LA VIBRACIÓN EN EL HORMIGÓN

Técnica para lograr Calidad y Economía

Durante las últimas décadas, la tecnología del hormigón ha experimentado notables progresos que bien puede decirse han contribuido a revolucionar, en muchos aspectos, los dominios de la ingeniería estructural.

Entre esas innovaciones, el método de compactación mecánica por vibrado constituye un aporte de significativa importancia, cuyo uso tiende a difundirse cada vez más, a tal punto que hoy puede considerárselo como práctica normal en todo trabajo donde se requiere un hormigón de alta calidad.

Es un principio universalmente aceptado que, cuando más reducida es la relación agua – cemento del hormigón, mayores son su resistencia, durabilidad y cualidades conexas. Pero la reducción de la relación agua – cemento, mediante el único arbitrio de la disminución del contenido de agua, produce mezclas poco trabajables, de colocación difícil y costosa con los medios manuales comunes; y con el peligro, a veces también, que permanezcan en la masa del hormigón endurecido porosidades u oquedades que pueden afectar seriamente la resistencia total o parcial, y disminuir de modo considerable la durabilidad y la impermeabilidad de las estructuras.

Por tal causa, el uso de hormigones secos y consistentes en las estructuras armadas modernas, sólo pudo desarrollarse cuando se descubrió que el vibrado modificaba completamente las propiedades reológicas del hormigón fresco.

Aunque esta técnica ha sido establecida desde hace unos 20 años y diferentes equipos se han desarrollado desde entonces, la tecnología del hormigón ha ampliado continuamente el conocimiento del proceso y perfeccionado su uso, por lo que consideramos de utilidad hacer una somera revisión del vibrado en el hormigón, dada la importancia y generalización que cobra en la actualidad su aplicación, en todas las estructuras de hormigón simple, armado y pretensado y, especialmente, en la prefabricación.

Naturaleza y efectos del vibrado

Este método de colocación consiste en someter el hormigón a rápidas vibraciones (del orden de 50 o más impulsos por segundo) por medio de aparatos especialmente diseñados al efecto.

Bajo la acción de estos últimos, el hormigón fresco fluye como un líquido espeso y se extiende dentro de los moldes, mientras el exceso de aire escapa rápidamente a la superficie en forma de abundantes burbujas. Tan pronto como cesa la vibración, la mezcla recupera su rigidez inicial.

Ese cambio de consistencia se debe al hecho de que el movimiento vibratorio, al comunicarse a las partículas sólidas contenidas en el hormigón, neutraliza o aminora el frotamiento entre las mismas, permitiendo que la mezcla se asiente y compacte por simple acción de la gravedad.

En tales condiciones, un hormigón seco o de escasa consistencia se comporta como si fuera plástico o semi – fluido, lo que permite colocarlo fácilmente en estructuras donde esa operación resultaría impracticable o muy trabajosa, por el método corriente de apisonado manual.

El vibrado no sólo facilita la colocación de mezclas más consistentes, sino también más ásperas –esto es: con mayor proporción de agregado grueso, y menor agregado fino- que en los hormigones apisonados comunes. Estos últimos contienen, por lo general, un exceso de mortero que responde a la necesidad de aumentar la trabajabilidad y propiedades cohesivas de la mezcla.

Se puede lograr así, como se verá más adelante, una mejora sustancial en la calidad del hormigón o, viceversa, a igualdad de resistencia una disminución en el contenido de cemento, dado que una reducción en el porcentaje de arena de la mezcla, reduce también el contenido de agua. Este, a su vez, es el que influye en la relación agua – cemento. Según lo dicho, mediante el vibrado puede mejorarse la calidad o la economía del hormigón; usando mezclas ya sea de mayor consistencia o más ásperas.

Ventajas del vibrado

De acuerdo con lo expuesto, con el uso de la vibración se pueden colocar mezclas con menor contenido de agua [1] que las compactadas manualmente. Así, mediante el empleo de mezclas más consistentes y más ásperas, el vibrado permite una mejora substancial de la calidad del hormigón, sin aumentar la proporción de cemento, o bien una economía de este último para calidades equivalentes.

Las ventajas cualitativas que derivan de la reducción del contenido de agua son bien conocidas y pueden resumirse en los siguientes puntos:

1. Mayor resistencia mecánica

[1] Cantidad de agua por unidad de volumen de mezcla compactada

2. Mayor impermeabilidad

3. Mayor durabilidad y resistencia a los agentes agresivos

4. Mejor adherencia entre el hormigón y las armaduras, como así también entre capas sucesivas.

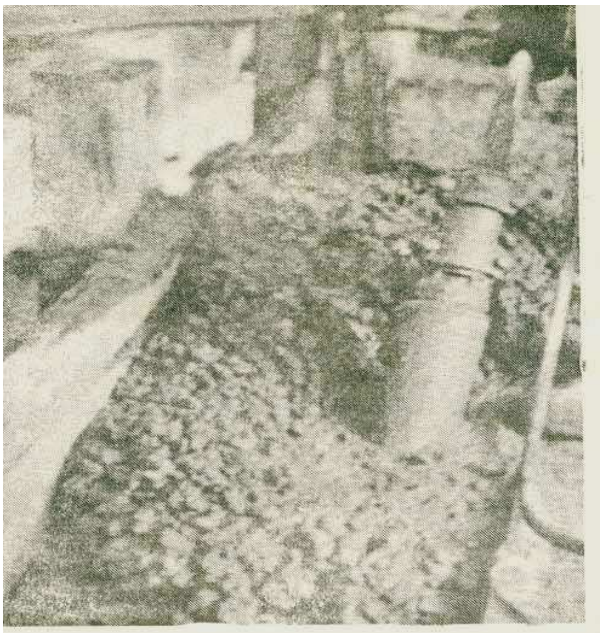
5. Menores cambios volumétricos

6. Menor tendencia a la segregación o exudación del agua ("bleeding")

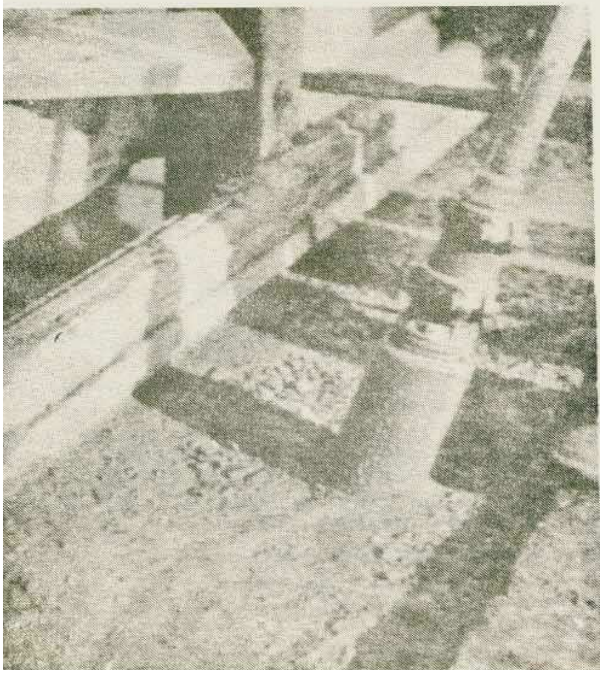
El vibrado asegura, por otra parte, una mayor homogeneidad del hormigón, evitando o reduciendo a un mínimo la formación de huecos o "nidos de abeja" - tan comunes en los hormigones apisonados -, y los retoques superficiales.

Al mismo tiempo, proporciona una economía a veces considerables, de la mano de obra empleada en la colocación, sobre todo cuando se trata de estructuras complicadas y con gran concentración de armadura.

Otra característica ventajosa del hormigón vibrado es que permite usar hormigones de consistencia tan seca, de tan elevada rigidez inicial, que hace posible desmoldar las piezas inmediatamente después de compactadas, lo que reviste singular importancia en la fabricación de artículos premoldeados.



igs. 1 y 2 - Aspecto del hormigón antes y después de
ibrado. Nótese el cambio de consistencia obtenido por
efecto de la vibración.



Equipos vibradores y sus diferentes formas de aplicación

Distintos tipos de aparatos vibradores han sido diseñados para hacer frente a las condiciones de trabajo variables que plantea la aplicación de esta técnica.

Algunos de ellos actúan directamente sobre el hormigón a compactar, ya sea sumergidos en su masa (vibración interna) o bien apoyados en su superficie (vibración superficial). Otros lo hacen por intermedio de los moldes o encofrados (vibración indirecta).

El órgano pulsante consiste, generalmente, en un árbol giratorio vinculado a una masa excéntrica y alojado dentro de una envoltura hermética.

El accionamiento se efectúa mediante motor eléctrico, aire comprimido o motor a explosión, en cuyo caso la potencia es transmitida al aparato, a través de un eje flexible (trenza de acero en vaina espiralada). Existen también equipos vibradores del tipo alternativo, accionados por pulsación electromagnética, otros por aire comprimido (martillo neumático) y finalmente de tipo hidráulico.

Los vibradores internos tienen un amplio campo de aplicación y se los prefiere, en general – toda vez que la naturaleza del trabajo lo permita – por su mayor rendimiento y facilidad de operación. Los modelos más pesados y de mayor potencia (hasta 7 CV u 8 CV) se adaptan especialmente para trabajos de hormigón en masa, tales como presas, grandes fundaciones u obras similares. Tratándose de estructuras más complejas y armadas, como ser: losas, vigas, muros, pórticos, arcos, bóvedas, etc., se utilizan vibradores internos livianos, a eje flexible, que permite desplazarlos fácilmente y distribuir uniformemente su acción en toda la masa hormigonada.

Los vibradores superficiales se aplican especialmente a la ejecución de pavimentos. A esa clase de equipos pertenecen los llamados "de plataforma" y las "reglas" o "enrasadores vibrantes", utilizadas en la construcción de caminos y calles, las que, al mismo tiempo que compactan el hormigón, permiten conformar, y alisar su superficie. Estas últimas suelen ir incorporadas a las máquinas terminadoras mediante oportunas adaptaciones, con lo que se logra un alto grado de automaticidad.

El sistema de vibración indirecta, aunque menos eficaz que los anteriores, ya que una parte de la energía aplicada es absorbida por los moldes o encofrados, resulta sin embargo muy útil para la ejecución de ciertas estructuras, tales como muros delgados y columnas con gran concentración de armadura que imposibilita o torna difícil el empleo de vibradores internos. Se utiliza también en los revestimientos de túneles, conductos de desagües y otras estructuras similares. En esos casos se usan pequeñas unidades portátiles que se aseguran rígidamente a los encofrados mediante mordazas, cadenas u otros dispositivos.

La vibración indirecta tiene también una aplicación extensivas en la industria de elementos premoldeados. Generalmente se emplean "mesas vibradoras", montadas sobre resortes con excéntricas ajustables, encima de las cuales se

aseguran los moldes, procedimiento que mejor se adapta a las exigencias de la producción en serie.

La elección del equipo vibrador a aplicar en cada caso, está gobernada fundamentalmente por las condiciones de colocación. Los vibradores internos constituyen, como se ha dicho, la solución más eficaz para la mayor parte de los problemas que se plantean en las estructuras corrientes. En general, los equipos más potentes y con elemento vibrante de mayor diámetro son los más efectivos, pero esta última característica está limitada por el tamaño de las secciones a hormigonar y su densidad de armadura.

En muchos casos, una combinación adecuada de dos tipos de vibradores conduce a los resultados más satisfactorios. Así, por ejemplo, cuando se hormigonan muros y se desea una buena terminación de las caras vistas, los vibradores internos deben ser suplementados con vibradores de encofrado. Del mismo modo, en la ejecución de pavimentos, la acción de las reglas vibradoras ya mencionadas suele completarse con la aplicación de vibradores internos aplicados en proximidad de los moldes, donde interesa especialmente obtener un hormigón bien compactado.

Fig. 3 - Vibrador interno, accionado por motor a nafta con manguera flexible.

Efectos de la frecuencia y amplitud de la vibración

Experimentalmente ha podido comprobarse que la eficacia del vibrado – apreciada en función del tiempo que se requiere para consolidar un

determinado volumen de hormigón – aumenta sensiblemente con la frecuencia de la vibración y, en menor escala, con su amplitud.

No obstante, ninguno de esos dos factores determina por sí solo la eficacia del vibrado; esta última se relaciona más directamente con el valor de la aceleración máxima que, en el movimiento armónico simple, es proporcional, como se sabe, a la amplitud y al cuadrado de la frecuencia.

De acuerdo con ensayos efectuados por R.D. Davies [2], la eficacia del vibrado crece con la aceleración hasta, por lo menos, un valor de 20 g (g = aceleración de la gravedad), pero por encima de 12 g el ritmo de crecimiento es ya muy lento.

Para una amplitud determinada, existe una frecuencia mínima por debajo de la cual el vibrado resulta muy poco eficaz; dicha frecuencia mínima varía con las características y especialmente con la consistencia de la mezcla sometida a vibrado; pero para las condiciones más corrientes, ese valor puede fijarse en 3.000 impulsos por minuto.

Desde un principio, la fabricación de equipos vibradores se ha desarrollado en el sentido de alcanzar mayores frecuencias, dentro de las limitaciones prácticas impuestas por las severas condiciones de servicio a que están sometidos los órganos mecánicos de dichos aparatos.

La mayor parte de los vibradores actualmente en uso desarrollan frecuencias comprendidas entre 3.600 impulsos por minuto y 9.000 impulsos por minuto, con amplitudes variables según sea su aplicación. Algunos tipos especiales pueden alcanzar "altas frecuencias", hasta de 30.000 vibraciones por minuto.

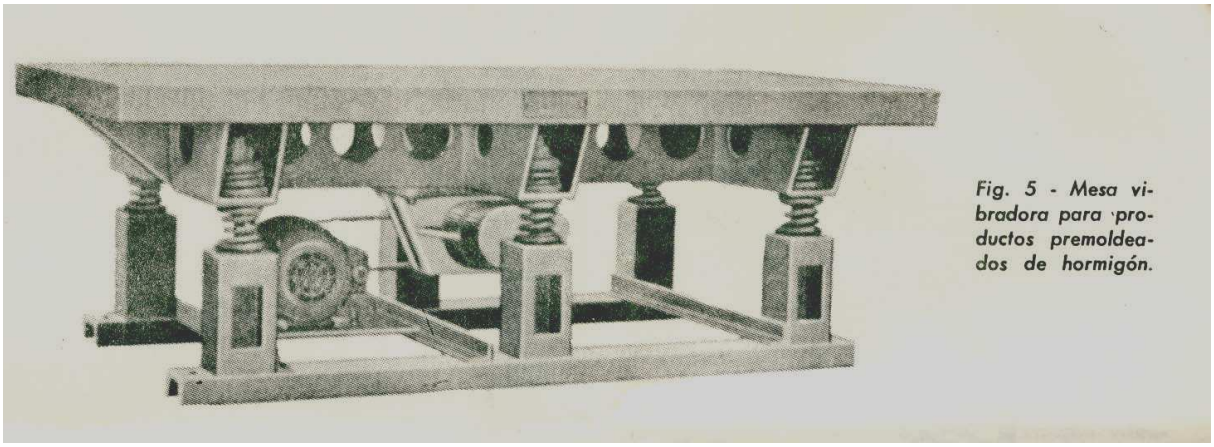


Fig. 5 - Mesa vibradora para productos premoldeados de hormigón.

[2] R.D. Davies, "Some experiments on the compaction of concrete by vibration". Magazine of Concrete Research (Londres)3. 71-78 (Diciembre 1951, Nº 8)

Las características de la vibración no sólo influyen sobre la rapidez de consolidación, sino también sobre su radio de acción. Estudios de laboratorio realizados por Sven G. Bergstrom [3] demuestran que este último crece – tendiendo a un valor límite – con la aceleración efectiva impresa a la mezcla, en proximidad del vibrador. Pero si los resultados experimentales se relacionan con las características propias del vibrador, el factor determinante parecería ser la velocidad, más bien que la aceleración.

Características de las mezclas para el vibrado

Para que el vibrado proporcione sus máximos beneficios, la consistencia del hormigón debe ser seca o ligeramente plástica. si la plasticidad es excesiva, el vibrado no proporciona ningún efecto apreciable de consolidación y, en vez de mejorar la calidad del hormigón, puede producir su segregación. En términos generales, no deben vibrarse hormigones cuya consistencia, medida por el asentamiento del cono de Abrams , exceda de 10 cm.

La reducción de los valores de la consistencia depende fundamentalmente de la naturaleza de la estructura y de la efectividad del vibrado. Seguidamente se indican los asentamientos recomendables, para distintas clases de obras, cuando se utilizan equipos vibradores adecuados y se opera correctamente:

Pavimentos, obras de hormigón en masa, artículos premoldeados	2,5 cm o menos
Puentes, muros de contención, columnas de gran sección	2,5 cm a 5 cm
Elementos estructurales en general	5 cm a 7,5 cm
Muros delgados con fuerte armadura	7,5 cm a 10 cm

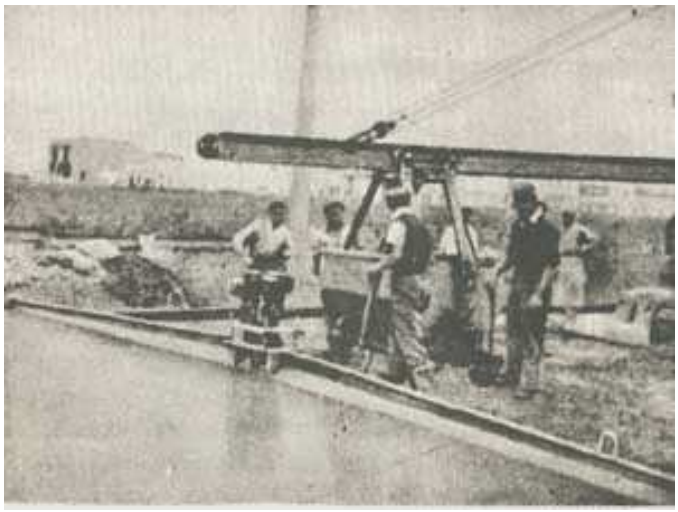
La reducción de consistencia, como se ha consignado, se puede obtener, fundamentalmente, disminuyendo el contenido de agua de la mezcla, lo que mejora la calidad, o aumentando los contenidos de agregados con respecto a los de cemento y agua (pasta constante), o sea logrando economía en la mezcla.

Dependiendo de la clase de mezcla y tipo de estructura, el aumento de resistencia que puede obtenerse con respecto a los hormigones compactados a mano puede variar desde un 20% a más del 50% para un mismo contenido de cemento.

[3] Sven G. Bergstrom, "Laboratory test on vibration of concrete", Proceedings American concrete Institute, 49 (1953) 893-908 (Junio 1953)

Como ya se ha dicho, el vibrado permite la colocación de mezclas más rígidas, y también más ásperas, que el apisonado manual. La relación de agregados gruesos a finos debe ser, pues, mayor que en este último caso.

Además, como es normativo en la dosificación de hormigones, se deberá tratar de usar el mayor tamaño máximo del agregado compatible con las secciones de la estructura, o de la separación entre barras de acero, pues, a medida que aumente dicho tamaño del agregado, a igualdad de otras condiciones, disminuye el contenido de agua y, por lo tanto, para una determinada relación agua – cemento, la mezcla requerirá menos cemento.



El empleo de granulometrías discontinuas – caracterizadas, como se sabe, por la ausencia total o parcial de algún tamaño de granos – también es posible cuando se emplea este método de colocación y resulta particularmente indicado en las obras de hormigón en masa. Dichas granulometrías permiten alcanzar resistencias superiores a las de los hormigones corrientes, a igualdad de contenido de cemento, debido a la reducción en la "interferencia" o acción de acuñamiento que provoca la omisión de tamaños intermedios.

La dosificación de mezclas para el vibrado debe hacerse, lo mismo que para el hormigón común, partiendo de la relación agua – cemento que satisfaga las condiciones de durabilidad y resistencia requeridas y calculando las proporciones restantes de acuerdo con el grado de trabajabilidad que se estime necesario o conveniente en cada caso. La dosificación conviene calcularla de acuerdo a los métodos racionales que se han desarrollado para el proyecto de las mezclas. En la obra se realizará el ajuste final de la mezcla de conformidad con las condiciones particulares y tipo de vibrador que se utilice.

Las proporciones de la mezcla deben ser tales que, bajo la acción del vibrado, adquiera la trabajabilidad necesaria y se consolide fácilmente, sin riesgo de

segregación. El límite de consistencia suele estar determinado, no solo por las condiciones de colocación, sino también por las del equipo de mezclado y transporte. Mezclas rígidas pueden aumentar excesivamente los costos de preparación y manipuleo del hormigón. La consistencia debe ser, pues, cuidadosamente ajustada para asegurar un justo equilibrio de los diversos factores característicos de arena (referido a la suma total de agregados) deberá ser el menor que produzca una mezcla que permita ser perfectamente colocada y compactada, libre de oquedades, nidos de abejas o segregación del material.

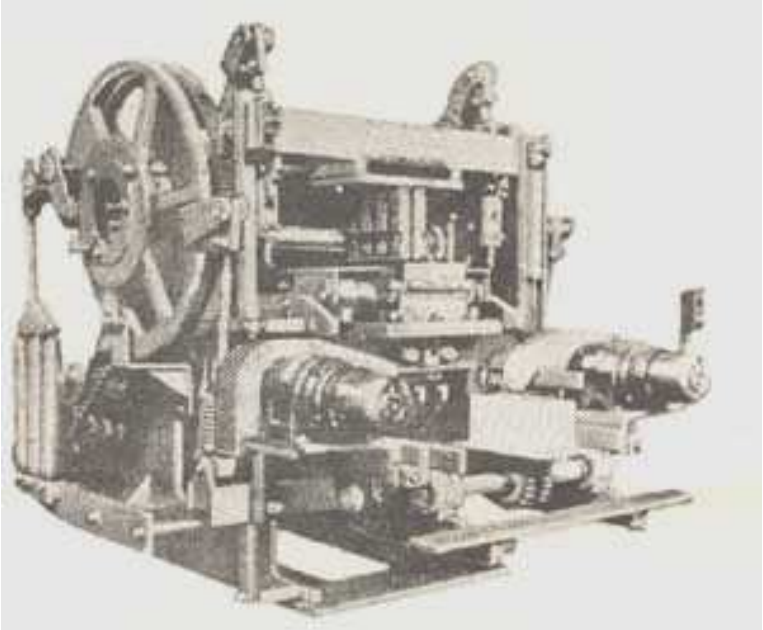


Fig. 7 - Bloquera automática, provista de dos vibradores, para la fabricación de bloques en gran escala.

Duración del vibrado

Para cada tipo de mezcla, existe un período óptimo de vibración, que proporciona una máxima resistencia del hormigón. Exceder ese período resulta prácticamente superfluo, pues, poco o nada agrega a dicha resistencia y puede en cambio producir la segregación de la mezcla. Cuanto menor es el contenido de agua, o también cuanto más baja es la relación agua – cemento, a igualdad de contenido de cemento, mayor es el trabajo y el tiempo que requiere su consolidación; al reducir ese factor, dentro de ciertos límites, la duración del vibrado puede incrementarse en un 300%, sin que el correlativo aumento de resistencia sobrepase de un 10%, lo que evidentemente resulta poco compensatorio.

Por otra parte, si la vibración es insuficiente, la reducción del agua del mezclado puede tener efectos más perjudiciales para la resistencia del hormigón que un exceso de aquélla.

El límite económico de duración del vibrado, en mezclas muy secas como suelen usarse en determinados productos de hormigón, puede fijarse en unos cinco minutos. El período normal de vibrado, para hormigones de consistencia media como los utilizados corrientemente en estructuras, oscila entre cinco y quince segundos.

En cualquier caso, la duración e intensidad del vibrado deben ser suficientes como para producir una completa consolidación de la mezcla, sin llegar a su segregación. La operación puede darse por terminada cuando la reducción del volumen de hormigón y el desprendimiento de burbujas cesan y en la línea de unión con el encofrado y las armaduras aparece una zona de "fusión pastosa" con el resto de la masa. En la superficie no debe verse más que un pequeño exceso de mortero, recubriendo ligeramente el agregado grueso, señal indicativa de que todos los huecos han sido llenados.

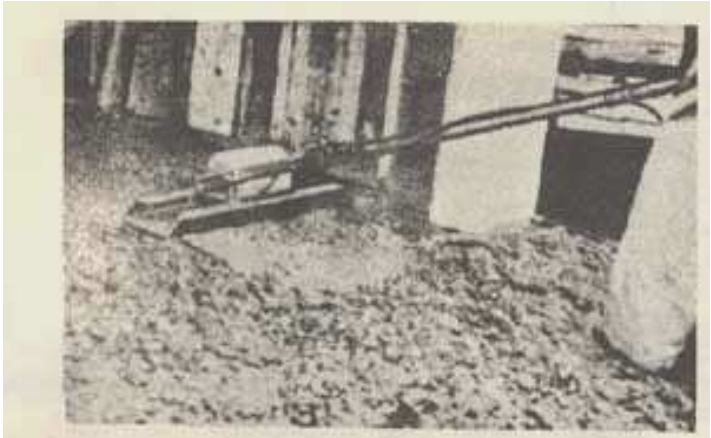


Fig. 8 - Fratás vibrador, de interesante y útil aplicaci en la construcción de pisos de hormigón.

Recomendaciones para la vibración del hormigón

En general, con pocas excepciones, la técnica de la vibración para la compactación y consolidación es, como se ha indicado, el que produce la superior calidad del hormigón, al mismo tiempo que la mayor economía en materiales y mano de obra. En la actualidad se recomienda su uso aún para las pequeñas obras, siendo prácticamente requisito indispensable su aplicación para todas las obras de hormigón medianas o grandes.

Aunque las condiciones de colocación pueden variar dentro de amplios márgenes, de acuerdo con las particularidades de cada obra, o trabajo, y de

los equipos vibradores utilizados, algunas reglas generales deben ser tenidas en cuenta si se desea obtener del vibrado resultados satisfactorios.

Tan esencial como el empleo de equipos adecuados y mezclas correctamente dimensionadas, es el control de las operaciones, el que sólo deber ser confiado a personas expertas.

El transporte del hormigón fresco hasta el lugar de colocación debe hacerse de manera que evite su segregación, pues el vibrado no puede corregirla.

El hormigón debe depositarse en capas de espesor; uniforme, no mayor de 30 cm ó 40 cm y cada capa debe ser vibrada antes de depositar la siguiente.

Cuando se emplean vibradores internos, debe introducírselos lentamente en la masa; al retirarlos, debe procederse también en la misma forma y sin suspender el funcionamiento. Si queda un hueco en el hormigón, es señal de que el vibrador se ha extraído demasiado bruscamente o antes de que el hormigón haya alcanzado su consolidación completa. Debe evitarse tratar de trasladar el hormigón mediante su vibrado dentro de los encofrados, pues provocará la segregación del mismo.

Los vibradores deben aplicarse en número proporcionado al ritmo de colocación del hormigón e insertarse a distancias suficientemente cortas como para que sus radios de acción se superpongan parcialmente. En términos generales, esa distancia no debe ser inferior a 0,60 m .

Es importante evitar un vibrado excesivo, especialmente cuando se trata de mezclas de mucha consistencia o deficiente dosificación, pues, como ya se ha dicho, esto puede provocar su segregación. En cualquier caso, la vibración no debe continuarse en ningún punto donde empiece a separarse del agregado grueso. Especial precaución debe tenerse, a este respecto, cuando se terminan superficies que han de quedar expuestas a las acciones atmosféricas y al desgaste. En estos casos, es aconsejable que la última capa se coloque tan delgada como sea posible, intensificando al mismo tiempo el vibrado.

La acción del vibrado incrementa sensiblemente las presiones del hormigón sobre los encofrados. Debido al proceso de fluidificación, esas presiones llegan a ser equivalentes a las de un líquido de peso unitario igual a la del hormigón vibrado, cuyo valor suele alcanzar a 2.400 kg/m^2 ó 2.500 kg/m^3. Además, hay un efecto de impacto cuyo valor es particularmente sensible cuando se utilizan vibradores aplicados a los encofrados. Dichas acciones deben ser tenidas en cuenta, al proyectar estos últimos.

La existencia de huecos o "nidos de abeja" en el hormigón vibrado es un signo indicativo de que la mezcla contiene demasiado poco mortero, o bien que el vibrado ha sido insuficiente o mal distribuido.

Efecto de la vibración sobre el hormigón con aire incorporado

La incorporación controlada de aire en el hormigón, es un procedimiento usado frecuentemente en la ejecución de pavimentos y otras estructuras sometidas a severas condiciones climáticas o a la acción de agentes agresivos.

Teniendo en cuenta las crecientes aplicaciones de esa técnica, interesa establecer en que forma y medida puede el vibrado afectar su eficacia.

Ensayos de laboratorio realizados al respecto demuestran que la vibración de hormigones con aire incorporado elimina una parte de este último, conjuntamente con el aire ocluido. Dicha pérdida es tanto mayor cuanto mayor es la duración del vibrado y la frecuencia del mismo; crece rápidamente durante los primeros segundos, disminuyendo luego su ritmo y puede llegar a ser casi total, si el vibrado se prolonga excesivamente. Esta influencia es efectiva cuando la frecuencia es mayor de 7.000 impulsos por minuto.

A igualdad de otras circunstancias, los porcentajes finales de aire retenido guardan estrecha relación con los inicialmente incorporados, pero la pérdida es tanto más rápida cuanto menor es la consistencia del hormigón. Independientemente de este último factor, el porcentaje de aire retenido por mezclas de distinta consistencia es prácticamente el mismo, después de cierto tiempo de vibrado, si se les adiciona igual cantidad de agente incorporador. Esto se debe al hecho de que las mezclas más plásticas, absorben un mayor porcentaje de aire inicial, aunque luego lo pierden más rápidamente por efecto del vibrado.

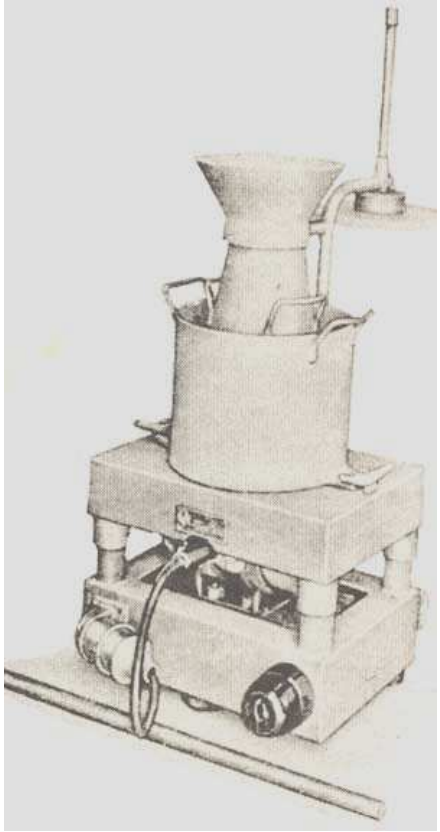
También influyen sobre la pérdida de aire incorporado las condiciones de confinamiento del hormigón sometido a ensayo, pudiendo observarse que, cuando las dimensiones de los moldes son muy reducidas dicho efecto se acentúa sensiblemente.

Los resultados experimentales a que se ha hecho referencia, aunque ponen de relieve los efectos de una vibración excesiva, implican en realidad condiciones extremas muy distintas de las que se presentan corrientemente en la práctica.

Las experiencias directas efectuadas durante la colocación de estos hormigones en obra demuestran, en efecto, que el peligro de "sobre – vibrado" y la consiguiente reducción del aire incorporado es, en la mayor parte de los casos, reducido, especialmente cuando se trata de estructuras no contenidas en moldes estrechos.

No obstante, cuando el vibrado excede de lo normal, o los efectos de al vibración se intensifican por las condiciones de confinamiento ya aludidas, las pérdidas pueden alcanzar valores no despreciables. En tales casos, a fin de

asegurar el contenido final de aire especificado, es aconsejable prever un cierto margen de reducción, incrementando correlativamente el porcentaje de aire inicial en la mezcla.



Hormigones de alta resistencia

La tendencia moderna para el cálculo de estructuras es ir aumentando las tensiones admisibles, las cuales para ser satisfechas, requieren hormigones de alta calidad. Ello también lo exigen las estructuras prefabricadas, para lograr liviandad y resistencia; y el advenimiento del hormigón pretensado ha creado nuevas e imperiosas exigencias en lo que se refiere a la calidad de este material. El vibrado constituye un valioso auxiliar para la obtención de tales hormigones que, como se sabe, requieren resistencias muy elevadas (más de 500 kg/cm^2 medida en cilindros a los 28 días) y, al mismo tiempo, una gran trabajabilidad y compacidad capaz de asegurar una adherencia satisfactoria con las armaduras pretensionadas.

En algunos casos, para complementar el efecto del vibrado, la mezcla es sometida a una compresión. Esto puede efectuarse ya sea aplicando una cierta carga en su superficie o bien una placa vibrante. Por tal medio se obtiene una

reducción de volumen adicional, lo que se traduce en una mayor compacidad y una resistencia más elevada del hormigón.

Algunos procesos patentados comprenden un vibrado previo del hormigón, antes de su colocación en los moldes, después de lo cual se lo vuelve a vibrar y finalmente se lo comprime en la forma antes aludida.

Este procedimiento, generalmente empleado en la fabricación de productos premoldeados, hace posible la utilización de mezclas extraordinariamente secas, obteniéndose excelentes resultados. Así, con un hormigón de 300 kg/m^3 de cemento y relación agua – cemento igual a 0,33, han podido alcanzarse resistencias cilíndricas a la compresión del orden de 500 kg/cm^2a los 7 días y de unos 650 kg /cm^2 a los 38 días [4].

En resumen, el método de colocación mecánica por vibrado proporciona ventajas de orden cualitativo y económico que lo señalan como uno de los más importantes avances introducidos en la técnica del hormigón.

[4] Y. Guyon. Béton Précontraint, Paris, Eyrolles, 1951, Pág. 95