

DOSIFICACION DE HORMIGONES

Conferencia dictada en la Facultad de Arquitectura por el profesor de la Universidad de Madrid, don Francisco Arredondo en el Invierno de 1962

Hace algunos años, interviene en nombre del Instituto "Eduardo Torroja", en una gestión de tipo administrativo larga y complicada. Cuando ya estaban todas las dificultades resueltas y quedaba todo el asunto pendiente tan sólo de la aprobación de la Superioridad, el letrado del organismo oficial con quien se realizaba la gestión me indicó la conveniencia de presentarle todo el protocolo a su jefe para ver si estaba de acuerdo y podía darlo por terminado.

Así lo hicimos y entramos en el despacho del jefe que era un señor de mucha edad y mal humor. Fue revisando toda la documentación acumulada y al llegar a un determinado papel se enfadó mucho y comenzó a chillar diciendo que las cosas no se habían hecho como él había dicho y que aquello no estaba correcto.

Como yo sabía que si estaba correcto, le invité a que leyera aquel papel completo, hasta el final. Así lo hizo y entonces se convenció de que todo estaba en regla, pero haciendo uso de mal humor habitual renegó mucho y protestó de que hubiera que leer todos los papeles hasta el final.

Bien, pues por mucho que proteste, quien proteste, no hay más remedio que leer todos los papeles hasta el final. En todos los órdenes de la vida las cosas no se pueden dejar a medias; hay que hacerlas hasta el final. Las máquinas no funcionan hasta que se pone el último tornillo.

La construcción no puede verse alejada de este ambiente general y es natural que en un proyecto haya que estudiarlo todo y no dejarse ningún detalle por estudiar y hay detalles que a muchas personas les parecen secundarios y los dan de lado.

¿Puede decirse que es secundario el revestimiento refractario de horno de acero? La industria norteamericana del acero estuvo a punto de parar durante la primera guerra europea por falta de refractario. Decidme si es secundario o no.

Hay técnicos que desdeñan ocuparse del proyecto de una mezcla de hormigón por considerar que es un tema de poca categoría. Se limitan a dar a un encargado de obra la orden de que prepare un hormigón de tantos kilogramos por metro cúbico y nada más.

Entonces, para quedarse del lado de la seguridad y permanecer a salvo de una posible baja de la resistencia del hormigón, aumentan las secciones de los distintos elementos. Al aumentar la sección se aumenta el coste de la estructura, se aumenta el coste del encofrado, se aumenta el peso propio y por tanto el coste de la cimentación, etc., y el propietario, paga. No creo que esto esté autorizado en ningún libro de moral profesional.

Quiero llevar a nuestro convencimiento el problema de la dosificación de un hormigón existe y que para cada caso concreto hay que estudiarlo considerando todas y cada una de las variables que en él intervienen. Es un problema que hay que estudiar tan seriamente como se estudia la distribución de momentos.

Vamos, pues, a considerar este problema en visión panorámica.

¿De qué depende el hormigón más conveniente en cada caso?

Depende de cuatro factores fundamentales que son:

- 1º—Las características de la obra.
- 2º—Equipo e instalaciones.
- 3º—Control de hormigonado.
- 4º—Materiales.

Las necesidades de cada obra son distintas. En una obra de hormigón armado la característica esencial del hormigón será su resistencia a compresión. En una carretera, es fundamental la resistencia a los ciclos alternos de hielo y deshielo y la resistencia a la abrasión. Lo esencial del hormigón en un depósito de agua será la impermeabilidad. En cimentaciones o en túneles pueden ser los sulfatos del terreno los que den quebraderos de cabeza al técnico.

El efecto combinado de la abrasión y la corrosión de tipo químico no podrá olvidarse al proyectar una obra marítima. La forma y dimensiones de los encofrados y la distribución de armaduras también son factores que hay que tener en cuenta.

Es indudable que todas estas características influirán en el hormigón que tratamos de proyectar.

También influirán en las características del hormigón la maquinaria de obra que con él tenga relación.

Las instalaciones de trituración y de clasificación de áridos harán que éstos puedan o no cumplir una determinada granulometría. La dosificación no podrá ser la misma si el hormigón se va a colocar en obra por canaletas o por un blondin, ni si se va a colocar por picado con barra o por vibración.

No es igual tampoco que las instalaciones permitan un buen control del hormigón o que no hagamos nada para evitar que cambie la humedad de la arena y midamos los materiales en volumen aparente, ya que, en este caso, la estabilidad de la masa fresca y la resistencia media del hormigón endurecido tienen que ser mayores, con el fin de que tanto la docilidad como la resistencia no lleguen a ser inferiores a los límites mínimos marcados como admisibles.

Los materiales tienen una influencia grande en la preparación de la mezcla.

No vamos a entrar aquí en detalles sobre el tipo de cemento que se requiere para obra. Lo único que diré es que no se puede hablar de cementos buenos o malos, dicho así en absoluto. Los cementos serán buenos o malos según el fin para que se destinan. Lo que generalmente se conoce con el nombre de supercemento será muy bueno desde el punto de vista de las resistencias mecánicas, sobre todo a edades cortas pero hay que tener en cuenta que esta cualidad la tiene debido a su alto contenido de silicato tricálcico y por esta misma razón desprenderá mucho calor durante su fraguado y liberará gran cantidad de hidróxido cálcico du-

rante su hidratación. La primera circunstancia le hace inadecuado para hormigonar grandes macizos y la segunda le hace vulnerable a toda clase de agresivos químicos.

Así pues, según sean las condiciones del caso particular deberá emplearse uno u otro cemento.

En general, todas las aguas potables, no minerales, son aptas para la fabricación de hormigones.

Lo principal a este respecto no suele ser la calidad de las impurezas, sino la cantidad. Las aguas selenitosas, las ácidas y las de mar pueden utilizarse, en general, para amasar el hormigón, pero no pueden utilizarse para curar el hormigón fabricado con cemento portland.

A propósito de aditivos, únicamente indicaré que algunos de ellos, por ejemplo los que contribuyen a aumentar la docilidad, influirán notablemente al tratar de proyectar una mezcla.

Durante muchos años se creyó que los áridos apenas tenían influencia en la calidad del hormigón. Por ser áridos, por ser inertes, no parecía que tuvieran una actuación importante en el conjunto; se les consideraba como un elemento de relleno que contribuía a abaratar el hormigón, pero nada más.

El pensamiento sobre estos extremos ha ido evolucionando. Veamos a qué propiedades del hormigón, fresco o endurecido, afecta este componente que es el que entra en mayor proporción.

Los granos de arena redondeados, con las tres dimensiones del mismo orden, favorecen enormemente la docilidad, entendiéndolo por docilidad el conjunto de propiedades que producen la aptitud del hormigón para emplearlo en una obra determinada.

La resistencia aumenta al aumentar el tamaño máximo de la grava, pero al aumentar éste lo hace también la permeabilidad y se dificulta el paso del hormigón entre las armaduras, si las hay.

La grava procedente de machaqueo suele tener una forma angulosa y una superficie rugosa e irregular. Su uso

favorece la resistencia a la tracción y a la abrasión.

Si el árido es muy absorbente se verá comprometida la resistencia al hielo y deshielo.

Los áridos de forma laminar y acicular deben proibirse pues, además de producir baja docilidad, empiezan a romperse, al parecer por flexión, antes de que la carga llegue a la magnitud que hubiese resistido un hormigón con formas mejores.

Algunos tratadistas opinan que las arenas con gran proporción de finos son malas. Lo contrario opinan los que subordinan todas las propiedades de un hormigón a la docilidad. Los que siguen las ideas de Feret suelen decir que lo malo son los áridos de tamaño intermedio.

Según el criterio que se siga nos encontraremos con una curva granulométrica u otra y lo verdaderamente importante es que esta curva sea adecuada para ahorrar cemento y para dar al hormigón las características que se van buscando.

Pero la curva granulométrica del árido compuesto depende de la granulometría de la arena, de la granulometría de la grava y de las proporciones en que se mezclen y estaréis de acuerdo en que es difícil modificar la granulometría de la arena. Sin embargo es fácil cambiar la de la grava. Por tanto parece que la conducta a seguir debe ser fijar a la arena unos límites suficientemente amplios para que quepan todas las que buenamente sean aceptables y, después, fijar la granulometría de la grava una vez que se conozca la de la arena que se ha de emplear.

Y llegamos ahora al problema más complejo. ¿En qué proporciones deben mezclarse los materiales?

A final del siglo pasado, Feret comenzó a preocuparse de este problema y llegó a la conclusión de que la resistencia de un hormigón es inversamente proporcional a la relación.

$$\frac{\text{agua} + \text{huecos}}{\text{cemento}}$$

es decir, que la máxima compacidad proporciona la mayor resistencia.

Pero hay que tener en cuenta que la cantidad de agua necesaria para obtener la densidad máxima y el valor de esta densidad no son constantes, sino que varían con la cantidad de energía empleada en la compactación. Precisamente una de las ventajas de la vibración es que con su empleo se consigue que esa cantidad óptima de agua sea inferior a la de los hormigones corrientes compactados por otros procedimientos.

Lo malo es que estas dos propiedades del hormigón, docilidad y resistencia, son antagónicas ya que cualquier variación del agua de amasado produce un aumento de una de ellas y una disminución de la otra.

Por otra parte, estudios relativamente recientes han puesto de manifiesto que ciertas propiedades, como la retracción, dependen, no sólo de la relación agua/cemento sino también de la cantidad de pasta. Es decir, que si fabricamos un hormigón de 350 kg/m³ con consistencia fluida, la retracción es aproximadamente tres veces la que obtendríamos con un hormigón seco de igual resistencia, pero de 200 kg/m³.

Indudablemente es una ventaja el poder mejorar la resistencia cuando convenga o el poder ahorrar cemento si no hace falta aumentar la resistencia. Pero además tenemos en nuestras manos la posibilidad de reducir la cantidad de pasta ya que mediante la vibración podemos obtener un hormigón con un conjunto de características mejores, por su compacidad, que las de los hormigones fluidos, aunque éstos sean lo suficientemente ricos en cemento para obtener la misma resistencia mecánica.

Bien, y con todo esto ¿cómo podremos proyectar un hormigón para un fin determinado?

De dos formas podemos definir un hormigón.

La forma más frecuente es definir los kilogramos de cemento por metro cúbico de hormigón. Esta es la forma más frecuente; sin embargo, no es la

más lógica. Es más lógico definir el hormigón por su resistencia. Me refiero, naturalmente, al caso más general en el que la característica más importante del hormigón sea su resistencia mecánica. Ya sé que en otros casos puede interesar más su elevada o reducida densidad, o su impermeabilidad o cualquier otra característica, pero estaréis de acuerdo en que, por regla general, la característica fundamental de un hormigón es su resistencia mecánica.

Digo que este segundo método es más lógico porque, como sabéis, en la calidad de un hormigón intervienen muchísimos más factores que el contenido de cemento, y creo que no tendréis inconvenientes en admitir que puede haber hormigones mejores con un contenido de cemento menor.

Para entrar en los cálculos necesitamos una resistencia y lo demás nos da igual; en fin de cuentas lo que pagamos es el kg/cm^2 y nos importa poco cómo está compuesto el hormigón.

Cuando especificamos un acero, por ejemplo, le exigimos un límite elástico, un alargamiento, que se pueda doblar, que se pueda soldar, que sea inoxidable, en fin, cualquier característica, pero no es frecuente definir un acero por su composición química ni por su constitución metalográfica. Nos interesan sus características, nos interesan sus cualidades, que es lo que nosotros vamos a aprovechar y haremos los ensayos precisos para comprobar si reúne esas cualidades, pero lo que el acero tenga dentro, por regla general, nos importa muy poco.

A este sistema de definir un hormigón dando su resistencia se le pone un reparo. Este es que el control se hace difícil. No cabe duda que es fácil contar los sacos de cemento gastados al final de la jornada y medir los metros cúbicos del hormigón puesto en obra. Sin embargo, me parece que este reparo tiene muy poco fundamento, pues no me cabe en la cabeza que pueda haber un técnico que limite el control del hormigón a contar los sacos de cemento empleados.

Como acabo de decir, en el problema intervienen muchas más variables, la calidad del hormigón no la define sólo la cantidad de cemento que tenga. No tengo que insistir en que la cantidad de agua, la granulometría, la compactación, etc. etc., tienen una influencia decisiva y, por consiguiente, para ver si el hormigón cumple las condiciones de resistencia, que ha imaginado el proyectista al hacer sus cálculos, habrá también necesidad de hacer ensayos de resistencia, habrá que romper probetas y habrá que esperar 28 días con todos los inconvenientes que esto ya sabemos que tiene. Si a la edad prevista el hormigón no tiene la resistencia que debía tener, el técnico tomará las medidas correspondientes, que supongo que serán demoler la parte de la obra que no reúna las condiciones previstas.

Pero este control ya no es tan sencillo como parecía al principio; ya el control es igual en un caso que en otro, reduciéndose en ambos casos a romper probetas y a comprobar resistencias.

Ya he dicho que el método de proyectar hormigones conociendo la resistencia me parece extraordinariamente lógico y creo que esa es la manera de proceder y no hay por qué impedir al contratista que utilice menos cemento o no use unos métodos de compactación determinados si a él le sale más económico.

En el proyecto se exigirá una resistencia característica determinada al hormigón y el contratista debe estudiar el hormigón que ha de usar para que le salga económico. Estudiará, por ejemplo si le resulta más económico utilizar más cemento o clasificar el árido en ocho tamaños, estudiará si le resulta más económico echar más cemento o utilizar medios de compactación más potentes, en fin, estudiará su problema y lo resolverá, pero no creo que se le deba poner limitación en ese estudio.

Naturalmente, al hacer el presupuesto de la obra el proyectista deberá hacer un estudio y suponer una composición determinada que puede, incluso,

recomendarla al contratista, pero de ningún modo imponérsela.

Para componer un hormigón cuando se utilice este método de definirlo, existen unas fórmulas y unos ábacos, en función del tipo de cemento, de que los áridos sean rodados o de machaqueo, de la consistencia, etc. El método está descrito con todo detalle en la "Instrucción especial para estructuras de hormigón armado" del IETCC.

Para dosificar hormigones por el otro procedimiento, es decir, dando la cantidad de cemento por metro cúbico, hay que acudir a otros procedimientos que vamos a examinar a continuación.

Si, de acuerdo con Feret, queremos obtener la máxima compacidad para obtener la máxima resistencia, debemos disminuir en todo lo posible el agua y los huecos. Disminuir los huecos quiere decir que el hormigón sea extraordinariamente compacto y entonces el ideal será que los huecos del árido de mayor tamaño sean rellenados con otro árido que, naturalmente, quepa en estos huecos, pero que tenga el mayor tamaño posible. Los huecos que dejen estos dos áridos serán, a su vez, rellenados por áridos del mayor tamaño posible y así sucesivamente llegaremos hasta obtener unos huecos muy pequeños que serán rellenados con pasta de cemento.

Esto de que el árido que rellena los huecos deba tener el mayor tamaño posible, se debe a que cuanto más grueso sea tendrá menor superficie específica y por consiguiente requerirá menos agua, con lo que nos aproximamos al ideal de un hormigón sin huecos y con poca agua.

Entonces, cuando tengamos varios áridos tendremos que mezclarlos en diversas proporciones, estudiar en cada caso la compacidad del conjunto y adoptar la combinación de áridos que nos da una compacidad mayor.

Esto es tremendamente complicado, tremendamente enojoso. No es difícil, pero sí molesto y para resolver el problema, una serie de investigadores han deducido unas curvas granulométricas

y aseguran que cuando la curva del árido compuesto con los varios áridos de que disponemos, coinciden con una de esas, el conjunto reúne la compacidad máxima.

Lo que tendremos que hacer entonces, en cada caso, es tantear diversas mezclas de los áridos de que disponemos y elegir la mezcla cuya curva se acerque más a esa curva teórica de compacidad máxima.

Antes de seguir adelante, debo hacer una advertencia que es común para todos estos procedimientos de dosificación.

Puede alguien pensar que cuando ya hemos compuesto los áridos que tenemos a nuestra disposición para que la curva granulométrica del conjunto se adapte lo más posible a esa curva de referencia, ya hemos terminado nuestra labor; es decir, que el conseguir esto es el fin que nos propusimos. Lamento desilucionar a quien piense así; esto no es el fin ni muchísimo menos, lo que es, es el principio; esto es el punto de partida; estas curvas lo que nos dan es una primera aproximación, muy aproximada, pero muy primera y por consiguiente nosotros debemos corregir luego los números que nos salgan para adaptarlos a nuestro caso concreto.

La primera curva granulométrica que vamos a considerar es la de Fuller, cuya ecuación es

$$y = 100 \sqrt{\frac{d}{D}}$$

Esta curva es muy sencilla pero no cabe duda que tiene muchas limitaciones. La ley de Fuller es adecuada, generalmente, para obras de hormigón armado cuando la cantidad de cemento no es inferior a 300 kg/m³, cuando no existen secciones fuertemente armadas, cuando el tamaño máximo del árido es de 50 ± 20 mm y cuando la forma de los granos del árido es redondeada. Con estas condiciones queda muy limitado el campo de aplicación de esta ley. Por otra parte tampoco parece lógico no tener en cuenta la cantidad de cemento que ha de usarse

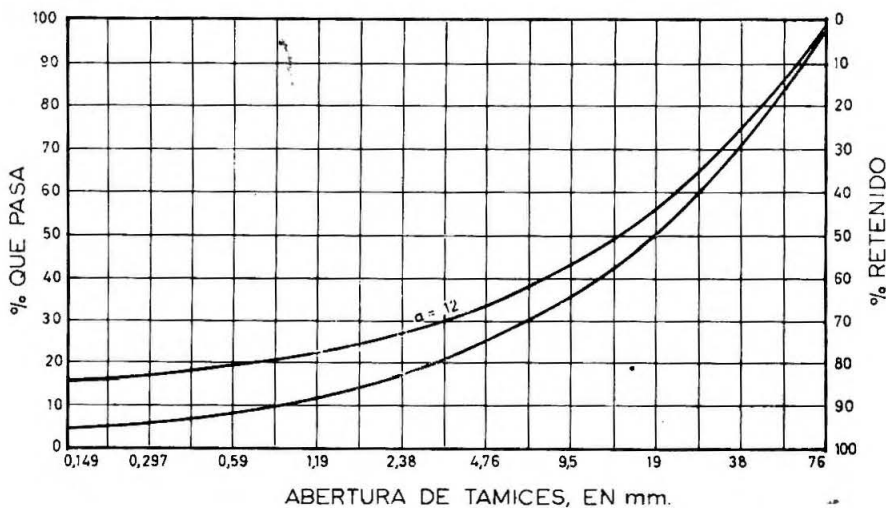


Fig 1

en el hormigón para determinar las proporciones de los componentes.

Tampoco tiene en cuenta las condiciones de puesta en obra. Esta granulometría está falta, en particular, de elementos finos, principalmente para compactaciones de tipo medio pero da buenos resultados para compactaciones enérgicas.

Bolomey siente la necesidad de modificar esta fórmula para que sirva para hormigones de grandes macizos, tales como presas, muros, etc. Como sabéis la curva de Bolomey tiene la siguiente forma:

$$y = a + (100 - a) \sqrt{\frac{d}{D}}$$

y puede considerarse como un perfeccionamiento de la ley de Fuller, por que en ella si se considera el cemento cosa que no ocurría en la ley de Fuller. Esta marcaba la mezcla de áridos de compacidad máxima; en la ley de Bolomey el cemento se considera a estos efectos como un árido más, cuya proporción en la mezcla será constante no permitiéndose jugar para los tanteos previos más que con áridos de verdad. Esta inclusión del cemento en la composición granulométrica del conjunto es la que hace que exista una diferencia en ordenadas en el origen (fig. 1).

Al mismo tiempo Bolomey introduce en su fórmula el parámetro a , que varía de 10 a 14 y que refleja la influencia de la consistencia del hormigón y de que el árido sea rodado o machacado.

Estas curvas representan unos tipos medios de granulometría y por consi-

guiente tienen un gran interés, pero como he dicho antes, no representan más que un punto de partida y para cada caso particular debe corregirse el hormigón obtenido por este procedimiento con objeto de que se adapte más a las características que deseamos que tenga en estado fresco o en estado endurecido.

M. Caquot ha estudiado también estos problemas de composición de hormigones. Ha realizado ensayos para determinar la compacidad máxima de mezclas y ha observado fenómenos curiosos que le han servido para sentar una nueva teoría.

M. Caquot ha medido la compacidad máxima de una mezcla de áridos colocando dicha mezcla en un recipiente de 50 litros y ha obtenido como resultado, que la compacidad máxima era de 0,64.

Ha medido después lo mismo pero en un recipiente análogo con capacidad de 1 litro y ha obtenido que la compacidad máxima era de 0,60.

¿Por qué ocurría esto? ¿Qué es lo que había variado?

Lo único que había variado era el radio medio del recipiente, es decir, la relación del volumen a la superficie.

Esto le sirvió para sentar la teoría del "efecto pared" que ha dado lugar a diversos métodos para dosificar hormigones.

Faury ha sido el primer investigador que ha tenido en cuenta el efecto pared a la hora de proyectar un hormigón y ha llegado a la conclusión de que cuanto menor es el radio medio R del molde, es decir, cuanto mayor es

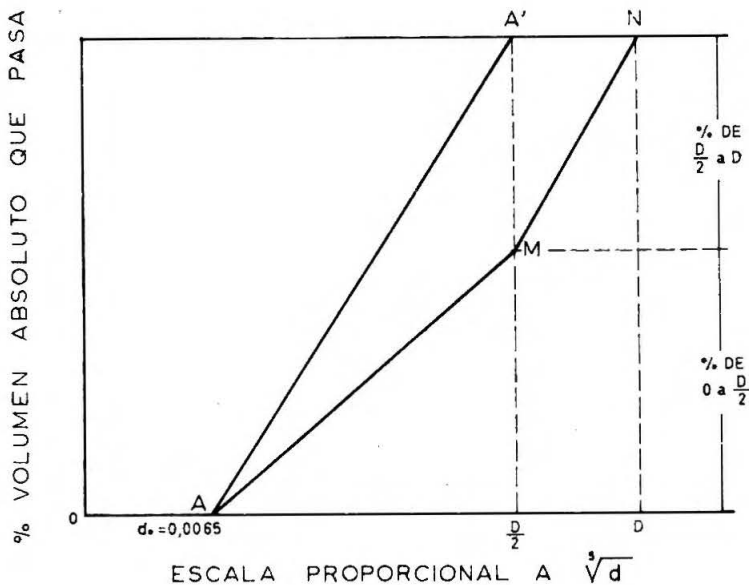


Fig. 2

el efecto pared caracterizado por la relación $\frac{D}{R}$, mayor es también la relación $\frac{R}{\text{arena}}$ óptima. relación $\frac{\text{arena}}{\text{grava}}$

Llega en sus estudios a la conclusión de que:

$$0,8 < \frac{D}{R} < 1$$

desigualdad que nos define el tamaño máximo que debemos emplear ya que R es conocido puesto que conocemos el molde que hay que llenar y las armaduras que tiene.

Para determinar la curva de referencia considera el conjunto de los áridos como una mezcla de dos componentes: un conjunto de granos finos y medios

comprendidos entre 0 y $\frac{D}{2}$ y un conjunto de granos gruesos comprendidos

entre $\frac{D}{2}$ y D.

Como siempre, al dibujar la curva tenemos en ordenadas el tanto por ciento de volumen absoluto de materiales, cemento comprendido que pasan a través de la malla cuyo tamaño es indicado en el eje de abscisas.

El eje de las abscisas está expresado en raíz quinta de d de tal forma que las dos rectas que constituyen la curva de referencia sean rectas. La corres-

pondiente a la fracción fina corta al eje en un punto que representa el valor $D_0 = 0,0065$, o sea 6,5 micras. Hay que tener en cuenta que los granos de cemento más pequeños en cantidad apreciable son del orden de 5 micras.

Como digo la curva de referencia del hormigón ideal viene representada por la línea quebrada AMN y el problema consiste entonces en determinar la ordenada del punto M cuya abscisa es $\frac{D}{2}$ (fig. 2). Esta ordenada

depende, evidentemente, de la forma de los granos, de la potencia de compactación y del efecto pared. Faury indica para ordenada del punto M el valor empírico siguiente:

$$y = A + 16 \sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0,75}$$

donde D y R ya sabemos lo que significan y vienen expresados en milímetros. A es un coeficiente numérico que depende de la naturaleza de los materiales y de la potencia de compactación. Para los hormigones corrientes varía de 22 a 38. El coeficiente B representa la influencia de la potencia de compactación. En condiciones usuales B = 1,5 puede descender hasta 1.

Para masas indefinidas se tendrá

$$y = A + 17 \sqrt[5]{D}$$

En la figura 3 se representa el método de proceder.

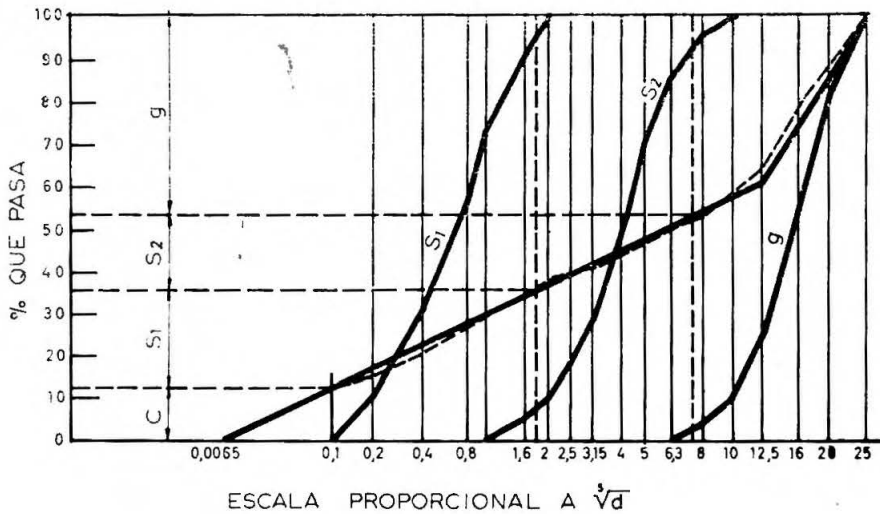


Fig. 3

M. Caquot basó su teoría del efecto pared en que la compacidad de un árido de dimensión uniforme en medio indefinido era 0,56. Esta cifra es un valor medio que corresponde a una compactación media con formas que pudiéramos llamar medias.

M. Joisel no admite este valor medio invariable sino que hace sus estudios variando esta compacidad entre un valor máximo de 0,74, que corresponde a la compacidad de una mezcla de bolas esféricas idénticas, y un valor mínimo de 0,45 que es el que corresponde a un árido de forma alargada y no compactado.

Para cada una de las compacidades comprendidas en este intervalo determina Joisel la curva representativa de los huecos en función de la relación de las dimensiones extremas de los granos. Encuentra, como es natural, diferencias apreciables según la forma de los granos, sus dimensiones máximas, la intensidad de compactación, etc.

Esta nueva ley hace cambiar la escala de las abscisas que ahora estará graduada según d^m en vez de $d^{1/5}$, variando m entre 0,16 y 0,32

La curva de referencia en el método de Joisel es la representada en la figura 4. Es una recta y tal vez sea este uno de los mayores éxitos del método.

La noción del efecto pared, válida para los granos superiores a 0,2 mm., no lo es para granos más finos porque el agua aísla a unos de otros.

Este es el caso de los granos de ce-

mento a los que se supone un tamaño máximo de 0,2 mm.

Para Joisel existe una dosificación óptima de cemento a la cual corresponde una compacidad máxima. Un hormigón que presente esta compacidad máxima, contendrá unos huecos constituidos por un 15% de aire y un 85% de agua.

Todo esto tiene una sólida base experimental que ha permitido establecer unos ábacos que sirven para dibujar la recta de referencia.

La escala de las ordenadas es decimal. El segmento C'F representa el volumen total del hormigón después de compactado y en él pueden distinguirse:

C'O = volumen absoluto de sólidos (cemento + árido)

OE = 0,850F = volumen absoluto de agua

EF = 0,150F = volumen de aire

En la escala de las abscisas el segmento OA viene definido por un ábaco. Su longitud es función del tamaño máximo del árido y del producto $n\delta$ en el que δ es la densidad relativa del cemento y n su agua normal.

El segmento AB" que da las abscisas de las diferentes aberturas entre O y D/2 se determina por otro ábaco. La graduación de este segmento depende de la compacidad en medio indefinido de los de los áridos elementales $d/2 - d$ medida en las condiciones de compactación que se suponen para obra.

El segmento B" C" se determina por otro ábaco en función de la compacidad y del efecto pared.

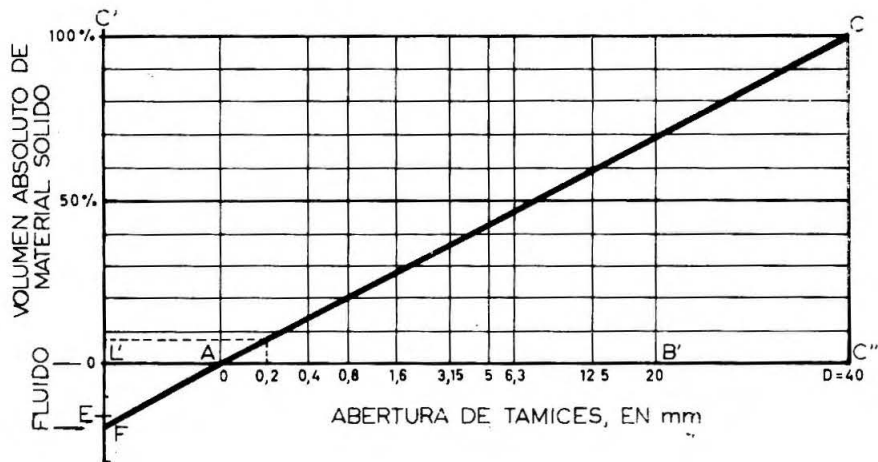


Fig. 4

En el punto C'' se eleva una perpendicular en la que corresponderá el punto C, de ordenada 100, al C''. La recta de referencia se obtiene uniendo A y C. Sobre el gráfico así obtenido se dibujan las curvas granulométricas de los distintos áridos. Las proporciones de cada uno se determinan como se indica en la fig. 5.

Con este método se obtiene una dosificación de cemento que en general, es un poco débil. Suele haber que aumentarla, sobre todo cuando se exige por el pliego de condiciones. Pero como hay que adaptarse lo más posible a la curva de referencia habrá que suprimir parte de los finos de la arena lo cual puede producir una discontinuidad entre los áridos y el cemento.

De todas formas M. Joisel indica algunos métodos gráficos para realizar esta operación rápidamente.

Desde luego el método de Joisel es el más perfecto de los métodos que utilizan una curva de referencia y ésta, en este caso, parece difícil que sea mejorada. Sin embargo, como el método es muy reciente se ha difundido poco.

Todas estas fórmulas de dosificación y otras muchas que no cito por no hacer interminable esta exposición, se refieren a granulometrías continuas, es decir, a granulometrías en las que están presentes todos los tamaños de árido, desde polvo hasta un tamaño máximo determinado. Pero también hay granulometrías en las que falta algún tamaño y a estas se les llama discontinuas.

El ingeniero francés Vallete es el padladrín de este tipo de hormigones.

Parte Vallete de las leyes experimentales obtenidas por Feret, que, por otra parte, son admitidas por todos los investigadores.

Dice Feret que los componentes de un hormigón no pueden considerarse independiente de su agua de mojado y dice también que el agua total A, necesaria para el amasado, unida a los huecos H, condiciona la resistencia,

que es función creciente de $\frac{C}{A+H}$, de los

granos y de su naturaleza.

Se ha encontrado, por ejemplo, que para mojar granos rodados son necesarias las cantidades siguientes referidas a un volumen aparente de 1 m³.

granos de 40 a 63 mm. . .	10 litros
granos de 16 a 25 mm. . .	18 litros
granos menores de 3 mm. . .	80 litros
granos menores de 1 mm. . .	200 litros

Se precisa entonces tanta más agua cuanto más finos sean los granos. Esto obliga, por consiguiente a utilizar los granos más grandes posibles, a evitar los huecos y a utilizar la menor cantidad posible de arena.

Obtiene Vallete unos gráficos (fig. 6) en los que relaciona la resistencia con la relación grava/arena para hormigones con distintas dosificaciones de cemento. Se ve en dichos gráficos que la resistencia crece al crecer la relación grava/arena, pero que tiene una limitación, porque, para cada dosificación de cemento, se llega a una relación grava/arena en la que se ha disminuido demasiado la cantidad de arena y no tenemos bastantes elementos para rellenar los huecos dejados por los áridos gruesos; se nos produce

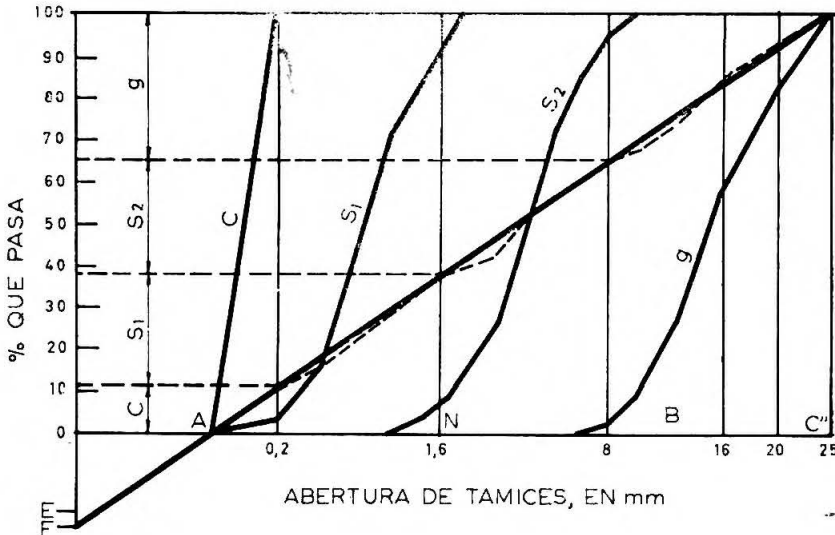


Fig. 5

entonces, un hormigón imposible de cerrar cuyas resistencias bajan, como es natural.

Por otra parte asegura Vallete que, cuando se tiene una granulometría continua, es muy difícil que los granos del segundo tamaño, por así llamarlos, ocupen los huecos dejados por el tamaño máximo y afirma que es mejor suprimir los tamaños intermedios con el objeto de que esta penetración de unos granos en los huecos dejados por los otros granos mayores sea más fácil.

Esto es verdad, pero es un arma de dos filos, porque no hay duda de que aquellos granos tienen mucha facilidad para entrar en los huecos dejados por los otros áridos, teniendo también una gran facilidad para salir y, por

tanto, en todas las manipulaciones previas a la colocación en obra, vertido, transporte, etc., es muy fácil que se produzca una segregación que no parece fácil de evitar y que es difícil de deshacer si llega a producirse.

Para fijar la granulometría ideal, Vallete deduce empíricamente unas relaciones entre los tamaños de los granos extremos de una misma categoría y entre los granos de distintas categorías. Estas relaciones son las siguientes:

$$\frac{D_1}{d_1} = 1,5 \quad \frac{D_2}{d_2} = 1,5 \text{ a } 2 \quad \frac{D_3}{d_3} = \frac{D_4}{d_4} = 2$$

$$\frac{d_1}{D_2} = 4 \text{ a } 5 \quad \frac{d_2}{D_3} = \frac{d_3}{D_4} = 3 \text{ a } 4$$

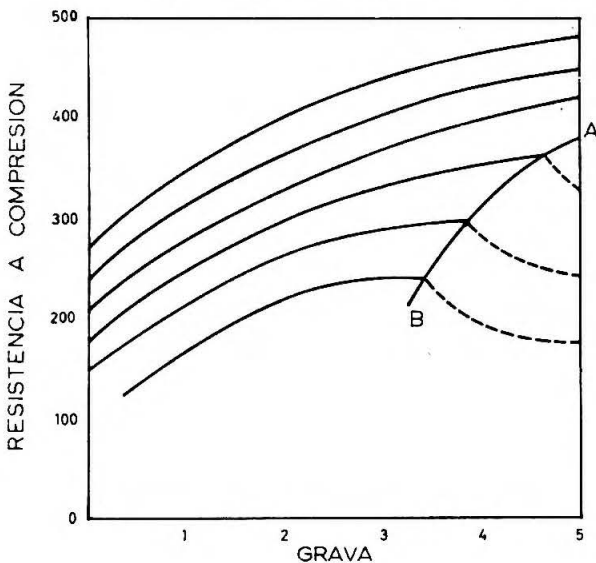


Fig. 6

Las ventajas e inconvenientes de las granulometrías discontinuas en comparación con las granulometrías continuas, son las siguientes:

1º) Los granos se penetran muy bien.

2º) Permiten resolver satisfactoriamente el problema del picado con barra de los hormigones fabricados con piedra partida cuya forma no es buena.

3º) Dan buen resultado cuando se trata de hacer hormigones con un tamaño de árido pequeño, como los que se emplean en viguetas, traviesas, etc. y en general en elementos prefabricados en taller.

4º) Suelen ser más caras porque necesitan, generalmente, operaciones suplementarias en la preparación de los áridos.

5º) Son adecuadas para obtener altas resistencias tal vez más altas que con una granulometría continua.

6º) Son más peligrosas porque los hormigones resultantes son más sensibles a los errores de medida de los materiales que los componen y necesitan por tanto una vigilancia grande durante la fabricación.

Como veis hay soluciones para todos los gustos. Encontramos fácilmente partidarios de una granulometría continua siguiendo las curvas de tal o cual investigador. Encontramos también partidarios de una granulometría discontinua en las que unos tamaños determinados brillan por su ausencia.

A la vista de todo este material que tenemos reunidos tendremos que elegir un sistema para proyectar nuestro hormigón y, sin embargo, a pesar de todo lo que se ha escrito sobre este tema, no creo que por el momento podamos tomar partido clara y rotundamente por ninguno de los procedimientos existentes.

Lo primero que habría que preguntarse es si existe alguna fórmula granulométrica ideal, es decir, si el problema tiene solución única. Aún en el caso de que eso fuera así, las demás serían soluciones aproximadas que deben resultar bastante próximas a la fórmula ideal y probablemente éstas pueden utilizarse sin cometer un error apreciable.

Creo, por tanto, que determinar la solución que conviene en cada caso no es un problema científico, sino que es un problema de obra en el que hay que tener en cuenta las posibilidades que existen de material, los medios de transporte y puesta en obra y la competencia de la mano de obra; en definitiva, el factor económico que en muchos casos, es el que dice la última palabra.

Si se dispone en una obra de un árido con una granulometría continua, sería faltar al sentido común despreciar una parte de dicho árido, después de someterlo a un cribado, por la sola razón de que el técnico es partidario

de las granulometrías discontinuas.

Si, por el contrario, tenemos un árido que está falto de unos granos de tamaño intermedio, no sería económico en forma alguna buscar esos tamaños que faltan a 30 km. de distancia para que el hormigón cumpla fielmente la ley de Bolomey.

No. A la vista del material de que se dispone el técnico debe decidir sobre la solución más adecuada para su obra, lo mismo que decide si le conviene que un arco sea triarticulado o que una presa sea de contrafuertes.

En el momento de tomar esta decisión el técnico debe pensar en que necesita dos cosas:

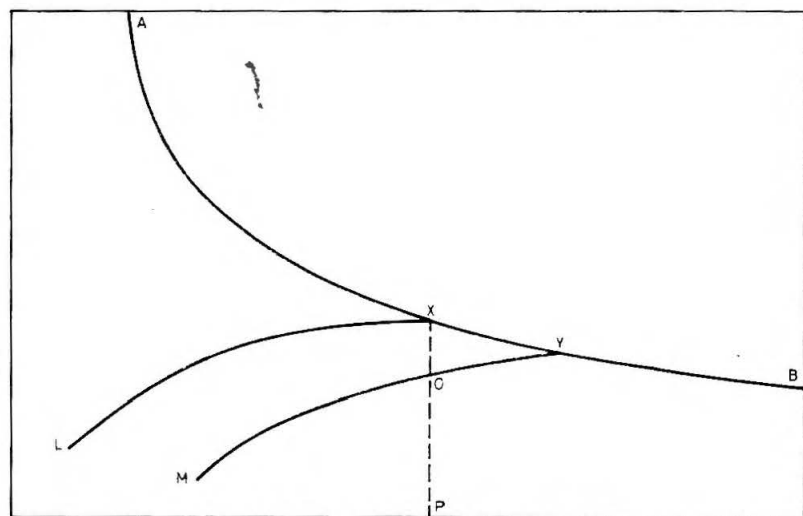
1ª) Que, mientras el hormigón está fresco, se pueda manipular de modo que llegue a adaptarse a la forma del encofrado, resultando un producto homogéneo y bien cerrado, lo cual depende, en primer lugar, de la consistencia y de la granulometría.

2ª) Que, una vez endurecida, tenga la resistencia y demás propiedades en el grado previsto, lo cual depende, sobre todo, de la relación agua/cemento.

Que un hormigón tenga una alta resistencia mecánica quiere decir, entre otras cosas, que está bien compactado; si está bien compactado sus huecos estarán reducidos a un mínimo y presentará también una gran resistencia a todo tipo de ataques que puedan venir del exterior.

Pero para que un hormigón esté bien compactado no basta con que queramos compactarlo bien, necesitamos además que el hormigón se deje compactar, es decir, que su composición sea tal que se pueda cerrar y que en estado fresco presente una docilidad adecuada.

El efecto de la compactación sobre la resistencia mecánica es indudable. En la fig. 7 la curva AB representa la relación entre la resistencia a compresión y la relación agua/cemento en un hormigón totalmente compactado. Las curvas LXB y MYB, corresponden a hormigones con distintos grados de compactación. Tenemos, pues, que la energía empleada en compactar estos



RELACION AGUA / CEMENTO

Fig. 7

dos últimos no ha sido suficiente para eliminar todos los huecos que en ellos había. Los puntos X e Y representan las mezclas más secas que se pueden compactar por el método de compactación empleado.

El hormigón representado por la curva LXB es más dócil que el representado por MYB, puesto que ha llegado al grado total de compactación con menos cantidad de agua.

Una vez fijada la resistencia, debemos decidir la docilidad. Esta debe ser tal que nos asegure una total compactación, pero debemos limitarnos a esto sin pasarnos en el grado de docilidad, porque ello puede dar lugar a otros fenómenos no deseables.

Así, pues, el equipo de compactación que vayamos a utilizar y las condiciones particulares del caso son los factores que nos deben fijar la docilidad; nosotros por nuestra parte haremos que el hormigón tenga esa docilidad, mediante el manejo de las variables que tengamos a nuestro alcance.

Ya dijimos antes que llamamos docilidad a todo un conjunto de propiedades, que no conocemos bien, pero que permiten la fácil colocación de un hormigón en obra. La docilidad es función de muchas variables, pero vamos a reducir estas variables a cuatro nada más: consistencia, compactividad, trabazón y estabilidad.

La consistencia es aquella propiedad del hormigón por virtud de la cual tiende a resistir deformaciones en estado fresco. Se mide como sabéis con el cono de Abrams o con la mesa de sacudidas, pero estos ensayos de asien-

to y de escurrimiento son muy sensibles a las variaciones de la cantidad de agua y poco nos dicen sobre las demás variables que intervienen en el fenómeno.

Sobre todo, el ensayo del cono es muy utilizado en obra por su sencillez. No hay que esperar que nos de unos valores absolutos de la consistencia, pero nos permite realizar con facilidad una comparación entre diversos hormigones para comprobar que tiene la misma cantidad de agua. Es uno de los ensayos menos dependientes de factores externos; sin embargo, el apisonado de la masa dentro del molde o la forma de retirar éste, puede influir en los resultados; no obstante, un operario especializado puede salvar estos inconvenientes con facilidad.

Otra variable que hemos citado es la compactividad, es decir, la mayor o menor facilidad para conseguir una compactación determinada. Parece a primera vista que es lo mismo que la consistencia, pero está muy lejos de serlo ya que un hormigón puede ser muy deformable y sin embargo, tener una imposibilidad absoluta de cerrarse porque la granulometría no lo permita. Por otra parte, tampoco puede decirse que un hormigón de baja compactividad haya de tener forzosamente una baja compactividad. Generalmente lo que ocurre es lo contrario; nada tiene que ver que un hormigón sea muy difícil de compactar, que haya que utilizar mucha energía para compactarlo, para cerrarlo, y sin embargo, una vez cerrado no hay inconveniente en admitir que la compactividad puede ser muy elevada.

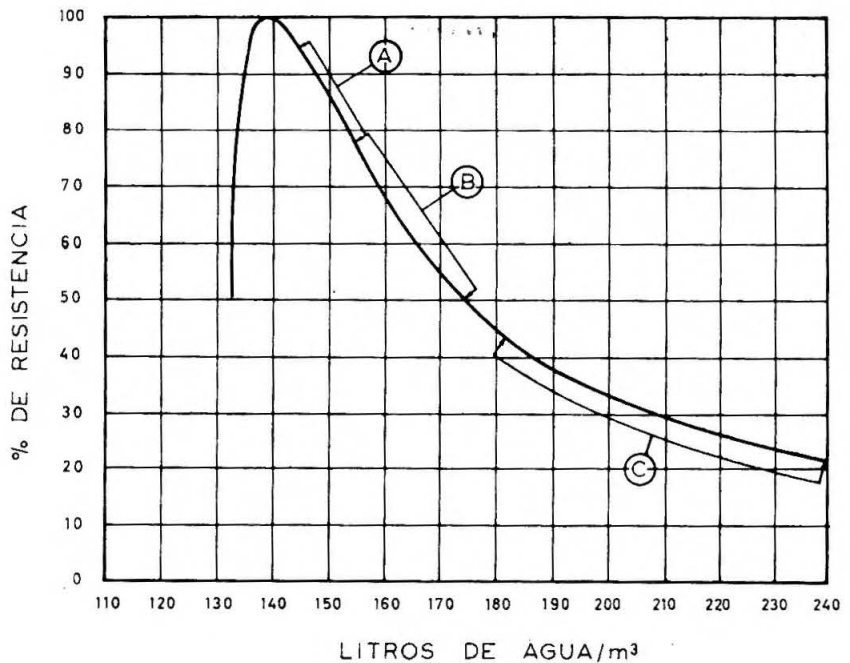


Fig. 8

Otra variable es la trabazón, que es la propiedad que tiende a dejar unidos y uniformemente repartidos dentro de la masa del hormigón los distintos materiales que lo integran, es decir, es la resistencia que opone el hormigón a que cada uno de sus componentes se vaya por su lado. Esto puede ocurrir porque haya una segregación de tamaños, por ejemplo, al salir de la hormigonera o porque, por un exceso de agua se produzca el fenómeno conocido con el nombre de exudación, que es la separación del agua de los demás componentes.

Por último hay que tener en cuenta lo que unos autores llaman estabilidad y otros sensibilidad. Decimos que un hormigón es sensible o poco estable cuando la variación de algunas de sus condiciones en magnitud relativamente pequeña, altera de forma peligrosa las cualidades del mismo. Estas variaciones pueden ocurrir por error en la medición de los materiales componentes, por humedad de los áridos, en fin, por mil causas diversas.

Podemos influir sobre la docilidad, modificando los siguientes factores: relación agua/cemento; contenido de cemento manteniendo la misma relación agua/cemento; tamaño máximo del árido más o menos grueso; uso de áridos rodados o machacados; variación de la proporción de árido fino; etc.

De todos estos factores, el más peligroso es la variación de la relación

agua/cemento, por el indudable efecto que tiene sobre la resistencia.

Las experiencias de Abrams le llevaron a dibujar el gráfico de la figura 8 en el que representa la evolución de la resistencia de un hormigón que mantiene fijas todas sus características, excepto la cantidad de agua de amasado.

En dicho gráfico, a la izquierda del máximo están los hormigones que, aunque poseen una baja relación agua/cemento, tienen una baja resistencia. Esto se debe a que, por insuficiencia de agua, no han podido ser perfectamente compactados, quedando, por tanto, huecos en su masa.

En la zona de la derecha figuran los hormigones que se usan en la práctica: la zona A corresponde a hormigones de consistencia apropiada para hormigón en masa, pavimentos de carreteras, etc. La consistencia correspondiente a la zona B es la adecuada para hormigones moldeados en encofrado, hormigón armado, etc. Con el hormigón fluido de la zona C se pierde de 2/3 a 3/4 de resistencia.

En fin, todo esto hay que tener en cuenta cuando se va a proyectar una mezcla de hormigón y cerrar los ojos a esta evidencia es lo mismo que no creer en el cáncer.

También para hacer hormigón hay que leerse todos los papeles hasta el final.