

ORIENTACIONES PARA VIBRAR EL HORMIGÓN

Por ANTONIO ANGULO

Ingeniero de Caminos.

En esta segunda parte del artículo publicado en el número de mayo de la REVISTA, se indican una serie de conceptos prácticos que son de gran utilidad para vibrar el hormigón.

(Conclusión.)

Precauciones al establecer el proyecto.

Cuando se proyecta una pieza que ha de construirse con hormigón vibrado, deben preverse una serie de circunstancias. Entre ellas, la ya citada de movilidad del hormigón, según el modo por el que se va a vibrar.

Cuando hay moldes o encofrados, deben fijarse al suelo, en general, de modo elástico.

Si la vibración ha de verificarse por el exterior, deben estudiarse las posibilidades de fijación de los vibradores a los refuerzos de los moldes. A título orientativo puede indicarse que la separación entre cada dos posiciones del vibrador suele ser del orden de 0,50 a 1,5 metros.

Si se han de utilizar vibradores de inmersión, debe comprobarse si materialmente caben sin tropezar con armaduras o encofrados.

La aplicación de la vibración exige que las juntas de los encofrados se hagan con cuidado, a fin de que no haya fugas, pues de no ser así, se escapa por ellas la lechada de cemento. Al desencofrar, aparece frente a la junta imperfecta del encofrado una zona que sólo tiene áridos.

Debe igualmente tenerse en cuenta la posible formación de espacios de aire en sitios que deben llenarse de hormigón. Como ejemplo, fijémonos en un tubo o canal prefabricado que se ha de construir con los moldes horizontales (fig. 8.^a, A). Al llenar la parte inferior, queda un espacio de aire que no tiene salida. En estas condiciones la pieza de hormigón no queda formada totalmente.

En tales casos, puede resolverse la dificultad mencionada, bien colocando la pieza invertida (lo de abajo arriba y viceversa) o bien dejando un trozo interior libre de encofrado para ser llenado posteriormente (figura 8.^a, B). Por supuesto, esta parte inferior del molde debe colocarse después y vibrarse, a fin de sacar un paramento liso en la pieza construida.

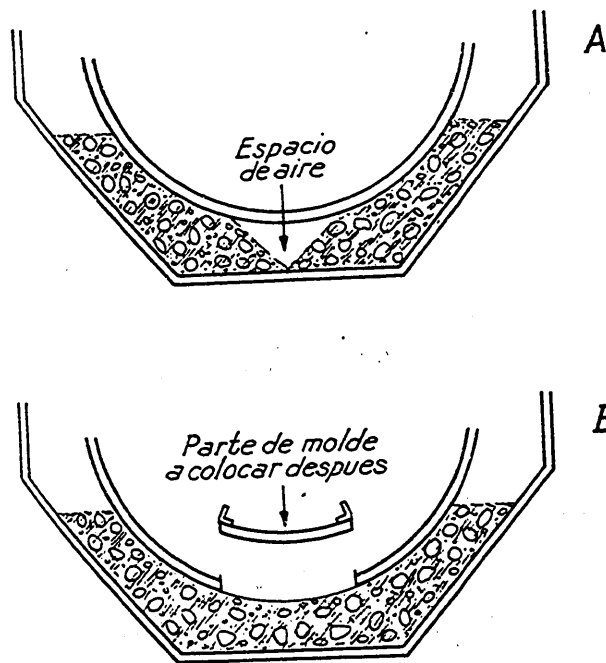


Figura 8.^a

Anormalidades durante la vibración.

Los movimientos vibratorios inducidos en el hormigón, presentan a veces algunas anomalías, cuya posibilidad también debe tenerse en cuenta.

Un tipo de anomalía son las *interferencias* entre los movimientos de diversos vibradores, si éstos actúan simultáneamente.

Tales interferencias se comprobaron mediante una serie de ensayos sistemáticos, cuyo detalle figura en la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS de agosto de 1953. De tales ensayos se llegó a la conclusión de que los vibradores, normalmente equipados con motores asíncronos, se sincronizan automáticamente cuando están unidos a un mismo molde. Los defasajes entre los diferentes vibradores se ajustan sin ninguna intervención humana, de modo tal, que producen el mínimo esfuerzo.

Por lo tanto, si representamos la línea de influencia de un vibrador adosado a un molde colocado en *A* (figura 9.^a), tendremos una curva análoga a la de la figura 3.^a. Del mismo modo, otro vibrador, colocado en *B*, tendrá su acción representada por una curva análoga a la anterior, solamente que desplazada, de modo que su máximo esté situado frente a *B*.

Pues bien, en vista de la experimentación mencionada, si se hace funcionar simultáneamente a ambos vibradores, la acción ejercida sobre el hormigón será la *diferencia* entre ambas líneas de influencia, o sea, la zona rayada de la figura 9.^a.

Es destacable que la zona central resulta muy poco afectada por la vibración.

También se han observado rotaciones en piezas que se someten a vibración externa. En todos los casos observados, la rotación se produce con su eje paralelo al del vibrador, y solamente cuando las características geométricas de la pieza (por ejemplo, si se trata de cilindros) no oponen dificultad a que se establezcan las rotaciones mencionadas.

El modo de evitar estos fenómenos consiste en colocar el eje del vibrador orientado de modo tal, que las rotaciones no tengan fácil recorrido. Por ejemplo, en el caso de un cilindro de hormigón, la posición del vibrador habrá de ser con su eje perpendicular al del cilindro.

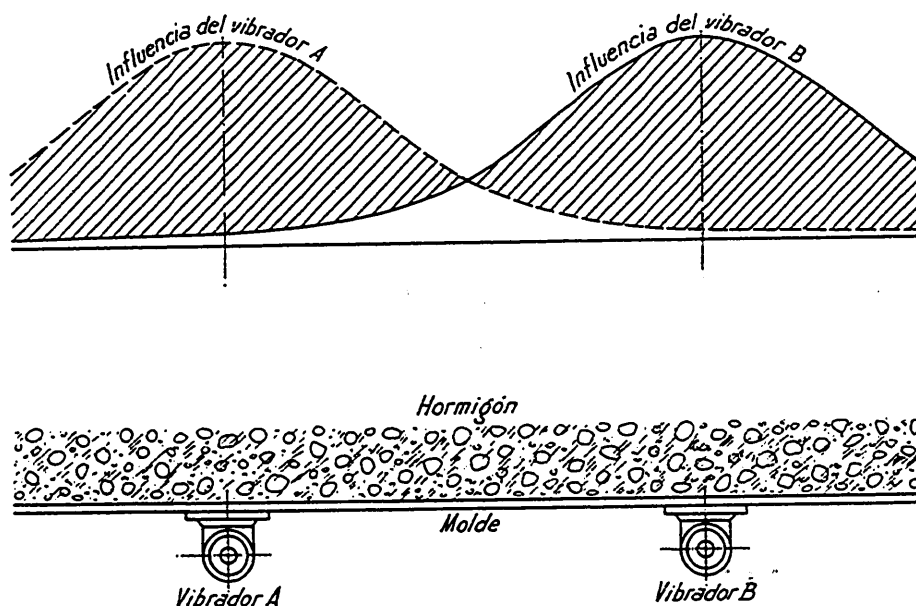


Figura 9.^a

Para obviar este inconveniente se debe proceder de modo que los vibradores inmediatos no funcionen simultáneamente. Se hará actuar primero a uno y después a otro vibrador.

Otra anomalía que se presenta en algunos casos es la *rotación* de algunas masas de hormigón.

Se presenta este fenómeno cuando parte de la masa del hormigón resulta afectada por movimientos vibratorios, tales que imprimen a dicha masa unos movimientos de traslación diferentes en varios puntos, resultando en conjunto un movimiento rotatorio.

Este hecho se ha observado en algunos casos de vibración interna. El hormigón gira alrededor de la aguja que se introduce en él. Se corrige este hecho afinando en la dosificación, generalmente mediante adición de mayor proporción de grava o árido grueso. Más adelante nos ocuparemos del ajuste de la dosificación.

Ajuste de la dosificación.

El fenómeno de *segregación* que se produce cuando se vibra el hormigón, permite ajustar la dosificación hasta una solución ventajosa.

Por supuesto, tal ajuste no se puede realizar más que cuando se trata de hormigón vibrado.

Hemos de recordar que, como consecuencia de los movimientos vibratorios, el hormigón se comporta como un fluido. Puede descomponerse el hormigón, a estos efectos, en mortero (arena, cemento y agua) y árido grueso o grava.

El árido grueso tiene mayor densidad que el mortero, por lo que tiende a descender, encontrándose el mortero en estado fluido.

Los granos de árido grueso se sitúan, pues, en la parte inferior de la pieza, y como también sufren los efectos de la vibración, se van ajustando entre ellos

a medida que se vibra el hormigón. Esta serie de movimientos termina cuando han quedado encajados entre sí los diferentes granos de árido grueso, de modo que, en conjunto, ocupen el mínimo volumen.

Se forma así una estructura de áridos gruesos, la cual tiene de por sí cierta consistencia, y deja entre tales elementos un volumen de huecos (llenos con mortero) que resulta *mínimo*.

La calidad de este hormigón es inmejorable, en atención a las siguientes razones:

1.^a Tiene máxima resistencia, ya que si se hiciera cualquier sección, se obtendría mayor proporción de piedra (árido grueso), que con cualquier otro sistema de dosificación, y la piedra es más resistente que el mortero.

2.^a La retracción de fraguado del cemento resulta mínima a causa de la estructura de los áridos gruesos, encajados unos contra otros, que impiden la reducción de las dimensiones de su conjunto, que es la pieza.

3.^a La existencia de la mencionada estructura, constituida por los áridos gruesos, permite desmoldes inmediatos, antes de que entre en juego el endurecimiento del cemento.

4.^a Es la dosificación *más económica*, ya que resulta mínimo el espacio ocupado por el mortero y, por lo tanto, por el cemento.

Se tiene, pues, en la parte inferior de la pieza, la mejor calidad de hormigón, siempre que éste haya sufrido la vibración adecuada.

Para que toda la pieza resulte construida con la misma excelente calidad de hormigón, habrá que dosificar el árido grueso en la cantidad precisa para que la pieza quede llena de tal árido (una vez encajados sus granos entre sí).

Prácticamente, puede lograrse esta dosificación de un modo muy sencillo. Se llena la pieza con el hormigón normal y se vibra. Al cabo de unos instantes habrá descendido el árido grueso, quedando en la parte superior un espacio que sólo tendrá mortero. Se aprecia fácilmente la profundidad de esta capa de mortero introduciendo una varilla verticalmente. Esta varilla penetrará en el mortero sin dificultad alguna, pero se detendrá ante los áridos gruesos encajados entre sí. El espesor de la capa de mortero es la longitud de la varilla que, al sacarla, haya quedado manchada de mortero. Seguidamente procede añadir árido grueso hasta conseguir que la varilla citada no pueda introducirse prácticamente nada en el hormigón, por estar prácticamente saturado de árido grueso.

Puede ocurrir que se exceda la proporción precisa de árido grueso y entonces ocurrirá que no aparecerá mortero en la parte superior de la pieza, aun cuando se la someta a una vibración adecuada. En este caso procede reducir la proporción del árido grueso.

Por lo tanto, y procediendo por tanteos, se puede llegar a una dosificación idónea para cada pieza, des-

tacando que este procedimiento de dosificación tiene, sobre cualquier otro, la ventaja de ser específico para cada pieza, teniendo en cuenta todas las circunstancias correspondientes a la misma, entre ellas el denominado "efecto pared" o "efecto armadura".

En efecto, en piezas de grandes dimensiones y escasamente armadas, cabe mayor proporción de áridos gruesos que en aquellas piezas de pequeña sección y con muchas armaduras, puesto que, en este segundo caso, tanto los moldes como las armaduras impiden que los granos de árido grueso se encajen entre sí.

También puede establecerse la dosificación de árido grueso precisa para una pieza determinada llenando el molde solamente con árido grueso y vibrando. La cantidad de árido grueso que haya cabido, aun sin mortero, indica la dosificación de tal material, correspondiente a la pieza en cuestión. Después se añadirá el mortero necesario para llenar los huecos (ni más, ni menos), obteniendo así la dosificación completa. Esta dosificación requerirá un ligero ajuste posterior, pues la existencia del mortero altera ligeramente las circunstancias del árido grueso, en lo que se refiere a encajarse entre sí los distintos granos del mismo.

Duración de la vibración.

En líneas generales, la vibración debe durar poco, a fin de que no entorpezca la construcción. Por esta razón, se suele vibrar durante muy pocos minutos.

No hay inconveniente, desde el punto de vista teórico, en que se exceda el tiempo de vibración. Es más, se mejora la calidad del hormigón cuanto más se vibra. Se ha comprobado experimentalmente que, vibrando durante hora y media, siempre se han obtenido hormigones más resistentes que vibrando un tiempo menor. Si la duración del vibrado es aún mayor, los resultados son dispares. Algunos hormigones (los más secos) arrojan una resistencia menor que cuando la duración del vibrado es de hora y media. Los hormigones confeccionados con más proporción de agua incrementaron su resistencia a medida que mayor tiempo estuvo actuando la vibración.

La limitación del tiempo de vibrado se impone por razones prácticas. Una de ellas, de tipo económico, ya que si se prolongase mucho la vibración, se obtendría muy poco rendimiento de los vibradores. Otra razón que limita el tiempo de vibrado es la pérdida de lechada de cemento a través de las juntas imperfectas de los moldes o encofrados.

Salvo en los casos mencionados, es preferible vibrar el mayor tiempo, compatible con las circunstancias. Si, por ejemplo, una pieza se construye con moldes metálicos (perfectamente ajustados) a los que está unido el vibrador, y se tarda unos cuantos minutos en llenarse de hormigón, podría hacerse funcionar el vibrador solamente durante los últimos ins-

tantes. Sin embargo, la pieza quedará mejor vibrada si se mantiene en marcha el vibrador durante todo el tiempo empleado en llenar la pieza de hormigón.

La evolución de las características del hormigón durante el proceso de vibrado puede seguirse en la figura 10, en la cual se ha relacionado la carga de rotura del hormigón (ordenadas) en función del tiempo de vibrado (abscisas).

La línea *A* se refiere a un vibrado muy eficaz, que en menos de medio minuto ha logrado obtener una elevada carga de rotura en el hormigón, que sólo puede superarse dilatando mucho la duración del vibrado, y aun así, en muy escasa proporción.

La línea *B* se refiere a un vibrado poco eficaz, que necesita actuar más de dos minutos para que el hormigón alcance una carga de rotura aceptable.

Por último, la línea *C* se refiere a un hormigón vibrado con un mecanismo cuya eficacia es insuficiente, ya que, al cabo de un minuto de actuar, sólo

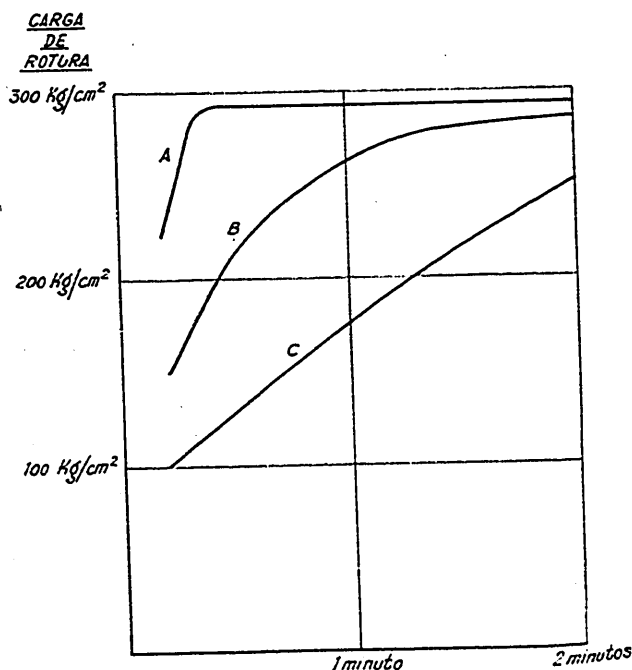


Figura 10.

se logra una carga de rotura en el hormigón del orden del 60 por 100 de lo que debe alcanzar el hormigón con el que se hicieron los ensayos.

Consecuencia de lo anterior es que la duración de la vibración debe ser superior a un mínimo, definido por las circunstancias del hormigón y del vibrador. Por ejemplo, en el caso *A*, este mínimo es del orden de medio minuto; en el *B*, de algo más de un minuto, y en el *C*, deberán sobrepasarse ampliamente los dos minutos.

Este tiempo mínimo se aprecia, en la práctica, por la aparición de lechada de cemento en la superficie libre.

No existe inconveniente, como antes se indicó, en continuar vibrando en exceso sobre el tiempo mínimo mencionado, si la dosificación del hormigón es correcta.

Por el contrario, una vibración insuficiente debe ser evitada, por impedir que el hormigón alcance sus características (carga de rotura, impermeabilidad, etcétera).

Vibración bajo carga en la superficie libre del hormigón.

Se ha observado que el hormigón situado en la parte superior de las piezas no reúne tan buenas características como el existente en las partes inferiores. La causa es que el hormigón colocado en las partes inferiores soporta el peso del que se vierte posteriormente.

Por ello se han efectuado diversas pruebas aplicando presión en la superficie libre del hormigón. Los resultados han sido favorables en todos los casos.

Bastan unos gramos por centímetro cuadrado (20, por ejemplo), para que se aprecie una mejoría en la carga de rotura, y de un modo destacado, en el aspecto de la cara superior de la pieza.

Aplicando presiones fuertes, del orden de 10 kilogramos/cm.², se incrementa la carga de rotura en su 25 por 100.

Es, pues, aconsejable en la construcción con hormigón vibrado, la colocación de cargas estáticas en la superficie libre del hormigón durante el tiempo en que se aplica la vibración. Estas cargas pueden materializarse mediante mecanismos o simplemente colocando pesos sobre el hormigón. Por supuesto, la aplicación de tales cargas es notablemente más fácil cuando las piezas se construyen en taller que cuando se realizan en la obra.

Estudio de la vibración en cada caso.

Cada pieza a construir de hormigón vibrado es un caso particular, por lo que deben estudiarse las posibilidades, rendimientos, etc., correspondientes, con objeto de que no haya entorpecimiento en el momento de la construcción.

Dicho estudio depende de las circunstancias específicas de cada obra, característica del hormigón, vibradores de que se dispone, etc. Por esta razón, no se pueden dar normas concretas para realizar tales estudios. En general, es aconsejable hacer algún ensayo utilizando hormigón de las mismas características que el que se ha de emplear en la construcción. También conviene aplicar los mismos vibradores, dispuestos de la manera más parecida posible a la que se adoptará en la obra.

A título de ejemplo, supongamos que se trata de

una solera de 30 cm. de espesor. La anchura son 3 m. y han de terminarse 150 m. lineales al día, por razón del plazo de construcción impuesto.

Se construirá vertiendo primero una capa de 20 centímetros, con la que se vibrará con aparatos del tipo "inmersión". Se verifican pruebas y se llega a la conclusión de que los vibradores de que se dispone actúan de modo eficaz, en cilindros de 30 cm. de radio, en un tiempo de un minuto.

Se puede prever, para estar en el lado de la seguridad, que se situará el vibrador en puntos distantes 50 cm. entre sí, y se mantendrá el vibrador en cada posición minuto y medio. En cada banda (perpendicular al eje de la pista) hará falta introducir el vibrador:

$$\frac{3 \text{ m.}}{0,5 \text{ m.}} = 6 \text{ veces}$$

A razón de minuto y medio, son nueve minutos (diez, para redondear) lo que se tarda en vibrar cada banda de 0,50 m. de anchura (0,25 m. a cada lado del vibrador). Por lo tanto, cada hora avanzará 3 m., y en la jornada de ocho horas, 24 m. de pista, aproximadamente. Se precisan, pues, seis vibradores de inmersión en funcionamiento, más otro como reserva. A la parte superior de la solera, de 10 cm. de espesor, se aplicará la vibración superficial mediante una viga vibrante que cubra toda la anchura (3 m.) de la pista, en una zona de 0,20 m. Los tanteos precisos indican que debe permanecer dos minutos en cada posición.

El avance será de treinta veces 0,20 m. por minuto, o sean 6 m. En la jornada de ocho horas, el avance será de 48 m. Por lo tanto, deben preverse tres vigas vibrantes funcionando permanentemente, más una como repuesto.

Otro ejemplo. Se trata de una serie de pilares de 5 m. de altura, cuya sección es de $0,40 \times 0,50$ m. El acopio de hormigón es de 150 litros cada tres minutos. La vibración se ha de realizar con vibradores externos adosados al encofrado.

Una precaución aconsejable consiste en tener en cuenta que el encofrado de los pilares está más sujeto en su parte inferior que en el resto del pilar. Por razón de esta sujeción, se obtiene una vibración menos eficaz en esta parte inferior del pilar. Con objeto de que el hormigón quede suficientemente vibrado, ha de forzarse la vibración en esta parte inferior, colocando los soportes para vibrador más próximos, o bien sosteniendo la vibración durante un tiempo superior al correspondiente al resto del pilar.

Los vibradores deben situarse en los refuerzos del encofrado (como ya se indicó), por lo que es preciso que en tales refuerzos (que son los cuadros en el caso de pilares) se fijen las piezas metálicas, a las que se

sujetará el vibrador en el momento preciso que haya de actuar.

Supongamos que los cercos de refuerzo están distanciados entre sí 0,40 m. Cabría la posibilidad de colocar los vibradores en cercos alternados, pero sólo se tendría una vibración eficaz en las zonas situadas frente a los vibradores. Las partes de hormigón correspondientes a la altura de los cercos que no se vibrasen, seguramente quedarían poco vibradas.

Por esta razón se prevé vibrar todos los cercos. Se supone será suficiente vibrar durante un minuto. Esta hipótesis debe comprobarse mediante algún ensayo, como en todos los casos de estudio de planes de vibración. En los cercos inferiores ha de tenerse más tiempo vibrando, por la razón apuntada antes, de mayor sujeción del encofrado.

Siendo de 0,40 m. la separación entre cercos, en los 5 m. que tiene el pilar hay 12 cercos. El vibrador ha de cambiarse once veces de sitio. Si se cuenta un minuto para cambio de sitio, más otro minuto de actuación en cada cerco, llegamos a un tiempo de vibrado de veintitrés minutos. También hay que tener en cuenta que en los cercos inferiores hay que forzar el tiempo de vibración, que se prevé sea de dos minutos para el cerco inferior y de un minuto (siempre en exceso) para el segundo cerco. Esto eleva el tiempo preciso para vibrar el pilar, con un sólo aparato, a $23 + 2 + 1 = 26$ minutos.

Por razón de acopio de hormigón, el pilar (cuyo volumen es de $0,40 \times 0,50 \times 5,00 = 1,00 \text{ m.}^3$) necesita:

$$\frac{1.000 \text{ litros}}{150 \text{ litros por cada masa}} = 6,67 \approx 7 \text{ acopios}$$

de masa. Como cada masa tarda tres minutos, el pilar se llenará en veintiún minutos.

Como se tardaría veinticinco minutos en vibrar, resulta que el ritmo de la vibración con un solo aparato es insuficiente.

Procedería, pues, utilizar dos vibradores: uno de ellos en marcha, mientras que el otro se está desplazando de la situación inferior a aquel aparato que está funcionando al cerco inmediatamente superior. En este caso, siempre estaría funcionando uno de los vibradores.

Por lo tanto, en cada cerco el vibrador tendrá un promedio de tiempo, actuando, de

$$\frac{21 \text{ minutos}}{12 \text{ posiciones}} = 1,75 \text{ minutos en cada posición.}$$

Esta cifra es superior a la de un minuto en cada cerco que se consideró como tiempo mínimo, por lo que la solución de utilizar dos vibradores resulta correcta.