



CEMENTOS

Por MANUEL BENITEZ RAMÍREZ, INGENIERO DE CAMINOS

Fábrica de Cemento de la Confederación
Hidrográfica del Guadalquivir.
Vista aérea durante la construcción.

DESDE los tiempos más remotos el hombre ha sentido la necesidad de materiales que le sirviesen para unir las piedras naturales y artificiales que empleaba en las construcciones, usando para ese fin, primeramente, la arcilla, el yeso cocido y la cal, que únicamente endurecen en construcciones aéreas.

Un hecho indudablemente casual le hizo ver que ciertas arenas, al amasarlas con cal, daban morteros mucho más resistentes y que endurecían también en el agua.

Estando las más afamadas en el pueblecito de Pozzuoli, cerca de Nápoles, se les dió el nombre de puzolanas. También se vió que las arcillas cocidas y reducidas a polvo tenían propiedades análogas, extendiéndose el empleo de esta puzolana artificial en donde no se disponía de las naturales.

En todas las construcciones hechas por el hombre hasta mediados del siglo XVIII no se emplearon otros materiales aglomerantes que los citados, salvo contadísimas excepciones que no merece la pena citar.

El pueblo romano, que nos ha legado obras tan maravillosas como el Coliseo, Panteón Romano, la Basílica de Constantino, los numerosos puentes y acueductos que dejó esparcidos por

todo su Imperio, añadía a la cal puzolanas naturales o artificiales.

Durante todo este tiempo, la técnica de fabricación y empleo del principal material usado, la cal sola o con puzolanas, estuvo en manos de los prácticos que ejercían su oficio apoyándose en ciertas reglas rutinarias, muchas de ellas sin fundamento.

El gran paso que se dió en el conocimiento de estos materiales tuvo lugar cuando le prestaron su atención los Ingenieros.

En 1756 fué encargado por el Parlamento el Ingeniero inglés John Smeaton de la construcción de un nuevo faro en Eddystone, pues el que había fué destruído por un incendio, ya que se trataba de un entramado de madera sin ningún carácter de permanencia.

Eddystone es un grupo de escollos de rocas de gneis, situado al sur de Inglaterra, frente a la pintoresca costa de Cornualles. Está en la entrada sur del Canal de la Mancha, y gran número de naufragios exigía la construcción de un faro permanente.

Al encargarse Smeaton de su construcción, se esforzó en hacer una obra capaz de desafiar las terribles tormentas que se desencadenan en aquella costa.

Describe así la gran importancia que daba al aglomerante que enlazaba los sillares de piedra para la estabilidad de la obra.

“En la manera de trabajar la piedra antes descrita vi claramente que no solamente gran parte de la belleza y elegancia de la obra, sino también su verdadera solidez, depende de encontrar un cemento que alcance tan firme consistencia por sí mismo y adherencia a la piedra, a pesar del agua arrojada continuamente contra él en todos los grados de violencia, que rellene perfectamente y por completo las juntas, formando una superficie regular y unida con la piedra, sin necesitar refuerzos de hierro o cobre para rodear las juntas horizontales...”

Emprendió un estudio sistemático de los aglomerantes que hasta entonces se venían empleando.

“Me informé de que la composición generalmente empleada en las construcciones hidráulicas, tanto en las obras de piedra como en las de ladrillos, era la siguiente: dos medidas de cal apagada en polvo seco, mezclada con una medida de *tras* (*) holandés, y todo muy bien batido hasta que toma la consistencia de una pasta, empleándose la menor cantidad posible de agua, la cual, una vez fraguada, sigue endureciéndose sin estar aún completamente seca; con el tiempo aumenta en dureza, aun debajo del agua; ésta parece ser la clase de cemento adoptada para nuestro uso”.

“Habiendo oído que la cal producida por una clase de piedra encontrada en Aberthaw, en la costa de Glamorganshire, poseía las mismas cualidades de fraguar en el agua que el *tras* de Holanda, deseaba proporcionarme esta clase de piedra. Cuando la obtuve, la calciné, observando que requería mucho fuego, y que al apagarse se desmenuzaba en polvo muy fino. Antes de calcinarse es de color azul pálido, con muy pocas partículas brillantes; pero una vez calcinada y cernida, es de un reluciente color amarillo. Se hicieron dos bolas, cada una con la proporción dicha, y otro par de bolas con la cal común (la cual entiendo es la cal de Plymouth); la diferencia de dureza después de veinticuatro horas era muy notable. Las compuestas por dos medidas de cal de Aberthaw y una de *tras*, excedía considerablemente a la de la cal común y *tras* en partes iguales, y esta diferencia fué aumentando con el tiempo”.

(*) Se refiere a la puzolana de Andernach, muy usada entonces, que salía de Alemania por el Rin y se enviaba desde Holanda a Inglaterra.

Trató de averiguar las causas de estas diferencias en el comportamiento de las cales procedentes de diferentes calizas, para lo cual las disolvía en ácido nítrico, observando que las que dejaban un mayor residuo de substancia insoluble daban cales que se endurecían más cuando se amasaban con *tras*, moldeándolas en forma de bolas y sumergiéndolas en el agua.

Es interesante resaltar la siguiente observación que hizo al terminar sus ensayos:

“Con respecto a estas bolas que se mantenían constantemente bajo el agua, no parecen inclinadas a sufrir ningún cambio de forma, sino a adquirir una dureza gradual, tanto que no dudo que he de hacer un cemento que igualará la mejor piedra de Portland del mercado en solidez y duración”.

En este párrafo aparece por primera vez la palabra Portland relacionada con los aglomerantes.

Como es sabido, Portland es una pequeña isla enlazada por una lengua de tierra con la costa a unos 150 kilómetros al noreste de Eddystone. Allí se explotan magníficas canteras de piedra caliza con la que se han construido numerosos edificios monumentales en Londres, que la han hecho famosa.

El eminente químico alemán W. Michaelis hace el siguiente comentario en su obra *Morteros Hidráulicos*, 1869, sobre el descubrimiento de Smeaton:

“Una centuria ha transcurrido desde que el famoso Smeaton terminó la construcción del faro de Eddystone. Este se yergue como verdadera obra maestra y fué una luz en la oscura noche, no sólo para los navegantes, sino para todos los hombres; desde el punto de vista científico, iluminó la oscuridad reinante en cerca de dos mil años. Él es el cimiento sobre que se apoyan nuestros conocimientos de morteros hidráulicos, clave de la construcción moderna. Smeaton nos libró de las cadenas de la tradición, demostrándonos que la cal que procede de las calizas más puras y duras no es la mejor para fines hidráulicos y que el manantial de hidraulicidad había que buscarlo en las mezclas arcillosas”.

El famoso Ingeniero publicó el relato de la construcción del faro en 1791 (fig. 1.^a), y del mismo se desprende que cualquier caliza podía servir para fabricar cal del grado de hidraulicidad conveniente, sin más que mezclarla íntimamente con arcilla.

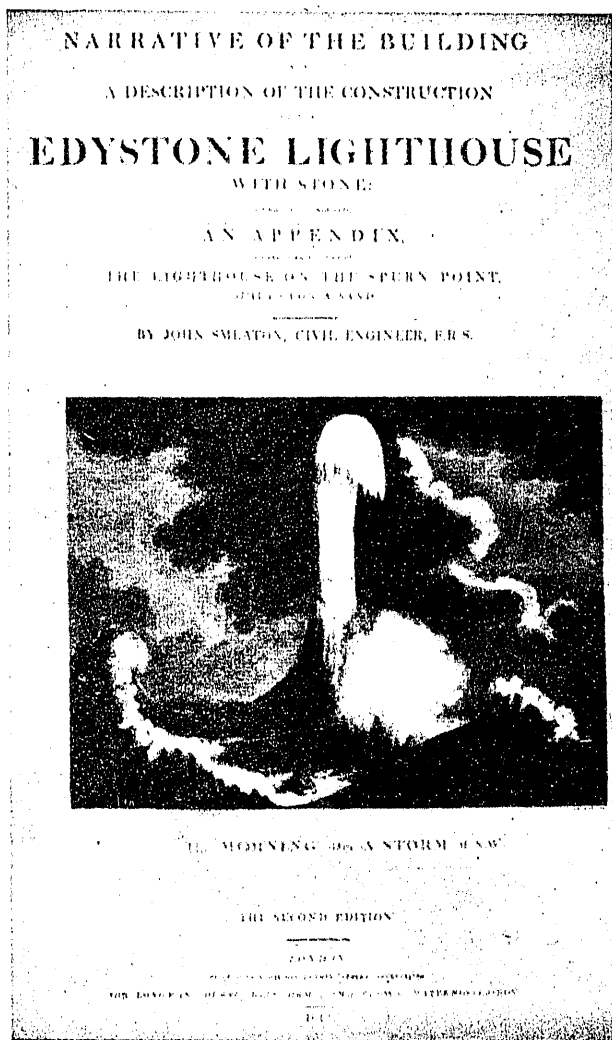


Fig. 1.^a—Portada del libro de Smeaton.

José Aspdin, en 1824, llevó a la práctica el procedimiento que se deducía de los anteriores trabajos, mezclando íntimamente la caliza y la arcilla y dando el nombre de *Cemento Portland* al producto que resultó de la mezcla calcinada. Por haber patentado el procedimiento se le tiene por el inventor del cemento portland.

El mismo procedimiento de obtención de aglomerantes hidráulicos siguió el Ingeniero francés Vicat.

Su famosa obra *Recherches expérimentales sur les chaux de construction, les bétons et les mortiers ordinaires*, apareció en 1818, aprobada por la Academia de Ciencias a continuación del dictamen de Prony, Gay-Lussac y Girard.

En ella, Vicat decía: "La fabricación de la cal hidráulica consiste en amasar cal apagada con

una cierta cantidad de arcilla gris o más sencillamente de la arcilla corriente de hacer ladrillos, haciendo con esta pasta bolas que se dejan secar, haciéndolas cocer a continuación hasta el grado conveniente.

Se comprende que pudiendo variar las proporciones, pueda darse a la cal fabricada el grado de energía que se desee, igualando o sobrepasando a voluntad la de las mejores cales naturales".

Para comprobar este descubrimiento, que debía tener una resonancia enorme, la Academia de Ciencias y el Cuerpo de Ingenieros de Puentes y Calzadas, nombraron una Comisión, delante de la cual el joven Ingeniero (tenía treinta y dos años), debía, con cal grasa y arcilla, fabricar cal hidráulica. Se echó en unas botellas pasta hecha con la cal que fabricó, acabándose de llenar con agua. Cuando transcurrió un año, volvió a reunirse la Comisión y los resultados fueron concluyentes, estando la pasta completamente petrificada.

Dió la clasificación de las cales hidráulicas, clásica en todos los tratados de materiales, y a su esfuerzo se debe la creación en Francia de una poderosa industria de aglomerantes hidráulicos.

En el terreno científico de determinar la constitución íntima del cemento portland apenas se hizo nada hasta que abordó el problema el genial Ingeniero francés Henry le Chatelier, que se propuso averiguar qué era el cemento.

Sus publicaciones comenzaron en 1882, pero su trabajo más importante apareció cuando publicó su tesis en 1887.

Bien pronto se dió cuenta de que el análisis químico decía bien poco sobre la constitución del cemento, siguiendo el camino de preparar placas delgadas del *clinker* y examinarlas al microscopio.

Como resultado de sus trabajos fué el primero que señaló como principales constituyentes del cemento portland el silicato bicálcico, SiO_2 , 2CaO , y el tricálcico, $\text{SiO}_2 \cdot 3 \text{CaO}$, si bien este último no logró prepararlo sintéticamente.

Largo ha sido el camino que los hombres de ciencia han seguido hasta llegar a un acuerdo sobre la constitución del cemento portland, pero al fin, después de cincuenta años de laboriosos trabajos, en los que se han puesto a contribución los adelantos científicos más modernos, en 1932 se ha llegado a la coincidencia.

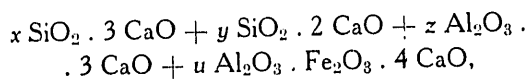
A ello han contribuido principalmente los investigadores americanos, a la cabeza de los cuales figura el eminente Dr. R. H. Bogue, que re-

cientemente dió en Madrid unas conferencias en el Instituto de la Construcción y del Cemento.

Sabemos, pues, hoy que el cemento portland está constituido por cuatro especies químicas principales: el silicato tricálcico, el silicato bicálcico, el aluminato tricálcico y aluminoferrito tetracálcico.

Estas cuatro sales unidas a pequeñas partes de cal libre, magnesia, sulfato cálcico y álcalis, constituyen todos los cementos portland, diferenciándose unos de otros en las cantidades que entran de ellas, con gran preponderancia, desde luego, de los silicatos.

Según esto, podríamos escribir una fórmula general de todos los cementos portland, que fuese:



diferenciándose unos cementos de otros en los valores de x , y , z y u .

Esta forma de estudiar el cemento portland está ya tan admitida, que comienza a entrar en los Pliegos oficiales de condiciones. Así vemos que el último Pliego americano considera cinco tipos de cemento portland, que son:

Tipo I, "para usar en construcciones de hormigón en general, en las que las propiedades específicas para los tipos II, III, IV y V no son necesarias".

Tipo II, o *cemento de moderado calor de endurecimiento*, "para usarlo en la fabricación de hormigón en general, expuesto a una acción de los sulfatos despreciable o donde se necesite un moderado calor de hidratación".

Tipo III, o *cemento de endurecimiento rápido*, "para emplearlo cuando se necesita una gran resistencia inicial".

Tipo IV, o *cemento de bajo calor*, "para usarlo cuando se necesite un calor de hidratación muy pequeño".

Tipo V, o *cemento resistente a los sulfatos*, "para emplear cuando se requiera una alta resistencia a los sulfatos".

En las condiciones químicas se señalan las cantidades límites de los cuatro compuestos fundamentales. Así, en los tipos II y IV el $\text{SiO}_2 \cdot 3 \text{ CaO}$ no pasará del 50 y 35 por 100; el $\text{SiO}_2 \cdot 2 \text{ CaO}$ será como mínimo 40 por 100 en

el tipo IV, y el $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3 \text{ CaO}$ no será mayor de 8, 15, 7 y 5 en los tipos II, III, IV y V, respectivamente.

La razón de estas limitaciones está, naturalmente, en el conocimiento de las propiedades de cada uno de los cuatro compuestos fundamentales que nos permite aumentar o disminuir el que nos interesa para que el cemento tenga en el grado máximo las cualidades que deseamos.

Así, por ejemplo, de todos es sabido los perjuicios que el calor de hidratación produce en los grandes macizos de hormigón al elevar fuertemente su temperatura.

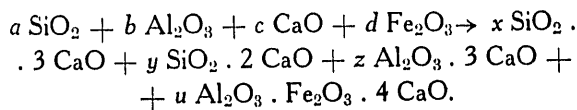
Sabiendo que el calor de hidratación del $\text{SiO}_2 \cdot 3 \text{ CaO}$, $\text{SiO}_2 \cdot 2 \text{ CaO}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3 \text{ CaO}$ y $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 4 \text{ CaO}$ son, respectivamente, 120, 62, 207 y 100 calorías por gramo, si queremos fabricar un cemento frío, es decir, de poco calor de hidratación, procuraremos que tenga mucho $\text{SiO}_2 \cdot 2 \text{ CaO}$, que da el mínimo, y poco $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3 \text{ CaO}$, que produce el máximo. De aquí que el Pliego americano señale para el cemento tipo IV un mínimo de 40 por 100 para el primero y un máximo de 7 por 100 para el segundo, limitando también el $\text{SiO}_2 \cdot 3 \text{ CaO}$ al 35 por 100.

Como reglas generales diremos que el silicato tricálcico es la sal que endurece más rápidamente, siendo fundamental en los supercementos. El bicálcico es la de menos calor de hidratación; su endurecimiento es lento, pero a larga fecha alcanza las mismas resistencias que el tricálcico. El aluminato tricálcico da gran calor de hidratación, siendo muy atacable por los sulfatos, y el aluminoferrito tetracálcico presenta poco calor de hidratación y es menos atacable por aquéllos.

Vemos, pues, la necesidad que tienen los Ingenieros de determinar fácilmente las cantidades de estas sales que tiene un cemento, a lo que se suele denominar su composición potencial, cuando se tiene el análisis químico.

Es un problema sencillo de estequiometría, de solución inmediata.

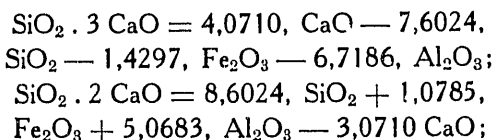
Supongamos conocida la composición centesimal de un cemento y llamemos a , b , c y d el número de moles (tantos por ciento divididos por sus pesos moleculares) que hay en 100 gr. de cemento, de sílice, alúmina, cal y óxido férrico, respectivamente; podemos escribir la ecuación:



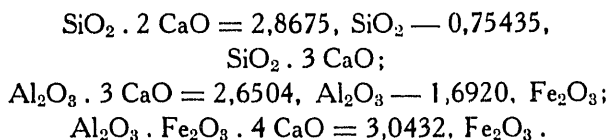
Igualando el número de moléculas de los cuatro óxidos en ambos miembros, de la anterior ecuación obtenemos:

$$\begin{aligned} a &= x + y; \\ b &= z + u; \\ c &= 3 \cdot x + 2 \cdot y + 3 \cdot z + 4 \cdot u; \\ d &= u. \end{aligned}$$

Sistema que, resuelto en x , y , z y u , y transformados los moles en gramos, nos da la composición potencial de un cemento cuando se conoce su análisis químico, obteniendo los siguientes valores:



o también:



Si en estas fórmulas sustituimos, en lugar de SiO_2 , Al_2O_3 , CaO y Fe_2O_3 , los tantos por ciento de estos óxidos obtenidos en el análisis químico corriente de un cemento, obtendremos la composición potencial del mismo.

Para facilitar su empleo existen tablas que se dan a continuación (tablas I a IV).

La única observación que hemos de hacer es que en la composición centesimal del cemento se ha de tener en cuenta la cantidad de cada óxido realmente combinada con los otros tres para formar la composición potencial. Así, de la cal total se restará la libre, si la hubiese, y la que está en forma de SO_4Ca , multiplicando el SO_3 por el factor 0,695.

Bogue da las siguientes cifras medias de las composiciones potenciales de los diferentes tipos de cemento del Pliego americano:

| | C_3S | C_2S | C_3A | C_4AF |
|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| Tipo I | 45 | 27 | 11 | 8 |
| Tipo II | 44 | 31 | 5 | 13 |
| Tipo III | 53 | 19 | 11 | 9 |
| Tipo IV | 28 | 49 | 4 | 12 |
| Tipo V | 38 | 43 | 4 | 9 |

Podemos tratar de resolver otro problema muy importante, que es tratar de fabricar un cemento que tenga una determinada composición potencial, partiendo de unas primeras materias cuyo análisis nos es conocido.

Supongamos que tenemos los siguientes análisis:

| | Caliza | Marga |
|--------------------------|---------------|---------------|
| Sílice | $s_1 = 4,60$ | $s_2 = 22,80$ |
| Alúmina | $a_1 = 0,64$ | $a_2 = 8,00$ |
| Oxido férrico | $f_1 = 0,55$ | $f_2 = 2,90$ |
| Cal | $c_1 = 51,60$ | $c_2 = 33,10$ |
| Magnesia | $m_1 = 0,72$ | $m_2 = 2,10$ |
| Anhídrido sulfúrico | $n_1 = 0,39$ | $n_2 = 0,93$ |
| Pérdida al fuego | $p_1 = 41,30$ | $p_2 = 29,20$ |
| Sin dosificar | 0,20 | 0,97 |
| | 100,00 | 100,00 |

Si ambos materiales los mezclamos y llamamos r la relación $\frac{\text{caliza}}{\text{marga}}$ por cada 100 Kg. de marga, entrarán en la mezcla 100 $\cdot r$ Kg. de caliza, y en total tendremos 100 (1 + r) Kg., donde habrá $s_2 + s_1 \cdot r$ Kg. de sílice, $a_2 + a_1 \cdot r$ Kg. de alúmina, ..., $p_2 + p_1 \cdot r$ Kg. de pérdida al fuego, etc. Después de calcinar, esta mezcla quedará reducida a 100 (1 + r) - ($p_2 + p_1 \cdot r$) = 100 - $p_2 + (100 - p_1) \cdot r$ Kg.; luego la composición centesimal del producto calcinado será:

$$\frac{(s_2 + s_1 \cdot r) 100}{100 - p_2 + (100 - p_1) r}$$

de sílice,

$$\frac{(a_2 - a_1 r) 100}{100 - p_2 + (100 - p_1) \cdot r}$$

de alúmina, etc.

Si en cualquiera de las fórmulas que hemos hallado para determinar la composición potencial de un cemento fijamos el valor de uno de los componentes y sustituimos los valores de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 y CaO del cemento resultante que acabamos de determinar en función de r , podemos hallar ésta, y el cemento que resulte de mezclar las primeras materias en esa relación tendrá la com-

posición potencial que hemos fijado previamente.

Supongamos, por ejemplo, que queremos fabricar con las anteriores primeras materias un cemento de grandes resistencias iniciales y para ello deseamos que tenga 67,5 por 100 de silicato tricálcico.

En la ecuación que nos da el valor de éste, sustituiremos en lugar de CaO, SiO₂, etc., los valores correspondientes a la composición química del

cemento resultante en función de r , y resultará:

$$67,5 = \frac{100 [4,0710 (33,1 + 51,6 r) - 7,6024 (22,8 + 4,6 r)]}{100 - 29,2 + (100 - 41,3) r} - \frac{100 [1,4297 (2,90 + 0,55 r) + 6,7186 (8 + 0,64 r)]}{100 - 29,2 + (100 - 41,3) r}$$

cuya ecuación resuelta con respecto a r nos da $r = \frac{14\,426,98}{13\,038,29} = 1,1$; es decir, que si mezclamos en esta relación las primeras materias poniendo

TABLA I. — Factores para el silicato tricálcico (SiO₂ . 3CaO).

| | CaO × 4.0710 | | | | | | | | | |
|----|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 10 | 40.71 | 44.78 | 48.85 | 52.92 | 56.99 | 61.07 | 65.14 | 69.21 | 73.28 | 77.35 |
| 20 | 81.42 | 85.49 | 89.56 | 93.63 | 97.70 | 101.78 | 105.85 | 109.92 | 113.99 | 118.06 |
| 30 | 122.13 | 126.20 | 130.27 | 134.34 | 138.41 | 142.49 | 146.57 | 150.63 | 154.70 | 158.77 |
| 40 | 162.84 | 166.91 | 170.98 | 175.05 | 179.12 | 183.20 | 187.27 | 191.34 | 195.41 | 199.48 |
| 50 | 203.55 | 207.62 | 211.69 | 215.76 | 219.83 | 223.91 | 227.98 | 232.05 | 236.12 | 240.19 |
| 60 | 244.26 | 248.33 | 252.40 | 256.47 | 260.54 | 264.62 | 268.69 | 272.76 | 276.83 | 280.90 |
| 70 | 284.97 | 289.04 | 293.11 | 297.18 | 301.25 | 305.33 | 309.40 | 313.47 | 317.54 | 321.61 |
| 80 | 325.68 | 329.75 | 333.82 | 337.89 | 341.96 | 346.04 | 350.11 | 354.18 | 358.25 | 362.32 |
| 90 | 366.39 | 370.46 | 374.53 | 378.60 | 382.67 | 386.74 | 390.82 | 394.89 | 398.96 | 403.03 |
| | SiO ₂ × 7.6024 | | | | | | | | | |
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 10 | 76.02 | 83.63 | 91.23 | 98.83 | 106.43 | 114.04 | 121.64 | 129.24 | 136.84 | 144.45 |
| 20 | 152.05 | 159.65 | 167.25 | 174.86 | 182.46 | 190.06 | 197.66 | 205.26 | 212.87 | 220.45 |
| 30 | 228.07 | 235.67 | 243.28 | 250.88 | 258.48 | 266.08 | 273.69 | 281.29 | 288.89 | 296.49 |
| 40 | 304.10 | 311.70 | 319.30 | 326.90 | 334.51 | 342.11 | 349.71 | 357.31 | 364.92 | 372.52 |
| 50 | 380.12 | 387.72 | 395.32 | 402.93 | 410.53 | 418.13 | 425.73 | 433.34 | 440.94 | 448.54 |
| 60 | 456.14 | 463.75 | 471.35 | 478.95 | 486.55 | 494.16 | 501.76 | 509.36 | 516.96 | 524.57 |
| 70 | 532.17 | 539.77 | 547.37 | 554.98 | 562.58 | 570.18 | 577.78 | 585.38 | 592.99 | 600.59 |
| 80 | 608.19 | 615.79 | 623.40 | 631.00 | 638.60 | 646.20 | 653.81 | 661.41 | 669.01 | 676.61 |
| 90 | 684.22 | 691.82 | 699.42 | 707.02 | 714.63 | 722.22 | 729.83 | 737.43 | 745.04 | 752.64 |
| | Fe ₂ O ₃ × 1.4297 | | | | | | | | | |
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 10 | 14.30 | 15.73 | 17.16 | 18.59 | 20.02 | 21.45 | 22.88 | 24.30 | 25.73 | 27.16 |
| 20 | 28.59 | 30.02 | 31.45 | 32.88 | 34.31 | 35.74 | 37.17 | 38.60 | 40.03 | 41.46 |
| 30 | 42.89 | 44.32 | 45.75 | 47.18 | 48.61 | 50.04 | 51.47 | 52.90 | 54.33 | 55.76 |
| 40 | 57.19 | 58.62 | 60.05 | 61.48 | 62.91 | 64.34 | 65.77 | 67.20 | 68.63 | 70.06 |
| 50 | 71.49 | 72.91 | 74.34 | 75.77 | 77.20 | 78.63 | 80.06 | 81.49 | 82.92 | 84.35 |
| 60 | 85.79 | 87.21 | 88.64 | 90.07 | 91.50 | 92.93 | 94.36 | 95.79 | 97.22 | 98.65 |
| 70 | 100.08 | 101.51 | 102.94 | 104.37 | 105.80 | 107.23 | 108.66 | 110.09 | 111.52 | 112.95 |
| 80 | 114.38 | 115.81 | 117.24 | 118.67 | 120.09 | 121.52 | 122.95 | 124.38 | 125.81 | 127.25 |
| 90 | 128.67 | 130.10 | 131.53 | 132.96 | 134.39 | 135.82 | 137.25 | 138.68 | 140.11 | 141.54 |
| | Al ₂ O ₃ × 6.7186 | | | | | | | | | |
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 10 | 67.19 | 73.90 | 80.62 | 87.34 | 94.06 | 100.78 | 107.50 | 114.22 | 120.93 | 127.65 |
| 20 | 134.37 | 141.09 | 147.81 | 154.53 | 161.25 | 167.97 | 174.68 | 181.40 | 188.12 | 194.84 |
| 30 | 201.56 | 208.28 | 215.00 | 221.71 | 228.43 | 235.15 | 241.87 | 248.59 | 255.31 | 262.03 |
| 40 | 268.74 | 275.46 | 282.18 | 288.90 | 295.62 | 302.34 | 309.06 | 315.77 | 322.49 | 329.21 |
| 50 | 335.93 | 342.65 | 349.37 | 356.09 | 362.80 | 369.52 | 376.24 | 382.96 | 389.68 | 396.40 |
| 60 | 403.12 | 409.83 | 416.55 | 423.27 | 429.99 | 436.71 | 443.43 | 450.15 | 456.86 | 463.58 |
| 70 | 470.30 | 477.02 | 483.74 | 490.46 | 497.18 | 503.90 | 510.61 | 517.33 | 524.05 | 530.77 |
| 80 | 537.49 | 544.21 | 550.93 | 557.64 | 564.36 | 571.08 | 577.80 | 584.52 | 591.24 | 597.96 |
| 90 | 604.67 | 611.39 | 618.11 | 624.83 | 631.55 | 638.27 | 644.99 | 651.70 | 658.42 | 665.14 |

TABLA II. — Factores para el silicato bicálcico ($\text{SiO}_2 \cdot 2\text{CaO}$).

| | $\text{SiO}_2 \times 2.8675$ | | | | | | | | | |
|----|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 10 | 28.68 | 31.54 | 34.41 | 37.28 | 40.15 | 43.01 | 45.88 | 48.75 | 51.62 | 54.48 |
| 20 | 57.35 | 60.22 | 63.09 | 65.95 | 68.82 | 71.69 | 74.56 | 77.42 | 80.29 | 83.16 |
| 30 | 86.03 | 88.89 | 91.76 | 94.63 | 97.50 | 100.36 | 103.23 | 106.10 | 108.97 | 111.83 |
| 40 | 114.70 | 117.57 | 120.44 | 123.30 | 126.17 | 129.04 | 131.91 | 134.77 | 137.64 | 140.51 |
| 50 | 143.38 | 146.24 | 149.11 | 151.98 | 154.85 | 157.71 | 160.58 | 163.45 | 166.32 | 169.18 |
| 60 | 172.05 | 174.92 | 177.79 | 180.65 | 183.52 | 186.39 | 189.26 | 192.12 | 194.99 | 197.86 |
| 70 | 200.73 | 203.59 | 206.46 | 209.33 | 212.20 | 215.06 | 217.93 | 220.80 | 223.67 | 226.53 |
| 80 | 229.40 | 232.27 | 235.14 | 238.00 | 240.87 | 243.74 | 246.61 | 249.47 | 252.34 | 255.21 |
| 90 | 258.08 | 260.94 | 263.81 | 266.68 | 269.55 | 272.41 | 275.28 | 278.15 | 281.02 | 283.88 |

| | $\text{C}_3\text{S} \times 0.75435$ | | | | | | | | | |
|----|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 10 | 7.54 | 8.30 | 9.05 | 9.81 | 10.56 | 11.32 | 12.07 | 12.12 | 13.58 | 14.33 |
| 20 | 15.09 | 15.84 | 16.60 | 17.35 | 18.10 | 18.86 | 19.61 | 20.37 | 21.12 | 21.88 |
| 30 | 22.63 | 23.38 | 24.14 | 24.89 | 25.65 | 26.40 | 27.16 | 27.91 | 28.67 | 29.42 |
| 40 | 30.17 | 30.93 | 31.68 | 32.44 | 33.19 | 33.95 | 34.70 | 35.45 | 36.21 | 36.96 |
| 50 | 37.72 | 38.47 | 39.23 | 39.98 | 40.73 | 41.49 | 42.27 | 43.00 | 43.75 | 44.51 |
| 60 | 45.26 | 46.02 | 46.77 | 47.52 | 48.28 | 49.03 | 49.79 | 50.54 | 51.30 | 52.05 |
| 70 | 52.80 | 53.56 | 54.31 | 55.07 | 55.82 | 56.58 | 57.33 | 58.08 | 58.84 | 59.59 |
| 80 | 60.35 | 61.10 | 61.86 | 62.61 | 63.37 | 64.12 | 64.87 | 65.63 | 66.38 | 67.14 |
| 90 | 67.89 | 68.65 | 69.40 | 70.15 | 70.91 | 71.66 | 72.42 | 73.17 | 73.93 | 74.68 |

TABLA III. — Factores para el aluminato tricálcico ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaO}$).

| | $\text{Al}_2\text{O}_3 \times 2.6504$ | | | | | | | | | |
|----|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 10 | 26.50 | 29.15 | 31.80 | 34.46 | 37.11 | 39.76 | 42.41 | 45.06 | 47.71 | 50.36 |
| 20 | 53.01 | 55.66 | 58.31 | 60.96 | 63.61 | 66.26 | 68.91 | 71.56 | 74.21 | 76.86 |
| 30 | 79.51 | 82.16 | 84.81 | 87.46 | 90.11 | 92.76 | 95.41 | 98.06 | 100.72 | 103.37 |
| 40 | 106.02 | 108.67 | 111.32 | 113.97 | 116.62 | 119.27 | 121.92 | 124.57 | 127.22 | 129.87 |
| 50 | 132.52 | 135.17 | 137.82 | 140.47 | 143.12 | 145.77 | 148.42 | 151.07 | 153.72 | 156.37 |
| 60 | 159.02 | 161.67 | 164.32 | 166.98 | 169.63 | 172.28 | 174.93 | 177.58 | 180.23 | 182.88 |
| 70 | 185.53 | 188.18 | 190.83 | 193.48 | 196.13 | 198.78 | 201.43 | 204.08 | 206.73 | 209.38 |
| 80 | 212.03 | 214.68 | 217.33 | 219.98 | 222.63 | 225.28 | 227.93 | 230.58 | 233.24 | 235.89 |
| 90 | 238.54 | 241.19 | 243.84 | 246.49 | 249.14 | 251.79 | 254.44 | 257.09 | 259.74 | 262.39 |

| | $\text{Fe}_2\text{O}_3 \times 1.6920$ | | | | | | | | | |
|----|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 10 | 16.92 | 18.61 | 20.30 | 22.00 | 23.69 | 25.38 | 27.07 | 28.76 | 30.46 | 32.15 |
| 20 | 33.84 | 35.53 | 37.22 | 38.92 | 40.61 | 42.30 | 43.99 | 45.68 | 47.38 | 49.07 |
| 30 | 50.76 | 52.45 | 54.14 | 55.84 | 57.53 | 59.22 | 60.91 | 62.60 | 64.30 | 65.99 |
| 40 | 67.68 | 69.37 | 71.06 | 72.76 | 74.45 | 76.14 | 77.83 | 79.52 | 81.22 | 82.91 |
| 50 | 84.60 | 86.29 | 87.98 | 89.68 | 91.37 | 93.06 | 94.75 | 96.44 | 98.14 | 99.83 |
| 60 | 101.52 | 103.21 | 104.90 | 106.60 | 108.29 | 109.98 | 111.67 | 113.36 | 115.06 | 116.75 |
| 70 | 118.44 | 120.13 | 121.82 | 123.52 | 125.21 | 126.90 | 128.59 | 130.28 | 131.98 | 133.67 |
| 80 | 135.36 | 137.05 | 138.74 | 140.44 | 142.13 | 143.82 | 145.51 | 147.20 | 148.90 | 150.59 |
| 90 | 152.28 | 153.97 | 155.66 | 157.36 | 159.05 | 160.74 | 162.43 | 164.12 | 165.82 | 167.51 |

TABLA IV. — Factores para el aluminoferrito tetracálcico ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{CaO}$).

| | $\text{Fe}_2\text{O}_3 \times 3.0432$ | | | | | | | | | |
|----|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 10 | 30.43 | 33.48 | 36.52 | 39.50 | 42.60 | 45.65 | 48.69 | 51.73 | 54.78 | 57.82 |
| 20 | 60.86 | 63.91 | 66.95 | 69.99 | 73.04 | 76.08 | 79.12 | 82.17 | 85.21 | 88.25 |
| 30 | 91.30 | 94.34 | 97.38 | 100.43 | 103.47 | 106.51 | 109.56 | 112.60 | 115.64 | 118.68 |
| 40 | 121.73 | 124.77 | 127.81 | 130.86 | 133.90 | 136.94 | 139.99 | 143.03 | 146.07 | 149.12 |
| 50 | 152.16 | 155.20 | 158.25 | 161.29 | 164.33 | 167.38 | 170.42 | 173.46 | 176.51 | 179.55 |
| 60 | 182.59 | 185.64 | 188.68 | 191.72 | 194.76 | 197.80 | 200.85 | 203.89 | 206.94 | 209.98 |
| 70 | 213.02 | 216.07 | 219.11 | 222.15 | 225.20 | 228.24 | 231.28 | 234.33 | 237.37 | 240.41 |
| 80 | 243.46 | 246.50 | 249.54 | 252.59 | 255.63 | 258.67 | 261.72 | 264.76 | 267.80 | 270.84 |
| 90 | 273.89 | 276.93 | 279.97 | 283.02 | 286.06 | 289.10 | 292.15 | 295.19 | 298.23 | 301.28 |

por cada 100 Kg. de marga 110 de caliza, obtendremos un cemento cuya composición será:

| | | | |
|-------------------------|---|-------|--------|
| Sílice. | $\frac{22,8 + 4,6 \cdot 1,1}{100 - 29,2 + (100 - 41,3) 1,1}$ | 100 = | 20,80 |
| Alúmina. . . . | $\frac{8,00 + 0,64 \cdot 1,1}{100 - 29,2 + (100 - 41,3) 1,1}$ | 100 = | 6,49 |
| Oxido férrico | $\frac{2,9 + 0,55 \cdot 1,1}{100 - 29,2 + (100 - 41,3) 1,1}$ | 100 = | 2,62 |
| Cal. | $\frac{33,1 + 51,6 \cdot 1,1}{100 - 29,2 + (100 - 41,3) 1,1}$ | 100 = | 67,04 |
| Magnesia. . . . | $\frac{2,1 + 0,72 \cdot 1,1}{100 - 29,2 + (100 - 41,3) 1,1}$ | 100 = | 2,16 |
| Sin dosificar | | | 0,89 |
| | | | 100,00 |

y con la composición potencial siguiente:

| | |
|---------------------------------------|-------|
| Silicato tricálcico | 67,50 |
| Silicato bicálcico | 8,80 |
| Aluminato tricálcico | 12,80 |
| Aluminoferrito tetracálcico | 8,00 |

Si tratamos de averiguar su resistencia, podemos aplicar la fórmula que da Bogue en la página 560 de la edición española, y obtenemos la cifra de 340 Kg./cm.², a los veintiocho días, para cilindros de hormigón de 1 : 3,4 : 3,6, de doble altura que el diámetro.

Si quisiéramos conseguir con las mismas primeras materias fabricar un cemento resistente a los sulfatos que tuviese una cantidad de $Al_2O_3 \cdot 3CaO = 5$, escribiríamos la ecuación de condición en función de r y obtendríamos $r = 5,87$, pero veríamos que esta solución era absurda, pues al deducir la cal que tendría el cemento resultante encontraríamos 81 por 100, cifra que no es posible combinar en el horno.

Vemos que no se puede, en una fábrica donde corrientemente se emplean dos primeras materias, obtener cualquier tipo de cemento mezclándolas.

Para resolver la dificultad se sigue ordinariamente el procedimiento de trabajar con más de dos primeras materias; así, además de la caliza y arcilla, se emplean la arena silícea y el óxido férrico.

Los americanos han ampliado dicho proceso, quitando de las primeras materias disponibles el óxido que se halla en exceso. Para ello siguen el procedimiento de la flotación, que fué aplicado

por primera vez a la industria del cemento por Mr. Charles H. Breerwood en la Valley Force Cement Co. de los Estados Unidos.

Consiste en agitar el material crudo finamente molido, con agua, en una cámara de flotación (fig. 2.^a), en la que se añade una pequeña cantidad de un agente espumoso. Estos agentes varían según sea la substancia que deseamos separar. Suelen ser mezclas de alcoholes, resinosos diluidos, ácido oleico, ácidos grasos de aceite de pescado y sus emulsiones, y jabones. El proceso lleva consigo una combinación de molienda, clasificación, flotación y concentración, adaptado a los requerimientos específicos del cemento y a las características de las primeras materias.

Como ejemplo de aplicación del sistema Breerwood, que los americanos consideran "el más importante avance, con mucho, en la industria del cemento desde el advenimiento del horno rotativo", damos la planta (fig. 3.^a) de la fábrica de la Universal Atlas Cement Company de Northampton, la más moderna e importante de las numerosas que hemos visitado en el valle de Lehigh (Pensilvania). Su capacidad de producción es de 400 000 toneladas anuales.

El citado sistema hace posible la producción de cualquiera de los tipos de cemento que hoy se exigen por el Pliego americano o puedan pedirse en el futuro.

La marga que extraen de la cantera, es molida por vía húmeda y la pasta se concentra por flotación.

Los análisis de la pasta al salir de los molinos

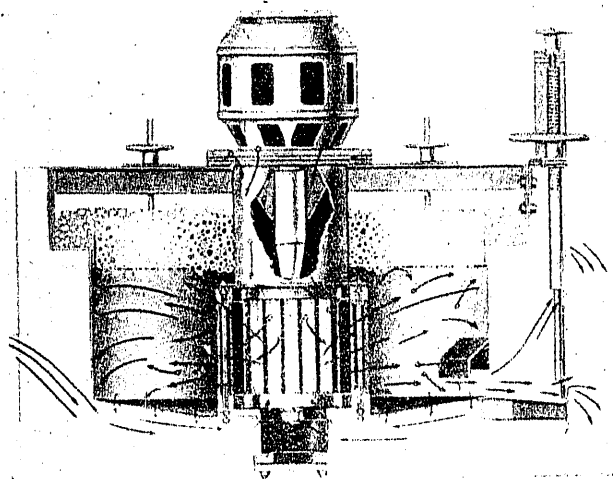


Fig. 2.^a — Diagrama de circulación en las cámaras de flotación. (La corriente de la pasta, está indicada por flechas llenas; la del aire inducido por el rotor, se indica por flechas con un circulito.

CINTA TRANSPORTADORA DE 76 CM DESDE LA ESTACION DE TRITURACION

SUBESTACION

TORRE DE REFRIGERACION

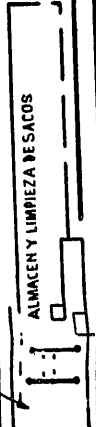
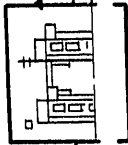
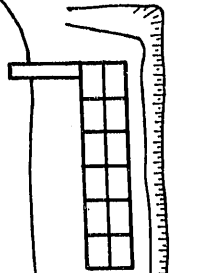
ARROYO DE HOKENDAQUA

CENTRAL DE TURBINAS

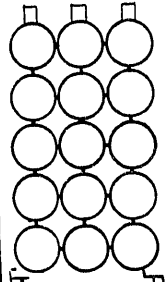
TUBERIA DE CARGA A GRANEL

ALMACEN DE FUEL OIL

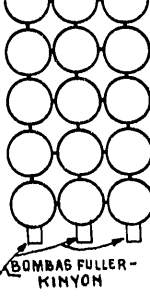
E LA BOMBA DE OIL



SILO DE CEMENTO GRIS



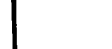
ENSACADORAS



BOMBAS FULLER-KINYON



BASCULAS DE VAGONES



ESTACION DE DESCARGA

GRUA N°1
ALMACEN DE MARGA
25,000 t.

ARENA 1500 t
CLASIFICADORES
DE ASTRILLO
MINERAL DE HIERRO
1300 t.

MOLINOS PRIMARIOS
YESO 900 t.

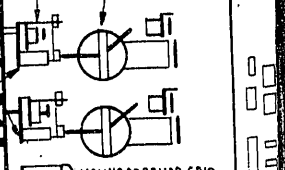
GRUA N°2
ALMACEN DE CLINKER GRIS
24,100 t.

DESCARGA DE CARBON
ALMACEN DE CARBON
YESO 450 t.

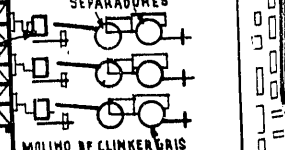
GRUA N°3
ALMACEN DE ARCILLA PARA CEMENTO BLANCO 450 t.

CALIZA PARA CEMENTO BLANCO 5500 t.

MOLINO PRIMARIO
CLASIFICADORES DE ALBERCA



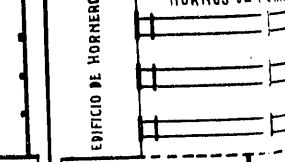
MOLINO DE CRUDO GRIS



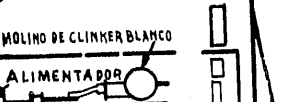
SEPARADORES
MOLINO DE CLINKER GRIS



MOLINO REFINADO



EDIFICIO DE HORNEROS
HORNEROS DE CEMENTO



MOLINO DE CLINKER BLANCO
ALIMENTADOR



MOLINO DE CRUDO BLANCO
ALIMENTADOR

ALMACEN DE GRASAS



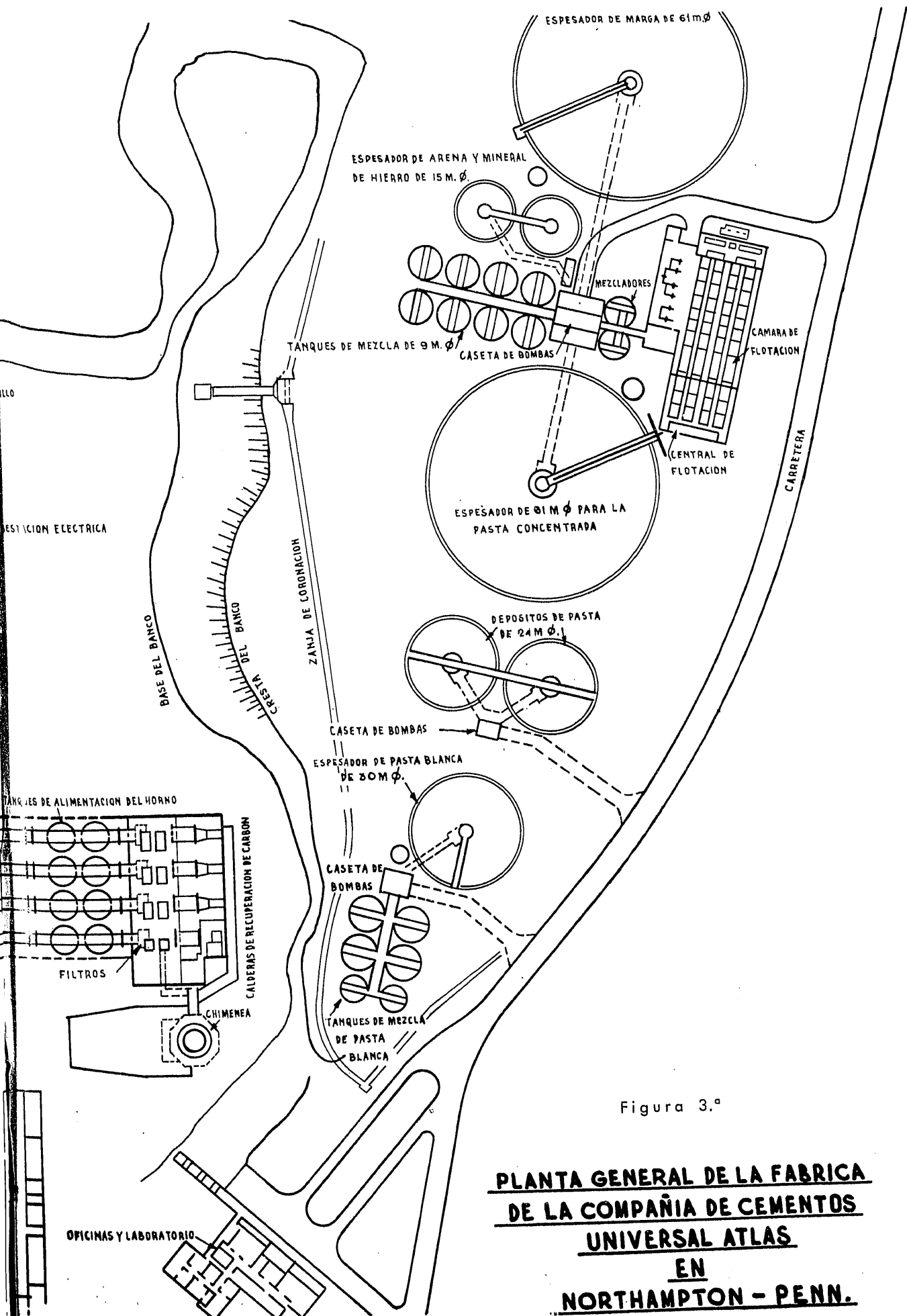


Figura 3.º

PLANTA GENERAL DE LA FABRICA
DE LA COMPAÑIA DE CEMENTOS
UNIVERSAL ATLAS
EN
NORTHAMPTON - PENN.

y después de pasar por las cámaras de flotación son los siguientes:

| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CO ₂ Ca | CO ₂ Mg |
|-----------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------|
| Marga sin tratar | 15,32 | 7,29 | 2,05 | 68,14 | 4,94 |
| Marga concentrada | 5,85 | 3,63 | 1,68 | 84,40 | 2,70 |
| Desecho de la flotación ... | 51,22 | 20,01 | 3,11 | 12,42 | 9,21 |

El desecho de la flotación se emplea como *filler* en la preparación de hormigones asfálticos para pavimentos de carreteras. Además de esta marga emplean arena silíceo y óxido férrico; así que las cuatro primeras materias fundamentales de la fábrica son:

1.^a Marga molida por vía húmeda en circuito cerrado a una finura de 92 por 100, pasando por el tamiz 200 (U. S. A.), de 74 micras de malla, almacenada en el espesador de 60 m. de diámetro.

2.^a Marga concentrada almacenada en el otro espesador de 60 m. de diámetro.

3.^a Arena silíceo molida separadamente y almacenada en el espesador de 15 metros de diámetro.

4.^a Óxido de hierro molido también independientemente y almacenado en otro espesador de 15 metros.

Si se trata de hacer los distintos tipos de cemento, se mezclan las pastas de la siguiente forma:

| Clase de cemento | Marga sin concentrar | Marga concentrada | Arena | Oxido férrico |
|--|----------------------|-------------------|---------|---------------|
| | Por 100 | Por 100 | Por 100 | Por 100 |
| Gris ordinario . . . | 62,8 | 37,2 | | |
| Moderado calor de hidratación . . . | | 93,5 | 5,8 | 0,7 |
| 10 % de Al ₂ O ₃ . . . | | 75,7 | 3,4 | 0,6 |
| . 3 CaO | 20,3 | 96,9 | 3,1 | |
| Supercemento . . . | | | | |

La pasta antes de entrar en el horno pasa por filtros que reducen el agua de 36 por 100 a 23 por 100, pero son tantos los interesantes detalles que recogimos de esta fábrica, que preferimos dejarlos para otro artículo, limitándonos a reproducir una vista del conjunto (fig. 4.^a).

Como hemos visto, entre los cinco tipos de cemento que figuran en el Pliego americano, el quinto se llama *Cemento resistente a los sulfatos*, y en las condiciones químicas figura para éste la limitación, de no pasar en su composición del 4 por 100 de alúmina y el 5 por 100 de Al₂O₃ . 3 CaO.

La razón de ello es la reacción de los sulfatos con el aluminato tricálcico hidratado Al₂O₃ 3 CaO . 12 H₂O, formándose sal de Candlot Al₂O₃ . 3 CaO . 3 SO₄Ca . 30 H₂O.

Estando el aluminato en forma sólida, esta reacción da lugar a un aumento de volumen de aproximadamente el 227 por 100, pudiendo ocasionar el agrietamiento y destrucción de las obras.

Este efecto ha sido comprobado con numerosas experiencias, pero generalmente el camino que se sigue para determinar si un cemento será o no resistente a los sulfatos es preparar probetas y sumergirlas en soluciones sulfatadas, esperando que transcurra el tiempo para ver el resultado, observando sus variaciones de longitud, resistencia o aspecto, después de conservarlas en soluciones de sulfatos hasta varios meses. Este procedimiento tiene dos notables inconvenientes. El tiempo requerido es excesivo y la forma de preparación de la probeta puede tener un pronunciado efecto en los resultados.

Existe un ensayo rápido para medir exactamente la susceptibilidad del cemento portland al ataque de las aguas sulfatadas que ha sido desarrollado por Taylor y Bogue, del National Bureau of Standards. El nuevo procedimiento, que determina la extensión con la cual los aluminatos del cemento pueden reaccionar con los iones sulfato presentes, no solamente reduce el tiempo requerido para el ensayo, de varias semanas o meses, a un día, sino que también proporciona resultados más valiosos que los métodos usados hasta ahora.

La resistencia a este tipo de ataque puede ser facilitada ya por la naturaleza química del cemento o por la forma de preparación del hormigón. Así, un hormigón que es casi impermeable al paso de soluciones, quedará inmune en aguas sulfatadas mucho más tiempo que otro pobre y poroso. No obstante, una mejora en la fabricación del hormigón atenúa simplemente la intensidad del ataque. Una gran resistencia a la acción agresiva de los sulfatos, únicamente puede alcanzarse usando cementos cuya composición química los hace naturalmente resistentes.

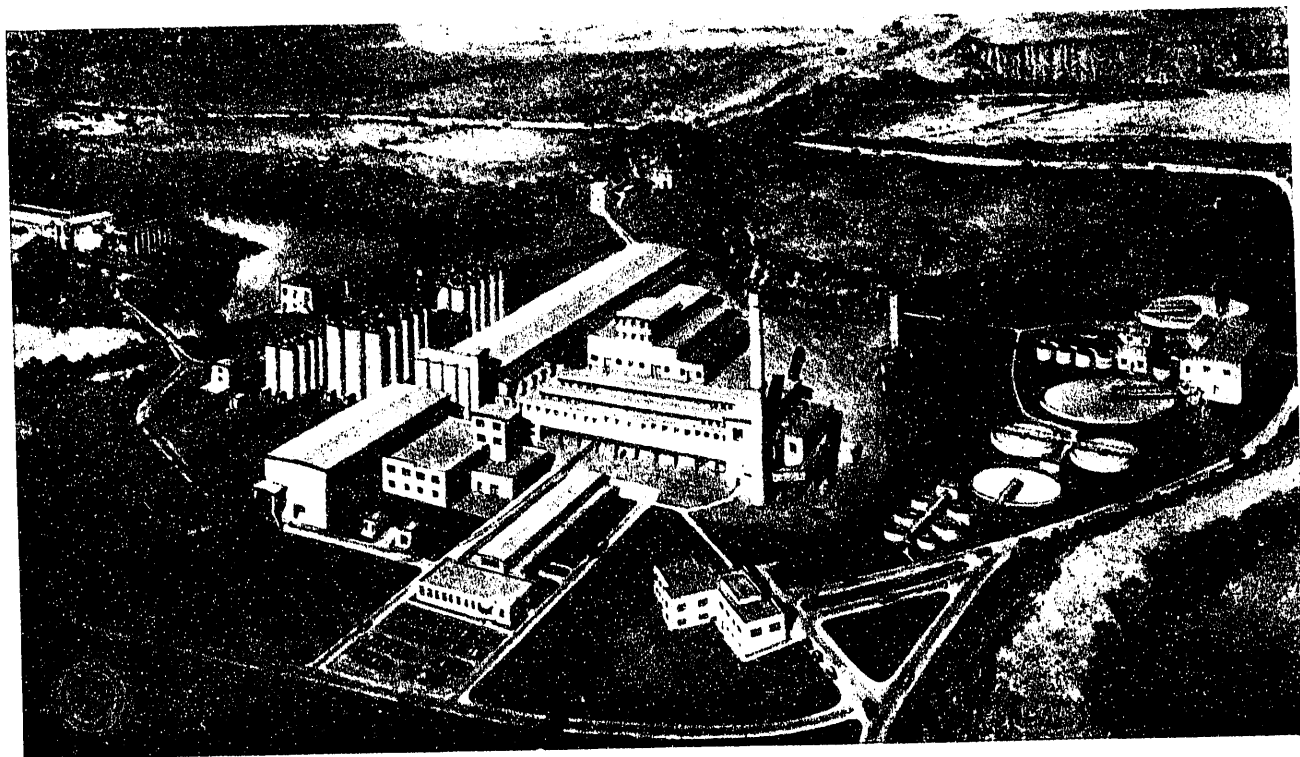


Fig. 4.^a — Fábrica de la Compañía de Cementos Universal Atlas en Northampton-Pensilvania.

Este ensayo mide la cantidad de sulfato que desaparece de la solución en un tiempo definido cuando una pequeña muestra del cemento (cuyo contenido de SO_3 se conoce) es agitada continuamente en una solución saturada de agua de cal. El sulfato del cemento se disuelve rápidamente en la mezcla líquida cemento-agua y reacciona con los aluminatos para formar el sulfoaluminato cálcico, difícilmente soluble. En el período inicial, que puede ser tan largo como de dos horas, la reacción tiene lugar rápidamente, pero después de cuatro, llega a ser mucho más lenta. Transcurridas seis horas, la concentración de sulfatos en la solución cambia tan lentamente que puede entonces medirse con muy poco error. La diferencia entre el contenido del SO_3 conocido en la muestra que se ensaya y el del líquido a las seis horas, calculase entonces como tanto por ciento del SO_3 que tenía el cemento y se designa como "valor de la reacción a los sulfatos". Este valor representa la cantidad de SO_3 que ha quedado en forma insoluble por reacción con los aluminatos, e indica así la susceptibilidad del cemento al ataque por las aguas sulfatadas.

Los valores de la reacción a los sulfatos obtenidos sobre un gran número de cementos en el

National Bureau of Standards han mostrado una gran correlación con el comportamiento de las probetas de morteros y hormigones de estos cementos que han sido conservadas en soluciones sulfatadas por algún tiempo. Los notables resultados obtenidos indican que es posible dividir los cementos en tres grupos con respecto a su susceptibilidad a los sulfatos. Así, un cemento teniendo un valor de reacción a los sulfatos de hasta 50, se puede esperar que tenga una considerable resistencia al ataque de los mismos. Cuanto más bajo sea el valor, mayor será la resistencia del cemento. Estructuras de mortero u hormigón hechas con tal cemento tendrán resistencia satisfactoria cuando se exponen a las aguas sulfatadas, salvo que se presenten otras reacciones desintegrantes distintas de las de los sulfatos.

Por el contrario, un cemento teniendo un valor de reacción a los sulfatos superior a 65, puede considerarse como relativamente vulnerable a su ataque. Estructuras hechas con tal cemento no puede esperarse que a la larga resistan la acción de las aguas sulfatadas independientemente de la calidad de la mano de obra o la presencia de agentes beneficiosos.

Cementos que tengan un valor de reacción a

los sulfatos entre 50 y 65 están, por decirlo así, en el límite de la línea.

No debemos considerarlos en general como los únicos factores de resistencia al ataque de los sulfatos; obras que se hagan con estos cementos pueden ser duraderas, expuestas a su acción, si se hacen con hormigones compactos e impermeables y están libres del ataque de otros agentes desintegrantes. Con esta serie de cementos, la buena mano de obra es absolutamente necesaria y será indudablemente beneficioso el empleo del hormigón aireado.

Ya que hemos tocado el interesante problema de la resistencia a los sulfatos, pasemos una ligera revista a los medios de resolverlo, independientemente del empleo del cemento portland.

Cemento aluminoso.

Como es sabido, el descubridor del cemento aluminoso fué J. Bied, Ingeniero de la famosa fábrica francesa J. y A. Pavin de Lafarge del Teil, que se propuso encontrar un cemento capaz de resistir los ataques del agua del mar y de las cargas de sulfatos.

Por consejo de Le Chatelier, encaminó sus investigaciones estudiando en las obras del célebre Ingeniero Vicat y llegando al descubrimiento del cemento aluminoso, que refiere así en su obra *Recherches sur les Chaux, Ciments et Mortiers*, 1926:

"Encaminé mis estudios por otro lado, siguiendo los principios de Vicat, el cual había declarado que si se pudiese lograr un cemento cuyo índice, es decir, la relación $\frac{\text{silice} + \text{alúmina}}{\text{cal} + \text{magnesia}}$ fuese mayor que 1, se tendría un cemento indescomponible.

"Era imposible obtener tal cemento aumentando la proporción de sílice. En efecto, de los tres silicatos: $\text{SiO}_2 \cdot \text{CaO}$, $\text{SiO}_2 \cdot 2\text{CaO}$, $\text{SiO}_2 \cdot 3\text{CaO}$, los dos primeros no son hidráulicos. El silicato monocálcico es siempre inerte; en cuanto al silicato bicálcico, parece, aunque la cuestión sea discutida, que ninguna de sus tres formas estables entre 0° y 600° , 600° y 1400° y por encima de 1400° tenga propiedades hidráulicas importantes.

"He buscado, pues, aumentar la proporción de alúmina y así he llegado, en 1908, al descubrimiento del cemento aluminoso, que se puede definir así:

"Cemento en el cual el peso de alúmina es francamente superior al de sílice."

Desde luego, el fin propuesto fué plenamente logrado, ya que su resistencia a los sulfatos está completamente demostrada; no obstante, los casos que se han presentado de caídas progresivas en las resistencias en cuanto la temperatura es algo elevada, hacen su empleo delicado y sólo aconsejable en casos bien estudiados.

Cemento sobresulfatado.

He aquí un producto casi desconocido entre nosotros y que está llamado a tener un gran porvenir.

Lo definen así las Normas francesas: "Se llaman cementos sobresulfatados los productos obtenidos por mezclas bien dosificadas y homogeneizadas de escoria granulada de altos hornos y de sulfato cálcico, en proporciones tales que la cantidad de anhídrido sulfúrico de la mezcla sea superior al 5 por 100, con una pequeña cantidad de cal, *clinker* o cemento actuando de catalizador".

Kühl, en 1908, había observado que una mezcla de escoria granulada y sulfato cálcico en proporciones convenientes puede fraguar por fijación de la última sal por la escoria en forma de sulfoaluminato cálcico, probablemente.

Los posteriores trabajos de Bied confirmaron los trabajos de Kühl, pero pusieron de manifiesto que por sí solos ambos materiales eran incapaces de reaccionar; había necesidad de cebar la reacción con unas trazas de cal que actuase de catalizador y la iniciase.

En la práctica se añade algo de cal o de cemento portland que actúa por la cal que libera por hidrólisis.

El cemento sobresulfatado se presenta en el mercado con características muy notables.

Una finura extremada, del orden de 3500 cm^2/g ., le da resistencias iniciales muy elevadas y gran impermeabilidad, sin que por ello aumente su calor de hidratación, que, según los fabricantes, es de 28 calorías por gramo, muy inferior al de los demás cementos.

Una de las propiedades que lo hacen más estimado es su resistencia a la acción de los sulfatos. El hecho de llevarlos en su masa le da una inmunidad completa contra sus ataques.

En nuestro país, la primera aplicación importante que se ha hecho de este cemento ha sido por

la empresa Aguas y Saltos del Zadorra, que dirige el Profesor del Águila.

Se trataba de cruzar con un canal en túnel un banco de yeso, y era necesario emplear un cemento que diera completa garantía de inalterabilidad en un caso tan difícil. El Sr. del Águila, después

Cemento expansivo.

Sabemos que el cemento portland corriente experimenta durante su fraguado y endurecimiento en el aire una disminución de volumen, conocida con el nombre de retracción, que está muy in-

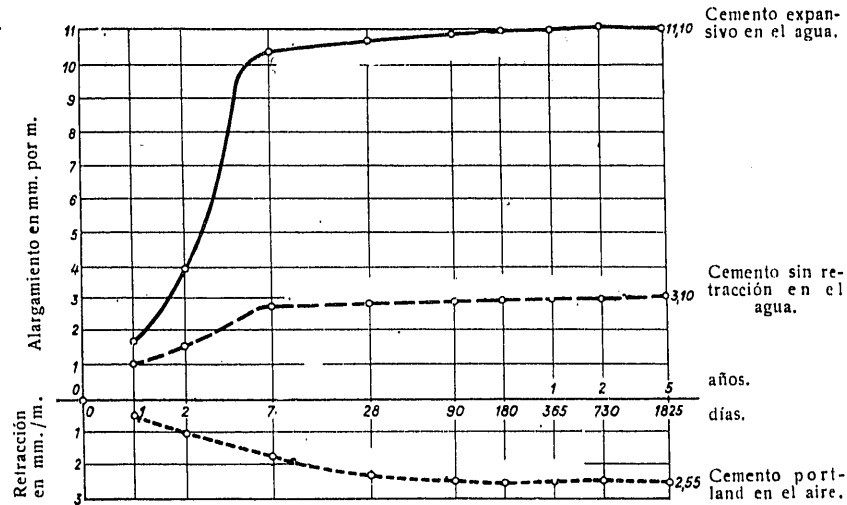


Fig. 5.ª — Alargamiento y retracción en función del tiempo y del medio de conservación.

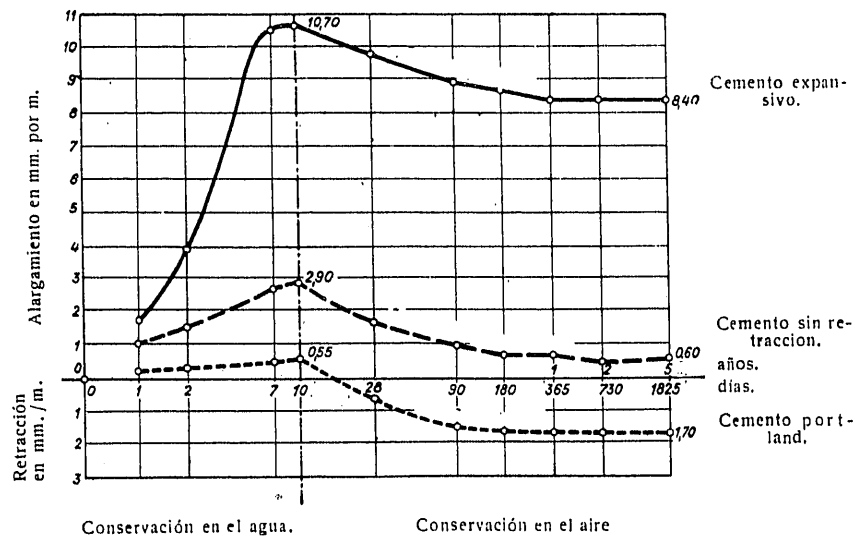


Fig. 6.ª — Alargamiento y retracción de diversos cementos conservados diez días en el agua y después en el aire.

de visitar en Bélgica y Francia diversas obras hechas con cemento sobresulfatado, encontró acertada la solución indicada.

Y, por último, vamos a tratar de un cemento que va comenzando a tener bastantes aplicaciones, y es el

fluenciada por la humedad del ambiente en que se conserva, siendo menor en los estados fuertemente higrométricos que en los débiles.

Se han hecho investigaciones desde hace bastantes años, principalmente por el Ingeniero francés Lossier, para encontrar cementos que durante

el fraguado y endurecimiento presentasen una expansión que compensase la retracción, habiéndose logrado plenamente este efecto.

Los cementos expansivos se obtienen por la

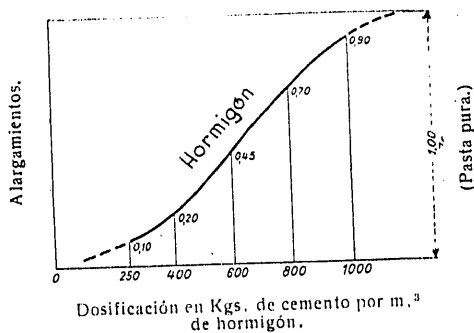


Fig. 7.ª — Alargamiento relativo de un hormigón en función de su dosificación.

mezcla de tres elementos, que por sí mismos son estables:

1.º Un cemento portland, que constituye la base.

2.º Un cemento sulfoaluminoso que juega el papel de *factor expansivo*.

3.º Un *elemento estabilizador*, cuya entrada en acción, voluntariamente retardada, detiene la expansión, absorbiendo el principal reactivo, es decir, el sulfato cálcico. Este elemento estabilizador está en general constituido por la escoria de altos hornos.

La adecuada dosificación de los tres elementos permite regular la expansión en intensidad y duración con notable precisión.

Por tanto, la característica principal de los cementos expansivos es la de *adquirir una expansión estable en medio constante que es regulable en intensidad y duración*.

La *intensidad de la expansión* puede alcanzar en pasta pura hasta 50 mm. por metro.

La *duración* puede ser regulada entre un mínimo de veinticuatro horas y un máximo de treinta días aproximadamente.

Prácticamente se hacen las dos calidades principales siguientes:

a) *Cemento débilmente expansivo llamado "sin retracción"*, que tiene una expansión inicial de 3 a 4 mm. por metro en pasta pura, igual a la retracción que ésta experimenta con el tiempo y que queda compensada.

b) *Cemento expansivo propiamente dicho*,

que tiene una expansión en pasta pura de 10 a 25 milímetros por metro.

La duración de la expansión, es decir, el tiempo durante el cual aumenta ésta progresivamente en medio húmedo antes de estabilizarse en medio constante, está regulado entre diez y quince días, para las probetas de pasta pura conservadas en agua.

Mayor rapidez de expansión tendría el inconveniente de poner en acción la energía expansiva antes de que el cemento poseyera resistencia suficiente.

Si fuese demasiado lenta existiría el inconveniente de entretener mucho tiempo la ejecución, ya que durante la expansión hay que mantener el hormigón con humedad suficiente para provocar las reacciones expansivas.

Las figuras 5.ª y 6.ª representan los procesos de expansión.

En la última se ve que si después de conservar las probetas ocho días en el agua se dejan en el aire seco, experimentan su retracción normal, anulándose prácticamente la expansión del cemento denominado "sin retracción", mientras que el cemento expansivo estabiliza su alargamiento de 8 a 9 mm. por metro.

La intensidad de la expansión para los hormigones disminuye naturalmente con su proporción de cemento expansivo.

Si se toma por unidad la expansión de la pasta

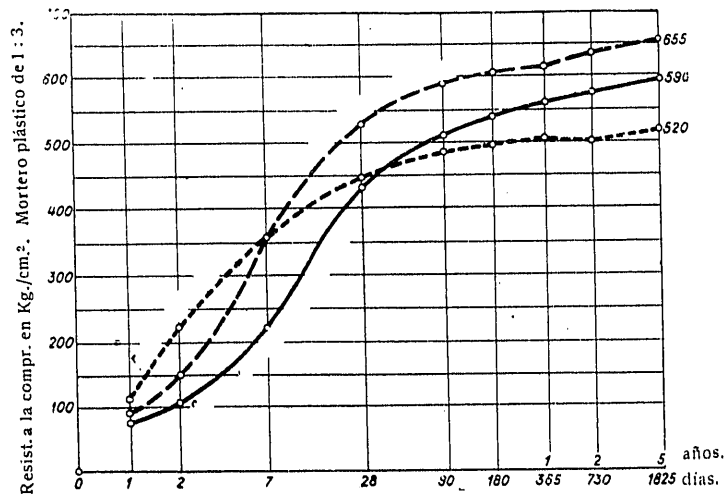


Fig. 8.ª — Resistencia en función del tiempo del mortero normal fabricado con diversos cementos.

- Cemento sin retracción.
- Cemento portland.
- Cemento fuertemente expansivo.

pura, la figura 7.^a da los alargamientos para las diferentes dosificaciones.

En la figura 8.^a aparece la marcha comparativa de las resistencias en morteros fabricados con diversos cementos.

Las aplicaciones de los cementos expansivos son muy interesantes y numerosas.

En primer lugar citaremos los recalces de muros, reparaciones de obras siniestradas; en una palabra, siempre que se coloca hormigón relleno de obras antiguas, como el nuevo hormigón experimenta una cierta retracción, es evidente que para que entre en carga tiene que deformarse fuertemente y hasta agrietarse, la obra antigua. Al hacer el relleno con cemento expansivo, éste puede tomar la carga que el constructor estime conveniente, sin más que dosificar la expansión.

Otra aplicación muy interesante es la de permitir el descimbramiento automático de los arcos, sin más que cerrar la clave con hormigón expansivo. Al endurecerse y terminar su expansión, el arco se levanta de la cimbra, como por el conocido procedimiento de los gatos en la clave, pero de forma mucho más sencilla y cómoda.

También se pueden pretensar las obras en sentido favorable. Si hacemos una viga de hormigón armado con este cemento, su expansión obstaculizada por las armaduras dará lugar a una pretracción de éstas y a una precompresión del hormigón, ambas favorables.

En las presas, donde tan de temer son las grietas, este cemento compensa las retracciones, tanto de fraguado como de temperatura.

En los pavimentos, tanto de carreteras como de autopistas, las juntas son obligadas; más por la retracción del cemento que por la temperatura. Como la junta es siempre un punto débil, su disminución o supresión es muy beneficiosa.

En Francia se ha emprendido un programa de ensayos subvencionado por el Ministerio de Obras Públicas para construir carreteras y pistas de avión, si no sin juntas, al menos con un número de ellas muy reducido.

Por último, terminamos presentando un caso notable de aplicación de los cementos expansivos, en la reconstrucción del Viaducto de Laroche de la línea París-Dijón.

Esta obra es de cinco arcos de 20 m. de luz rebajados al 1 : 4,5, soportando cinco vías de ferrocarril de ancho normal.

Los arcos son de hormigón en masa, con un

espesor de 1,22 m. en la clave y 1,80 en los arranques.

Por economía en la ejecución, cada bóveda fué hormigonada en dos rosas, midiendo la primera 0,50 m. en la clave, y la segunda, 0,72 m. (fig. 9.^a).

La ejecución se hizo en cuatro operaciones sucesivas:

1.^a Se hormigonó la primera rosca de cada bóveda, dejando en la clave un trozo sin hormigonar de 1,20 m. de ancho para producir la expansión.

2.^a Se colocó la dovela expansiva E_1 por el procedimiento corriente, estando regulado el cemento para que la expansión fuera de 2,5 mm.

3.^a Cuando la primera rosca hubo fraguado, se hormigonó la segunda, dejando un hueco en la clave de 0,85 m. para la segunda dovela expansiva.

4.^a Se hormigonó hasta cerrar la segunda rosca colocando la dovela E_2 , cuya expansión estaba regulada de manera que fuese los $3/10$ de la inferior E_1 , es decir, 0,75 mm.

Todas las dovelas de cierre se hicieron con hormigón de 600 Kg./m.³ de cemento expansivo. Las figuras 10 y 11 se refieren al hormigonado de la dovela E_1 .

* * *

No queremos terminar esta reseña sobre los cementos, sin citar el caso de la presa de Bort (Francia).

Esta gran obra se ha construido por un procedimiento totalmente original en la preparación del cemento a pie de obra.

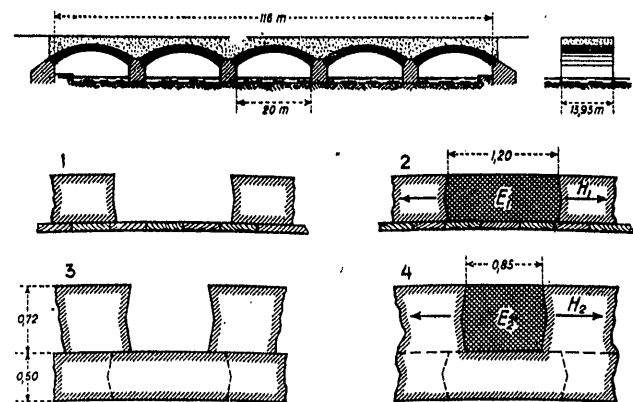


Fig. 9.^a — Viaducto de Laroche.

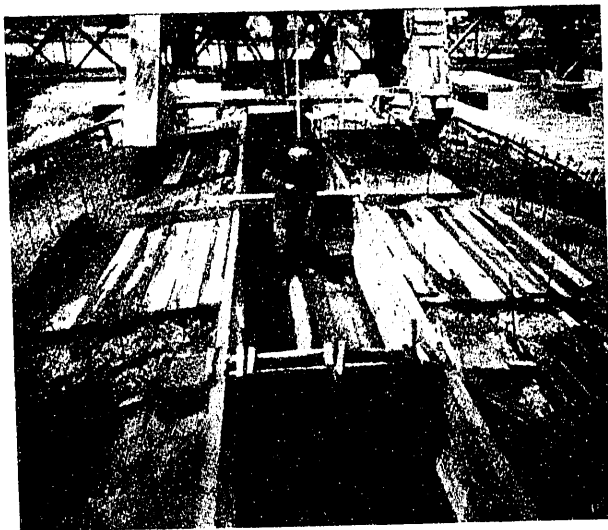


Fig. 10. — Viaducto de Laroche. Encofrado de la clave E1.

Antes de comenzar a hormigonar se han almacenado al aire libre grandes cantidades de escoria granulada de altos hornos, que se han molido a una finura extrema, 10 por 100 de residuo en el tamiz de 10 000 mallas/cm.². La molienda se ha hecho por vía húmeda, añadiéndole un 1,5 por 100 de CINA y saliendo la escoria de los molinos, con un 40 por 100 de agua, a los depósitos de almacenamiento.

El cemento se ha confeccionado mezclando en la hormigonera la papilla de escoria, el cemento portland y los áridos para tener un hormigón de 200 Kg. de cemento por metro cúbico y que a su vez éste resulte, de la mezcla del 30 por 100 de portland con 70 por 100 de escoria.

Por este procedimiento se han confeccionado los 660 000 m.³ de hormigón que ha necesitado la presa, habiéndose obtenido una notable economía.

Las principales ventajas han sido la facilidad de molienda de la escoria granulada por vía húmeda, su económico transporte a granel en vagones descubiertos, el sencillo almacenamiento al aire libre, el ahorro del secado de la escoria granulada de gran contenido de humedad, resistencias excelentes por la extraordinaria finura del molido de la escoria, regularidad y homogeneidad grande del hormigón, así como su notable docilidad, débil calor de hidratación que ha permitido la disminución a la mitad de los tubos de enfriamiento de la presa y ha permitido hacer el cierre de la obra en el año mismo de su iniciación, sin que se presenten grietas.

El ritmo de hormigonado ha sido de 50 000 metros cúbicos mensuales, lo que ha hecho posible la entrega de la obra en el plazo convenido.

* * *

Después de haber pasado una ligera revista sobre la evolución de los aglomerantes hidráulicos, dando a conocer las últimas novedades, vemos el gran porvenir que la industria presenta y lo mucho que nos queda por hacer.

El primer paso que, a nuestro juicio, se impone es lograr que el mercado español esté ampliamente abastecido de cemento, para que, como consecuencia de ello, el juego de la libre concurrencia permita la oferta de las clases especiales, que seguramente se harían en nuestro país tan buenas como en cualquier otro. Prueba de ello es la calidad excelente de nuestro cemento portland.

Las primeras materias son abundantísimas, pero la maquinaria es sumamente costosa, y ello, unido a la escasez de combustibles, frena la construcción de nuevas fábricas.

A pesar de estas dificultades, los poderes públicos, en su afán de abastecer de tan fundamental primera materia al mercado nacional, hacen titánicos esfuerzos por fomentar su producción, y buena prueba de ello es la fábrica de cemento que ha construido la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir en Villanueva de las Minas (Sevilla).

Como es la última construída en nuestro país, quizá pueda interesar a nuestros lectores una descripción de la misma.

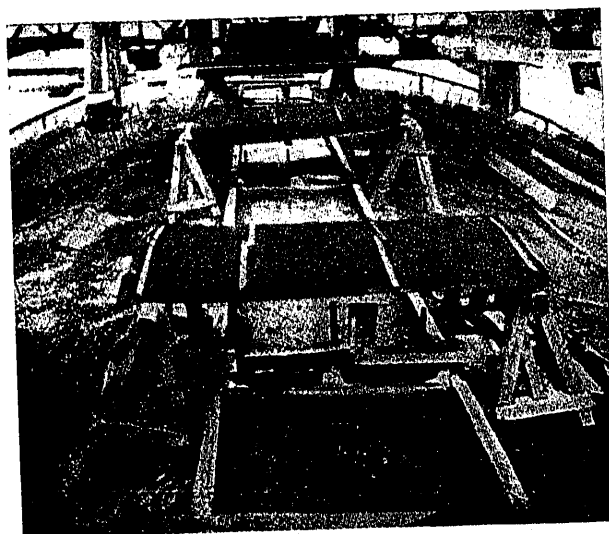


Fig. 11. — Viaducto de Laroche. Clave E1 hormigonada.

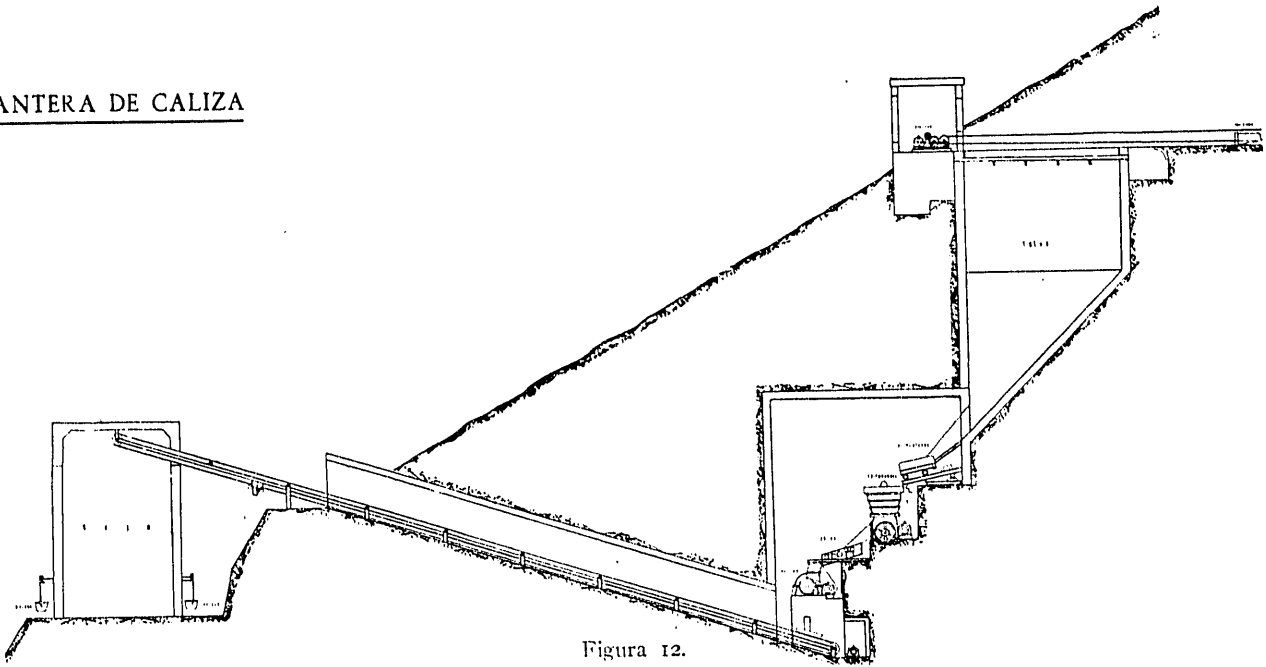
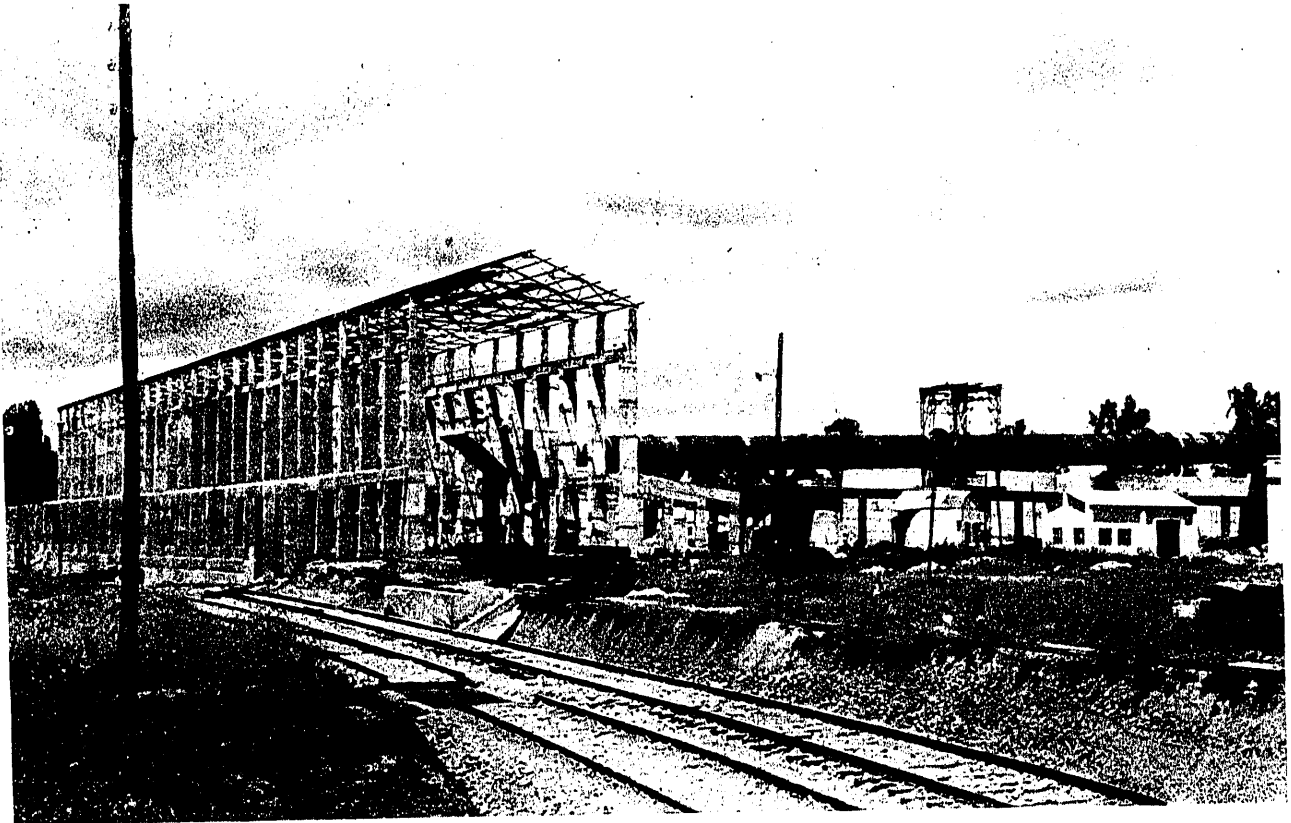


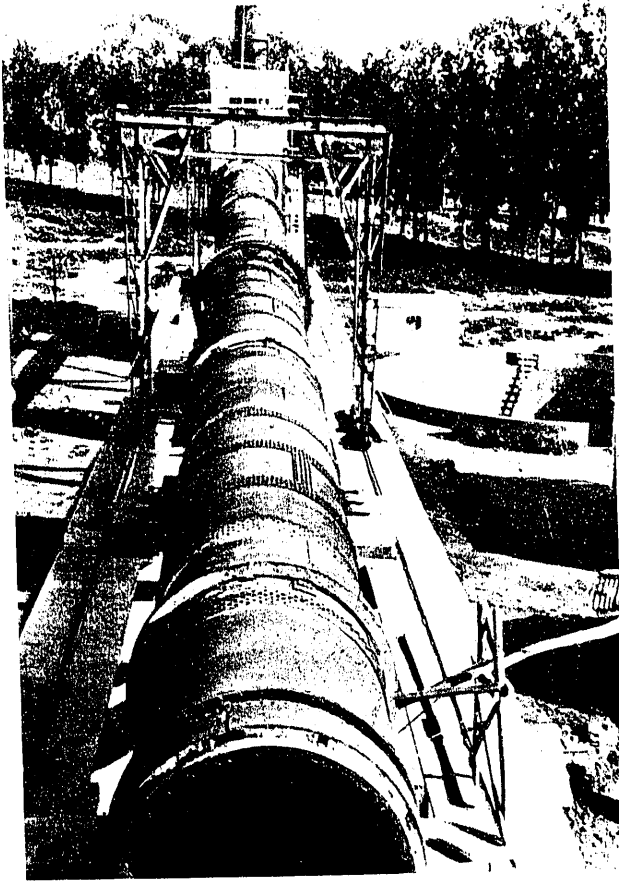
Figura 12.

El problema que se nos planteó al encargarnos de su construcción como Ingeniero asesor fué el de proyectarla con la maquinaria que se había desmontado de otra fábrica belga.

Por aquel tiempo acababa de publicarse la obra de Bogue *La Química del Cemento Portland*, de cuya lectura se deducía los grandes progresos que los americanos habían hecho en esta industria.



Nave de primeras materias en construcción y horno.



Horno en el período de montaje.

Ello nos sugirió la conveniencia de visitar los Estados Unidos antes de comenzar el proyecto de la nueva fábrica.

Expuesto este propósito al General Fernández-Ladreda, entonces Ministro de Obras Públicas, le prestó todo su apoyo, alentándonos en nuestro trabajo para que "la instalación fuese modelo y sirviese a los demás para interesarse en la mejora".

Aprovechamos la presente oportunidad para expresar nuestra profunda gratitud por su valiosa ayuda que de tanto nos sirvió.

En el viaje a los Estados Unidos vimos bastantes novedades, como la tendencia a hacer toda la molienda en circuito cerrado, incluso la de las primeras materias en la vía húmeda; la rectificación de la composición del crudo quitando algunos óxidos por flotación, y que ya hemos descrito al tratar de la fábrica Atlas; la recuperación del calor

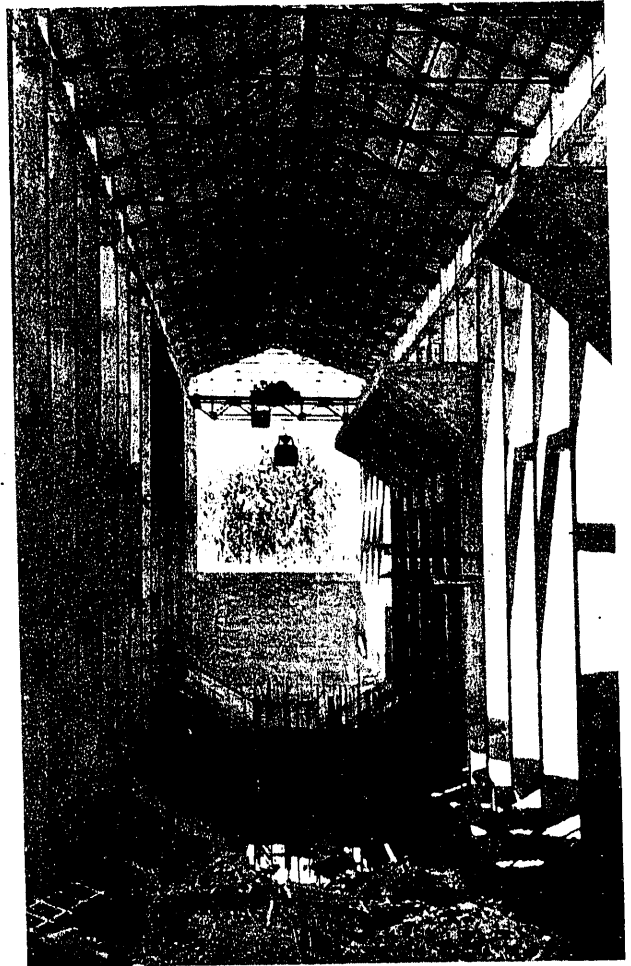
y templado del *clinker* en enfriadores de parrilla; el secado, molienda e inyección del carbón en el horno con sólo el molino, trabajando en circuito cerrado con aire caliente tomado de la cabeza del horno...

La mecanización impera de tal modo en aquellas fábricas, que es corriente la cifra de 1 000 toneladas de producción anual por hombre. Igualmente en las canteras, que en general se explotan con grandes voladuras, la cifra de 100 toneladas de rendimiento diario por obrero es a veces sobrepasada.

A nuestro regreso se trazó un programa de las mejoras adaptables a la maquinaria existente, que es el que se ha desarrollado.

Después de este preámbulo volvamos a la descripción anunciada.

La fábrica de la Confederación se halla situada junto a la carretera de Lora del Río a Santiponce, en el kilómetro 200 del ferrocarril de



Nave de primeras materias. Interior en construcción.

Mérida a Los Rosales, a unos metros de la estación de Alcolea del Río, de donde se deriva la vía del apartadero que entra en la fábrica. La distancia a Sevilla por carretera es de 42 Km.

Como se encuentra en la orilla derecha del Guadalquivir, en el tramo navegable, cuando se termine la presa de Cantillana está proyectado un embarcadero para el servicio de la fábrica.

Las primeras materias son una caliza cristalina casi pura y una marga con 39/40 por 100 de carbonato cálcico.

El sistema de fabricación es la vía húmeda, y la producción probable, 75.000 Tn. anuales.

La cantera de caliza está situada en Sierra Traviesa, lugar denominado Fuenteluenga, a unos 8 Km. al NO. de la fábrica, adonde llega la caliza triturada a un tamaño de 10/12 mm. por un teleférico.

La instalación de explotación está hecha para, en su día, cuando se haya formado frente de altura suficiente, hacer grandes voladuras.

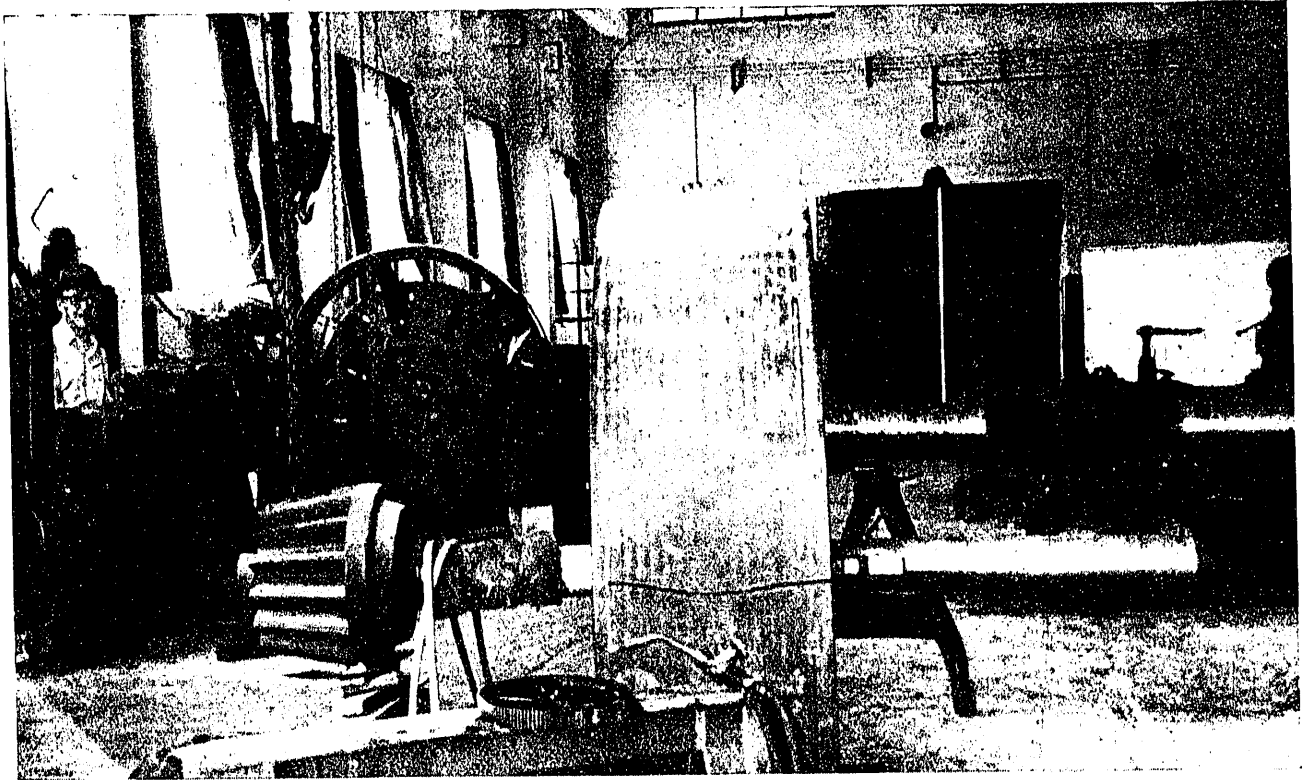
El material obtenido, después de taquear los bloques de más de 50 cm., es arrastrado por un *scraper* de dos metros cúbicos hasta una tolva de pozo, donde cae a través de una rejilla. El fondo inclinado permite el deslizamiento del material



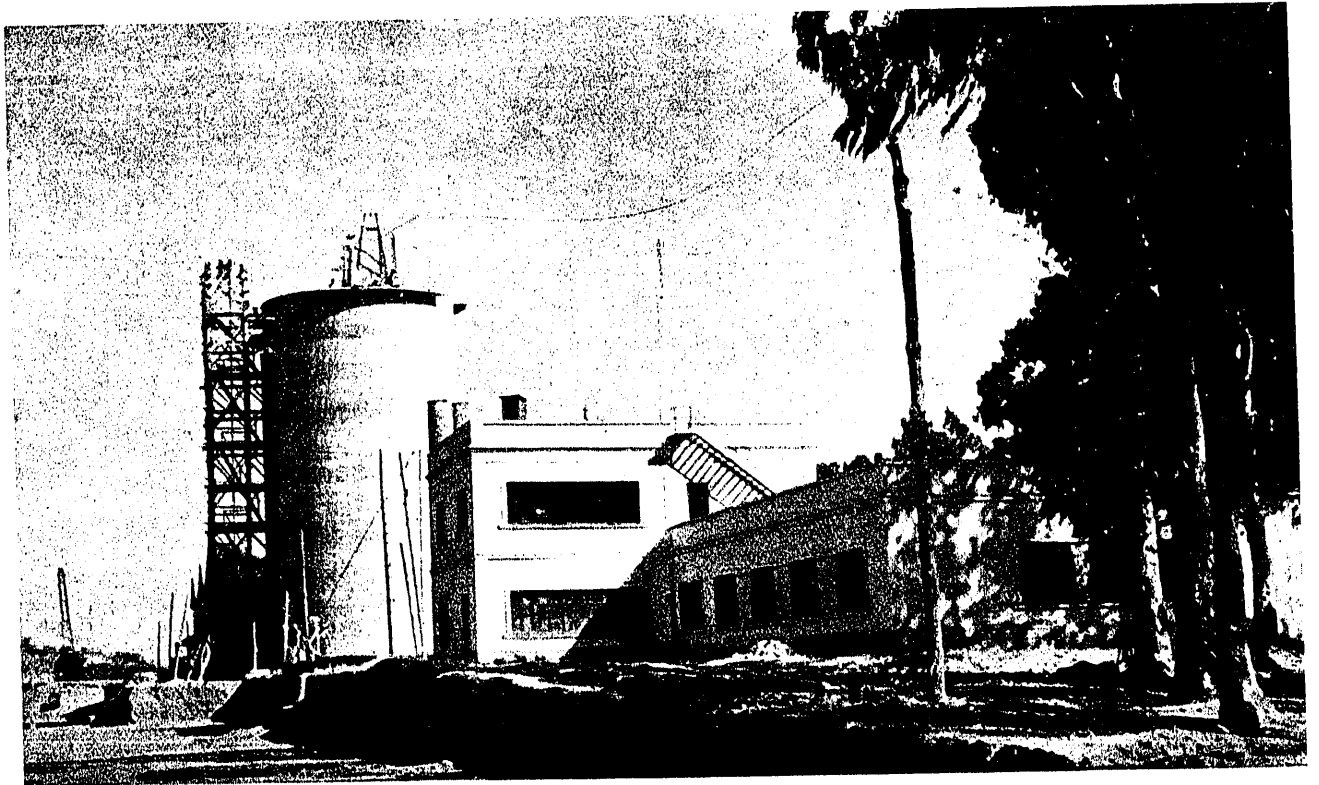
Silos de cemento y tubería de llenado.



El horno echando el primer humo, en 25 de octubre de 1952.



El taller.



De izquierda a derecha: oficinas, laboratorio y silos (en construcción).

hasta el alimentador de la trituradora primaria, que lo deja a tamaño máximo de 50 mm.

De allí cae a una criba que separa lo menor de 10/12 mm., cayendo el resto a una trituradora

La explotación se hace en forma análoga a la de la de caliza, cayendo el material desde la tolva a una trituradora, que lo deja a 50 mm., y de allí cae en uno de los dos desleidores que hay,

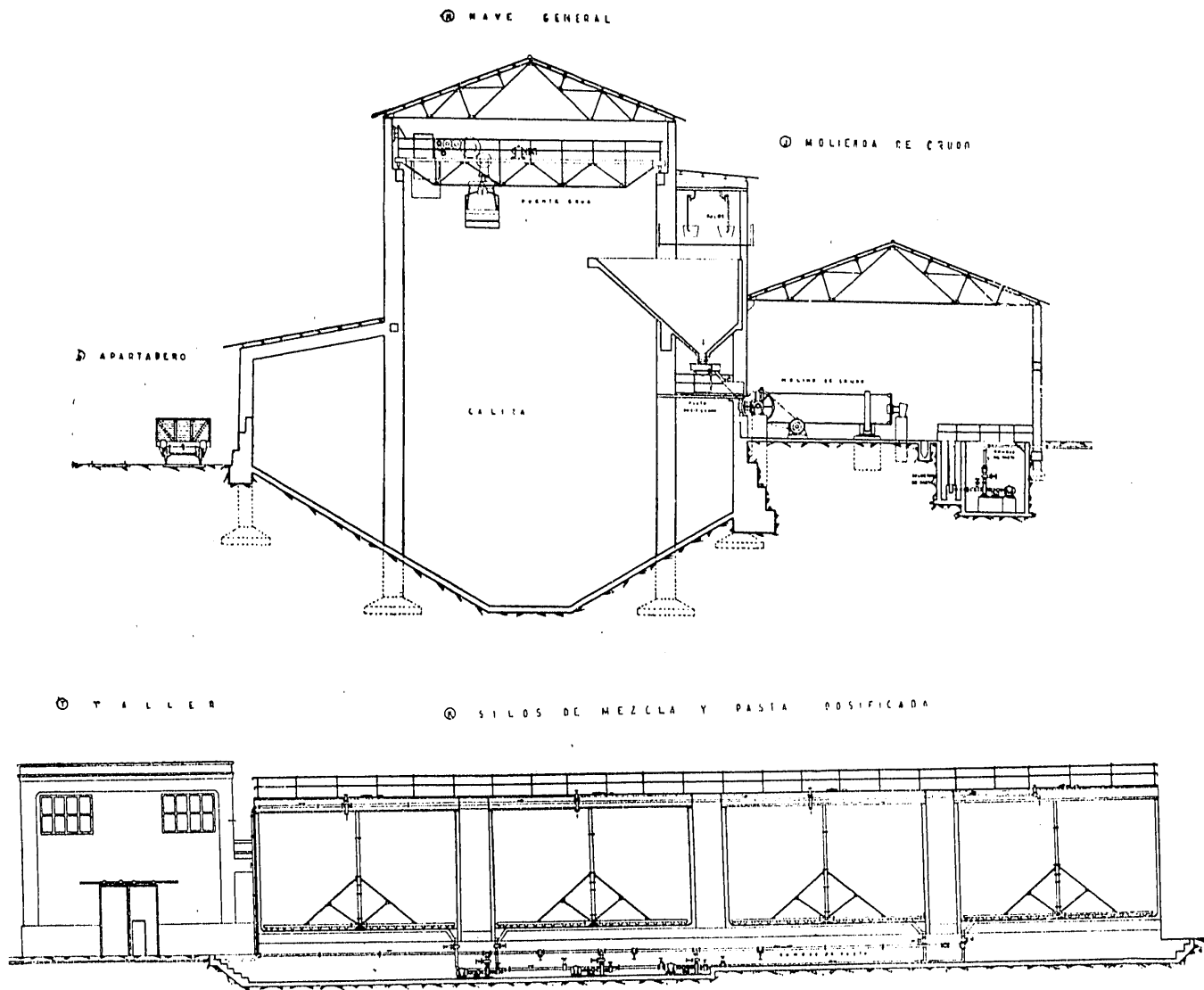


Figura 13.

de martillos, que lo tritura a ese tamaño, y cae el material molido, en unión del que pasó por la criba, a una cinta de goma, que lo deja directamente en el almacén de carga del teleférico. El rendimiento de la instalación es de 40 Tn./hora (figura 12).

La cantera de margas arcillosas se encuentra a 1 300 m. al E. de la fábrica.

y la pasta resultante se envía a la fábrica, con bombas Wilfley, por una tubería de 200 mm. de diámetro.

El transporte es, seguramente, el de mayor longitud hecho en nuestro país; pero recientemente se ha inaugurado la fábrica inglesa de Shoreham, que también hace el transporte de la arcilla desleída por tubería del mismo diámetro, siendo la

distancia a la fábrica de más de cuatro kilómetros. Tanto en una como en otra fábrica se utiliza la misma tubería para enviar el agua a la cantera, lo que permite lavarla, evitando las sedimentaciones.

La caliza que llega en el teleférico se vierte en las tolvas de los molinos de crudo, y, si estuviesen llenas, en la nave de primeras materias.

Los molinos de crudo son tres, con dimensiones de $5,50 \times 1,30$ m., $7 \times 1,45$ m. y $7,50 \times 1,50$ m., trabajando a velocidades deducidas según la clásica fórmula de Fischer.

La pasta de los tres va al depósito, donde la toman las bombas y la envían a los vasos dosificadores (fig. 13).

Éstos son cuatro de 10,10 m. de diámetro

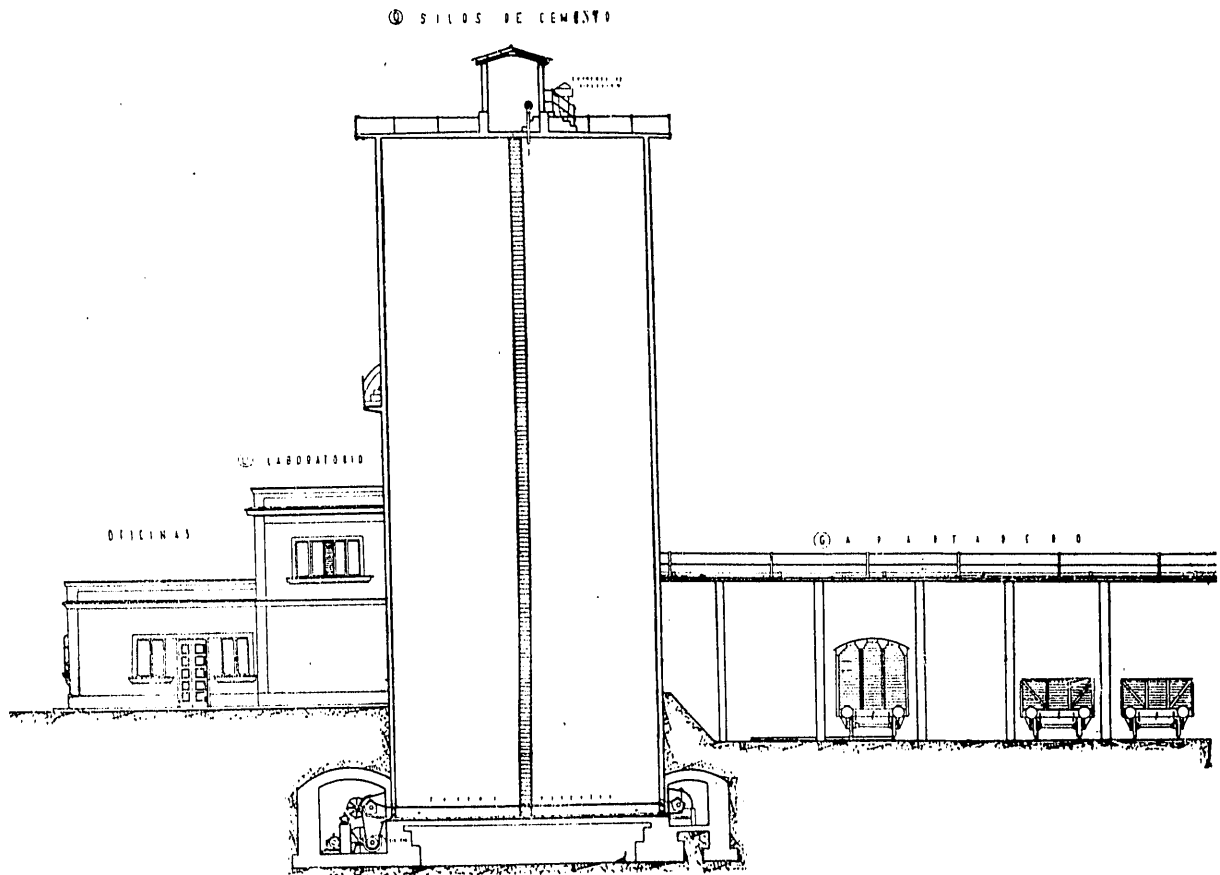


Figura 16.

Ésta tiene una longitud de 130 m. por 30 de ancho, pero las paredes laterales están inclinadas para que, al sacar el material, afluya al centro, donde lo recoge la cuchara, de dos metros cúbicos, del puente-grúa fácilmente, teniendo éste solamente una luz entre carriles de 13,70 m. Con esta disposición se pueden almacenar enormes volúmenes con pequeños empujes en las paredes laterales. La capacidad total de la nave es de 40 000 toneladas y estará servida por dos puentes-grúa.

por 6 de altura, que después de dosificar la pasta la envían al depósito del horno, de 21 m. de diámetro por 6 de altura.

Desde éste va el material al alimentador del horno, que dosifica la cantidad de pasta que entra en el mismo, y su marcha está sincronizada con el motor del horno.

Después de haber alargado en un 50 por 100, aproximadamente, el horno adquirido, las dimensiones del instalado son 74,5 m. de largo y 2,70 de diámetro.

Su movimiento se hace por un reductor encastrado en un cárter hermético, con lubricación por bomba de aceite, y éste refrigerado por un serpentín con circulación de agua.

Se calienta con un dardo alimentado con carbón pulverizado que muele un molino trabajando en circuito cerrado y calentado con aire que se toma de la cabeza del horno.

El *clinker* cae a un enfriador Fuller de pa-rilla escalonada, donde sufre un brusco enfriamiento que favorece su calidad y su molturabilidad. Este es el primero del nuevo tipo americano adquirido en España, y son ya bastantes los que se han instalado en nuestro país.

Después cae a una trituradora de cono y va al almacén de *clinker*.

Éste forma parte de la nave donde se almacenan la caliza, *clinker*, yeso y carbón.

Hay un volcador de vagones hasta de 20 toneladas que permite vaciar éstos en el mismo almacén cuando llegan llenos de menudo de carbón (fig. 14).

El *clinker* se muele en un molino de cemento de $12,90 \times 2,00$ m., con tres cámaras, trabajando en circuito abierto, que ha sido reconstruido para darle un rendimiento de 12 Tn./h. (fig. 15).

El cemento molido cae a una bomba Fuller Kinyon, que lo transporta por una tubería de urilita a los silos de cemento.

Éstos son dos, de 10,50 m. de diámetro por 26 de altura, describiéndose el sistema seguido en la construcción en un artículo que hemos publicado en la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS de enero del pasado año (fig. 16).

Se descargan por tres cadenas de arrastre en cada silo, que echan el cemento en un transportador sin fin, de donde va a un elevador que llena la tolva de la ensacadora.

Ésta es automática, con dos bocas y una capacidad de 30 Tn./h.

Los sacos caen en una cinta de goma que los lleva ya al vagón o al camión, según marche en uno u otro sentido.

Las adjuntas fotografías y planos dan una idea de tan hermosa fábrica, cuya dirección han llevado los Ingenieros Sres. Briones y Gavala, de la Confederación, y que ha sido construida por

la Empresa Entrecanales y Távora, con nuestro asesoramiento.

Y terminamos el presente artículo transcribiendo literalmente la presentación que hace de su fábrica la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, en el folleto que fué repartido con motivo de la inauguración por S. E. el Jefe del Estado el 24 del pasado mes de abril.

"El ritmo acelerado con que se lleva a cabo la realización del Plan Nacional de Obras Hidráulicas y el ser la cuenca del Guadalquivir una zona deficitaria de cemento, condujo al Ministerio de Obras Públicas a disponer la construcción de una fábrica de dicho aglomerante que atendiese exclusivamente al suministro que dichas obras requieren, construcción que ha sido realizada por la Dirección General de Obras Hidráulicas a través de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir.

"La capacidad de producción de la fábrica es de 75 000 Tn. al año, con lo que quedan atendidas las necesidades actuales de dicha Confederación; pero está prevista — y en algunos elementos realizada — la ampliación hasta 150 000 toneladas, lo que permitirá atender también a las obras de otras cuencas limítrofes, habiendo sido elegido el emplazamiento de la fábrica como previsión del posible suministro a la cuenca del Guadiana.

"Las circunstancias existentes al iniciarse la construcción aconsejaron la utilización de una parte de maquinaria usada, pero, además de mejorar ésta, se ha completado con instalaciones modernas — algunas de primera implantación en España — que han dado al conjunto la eficacia y rendimientos requeridos.

"Las disponibilidades de materias primas, prácticamente ilimitadas, y la alta calidad del cemento obtenido auguran el mejor porvenir a esta nueva industria, con la que el Ministerio de Obras Públicas pone al servicio de la gran transformación que en la cuenca del Guadalquivir se realiza, el poderoso medio auxiliar que hacía falta para cumplir la consigna del Caudillo, de crear rápidamente toda la riqueza que nuestros recursos hidráulicos permiten."