

- Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento -

618-36 EL HORNO VERTICAL DEL FUTURO

(Der Schachtofen von Morgen)

E. Spohn

De: "ZEMENT-KALK-GIPS", vol. 7, nº 11, noviembre 1954, pág. 409

- S i n o p s i s -

Se ha conseguido que la cocción con carbón pulverizado sea económica, gracias a un nuevo modelo de parrilla. Un nuevo procedimiento de cocción, con granulación y recubrimiento de los granulos mediante una capa exenta de carbón, permite reducir considerablemente las pérdidas de CO del horno vertical.

El horno vertical actual es el sistema de horno más barato, en cuanto a gastos de adquisición. Sin embargo, existe el anhelo de mejoramiento, en relación con la calidad del clínker y el consumo de carbón.

EL PROBLEMA DE LA CALIDAD

En las instalaciones actuales de hornos verticales existen dos obstáculos fundamentales que se oponen al mejoramiento de la calidad: la acción de las cenizas y la aparición de trozos compactos, reducidos, que la mayoría de las veces salen aún calientes del horno.

LA ACCION DE LAS CENIZAS

El contenido en oal del crudo, en una instalación moderna, debe ser, aproximadamente, un 1/10%. En la cocción se añaden, de

forma suplementaria, las cenizas del carbón. En el caso de un contenido de cenizas en el carbón de, por ejemplo, 10%, se introduce un 1% de cenizas en el clínker, lo que significa una adición de 3% de cal. Se origina un cambio total en la disposición original de la cal, cuya magnitud no puede preverse, pues no siempre se dispone de carbón con contenido constante de ceniza. En el presente año se han utilizado carbones cuyo contenido en cenizas oscilaba entre 5 y 50%.

La ceniza de carbón no se encuentra distribuida de forma uniforme en la masa. En cualquier punto donde existiese un grano de carbón se formará un núcleo de ceniza. Los tamaños de los granos de carbón son de 10, 15 mm, y más. A veces se forman núcleos a partir de varios granos de carbón. El clínker no es, pues, homogéneo, sino que consta de partes con defecto y con exceso de cal. Este hecho se puede comprobar microscópicamente.

Puede demostrarse, fácilmente, lo que ocurre con uno de estos núcleos de cenizas durante la cocción. Basta colocar una bolita de ceniza en una bola de crudo, y someter el conjunto a la acción de una temperatura creciente. La bolita de ceniza funde, en parte, ya a 1100°C ó 1200°C, temperatura a la cual la masa de crudo permanece sin sinterizar, porosa. La porción de ceniza fundida es absorbida por la masa de crudo. Se forma una mancha alrededor de la bolita de ceniza. Una parte de la ceniza permanece, sin embargo, sin fundir, incluso a temperaturas elevadas, si la masa cruda de cemento ya está sinterizada. Esta acción, semejante a la de un secante, del crudo, no determina una distribución regular. No sólo las partes sin fundir, sino también las partes absorbidas se encuentran distribuidas irregularmente como manchas.

En el horno vertical falta, además, el efecto de amasado del clínker, tal como se presenta en el horno rotatorio. Se ha comprobado, en preparaciones microscópicas, que en el clínker de horno vertical la formación de cristales es mayor y más regular que en el de horno rotatorio. El clínker de horno vertical es comparable al hielo que se produce en una cámara frigorífica, sin agitación. El clínker de horno rotatorio puede compararse con el hielo de grano fino que se produce en una máquina frigorífica, con agitación. El efecto de amasado, que puede igualar las más pequeñas diferencias de homogeneidad, desaparece en el horno vertical.

LA REDUCCION

Los fenómenos de reducción son, quizás, más desagradables que los efectos debidos a las cenizas. El clínker reducido puede contener menos cal combinada que el oxidado. Asimismo, tiene una serie de propiedades desagradables.

Para poder juzgar el grado de reducción del clínker, se ha introducido un procedimiento de valoración con permanganato. Aunque las sustancias reducidas pueden ser hierro puro, óxido ferroso, sulfuros y otros compuestos, se suele calcular el grado de reducción como si sólo existiese óxido ferroso. Efectivamente, esto es falso, pero da una idea del grado de reducción. En el caso de hornos verticales, con buen funcionamiento, se encuentra por término medio un 0,5% de óxido ferroso ficticio. Existen hornos con más de 1%. Pero se trata, únicamente, de valores medios. Fundamentalmente, el clínker se compone de una mezcla de trozos porosos, enfriados rápidamente, y de trozos compactos, reducidos. Algunos trozos pueden estar más reducidos de lo que indica el análisis.

MOLIENDA DEL CARBON

Se observa que el efecto de las cenizas se elimina, casi por completo, si se muele el carbón junto con el crudo. Entonces, la ceniza queda distribuida homogéneamente. La determinación del contenido de cal se realiza, actualmente, por el método de diferencia de cal. Este método consiste, esencialmente, en mezclar el polvo crudo con una cantidad conocida de cal; se cuece la mezcla en un horno especial y se determina la cal libre por el método del glicolato, de Schläpfer-Bukowski. La cantidad valorada menos la cal libre introducida previamente, nos da la diferencia de cal, positiva o negativa. El método sirve, también, para polvo de carbón.

Para eliminar los fenómenos de reducción, debidos al carbón pulverizado, se ha de introducir algo de oxígeno durante la cocción. Se tiene así la posibilidad técnica de producir un polvo determinado, químicamente inmejorable, incluso con carbones de calidad inferior, de composición oscilante. En hornos rotatorios se puede obtener un resultado análogo, únicamente, con gas o aceite.

RESULTADOS PRACTICOS

En uno de los primeros ensayos realizados se trabajó con una prensa de dos rodillos (Loesche) para la fabricación de los nódulos. Se prepararon mediante una placa con orificios de 18 mm; tenían todos aproximadamente, el mismo diámetro. La retracción durante la cocción es completamente diferente según se trate de carbón molido o no. En el caso de carbón sin pulverizar, la retracción ascendió, aproximadamente, a 20% de las dimensiones originales; este resultado ha contribuido a la introducción de la zona de sinterización con forma de embudo. Se pueden observar las variaciones que se presentan cuan-

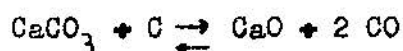
do un nódulo atraviesa, una después de otra, la zona de precalentamiento, de calcinación, de sinterización y de enfriamiento. Al final ha disminuido y se ha compactado gracias al proceso de cocción.

Es sorprendente que los nódulos se comporten de forma diferente con carbón pulverizado. Su contracción por cocción es, esencialmente, menor, por lo que contienen celdillas internas. Es como si la retracción no hubiese tenido lugar de fuera hacia el centro, sino a la inversa, de dentro a fuera, hacia la corteza. Los productos formados no eran compactos ni duros, sino, como consecuencia de sus celdillas y del enfriamiento rápido, extraordinariamente quebradizos. La suposición de que en el caso de carbón pulverizado el curso de la reacción es completamente diferente, se basa en las siguientes consideraciones:

Si se retiran nódulos semicocidos de la zona de cocción, se puede determinar que no representan como hasta ahora un determinado estado de cocción, como si viniesen de la zona de secado, calcinación o sinterización (fig. 1). Se encontró que muchos permanecían aún crudos en el núcleo, pero que en su superficie presentaban una pequeña capa clinkerizada. A esta capa sigue, hacia el interior, una capa de unos milímetros de espesor, de cocción débil, amarilla de la cual ha desaparecido el carbón por combustión; después se encuentra polvo sin calcinar, conteniendo carbón, y finalmente, en el núcleo, el color violeta, que se origina, aproximadamente, a 300-400°C. Las zonas de cocción, que antes como mínimo medían centímetros, no sólo se han acortado a unos milímetros, sino que en cada gránulo se encuentran desplazadas, avanzando anularmente desde la corteza hacia el centro, hasta que todo el gránulo se encuentra cocido (fig. 2). De esta forma, se puede aclarar también el contenido de celdillas del nódulo;

por cocción, se contrae el núcleo en relación con la primera capa de clínker formada.

Los gránulos de clínker, después de la cocción, se disponen con una estructura de roseta, por penetración de unos en otros - (fig. 3). Examinando, atentamente, gránulos semicocidos, se llega a la conclusión de que la reacción de Hauenschild, hasta ahora discutida,



juega aquí un papel extraordinario, pues junto con el ácido carbónico desaparece también el carbón de la zona respectiva. El carbón no se une, al principio, con el oxígeno del aire, sino con el ácido carbónico de la caliza, formando CO, que escapa de la superficie del gránulo y arde con el oxígeno, dando CO₂. De esta forma, no se encuentran en un clínker sobrecocido residuos de carbón sin quemar, que determinan una fuerte reducción en sus alrededores. El hasta ahora temido clínker reducido aparece en pequeña cantidad.

Otro fenómeno sorprendente es que los gránulos ya no presentan tan pronunciada la tendencia a aglomerarse en racimo y a compactarse bajo su propio peso, dando una masa cada vez más rígida. La mayor parte del clínker permanece suelto, como lo estaba el crudo; - donde se vitrifica, conjuntamente, de forma ligera, el producto racimoso formado es tan poco firme y frágil, que se separa fácilmente. Este es un hecho importante, pues el objetivo era producir clínker suelto, poroso, que se cuece rápidamente y que se puede enfriar rápidamente, en oposición al clínker corriente, compacto, duro. Por desgracia, este clínker, suelto, presentó, en las primeras experiencias, una faceta desagradable: el contenido del horno era tan suelto que se for

maban chimeneas, por las que caía el clínker desde la boca del horno hasta la parrilla, de forma incontenible. Las compuertas de vaciado se llenaban en exceso y ya no se podían cerrar. El fuego se estropeaba, y no se podía conseguir un fuego estable, incluso con un consumo mucho más elevado de combustible.

Las consideraciones expuestas no dejan ninguna duda, de que la cocción con carbón pulverizado transcurre de una forma esencialmente diferente a como hasta ahora se había considerado, y que se debe romper con los viejos procedimientos. Ante todo se pudo ver que las parrillas utilizadas hasta el momento no servían para detener y, al mismo tiempo, repartir el clínker suelto formado.

LA PARRILLA

Las antiguas parrillas Grueber (fig. 4) no se diferencian mucho de todas las otras parrillas corrientes. Retienen los trozos gruesos, sólidos; los trituran despacio y dejan pasar el material fino. El material que ya era fino antes cae sin ningún obstáculo y atraviesa rápidamente el horno. Esto es, justamente, lo que no interesa. Se ha de conseguir que el contenido del horno descienda de igual forma en toda la sección.

Este requisito de repartir por igual material duro y blando, compacto y poroso, no parece asequible a primera vista. El aire se ha de distribuir por igual en toda la sección. Las experiencias realizadas han conducido a un nuevo tipo de parrilla, en diversos modelos. El clínker debe ser cogido y desmenuzado en toda la sección del horno; y la parrilla, con sección escalonada, no debe dejar caer el clínker a su través. El clínker es conducido a un dispositivo de distribución, regulable, que debe sincronizarse con el dispositivo -

de trituración, que estaciona un exceso de material triturado, sobre el cual se apoya el contenido del horno.

Las figuras 5-11 presentan diferentes ejemplos de realización del nuevo tipo de parrilla.

RESULTADOS OBTENIDOS CON LA NUEVA PARRILLA

En los ensayos previos realizados en frío, se llenó el horno de clínker finamente triturado. Se consiguió un descenso completamente igual en toda la superficie del clínker. Los ensayos de combustión con carbón sin pulverizar, así como con carbón pulverizado condujeron a un funcionamiento permanente ininterrumpido. Asimismo, desapareció el temor de que el fuego se debilitase durante un cierto tiempo.

Antes, y por esta razón, se trabajaba con exagerada precaución, con un exceso de carbón; pero el coste es elevado y se obtiene clínker reducido. Con la nueva parrilla se puede trabajar en el límite inferior de consumo de carbón, sin que haya que temer ninguna dificultad. En los ensayos realizados se observó, no solamente con carbón no pulverizado, sino también pulverizado, una regularidad del funcionamiento del horno, como no se conocía con los antiguos procedimientos utilizados.

En el caso de carbón pulverizado se observó que el fuego lateral no podía subir tanto como antes. Entonces, se llenó el cono del horno sólo hasta la mitad. El fuego lateral y el central se hicieron, de esta forma, iguales. Esta observación está de acuerdo con las primeras experiencias, en las que se comprobó que la retracción en la parte exterior es menor, en el caso de carbón pulverizado. No

hay ninguna duda, de que la forma de embudo de la zona de cocción de be ajustarse a este hecho.

El consumo de calor descendió de 1100 a 960 kcal/kg de clinker. Esta reducción inesperada no aparecía clara al principio, pues el clinker se presentaba perfectamente cocido. La explicación se encuentra en la distribución por igual del aire en el horno. Las medidas realizadas en los gases de escape dieron, en el centro y en los bordes del horno, casi el mismo contenido de CO, mientras que ya estábamos acostumbrados a no encontrar apenas CO en el borde, sino un exceso de aire, y en cambio grandes cantidades de CO en el centro.

En este caso de funcionamiento regular del horno no es extraño que el clinker presente una calidad regular poco corriente. La mayor parte se componía de gránulos sueltos y hacía por ello la sensación de clinker de horno rotatorio. Únicamente, en pequeña proporción, pequeñas porciones se habían comprimido juntas para formar trozos compactos y reducidos. El contenido medio de FeO era 0,2%. Un valor tan pequeño no se había alcanzado nunca. Ascende a 1/3 de lo que era corriente.

Un polvo mal mezclado influye perjudicialmente en el horno vertical, no solo directamente sobre la composición del clinker, si no también, indirectamente, sobre la regularidad del funcionamiento del horno.

Hay que indicar también que con carbón pulverizado, sin efecto perjudicial de cenizas, no solamente se puede cocer clinker, sino buen clinker, con pequeño consumo de calor.

PLATO GRANULADOR

Hasta ahora la longitud del fuego, la velocidad de reacción, etc. dependían ampliamente del tamaño del grano de carbón, que

por lo general no podía controlarse por completo; actualmente, es el tamaño de los gránulos el principal factor que influye sobre la longitud del fuego. Con gránulos del tamaño de una nuez, aproximadamente, el fuego era tan largo que la parrilla ya se ponía caliente. Por el contrario, con gránulos finos, de pocos milímetros, el fuego era tan corto que no podía obtenerse ninguna zona de fuego coherente, y ya no era posible un funcionamiento permanente. El plato granulador apareció, pues, como un instrumento ideal, ya que no sólo proporciona gránulos de un solo tamaño, que permiten un paso de aire especialmente favorable, sino que facilita el variar a voluntad su tamaño.

EL HORNO VERTICAL, ¿UN GENERADOR?

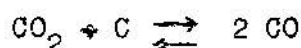
Se ha refutado, gracias a los ensayos citados anteriormente, la consideración de que la combustión con carbón pulverizado era antieconómica. Sin embargo, no carece del todo de fundamento. Es to lo prueba el alto contenido de CO de los gases de escape.

Comparemos la combustión en horno vertical y la combustión de polvo de carbón. En una combustión de polvo de carbón rige el principio de corrientes paralelas. Aire y carbón se introducen juntos en corrientes paralelas, se calientan y arden. La relación carbón/oxígeno puede regularse y permanece constante durante el proceso de combustión. También una combustión en parrilla trabaja según el mismo principio. Se puede variar a voluntad la relación combustible/aire, por variación de la velocidad de inyección o de la cantidad indicada de combustible.

En el horno vertical es completamente diferente. En él rige el principio de contracorriente. En la boca fría del horno existe exceso de combustible; en la parrilla, exceso de oxígeno. Una in

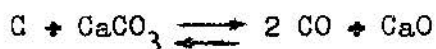
yección de aire más fuerte o más débil no varía nada; solamente cambia la velocidad del progreso del fuego. Siempre domina arriba, en la zona de precalefacción, una atmósfera reductora; y en la zona de enfriamiento, oxidante. En la zona de combustión debe existir una atmósfera neutral.

Sigamos a un gránulo de crudo-combustible, a lo largo de su camino a través de las diversas zonas. Se calienta, en primer lugar, superficialmente, mediante los gases calientes de combustión. Estos gases no contienen ya oxígeno, pero sí mucho CO_2 . Cuando se alcanza en la superficie de los gránulos una temperatura de $600-700^\circ\text{C}$, tiene lugar, en dicha superficie, la reacción de Boudouard



El CO es arrastrado a las capas más frías; después es expulsado. No puede arder más, debido a la falta de oxígeno.

De la zona de precalefacción, el gránulo, que ha perdido el carbón de su superficie, alcanza, después de algún tiempo, la zona de cocción, profunda, en la que abunda el oxígeno. Las capas internas de los gránulos llegan a alcanzar la temperatura de reacción. El carbón reacciona con el CO_2 , que se libera de la caliza, según la reacción de Hauenschild



El CO así formado alcanza la superficie de los gránulos y encuentra allí O_2 , con el que puede arder.

El inconveniente se encuentra en que el carbón se pone en contacto con los gases de escape, calientes, libres de oxígeno. Este hecho debe evitarse. El carbón debería introducirse herméticamente -

aislado, a través de la zona de precalentamiento, en la zona de cocción, con lo cual se impediría la reacción de Boudouard. Con este - fin se sigue el siguiente método.

METODO DE FORMACION DE CORTEZA

Este procedimiento se basa en crear, sobre el gránulo, - una capa, de un espesor determinado, libre de carbón. Cuanto más gruesa sea la capa, más tarde entrará el carbón en reacción. Se puede esperar que en el caso de cortezas muy delgadas, aún aparece CO, y en el caso de un espesor justo de corteza desaparece el CO. En el caso de cortezas muy gruesas, se ha de esperar un exceso de O₂ en los gases de escape, debido a que el oxígeno no puede alcanzar el carbón.

Los gránulos no deben ser demasiados pequeños; deben tener todos el mismo tamaño, y el espesor de la corteza debe ser uniforme.

No se pueden alcanzar fácilmente estos requisitos. Para conseguir una corteza libre de carbón ya no sirve el sencillo procedimiento de espolvorear los gránulos húmedos para secarlos superficialmente. Se debe encontrar un proceso exacto de granulación, con adición de más agua y de un polvo, con un contenido determinado de - cal, pues ya no puede impurificarse por las cenizas, como ocurre en el núcleo.

Cuando se quiere evitar la molienda y la mezcla por separado de dos clases de polvos, unos para la corteza y otros para el - núcleo, existe la posibilidad de preparar la corteza con polvo de - olfínker.

RESULTADOS PRACTICOS OBTENIDOS CON EL PROCEDIMIENTO DE FORMACION DE CORTEZA

La corteza, de 10-20% de polvo crudo, fué cocida sin consumo adicional de carbón. El consumo de calor fué de unas 800 kcal/kg de clínker. Simultáneamente, el valor de CO en los gases de escape se redujo a 3/4 del valor original.

CONSIDERACIONES FINALES

Resumiendo, podemos formular el perfeccionamiento del horno vertical, en los pasados años, de la siguiente forma:

Además del conocido procedimiento de la doble cocción y algunas mejoras en los cierres de las compuertas, toberas y dispositivos de distribución, se ha introducido la zona de sinterización, en forma de embudo, con la que se ha conseguido una mejora notable.

Se pueden esperar otras mejoras, gracias al empleo de carbón pulverizado y del procedimiento de formación de corteza. Este último se halla aún en sus comienzos.

S. F. S.

- - -

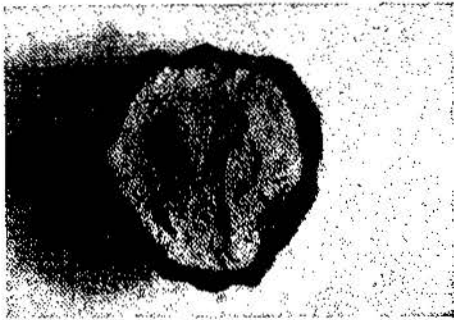


Fig. 1.



Fig. 2.



Fig. 3.

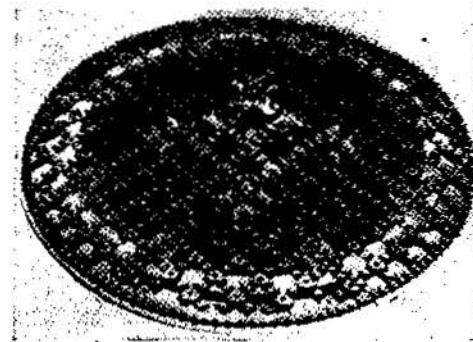


Fig. 4.

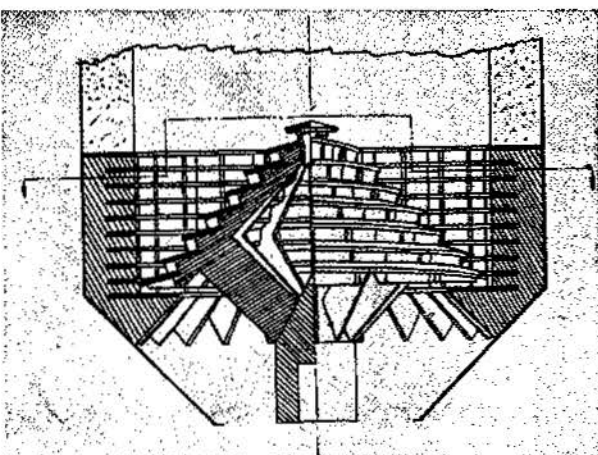


Fig. 5.

Fig 1.—Gránulo semicocido (empleando carbón pulverizado).

Fig. 2.—Avance de la zona de sinterización desde la superficie hacia el interior del gránulo.

Fig. 3.—Estructura en roseta del clinker, cocido con carbón pulverizado.

Fig. 4.—Modelo antiguo de parrilla.

Figs. 5 a 11.—Distintos tipos del nuevo modelo de parrilla.

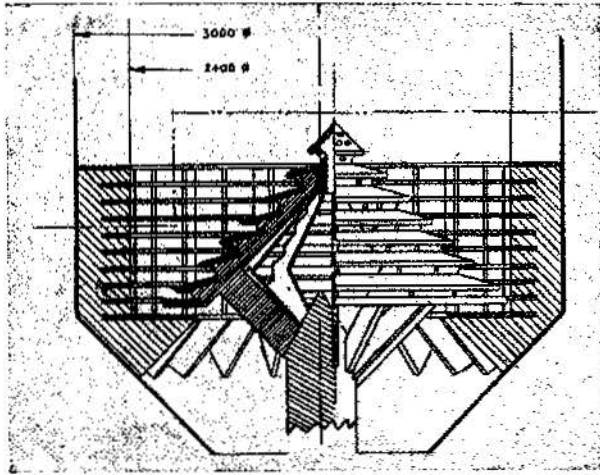


Fig. 6.

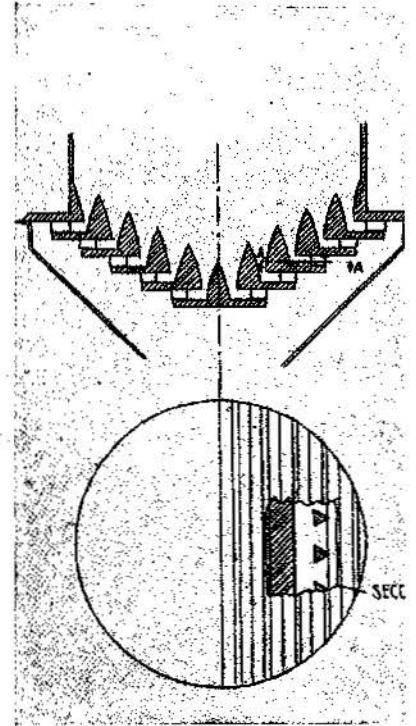


Fig. 7.

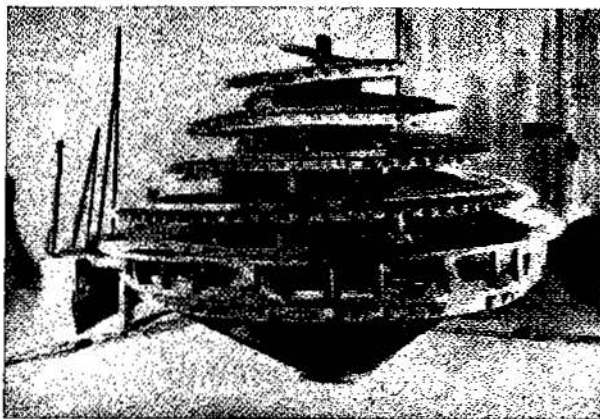


Fig. 8.



Fig. 9.

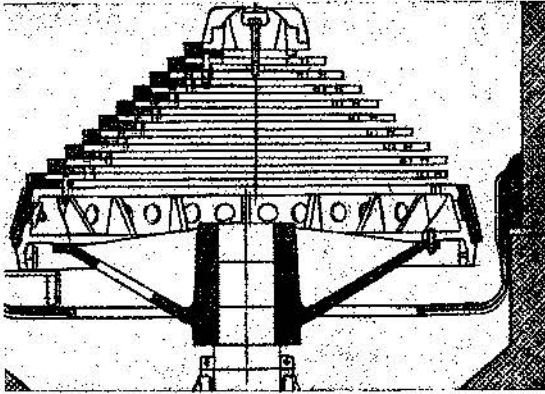


Fig. 10.

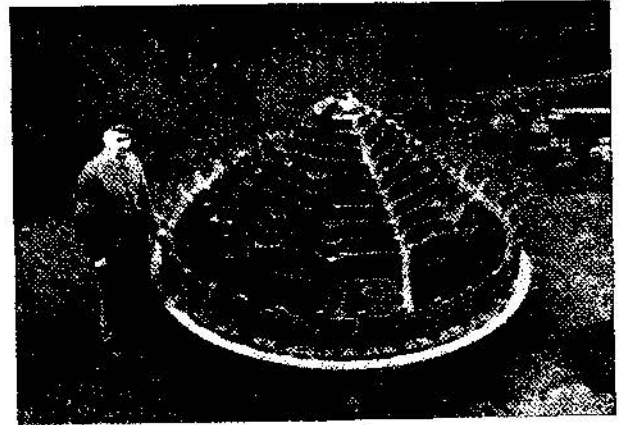


Fig. 11.

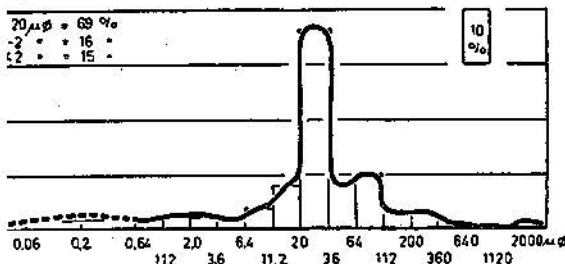


Fig. 12.

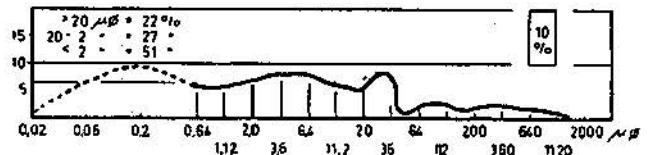
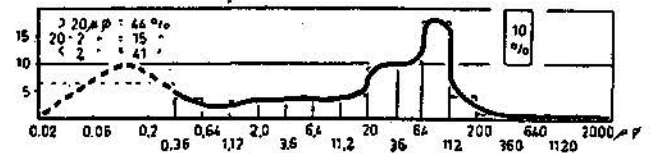
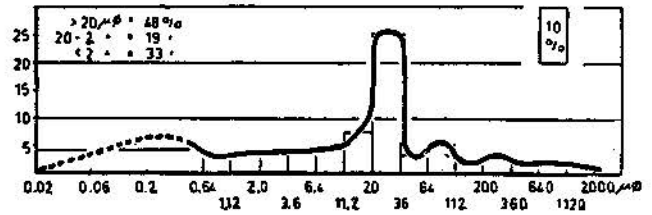


Fig. 14.

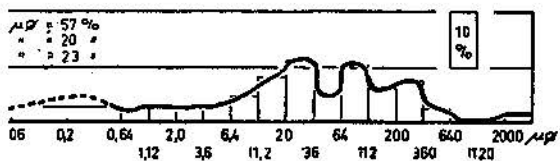
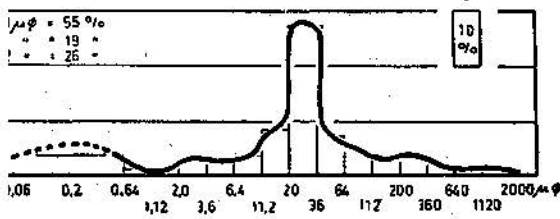


Fig. 13.

Fig. 12.—Composición granulométrica de una arcilla utilizada para la fabricación de ladrillos macizos.

Fig. 13.—Composición granulométrica de arcillas utilizadas para la fabricación de ladrillos multicelulares.

Fig. 14.—Composición granulométrica de arcillas utilizadas para la fabricación de tejas.