

lo que se exige al hormigón preparado con respecto a su transporte, colocación y compactado

R. WEBER, DÜSSELDORF

Beton, nº 8, agosto 1968, págs. 298-306

generalidades

Las condiciones que se exigen del hormigón endurecido pueden conseguirse únicamente con seguridad cuando ya el hormigón fresco acusa determinadas propiedades. Cuando el hormigón preparado ha alcanzado un aspecto uniforme en la hormigonera de la central, debe mantener su consistencia al cargarlo en el vehículo, durante el transporte al lugar de la obra, al vaciar el vehículo, al elevarlo a la obra y al colocarlo en el encofrado. El hormigón preamasado y remezclado en vehículos ha de conservar su homogeneidad en todas las fases de trabajo después de haber sido entregado en el lugar de la obra. Debe poder elaborarse con el menor trabajo posible, pero de tal forma que se produzca un elemento de construcción homogéneo y compacto.

La suma de estas propiedades se denomina trabajabilidad del hormigón. Una elaborabilidad suficiente es necesaria para cualquier hormigón. Para determinados tipos de hormigón pueden ser necesarias además otras propiedades en el hormigón fresco, como, por ejemplo, una suficiente porosidad cuando se ha de aplicar en pavimentos. Aquí no se tratará de estas propiedades.

1. TRABAJABILIDAD DEL HORMIGÓN Y SU EXAMEN

El grado de trabajabilidad depende de la composición del hormigón, o sea, de la granulométrica de los áridos, de la forma de los mismos, del tamaño máximo, del contenido de finos y del contenido de agua. La composición del hormigón ha de estar, por lo tanto, también acorde con la clase de transporte y de obra.

Las propiedades más importantes para el examen de la trabajabilidad son la magnitud de la cohesión interna en la mezcla (también denominada capacidad de cohesión) y la resistencia a la deformación (en sentido más estricto, la docilidad o compresibilidad).

Como magnitud parcial que pueda medirse, para conocer la trabajabilidad del hormigón, se emplea en la práctica la consistencia. Esta depende en gran medida del volumen de pasta de cemento. El concepto de consistencia está unido a determinados métodos de medida. El resultado de dicha medida da un punto de apoyo para definir en qué zona de consistencia ha de clasificarse el hormigón ensayado.

Sería interesante disponer de un método mediante el cual con un aparato de ensayo pudiera determinarse y definirse con cifras la trabajabilidad de una mezcla. De ser esto posible, tendrían que abarcarse todos los factores que son decisivos en una elaboración determinada, al menos la consistencia y la resistencia a la deformación. También el modo de influir sobre el hormigón en el aparato de ensayo debe ser parecido a como lo es en el lugar de la obra.

Pero hasta ahora no se ha conseguido abarcar la trabajabilidad por medio de un sistema de medida —correspondiendo a estas condiciones— como un todo normalmente válido y completamente satisfactorio. Con los instrumentos de medida conocidos, únicamente pueden distinguirse propiedades parciales.

Con el ensayo de penetración se comprueba la conformabilidad del hormigón compactado de cierta manera. La garantía de seguridad de esta medida es reducida; una piedra grande sobre la que coincide el peso de caída puede falsear el resultado. En el ensayo de penetración no es posible un examen de la capacidad de cohesión o de la posibilidad de disgregación del hormigón incluso realizando una inspección ocular. A esto hay que añadir que este método solamente puede utilizarse para una zona de consistencia limitada. Estos inconvenientes son también motivo para que el ensayo de penetración no se mencione en el proyecto de la nueva norma DIN 1 048 “método de ensayo para hormigón”.

En el proyecto de esta norma de ensayo se han descrito el ensayo de desparramado y el ensayo de compactado según Walz como ensayos normales. En el proyecto de la nueva DIN 1 045 se indican los siguientes valores límite para los diversos intervalos de consistencia:

Margen de consistencia	Medida de desparramado a (cm)	Medida de compactado v (—)
K 1	—	1,45 1,30
K 2	≥ 42	1,30 1,15
K 3	≥ 50	1,15 1,05

En el ensayo de desparramado, la probeta de hormigón se deforma por efecto de golpes o sacudidas. El campo de aplicación está limitado a mezclas de hormigón que disponen de una suficiente capacidad de acomodación. Por lo tanto, el ensayo de desparramado es solamente apropiado para determinar la consistencia de hormigones plásticos y blandos (márgenes de consistencia K 2 y K 3). Además de medir la torta de hormigón, se recomienda examinar ocularmente la tendencia a la desintegración y facilitar datos descriptivos complementarios, como, por ejemplo, si el hormigón acusa disgregaciones de agua o grava.

Que el resultado de la medida no aclara satisfactoriamente la trabajabilidad de hormigón, queda explicado por dos ejemplos. Si se hacen dos hormigones de igual composición granulométrica, uno de grava y el otro de material triturado, y se los combina de modo que ambos tengan el mismo desparramado, siempre se diferenciarán en su conformabilidad; el hormigón de piedra machacada se maneja con más dificultad que el hormigón de grava. Existirán incluso diferencias con las arenas gruesas de diversa forma de grano, sobre

todo cuando la mezcla es pobre en arena. Una buena cohesividad en un hormigón produce una disminución de la medida de desparramado; aparentemente, se obtiene una trabajabilidad más desfavorable, que si, como ocurre en la mayoría de los casos, la consistencia medida se iguala a la trabajabilidad.

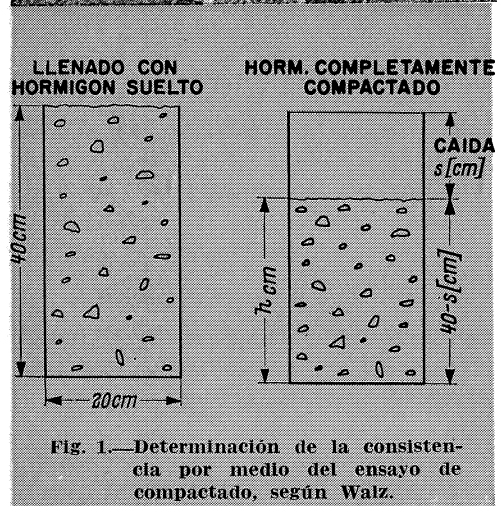


Fig. 1.—Determinación de la consistencia por medio del ensayo de compactado, según Walz.

mites es posible la inmediata comparación de los resultados de ambos casos. Por lo tanto, se recomienda basarse solamente en uno de los dos métodos indicados en la nueva DIN 1 048 al suministrar hormigón preparado.

2. ENTREGA DEL HORMIGON PREPARADO AL LUGAR DE LA OBRA

Desde el punto de vista tecnológico, en el transporte del hormigón fresco desde la hormigonera a la obra se trata sobre todo de que el material no se disgregue y de que no se alteren sus propiedades. Al considerar la corriente de material en el hormigón preparado, hay que distinguir entre el transporte desde la fábrica al lugar de la obra y el transporte dentro de la propia obra.

El transporte al lugar de la obra se realiza con ayuda de vehículos especiales o con camiones abiertos. De los vehículos especiales más del 85 % son vehículos-hormigoneras (en

Un método por el cual se determina la trabajabilidad del hormigón, es el ensayo de compactado según Walz. En un recipiente de 40 cm de alto y 20 cm \times 20 cm de sección, se vierte el hormigón con una paleta desde el borde del cajón dejándolo suelto y sin compactar, enrasándolo simplemente. A continuación se compacta el hormigón por medio de sacudidas hasta que ya no se comprime más. Midiendo la caída s en los ángulos del recipiente, puede calcularse la altura media del material compactado $h = 40 - s$ y la medida de compactado $v = 40 : h$ (fig. 1). Esta valoración tiene la ventaja de que es independiente del margen de consistencia y que el hormigón, desde el punto de vista de su efecto y estado, se ensaya en condiciones similares a como se maneja en la práctica.

Como complemento, en diversas ocasiones, se mide en este ensayo el tiempo que tarda el hormigón en estar completamente compactado. Al determinar la consistencia con ayuda de este ensayo denominado de tiempo de compactado, es sin embargo necesario que el hormigón se compacte siempre con la misma energía.

Como quiera que en el ensayo de desparramado se determina, en primer lugar, la conformabilidad, en el ensayo de compactado se determina más bien la concentrabilidad del hormigón; por eso, sólo dentro de ciertos lí-

el año 1966 había trabajando 5.153 vehículos-hormigoneras); el resto son vehículos-agitadores y vehículos recipiente.

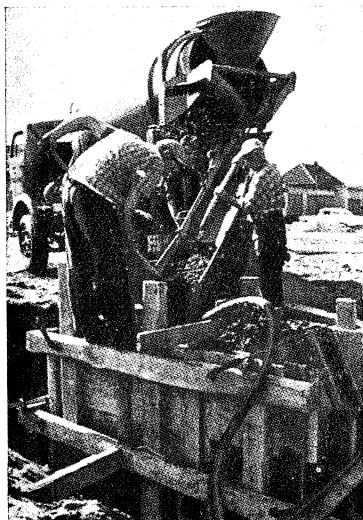


Fig. 2.—Entrega del hormigón preparado en un vehículo-hormigonera.

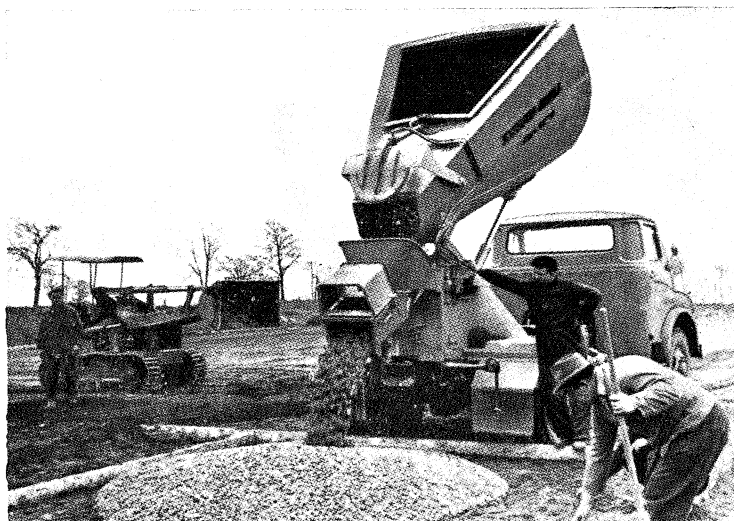


Fig. 3.—Entrega del hormigón preparado en un vehículo con mecanismo agitador.

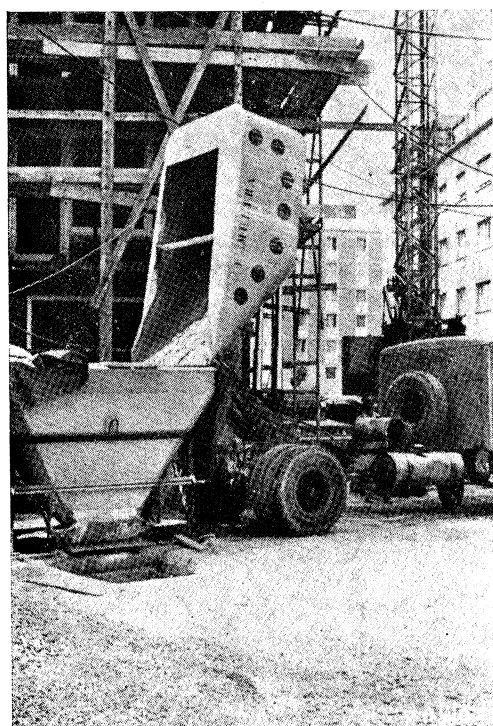


Fig. 4.—Entrega del hormigón preparado en un vehículo-recipiente sin agitador.

En vehículos-hormigonera (fig. 2) tendrían que ser transportados hormigones de todas las consistencias, o sea, secos, plásticos y fluidos. Los vehículos con mecanismo agitador (agitadores) se utilizan para el transporte de hormigón mezclado en fábrica con márgenes de consistencia K 2 y K 3 (fig. 3). Con el fin de evitar que se disgregue el hormigón, hay que moverlo agitándolo continuamente. Tanto empleando vehículos-hormigoneras como vehículos con mecanismo agitador, la descarga ha de concluirse antes de hora y media después de haber añadido el agua, como máximo.

En vehículos sin mecanismo agitador (fig. 4), a causa del peligro de disgregación, solamente pueden transportarse, en Alemania, hormigones con márgenes de consistencia K 1. Además, las “Normas provisionales para la fabricación y suministro de hormigón preparado” ordenan que estos vehículos han de estar equipados de forma que permitan una descarga lenta y uniforme del hormigón sin que se disgregue.

En estos vehículos, el proceso de descarga ha de estar concluido a los 45 minutos de haber añadido el agua, porque en las tolvas abiertas por arriba el hormigón está más expuesto a las influencias climatológicas que en los vehículos-hormigonera. Caso de que estas tol-

vas estuviesen provistas de una tapa hermética que protegiera al hormigón de la lluvia, el sol y el viento producido por la marcha, pueden autorizarse tiempos de descarga más prolongados.

2.1. Influencia de un mezclado y depósito prolongados

La cuestión de si, por un mezclado y depósito prolongados, se afectan las propiedades del hormigón, es de especial significación para el hormigón preparado. En numerosos ensayos se estudió la influencia de diferentes tiempos de mezcla y depósito sobre la consistencia, la temperatura del hormigón fresco y la resistencia inicial. A continuación se presentan algunos resultados de estos ensayos, los cuales, sin embargo, sólo muestran una tendencia, ya que en las pruebas no se utilizó ningún vehículo-hormigonera, sino una mezcladora forzada cubierta de laboratorio.

La influencia sobre la consistencia está representada en la figura 5. El hormigón permaneció en la hormigonera sin tapa y prácticamente no se endureció hasta transcurridas 3 horas; a las 6 horas el endurecimiento era general. Un mezclado lento y continuo aceleró notablemente el endurecimiento.

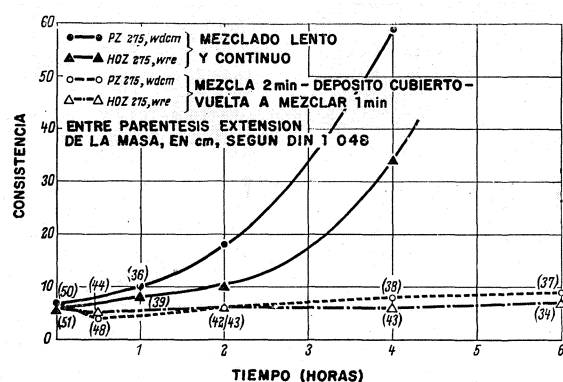


Fig. 5.—Influencia de los tiempos de amasado, y depósito de los hormigones sobre su consistencia, según los ensayos de G. Wischers.

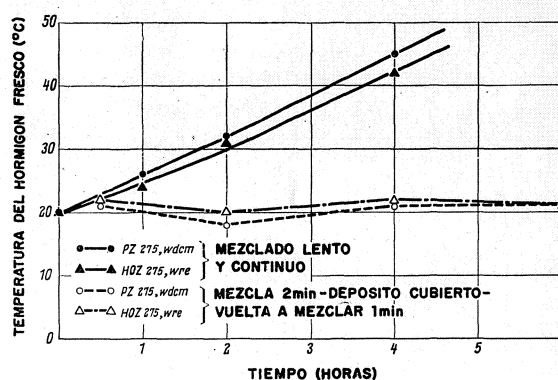


Fig. 6.—Influencia de los tiempos de amasado y depósito de los hormigones sobre su temperatura, según los ensayos de G. Wischers.

Parecidos resultados presenta la figura 6, en la que el tiempo se representa frente a la temperatura del hormigón fresco.

Si en la hormigonera el hormigón permaneció sin cubrir, la temperatura se mantuvo prácticamente constante. Pero al mezclarlo continuamente aumentó en más de 20°C. Al considerar estos resultados hay que tener en cuenta que en hormigoneras transportables el aumento de temperatura no es tan grande como en hormigoneras forzadas. En aquellas hay que contar con aumentos de temperatura de unos 5°C, máximo 10°C.

En la figura 7 está representada la resistencia a la compresión a los 28 días frente al tiempo. Mientras que como consecuencia de un depósito prolongado se altera poco la resistencia a la compresión, aumenta considerablemente con un mezclado prolongado, en tanto que la consistencia, que cada vez se va haciendo más rígida, permita una compactación total.

De estos resultados puede sacarse la consecuencia de que la resistencia del hormigón no se perjudica por un mezclado prolongado en vehículos agitadores y hormigoneras, sino que más bien, se mejora. Una limitación del intervalo entre la adición de agua y el vaciado de la hormigonera o una limitación del número de revoluciones del tambor no son, pues, necesarias por motivos de resistencia. En cambio, sí hay que tener en cuenta que por un mezclado prolongado se produce un endurecimiento del hormigón. La consistencia pedida ha de mantenerse en la entrega, ya que es necesaria para el transporte ulterior y elaboración prevista del hormigón. Por lo tanto, en el ensayo de calidad se recomienda aspirar a una consistencia que se halle lo más cerca posible del límite "más blando" de la zona de consistencia a suministrar, con el fin de que exista un margen para el endurecimiento durante la marcha.

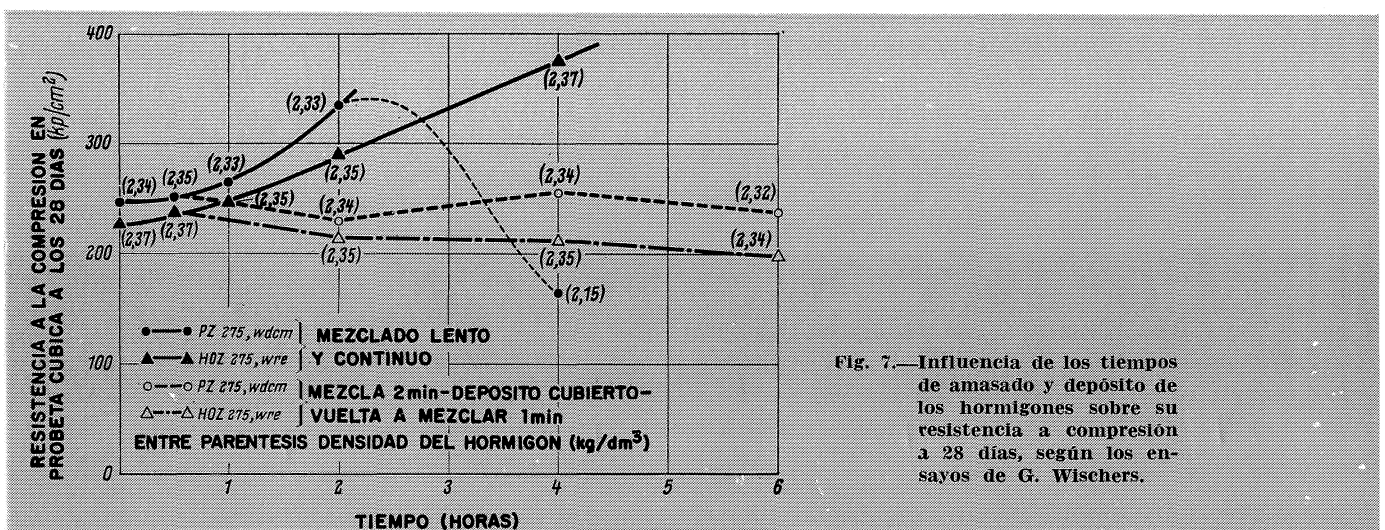


Fig. 7.—Influencia de los tiempos de amasado y depósito de los hormigones sobre su resistencia a compresión a 28 días, según los ensayos de G. Wischers.

Si el hormigón se ha endurecido mucho por un tiempo de marcha o de espera inesperadamente largos, en ningún caso debe de añadirse más agua, ya que entonces disminuye la resistencia a causa de la mayor relación agua/cemento. Si, como consecuencia del endurecimiento, el hormigón no puede ya transportarse, colocarse y compactarse en obra, de acuerdo con lo reglamentado, ha de desecharse el suministro. Además, hay que tener en cuenta que un mezclado muy prolongado puede repercutir desfavorablemente en la retracción, sobre todo con hormigones blandos.

Como quiera que las elevadas temperaturas aceleran el endurecimiento, durante el verano habría que esforzarse en reducir la temperatura de expedición del hormigón. Esto puede hacerse, por ejemplo, cubriendo el almacén de áridos y empleando agua de amasado lo más fría posible; también los vehículos que esperan deben permanecer lo más posible en la sombra.

3. TRANSPORTE DEL HORMIGON PREPARADO AL LUGAR DE LA OBRA

Siempre que a pie de obra el hormigón preparado no pueda llegar inmediatamente del vehículo —a través de un canalón inclinado— a la zona de hormigonado (fig. 8), hay que llevarlo, por cintas o a través de tuberías, al lugar de colocación en recipientes. Caso de que los elementos de transporte intercalados tengan unos rendimientos/hora reducido, pa-

ra acortar el tiempo de espera de los vehículos puede ser conveniente un almacenamiento intermedio en un silo de transbordo.



Fig. 8.—Entrega inmediata del hormigón preparado desde un vehículo-hormigonera, a través de una rampa, al elemento a hormigonar.

3.1. Transporte en recipientes y por cinta

Si el hormigón preparado se transporta en pequeños recipientes móviles, como, por ejemplo, carretillas de transporte a motor, calesinas de hormigón (japoneses), carretillas o vagonetas monocarril (fig. 9), el peligro de segregación no es tan grande como en el transporte por camión, ya que al utilizarse estos elementos la distancia de transporte es reducida, la mayor parte de las veces. Aunque, con malos caminos de transporte, debe de tenerse cuidado de que, por efecto de las sacudidas durante el transporte, no puede segregarse el hormigón fluido en una carretilla o en un calesín de hormigón (japonés).

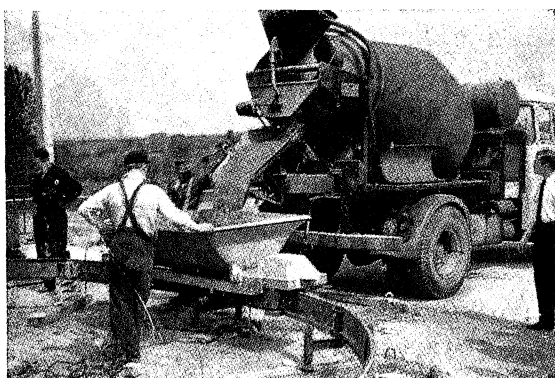


Fig. 9.—Transporte del hormigón preparado con una vagoneta monocarril.



Fig. 10.—Transporte del hormigón preparado con una cinta.

Los elementos de transporte más seguros a pie de obra, desde el punto de vista de la segregación del hormigón son los cubos de grúa y elevadores. En ellos puede acarrear, sin grandes perturbaciones, tanto hormigón seco como plástico o fluido.

Nada hay que objetar en contra del transporte de hormigón con cinta, siempre que su aplicación sea correcta (fig. 10). Pero hay que tener especial cuidado al transportar hormigón seco y fluido. La velocidad y la inclinación de la cinta hay que graduarlas de modo que ni rueden hacia abajo los trozos gruesos de la grava ni sean arrojados demasiado lejos. Al extremo de la cinta transportadora es conveniente disponer una chapa de rebote, la cual devuelva los trozos gruesos lanzados demasiado lejos (fig. 11).

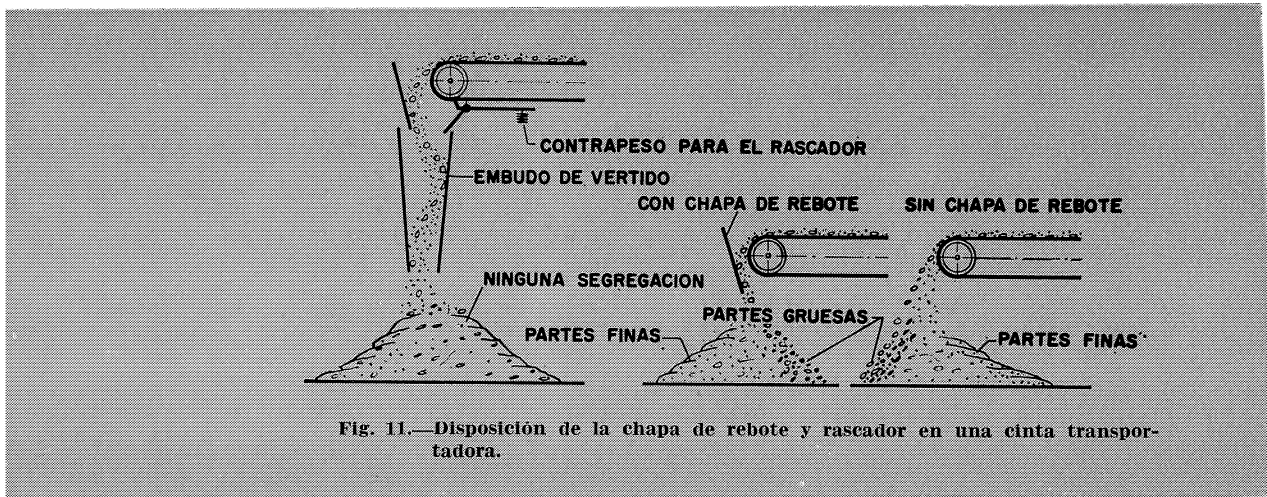


Fig. 11.—Disposición de la chapa de rebote y rascador en una cinta transportadora.

Con el fin de eliminar de la cinta la lechada de cemento, justo después del rodillo superior de inversión debe montarse un rascador. En recorridos de la cinta largos hay que proteger el hormigón contra las influencias exteriores de modo similar a como se hace con el transporte por camión. El hormigón no debe verterse inmediatamente de la cinta al encofrado, sino a través de un embudo.

3.2. Transporte por tubería.

Las repercusiones de un hormigón segregado, que no fue transportado ni en depósitos ni en cintas transportadoras, no se comprueban la mayoría de las veces, como acumulaciones de grava o grandes coqueas, hasta que no está terminado el elemento constructivo. En el acarreo por tuberías con ayuda de bombas, por regla general no se manifiestan segregaciones durante el proceso de transporte más que en forma de atascos en la tubería. Por esto, el hormigón bombeado exige aún más homogeneidad que el hormigón que se transporta con otros elementos.

Como quiera que la combinación de hormigón preparado/bomba de hormigón ha ganado en los últimos años una importancia creciente que va a continuar creciendo, en el futuro deberán de tratarse con más cuidado las condiciones que hay que exigir a un hormigón preparado que ha de ser transportado a través de tuberías.

3.2.1. Condiciones generales que se ha de exigir a un hormigón bombeado

Para su transporte sin dificultades, el hormigón bombeado ha de estar compuesto de forma que su comportamiento sea el de un líquido viscoso. Para esto es necesario que contenga una cantidad suficiente de lechada de cemento o de mortero fino. Para el transporte por tubería de un hormigón de este tipo, la presión axial en la tubería debe ser igual a la presión radial.

Esto pudo comprobarse con numerosas medidas realizadas en bancos de pruebas y en obra con ayuda de tubos de medición. Los tubos de medida (fig. 12) tenían en su centro una zona débil exactamente calibrada, la cual estaba tan repleta de bandas extensométricas, que los esfuerzos en sentido axial y tangencial de la pared, del tubo podían abarcarse simultánea y separadamente. Con una composición correcta del hormigón, las fuerzas longitudinal y transversal acusaron la misma magnitud en los citados tubos de medición (figura 13); el hormigón podía bombearse bien.

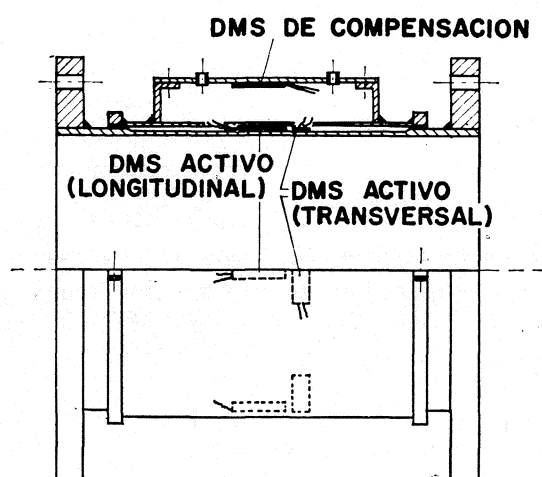


Fig. 12.—Elemento de medida.

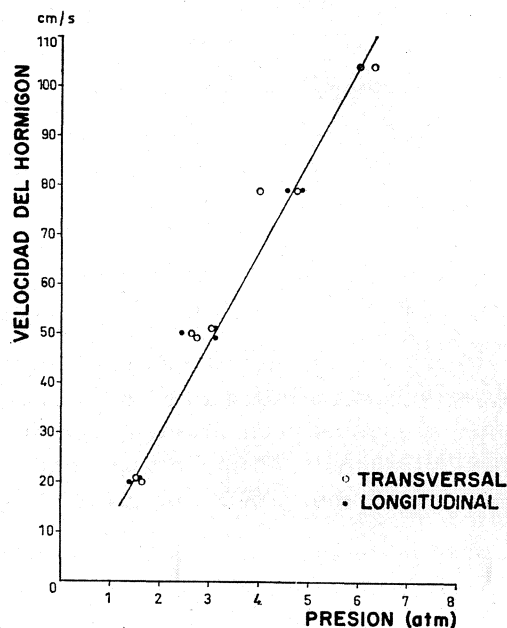


Fig. 13.—Presión sobre el tubo en sentido longitudinal y transversal en función de la velocidad del hormigón.

Si el hormigón no contiene suficiente lechada de cemento o mortero fino para envolver los áridos gruesos y formar una película lubricante en las paredes de la tubería, la presión axial producida por el émbolo de la bomba no se transmite entonces a las paredes de la tubería a través de la lechada de cemento sino a través de la estructura granular. En consecuencia, para el transporte se necesita una gran presión en la bomba.

Si a unos de estos cementos pobres en mortero se le añade agua, existe el peligro de que la lechada de cemento muy fluida o el agua fluyan en dirección de la caída de presión, es decir, hacia el extremo de la tubería. Esta segregación puede conducir a un apelotonamiento de los granos de grava y con ello a un atasco de la tubería.

3.2.2. Composición del hormigón bombeado

Con el fin de poder conseguir las condiciones indicadas, ha de observarse algunas normas en cuanto a la composición del hormigón preparado que ha de transportarse a través de tubos.

El *cemento* ha de tener una buena capacidad de retención del agua. Dentro de la misma clase de cemento, la cantidad de agua de amasado en el hormigón fresco se determina, en

gran parte, por la superficie específica de aquél, haciéndose mayor la capacidad de retención de agua al aumentar la finura de molido. Además, y como consecuencia de una molienda más fina, mejora la trabajabilidad del hormigón.

A pesar de esto, se han puesto limitaciones. Una finura de molido excesivamente alta conduce, para la misma relación agua/cemento, a un mayor coeficiente de fricción de la lechada y entonces se necesitan mayores presiones para el transporte del hormigón.

Para la formación de una cantidad suficiente de lechada de cemento de consistencia no demasiado fluida, ha de existir un determinado contenido de cemento. Este debiera ser de 250 kg/m³ como mínimo; mejor 300 kg/m³.

Por otro lado, el transporte se dificulta como consecuencia de un excesivo contenido de cemento, porque éste confiere al hormigón una naturaleza pegajosa y gomosa que reduce su capacidad de deslizamiento.

A ser posible, los áridos han de ser redondeados, aunque también se ha empleado con éxito el material triturado para preparar hormigón bombeado. En este caso, hay que tener en cuenta que por la mayor superficie de los granos triturados en comparación con los granos gruesos redondeados, se necesita más lechada de cemento para recubrirlos.

Son convenientes las composiciones granulométricas cuya curva en el grupo de las arenas se encuentra dominante en la mitad superior de la zona óptima. También los hormigones preparados con áridos en granulometría discontinua, han demostrado ser bombeables. Por ejemplo, en numerosas obras se transportaron por tubería, hormigones con 32,5% de arena 0/3 mm y 67,5% de grava 7/30 milímetros.

Para el hormigón bombeado es muy importante la arena fina. Juntamente con el cemento y el agua, forma la misma la película lubricante en las paredes de la tubería y soporta la presión producida por el émbolo de la bomba. La cantidad necesaria de *grano fino* depende del tamaño máximo de los áridos. Con 30 mm de tamaño máximo, 1 m³ de hormigón compactado debe contener, por lo menos, 350 kg de materiales finos, y con tamaño de grano máximo de 15 mm, 400 kg/m³. El contenido de grano fino ha de aumentarse cuando el cemento repele el agua o cuando se emplean áridos triturados.

Si no son suficientes la cantidad de cemento y la proporción de arena fina en la mezcla de relleno, o se aumenta la cantidad de cemento o se añaden materias finas tales como trass o piedra molida.

De todos modos, hay que evitar un exceso de grano fino porque, como consecuencia de ello, no solamente se afectan desfavorablemente la contracción, la resistencia a las heladas y otras propiedades del hormigón, sino porque también se dificulta el transporte, lo mismo que ocurre con un contenido excesivo de cemento.

Si al cemento bombeado se agrega un *producto de adición*, además de los ensayos de calidad correspondientes, se recomienda realizar pruebas de bombeo para comprobar la disposición que tiene el hormigón para su transporte.

Lo más frecuente es añadir al hormigón bombeado agentes fluidificantes, con lo que se reduce la demanda de agua o se mejora su trabajabilidad.

De un modo especial se utilizan las sustancias formadoras de poros (agentes oclusores de aire), para, en el caso de mezclas pobres en cemento, sustituir la falta de finos por pequeños poros de aire cerrados distribuidos uniformemente. En la trabajabilidad de hormigón, estos poros ejercen una influencia parecida a la de las materias finas. Con un 1 %

de microporos introducidos en 1 m^3 de hormigón, puede sustituirse aproximadamente de 15 a 20 kg de materiales finos.

Por supuesto, hay que tener en cuenta que los poros de aire disminuyen la resistencia del hormigón. Además, se ha comprobado en las obras que un contenido excesivo de poros de aire influye negativamente en la disposición del hormigón para su transporte. Como el aire se deja comprimir, los poros pueden hacer el efecto de amortiguadores. En consecuencia, y sobre todo con tuberías largas, la capacidad de transporte puede afectarse seriamente. Si en la tubería existe un colchón de aire, éste se nota cuando, al cambiar las compuertas, el aire comprimido vuelve a empujar el hormigón al embudo.

La *consistencia* ha de conservarse lo más igual posible durante el proceso de hormigonado. Después de una repentina alteración de dicha consistencia, puede contarse con mucha probabilidad con un atasco. Por lo tanto, y sobre todo al suministrar hormigón preparado que ha de ser bombeado, hay que cuidar que el hormigón de los diferentes vehículos tenga la misma consistencia.

Considerado desde el punto de vista de la mecánica del proceso, la consistencia debiera de ser lo más fluida posible, ya que el transporte de un hormigón seco necesita más presión que el de un hormigón fluido (fig. 14). A esto se opone el que un hormigón fluido con elevado contenido de agua puede segregarse bajo presión y, en consecuencia, llegar a atascarse la tubería.

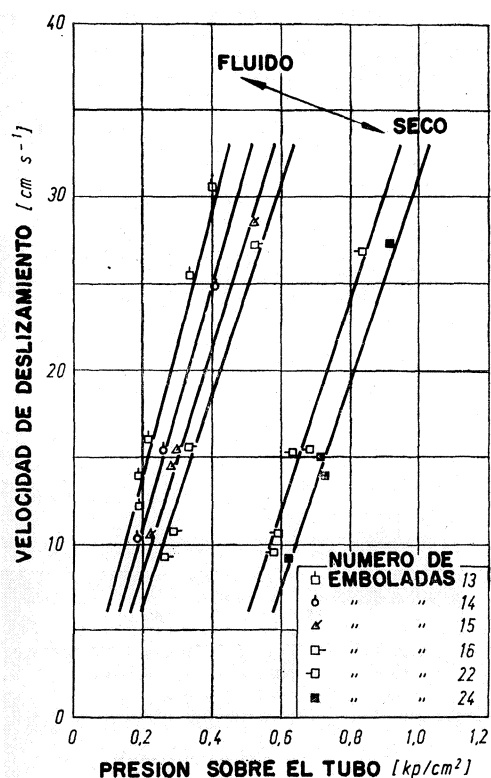


Fig. 14.—Presión sobre el tubo en función de la consistencia y de la velocidad del hormigón.



Fig. 15.—Salida del hormigón al final del tubo.

El límite de la posibilidad de bombeo de un hormigón de consistencia seca viene determinado por su disposición a ser aspirado. Hay que asegurar que el hormigón sea aspira-

do desde el embudo al cilindro de la bomba. En caso contrario, el cilindro de la bomba no se llena completamente en la carrera de aspiración y, por lo tanto, disminuye su rendimiento. Un mecanismo agitador montado en el embudo puede mejorar la aspiración.

Teniendo en cuenta estos hechos, un hormigón que haya de ser transportado por una tubería con diámetro mayor, ha de ser plástico y con un desparramado de 36 a 40 centímetros. Con tal consistencia, el hormigón sale en el extremo de la tubería como un tapón que llena toda la sección y se rompe en pedazos a su caída (fig. 15).

3.2.3. Transporte por tubos de pequeño diámetro

Hasta hace pocos años, eran de uso frecuente tubos con un diámetro nominal de 150 mm y 180 mm trabajando con bombas estacionarias; más escasos eran los tubos con un diámetro nominal de 125 mm y de 204 milímetros.

Una antigua norma de obra confirmaba que el diámetro interior debía ser, generalmente, cinco veces mayor que el grano más grueso del árido. Es decir, para un tamaño de grano de 30 mm se requería un tubo de 150 mm. La experiencia práctica demostró en los últimos 3 años que el hormigón se transportaba bien a través de tubos con diámetro menor. En los últimos tiempos se ha observado una creciente utilización de tuberías de 80 y 100 mm, sobre todo para transportar hormigón preparado. Seguramente en Alemania funcionan ya unas 200 autobombas de hormigón, a las cuales se empalman normalmente tubos con diámetro pequeño (fig. 16).



Fig. 16.—Transporte posterior del hormigón preparado con un vehículo autobomba.

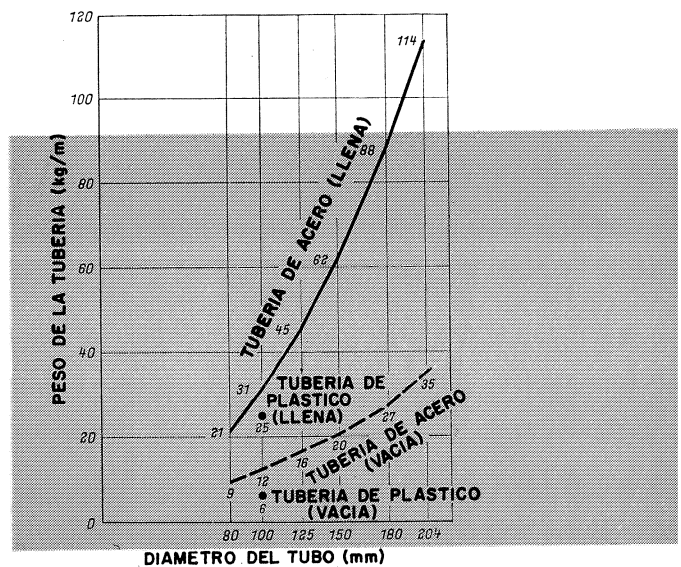


Fig. 17.—Peso de la tubería en función del diámetro de los tubos.

En la elección del menor diámetro nominal importa mucho el reducido peso de los tubos. Una mayor reducción de peso se consigue empleando tubos de plástico en lugar de tubos de acero fundido. El peso, por metro, de un tubo de acero de 180 mm es tres veces mayor que el de un tubo de 80 mm del mismo material y casi cinco veces mayor que el de un tubo de plástico de 100 mm (fig. 17).

Asimismo, si se considera el peso por metro indicado en la figura 17 de tubos llenos de hormigón, el de 80 mm es el más ligero. El tubo de plástico de 100 mm es aproximadamente 20 % más pesado; el tubo de acero de 100 mm aproximadamente 50 %; el tubo de acero de 150 mm aproximadamente 300 % y el tubo de acero de 180 mm aproximadamente 400 %.

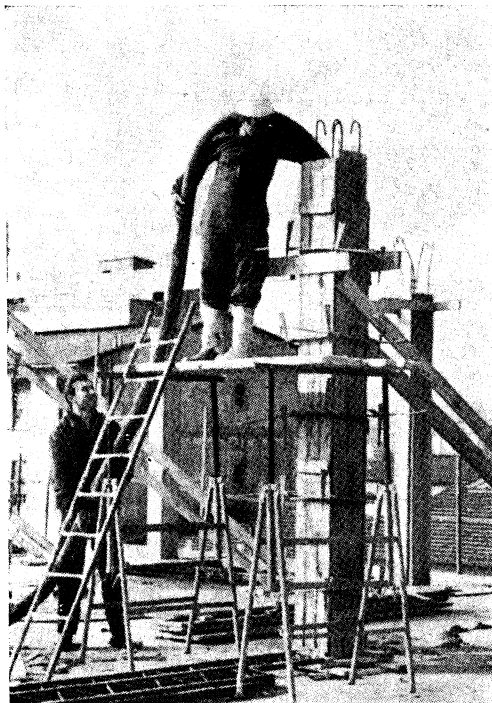


Fig. 18.—Empleando una tubería de diámetro pequeño, la manguera terminal puede sostenerla un solo obrero.

Esta comparación demuestra que una tubería de diámetro más pequeño puede tenderse más deprisa y más fácilmente y durante el trabajo puede modificarse su trazado de forma más sencilla.

A esto hay que añadir que, con el empleo de estas tuberías, puede empalmarse en su extremo una manguera flexible, la cual puede ser sostenida por obreros (fig. 18); el hormigón puede colocarse así de forma más económica. Con tubos de mayor diámetro también puede empalmarse una manguera de distribución, pero, en este caso, la mayor parte de las veces, ha de suspenderse de una grúa.

Es desfavorable el hecho de que, con igual composición y consistencia así como con la misma velocidad de deslizamiento del hormigón, el transporte a través de una tubería de menor diámetro exige una mayor presión que el transporte a través de una tubería con diámetro mayor (fig. 19).

Además, hay que tener en cuenta que, con el mismo rendimiento de transporte, la veloci-

dad del hormigón en tubos de 80 mm o de 100 mm es de 3 a 5 veces más elevada que en un tubo de 150 mm o de 180 mm (fig. 20). Según la estructura de la bomba —si es una bomba de uno o de dos émbolos— la velocidad del hormigón en un tubo de 80 mm es, por ejemplo, con un volumen acarreado de 40 m³, de 4,4 m/s o de 2,2 m/s, respectivamente.

Como puede verse en la figura 19, velocidades de transporte elevadas exigen también un mayor consumo de energía ya que, independientemente del diámetro del tubo, la presión aumenta linealmente con la velocidad de transporte. Además, una mayor velocidad produce también un mayor desgaste de los tubos.

Por otro lado, la experiencia en obra demuestra que, empleando tubos con diámetro menor, el peligro de segregación de un hormigón fluido con elevado contenido de agua es más reducido que con tubos de diámetro nominal mayor (fig. 21). Esto debe atribuirse a la mayor velocidad, al menor tiempo durante el cual el hormigón se encuentra en la tubería y a la menor sección del tubo. Pero la posibilidad de transportar hormigón fluido tiene —como ya se ha mencionado— la ventaja técnico-mecánica de que se necesita una presión más reducida que la precisa para el transporte de hormigón seco.

En el transporte a través de tubos con pequeño diámetro nominal juega también un papel esencial la deformabilidad del hormigón. Los cilindros de las bombas tienen diáme-

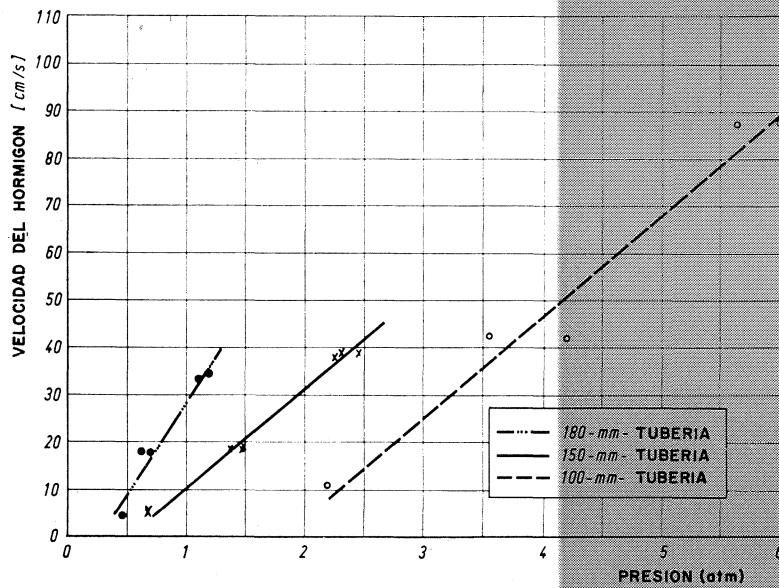


Fig. 19.—Presión sobre el tubo en función del diámetro del mismo y de la velocidad del hormigón.

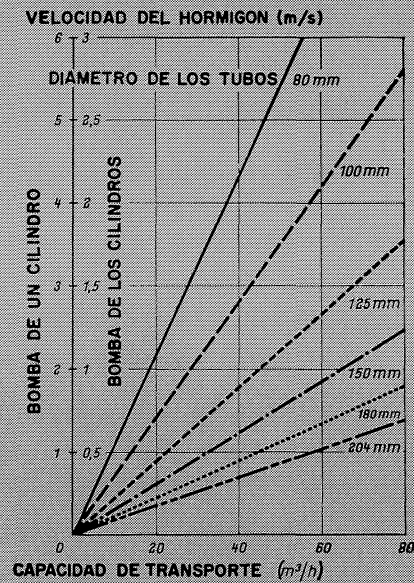


Fig. 20.—Velocidad del hormigón en función de la capacidad de transporte y del diámetro de los tubos.



Fig. 21.—Transporte de un hormigón fluido por una tubería de diámetro pequeño.

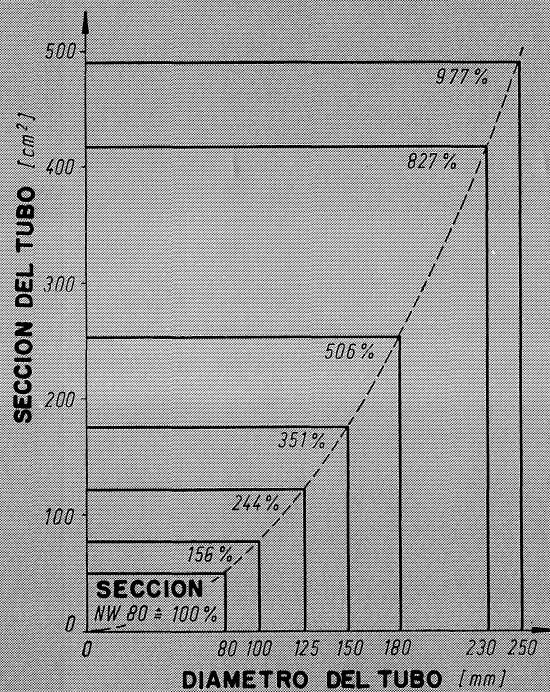


Fig. 22.—Sección del tubo en función del diámetro de los tubos.

tros de 150, 180, 230 e, incluso, en un aparato extranjero pueden ser de 250 mm. En su recorrido desde el cilindro de la bomba hasta la tubería ha de deformarse el hormigón en una fracción de la sección del cilindro. En la figura 22 están representadas en % las superficies para las distintas secciones. Aquí puede verse por ejemplo, que la superficie de la sección de un cilindro de bomba de 250 mm es casi diez veces más grande que la de un tubo de 80 milímetros.

Las investigaciones han demostrado que la presión de transporte necesaria para la deformación depende de la longitud del recorrido de deformación. En la figura 23 está representada, para diferentes velocidades, la presión para el transporte de hormigón por una pieza de paso de 2 m y una de 4 m. La longitud total de la tubería era, en ambos casos, de 32,70 m. El tubo de medición estaba situado delante de la pieza de paso directamente a la bomba. El cilindro de la bomba tenía un diámetro de 180 mm, la tubería un diámetro de 100 mm, o sea, que el hormigón tenía que deformarse como consecuencia de una superficie de sección de 254 cm² a una de 78 cm². Se vio que con piezas de paso más largas es más reducido el consumo de energía necesaria. La influencia de la longitud del recorrido de deformación se nota sobre todo al transportar hormigones secos. Esta consecuencia sirve también para la estructura del tubo en Y necesario en las bombas gemelas.

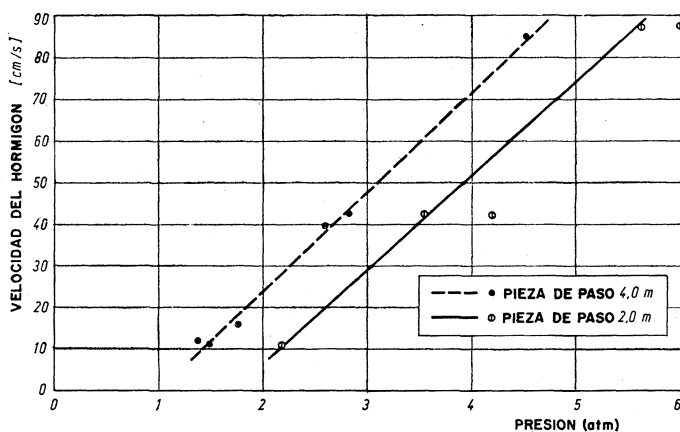


Fig. 23.—Presión del tubo con pieza de paso de 2 m y de 4 m de longitud en función de la velocidad del hormigón. La consistencia del hormigón era la misma en ambos casos.

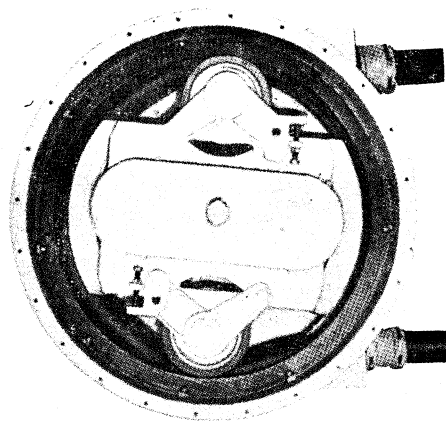


Fig. 24.—Vista de la cámara de la bomba abierta del aparato "Squeeze-Crete".

El empleo del aparato americano "Squeeze-Crete" conocido desde hace 3 años en Alemania presupone también una buena deformabilidad del hormigón. En este aparato, dos rodillos pisan sobre un tubo flexible, con lo que el hormigón se desplaza hacia la tubería empalmada (fig. 24).

El hormigón está también expuesto a fuertes deformaciones al transportarlo con pluma distribuidora, ya que la sección del cilindro a la tubería se reduce en un recorrido corto. Además, en la tubería se ha montado un tubo bifurcado, así como también curvas con pequeños radios de curvatura. Es seguro que determinados problemas de transporte pueden solucionarse más económicamente con la ayuda de estas plumas (fig. 25), pero hay que tener en cuenta que es necesario un considerable consumo de energía. Este consumo de energía puede reducirse con un hormigón

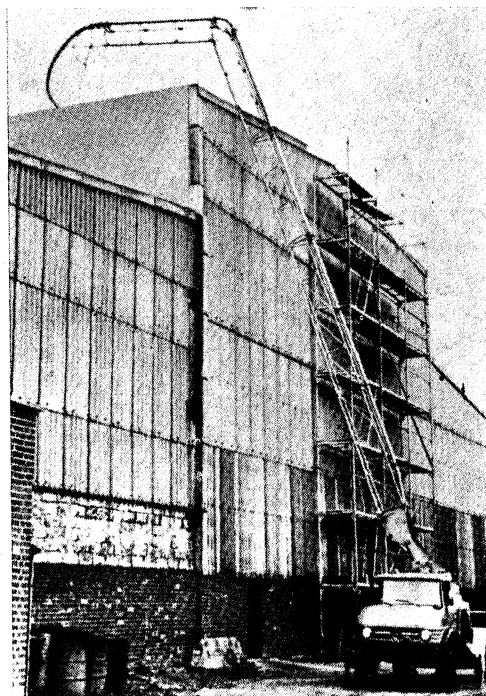


Fig. 25.—Autobomba de hormigón con pluma.

de consistencia más fluida, aunque la adición de agua habrá de mantenerse lo más reducida posible, ya que un exceso de la misma influye desfavorablemente en la resistencia y en otras propiedades del hormigón.

4. COLOCACION Y COMPACTACION DEL HORMIGON PREPARADO

La colocación y compactación del hormigón preparado no difieren de las del hormigón producido a pie de obra. También en este caso se exige que al colocar el hormigón éste no se segregue. Para ello es necesario que la altura de caída entre la salida del recipiente de acarreo, extremo de la rampa, cinta transportadora o tubería, por un lado, y la superficie a hormigonar, por el otro, sea reducida. Con mayores alturas de caída, como, por ejemplo, al hormigonar pilares y muros, hay que mantener la cohesión del hormigón por medio de tubos de caída que acaban poco antes de la superficie de vertido. Al colocarlo por capas, hay que tener cuidado de no verter el hormigón sobre la superficie del talud, ya que los granos gruesos escaparían de la corriente de vertido. Las acumulaciones de grava que se forman en la base del talud, pueden evitarse si se mantiene el tubo de caída contra el talud del vertido anterior (figura 26).

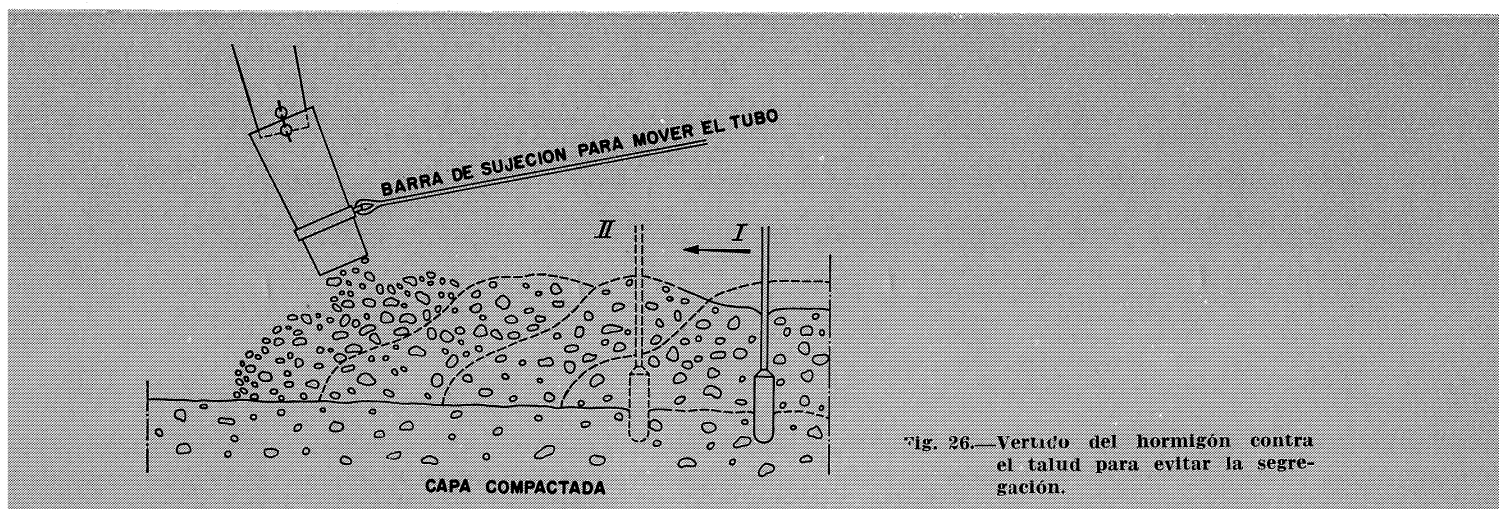


Fig. 26.—Vertido del hormigón contra el talud para evitar la segregación.

Después de la colocación, los huecos estructurales hay que eliminarlos lo más posible del hormigón fresco mediante un compactado de acuerdo con su trabajabilidad, puesto que las propiedades más importantes del hormigón, como son la resistencia mecánica, la impermeabilidad y la durabilidad, dependen de la densidad del hormigón endurecido. Cuanto más reducido es el volumen de poros tanto más favorables son las propiedades que pueden obtenerse en el hormigón endurecido.

En las obras, el hormigón se compacta preferentemente por vibración. Según el elemento a construir y sus dimensiones, puede emplearse un vibrador interno, un vibrador de encofrado o un vibrador de superficie. Mediante el vibrado no puede esperarse ningún aumento de la calidad con respecto al propio hormigón, el cual puede compactarse por otros sistemas; en la práctica, hasta aplicarse la técnica del vibrado, no fue posible compactar con seguridad hormigones secos y de grano grueso sin un gasto excesivo, tratando de aprovechar las ventajas inherentes a una reducida relación agua/cemento.

Pero el hormigón seco, sólo se deja vibrar bien cuando la lechada de cemento o el mortero fino están lo bastante húmedos para que durante el vibrado adquieran una consisten-

cia viscosa y pegajosa. También el hormigón vibrado tiene un límite al tratar de aumentar la calidad disminuyendo la adición de agua. La resistencia únicamente aumenta con contenidos decrecientes de agua, en tanto la flexibilidad de la lechada de cemento permita una compactación total. Si se continúa rebajando el valor límite, ya no queda completamente compactado el hormigón y disminuye su resistencia, a pesar de la menor relación agua/cemento (fig. 27).

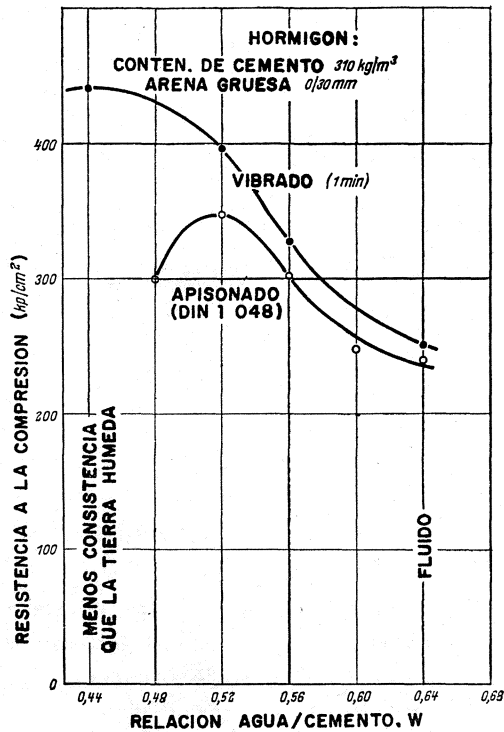


Fig. 27.—Resistencia a la compresión de cubos de hormigón de 20 cm, vibrados y apisonados y con distintas consistencias, según el ensayo de K. Walz.

mentan en el mortero fino “licuado” como consecuencia del vibrado, mientras que en la superficie se acumula lechada de cemento o, incluso, agua.

5. RESUMEN

5.1. Condición precisa para conseguir en el hormigón endurecido las propiedades exigidas, es una suficiente trabajabilidad del hormigón fresco. La trabajabilidad depende de la estructura del hormigón, es decir, de la composición granulométrica de los áridos, tamaño máximo y forma del grano, así como del contenido de grano fino (incluido cemento) y de agua. Las propiedades más importantes para enjuiciar su trabajabilidad son la cohesión y la resistencia a la deformación del hormigón fresco. Como magnitud parcial medible para enjuiciar la trabajabilidad se emplea en la práctica la consistencia, la cual se caracteriza, según el método de ensayo, por grado de desparramado o grado de compactado. Se recomienda que el suministro de hormigón preparado se base solamente en un método de medida de la consistencia.

5.2. En Alemania se utilizan generalmente vehículos-hormigoneras para el transporte desde la fábrica de hormigón preparado al lugar de la obra; en ocasiones, también vehículos con mecanismo removedor. Aquí no existen limitaciones en cuanto a la consistencia. La entrega en vehículos sin mecanismo removedor está limitada a la consistencia K1.

5.3. Con un mezclado continuo y prolongado se endurece el hormigón y aumenta su temperatura. Mientras que el hormigón en su hidratación se deje compactar completamente,

Hasta qué límite puede reducirse el contenido de agua depende de las características mecánicas del vibrador. Para la eficacia de un vibrador interno son importantes los golpes ejercidos por la botella del vibrador en la unidad de tiempo y la energía potencial de cada uno de estos golpes. Determinantes para éstos son, fundamentalmente, el número de vibraciones, la fuerza centrífuga y el peso de la botella.

Debe limitarse la vibración del hormigón demasiado fluido, por causa del peligro de la segregación, a casos excepcionales, como por ejemplo, con encofrado estrecho y armadura cerrada. Entonces sólo debe vibrarse hasta que el hormigón llene el encofrado a saturación. La segregación por vibrado excesivo se produce porque los granos gruesos se sedimentan en el mortero fino “licuado” como consecuencia del vibrado, mientras que en la superficie se acumula lechada de cemento o, incluso, agua.

la resistencia aumenta con un mezclado prolongado. Como quiera que la consistencia estipulada ha de mantenerse a la entrega en la obra, en la prueba de la calidad hecha en la central de hormigonado se recomienda buscar una consistencia que esté lo más cerca posible del límite "más fluido" de la zona de consistencia a suministrar. Al hormigón en proceso de hidratación no debe de agregársele agua de amasado, ya que con ello disminuiría su calidad.

5.4. El hormigón no ha de segregarse ni en el transporte a obra ni al verterlo en el encofrado. Con una acertada composición del hormigón y determinadas disposiciones mecánicas puede cumplirse esta condición.

5.5. Si se bombea el hormigón preparado a través de tuberías, el cemento ha de poseer una buena capacidad de retención del agua y no ha de estar molido demasiado fino. El contenido de cemento ha de ser como mínimo de 250 kg/m³, y mejor aún de 300 kg/m³. Se debe evitar un contenido de cemento excesivo, ya que dificultaría el transporte.

Los áridos han de ser lo más redondeados posible.

El hormigón bombeado ha de contener suficiente mortero; la cantidad necesaria depende del tamaño máximo del árido. Si no son suficientes el contenido de cemento y la proporción en sustancias finas del árido, o se aumenta la cantidad de cemento o se añaden materiales finos como el polvo de árido o trass; de todos modos hay que evitar un exceso de polvo.

Si al hormigón hay que agregarle un aditivo, además del ensayo de la calidad se recomiendan realizar pruebas de bombeo, con el fin de comprobar la facilidad de transporte del hormigón. Una aportación excesiva de aditivos que forman poros (oclusores de aire), puede redundar en perjuicio del rendimiento del transporte.

Si se utilizan tubos de gran diámetro, el hormigón debe estar comprendido en la zona de consistencia K2. Si se realiza el transporte a través de tubos con diámetro más pequeño, se recomienda una consistencia algo más fluida.

La composición y la consistencia del hormigón preparado que se ha de transportar por tuberías, no deben de cambiar esencialmente entre vehículo y vehículo.

5.6. Con la aplicación de vibraciones mecánicas, a las cuales se obliga al hormigón en el compactado por vibración, los hormigones de consistencias K1 y K2 se dejan compactar con seguridad y economía. El hormigón fluido puede segregarse si se le agita intensamente.

BIBLIOGRAFIA

- REINSDORF, S.: Verarbeiten des Betons. Zement-Taschenbuch 1968/69. Bauverlag. Wiesbaden 1967, S. 357/96.
- STEEGE, H. D.: Betonpumpen fördern Transportbeton. Die Bauwirtschaft 21 (1967), H. 8, Sonderteil Transportbeton, S. T 1/T 11.
- WALZ, K.: Verarbeitbarkeit und mechanische Eigenschaften des Frischbetons. Deutscher Ausschluß für Eisenbeton, Heft 91. Wilhelm Ernst & Sohn. Berlin 1938.
- WALZ, K.: Das Messen mechanischer Eigenschaften des Frischbetons. Arch. für Techn. Messen. Februar 1948, T 41/T 42.
- WALZ, K.: Rüttelbeton, 3. Auflage. Wilhelm Ernst & Sohn. Berlin 1960.
- WALZ, K.: Kennzeichnung der Betonkonsistenz durch das Verdichtungsmaß v. Betontechnische Berichte 1964. Beton-Verlag. Düsseldorf 1965, S. 207/18.
- WEBER, R.: Rohrförderung von Beton. 2. Auflage. Beton-Verlag. Düsseldorf 1963.
- WISCHERS, G.: Einfluß langen Mischens oder Lagerns auf die Betoneigenschaften. Betontechnische Berichte 1963. Beton-Verlag. Düsseldorf. 1964, S. 21/52.
- WISCHERS, G.: Entwicklung des Transportbetons in Deutschland. Betontechnische Berichte 1965. Beton-Verlag. Düsseldorf 1966, S. 113/27.
- Vorläufige Richtlinien für die Herstellung und Lieferung von Transportbeton. Zement-Taschenbuch 1964/65. Bauverlag. Wiesbaden 1963. S. 370/79.
- DIN 1045 Beton und Stahlbeton/Bemessung und Ausführung. Entwurf März 1968. Beuth-Vertrieb. Berlin 30/Köln 1968.
- DIN 1048 Prüfverfahren für Beton. Entwurt März 1968, beton 18 (1968), H. 3, S. 84/93.