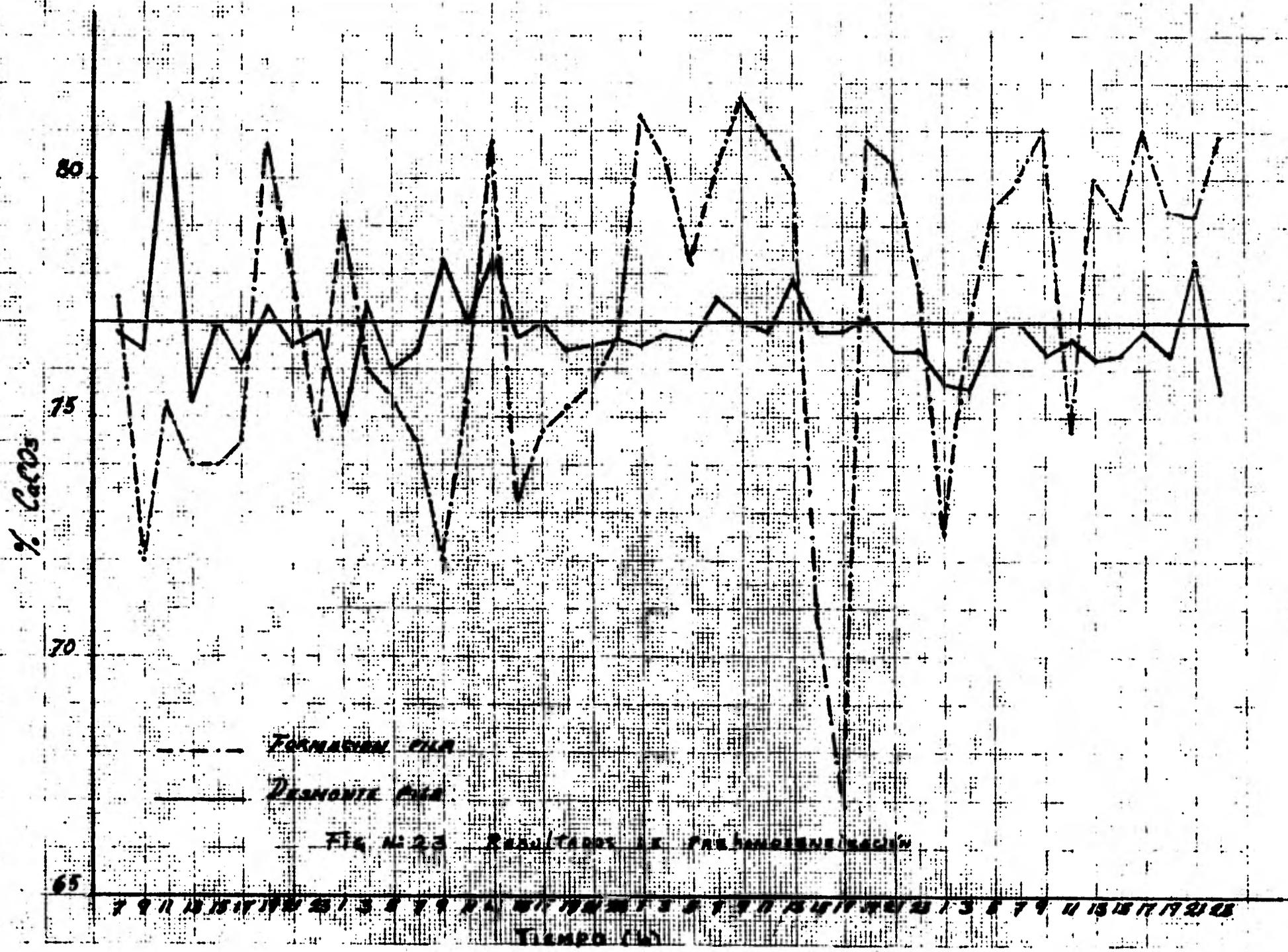
La planta tiene una capacidad de 4000 ton/día de clinker, y considerando que, por cada tonelada de clinker producido, se requieren 1.78 toneladas de crudo. Para cubrir esta producción se requerirán 7120 toneladas de mezcla seca. Ahora bien, si la humedad de la mezcla es 5%, se deberán manejar 7476 toneladas por día, de material. Como las proporciones de los tres componentes son:

MATERIAL	PORCENTAJE
Caliza	80.0%
Arcilla	18.0%
Mineral de Fierro	<u>2.0%</u>
	100.0%

Se quieren 5981 ton/día de caliza 1346 ton/día de arcilla y 149 ton/día de Mineral de Fierro.

Dado que las variaciones en la calidad de los dos principales componentes, es decir, caliza y arcilla, son severas, se opta por la prehomogeneización conjunta de las materias primas componentes. Otra razón, por la que se prefiere este método es que se pueden realizar ajustes o correcciones pequeñas, antes de que algún lote entre al proceso, y pueda causar algún desequilibrio en el sistema.

La caliza pasa aquí por tres etapas de trituración, que consisten en las reducciones de tamaño que en seguida se indican:



--- FORMACION FILA

— DESMONTE FILA

Fig. N° 23 RESULTADOS DE PRUEBAS DE FORMACION

7 9 11 13 15 17 19 21 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100

Tiempo (min)

Trituración Primaria	de 107 cm a 18 cm
Trituración Secundaria	de 18 cm a 6.4 cm
Trituración Terciaria	de 6.4 cm a 2 cm

La trituradora primaria es de pilón y tiene una capacidad de 400 ton es decir, que puede triturar 9,600 toneladas de caliza en un día, dando margen a almacenar bastante material, para cuando requiera de mantenimiento o de alguna reparación, se le puedan practicar estos, sin menoscabo de la producción de las etapas posteriores. En sí, éste almacén o pila cónica constituye una etapa de prehomogeneización de la caliza a una eficiencia baja, ya que se reducen las variaciones de  $\text{CaCO}_3$  de 2.127 % con una desviación normal de 0.9100, lo cual da una eficiencia de 57.24%.

$$n = \frac{2.127 - 0.9100}{2.127} \times 100 = 57.2\%$$

En la segunda etapa de trituración hay dos trituradoras de martillos instaladas, cada una tiene una capacidad de 300 tons que equivale a una producción diaria probable de 14,400 toneladas, que dadas las necesidades y condiciones actuales de la planta, da margen para proporcionar a ambas el elevado mantenimiento que requieren.

Entre la segunda y tercera etapas de trituración no existe almacenaje alguno. La trituradora terciaria también es de martillos y tiene una capacidad de 480 ton/h, es decir, 11520 toneladas por día. Esta trituradora además de triturar la caliza, proveniente de la segunda etapa de trituración, también tritura la arcilla, y es al salir de esta etapa, donde se realiza el mezclado de las tres materias primas componentes, este mezclado y dosificación se realizan mediante alimentadores de control de flujo gravimétrico. De aquí es transportada la mezcla, mediante un transportador de cinta, hasta el apilador,

el cual realiza el apilado en dos fajas longitudinales colineales según el método Chevron. Las pilas son recogidas con un desapilador provisto de una rueda de cangilones, el cual deposita el material prohomogeneizado en otra banda transportadora que lo lleva, a su vez, hasta las tolvas de alimentación de molinos de crudo.

La capacidad promedio del apilador es de 760 ton/h basada en una densidad aparente de  $1.4 \text{ ton/m}^3$

El apilador y la pluma se mueven hacia atrás y hacia adelante a lo largo del montón o pila a velocidades tales, que la misma queda formada con un número de capas de igual volumen. El apilador está equipado con un sistema de control automático que incluye un indicador de nivel, montado en el ala o pluma y una serie de interruptores límite.

El indicador de niveles y los interruptores límite, están conectados con bloqueo eléctrico con la elevación de la pluma del apilador.

El comenzar a formarse la pila, el extremo de la pluma está cerca de la base de ésta y la apiladora tiene entonces su viaje máximo. Cada vez que el indicador de nivel está tocando la pila, la pluma se va elevando un poco, mediante el mecanismo de levante. Según va variando la posición de la pluma, el viaje del apilador se va acortando por medio de los interruptores límite.

Este método de formación de pilas tiene las siguientes ventajas:

- 1.- El mezclado del cono final, el cual será recogido por la desapiladora, mejorará considerablemente.
- 2.- La altura de descarga, de la polea de la pluma a la punta de la pila, se mantendrá al mínimo, evitándose con esto, las posibles emisiones de polvo.

El material es recogido con un desapilador rotatorio de cangilones, el cual esencialmente es una unidad excavadora montada sobre un puente viajero que abarca el alto de la pila.

La desapiladora está adaptada para trabajar en dos direcciones y con un rendimiento promedio de 400 ton/h de material, con una densidad aparente de  $1.4 \text{ ton/m}^3$ .

Para regular la capacidad, de acuerdo con la cantidad requerida se ajusta el paso delantero de la máquina por medio de un mecanismo de operación, que está instalado en la transmisión del vehículo. Esto está relacionado con un equipo electrónico y un interruptor selector, que está localizado en la cabina del operador, el cual lo capacita para escoger la velocidad requerida dentro de un rango de 50-500 ton/h, en pasos sucesivos de 6 ton/h.

Un rastrillo ajustable, provisto de dientes salientes va montado en ambos lados del carro. Su función principal consiste en aflojar el material del frente de la pila y dejarlo que fluya con una velocidad constante, hacia la base donde lo recoge la rueda de cangilones. La inclinación del rastrillo puede ser ajustada manualmente, para adaptarse al ángulo de reposo del material, y un ajuste adicional relacionado con el círculo de giro de los cangilones, determinan la cantidad aproximada de alimentación a la rueda.

Antes de invertir la dirección de la desapiladora, es menester invertir los cangilones, lo cual se hace en forma manual.

El carro está provisto de una transmisión con velocidad variable, para compensar las variaciones en rendimiento que existirían si la velocidad fuera constante, debido a la forma triangular de la sección transversal de la pila.

Durante la recuperación del cono frontal de la pila, solamente una parte del ancho del lecho está lleno con material, es-

ta parte va aumentando desde cero hasta el ancho total de la pila.

En frente de la rueda de cangilones está montado un indicador de nivel especial, el cual está en contacto con el material siempre, mientras la rueda hace contacto con el motor. Cuando la rueda se despega del material y en consecuencia gira en va cío, también el inidicador de nivel pierde contacto con el motor. Esto da lugar a un impulso en la transmisión de veloci dad variable, la cual se invierte inmediatamente y así vuelve la rueda de cangilones a recoger material. En el lado opuesto de la pila sucede lo mismo.

El material recuperado por la rueda de cangilones mientras se desplaza a lo largo del frente de la pila, se desposita sobre la banda del frente, la cual está sostenida por la estructura del puente y este material se descarga sobre una unidad fija de carga a la banda de recuperación, que corre a lo largo del lecho de materiales.

Una vez explicado el funcionamiento del sistema que se utiliza en esta factoría, se anotará en forma de tabla los valores obtenidos en la formación de una pila, así como aquellos que se obtuvieron durante el desmonte de la misma. Estos valores están en función de la concentración de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), por ser la manera más rápida y fácil de conocer el comportamiento de la mezcla, cabe mencionar que se podían haber utilizado otros parámetros de control, pero por las razo nes antes expuestas, se tomó como base éste parámetro.

El método que se siguió para la determinación de la concentra ción de carbonato de calcio  $\text{CaCO}_3$ , consiste en la titulación por retroceso Acido-Base.

## DATOS OBTENIDOS DE LA FILA No.555

HORA	FORMACION PILA % CaCO <sub>3</sub>	DESMONTE PILA %CaCO <sub>3</sub>
7.00	77.50	76.80
9.00	72.00	76.40
11.00	75.30	81.60
13.00	74.00	75.30
15.00	74.00	77.00
17.00	74.50	76.10
19.00	80.70	77.30
21.00	78.00	76.50
23.00	74.60	76.80
1.00	79.10	74.80
3.00	76.00	77.40
5.00	75.40	76.00
7.00	74.50	76.40
9.00	72.00	78.30
11.00	75.30	77.00
13.00	80.80	78.40
15.00	73.30	76.70
17.00	74.70	77.00
19.00	75.20	76.50
21.00	75.70	76.50
23.00	76.60	76.60
1.00	81.30	76.50
3.00	80.40	76.70
5.00	78.20	76.60
7.00	80.20	77.50
9.00	81.70	77.00

HORA	FORMACION PILA	DESMONTE PILA
	% $\text{CaCO}_3$	% $\text{CaCO}_3$
11.00	80.90	76.80
13.00	79.90	77.90
15.00	70.60	76.80
17.00	66.90	76.80
19.00	80.90	77.10
21.00	80.30	76.40
23.00	77.80	76.40
1.00	72.60	75.70
3.00	76.60	75.70
5.00	79.40	76.90
7.00	80.00	77.00
9.00	81.00	76.30
11.00	74.70	76.60
13.00	80.00	76.20
15.00	79.20	76.20
17.00	81.00	76.80
19.00	79.30	76.30
21.00	79.20	78.30
23.00	80.90	75.50
Media	77.16	77.08
Desv. Estándar	3.436	1.031
Varianza	11.544	1.039

## HOMOGENEIZACION.

Para realizar esta parte, se utilizó un sistema Fuller de dos silos de homogeneización conectados en serie de operación con t $\acute{u}$ nua por rebozadero y tres silos de almacenamiento como se ve en la figura No. **24**. Cada silo de homogeneización cuenta con una altura de 19.65 m y un diámetro de 14 m; provisto de cajas de aireación de 250 x 250 mm y utilizando lona como sistema dispersante del aire.

Cada uno de los silos está dividido en cuatro cuadrantes y a cada cuadrante se introduce por medio de pulsaciones de 7 mi nutos cada cambio de aire de homogeneización, mientras que los otros tres cuadrantes se conservan con aireación.

El aire para la homogeneización es suministrado por un compresor Fuller c-350 para cada silo que tiene capacidad de 1750 CFM de aire a 20° C y un  $\text{Kg/cm}^2$  de presión, mientras que para aireación se cuenta con un compresor Fuller C-175, con capacidad de 875 CFM de aire de 20° C y 1  $\text{Kg/cm}^2$  de presión.

Periódicamente se debe verificar la presión en el sistema de tuberías de aire para ver el grado de obstrucción de las lonas y cuando se tiene el máximo permisible por las compresoras ( $2.2 \text{ Kg/cm}^2$ ), se detiene la operación en un silo de homogeneización para limpieza de las mismas, cosa que ocurre aproximadamente cada ocho meses.

La prueba que se realizó, consiste en muestrear una pila, formada en el sistema de prehomogeneización y determinar las variaciones que sufre a la entrada y a la salida del sistema de homogeneización el % de  $\text{CaCO}_3$ , muestreándose cada 2 h obteniéndose las siguientes tablas.

descarga de molinos de  
crudo

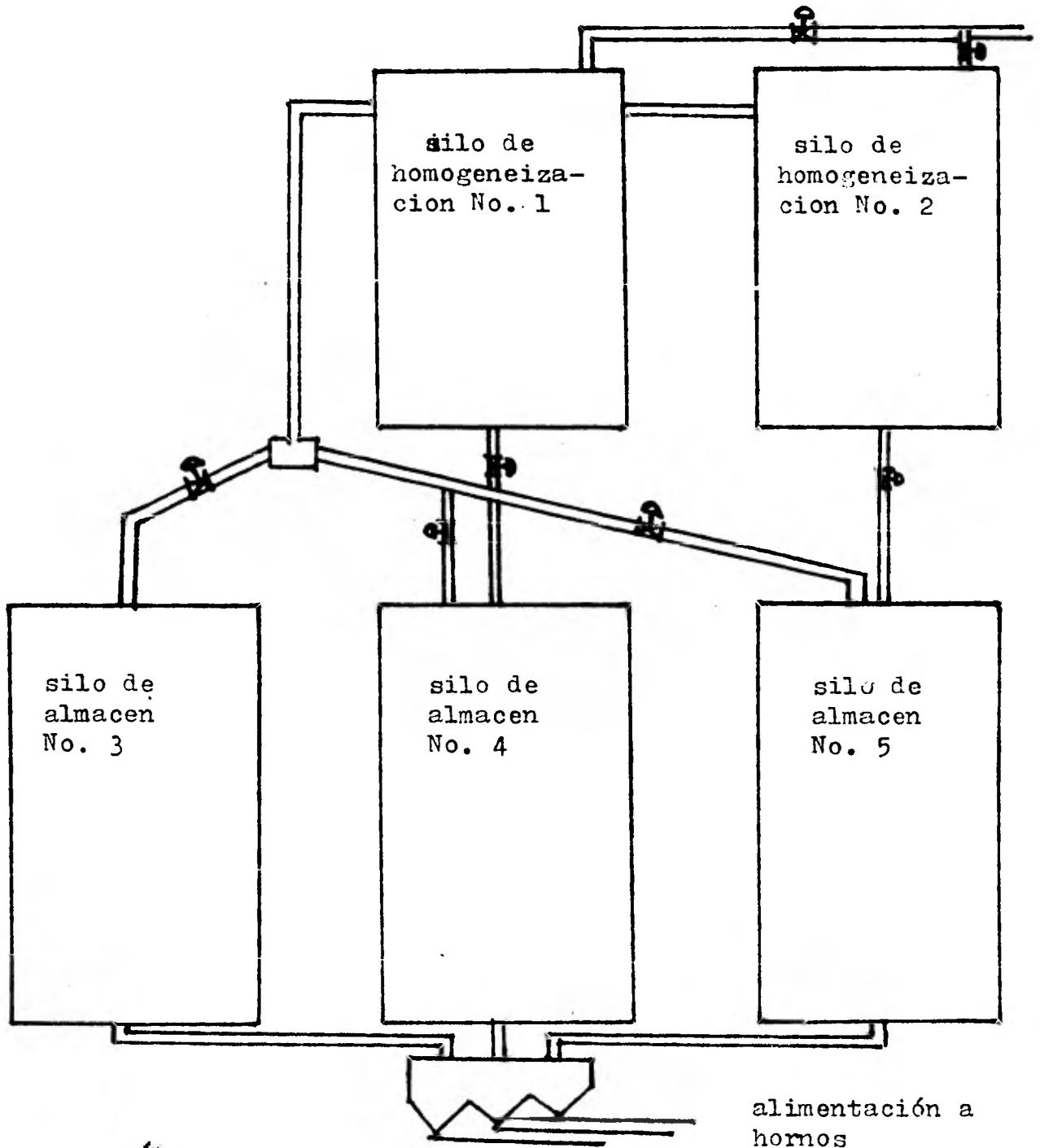


FIG. No 24 SISTEMA DE SILOS USADOS PARA LA OBTENCION DE LOS DATOS EXPERIMENTALES.

DATOS OBTENIDOS A LA ENTRADA AL SISTEMA DE  
HOMOGENEIZACION DE LA PILA NO. 555

HORA	F.S.C.	% CaCO <sub>3</sub>
5	97.68	76.8
7	96.99	76.4
9	95.20	75.3
11	98.80	78.4
13	96.12	76.5
15	97.90	77.3
17	95.80	74.8
19	98.20	78.3
21	96.20	76.8
23	98.48	81.6
1	97.70	77.0
3	96.80	76.1
5	94.55	77.4
7	96.43	76.0
9	95.82	76.4
11	97.40	77.0
13	95.32	76.4
15	95.82	76.5
17	97.68	76.7
19	97.16	77.0
21	98.55	77.9
23	97.66	77.5

..ORA	F.S.C.	% Ca CO <sub>3</sub>
1	96.15	76.6
3	97.08	76.5
5	96.12	76.7
7	96.15	76.6
9	95.50	76.8
11	96.89	77.0
13	96.50	76.8
15	96.50	76.8
17	97.86	76.3
19	95.49	76.2
21	95.80	76.3
23	96.88	76.6
1	94.72	75.6
3	96.56	76.4
5	94.85	76.3
7	97.25	77.0
9	98.75	78.3
11	95.45	75.7
13	96.95	76.4
15	97.50	77.1
19	96.68	76.8
21	94.73	75.5

Media	X = 96.61	X = 76.78
Desv.Estandar	= 1.136	= 1.031
Varianza	= 1.261	= 1.039

DATOS OBTENIDOS A LA SALIDA DEL SISTEMA DE  
HOMOGENEIZACION EN LA PILA No.555

H.	F.S.C.	%Ca CO <sub>3</sub>
13	96.50	77.0
15	96.64	76.9
17	96.28	77.2
19	96.73	77.0
21	96.49	76.7
23	96.17	76.9
1	96.60	76.7
3	96.77	77.0
5	96.91	76.5
7	96.80	76.4
9	97.40	76.8
11	97.06	77.1
13	96.78	76.8
15	97.06	76.9
17	96.39	76.6
19	96.65	76.5
21	96.16	76.6
23	96.23	76.8
1	96.62	76.6
3	96.91	77.0
5	97.17	76.6
7	96.75	77.2
9	96.69	77.0
11	96.71	76.8
13	96.48	76.7
15	96.42	77.2
17	96.45	76.6

HORA	F. S. C	% CaCO <sub>3</sub>
19	96.36	76.6
21	96.69	76.8
23	96.41	76.5
1	96.71	76.8
3	96.40	77.1
5	96.51	76.7
7	95.98	77.0
9	96.72	77.3
11	96.37	76.9
13	96.85	76.8
15	96.41	76.6
17	96.31	76.6
19	96.33	76.8
21	96.52	76.6
23	96.59	76.8
1	96.62	76.6
3	96.66	76.5
5	95.93	76.8

$$\bar{X} = 96.59$$

$$\sigma = 0.2874$$

$$\sigma^2 = 0.0808$$

$$\bar{X} = 76.79$$

$$\sigma = 0.2254$$

$$\sigma^2 = 0.0497$$

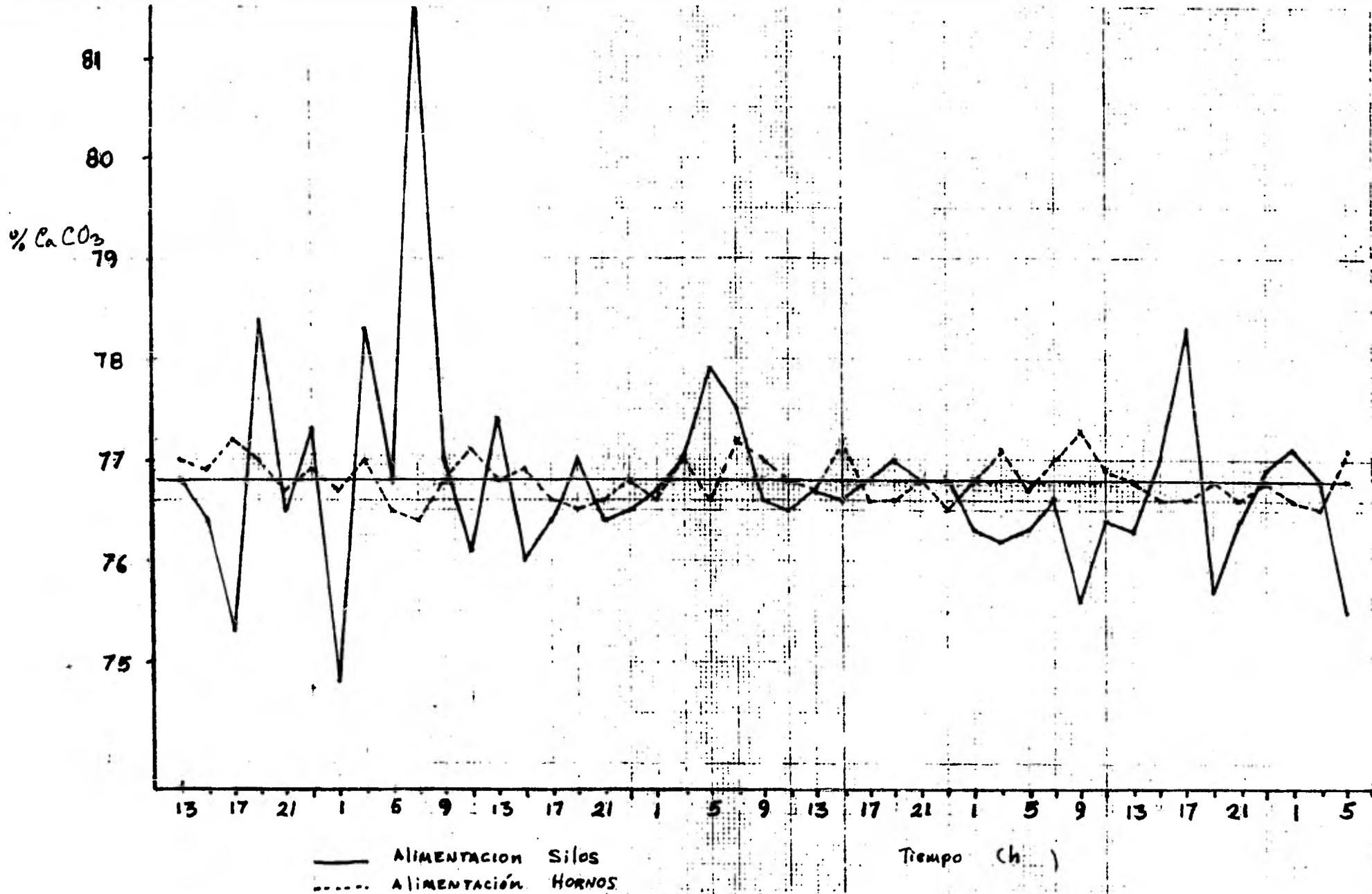


FIG Nº 25 RESULTADOS DE HOMOGENEIZACIÓN.

## 7.- CONCLUSIONES

En la planta de Atotonilco, Hgo., donde se realizó el presente trabajo, hasta antes de la instalación de los equipos para la prehomogeneización y homogeneización de la mezcla cruda, se tenían elevados consumos de energía (combustible y electricidad) y una fuerte inestabilidad en la operación de sus hornos (descostramientos, tapones y formación de anillos) lo cual ocasionaba bajas producciones, una vida muy corta en su forro refractario y un clinker de baja calidad, que requería molienda hasta superficies específicas muy elevadas, necesarias para dar una calidad deseada en el cemento, lo que originaba como consecuencia adicional un alto desgaste en los elementos molturadores y un alto consumo de energía en la molienda de cemento.

Al entrar en operación estos equipos, los parámetros anteriormente enunciados se vieron afectados como se puede ver en la tabla siguiente:

## RESUMEN ECONOMICO GLOBAL

CONCEPTO	CONDICIONES ANT.		CONDICIONES ACT.		DIFERENCIA	
		PESOS		PESOS		PESOS
PRODUCCION (TONS.)	3,775.0	+2'642,500.0	4,301.0	+3'010,700.0	526.0	+ 368,200.00
REFRACTARIO (Kg)	3,775.1	-93,871.9	3,924.0	- 54,368.7	2,851.1	39,503.2
COMBUSTIBLE GAS (m <sup>3</sup> )	239,243.5	-90,912.6	218,676.1	- 83,097.0	20,567.4	7,815.6
COMBUSTOLEO (l)	171,316.0	-75,379.0	148,800.0	- 65,472.0	22,516.0	9,907.0
ELEMENTOS DE:						
MOLIENDA (kg)	1,434.5	-20,083.0	645.2	-9,032.8	789.3	11,050.2
ENERGIA ELECTRICA (Kwh)	528,500.0	-385,805.0	524,722.0	-383,047.0	3,778.0	2,758.0
COSTOS DE EQUIPO						
E INSTALACION				191,780.8		191,780.8
OPERACION				11,550.0		11,550.0
MANTENIMIENTO				11,110.0		11,110.0
<u>TOTAL</u>		<u>1,976,448.0</u>		<u>2,201,241.7</u>		<u>224,793.0</u>

## CALCULOS

## 7.1 INCREMENTO EN PRODUCCION

PRODUCCION ANTERIOR = 3,775 ton/día Cemento

PRODUCCION ACTUAL = 4,301. ton/día Cemento

$$\text{GANACIA} = (4301-3775) \frac{\text{ton}}{\text{día}} \text{ cemento} \times 700 \frac{\text{pesos}}{\text{ton.cto.}} = 368.200 \frac{\text{pesos}}{\text{día}}$$

## 7.2 AHORRO EN REFRACTARIO (CUATRO HORNOS)

## 7.2.1 HORNOS 1 y 2

CONSUMO ANTERIOR

$$2.44 \frac{\text{kg.refractario}}{\text{ton.clinker}} \times 440 \frac{\text{ton.clinker}}{\text{día horno}} \times 2 \text{ hornos} = 2147.2 \frac{\text{kg.refractario}}{\text{día}}$$

CONSUMO ACTUAL

$$1.15 \frac{\text{kg.refractario}}{\text{ton.clinker}} \times 500 \frac{\text{ton.clinker}}{\text{día horno}} \times 2 \text{ hornos} = 1150.0 \frac{\text{kg.refractario}}{\text{día}}$$

## 7.2.2 HORNO 3

CONSUMO ANTERIOR

$$1.58 \frac{\text{kg.refractario}}{\text{ton.clinker}} \times 880 \frac{\text{ton.clinker}}{\text{día}} = 1390.4 \frac{\text{kg.refractario}}{\text{día}}$$

CONSUMO ACTUAL

$$0.554 \frac{\text{kg.refractario}}{\text{ton.clinker}} \times 1000 \frac{\text{ton.clinker}}{\text{día}} = 554.0 \frac{\text{kg.refractario}}{\text{día}}$$

## 7.2.3 HORNO 4

CONSUMO ANTERIOR

$$1.85 \frac{\text{kg.refractario}}{\text{ton.clinker}} \times 1750 \frac{\text{ton.clinker}}{\text{día}} = 3,237.5 \frac{\text{kg.refractario}}{\text{día}}$$

CONSUMO ACTUAL

$$1.11 \frac{\text{kg.refractario}}{\text{ton.clinker}} \times 2000 \frac{\text{ton.clinker}}{\text{día}} = 2,220.0 \frac{\text{kg.refractario}}{\text{día}}$$

$$\text{GANANCIA} = (6775.1 - 3924.0) \frac{\text{kg.refractario}}{\text{día}} \times \frac{1 \text{ pieza}}{8.3 \text{ kg.ref.}} \times 115 \frac{\text{pesos}}{\text{pieza}} = \$39,503.20$$

## 7.3 AHORRO EN COMBUSTIBLE

## 7.3.1 HORNOS 1 y 2

CONSUMO ANTERIOR

$$4.4 \times 10^5 \frac{\text{kg.clinker}}{\text{día horno}} \times 1200 \frac{\text{kcal.}}{\text{kg.clinker}} \times \frac{1 \text{ m}^3 \text{ gas}}{8460 \text{ kcal}} \times 0.38 \frac{\text{pesos}}{\text{m}^3 \text{ gas}}$$

$$= 23,716.3 \text{ pesos/día} \times 2 \text{ hornos} = 47,432.6 \text{ pesos/día}$$

CONSUMO ACTUAL

$$\frac{5.0 \times 10^5 \times 1000 \times 0.38 \times 2}{8460} = 44,917.3 \text{ pesos/día}$$

## 7.3.2 HORNO 3

$$\text{CONSUMO ANTERIOR} = \frac{8.8 \times 10^5 \times 1100 \times 0.38}{8460} = 43,480.0 \text{ pesos/día}$$

$$\text{CONSUMO ACTUAL} = \frac{1.0 \times 10^6 \times 850 \times 0.38}{8460} = 38,179.7 \text{ pesos/día}$$

$$\text{GANANCIA} = 90,912.6 - 83,087.0 = 7,815.6$$

## 7.3.3 HORNO 4

CONSUMO ANTERIOR

$$1.75 \times 10^6 \frac{\text{kg.clinker}}{\text{día}} \times 100 \frac{\text{kcal}}{\text{kg.clinker}} \times \frac{1 \text{ kg.comb.}}{9500 \text{ kcals}} \times 0.93 \frac{\text{lt.comb.}}{\text{kg.comb.}}$$

$$\times 0.44 \frac{\text{pesos}}{\text{lt.comb}} = 75,379.00 \text{ pesos/día}$$

$$\text{CONSUMO ACTUAL} = \frac{2.0 \times 10^6 \times 760 \times 0.93 \times 0.44}{9500} = 65,472.00 \text{ pesos/día}$$

$$\text{GANANCIA} = 75,379.0 - 65,472.0 = 9,907.00 \text{ pesos/día}$$

## 7.4 AHORRO EN ELEMENTOS DE MOLIENDA

CONSUMO ANTERIOR

$$3775.0 \frac{\text{ton.cto.}}{\text{día}} \times 0.38 \frac{\text{kg.bola}}{\text{ton.cto.}} = 1,434.5 \text{ kg.bola/día}$$

$$\text{CONSUMO ACTUAL} = 4301 \frac{\text{ton.cto.}}{\text{día}} \times 0.15 \frac{\text{kg.bola}}{\text{ton.cto.}} = 645.20 \text{ kg.bola/día}$$

$$\text{GANANCIA} = (1434.5 - 645.2) \frac{\text{kg.bola}}{\text{día}} \times 14.0 \frac{\text{pesos}}{\text{kg.bola}} = 11,050.2 \text{ pesos/día}$$

## 7.5 AHORRO EN ENERGIA ELECTRICA

$$\text{CONSUMO ANTERIOR} = 3775.0 \frac{\text{ton.cto.}}{\text{día}} \times 14 \frac{\text{kwh}}{\text{ton.cto.}} = 528,500 \frac{\text{kwh}}{\text{día}}$$

$$\text{CONSUMO ACTUAL} = 4301.0 \frac{\text{ton.cto.}}{\text{día}} \times \frac{\text{kwh}}{\text{día}} = 524,722.0 \text{ kwh/día}$$

$$\text{GANACIA} = 528,500 - 524,722) \frac{\text{kwh}}{\text{día}} \times 0.75 \frac{\text{pesos}}{\text{kwh}} = 2,757.9 \text{ pesos/día}$$

## 7.6 COSTOS DE EQUIPO E INSTALACION (en 1974).

Prehomogeneización	=	62,914.560.00 pesos
Homogeneización	=	83,886,080.00 pesos
TOTAL	=	136,800.640.00 pesos
Costo total actual	=	700,000,000.00 pesos

Considerando que el equipo se depreciara a 10 años se tendrá:

$$\frac{700,000.000.00 \text{ pesos}}{3,650. \text{días}} = 191,780.8 \text{ pesos/día}$$

$$\frac{3,650. \text{días}}{10 \text{ años}}$$

## 7.7 COSTOS DE OPERACION Y MANTENIMIENTO

$$\text{Costo de operación} = 11,550.0 \text{ pesos/día}$$

$$\text{Costos de Mantenimiento} = 11,110 \text{ pesos/día}$$

Realizando un balance general se tiene una ganacia neta de 224,793.20 pesos/día

De los datos observados se puede deducir que la influencia de la instalación de estos equipos es beneficiosa para la economía de una empresa con esta envergadura.

## BIBLIOGRAFIA

- 1.- BOGUE, R.N. "LA QUIMICA DEL CEMENTO PORTLAND", ED. DOSSAT, 1952.
- 2.- CRADDOCK, WATSON W.Q.L., "CEMENT CHEMISTS" AND WORKS MANAGERS HAND BOOK" CONCRETE PUBLICATIONS LIMITED LONDON, S.W., 1952.
- 3.- DUDA W.H., "MANUAL TECNOLOGICO DEL CEMENTO" E.T.S.A. ESPAÑA 1977.
- 4.- FOSSHAG W. "PNEUMATIC FLUIDISING SYSTEMS IN STORAGE SILOS" ZEMENT-KALK-GIPS No.2 ALEMANIA 1965.
- 5.- IRONMAN, RALPH, "SILOS SOLVES CEMENT RAW MEAL PROBLEMS" ROCK PRODUCTS, U.S.A. AGOSTO 1976.
- 6.- JACKSON W.S. "HOMOGENIZING SILOS ANSWER BLENDING READS" (BNDY) ROCK PRODUCTS UNITED STATES OF AMERICA, ABRIL DE 1970.
- 7.- JACKSON W.S. "CONTINUOUS SERIES AIR BLENDING" ROCKS PRODUCTS CEMENT INDUSTRY SEMINAR, CHICAGO 1968.
- 8.- KLEIN H. "RELATIONS SHIP IN PNEUMATIC HOMOGENISATION" ZEMENT KALK GIPS, No. 9. 1962.
- 9.- LABAH, N. OTTO. " PRONTUARIO DEL CEMENTO" E.T.A.S.A. ESPAÑA
- 10.- LEA F.M. "THE CHEMISTRY OF CEMENT AND CONCRET EDWARD ARNOLD & Co. 1935.
- 11.- LYNCH, B. & H. DE KONING "RAY SPECTROMETRY IN THE CEMENT INDUSTRY PHILIPS APLICATIONS LABORATORIES 1977 No. 9151
- 12.- Mc DONALDS DOUCLAS T. HE NEW PLANT OF CEMENTS APASCO" (HOLDERBANK ) ROCK PRODUCTS, ABRIL 1976.
- 13.- PERRY ROBERT H. "CHEMICAL ENGINEERS HANDBOOK" McGRA HILL-KOGA KUSHA LTD. 5a. EDICION, 1973.
- 14.- REUSS A., PREHOMOGENIZATION OF RAW MATERIAL IN THE CEMENT INDUSTRY ZEMENT KALK GIPS 12 1970.
- 15.- SCHOFIELD C.G., "RAW MATERIALS BLENDING AND HOMOGENISATION" CEMENT TECHNOLOGY BLUE CIRCLE TECHNICAL, ENGLAND, No. 8, 1979.
- 16.- TAGGART, ARTHUR F. "HANDBOOK OF MINERAL DRESSING", WILEY INTERSCIENCE PUB. 2a. COPIA 1945.