

Características del hormigón destinado a ser bombeado (*)

Por OSCAR MARTINEZ ALVARO

Alumno de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

El bombeo del hormigón es uno de los medios de puesta en obra más eficaces en determinadas circunstancias, si bien exige especiales condiciones en cuanto al propio material y al sistema de ejecución. En el artículo, que mereció el 1.º Premio HALESA 1980, se estudian las propiedades que deben exigirse a la mezcla, en cuanto a dosificación, consistencia, aditivos, amasado, control, etc.

1. INTRODUCCION

El bombeo del hormigón puede realizarse de diversos modos, pero nos referiremos exclusivamente a los que se producen a tubería llena y de modo continuo. Dentro de esta definición podrían incluirse sistemas neumáticos, pero el mayor campo de aplicación aparece con las bombas de pistón y las "squeeze".

Estas últimas, cuya traducción literal del inglés sería "exprimidoras" o "estrujadoras", reciben gran cantidad de nombres en castellano, como peristálticas (4), trituradoras (21), etc.

Las de pistón son las que tienen el mayor futuro y las que presentan mayores dificultades desde el punto de vista del hormigón, dadas las elevadas presiones y los largos recorridos —tanto en horizontal como en vertical— a que se les someten. Para tener una idea de lo que representa el bombeo con bombas de pistón entre las técnicas del hormigón, basta con decir que en España en el año 1975 se colocó un 7,4 % del total por este procedimiento, y que en la misma fecha en la República Federal de Alemania dicha cantidad ascendió al 20 % (14). Y las tendencias son a aumentar en todos los casos.

Por ello, nos referiremos fundamentalmente a las condiciones exigidas para un hormigón puesto en obra mediante bombas de pistón. Aunque habrá que recordar que todo esto es válido para cualquiera de las bombas antes definidas, a pesar de que normalmente no haya que ser tan exigentes.

2. ESTUDIO TEORICO

Para fabricar un hormigón que sea bombeable debemos saber el comportamiento en la tubería de una mezcla que haya dado buenos resultados. Si representamos gráficamente el diagrama de tensión tangencial - velocidad de deslizamiento de un hormigón satisfactorio, obtenemos la figura 2/1. Para una misma consistencia del hormigón la recta es única, independiente de la presión (29). Este comportamiento es propio de los cuerpos denominados "fluidos de Bingham", para los que el comportamiento en el interior de una tubería (19) es como se esquematiza en la figura 2/2. En ella, se ve que la distribución de velocidades en estado estacionario es trapecial, manteniéndose constante en el centro, con un fuerte gradiente de velocidades en la periferia. Se calcula que para una

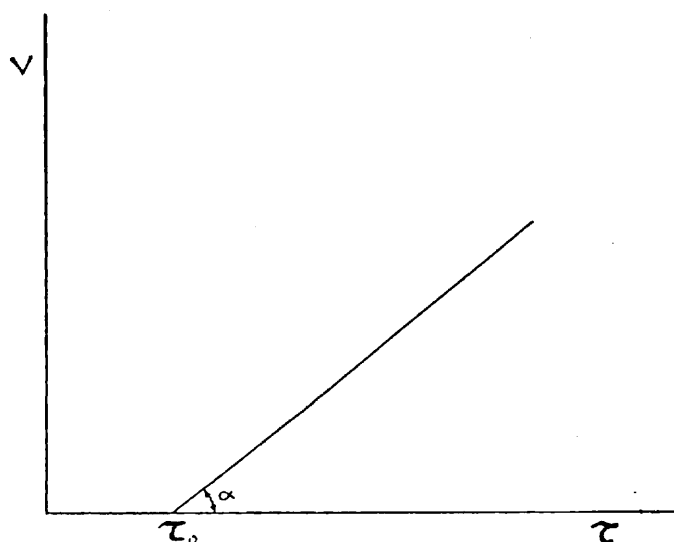


Fig. 2/1

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista, hasta el 31 de enero de 1981.

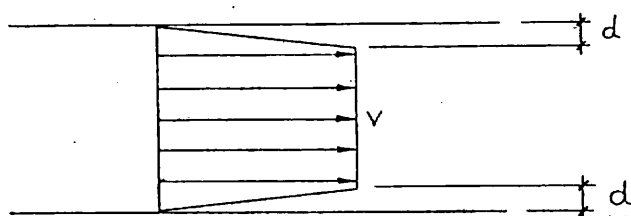


Fig. 2/2

tubería de 100 mm. de diámetro interior, a una velocidad media (caudal/sección) de un metro por segundo, el espesor en el que se produce la caída de velocidad (d , en la figura 2/2) es de unos tres milímetros.

Este comportamiento es el normal de las suspensiones. En ellas también se comprueba la tendencia del hormigón a producirse la segregación de los finos hacia la periferia, lo que es consecuencia directa de los fuertes gradientes existentes. La formación de la película lubricante es así continua, al ser expulsada de la masa por la presión (11).

Podemos distinguir, así pues, dos partes diferenciadas en el hormigón que discurre por la tubería:

1. Un bloque central que se mueve sin deformaciones internas.
2. Una capa exterior delgada formada por una suspensión de finos.

Luego hará falta que el hormigón a bombear tenga:

1. La posibilidad de formar este bloque central sin segregaciones.
2. Una cantidad suficiente de finos como para formar la película periférica.

Pero hay que precisar más estos dos aspectos. Respecto al primero hay que mencionar que para cualquier hormigón hay siempre un gradiente de presiones tal que sobrepasado se produce la rotura de la mezcla. Habrá que conseguir que la presión requerida para el bombeo sea menor que la que produce la segregación de la mezcla. Requerimos por tanto una mezcla tanto más cohesiva cuanto mayor sea la presión de bombeo, dependiendo así la mezcla de cada caso particular (19).

Respecto al segundo aspecto, no hay que creer que cuanto más rica sea la mezcla en finos el comportamiento será mejor, pues en ese caso la lechada segregada tiene una alta resistencia a la deformación y así crece mucho la resistencia al

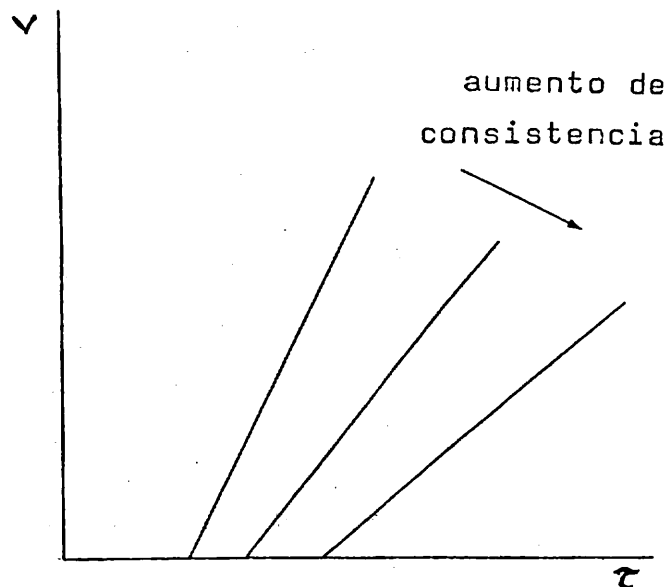


Fig. 2/3

deslizamiento (19). Según Aleksejew (2), ensayos realizados con viscosímetros han puesto de manifiesto que la tensión de deslizamiento no varía apreciablemente manteniendo constante la relación agua/cemento aunque se varíe la cantidad de cemento. Sin embargo, aumentos de la dosificación de cemento, manteniendo constante el agua, implican aumentos de dicha tensión.

En este sentido también nos parece importante el efecto descrito por Ernst (10). Según él, al aumentar excesivamente la proporción de finos, la distribución de presiones se asemeja a la de un fluido newtoniano dejando de moverse en bloque y aumentando la presión contra las paredes. Con ello crece la fricción y aumenta la resistencia total al deslizamiento.

Por lo tanto habrá una cantidad óptima de finos. Para hallar una cuantificación teórica del óptimo de finos, son muy interesantes los ensayos del Centro de Investigación para la Construcción, citadas en (4). En ellos se medía el volumen de huecos de unas ciertas granulometrías (mediante un vacuómetro, dada la dificultad de estimarlo teóricamente); tras ello, se formaba una serie de hormigones añadiendo a estas granulometrías, previamente clasificadas por su porcentaje de huecos, distintas cantidades de cemento. En todas ellas, los resultados de los ensayos mostraron que cuando el contenido de volumen de finos (cemento y finos naturales) era igual o mayor que el volumen de huecos, las mezclas eran bombeables, excepto cuando la cantidad de cemento era excesiva. Las mezclas con pocos

CARACTERISTICAS DEL HORMIGON DESTINADO A SER BOMBEADO

$\frac{H}{F}$	17%	20%	25%	28%
30%	BD	B	B	NB'
25%	B	B	B	NB'
20%	B	B	NB'	NB
15%	B	BO'	NB'	NB

H = volumen de huecos
F = volumen de finos
B = bombeado
BD = bombeado con dificultad
BO = bombeado pero se obstruyó
NB = no bombeado
 = mezclas que se hicieron bombeables al añadir éteres de celulosa.

Fig. 2/4

finos eran imbombeables por la segregación producida, con el consiguiente atasco.

Los resultados se pueden expresar en forma de cuadro en la figura 2/4 y en forma de diagrama en la figura 2/5, ampliada según (6). El por qué de la necesidad de que todos los huecos estén rellenos por finos es que sólo de éste modo se podrá transmitir la presión a los áridos gruesos (29) pues así se permite una trayectoria suficientemente sinuosa al agua, de modo que no pueda huir (3).

Las cantidades de finos son ligeramente mayores que las estrictas para llenar los huecos entre áridos gruesos, pues es precisa una cierta cantidad para formar la película lubricante de la tubería (3) y porque deben recubrir todos los áridos gruesos de modo que no haya contacto directo entre ellos (10) (3). La película formada evitará el alto rozamiento interno de la masa. Con ello, los movimientos relativos que aparecen en los estrechamientos de salida de la bomba y codos se ven facilitados (10) (13) y se evitarán los atascos.

Hay que hacer notar una característica muy importante de este ensayo y que podría pasar desapercibida. Y es que no sólo influye la cantidad de huecos, sino su tamaño. En efecto, la mezcla con un 30 % de finos y un 17 % de huecos tenía suficiente cantidad de finos, como ocurría con las otras bombeables, pero tenía un carácter diferenciador. Para lograr una cantidad de huecos tan elevada era preciso que no hubiera granulometría menor de 0,6 mm. —salvo el cemento—. Así, los huecos eran demasiado grandes para retener las partículas de cemento, y eran arrastradas por el agua, llegándose así al atasco. El que este fenómeno se debía al tamaño de los huecos

se comprobó posteriormente en ensayos adecuados usando granito de machaqueo como árido grueso.

Dijimos antes que para una misma característica y tipo de hormigón, la recta representativa de la ley de tensiones tangenciales-velocidades de deslizamiento era única. Pero variando la consistencia varían las constantes que definen el comportamiento del hormigón: tensión límite de deslizamiento (τ_0 en fig. 2/1) y viscosidad plástica (inversa de la pendiente: $\nu = 1/\text{tg}\alpha$. Ver fig. 2/1).

Diversos ensayos (29), han puesto de manifiesto que al crecer la consistencia, crecen τ_0 y ν , como se expresa en la fig. 2/3. De ello se deduce que para una misma velocidad de deslizamiento, es decir, iguales rendimientos de puesta en obra, la tensión tangencial movilizadora es mayor a mayor consistencia, y por ello debe tenderse a mezclas de baja consistencia.

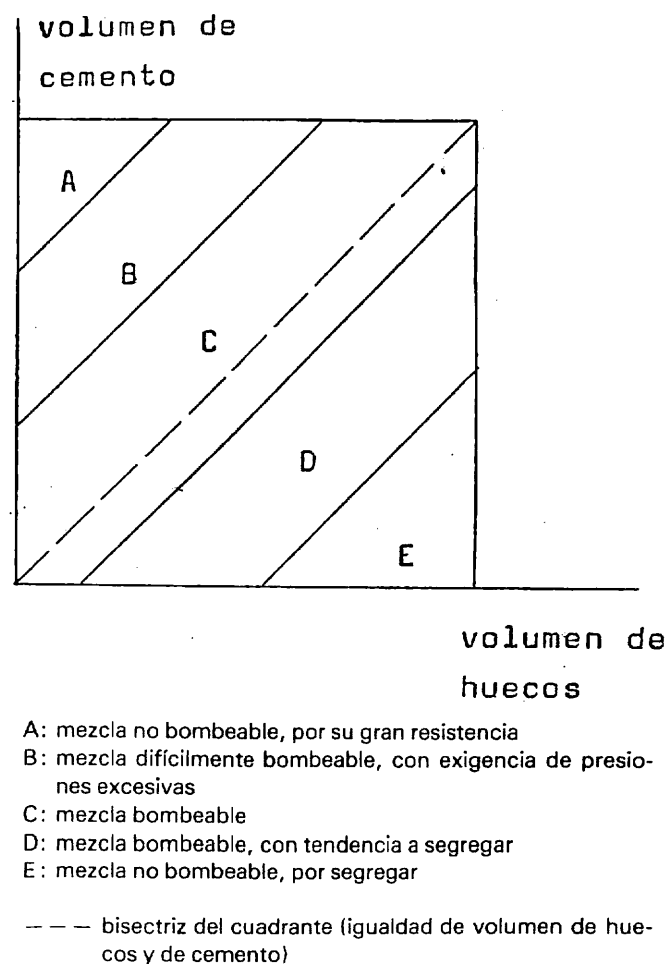


Fig. 2/5

Tal y como era previsible, los áridos de machaqueo son más difíciles de bombear, y en ellos aumenta tanto la tensión límite de deslizamiento como la viscosidad plástica, a igualdad de las demás condiciones (29). Con lajas y cantos vivos es muy difícil bombear (21) produciéndose encajamiento de los áridos (3).

3. COMPOSICION OPTIMA

En general, la composición del hormigón vendrá fundamentalmente impuesta por las exigencias de la estructura de la que va a formar parte (resistencia mecánica, inatacabilidad, impermeabilidad, etc.), aunque las condiciones de puesta en obra pueden ser fundamentales. Y en el caso del bombeo esto es especialmente destacado.

3.1. Aridos

Es obvio que para una tubería dada habrá unas ciertas limitaciones de tamaño máximo de árido. Como límite absoluto, por imposibilidad geométrica, deberá ser el tamaño máximo del árido menor que el de la tubería. Pero habrá mayores limitaciones por cuestiones dinámicas. Hay muchas recetas prácticas para este fin. Unas limitan el tamaño máximo a 1/5 del diámetro de la tubería (1) (6), mientras que otras lo limitan sólo a 1/3 (10) y otras dan 1/3 para material de machaqueo y 1/2,5 para rodado (1) (3).

El motivo de tal dispersión puede estar en que el diámetro de la tubería no se relaciona de modo lineal con el árido máximo, y así será más razonable la limitación usual en la práctica de las empresas de bombeo españolas (8) de 20 mm. de tamaño máximo para Ø 100 (relación 1/5) y de 40 mm. para Ø 125 (relación 1/3,13). Pero esto está aún incompleto, pues de algún modo debe influir la calidad del hormigón y sus características, por lo que nos parece necesario conjugar ambos factores.

Según los ensayos de la ACI, se obtiene la tabla de la figura 3.1/1. Vemos que los valores correspondientes a Ø 100 y Ø 125 de la mezcla pobre son muy parecidas a las anteriores, lo que ya es una cierta garantía. También se aprecia que la media de la relación tamaño máximo/diámetro de tubería es 1/2,7 en mezcla rica y 1/3,5 en mezcla pobre. La media de ambos valores es aproximadamente 1/3, lo que justifica esta limitación; pero no habrá que olvidar que esto es un valor medio y en algunos casos se llega a 1/4.

Ø interior (pulgadas)	4	5	6	8
Tamaño máximo (pulgadas):				
Mezcla rica	1,5	2	2	3
Mezcla pobre	1	1,5	1,5	3
Relación de tamaños:				
Mezcla rica	2,67	2,5	3	2,67
Mezcla pobre	4	3,33	4	2,67

Fig. 3.1/1

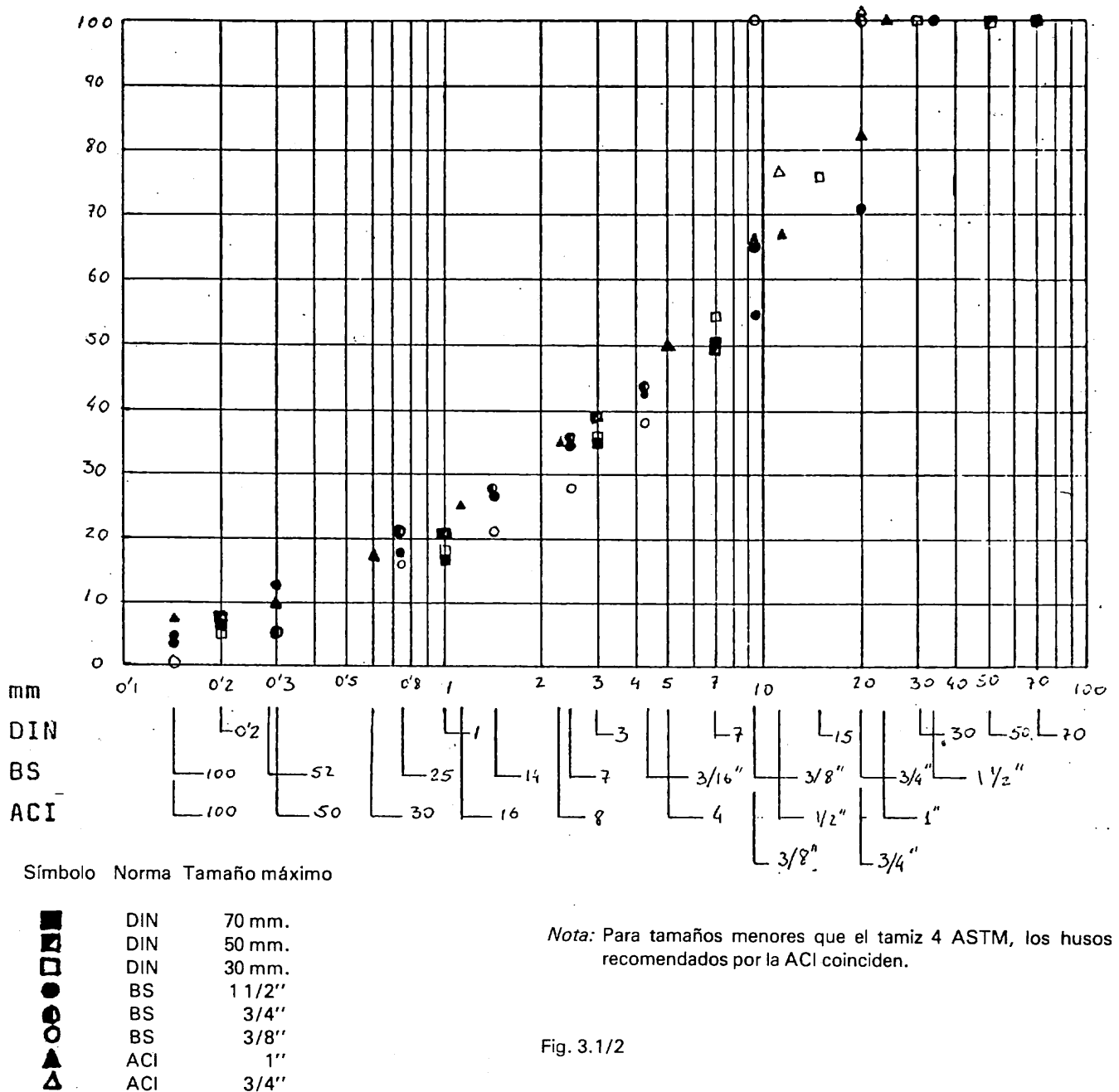
Por otra parte, aunque en la figura 3.1/1 la mínima relación es 1/2,5 no es un límite absoluto, pues se ha logrado bombear árido de tamaño máximo 63 mm. a través de tubería de 125 mm. (relación 1/1,98) (24). Lo que ocurre es que rebasarlo exige cuidados especiales.

Además, parece lógico que no sólo se limite el tamaño relativo del árido sino que habrá que limitarlo absolutamente. Así, se recomienda que la cantidad mayor de 30 mm. no supere el 15 % en peso y el tamaño máximo no sea superior a los 70 mm. (29).

Una vez definido el tamaño máximo admisible de los áridos, tenemos que determinar qué granulometría con dicho tamaño máximo es preferible. La condición a imponer por motivo del bombeo es que la cantidad de finos precisa sea la menor posible que permita el bombeo, pues el cemento es el elemento más caro del hormigón y es el principal componente de los finos. Pero como todos los huecos entre áridos deben estar llenos de finos, precisamos una granulometría con una cantidad de huecos mínima. Además, como debe preverse la formación de una película lubricante alrededor de todas las partículas, es preciso tener una superficie total reducida. Esto nos obliga a tamaño de áridos grandes (29). Granulometrías con estas características son las normalizadas en general para el hormigón.

Refiriéndonos a las granulometrías normalizadas DIN 1045, las más favorables para el bombeo son las de la mitad superior del campo entre la D y E (21) (29) aunque en (27) se extiende este campo a la zona comprendida entre D y F. Respecto las Normas BS se ha comprobado (10) que tienen buenas condiciones las curvas comprendidas entre 1 y 2 para 3/8" de tamaño máximo, las comprendidas entre 2 y 4 para 3/4" y las comprendidas entre 3 y 4 para 1-1/2". Por su parte, la ACI (1) da unas curvas referidas a la serie ASTM que nos definen otra zona óptima.

CARACTERISTICAS DEL HORMIGON DESTINADO A SER BOMBEADO



Pero si representamos sobre una misma gráfica los husos anteriormente enunciado veremos que todos se solapan, y prácticamente coinciden. Esto puede verse en la figura 3.1/2, donde se ha representado sólo la línea media de cada huso. Las mayores diferencias se encuentran en los tamaños máximos, pero su influencia es mínima, siendo admisible una dispersión en esa zona. Por ello, podemos decir sin ningún género de dudas que si disponemos de áridos comprendidos en la mitad superior del huso D-E de las normas DIN

—o de cualquiera de sus equivalentes en otra norma— tendremos las mejores condiciones granulométricas para el bombeo unidas a una fácil compactación y se conjugará alta resistencia con bajo precio.

En cuanto a las curvas recomendadas por las citadas normas para la arena, consideramos que tienen menos importancia, pues obtener una granulometría de este tipo suele ser antieconómico si no se dispone de antemano. Solo suele ser

factible el lavado o la adición de finos (5), y esto lo veremos con más detenimiento al hablar del cemento.

Muchas veces, para conseguir buena bombeabilidad resulta más cómoda una composición de áridos distinta de las normalizadas. Entonces, habrá que ceñirse a ellas en lo posible, pero si es imposible adaptarse, se recurrirá a compensar sus defectos uno con otro, y hacer ensayos de bombeo en las condiciones de obra. Naturalmente, la granulometría no será un factor único a considerar. Así, para hormigones más bien secos se debe usar una curva granulométrica acusadamente favorable; para hormigones más bien fluidos habrá que aumentar los finos (17).

En general lo mejor en caso de falta de finos es aumentar los tamaños mayores, restándoselo a los intermedios, de modo que el módulo de finura —según la definición de la ASTM (1) o su equivalente como módulo granulométrico (21)— se mantenga constante. Valores normales para el módulo de finura son de 2,6 a 2,8 (13), aunque la ACI amplía los límites de 2,4 a 3,0 (1) —correspondientes a las curvas límite de la ASTM— y (3) rebaja el inferior a 2,2. En general, el módulo de finura es referencia bastante fiable a efectos de bombeabilidad, sea árido rodado o de machaqueo, pero usarlo ciegamente, sin tener en cuenta las cantidades de finos es inútil (1). El uso de excesivos finos requerirá altas presiones de bombeo; para reducirlas se puede aumentar la cantidad de agua, pero, correlativamente, aumenta el peligro de segregación. Si hubiese poca arena podría paliarse el problema añadiendo más agua o cemento, pero debe tenerse en cuenta que la resistencia del hormigón ya endurecido bajará mucho más añadiendo agua que arena. Las arenas finas, al tener huecos menores suelen dar mejores resultados (1).

Respecto a los tamaños mayores cabe decir que tienen generalmente menos importancia que los finos y la arena, dado su papel pasivo, al dejarse conducir en suspensión entre los finos y la arena. Pueden servir para corregir los defectos del resto de los tamaños. Cuanto más fina sea la arena, mayor cantidad de grava se deberá usar. Sin embargo, cuanto menor es el tamaño de la propia grava, menor debe ser su cantidad. Se ha comprobado que hormigones con un volumen de árido grueso del 50 % al 60 % del volumen del árido total, se bombea bien (3). Disminuir esta cantidad requiere más agua y finos para lubricar la mayor superficie. No obstante, puede aumentarse hasta el 65 % si el tamaño máximo es grande y re-

dondeado y la arena fina (3). Se han bombeado bien granulometrías en las que faltaba total o parcialmente los tamaños 2-8 mm. o 2-16 mm. (17).

Hay que mencionar un hecho importante respecto la cualidad de los áridos redondeados de dar mezclas con menos tendencia al atasco que los de machaqueo, como ya hemos dicho anteriormente. En efecto, aparte de la influencia de la forma, las mezclas redondeadas naturales también deben su bombeabilidad a que dentro de un grado de finura hay una gama amplia de tamaños, siempre mayor que para áridos de machaqueo, lo que colabora a la existencia de menor cantidad de huecos (4). Sin embargo, esto puede compensarse en la dosificación por el hecho de que los productores de áridos de machaqueo ofrecen una gran variedad de tamaños, lo que facilita la consecución de granulometrías con pocos huecos (4). Lo peor es disponer solamente de áridos de machaqueo. Si los áridos gruesos lo son, pero no los finos suele bombearse bien. En caso de disponer de finos de machaqueo suele recomendarse adicionar algo de naturales (3).

Hasta ahora nos hemos referido a áridos normales, pero hay algunos de características especiales a los que no puede aplicarse lo anterior sin más. En particular nos referimos a los áridos ligeros. Para dar una idea de las dificultades que presenta el hormigón ligero, basta decir que el récord de distancia bombeada es de 155 m. en vertical obtenido en Detroit (25), mientras que, en contraste tenemos los 340 m. de altura y 600 m. de longitud del túnel de San Gotardo usando árido normal (22).

Dada la porosidad de estos áridos, podemos distinguir (1) dos tipos de agua: la activa y la absorbida. Esta última carece de efectos en la plasticidad o demás propiedades del hormigón. En general, puede decirse que bajo la presión de bombeo el agua penetra mucho más en los áridos que a presión atmosférica, con lo que el hormigón queda seco y no puede bombearse.

Como el mayor problema que presentan estos áridos es su gran absorción de agua se ha extendido en USA la técnica de saturarlos antes del uso (1). La saturación puede lograrse por riego o —en el caso de los finos— por agitación en la mezcladora con agua antes de añadir los demás áridos. Hay sistemas patentados que saturan mediante el uso de bajas presiones o calor y logran saturar casi totalmente el árido. Este método no se aplica en otros países demasiado, dadas las dudas

sobre el comportamiento del hormigón en dichas condiciones (6).

Puede ayudar la adición de arena fina natural y la utilización de áridos gruesos, a ser posible con superficie cerrada. La granulometría irregular hace más fluido este hormigón (21). En los hormigones ligeros colocados por bombeo, el árido de tamaño máximo debe reducirse en un tercio de lo que correspondería a su colocación por medios convencionales (1). A veces ayuda el bombeo con aire comprimido con lo que se ocluye aire en grandes cantidades. No debe confundirse esta oclusión de aire con la producida por un aditivo o la normal de amasado, pues las cantidades normales en este caso son unos 4 ó 5 m³/min a unas 7 ó 10 atmósferas (21).

Los aditivos pueden mejorar altamente el comportamiento de estos áridos, mediante el sellado de sus poros, con lo que se reduce la absorción. También se puede recurrir al uso de aditivos que permitan una cantidad de agua suficiente como para saturar al árido cuando aumenta la presión sin que aparezca segregación.

En cualquier caso, dada la diversidad de estos áridos, cada clase de hormigón ligero tiene sus particularidades especiales. Por ello es recomendable; antes de cualquier tanteo, recurrir al fabricante en todo lo que haya dudas.

3.2. Cemento

Ya hemos dicho la importancia que tienen los finos en las resistencias de bombeo. Estas crecerán con la finura, dada la mayor superficie de contacto, como se ve en la figura 3.2/1 para dos tipos de cemento, según Joisel (15). Esto se ve contrapesado por el que la capacidad de retención de agua sea directamente proporcional a la superficie del cemento. Por ello deberá usarse cemento de finura normal dando prioridad al asegurar la retención de agua (29). Se ha comprobado que hormigones con distintas dosificaciones de distintos cementos (Portland y aluminosos), pero que tuviesen la misma superficie total de cemento (superficie específica por cantidad de cemento) presentaban caracteres reológicos semejantes (τ_0 y ν) (29).

De todos modos, influye la naturaleza del cemento. Ateniéndonos a la clasificación dada por el pliego RC-75, podemos dar una lista de tipos según sus cualidades para el bombeo (23):

a) no serán aparatos para bombear aquéllos que presenten un fraguado rápido como son los

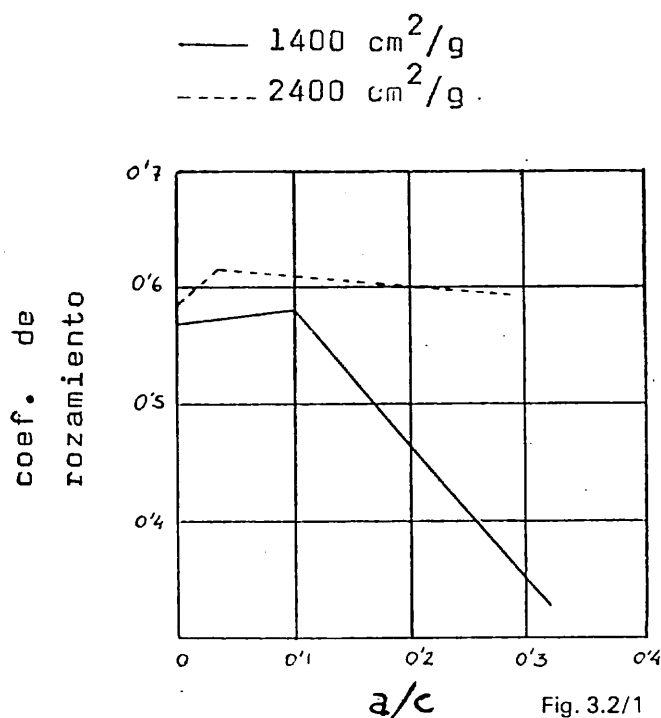


Fig. 3.2/1

cementos de altas resistencias iniciales (ARI) o los naturales (N), salvo que se tomen medidas especiales. Tampoco parece lógico usarlo en los cementos no aptos para estructuras —compuesto (C) y también los naturales (N)—.

Si se utilizase el bombeo para la puesta en obra de cemento blanco (B), debe hacerse especial hincapié en la evitación de todo tipo de aportación que pueda colorear, ya sea metálica, ya sea por los plastificantes.

b) los cementos portland (P) y los portland con adiciones (PA) se utilizan mucho —sobre todo los de adiciones por su menor precio— pero debe tenerse cuidado con la curva granulométrica, tamaño de árido, adición de plastificantes, etc., como ya sabemos. También debe tenerse en cuenta su tiempo de fraguado. Igual puede decirse de los de bajo calor de hidratación (BC). Los siderúrgicos (S) pueden bombearse generalmente como los portland, aunque parece que presentan mayores dificultades (21), a pesar de que su tiempo de fraguado es mayor que el de aquéllos.

c) los cementos resistentes al yeso (Y) y el aluminoso (A), presentan mejores cualidades en el bombeo que los anteriores. Además, el aluminoso tiene un tiempo de fraguado muy grande, lo que es una clara ventaja. Los puzolánicos (PUZ) se pueden considerar como los más adecuados para el bombeo por su gran plasticidad, aparte de que

los PUZ-II pueden llegar a tener tiempos de fraguado tan altos como los aluminosos.

Para calcular la cantidad adecuada de cemento, sabemos que para que el hormigón se comporte correctamente, los huecos de los gruesos deben estar prácticamente llenos de partículas de tamaño similar a las de cemento. Disponemos, como sabemos, de un método teórico para conocer la cantidad mínima de cemento necesaria, mediante el cálculo en laboratorio de los huecos que quedan entre los áridos gruesos. No obstante, esto no suele hacerse y se recurre a reglas empíricas que fijan la cantidad total de finos. Pero surgen discrepancias desde el primer momento, pues incluso no hay unanimidad en definir lo que son finos. En países con sistema métrico decimal se consideran finos a los tamaños menores de 0,20 mm.; en los anglosajones se toma como referencia el tamiz 100 de la serie ASTM (ó BS) que equivale a 0,149 mm. Incluso en algunos casos se toma como referencia el tamiz 52 (0,3 mm.) (6) (4) o el diámetro 0,25 mm. (13).

Consiguientemente, las cantidades de finos recomendadas dependerá del autor. Según los tamaños adoptados como referencia tenemos:

- a) tamaño menor de 0,25 mm.
400-450 kg/m³ (13)
- b) tamaño menor de 0,2 mm.
 - b.1) 350 kg/m³ (29)
 - b.2) DIN 1045:
350-400 kg/m³ para granulometría 0-30 (21)
400-450 kg/m³ para granulometría 0-15 (21)
- c) tamaño menor de 0,149 mm.
550-600 lb/cu.yd. (= 325-350 kg/m³) (10).

Vemos que a menor tamaño considerado se corresponde, lógicamente, menor cantidad. Además las diferencias no son grandes por lo que parece que todos los criterios coinciden en definitiva.

Estas cifras son medias, pues se ha llegado a bombear hormigones de 850-875 lb/cu.yd. (= 500-520 kg/m³) pero requieren una ejecución esmerada y un control de calidad estricto (10). Por el otro extremo, se han realizado bombeos con sólo 130 kg/m³, pero usando aditivos (11), por lo que veremos esto en el apartado correspondiente. Para largas longitudes el valor indicado es menor que la media para disminuir las presiones necesarias, pudiendo tomarse como valor 300-320 kg/m³ (21).

Para árido de machaqueo se recomienda incrementar estas cantidades en 10 %. (10).

Hemos hablado hasta ahora de cantidades totales de finos. La cantidad de cemento necesaria depende de los finos disponibles. Según (21), la arena de río tiene de 4 a 6 % de polvo natural, lo que equivale a 2 % sobre el total, es decir, unos 40 kg/m³. Así será preciso añadir de 300 a 320 Kg. de cemento como mínimo. Si los áridos naturales tienen pocos finos se puede aportar, como ya veremos en el capítulo de aditivos. Se recomienda que, al menos, el 80 % de los finos sea proporcionado por el cemento (29).

3.3. Agua

Como es sabido, el agua para el hormigón debe cumplir unas condiciones que no se ven acentuadas por el hecho del bombeo. Sin embargo, puede ser preciso un control especial debido a fenómenos directamente relacionados con éste, como, por ejemplo, el acelerado del fraguado debido a cloruros, que impediría el bombeo, pero que no afectarían a un hormigón en masa puesto en obra por otro proceso (5).

Usando aguas sancionadas por la práctica no se presentarán problemas y la influencia decisiva del agua radicaré en la relación agua/cemento y la consistencia.

3.3.1. Consistencia

Atendiendo al asiento en cono de Abrams tenemos que para asientos menores de 5 cm. (2") es muy difícil el bombeo y sólo se producirá para valores próximos al límite. Es coherente pero no plástico. Para asientos de 5 a 7,5 cm. (2" a 3") se obtiene el hormigón de mejores propiedades en cuanto a consistencia: es coherente y plástico. Para asientos mayores de 7,5 cm. (3") llegamos al caso opuesto al primero: es hormigón plástico aparentemente fácil de bombear, pero con tendencia a sangrar y segregarse, produciendo obstrucciones en la tubería. En cuanto a la influencia de la tubería se puede decir que a menor diámetro es preferible mayor asiento para prevenir el bloqueo (10).

A priori puede tomarse como bombeable aquella consistencia que permite su absorción por la bomba. Así un hormigón seco sólo podrá bombearse cuando tras ser vertido mantenga su cohesión, sin desgregarse en terrones (10). En general parece preferible hormigón de asiento algo más alto que 3" que más bajo de 2". Para ello

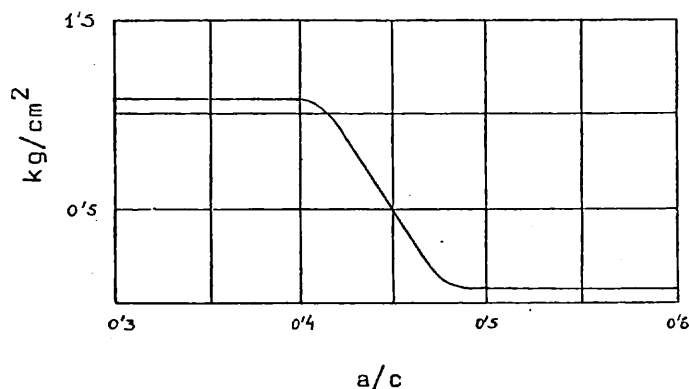


Fig. 3.3.1/1

suele recomendarse tomar como consistencia adecuada entre 2" y 3" de slump (K2 de las normas DIN) (21). No obstante, se llega a ampliar el límite superior hasta 4" (6) (4) y el límite inferior hasta 1" (10). A posteriori se comprueba que la consistencia es la correcta cuando el hormigón sale de la tubería formando un tapón de una longitud de unos 10 cm. antes de romper (10). Como caso puntual merece citarse el uso de mezclas con exceso de agua en hormigones de áridos ligeros, recordando lo dicho sobre la absorción que presentan a altas presiones. Se ha llegado a bombear hormigón ligero con un asiento de 16 cm. (6), cifra inconcebible para un hormigón normal.

Para aumentar la retención de agua por parte del hormigón en estas condiciones se recomienda aumentar la cantidad de finos —aumentando así la superficie específica del árido— o el tiempo de amasado (10).

3.3.2. Relación agua/cemento

En la figura 3.3.1./1, según ensayo de Ede (9) se ve la influencia de la relación agua/cemento en la presión de bombeo. Se aprecia que para una pequeña variación de la relación agua/cemento se puede producir una muy grande de la presión de bombeo. La zona crítica es para una relación agua/cemento 0,4 a 0,5. En hormigones de consistencia K1 (slump: 1"-2"), la adición de sólo 10 litros de agua por m³ produce una caída de la presión del 20 % (21).

La relación agua/cemento dependerá de cada caso particular, pero se puede decir que para cantidades normales de cemento (275-450 kg/m³)

oscila de 0,4 a 0,65 (10), lo que coincide con la cita de Weber (29) de una estadística de consistencias que daba un mínimo de 0,34 y un máximo de 0,68. Con unos contenidos de finos de hasta 350 kg/m³ y con unos 300 kg/m³ de cemento las necesidades de agua son similares para una misma consistencia. Al aumentar los finos sobre esta cantidad se precisa aproximadamente un litro de agua por cada 10 kg. de finos.

3.4. Aditivos

El uso correcto de un aditivo puede representar, una notable mejoría de las propiedades, pero hay que tener presente que un aditivo no podrá transformar un mal hormigón en uno bueno, sino que debe partirse de un hormigón de calidad.

Los aditivos a usar en el bombeo serán aquéllos que nos proporcionen:

- menos tendencia a la segregación
- menos tendencia a la exudación
- mayor lubricación.

No toda aditivo es adecuado en cualquier condición. Influyen la naturaleza de los áridos, el agua, el cemento, otros posibles aditivos y hasta sus proporciones o la temperatura. Por ello es recomendable hacer ensayos previos a su uso para comprobar la supuesta acción beneficiosa y que no aparezcan efectos contraproducentes. Entre los ensayos deberá incluirse un bombeo en idénticas condiciones que en obra, observando si realmente se produce una mejora en la bombeabilidad. Puede llegar a ocurrir que al usar un aditivo en determinadas circunstancias, no sólo no se mejora la bombeabilidad, sino que una mezcla que era bombeable deja de serlo (6).

Los aditivos más usados en el bombeo son los aireantes y/o plastificantes (10), aunque en determinados casos puede ser imprescindible recurrir a otros tipos como los retradadores. Además en el mercado se encuentran productos específicos destinados al bombeo, aunque su uso es muy limitado en la actualidad.

3.4.1. Aireantes

Merced a la generación de microporos se puede reducir el agua de amasado y la cantidad de finos. Se estima que 1 % de microporos puede equivaler a 15 ó 20 Kg. de finos (29). Su uso controlado puede proporcionar mayor plasticidad y menos tendencia a la exudación y segregación (1). Pero la insuficiencia de lechada o la exudación no se

pueden corregir con aireantes, según se ha comprobado numerosas veces (10). Esto se debe a que durante el bombeo los poros desaparecen casi por completo dadas las altas presiones. En esto consideramos que no solo influirá la disminución de volumen debido a la compresión de la burbuja (ley de Boyle-Mariotte), sino que también aumentará la disolución de los gases en el agua (ley de Henry). No obstante, al final de la tubería, cuando la presión vuelve a ser la atmosférica, el hormigón tiene un aspecto normal, ya que el aire vuelve a su situación inicial (21) al menos en su mayor parte, ya que se ha podido apreciar que al final el contenido de aire disminuye ligeramente respecto al comienzo. Esta disminución puede cifrarse en un 1 % ó un 2 % en longitudes de 100 a 150 m.

Pero, aparte de esto, para el bombeo la oclusión de aire puede ser altamente perjudicial, pues el conjunto de burbujas introducidas actúan como un colchón que absorbe la energía de la bomba. En caso de grandes longitudes o alturas, tal colchón de aire llega a absorber toda la energía y el bombeo se detiene (10), incluso sin llegar a producirse la segregación. El que la obstrucción se debe en este caso a un colchón de aire es fácil de comprobar sin más que apreciar que al abrirse las válvulas el hormigón vuelve a la tolva. También es audible el ir y volver del hormigón dentro de la tubería, causando al final la segregación del hormigón (10).

Por ello, en general, es preferible no usar aireantes para el hormigón que vaya a ser bombeado, si no hay garantías de absoluto control. En caso de recurrir a ellos, es casi universal la limitación del total de aire ocluido al 5 % reduciéndose en algún caso a 4 % (13).

3.4.2. *Plastificantes*

Vamos a distinguir dos grupos de plastificantes: los que permiten reducir el agua de amasado y los que la retienen.

a) Entre los primeros hay distintas clases. Debe tenerse mucho cuidado al elegirlos ya que algunos actúan como oclusores de aire llegando a aumentarlo hasta en un 16 % en los casos extremos (28). Por este motivo al adquirir hormigón preamasado debe considerarse la posibilidad de que se haya utilizado este tipo de aditivos (10), muy frecuentes en las centrales de hormigonado. Además suelen retrasar el fraguado lo que, si es moderado, es beneficioso. Este

posible carácter debe preverse para evitar añadir además un retardador específico.

A pesar de que estos productos den una cierta mejora de la trabajabilidad, no debe reducirse la cantidad de lechada (10), pues su única misión es deflocular los granos de cemento, facilitando su mojado y disminuyendo el esfuerzo necesario para ponerlos en movimiento (28).

b) Entre los agentes de retención de agua hay dos tipos diferenciados: los productos químicos (productos coloidales, acetatos, estearatos) y los polvos finos. Todos tienen de común su aumento de la retención de agua y su consiguiente disminución de la exudación. A veces aumentan el aire ocluido, pero siempre bajo proporción (3-4 %) (28). Por todo esto son más indicados para bombeo los anteriores.

Los polvos finos pueden sustituir a los finos naturales o parte del cemento del hormigón. Todas las puzolanas tienen una aplicación específica en el bombeo (28) (6). Las cenizas volantes, que pueden considerarse como un tipo de puzolanas artificiales, incluso fijan parte del aire ocluido (28). En este caso concreto de las cenizas volantes se bombea incluso mejor con ellos que con cemento, pues presentan menos fricción al ser partículas más lisas y redondeadas (3).

Otros polvos finos como escorias, caliza, etc, pueden usarse, pero la realidad es que se emplean menos. Para áridos ligeros se ha usado bentonita y los resultados han sido buenos, aunque aumenta mucho la presión de bombeo (4). Es muy útil con ellos la adición de materiales puzolánicos (1).

Todos los plastificantes son muy útiles cuando se va a bombear después de un largo recorrido en camión hormigonera, pues al principio de la descarga siempre se produce una disgregación más ó menos acentuada, saliendo más gruesos al principio, que pueden provocar atascos (7).

Cuando vaya a ensayarse las propiedades de un plastificante habrá que tener en cuenta que sus propiedades son en muchos casos tixotrópicas y estáticamente no acusan apenas efectos (7).

3.4.3. *Retardadores*

Deben usarse sin duda alguna cuando el recorrido sea largo y la temperatura elevada para evitar que el fraguado se produzca dentro de la tubería.

A veces tienen un marcado carácter aireante llegando a ocluir hasta el 5 % (28), lo que es límite

admitido universalmente. Por ello deben usarse con cuidado especial. En ningún caso se podrá extrapolar la dosificación de retardadores, pues algunos al variar las proporciones pueden llegar a ser aceleradores (20).

3.4.4. *Aditivos especiales para bombeo*

Son aditivos que podrían incluirse junto a los plastificantes normales. Pero a pesar de ello se venden específicamente para el bombeo, pues sus propiedades son más acentuadas en el sentido que nos interesa. Suelen estar basadas en sustancias solubles en el agua, como el óxido de polietileno, los alginatos (6) y los derivados de la celulosa (carboximetil, hidroxipropil, hidroxietil) (30).

Tienen en común el dar una mayor viscosidad a la fase acuosa. De este modo, se aumenta la cohesión de la mezcla, reduciendo las posibilidades de segregación, por lo que son muy indicados para contenidos de cemento bajos. Ya se mencionó el hecho de que se ha bombeado hormigón con sólo 130 kg/m³ (11). Igualmente permiten el empleo de arenas que den huecos demasiado grandes debido al aumento de viscosidad. Como también proveen mayor lubricación, reduciendo la fricción, son útiles con cualquier hormigón, aunque sus resultados no sean entonces tan espectaculares.

Se ha comprobado su utilidad con hormigones ligeros (6) (11) (30), pero siempre que se limite la absorción, pues su única misión es evitar la segregación por diferencia de densidades. En estos casos, aunque se use aditivo, la dosis de cemento será elevada (12) (30).

Característico de estos aditivos es que su acción es efectiva sólo durante el movimiento. Durante el reposo la mezcla puede parecer incluso más dura, pero en cuanto se produce cualquier movimiento, se aprecia una disminución del rozamiento interno (12). No obstante, pueden tener un efecto negativo en la resistencia a la compresión (6) (30). También pueden retrasar el fraguado (4), aunque, si no es excesivo puede ser incluso favorable. Igualmente, se ha comprobado a veces un aumento del aire ocluido, aunque en cantidades pequeñas (4) (26) (30).

Según hemos podido comprobar personalmente, a pesar de sus efectos beneficiosos, se está lejos de poder considerar estos aditivos como de uso normal en el bombeo, pues lo incierto todavía de sus propiedades y sobre todo su elevado precio

hacen que se usen sólo en condiciones muy especiales, por lo menos en España.

4. METODO PRACTICO DE DOSIFICACION

Una vez conocidas todas las cualidades exigibles a cada uno de los componentes del hormigón, hay que seguir un orden en el cumplimiento de cada una. En general, para obtener un hormigón susceptible de ser bombeado, podemos dar los siguientes pasos (4) (6):

- 1) Aunque hay determinadas afirmaciones sobre la variación de propiedades del hormigón tras el bombeo —especialmente resistencia— son de realidad dudosa y parece confirmado que no influye el hecho del bombeo (13), y lo único que está universalmente aceptado es la variación del contenido de agua libre usando áridos porosos. Por ello, para el diseño de una mezcla bombeable habrá que considerar primeramente las exigencias finales del hormigón y dosificar por un método normal, generalmente el de la resistencia.
- 2) Comprobar que la granulometría antes determinada es apta para el bombeo mediante:
 - a) La medida de huecos (vacuómetro), viendo si su cantidad es razonable.
 - b) Contraste con curvas ya establecidas.
 - c) Reglas empíricas para corregir deficiencias. Perfilar la granulometría si es preciso.
- 3) Comprobar que el cemento es suficiente, mediante
 - a) Medida de huecos.
 - b) Reglas empíricas.Corregir en su caso.
- 4) Comprobar que hay suficientes finos (cemento + finos naturales ó añadidos) con los mismos procedimientos que para el cemento.
- 5) Comprobar que la cantidad de arena es correcta para lograr el slump adecuado, modificando, si es necesario.
- 6) Comprobar la docilidad y cohesión obtenidas.
- 7) Si se ha modificado la dosificación hallada en 1), comprobar que se cumplen las características exigidas. Si no se cumple, úsense aditivos, previo ensayo de los mismos.

Este proceso es el que debe seguirse si se va a fabricar el hormigón "ad hoc". Pero no siempre esto es económicamente rentable y se recurre al hormigón preamasado. Las centrales de hormigón preparado normalmente no tienen una demanda específica de hormigón bombeable, y recurren a usar el standard pues no es económico el disponer de áridos especiales para un uso restringido. Estas

empresas tienden, lógicamente, a obtener un hormigón del menor costo compatible con la exigencia normal impuesta por el cliente, que, generalmente, es la resistencia a la compresión.

Para ello, se reduce a lo menos posible la cantidad de cemento —el componente más caro—. Pero para mantener una relación agua/cemento baja, que nos permita obtener la resistencia deseada, se disminuye también el agua. Esta reducción del agua se ve favorecida eliminando al máximo la arena y aumentando el tamaño máximo y su proporción. Y todo esto redunda en mayores dificultades de bombeo (6). Para subsanar esto, puede recurrirse a la solución de compromiso de almacenar solamente áridos de un único tamaño o finos como específicos para el bombeo, y en lo demás recurrir a los áridos normales (4).

5. AMASADO

Es fundamental para el bombeo del hormigón una homogeneidad perfecta. Aparece un límite inferior al tiempo de amasado, que será el que permita a todas las partículas de cemento entrar en contacto con el agua (10). pero si se prolonga excesivamente este amasado se puede llegar a rotura de áridos con variación de la granulometría y, en cualquier caso, a pérdidas de rendimiento. Dado que se exige una gran calidad al amasado deberá ser más largo que el normal: de 60 a 90 minutos (10). Por lo mismo, se preferirá usar mezcladoras (amasado forzado) a hormigoneras (caída libre) (27).

En el caso de usar hormigón preamasado hay que prestar especial atención al tiempo de permanencia del hormigón en el camión, pues nunca debe superar los 90 minutos. Debe tenerse gran cuidado con la nefasta costumbre de añadir agua no prevista en su proyecto al hormigón que lleva largo tiempo en el camión con el fin de darle mayor plasticidad. El hormigón así tratado producirá indefectiblemente atascos en las tuberías (10). Antes de descargar del camión, deberá hacerse girar la cuba a su máxima velocidad durante 3 minutos (10).

Si la mezcla se verifica en seco, la hormigonera del camión debe tener unas cuchillas que permitan un perfecto mezclado que deberá verificarse durante un tiempo suficiente para asegurar la perfecta homogeneidad del hormigón. Es importante el destacar que aunque la central y la obra estén próximas debe permitirse un tiempo mínimo de amasado (6). Como bastan 50 litros de hormigón

mal mezclado para que se produzca el bloque de la tubería (6) (18), teniendo en cuenta que un camión hormigonera puede tener un volumen de cuba de 4 a 12 m³, con que sólo un 1,3 % ó un 0,4 %, respectivamente, de todo el hormigón que de sin mezclar se produce el colapso del bombeo. Naturalmente, las exigencias de cuidado en el amasado crecen cuando la consistencia del hormigón es seca.

6. CONTROL DEL HORMIGON DESTINADO A SER BOMBEADO

Hay multitud de ensayos que podrían ayudarnos a determinar la aptitud de un hormigón al bombeo, o las de sus componentes para producir dicha aptitud. Pero ninguno es completo y sólo indican aspectos parciales.

Como interesante para calcular la dosificación o la posible aptitud de unos áridos para el bombeo tenemos el vacuómetro que nos mide los huecos del árido conjunto, indicando así la dosificación de cemento. Quizá sea más importante para áridos ligeros que para los normales, pues se ha comprobado que aquéllos cuya lectura daba menos de un 10 % de exceso sobre el correspondiente a un árido equivalente normal es bien bombeable (4). En la práctica no se recurre a él, a pesar de su valor teórico.

En ensayos sobre el hormigón fresco tenemos en primer lugar los que miden la plasticidad. Los más usados en general son el cono de Abrams (slump-test), la mesa de sacudidas (flow-test) y la penetración (bola de Kelly), pero se han mostrado parciales (7), ya que lo que buscamos es un comportamiento dinámico. En este sentido cabe recordar lo indicado sobre los plastificantes que aumentaban la viscosidad del agua y, mejorando la bombeabilidad, parecían hormigones más duros que sin usarlos. Para apreciar este comportamiento dinámico se podría recurrir a viscosímetros que analizasen el comportamiento de la lechada, pero resulta excesivamente teórico (3) y sus correlaciones con el bombeo no están determinadas cuantitativamente. Se han ideado otros muchos ensayos (Vebe, Meynier Orth, Lesage, etc. (7)) pero, aún siendo mejores, no son completos y carecen de difusión.

Para medir los efectos de aditivos hay ensayos con un cierto valor, pero son específicos para dichos aditivos y no para el bombeo en sí como ocurre con los retardadores (Proctor, arranque de varillas) (7). Tan sólo puede ser de utilidad

inmediata la medición del aire ocluido, dada la importancia de este factor.

La ASTM ha normalizado tres de estos ensayos de medida de aire ocluido. El primero, el más antiguo y delicado, de aplicación solamente en laboratorio, y conocido como gravimétrico, consiste en comparar la densidad teórica si no hubiese huecos y la real. Para uso a pie de obra tenemos el volumétrico y el de presión. El volumétrico es muy útil con áridos ligeros y porosos mientras que el de presión es de aplicación en todo tipo de hormigón y está más extendido (7).

Queda ya sólo por citar los ensayos específicamente pensados para el bombeo, que hasta la actualidad son el de Powers y el CIRIA-test. El ensayo de Powers (29) nos da el trabajo relativo necesario para transformar un molde semiesférico en otro de forma cilíndrica. Se usa en laboratorio, pero no en obra. El aparato no está bien normalizado, apareciendo efectos de percusión no controlables. El CIRIA-Test, indica el comportamiento de una mezcla a presión conocida, dando así un modo de conocer la presión de segregación (6) (16). Ninguno de los dos está extendido.

Como hemos visto hasta ahora, los ensayos normales no son adecuados para el bombeo, los adecuados son complicados pero no completos y los pensados para estudiar el comportamiento global son imperfectos ó de caracterización dudosa. Resta como única posibilidad el estudio en las mismas condiciones de obra. Cualquier cambio en la longitud o altura de bombeo, granulometría, proveedor, tipo de bomba, temperatura ambiente, etc., requerirá nuevos ensayos. Y así, y sólo así, se podrá tener certeza del comportamiento del hormigón durante el bombeo.

7. CARACTERISTICAS DEL HORMIGON PARA EL COMIENZO DEL BOMBEO

Según vimos, en condiciones estacionarias en el interior de la tubería por la que se bombea el hormigón se forma una película lubricante que soporta todo el gradiente de velocidades, mientras que el resto se comporta como un bloque, dado su carácter de fluido de Bingham. Pero si se bombease directamente el hormigón, con la tubería vacía, el comportamiento sería en principio sin formación de película, con segregación y consiguiente atasco.

Hay que recurrir a una mezcla que pueda proveer desde un principio la película y que no

produzca segregaciones. Una mezcla de este tipo es un hormigón sin árido grueso, es decir, un mortero o, si eliminamos también la arena, una lechada. Se usará lechada cuando no se alimente la bomba con una mezcladora, sino por camión (10)

No existen estudios precisos sobre la composición de estas mezclas y suele recurrirse a dosificaciones sancionadas por la práctica. Las lechadas se dosifican sólo por el peso de cemento a usar, mientras que en los morteros se fija la relación arena/cemento (1/2 según (10) y (28)).

Un ejemplo de dosificación para esta mezcla inicial podría ser, según (10):

- a) lechada: para diámetros comprendidos entre 7,5 y 10 cm. se usarán 100 kg. de cemento si la longitud es menor de 50 m. En caso contrario, se usan 200 kg.
- b) mortero: para diámetros comprendidos entre 12,5 y 17 cm., si la longitud es menor de 100 m. se usarán 500 litros de mortero y si es mayor de 200m. se tomarán de 900 a 1200.

Estas cantidades pueden ser excesivas, ya que, según (1), basta con 400 litros para lubricar 300 m. de Ø 150-200, e incluso permite rebajarlo para líneas verticales o de menor diámetro.

La consistencia de esta mezcla no debe ser demasiado fluida. En general es preferible usar mezclas cohesivas, y en el caso particular de conducciones verticales debe prestársele aún más atención. La consistencia adecuada es un slump de 2 ó 3 pulgadas (27).

Respecto al uso de aditivos en esta mezcla inicial, pueden ser interesantes plastificantes o bentonita (21).

Por comodidad, también puede bombearse hormigón como el definitivo, eliminando simplemente el árido grueso (1). Incluso se llega a considerar el bombeo de un hormigón completo (21) con la condición de que la primera amasada sea más rica (10 % más de cemento) y más fluida (consistencia K3).

Sea cual sea la solución adoptada no deberá usarse esta mezcla inicial más que en trabajos sin responsabilidad (1).

8. CONCLUSION

Como hemos visto, un hormigón que es susceptible de ser bombeado tiene unas condiciones óptimas de granulometría, consistencia y dosificación. Por ello, el bombeo puede tomarse

como un auténtico control de calidad. Ningún hormigón de mala calidad podrá bombearse.

Pero no hay que sacar la idea equivocada de que el hormigón que se vaya a bombear debe cumplir unas exigencias de laboratorio. La realidad es que diariamente se bombea hormigón por todas partes y sólo contadas veces se le exigen condiciones especiales en su fabricación. Generalmente es hormigón preamasado elaborado como es normal en las centrales de este tipo.

Las propias empresas de alquiler de bombas cuando son contratadas para un servicio solamente controlan la dosificación de cemento (300 ó 350 kg/m³) y el tamaño máximo (20 ó 40 mm.) (8). La justificación de esto es clara. De todos los bombeos habituales prácticamente ninguno requiere presiones extraordinarias, dada su corta longitud y altura. Por ello basta con las exigencias habituales de dosificación y granulometría (o la equivalente de resistencia a compresión) y la consistencia adecuada para vibrar. Los finos vienen dados de sobra por el cemento. Además, todos llevan un plastificante retardador, que favorece el bombeo. Si se usan aireantes, como es general, lo serán en corta cantidad por la limitación de resistencia y así no influirán negativamente.

Sólo cuando las condiciones de bombeo vayan a ser singulares, se requerirá granulometría corregida, aditivos especiales, etc. Y entonces habrá que tener en cuenta toda esta exposición, tanto más cuanto mayor sea la longitud o altura a dominar.

BIBLIOGRAFIA

- (1) A.C.I. Manual of concrete practice. Committee 304. Pumping concrete. 1973. (Traducción al castellano: Nueva Serie IMCYC/1. Colocación del concreto por métodos de bombeo. Instituto Mexicano del cemento y del concreto).
- (2) ALEKSEJEV, S. N. *Mechanizatsia stroitel-stva* 9 (1952), vol 1. (Traducción al inglés: Library of the Congress. No. 61. 13659; citado en (6) y (29))
- (3) ANDERSON, W.G. Analisis de mezclas de concreto para determinar su bombeabilidad. Revista IMCYC, 92. Mayo-junio 1978. Mexico.
- (4) ANEFHOP (Agrupación Nacional Española de Fabricantes de Hormigón Preparado). El bombeo del hormigón. 1974. Madrid.
- (5) ARREDONDO, F. Estudio de materiales (V, Hormigones). Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento. 1975. Madrid.
- (6) BRITISH CONCRETE PUMPING ASSOCIATION. The Manual of Pumped Concrete Practice. Sin fecha. Harrogate, North Yorkshire.
- (7) CALVO FIDALGO, J.L. Empleo de aditivos en hormigones transportados y bombeados. XVI Jornada técnica Alemanas. 28-30 abril 1970. Madrid.
- (8) C.B.H. (Compañía Auxiliar para el Bombeo del Hormigón). Características de nuestras bombas. Una hoja, sin fecha.
- (9) EDE, A.N. The resistance of concrete pumped through pipelines. Magazine of Concrete Research, 9 (1957). (Citado en (6), (29), (4) y (21)).
- (10) ERNST, K.V.E. Pumping concrete and concrete pumps. Ed. Schwing. GmbH. Julio 1975. Herne 2, R.F. de Alemania.
- (11) FLATAU, A.S. Admixtures. Concrete, Volumen 5. N.º 12. Diciembre 1971. Londres.
- (12) HALESA. Catálogo de aditivos. Folleto sin fecha. Madrid
- (13) HERRERO, y otros. Bombeo. Maquinaria: sus aspectos, dosificaciones adecuadas. Cemento-Hormigón. Junio 1977. Barcelona.
- (14) HERRERO, y otros. Bombeo. Maquinaria: sus aspectos, dosificaciones adecuadas. Cemento-Hormigón. Diciembre 1977. Barcelona.
- (15) JOISEL, M.A. Recherches sur les pompes a béton. Anuales de l'Institut Technique de Bâtement et des Travaux Publics, 204. 1951. (Citado en (21) y (29)).
- (16) KEMPSTER, E. Concrete for pumping. Concrete. Volumen 5, n.º 12. Diciembre 1971. Londres.
- (17) MANGEL, S. y SEELING, R. Preparación y Empleo del hormigón. Ed. Gustavo Gili S.A. Barcelona. 1976.
- (18) OLDFIELD, J.B. Supply of ready mixed concrete. Concrete, volumen 5, N.º 12. Diciembre 1971. Londres.
- (19) PARKINSON, J.D. Workability and flow behaviour. Concrete, volumen 5, N.º 12. Diciembre 1971. Londres.
- (20) de la PEÑA QUEVEDO, C. Empleo de los aditivos en hormigón armado y pretensado. XVI Jornada Técnica Alemanas. 28-30 Abril 1970. Madrid.
- (21) PUTZMEISTER. Hormigón para el bombeo. BP192 (B) ES. Folleto sin fecha.
- (22) PUTZMEISTER. Bombas de hormigón PM, Elefante. BP444-2 ES. Folleto sin fecha.
- (23) REZOLI IZAGUIRRE, J. Características y correcta aplicación de los diversos tipos de cemento. Ed. Técnicos Asociados. Barcelona 1976.
- (24) SCHWING. En las obras. Reportaje 3. Folleto sin fecha.
- (25) SCHWING. En las obras. Reportaje 4. Folleto sin fecha.
- (26) TEXSA. Hormigón y aditivos. Barcelona 1974.
- (27) TIKTIN, J. Procedimientos Generales de Construcción. Apuntes sobre bombeo de hormigón, vibración de hormigón y cintas transportadoras. Ed. Servicio de Publicaciones de Alumnos. ETSICCP. Madrid 1979.
- (28) VENUAT, M. Aditivos y tratamientos de morteros y hormigones. Ed. Técnicos Asociados S.A. Barcelona. 1972.
- (29) WEBER, R. Transporte de hormigón por tubería. Ed. Urmo. Bilbao. 1968.
- (30) WEISS, S. El natrosol en el bombeo: una nueva vida en las construcciones de hormigón. Arte y cemento n.º 966. 30 de agosto de 1972. Bilbao.