

HORMIGÓN VIBRADO

Por GABRIEL BARCELÓ, Ingeniero de Caminos.

Hace el autor un análisis completo del proceso de vibración del hormigón, merced al cual puede llegarse a una extraordinaria compacidad y reducir al mínimo la cantidad de agua para el amasado, con las ventajas que ello trae consigo y eliminando los inconvenientes, gracias a la vibración.

Parece ser que la vibración del hormigón fué descubierta por casualidad: primero, intuída por Rabut y luego, eficazmente llevada a la práctica por Freyssinet, el cual buscaba en 1917 un medio cómodo y eficaz para hormigonar una cubierta fuertemente armada. Entró por casualidad en un taller de la Sociedad Ingersoll, en el momento en que se hacía el ensayo de un vibrador de fundición. Había encontrado lo que buscaba.

Para consolidar el hormigón, utilizó, en un principio, martillos neumáticos corrientes, aplicándolos, primero, a los extremos libres de las armaduras y, posteriormente, a los encofrados. Aunque con ello se mejoraba la calidad del hormigón, a pesar de su débil frecuencia, pronto se emplearon aparatos especialmente contruidos para el vibrado del hormigón, siendo los primeros neumáticos. Ya en el Congreso de Hormigón Armado de Lieja, de 1930, dijo Freyssinet que utilizaba vibradores en todas sus obras.

Hoy día es corriente el empleo de la vibración, y se está difundiendo extraordinariamente en gran cantidad de industrias de elaboración y manipulación. En la de la construcción, ocupará un papel cada día más preponderante, dada la actual evolución hacia formas más ligeras y de mejor calidad. Cuando se trata de obtener hormigón de alta calidad, el empleo de la vibración es insustituible, máxime si no se dispone de cemento especial.

La consolidación del hormigón se produce en virtud de la acción de la gravedad, la cual se encuentra dificultada por los rozamientos mutuos de los elementos componentes. La vibración actúa sobre el hormigón, aplicando a los elementos o granos fuerzas de inercia variable. Generalmente, el contacto entre dos elementos no tendrá lugar en la línea de sus centros, y dichas fuerzas producirán movimientos complejos que podrán tener lugar en todas direcciones; por tanto, los granos se desplazarán y girarán sin cesar, a pesar de la resistencia de su medio.

En resumen, la vibración separará entre sí, durante un pequeño tiempo, los granos, disminuyendo los rozamientos internos de los elementos del hormigón, los cuales, sometidos constantemente a la acción de la gravedad, se asientan o consolidan eficazmente, deslizando los unos sobre los otros en la pasta de cemen-

to, y tomando posiciones más estables. Es evidente que en esta nueva posición de equilibrio los huecos quedan sumamente disminuidos, y se obtiene un hormigón de mayor compacidad.

Esta imagen física de la vibración hace evidente sus beneficiosos efectos y ventajas, los cuales se conocen bastante perfectamente; sin embargo, las leyes que rigen el fenómeno, que son harto complejas, no han sido fijadas todavía, a pesar de los esfuerzos realizados en este sentido.

Entre las experiencias llevadas a cabo con dicho objeto, destacan las realizadas por el Bureau Veritas, y publicadas por su director adjunto, L'Hermite.

Se utilizaron arenas tamizadas contenidas en vasos cilíndricos de palastro, en cuya parte inferior se fijan los vibradores; la medida de la vibración la da el aumento de compacidad. Se obtuvieron curvas dando la compacidad en función del tiempo. Utilizando un vibrador determinado, la compacidad sigue una curva ascendente casi rectilínea, parándose bruscamente al llegar a un cierto valor C_1 ; continuando la vibración, la compacidad oscila alrededor de C_1 . En la primera etapa, los granos giran sobre su posición y se agitan con poca amplitud, obteniéndose un asentamiento eficaz; pero alcanzada C_1 , la mezcla se remueve en su conjunto, produciéndose corrientes de régimen, al parecer, continuo. Esto es debido a que, al principio de la vibración, los rozamientos a vencer absorben enteramente la energía suministrada por el vibrador; pero a partir del momento en que esto no tiene lugar, dicha energía suministrada se gasta en producir un batido del conjunto, que destruye el equilibrio conseguido anteriormente, el cual se restablece de nuevo, y así sucesivamente. Utilizando entonces un vibrador de mayor frecuencia, se observa un aumento de compacidad hasta C_2 , seguida de una oscilación alrededor de C_2 .

Ensayos hechos sobre hormigones han dado resultados semejantes. La conclusión que se deduce es que, para un determinado vibrador, existe una compacidad óptima, y que hay que evitar a toda costa las corrientes interiores indicadas, que pueden producir la segregación del hormigón. Si es posible, no debe permanecer constante la frecuencia de la vibración, sino crecer con el tiempo.

Pero para comprender mejor el fenómeno de la vibración, de por sí tan complejo, es necesario recordar la teoría de Freyssinet sobre la constitución del hormigón. Ya en 1926 descubrió los fenómenos de deformación lenta del hormigón sometido a carga, siendo el primer eslabón de una cadena de investigaciones y estudios, que la ha conducido a concebir su famosa teoría, que publicó primeramente en las Memorias de la Asociación Internacional de Puentes y Estructuras, en 1936, y desarrolló luego en su obra *Una revolución en la técnica del hormigón*, completada más recientemente en conferencias y artículos de revistas. Vamos a indicar someramente algunos puntos de tan interesante teoría.

Al empezar el fraguado de un hormigón, el cemento, que es algo soluble, se disuelve en presencia del agua; lo que significa que una cierta cantidad de moléculas de las sales constituyentes del cemento, silicatos o aluminatos, se disocian electrolíticamente y, como resultado de esta descomposición, aparecen iones

(naturalmente móviles) en el líquido; esto es: átomos o grupos atómicos cargados de electricidad. Sabemos que la molécula de agua, en conjunto, es neutra, constituyendo un dipolo, ya que en la unión del H y O para formar H_2O , los dos electrones de los átomos de H se aproximan al átomo de O y completan su carga electrónica externa; por eso en la parte de la molécula donde está el O se origina un exceso de electricidad negativa, y en la parte en que se hallan los núcleos de H, un exceso de carga positiva. Al llegar al agua un ion positivo de sal anhidra del cemento, todas las moléculas de agua de su alrededor dirigirán al ion positivo las cargas negativas del dipolo y le envolverán en un apretado círculo. Este fenómeno de envolvimiento de un ion por moléculas de agua orientadas es la hidratación. Análogamente ocurre al entrar moléculas de agua en pequeña cantidad en un cristal sólido, el cual no se disuelve, pero absorbe el agua, formándose los hidratos correspondientes.

La teoría de Freyssinet se basa en la hipótesis de Lechatelier sobre el fraguado del cemento, el cual, parece ser, es debido a que la solubilidad de los hidratos que se forman es menor que la de los anhídros. Así, pues, los iones que se producen por disolución de las moléculas anhídras del cemento en el agua se cristalizan en forma de hidratos sólidos y estables. El fraguado se produce, por tanto, porque dichos iones hacen perder la movilidad de las moléculas de agua de su alrededor y forman con ellas verdaderas asociaciones o edificios moleculares que son verdaderos gérmenes de hidratos.

Estos gérmenes o cristales embrionarios no son estables más que cuando la riqueza en iones, o concentración del medio, sobrepasa un cierto mínimo. Los gérmenes siguen aumentando por la anexión de nuevos iones puestos a su alcance por el movimiento molecular. Además, si gérmenes sólidos ya formados entran en contacto, debido a la tendencia a reducir al mínimo la energía superficial del sistema, su asociación es más estable que cada una de ellas, y se mantendrá si la concentración está por debajo del mínimo necesario para la formación de un germen aislado. Así, pues, el medio llegará a ser impropio para la formación de nuevos gérmenes, y los ya formados seguirán creciendo por las nuevas anexiones, obteniéndose, en definitiva, un número limitado de asociaciones. Cada germen impide, en un radio determinado, la formación de nuevos gérmenes o se anexiona a los que hayan podido formarse por un aumento casual y local de la concentración.

En resumen: el fraguado del cemento comprende tres fases: período de disolución, período de formación de gérmenes de hidratos y período de agrandamiento de dichos gérmenes por aporte de nuevos iones, gracias al mecanismo de la difusión.

Los gérmenes o asociaciones de hidratos, al se-



Pervibrador en acción, en la ejecución de un macizo de cimentación de hormigón en masa.

guir creciendo progresivamente, llegan en un momento dado a poner sus capas superficiales en contacto entre sí o con la de los cuerpos preexistentes. En los puntos de contacto existen zonas con moléculas que, con relación a cada uno de los sistemas, están en su esfera de atracción; estas moléculas, realizando la soldadura de los corpúsculos, determinan el fraguado del cemento. Por tanto, el relleno total de los intersticios entre corpúsculos no es posible; aparte que la forma límite de los corpúsculos estará determinada por las disponibilidades en elementos moleculares solidificables.

Suponiendo un volumen unidad de hormigón, existirá: un volumen A , no ocupado por árido ni cemento, y que suponemos ocupado por agua, y un volumen V de sal soluble. Después de un tiempo dado, un cierto volumen V_1 de anhidro habrá sido transformado en un volumen KV_1 de hidratos, dentro de un espacio $A + V_1$. Podemos tener una imagen grosera del fenómeno, imaginando globitos inflados por un volumen de líquido KV_1 encerrados en un espacio $A + V_1$. Como KV_1 es menor que $A + V_1$, las superficies de contacto serán más o menos grandes, pero siempre subsistirán vacíos, tanto mayores cuanto KV_1 sea más pequeño.

Los cristales aumentan por el exterior gracias a aportes provocados por la agitación incoherente de las moléculas de la disolución. En realidad no hay superficies de contacto definidas, sino superficies irregulares y llenas de lagunas, separadas por zonas permeables a las moléculas, que constituyen un verdadero sistema circulatorio que recuerda al de los seres vivos. Estas zonas, que Freyssinet llama de soldadura, permiten, por su asentamiento o apisonado y por su interpenetración, deformaciones tanto mayores cuanto menos densas sean, y determinan las particularidades de las leyes de deformación de los hormigones, tan alejados de la simplicidad de la deformación elástica de los aceros.

Esto es debido a que la solidificación de los cementos (y otros cuerpos formados por análogo proceso) resulta de agrupaciones moleculares, implicando desplazamientos de elementos materiales a través de un medio líquido en una red de intersticios, cuyo relleno, cada vez más lento, no se acaba nunca por un mecanismo análogo al del crecimiento de los tejidos orgánicos. Resulta, por tanto, que estos cuerpos, que Freyssinet llama pseudosólidos, no pueden obtenerse en estado compacto, sino que están formados por un esqueleto y una red de canículos o intersticios de pequeñas dimensiones, rellenos de aire o agua y en contacto con el exterior. Las propiedades mecánicas de estos cuerpos dependen de las propiedades geométricas y elásticas de sus microscópicos intersticios, inaccesibles a las observaciones ópticas.

En resumen: la solidez y deformabilidad de un

hormigón dependen de la perfección del relleno de los vacíos entre los granos inertes o zonas de soldadura; es, pues, función de la relación del volumen de los huecos conteniendo el agua a la cantidad de cemento que puede entrar en disolución. Esto se expresa corrientemente, diciendo que la resistencia crece con la relación $\frac{C}{A}$. Esta ley es verdadera si el volumen

del agua es igual al volumen de los huecos, aunque el agua actúa como elemento químico y en la ley no interviene más que como medida de una relación de volúmenes, hecho puramente geométrico. C indica el volumen de los hidratos disponibles para rellenar el volumen de los huecos, lo que depende de la cantidad y cualidades del cemento. Sobre el volumen de huecos podemos actuar por la fabricación.

Por tanto, para obtener hormigón de alta calidad con un cemento corriente, hay que reducir al máximo los huecos a rellenar con hidratos. Naturalmente, la granulometría juega un papel importantísimo y hay que escoger los áridos cuidadosamente.



Pervibración del hormigón en una viga fuertemente armada.

Pero disponiendo de unos áridos determinados y con buena granulometría, para ordenarlos con el mínimo de huecos es necesario recurrir a la vibración. Es lo que groseramente se ha hecho siempre en el hormigón cuando se deseaba una mayor capacidad: golpear el encofrado, sacudir las armaduras, etc., medios que hacen someter a los granos a movimientos relativos.

La vibración propiamente dicha se produce cuando tienen lugar oscilaciones de frecuencia mayor a 3 000 por minuto. Actualmente se fabrican vibradores hasta de 22 000 g. p. m. Estos vibradores neumáticos, alternativos de alta frecuencia, tienen el grave inconveniente de su débil potencia, pues el diámetro del pistón no es más que de 15 mm., y el peso total del aparato, 0,7 Kg., lo que les hace insuficientes para piezas de dimensiones medias.

Los aparatos actuales eficaces tienen una frecuencia media de alrededor $n = 6\,000$ g. p. m. = 100 g. por segundo.

Con una semiamplitud del movimiento vibratorio de $a = 0,5$ mm., y suponiendo la ecuación del movimiento:

$$x = a \sin 2 \pi n t,$$

la aceleración será:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = - a 4 \pi^2 n^2 \sin 2 \pi T,$$

cuyo máximo sería:

$$j_m = a 4 \pi^2 n^2 = 20 \pi^2 = 20 \times 9,85 \text{ u./s.}^2;$$

igual a 20 veces la de la gravedad. Es lo que, aproximadamente, se consigue con los aparatos actualmente en servicio. Ahora bien: según un teorema indicado recientemente (mayo 1943) por Freyssinet, "en medio viscoso, la dimensión límite inferior de los granos movilizables por una vibración es inversamente proporcional a su frecuencia y a la raíz cúbica de la velocidad máxima de los granos":

$$d = K \frac{1}{n \sqrt[3]{V_m}} = K \frac{1}{\sqrt[3]{a n}}.$$

Vemos, pues, que aumentando la frecuencia o, más exactamente, el producto $n \sqrt[3]{a n}$, ensanchamos el campo de acción del vibrador, movilizandolos elementos más finos del hormigón, que en otro caso quedan sustraídos a los beneficiosos efectos de la vibración, teniendo en cuenta, además, que las dichas finas partículas comprenden la parte más activa de la masa sobre la cual hay el mayor interés en actuar.

Para actuar sobre las pequeñísimas partículas del orden de los cristalículos de hidratos en formación, se-

ría preciso alcanzar una frecuencia $n = 10\,000$ g./s., hallándonos ya en el dominio de los ultrasonidos, lo cual es imposible alcanzar actualmente.

Para conseguir la máxima compacidad es necesario asociar a una vibración eficaz una compresión energética que, forzando a los corpúsculos a reducir sus separaciones, disminuya las zonas de soldadura, permitiendo expulsar la mayor cantidad de agua posible. Actualmente, en ciertas fábricas, Freyssinet obtiene, una hora después de terminar la consolidación del hormigón, resistencias de varios centenares de Kg./cm.², que se elevan en seguida hasta cerca de 1 000 kilogramos por centímetro cuadrado. Esto lo consigue sometiendo hormigones de granulometría conveniente a una vibración extremadamente enérgica, e inmediatamente a una elevada compresión, hasta de 250 kilogramos por centímetro cuadrado, teniendo cuidado de permitir la libre evacuación del agua, de tal manera que la presión se ejerza sobre los elementos sólidos y no sobre el líquido.

Los efectos capilares del agua contenida entre los granos, si no moja completamente el hormigón, constituye una fuerza de "apretado" que ejerce sobre los granos sollicitaciones que equivalen a una presión exterior proporcional a la tensión capilar del agua y a las dimensiones de los intersticios entre los granos. A este respecto es interesante la experiencia de L'Hermite. Batiendo basalto molido con agua pura, la mezcla fué sometida a una presión de 2 500 Kg./cm.², presión repetida algunos millones de veces a razón de 500 vibraciones por minuto, obteniéndose piezas de consistencia esquistosa, cuya resistencia era de 420 kilogramos por centímetro cuadrado. Freyssinet cree que pueden obtenerse resultados del mismo orden con presiones mucho menores, combinadas con vibraciones de frecuencia mucho más elevada.

Esta técnica puede aplicarse al hormigón, realizando por medio de tensiones capilares interiores fuerzas de atracción bastante considerables para conferir al hormigón, desde que termina la vibración, resistencias importantes, aparte de todo fenómeno de fraguado. Para esto es necesario que la dosificación del agua sea regulada con extraordinaria precisión.

En resumen: es del mayor interés disminuir lo más posible el volumen de huecos a rellenar por los hidratos. Si este volumen es reducido, la cantidad de cemento a emplear será pequeña y los hormigones correspondientes tendrán una excelente estabilidad química por el pequeño volumen de sus cuerpos activos y su gran impermeabilidad. Tendrán mínima retracción y deformación lenta bajo carga, y su resistencia y propiedades mecánicas serán análogas a las de los áridos que los constituyen casi exclusivamente.

La combinación de la vibración y compresión es sólo posible actualmente en piezas premoldeadas en taller, las cuales, ejecutadas con tensiones previas,

tienen en un porvenir próximo un gran campo de acción.

Hoy día en la mayoría de las obras no es posible, para mejorar el hormigón, más que someterlo a una vibración eficaz, además, naturalmente, de escoger una granulometría adecuada.

La vibración eficaz actual, de una frecuencia de unos 6.000 g./m., mejora ya notablemente el hormigón respecto al hormigón corriente, obteniendo materiales con pequeña relación A/c , gran compacidad y, por tanto, gran resistencia y mayor rapidez de endurecimiento. Pero, sobre todo, se consigue con esta práctica una homogeneidad, en el hormigón, imposible de alcanzar con el apisonado a mano, en el cual la resistencia y demás cualidades del hormigón están completamente al arbitrio del obrero que efectúa la operación. El aumento de compacidad se manifiesta por una mayor densidad (2,5 a 2,6, en lugar de 2,35 a 2,4).

Para conseguir un buen hormigón vibrado, es necesario que la fluidez del hormigón sea tal, antes de la vibración, que toda el agua contenida quede retenida por capilaridad en la superficie de los áridos y del cemento. La vibración, aplicando a los granos fuerza de inercia variable, hace que éstos se desplacen y giren sin cesar, liberando el agua de amasado de su estado de capilaridad. Dicha agua, al unirse con la arena fina y el cemento, forma una pasta que conviene posea un peso específico elevado. Esta pasta aglomerante es una especie de cola activa que pega los cuerpos inertes del hormigón. Se comprende que cuanto menor sea la cantidad de agua que contenga la pasta, respecto a la cantidad de cemento, más espesa será y, por tanto, pegará más; claro que ello tendrá un límite.

Los áridos se ordenan y asientan lentamente en dicha pasta en virtud de la ley de gravedad; asentamiento moderado por la misma vibración, de modo que la masa del hormigón llega a ser lo más compacta posible. Los elementos más gruesos van hacia el fondo y sus huecos se rellenan con elementos más finos. Así, al contrario que en el apisonado corriente, durante la vibración el mortero asciende hacia la superficie del hormigón.

El hormigón, para ser vibrado, necesita, por tanto, contener suficiente cantidad de

parte fina para formar con el cemento y con el agua una pasta aglomerante de un peso específico suficiente y tal que garantice el asentamiento lento de los áridos, pues el éxito radica en escoger convenientemente la diferencia de los pesos específicos de la pasta y de los áridos. La densidad de las partes finas debe ser alrededor de 2,25, y la de la pasta que se forma, de 1,7 a 2 (según Bolomey, de 1,75 para 2,6 de fluidez, y 1,90 para fluidez de 1,7).

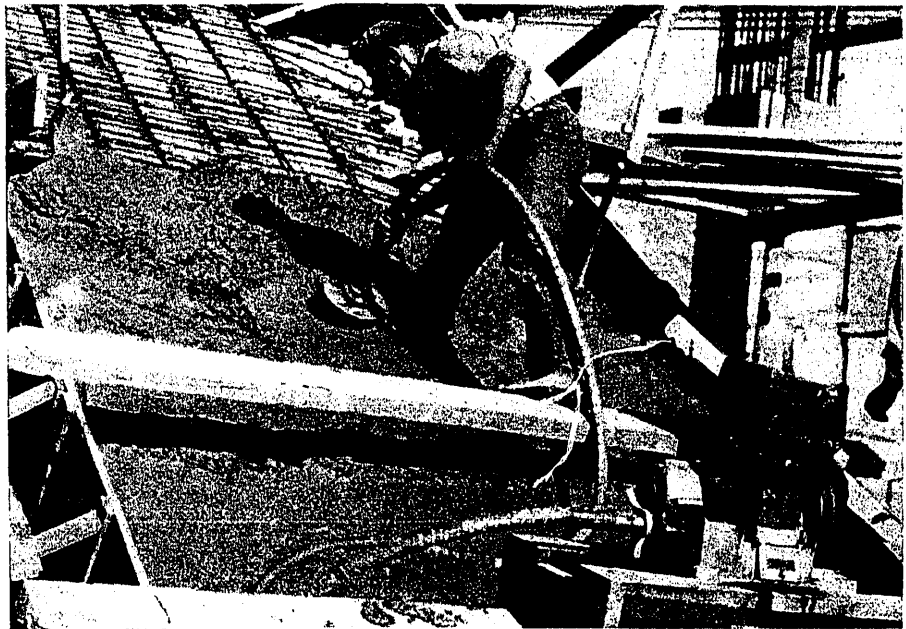
Siempre que exista el agua necesaria para cumplirse esta condición, es conveniente reducir ésta al mínimo. Según el ingeniero japonés Joschida, el agua contenida en el hormigón se divide:

1.º Agua combinada, absorbida por el cemento para hidratación (para ello el cemento necesita del 24 al 30 por 100 de su peso de agua).

2.º Agua semicombinada, para carbonatación; representa el 40 por 100 del peso del CO_2 absorbido por la cal libre.

3.º Agua libre, generalmente evaporada durante el endurecimiento.

El agua en exceso no combinada, y a veces necesaria para conseguir la adecuada puesta en obra o colocación del hormigón, es una de las causas de la imperfección de este material. Hay, pues, que eliminar este agua libre, a la cual se debe principalmente la retracción del hormigón. La vibración, por la aparente licuefacción que produce en el hormigón, tiene el mismo papel que un exceso de agua de amasado, sin tener sus graves inconvenientes.



Plato o latocha vibrante, ejecutando un forjado de hormigón armado con fuerte pendiente.

Nosotros hemos ejecutado hormigón armado vibrado con relación $A/C = 0,28$; esto es: con la indispensable para la hidratación del cemento, consiguiendo hormigones que, aunque tenían un *slump* prácticamente nulo en el cono de Abrams, su docilidad era perfecta tras un enérgico vibrado de unos dos minutos; su fraguado, normal y rápido, y su superficie, al desencofrar, casi perfecta.

En firmes de carreteras se han llegado a emplear hormigones con $A/C = 0,20$, o sea menor cantidad de agua que la necesaria para el fraguado normal. Creemos que no hay inconveniente en esta práctica en el caso citado, pues estamos convencidos de que el fraguado puede continuar durante cierto tiempo, más o menos largo, tomando el agua necesaria de la capa superficial húmeda durante el inevitable período de curado; por lo que la práctica de un curado eficaz es de vital importancia en estos casos. Pero aun en el caso de que, terminado el período de curado, quedasen sales activas del cemento sin actuar por falta de agua, pueden entrar en actividad durante un largo plazo tomando el hormigón la humedad necesaria de la lluvia o de la atmósfera por un proceso análogo al fraguado lento del hormigón amasado seco, en grandes masas y sumergido en agua, como ha confirmado la experiencia. Naturalmente que ello no es conveniente, pero indicamos aquí una posibilidad.

Confirmada esta tesis, ofrecería un vasto campo para la obtención de hormigones extremadamente compactos con los medios actuales. La cantidad de agua vendría indicada no por la necesaria al fragua-

do, sino por la imprescindible para conseguir una puesta en obra eficaz del hormigón. Este hormigón, al tener mínimas cantidades de agua, podría tener pequeñísimos volúmenes de huecos. Una vez colocado en obra, y mediante una capa de agua superficial, absorbería por procesos químicos la cantidad de agua necesaria para terminar su fraguado, el cual, una vez acabado, produciría un hormigón extremadamente compacto y resistente y con perfecta estabilidad físico-química.

El éxito y eficacia de la vibración es indiscutible. Con una granulometría cuidadosamente escogida, y tras una enérgica vibración, se consigue un hormigón con el mínimo de huecos. Con la vibración ya no es necesaria gran cantidad de agua para colocar en obra el hormigón, y puede ser reducida al mínimo posible y en cantidad inferior a la necesaria para el fraguado del cemento.

El único cuidado imprescindible a tener en cuenta para que el proceso del fraguado se complete es que el hormigón, al no ser posible que esté sumergido, estuviese parte de su superficie en contacto directo con el agua para producirse la necesaria absorción química. Habría que hacer experiencias para fijar el tiempo mínimo a tener húmedo el hormigón, para tener la seguridad de que se completase el proceso químico del fraguado.

Las fotografías adjuntas muestran varios detalles de la vibración del hormigón en una obra actualmente en ejecución por Constructora Internacional, S. A., en el Puerto de Málaga.