

ESTUDIO Y EJECUCION DE HORMIGONES PARA PRESAS

Ing. C. C. P. J. G.^o ROSSELLO

Ing. C. C. P. J. FEIJOO

Lic. C. Químicas J. RIVERO

1. CARACTERISTICAS GENERALES DEL HORMIGON DE PRESAS

1.1. Condiciones de tipo general.

Los hormigones de presas se distinguen de los hormigones de otras estructuras por las condiciones de trabajo de la estructura misma y por las características especiales de su fabricación y puesta en obra.

El hormigón de presas está sometido a la percolación del agua del embalse. Está a la intemperie, y con frecuencia en condiciones climatológicas severas.

Por tratarse de grandes masas, cuya colocación ha de realizarse a ritmos elevados, se desarrollan considerables cantidades de calor de hidratación, con la consiguiente tendencia al agrietamiento en el posterior enfriamiento.

Las presas están, por lo general, situadas en parajes alejados de las grandes poblaciones y de las vías de comunicación principales. Esto constituye una indudable dificultad.

La construcción de una presa exige el montaje de complejas instalaciones de hormigonado que tengan una gran seguridad de funcionamiento y la suficiente calidad de proyecto y construcción, que permita fabricar un hormigón homogéneo y a ritmo elevado.

1.2. Resistencias mecánicas.

De todas las propiedades del hormigón es, sin duda, la resistencia mecánica a la compresión la más importante y significativa, no sólo porque la estructura ha de resistir a esfuerzos fundamentalmente de compresión, sino también porque la resistencia a la compresión proporciona un índice de calidad global del hormigón, en la que intervienen la densidad, la impermeabilidad y la resistencia a la tracción.

En presas no interesa, generalmente, la resistencia a cortas edades del hormigón endurecido, siete o veintiocho días, sino a partir de los noventa días.

No obstante, para el control del hormigón de una presa en construcción, los resultados de los ensayos de probetas a los veintiocho días, son los que se utilizan en la práctica. Mediante correlaciones obtenidas con un tanto por ciento muy pequeño de probetas de la misma serie,

rotas a noventa días, se determina la resistencia del hormigón que ha de tomarse a efectos de comparación con las resistencias mínimas exigidas.

En la nueva instrucción de grandes presas la resistencia a compresión del hormigón se define como la carga de rotura a compresión uniaxial de probetas cilíndricas de 15 cm. de diámetro por 30 cm. de altura, moldeadas con muestras de hormigón fresco tomadas a la salida de hormigoneras.

En definitiva, las resistencias a compresión son los resultados de ensayos realizados con muestras representativas del hormigón que se elabora en obra.

¿Hasta qué punto el resultado de unos ensayos hechos con una determinada frecuencia, con unas muestras tomadas aleatoriamente una vez al día, o por cada turno de trabajo, son representativos de las propiedades mecánicas del hormigón que constituye la estructura de la presa?

Indudablemente en la autenticidad (acuracidad) de los resultados influirán, en primer lugar, la forma de hacer el muestreo, los métodos de ensayo que se empleen, el tarado de la prensa e incluso el personal que los realiza.

Aparte de que las probetas "no son transportables para ser rotas en otro laboratorio", los resultados obtenidos con el mismo hormigón difieren bastante de un laboratorio a otro, aunque se empleen los mismos procedimientos y la misma calidad operatoria. No obstante, el único medio práctico que tenemos para comprobar la resistencia del hormigón es la rotura de probetas.

El hormigón tiene que superar la resistencia mínima exigida en el proyecto de la presa.

En tiempos pasados se exigía que todas las probetas ensayadas alcanzasen una resistencia superior a una mínima. Así se llamaba: "resistencia mínima exigida".

Actualmente se establece la resistencia, con un coeficiente de seguridad mínimo, ligada a un determinado valor de probabilidad de que se presenten resistencias inferiores a la crítica.

Aunque todas las probetas ensayadas hayan dado una resistencia superior a la mínima exigida, no hay duda que existe cierta probabilidad de que haya zonas de hormigón colocado en obra cuya resistencia puede ser inferior a dicha mínima, incluso puede haber resistencias nulas.

Dicha probabilidad es tanto mayor cuanto mayor sea la variabilidad de la calidad del hormigón.

La única forma que tenemos de medir la uniformidad

20

real del hormigón es por medio de la regularidad de los resultados de los ensayos. Es decir, determinando el grado de dispersión de los resultados de rotura de las probetas, generalmente en función de la desviación típica "σ" (desviación media cuadrática), o del coeficiente de variación

$$c = \frac{\sigma}{R_m}, \text{ donde } R_m \text{ es la resistencia media.}$$

Utilizando el conocido ábaco del profesor Stucky (figura 1.^a), se puede conocer el coeficiente de seguridad

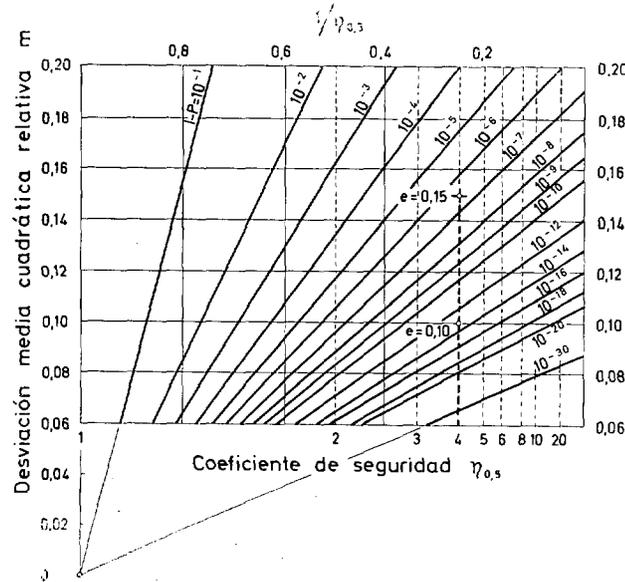


Fig. 1.^a — Probabilidad de obtener una resistencia en el hormigón inferior a la tensión de cálculo. (Probability of obtaining a concrete strength less than the calculated stress).

Abaco del Prof. Stucky, para determinar la probabilidad de tener resistencias menores de la tensión de cálculo, en función del coeficiente de seguridad y de la dispersión de las probetas.

(Abacus of Prof. Stucky, to determine the probability of having strengths less than the calculated stress as a function of the safety coefficient and of the dispersion of the test specimens.)

real del hormigón en función de la dispersión (C. de V.).

Por ejemplo, si tomamos un coeficiente de seguridad 4, la probabilidad de que existan zonas de resistencia menor de la tensión de cálculo es muy pequeña, 10^{-13} cuando el coeficiente de variación es el 10 por 100; sin embargo, aumenta hasta 10^{-4} si el coeficiente de variación alcanza el 20 por 100.

En la nueva Instrucción de Grandes Presas se establece el concepto de *resistencia característica*, correspondiente a una serie de probetas (seis como mínimo) rotas a una misma edad:

$$R_c = R_m - 2(R_m - R_{m, n/2}) = R_{m, n/2} - R_m.$$

R_c = resistencia característica de una serie de probetas.

R_m = resistencia media del conjunto de toda la serie.

$R_{m, n/2}$ = resistencia media de la mitad de resistencia más baja.

Por otra parte, la nueva instrucción permite reducir el coeficiente de seguridad de 4 a 3,2 en aquellas presas donde el coeficiente de variación del hormigón sea igual o inferior al 15 por 100.

Con estas dos innovaciones se inicia el camino de considerar oficialmente la estrecha relación que existe entre la regularidad y el coeficiente de seguridad, que ciertamente tiene una estructura de hormigón.

En el establecimiento de la resistencia característica se hace intervenir indirectamente la dispersión del propio ensayo (incluido el muestreo), y con la reducción del coeficiente de seguridad (como relación entre resistencia característica mínima exigida y carga de trabajo máxima obtenida en el cálculo), se tiene en cuenta la regularidad de los hormigones fabricados, aunque tímidamente, pues existe mucha diferencia entre un hormigón con C. de V. 16 por 100 y otro con 22 por 100, y no digamos entre un C. de V. 15 por 100 y otro 10 por 100. Sin embargo, se han de aplicar los mismos coeficientes de seguridad en cada pareja de casos 4 y 3,2, respectivamente.

Se plantea ahora el problema de determinar, en función de la resistencia característica mínima exigida en el proyecto, cuál ha de ser la resistencia media de los hormigones que es preciso estudiar mediante ensayos de laboratorio antes de iniciar la construcción de una presa. Realmente la resistencia que se maneja en los ensayos de laboratorio es la media de una o varias series de probetas, y no la característica ni la menor de una serie.

Esto es, claro, porque las diferencias entre los resultados de una misma serie de probetas fabricadas con una sola muestra de hormigón fresco son debidas únicamente a la dispersión propia del ensayo, no tiene otra significación y dudamos pueda compararse con la dispersión entre las distintas masadas de hormigón fabricado.

En primer lugar habría que suponer cuál será el coeficiente de variación del hormigón de la obra.

Es corriente considerar los siguientes grados de regularidad que a continuación indicamos:

Siendo el coeficiente de variación:

$$c = \frac{\sqrt{\frac{\sum (R_i - R_m)^2}{N - 1}}}{R_m};$$

donde:

R = resistencia individual (de una probeta).

$$R_m = \text{resistencia media} = \frac{\sum R_i}{N}.$$

N = número de probetas.

c:

5 por 100, sólo alcanzable en pruebas de laboratorio muy cuidadas.

10 por 100, excelente, aproximado a la precisión del laboratorio.

15 por 100, buena calidad.

20 por 100, menos buena.

25 por 100, mala calidad.

La apreciación del C. de V. que se podrá obtener en la obra depende de muchos factores; en primer lugar, de la uniformidad de los áridos y del cemento; también de la calidad de las instalaciones, y finalmente, del control en el proceso de hormigonado.

Partimos de la resistencia media del hormigón tipo estudiado en laboratorio, R_{m1} , y del coeficiente de variación que se espera obtener en la obra c_1 . La resistencia R_{m1} será la necesaria para que, dada la resistencia mínima exigida para el hormigón R_c (resistencia crítica), tengamos una probabilidad, "p" no mayor de un determinado valor, de que existan valores de resistencia inferiores a esta R_c .

Suponemos que los resultados de roturas de probetas tienen una distribución normal (gaussiana), lo cual es bastante real, especialmente en la zona de las resistencias bajas que es la interesante en nuestro caso. Fijados R_c y p queda determinada $R_m = m$, en función de la desviación media cuadrática σ por la ecuación de la función de distribución normal:

$$p(R \leq R_c) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{R_c} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} dx \quad [1]$$

Es interesante determinar cuál ha de ser la resistencia media del hormigón, en el caso de suponer un coeficiente de variación c_2 distinto del supuesto en principio, sin modificar la resistencia crítica R_c ni la probabilidad de tener resistencias menores de ésta, es decir, con el mismo coeficiente de seguridad para la estructura.

Para ello podemos establecer la igualdad de las abscisas en la curva de distribución una vez tipificadas:

$$\frac{R_{m1} - R_c}{\sigma_1} = \frac{R_{m2} - R_c}{\sigma_2} \quad [2]$$

La desviación típica es por definición de coeficiente de variación:

$$\sigma = c \cdot R_m \quad [3]$$

de (2) y (3) obtenemos:

$$R_{m2} = \frac{R_{m1}}{\frac{c_2}{c_1} \left(1 - \frac{R_{m1}}{R_c}\right) + \frac{R_{m1}}{R_c}} \quad [4]$$

Que nos da, para la misma probabilidad, el valor necesario de R_{m2} en función de la relación entre los coeficientes de variación y de la relación entre la resistencia media del primer conjunto y la resistencia característica exigida. Para simplificar la expresión anterior, hagamos:

$$r_1 = \frac{c_2}{c_1} \quad \text{y} \quad r_2 = \frac{R_{m1}}{R_c};$$

la ecuación (4) se puede escribir así:

$$R_{m2} = \frac{R_{m1}}{r_1 + r_2 - r_1 r_2} \quad [5]$$

Por ejemplo, el hormigón tipo estudiado tiene las características siguientes: resistencia media, $R_{m1} = 300$ kilogramos/cm.²; coeficiente de variación, $c_1 = 12$ por 100, y la resistencia mínima exigida es $R_c = 200$ Kg./cm.².

Calculemos la resistencia media que necesitaríamos en el caso de tener una mayor dispersión que estimamos en $c_2 = 18$ por 100:

$$r_1 = \frac{c_2}{c_1} = 1,5;$$

$$r_2 = \frac{300}{200} = 1,5;$$

$$r_1 \cdot r_2 = 2,25;$$

$$R_{m2} = \frac{300}{1,5 - 1,5 - 2,25} = \frac{300}{0,75} = 400 \text{ Kg./cm.}^2;$$

$$R_{m2} = 400 \text{ Kg./cm.}^2.$$

Vemos que por el solo hecho de pasar de un coeficiente de variación de 12 a 18 por 100 (ambos muy frecuentes en buenos hormigones) es preciso, en nuestro ejemplo, aumentar la resistencia media de los hormigones de 300 Kg./cm.² a 400 Kg./cm.², lo cual no suele ser fácil de conseguir sin aumentar demasiado la dosificación de cemento, con todos los inconvenientes que esto acarrea, aparte del mayor costo del hormigón.

En la figura 2.^a hemos representado las dos curvas de distribución con la misma probabilidad de obtener valores inferiores a una determinada resistencia (200 Kg./cm.²) con diferentes dispersiones, 12 a 18 por 100 de C. de V. La mayor resistencia media necesaria corresponde a la curva de mayor desviación típica. La probabilidad de obtener resistencias mayores de la crítica ($R_c = 200$) es en nuestro ejemplo del 0,2765 por 100.

Podemos, pues, afirmar que la disminución de la dispersión dará más seguridad a la estructura que un aumento de la resistencia media del hormigón con mayores dispersiones. Y en la mayoría de los casos, será más fácil y económico mejorar la regularidad que aumentar apreciablemente la resistencia media.

La reducción de la dispersión tiene sus límites, como es lógico. Viene influida de manera muy directa por la regularidad del cemento.

Prácticamente es muy difícil conseguir que el hormigón presente un coeficiente de variación doble que el cemento:

$$c_h = 2 c_c .$$

Como hay que tender a conseguir un C. de V. del hormigón próximo al 10 por 100, no se puede aceptar para la construcción de presas un cemento con dispersiones mayores de las correspondientes a un C. de V. mayor del 6 por 100.

donde:

- e = error máximo de la media.
- t = variable de Student para $n - 1$ grados de libertad, correspondiente a un determinado nivel de probabilidad (90 por 100 en nuestro caso).
- c = coeficiente de variación.
- n = número de ensayos.

$$c = \frac{2,92 \times 5}{\sqrt{3}} = 8,5 \text{ por } 100.$$

Es decir, que en el 90 por 100 de los casos el error de la media no será superior al 8,5 por 100.

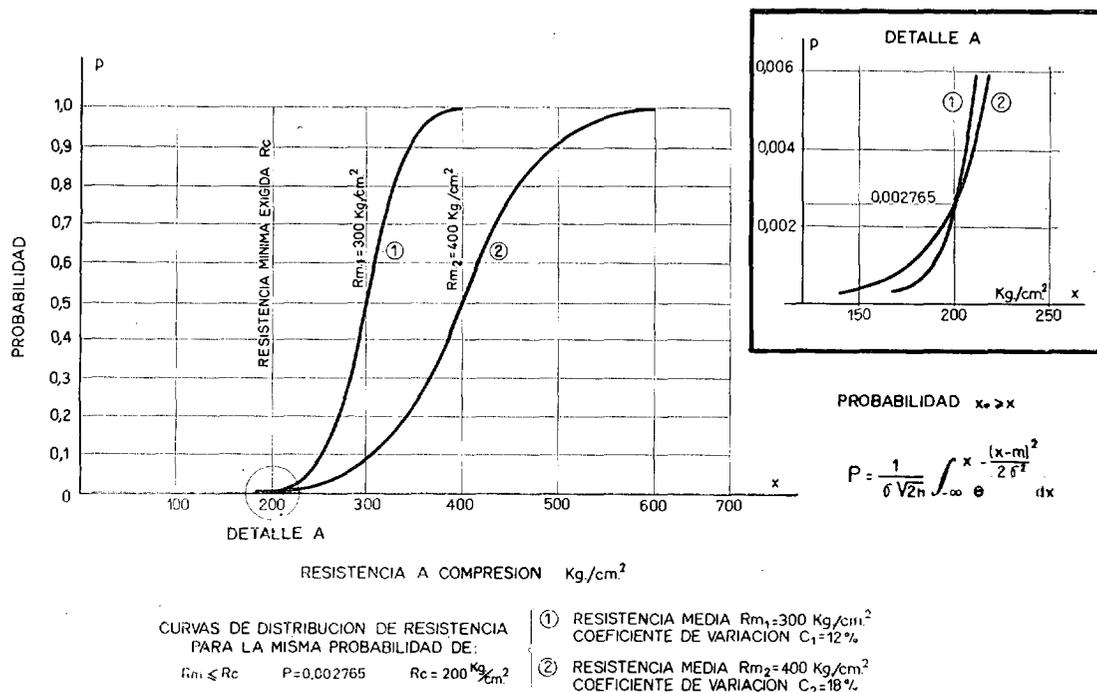


Fig. 2.ª.— Probabilidad. (Probability).
Curvas de distribución de dos hormigones distintos con la misma probabilidad de fallos.
(Curves of distribution of different types of concrete with the same probability of failures).

Respecto del número de probetas de cada muestra de hormigón fresco para romper a la misma edad, es suficiente el de 3, pues si aceptamos una dispersión de laboratorio y muestreo con un C. de V. 5 por 100 y aceptamos un nivel de probabilidad del 90 por 100, el error máximo es:

$$e = \frac{t C}{\sqrt{n}} ; (*)$$

(*) "Significance of test and properties of concrete and concrete-making materials". ASTM, Pub. n° 169-A. April 1956 (pág. 25).

En cambio, si el número de ensayos es muy grande:

$$e = \frac{1,645 \times 5}{\sqrt{3}} = 4,8 \% ;$$

Puede aceptarse que en obras bien controladas son suficientes tres probetas para determinar la resistencia media de una masada de hormigón, con un error máximo del 4,8 por 100 en el 90 por 100 de los casos. Lo cual es suficiente.

Por otra parte, para representar el hormigón colocado a lo largo de una jornada o de un turno, en obras de coeficiente de variación del 15 por 100 el error sería:

$$e = \frac{2,920 \times 15}{3} = 25 \% \text{ en el } 90 \% \text{ de los casos y pocos ensayos.}$$

En un número grande de ensayos (más de 30):

$$e = \frac{1,645 \times 15}{3} = 14 \%$$

Para obtener la resistencia media representativa del hormigón que se coloca en obra día tras día, suponiendo que la dispersión propia del ensayo, entre probetas de la misma serie, tiene un C. de V. 5 por 100 y la dispersión del hormigón del conjunto de series diferentes tiene un C. de V. 15 por 100, y queremos tener un error menor del 5 por 100 con probabilidad del 90 por 100, el número de ensayos o series de probetas viene dado por:

$$n = \left(\frac{tc}{e} \right)^2 ;$$

por serie:

$$n = \left(\frac{1,645 \times 15}{5} \right)^2 = 24,4 \dots = 25 \text{ probetas.}$$

Por tanto, si se hace una toma de muestras diaria, base de 3 probetas por serie, los resultados de un mes son suficientes para conocer los dos valores que nos definen, en cuanto a resistencias mecánicas, el hormigón colocado en obra: la resistencia media y el coeficiente de variación:

1.3. Densidad, impermeabilidad, durabilidad.

La densidad del hormigón de presas debe ser lo más alta posible. El mínimo exigido corrientemente de 2,35 Tm./metro cúbico de hormigón saturado superficialmente seco, es relativamente fácil de conseguir. Además la densidad es de las pocas cualidades del hormigón que no es contrapuesta con las demás. Es convergente con la resistencia, la impermeabilidad, la durabilidad y no afecta al calor de hidratación.

La impermeabilidad es también una cualidad específicamente requerida para el hormigón de presas, no tanto desde el punto de vista de los caudales de filtración a través de la masa de hormigón, sino porque afecta muy directamente a la durabilidad de la fábrica.

Las filtraciones a través del cuerpo de presa son debidas a defectos en el hormigonado, coqueras, nidos de piedras, juntas de fraguado, juntas horizontales entre tongadas y en especial a defectos en el sistema de impermeabilización de las juntas de contracción entre bloques de la presa.

Contra la durabilidad del hormigón actúan dos causas: los agentes meteorológicos y el agua de percolación procedente del embalse, que arrastra la cal liberada de los silicatos hidratados del cemento, lo cual origina la paula-

tina e irreversible degradación del hormigón a lo largo de la vida de la presa. Este efecto se acentúa en los embalses de aguas muy puras. 20

1.4. Calor de la hidratación.

La obtención de bajos calores de hidratación y su rápida disipación es, quizá, uno de los problemas que más preocupan en la construcción de las presas. El problema es mayor en presas de espesor grande, en las presas bóveda por requerir una temperatura baja en el momento de la inyección de juntas previo a su puesta en carga. También se agrava con la velocidad de construcción, siendo necesario establecer la refrigeración artificial del hormigón, lo cual ya es hoy preceptivo en presas gruesas construidas a ritmos normales.

En las bóvedas muy delgadas apenas existe problema de evacuación de calor (fig. 3.a).

2. ESTUDIO DE HORMIGONES

2.1. Fases del estudio de hormigones.

Existen dos fases en el estudio de hormigones para una determinada presa. La primera durante la elaboración del proyecto de la obra, y la segunda al principio de su ejecución, cuando se ponen en marcha las instalaciones definitivas.

2.2. Aridos. Comparación de posibles soluciones de cantera o yacimiento natural.

El estudio de hormigones empieza, naturalmente, por la búsqueda de posibles canteras o de yacimientos naturales. Del acierto en la elección depende, en gran parte, el éxito de la obra.

Cuando la presa está situada en terrenos de roca de buena calidad, no hay duda en la elección de cantera. Tal han sido los casos de las presas del tramo internacional del Dueró, en granitos excelentes, la presa del Eume, presa de San Juan y otras. Sin embargo, no es frecuente poder disponer de canteras inmediatas a la obra. Entonces no se destaca, a primera vista, la solución idónea, en cuanto a calidad, economía de la explotación y disponibilidad de los volúmenes necesarios.

En estos casos dudosos tiene que intensificarse el estudio en el reconocimiento del terreno y en el laboratorio de hormigones.

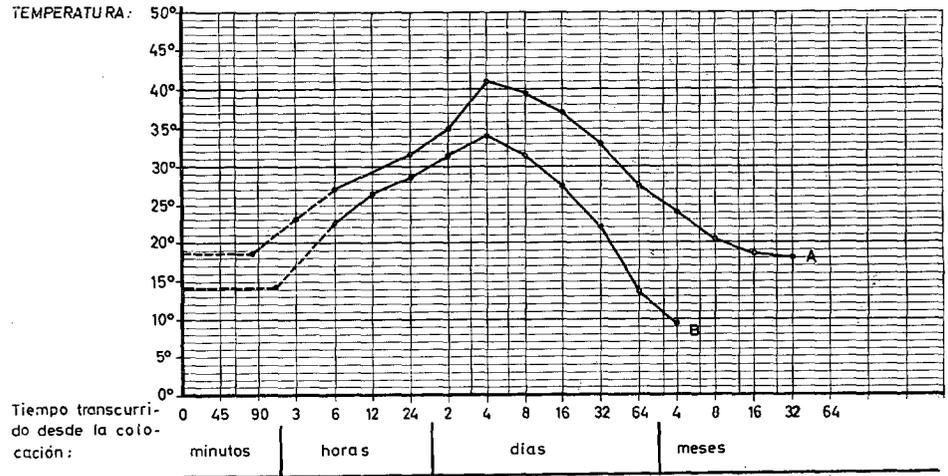
Hay que tener en cuenta también que, en su explotación, las canteras suelen resultar peores de lo previsto en los reconocimientos. No hay razón para suponer que al profundizar en el terreno se va a encontrar roca de mejor calidad que los crestones que afloran en superficie. Precisamente estos existen por haber resistido la meteorización.

A — PRESA DE SAN ESTEBAN, BLOQUE -21

B — PRESA DE SANTA EULALIA, BLOQUE-0

Fig. 3.^a — Curvas de temperatura del hormigón en una presa arco-gravedad (A) y en una bóveda delgada (B).

(Temperature curves of the concrete in a gravity arch dam (A) and in a thin arch dam (B)).



Hay que acentuar los trabajos de reconocimiento, con calicatas, sondeos y especialmente con galerías, en las vaguadas y depresiones del terreno.

También es preciso asegurarse con márgenes amplios de que existe suficiente cantidad de roca aceptable. El desperdicio de canteras y graveras suele ser mayor del previsto en los reconocimientos.

Aunque exista suficiente volumen útil *in situ*, la cantera

es posible si es económicamente explotable. Para ello hay que considerar el volumen de estériles, la posibilidad de una fácil eliminación de los materiales deleznable y la capacidad de producción requerida por el ritmo de hormigonado.

En el estudio de hormigones de la presa de Santa Eulalia, en el río Jares, se nos presentó un típico caso de los que hemos llamado dudosos.

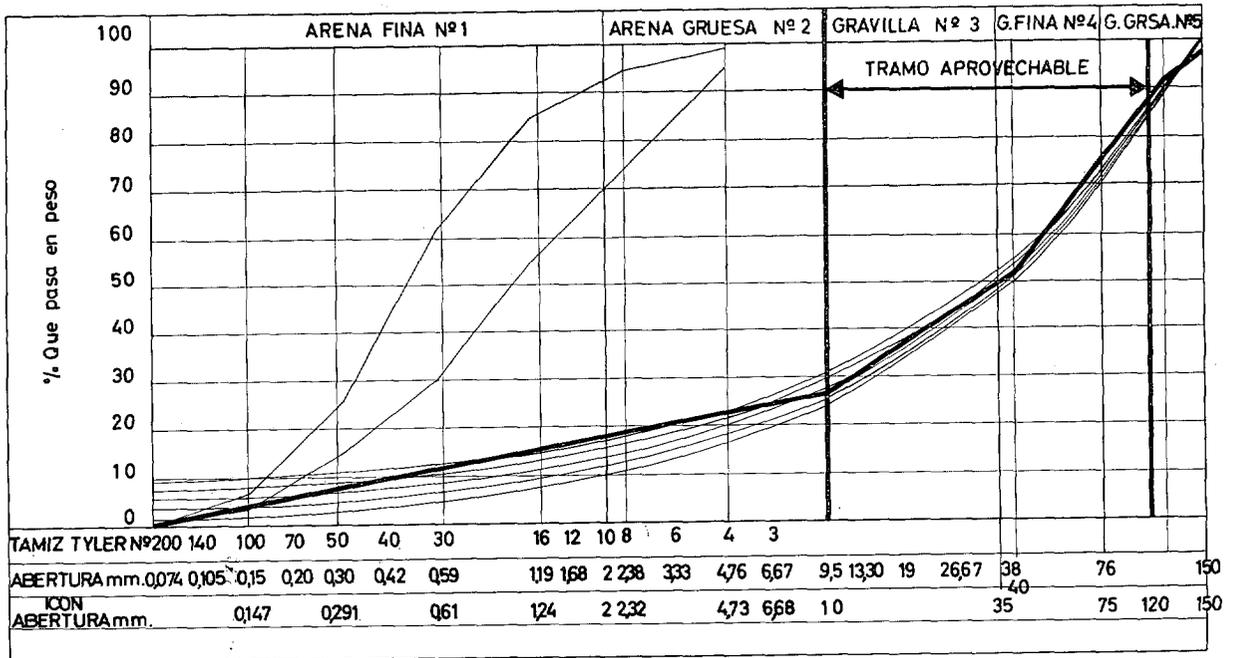


Fig. 4.^a — Granulometría natural de la gravera de La Rúa.
Granulometría del material de graveras del río Sil en la Rúa.
(Natural granulometry of La Rúa gravel pit).
(Granulometry of gravel material from the river Sil at la Rúa).

Una vez desechadas las soluciones de pequeñas canteras en explotación, de calidad de roca deficiente, quedaron dos soluciones a comparar: los granitos de una zona próxima a la presa de Prada, solución que requería la construcción de una carretera de 6 Km. en terreno accidentado, y de otro lado una solución mixta a base de gravas del río Sil, para el árido grueso y calizas metamórficas cristalinas del Barco o Peñarrubia. La distancia de transporte sería de 12 Km. para las gravas y de 25 kilómetros para las calizas, sin necesidad de construir nuevos caminos (fig. 4.^a).

Debido a que las gravas contenían gran cantidad de pizarra en los tamaños pequeños y la arena era inadecuada para el hormigón de la presa, por estar cargada de limo y carbón, el primer problema que se planteó fue la determinación del tamaño por debajo del cual debía rechazarse el material de gravas. Este quedó limitado a 10 mm. después de varios ensayos comparativos. Fijado en 100 mm. el tamaño máximo del árido, dadas las características de esbeltez de la presa (de 7 m. a 2,50 metros de espesor de bóveda), se comprobó que no era aconsejable el machaqueo del canto rodado superior a este tamaño, pues la piedra de naturaleza silícea partía en formas planas, casi en rodajas.

Las dos soluciones estudiadas resultaban aceptables

desde el punto de vista técnico, aunque la combinación de árido fino de caliza y árido grueso de río, daba una calidad notablemente superior al hormigón, que el árido procedente de la roca granítica de Prada.

Ante la pequeña diferencia en el costo de la solución con árido mixto de gravas y caliza (no mayor de un 4 por 100), se decidió por esta solución que, además, presentaba la ventaja de obtener hormigones fáciles de consolidar.

El estudio comparativo de los áridos se basó en el examen petrográfico de la roca, la determinación de la densidad, del coeficiente de absorción de agua, de la heladicidad y del coeficiente de forma o volumétrico de las partículas. Finalmente la prueba decisiva, consistente en realizar ensayos de morteros y hormigones con los distintos áridos posibles.

Un índice claro de la calidad de las arenas resulta de la comparación con la arena normalizada de Segovia, que se prescribe para los ensayos de cemento. Dicha comparación ha de realizarse con muestras preparadas con la misma gradación granulométrica que la arena normalizada. En el cuadro siguiente se han reunido los resultados obtenidos en el estudio de hormigones de la presa de Santa Eulalia.

FLEXOTRACCION

Mortero 1 : 4, A/C = 0,60

Arena de	Resistencia en Kg./cm. ²		
	3 días	7 días	28 días
Normalizada de Segovia	34,54 (100 %)	48,66 (100 %)	55,21 (100 %)
Granito	28,70 (83 %)	35,44 (73 %)	52,62 (95 %)
Caliza del Barco	42,37 (123 %)	60,16 (123 %)	75,48 (137 %)
Gravera de la Rúa	31,40 (91 %)	39,48 (81 %)	49,16 (89 %)

COMPRESION

Arena de	Resistencia en Kg./cm. ²		
	3 días	7 días	28 días
Normalizada de Segovia	186,8 (100 %)	270,5 (100 %)	461,4 (100 %)
Granito	159,6 (85 %)	208,9 (77 %)	393,1 (95 %)
Caliza del Barco	197,2 (105 %)	358,5 (136 %)	547,7 (119 %)
Gravera de la Rúa	157,8 (84 %)	227,91 (84 %)	401,4 (87 %)

En los ensayos de laboratorio hemos podido verificar la teoría de J. Farran ("Contribution a l'étude de l'adhérence entre les constituents hydratés des ciments et les matériaux enrobés". *Revue des Matériaux de Construction*, núms. 490, 491, 492, de julio, agosto y septiembre de 1956), sobre el efecto de unión interfacial (epitáxica) entre los cristales de calcita de una roca caliza cristalina y los silicatos hidratados del cemento.

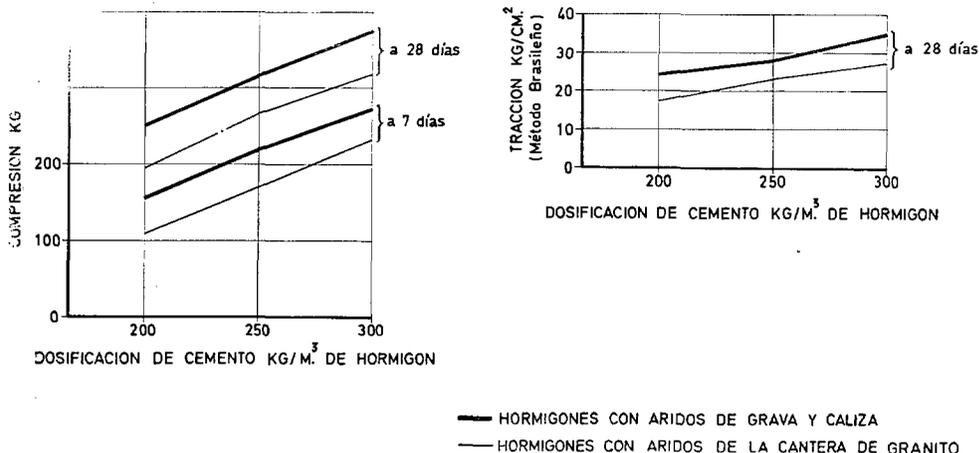
De los cuadros anteriores se deduce que el efecto favorable de la caliza se acusa más en las resistencias a tracción que en las de compresión, lo cual es muy interesante para los hormigones de presas.

En los ensayos con hormigones también se ha destacado el efecto favorable de las arenas de caliza metamórfica (fig. 5.^a).

El estudio de hormigones realizado en la fase de pro-

Fig. 5.^a — Resistencias mecánicas de hormigones estudiados en Laboratorio con áridos de dos orígenes diferentes: Calizas-gravas y roca granítica.

(Mechanical strength of various types of concrete studied in the laboratory with aggregates of two different origins: limestone plus gravels and granite rock.)



yecto permite establecer las exigencias mínimas que han de cumplir los áridos, y en consecuencia, redactar, con conocimiento de causa, el Pliego Particular de Condiciones del proyecto de la presa.

El establecimiento de condiciones generales sin haber realizado el estudio de áridos y hormigones nos parece contraproducente, porque o bien se fijan unos límites tan amplios que no definen la calidad del hormigón, o por el contrario, tan estrictos que no es posible una solución económicamente adecuada a las características específicas de la presa a construir.

El conflicto entre calidad y costo he da resolverse, en cada caso particular, mediante un estudio de hormigones anterior a la contratación de la obra.

2.3. El cemento.

Tan importante como el estudio de los áridos es la determinación de las características del cemento a emplear en la obra.

No se puede hablar, en general, de cemento para presas. En una presa de gran espesor interesa emplear cemento de bajo calor de fraguado, en cambio en una bóveda delgada, de cierta altura y con fuerte desplome no

preocupa tanto el calor de hidratación, como obtener resistencias iniciales relativamente altas, pues de lo contrario no sería posible un ritmo de construcción que permita desenfocar con la prontitud necesaria.

El tema del cemento es tan extenso que sería demasiado prolijo intentar ahora una exposición metódica de todas sus facetas. Haremos solamente unas breves consideraciones.

El bajo calor de fraguado por metro cúbico de hormigón de presa, ha de buscarse reduciendo la dosificación de cemento al mínimo compatible con la resistencia, impermeabilidad y docilidad exigidas al hormigón.

No se debe exagerar esta tendencia. Los hormigones excesivamente pobres en cemento suelen ser poco durables, porosos y de alta dispersión.

Los cementos puzolánicos son los más adecuados para

la construcción de presas. A la reducción del calor de hidratación por unidad de conglomerante, se une el importante efecto de fijación de la cal liberada a lo largo del proceso de hidratación de los silicatos cálcicos del cemento. Esto da lugar a hormigones más durables y resistentes a la acción de lavado por el agua que se filtra a través de la masa del hormigón a la presa, con independencia de la mayor o menor agresividad química del agua.

El cemento ideal para presas ha de tener un moderado contenido de silicato tricálcico, el más alto posible de dicálcico. La mínima cantidad de aluminato tricálcico. El resto de ferrito-aluminato-tetracálcico.

El ingeniero autor del proyecto y el constructor de la presa, no pueden desentenderse de cómo ha de ser el cemento a emplear y mucho menos considerarlo un material tipificado comercialmente.

Del mismo modo que en la elección de la fuente del material para la producción de áridos es necesario el estudio comparativo técnico-económico de las distintas posibilidades, es preciso seleccionar el cemento adecuado a la presa dentro de las posibilidades técnicas y económicas ofrecidas por los fabricantes.

La elección del cemento ha de ser simultánea a la

A — SEGUN EL MANUAL A. DEL HORMIGON. CON CEMENTO TIPO II

B — HORMIGON DE LA PRESA DE SANTA EULALIA.

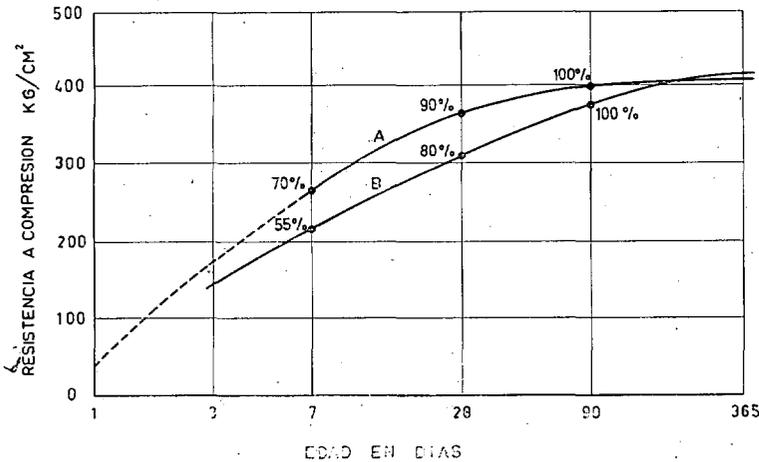


Fig. 6.^a — Curvas de endurecimiento del hormigón. Endurecimiento del hormigón elaborado con un cemento tipo II norteamericano y con otro cemento portland ordinario.

(Curves of hardening of concrete.)
(Hardening of the concrete prepared with a type II United States cement and with another ordinary Portland cement.)

de los áridos, ya que el estudio de hormigones ha de realizarse con el cemento tipo elegido.

En la figura 6.^a se han superpuesto las curvas de endurecimiento de dos hormigones, el primero dosificado con cemento tipo II U.S.A., apropiado para presas de gran es-

pesor, y el segundo con un cemento portland español, de buena calidad, adecuado para bóvedas delgadas.

2.4. Hormigones tipo de proyecto.

En el proyecto de la presa es imprescindible definir

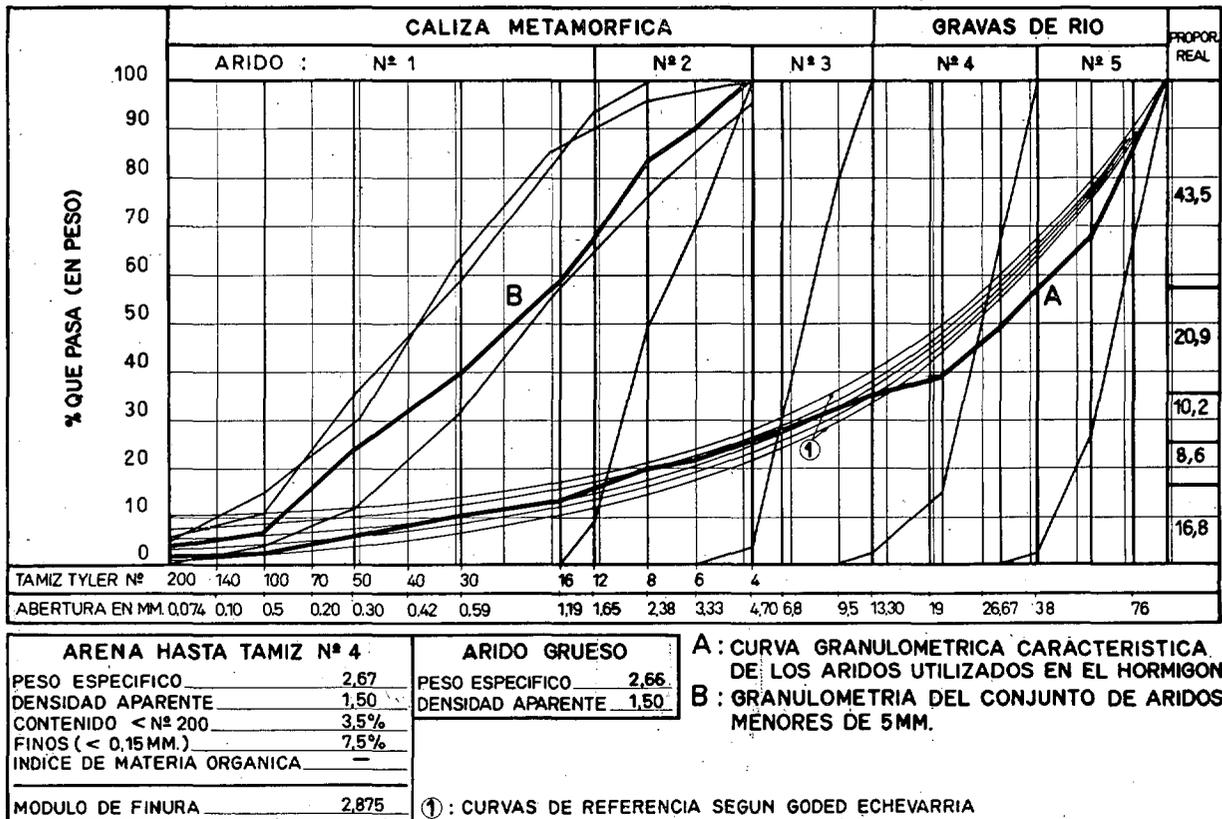


Fig. 7.^a — Composición granulométrica del hormigón empleado en la presa de Santa Eulalia.

(Granulometric composition of the concrete used in the Santa Eulalia Dam).

los tipos de hormigón a emplear en obra. Estos resultan de ensayos de laboratorio con los áridos, cemento y aditivos elegidos.

Los hormigones tipo han de ser definidos fundamentalmente por la dosificación de cemento, composición granulométrica y docilidad.

La fijación de la composición granulométrica de los áridos ha de hacerse estableciendo el número de clases o tamaños de los áridos clasificados, así como los límites de cada clase.

El número mínimo de tamaños debe ser cinco. No creemos que el aumento de calidad en clasificar en más de ocho tamaños compense el mayor costo que esto supone.

En cuanto a la curva granulométrica, sólo como punto de partida ha de tomarse alguna de las teóricas y corregirla mediante ensayos para buscar la máxima compacidad con el menor contenido de cemento, partiendo siempre de la base de una docilidad conveniente del hormigón fresco para que se pueda colocar y vibrar con gran facilidad. Es mejor un hormigón plástico cuya buena consolidación pueda asegurarse en todos los puntos de la presa, que un hormigón seco que implica peligro de segregación, nidos de piedras e incluso zonas mal consolidadas (fig. 7.*).

Como es sabido, la granulometría del árido fino tiene fundamental importancia en la calidad del hormigón.

Para encajar en la práctica la curva granulométrica dentro de los límites de una buena gradación, se ofrecen dos caminos distintos:

a) Disponer, en el proceso de trituración, de máquinas

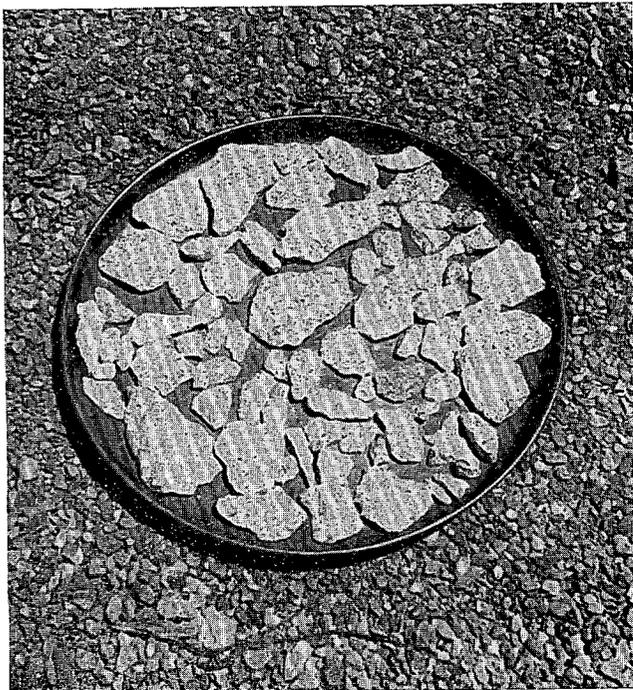


Figura 8.^a.

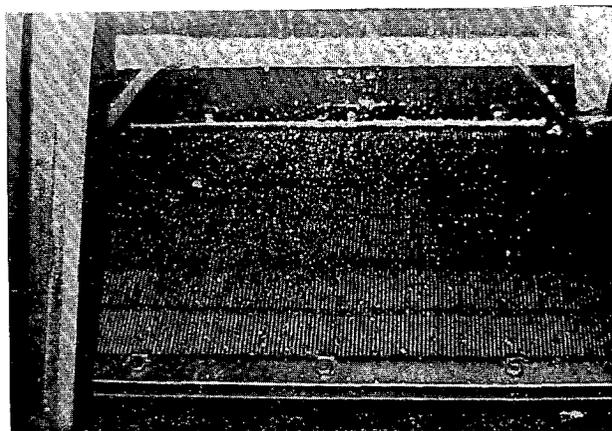


Fig. 9.^a — Criba tipo Norberg, de varillas calibradas.
(Norden type screen of gauged rods.)

que por sus características y forma de instalación produzcan, en todo momento, árido fino de granulometría invariable, dentro de los límites aceptados.

b) Clasificar el árido fino en varios tamaños.

En el caso de arenas naturales, como es lógico, sólo cabe la segunda modalidad.

Indudablemente el punto crítico de la granulometría de las arenas está en el entorno de 1 mm. Por ello, en presas de cierta importancia, es conveniente poder separar las arenas por este tamaño. Esto se consigue con el empleo de clasificadores hidrodinámicos (Rheax, Lavodune, etcétera), o bien, cuando el tratamiento es por vía seca, mediante ciclones.

Con cribas vibratorias corrientes no es posible clasificar en tamaños inferiores a 2,5 mm. Puede llegarse a 1,6 mm. empleando cribas vibratorias especiales (tipo Norberg, etc.) (fig. 9.^a).

La decisión, en el proyecto, de la clasificación de la arena, por 1 mm., o si puede aceptarse una separación por un tamaño mayor, siempre menos costosa, depende de los siguientes factores:

a) Cuando la granulometría, una vez eliminado el material que pasa por el tamiz núm. 200 (0,074 mm.), en el tramo de árido de 0 a 2,5 mm. o 1,6 mm., sale fuera de los límites aceptables, ya sea por falta de finos (que es lo más frecuente) o por exceso de éstos.

b) En los casos en que es preciso disminuir el contenido de mica suelta procedente de la trituración de rocas que, sin este recurso tendrían que ser rechazadas para la producción de áridos, especialmente si se trata de moscovita (mica blanca).

La forma del árido tiene gran importancia en la docilidad del hormigón. Con áridos angulosos es preciso aumentar bastante la cantidad de arena fina. La simple forma de partirse la roca, por muy dura y compacta que sea, es motivo suficiente para desechar una posible fuente de áridos (fig. 8.^a).

3. DEFINICION Y CONTROL DEL HORMIGON EN LA EJECUCION DE LA OBRA

3.1. Hormigones patrón.

Una vez puestas en funcionamiento las instalaciones de áridos y de hormigonado de la presa, viene una nueva etapa de ensayos para comprobar que los áridos clasificados cumplen las condiciones exigidas.

Con los áridos y el cemento que se va a emplear en obra se definirán lo que denominamos hormigones patrón, cuyas cualidades no serán inferiores a las de los hormigones tipo establecidos en el proyecto.

Es frecuente tener que ajustar la curva granulométrica para mejorar el hormigón y atemperar su composición a las posibilidades de producción de los áridos.

La forma de los áridos procedentes de trituración de roca, depende en gran parte del proyecto de la instalación de machaqueo. No obstante, puede suceder que, aun estando bien elegido el tipo de las máquinas de cada una de las etapas de trituración, la textura de la roca dé lugar a formas excesivamente lajosas o alargadas en algún tamaño intermedio. La supresión de este tamaño en la composición del hormigón puede ser aconsejable, aunque esto obligue a adoptar granulometrías no continuas, con todos los inconvenientes que entraña, por la tendencia a la segregación del hormigón fresco y por la repercusión exagerada que sobre la calidad de estos hormigones discontinuos producen las pequeñas desviaciones en su composición.

Los hormigones que se realicen en la ejecución de la obra habrán de ser lo más parecidos posible a los "hormigones patrón", y las resistencias no deberán apartarse de las de éstos en un tanto por ciento fijado de antemano en el Pliego de Condiciones.

3.2. Vigilancia durante la construcción.

El hormigón de una presa es el producto de un complicado proceso en el que intervienen materiales, maquinaria y equipos de hombres. La calidad de este producto puede quedar comprometida por el fallo eventual en cualquiera de sus fases en el transcurso de la obra.

Si aquel fallo se produce, la posibilidad de corrección es prácticamente nula. La demolición de una parte de la obra ocasionaría graves trastornos.

El hormigón no es un producto manufacturado que pueda rechazarse a su recepción. Tampoco es susceptible de reparaciones satisfactorias.

Por estos motivos, es indispensable la constante inspección de todas y cada una de las operaciones que componen el proceso de su producción, así como de la calidad de los materiales que lo integran.

3.3. Control del cemento.

Podemos distinguir entre control de recepción del ce-

mento y control estadístico a efectos de comparación con los resultados de los ensayos de hormigón.

La recepción del cemento puede realizarse en fábrica, con lo cual se tiene la garantía de que todos los envíos a la obra cumplen las condiciones exigidas en el Pliego de Condiciones.

Si la recepción se efectúa en obra, es necesario conocer los resultados de los ensayos relativos al cemento contenido en un silo antes de iniciar su empleo. Esto obliga a tener en obra por lo menos tres silos, uno en fase de llenado, otro en espera y otro en vaciado.

En el caso de un cemento de cierta regularidad creemos suficiente tener los resultados de las roturas de probetas a los tres días de edad, para poder autorizar su empleo.

3.4. Producción de áridos.

La inspección en la producción de los áridos abarca desde la cantera o gravera, hasta los silos inmediatos a las hormigoneras. El control se suele establecer sobre los puntos siguientes:

Cantera: Capa vegetal, rocas blandas, arcilla.

Eficiencia de clasificación: Mallas rotas en las cribas, cribas sobrecargadas, etc.

Alimentación de las machacadoras y molinos.

Curvas granulométricas. Individuales del material de cada tamaño de árido clasificado.

Contenido de impurezas en la arena y en el árido grueso.

Contenido de agua en los áridos, especialmente en las arenas.

El control del agua contenida en las arenas merece gran atención, pues la oscilación del agua de amasado suele ser, a menudo, la causa principal de la irregularidad del hormigón colocado en obra.

Excepto los casos poco frecuentes de proceso de clasificación de áridos y eliminación de polvo por vía seca, la clasificación de arenas y eliminación de arcilla se realiza por vía húmeda, lo cual presenta la dificultad de la gran oscilación del contenido de agua en los áridos finos.

El árido grueso, que también ha de ser lavado, es fácil de drenar en el interior de los silos. Por el contrario, el secado de las arenas, concretamente de la arena fina, exige un estudio cuidadoso al proyectar las instalaciones.

El procedimiento más eficaz consiste en disponer varios silos de arena, con el fin de dar tiempo de escurrido del agua a través de un sistema de drenaje.

Es práctica frecuente el empleo de aparatos vibratorios para el escurrido de las arenas antes de ser introducidas en los silos de secado.

Es casi imposible controlar la relación A/C del hormigón con arenas con más del 12 por 100 (en peso) de contenido de agua.

La eficiencia de la clasificación de los áridos en el cribado queda disminuida por la rotura de los áridos gruesos al caer dentro de los silos y por la abrasión producida en el interior de ellos al vaciarse. El primer efecto puede

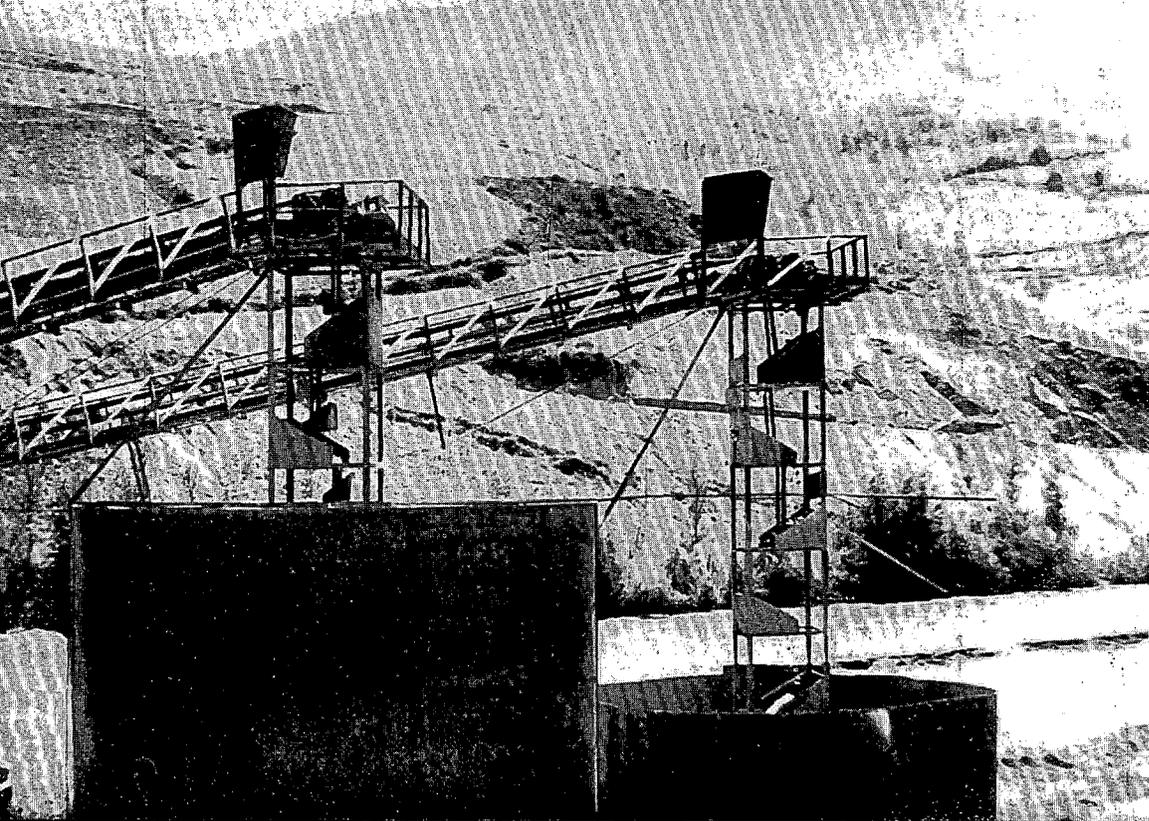


Figura 10.

paliarse empleando dispositivos tales como las escalas de bandejas que limitan la altura libre de caída (fig. 10).

El efecto de la abrasión en el interior de los silos se ha querido remediar por medio de un lavado sobre cribas inmediatas a la central de hormigonado.

Esta solución no es aconsejable por modificar en proporciones muy variables el contenido de agua en los áridos.

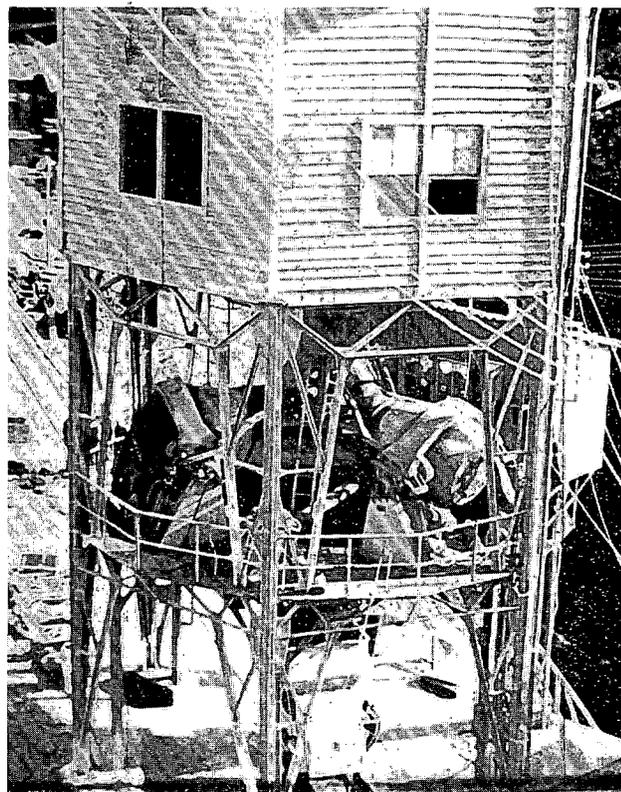
3.5. Fabricación del hormigón.

El empleo, cada vez más generalizado, de las modernas torres o centrales de hormigonado, ha facilitado el problema de fabricar hormigones uniformes a ritmos elevados de producción. Sin embargo, no basta instalar una torre automática o semiautomática, con preselección de tipos de hormigón, pupitres de mando centralizado y echarla a rodar.

En primer lugar, es preciso que la torre de hormigonado cumpla una serie de requisitos de precisión en sus básculas, de posibilidad de corrección rápida del agua de amasado, de la arena y del cemento y de comprobación de dosificadores. Especificaciones que deben establecerse en el Pliego de Condiciones, de acuerdo con las características de la presa a construir.

Es muy conveniente independizar la estructura de sustentación de las hormigoneras del resto de la torre. De lo contrario, las vibraciones fuertes que producen las hormigoneras descorren con frecuencia los dispositivos de pesaje (fig. 11).

Figura 11.



La determinación del contenido de agua de las arenas ha de poderse realizar con rapidez, a fin de modificar la dosificación de arena y del agua de amasado siguiendo las oscilaciones de la agua contenida en los áridos. El procedimiento mejor es disponer de medidores automáticos de la humedad de las arenas, basados en la mediación de la resistividad eléctrica o por isótopos.

Es obligado mantener un control periódico de los errores de pesadas de todos los dosificadores.

Corrientemente se exige una tolerancia de pesadas del 5 por 100 en los áridos gruesos, del 3 por 100 en las arenas, y del 1 por 100 para el agua y del cemento. Estas

fáciles de colocar y vibrar. Emplear vibradores potentes y en número suficiente. Establecer la vibración mecánica si el volumen de la obra lo requiere, y proyectar los medios auxiliares de transporte y vertido del hormigón que no produzcan segregaciones.

Respecto de la vibración mecanizada con batería de vibradores sobre tractor, hay que tener en cuenta que la necesidad de consolidar las capas que constituyen una tongada, antes de iniciarse el fraguado de las subyacentes, puede ser determinante de la capacidad horaria de los medios de fabricación y transporte del hormigón.

La unión de tongadas merece especial atención, puesto

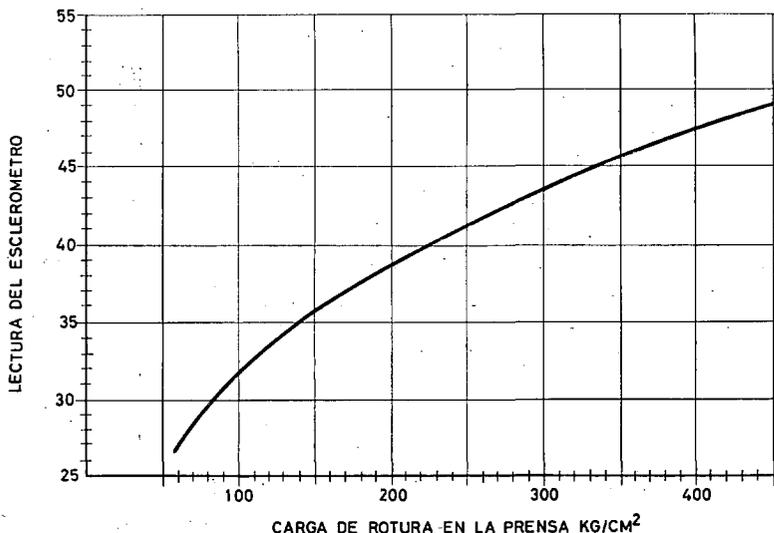


Fig. 12.— Curva de tarado del esclerómetro con probetas cilíndricas 15 X 30. Correlación entre lecturas de esclerómetro y resistencias a compresión en probeta cilíndrica. Corresponde al hormigón de la presa de Santa Eulalia. (Sclerometer curve with cylindrical test specimens 15 X 30.) (Correlation between Sclerometer readings, and resistances to compression in cylindrical specimens. This corresponds to the concrete of the Santa Eulalia dam.)

sensibilidades son fáciles de conseguir en torres de hormigonado de cierta calidad.

3.6. Puesta en marcha del hormigón.

Suponiendo que hemos fabricado un hormigón uniforme y de buena calidad en la torre de hormigonado, a través de un largo proceso de producción bien proyectado y conscientemente controlado en todas sus fases, el resto de la cadena productiva, esto es, la colocación en obra del hormigón, depende fundamentalmente del factor humano que pisa el tajo durante todas las horas de todos los días de hormigonado de la presa, en colaboración estrecha con el personal del laboratorio de pie de obra, cuya misión ha de ser mantener la calidad con autoridad y corregir con presteza las anomalías que pueden presentarse en cualquier momento, con espíritu de equipo y sentido de la responsabilidad.

En definitiva, no hay más garantía de la calidad de la colocación y de la vibración en el bloque que se está hormigonando, que la supervisión de este equipo de hombres. Todas las comprobaciones posteriores son simples testimonios de defectos que ya no se pueden remediar.

Por ello es obligado proyectar hormigones dóciles,

que casi siempre las filtraciones en los paramentos de las presas aparecen en las juntas horizontales.

Nos ha dado siempre buen resultado la extensión, no de una capa de mortero, sino de hormigón de gravilla elaborado con los mismos componentes que el hormigón normal, que se va a colocar suprimiendo los áridos superiores de 30 ó 40 milímetros.

En las presas en arco conviene evitar la continuidad horizontal de las uniones, estableciendo diferentes niveles de enrase en las tongadas de bloques contiguos.

Si un bloque ha de quedar sin hormigonar más de una semana, es conveniente colocar una tapajunta horizontal en el paramento de arriba.

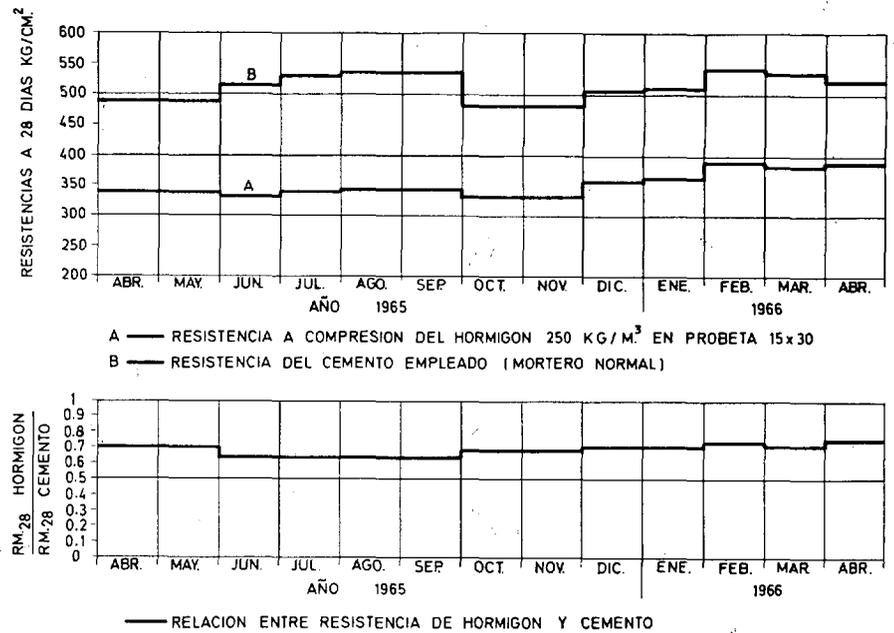
3.7. Desencofrado, curado y terminación.

Generalmente en los pliegos de condiciones se especifica que el desencofrado del hormigón no ha de realizarse hasta que éste haya adquirido una resistencia triple de la carga de trabajo que haya de soportar. A veces se especifica, además, que las tongadas no podrán desencofrarse hasta transcurridas cuarenta y ocho horas de la terminación del hormigonado.

La primera prescripción es bastante lógica, sin em-

Fig. 13.—Presa de Santa Eulalia.
Resultados obtenidos.
Resistencias medias mensuales del cemento y del hormigón a veintiocho días. La relación entre ambos ha sido del orden de 0,7.

(Santa Eulalia dam.)
(Mean monthly strengths of cement and of concrete at 28 days. The relation between both factors is of the order of 0.7.)



bargo, la segunda quizá, sea contradictoria con la primera, en invierno, y con cementos lentos y excesiva, en tiempo cálido con cementos normales.

Conviene, pues, conocer, en cada caso concreto y en cada época del año, el curso que sigue el endurecimiento del hormigón en sus primeros días de edad.

Para ello, se puede determinar la curva de endurecimiento mediante rotura de probetas a distintas edades.

En presas bóveda con fuerte desplome de paramentos tiene importancia este tema, ya que los encofrados han de sujetarse mediante anclajes a la tongada recién hormigonada.

Por la facilidad del ensayo puede ser útil el empleo del esclerómetro para conocer el grado de endurecimiento del hormigón de los paramentos. Naturalmente, hay que obtener antes, en laboratorio, una curva de correlación

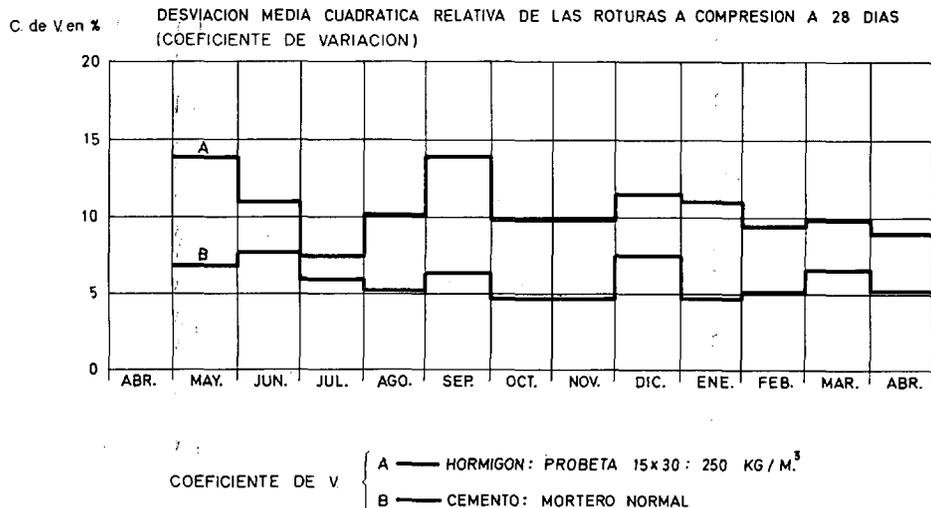


Fig. 14.—Presa de Santa Eulalia.
Dispersiones mensuales obtenidas en la resistencia del hormigón de la presa de Santa Eulalia. Se ha superpuesto la dispersión de los ensayos del cemento empleado. La dispersión está cifrada por el coeficiente de variación (desviación media cuadrática relativa). El aumento brusco de la dispersión en el mes de septiembre de 1965, fue debida a un mayor porcentaje de piedras de pizarra en el árido mayor de 12 mm. Esto obligó a rechazar una determinada zona de las graveras del río Sil.

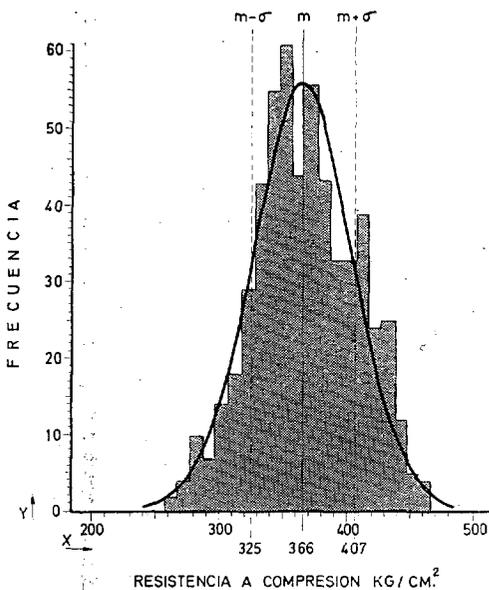
(Santa Eulalia dam.)
(Monthly dispersions obtained in the strength of the concrete in the Santa Eulalia Dam. The dispersion of the tests of the cement employed has been superimposed. The dispersion is expressed in numerical terms by the coefficient of variation (mean relative quadratic deviation). The sharp increase in dispersion in the month of september 1965 was due to a higher percentage of shale stones in the aggregate greater than 12 mm. This made it necessary to reject a certain zone of the gravel deposits of the river Sil).

entre la lectura del esclerómetro y la carga de rotura del hormigón (fig. 12).

Siguiendo el proceso de la construcción, no hemos de olvidar que el curado del hormigón tiene tanta importancia como una buena consolidación. También es obligada la reparación de los defectos de los paramentos vistos no sólo por motivos estéticos, sino también desde el punto de vista funcional, como es la eliminación de resaltes en los vertederos y la supresión de los elementos metálicos salientes, cuya oxidación pueda perjudicar al hormigón.

3.8. Resultados obtenidos. Regularidad.

Los resultados que se van obteniendo a lo largo de la



DISTRIBUCION DE RESISTENCIAS A 28 DIAS

HORMIGON DE 250 KG/M.³
 RELACION AGUA/CEMENTO DE 0,47 A 0,50
 ASIENTO CONO DE ABRAMS DE 30 A 45 M.M.
 PROBETAS CILINDRICAS 15 x 30
 DENSIDAD DE 2,45 A 2,47
 NUMERO DE ENSAYOS 1140
 TAMAÑO MAXIMO 100 M.M.
 CEMENTO: REST. MEDIA 28 d.: 517. KG/CM.²
 COEF. DE VARIACION: 6,70 %

RESISTENCIA MEDIA: 366 KG/CM.²
 COEFICIENTE DE VARIACION: 11,22 %

obra, han de reflejarse en gráficos. Así se conocerán las fluctuaciones de los hormigones y podrán corregirse a tiempo las tendencias desfavorables al mismo tiempo que se fomenta la preocupación por la calidad, aunque la obra dure muchos meses.

El gráfico comparativo de dispersiones mensuales y al origen de las resistencias del cemento y del hormigón, es muy interesante, pues refleja el grado de calidad de los factores propios de la obra.

Prácticamente es imposible obtener un hormigón con menor dispersión que el cemento. Es índice de buena ejecución un coeficiente de variación de las resistencias del

hormigón, inferior al doble del correspondiente al cemento. 20

La calidad del hormigón de la presa y, en consecuencia, el grado de seguridad real de la estructura, queda fijado definitivamente por la resistencia media y el coeficiente de variación del conjunto de los resultados de rotura de todas las probetas (figs. 13, 14 y 15).

4. CONCLUSIONES

En definitiva, podemos decir que la calidad del hormigón de presas está basada en los puntos siguientes:

1.º La elección acertada de cantera o yacimiento de material para la producción de áridos.

Fig. 15.— Presa de Santa Eulalia.

Curva de frecuencia de las resistencias a veintiocho días de todas las probetas de hormigón de la presa de Santa Eulalia. La excelente regularidad obtenida se debe a la uniforme calidad de los áridos y especialmente al proceso de preparación de los áridos clasificados, así como a la precisión de pesaje del agua y del cemento en la torre de hormigoneras.

(Santa Eulalia Dam).
 (Frequency curve of resistances at 28 days of all the test specimens of concrete of the Santa Eulalia Dam. The excellent regularity obtained is due to the uniform quality of the aggregates and specially to the process of preparation of the graded aggregates, as well as to the precision in the weighing of the water and the cement in the concreting tower).

2.º El empleo del cemento adecuado.

3.º El proyecto de las instalaciones de áridos y hormigonado.

4.º El control de la ejecución de la obra en todas su fases.

Sobre hormigones de presas se ha escrito mucho y se han dado muchas normas y especificaciones numéricas, quizá demasiadas, pero lo cierto es que la definición de los hormigones de cada presa concreta, tiene que resolverse mediante ensayos de laboratorio a pie de obra.