

# **influencia de la revibración sobre las propiedades de la pasta de cemento endurecida y de los hormigones**

**Prof. Ing. C. AVRAM, Dr. Ing. N. VOINA, Dr. Ing. O. MIRSU**  
**Instituto Politécnico de Timisoara - Rumania**

**Revue des Matériaux de Construction et de travaux publics, n.º 619, abril 1967, pág. 141**

## **1. consideraciones generales**

Este trabajo forma parte de una serie de estudios e investigaciones experimentales efectuadas desde 1962 en los laboratorios de la cátedra de Hormigón Armado del Instituto Politécnico de Timisoara y de la Sección de Materiales de Construcción de la Academia Rumana.

El trabajo se centra, desde el punto de vista teórico, en la aclaración de ciertos aspectos nuevos de la formación de la estructura de la pasta de cemento endurecida bajo la acción de la vibración repetida (revibración) durante el fraguado del cemento y, desde el punto de vista práctico, en la obtención de hormigones de gran resistencia y gran durabilidad junto con la reducción de las deformaciones bajo cargas de corta y larga duración.

La vibración del hormigón ha sido objeto de numerosos estudios, considerándose esta técnica como uno de los métodos de compactación más apreciados y extendidos, (8), (9) y (11). La vibración repetida es, por el contrario, menos conocida, aunque en los últimos decenios se hayan realizado ciertos ensayos y numerosos investigadores hayan expresado la opinión de que no se puede revibrar el hormigón durante el fraguado.

Las investigaciones efectuadas en los últimos tiempos, (1), (2), (6), (7), (10), (12) y (17), han demostrado que esta opinión no corresponde a la realidad. Actualmente, el desarrollo de las teorías y de los métodos relacionados con la revibración presentan un interés tal que este nuevo procedimiento de puesta en obra del hormigón puede ser muy recomendado. A veces, la revibración va unida al empleo de plastificantes u otros aditivos.

Los primeros ensayos sistemáticos de la revibración se realizaron en Estados Unidos con motivo de la fabricación de barcos de hormigón armado (1942). Después el procedimiento no se ha empleado más que esporádicamente y las investigaciones publicadas, poco numerosas, contienen datos contradictorios, especialmente en lo que se refiere a los parámetros de la vibración (intervalo de aplicación, duración, frecuencia, amplitud, aceleración, etc.) y a la composición del hormigón (dosificación de cemento, relación A/C, etc.).

En el III Congreso Internacional del Hormigón Preamasado (Estocolmo, 1960), (18) y en la Conferencia sobre la Técnica de Compactación por Vibración (Budapest, 1963), (19), se han reafirmado estas conclusiones, recalándose que sobre la base de las investigaciones realizadas hasta el presente es prematuro hacer recomendaciones sobre la metodología de aplicación de la revibración. La opinión predominante expresada en estas dos manifestaciones internacionales ha sido la siguiente: la revibración ofrece muchas ventajas, pero para su aplicación en la práctica corriente son todavía necesarias investigaciones sistemáticas [señalemos, como un inciso, que en Francia la revibración ha tomado cuerpo oficial en un pliego general de condiciones de puentes y caminos desde 1956, (6)].

## **2. antecedentes**

Un análisis de los datos publicados en la literatura especializada muestra que la revibración ha sido estudiada en varios países.

Así, DURIEZ, (6), ha encontrado en Francia, que la revibración aplicada a los hormigones plásticos de 1 ½ a 2 horas, después de la primera vibración, crea un aumento medio de las resistencias mecánicas de 15 a 20 %; este aumento sube a 30-40 % si el hormigón se plastifica con aditivos retardadores, pudiendo aplicarse la revibración en este caso 3 a 4 horas más tarde. Sobre hormigones secos, la revibración puede provocar una disminución de resistencias. F. BASTIEN (1944) indica un aumento de resistencias del 40 % a la compresión y 25 % a la tracción a 2 días de edad; el aumento relativo disminuye con el tiempo. Años antes se habían obtenido en Rusia aumentos del 70 % a la compresión a los 2 días de edad.

En Estados Unidos, C. A. VOLLIK, (17), obtuvo, sobre un hormigón revibrado, 2 ½ horas después de puesto en obra por vibración, un aumento de la resistencia a la compresión del 16 % y sobre un hormigón con 2 % de plastificante, revibrado después de 3 ½ horas, un aumento del 35 por ciento.

En Polonia, las investigaciones en este campo han sido llevadas por B. KALABINSKI, (6), en el laboratorio y en obras de carreteras. En el laboratorio obtuvo aumentos de 21 y 24 % a 7 y 28 días, respectivamente; en obras de carreteras, obtuvo aumentos del 52 % para la capa inferior y del 22 % para la superior, después de 3 años de explotación.

En Checoslovaquia, los trabajos realizados por O. VALENTA y E. WEINER, (12), han demostrado que la eficacia de la revibración depende de los parámetros de la vibración (frecuencia, amplitud, aceleración) y de la docilidad del hormigón. La eficacia óptima la consiguieron sobre hormigones de relación A/C = 0,4 y revibrados de 1 a 4 horas después de la puesta en obra (aumento de resistencias mecánicas de 100 a 200 % e incluso más).

## **3. premisas teóricas concernientes a la revibración del hormigón**

La mayor parte de las investigaciones realizadas con el fin de mejorar las propiedades físicas y mecánicas de los hormigones se han dirigido tratando de obtener una compacidad máxima, considerando a ésta como el principal índice de calidad. Las investigaciones de los autores han demostrado que, aparte de la compacidad, una influencia importante sobre las propiedades del hormigón procede del estado de la estructura que surge durante el fraguado.

Después del amasado del cemento en agua comienza la hidrólisis e hidratación de los componentes mineralógicos y aparecen las formaciones semicristalinas ya conocidas. Estas

formaciones cristalinas, de dimensiones reducidas en la primera fase, crecen rápidamente durante el fraguado del cemento, contribuyendo, por los contactos recíprocos y las interpenetraciones, a la consolidación de la estructura resistente.

La tendencia al aumento de las formaciones cristalinas es contrariada por el sistema cemento-áridos-agua, lo que provoca la aparición de tensiones internas. A la vez, se produce la disminución del volumen de la pasta de cemento, debido a la absorción interior de agua por los núcleos inalterados de cemento y a la retracción de los compuestos hidratados.

En general, se admite que la disminución de volumen en este período no engendra tensiones en la pasta de cemento a causa de la ausencia de uniones en el sistema. Las investigaciones de los autores han demostrado, por el contrario, que las deformaciones de volumen que aparecen durante el fraguado deben de considerarse como deformaciones creadoras de las tensiones.

Incluso, durante el tiempo de fraguado, el desarrollo de la retracción inicial, que en las primeras 4-5 horas alcanza valores de 1-5 mm/m (2), (13) y (16), está sometido por el esqueleto cristalino de la fase hidratada, por el aumento de los cristales de  $AC_3H_6$  y  $Ca(OH)_2$ , por los núcleos inalterados de cemento y también, en el caso de los hormigones, por los áridos. Se deduce que en la estructura de la pasta de cemento o del hormigón surgen importantes tensiones iniciales que ejercen una influencia negativa sobre las propiedades ulteriores de los hormigones por limitación del desarrollo de sus características potenciales. En apoyo de esta afirmación, recordaremos la fisuración observada con frecuencia en hormigones de muy poca edad.

Los autores emiten la opinión de que si durante el período de fraguado se trata por ciertos medios en el sentido de anular la retracción inicial, puede conseguirse una mejora esencial de las propiedades físico-mecánicas y químicas de la pasta de cemento o de los hormigones.

Para lograr este fin, se ha experimentado la vibración repetida —REVIBRACION— del hormigón durante el período de fraguado. Los criterios de aplicar la revibración se distinguen de los indicados en la literatura especializada (6), (7), (10), (12) y (17), en el sentido que se ha tratado de obtener, aparte de un aumento de la compacidad, la anulación de las tensiones internas provocadas por la retracción inicial en el curso del mismo período; cada revibración da, en efecto, una nueva estructura al hormigón puesto en obra. De hecho, los resultados experimentales han demostrado que, para un mismo aumento de la compacidad, el efecto de la revibración es mayor para los cementos que presentan una retracción inicial más grande.

## **4. estudios sobre pasta de cemento**

Las investigaciones realizadas sobre pasta de cemento se han dirigido al esclarecimiento de los procesos de formación de la estructura de la piedra de cemento durante el período inicial de endurecimiento bajo el efecto de la vibración y revibración, y al establecimiento de criterios óptimos de revibración en función de la composición mineralógica de los cementos, de la retracción y de las tensiones iniciales.

### **4.1. Cementos empleados**

Para mostrar la influencia de la composición mineralógica sobre la eficiencia de la re-

vibración se han empleado seis cementos, cuyas características químicas y físico-mecánicas se expresan en las tablas 1 y 2. La composición mineralógica se ha calculado con ayuda de las fórmulas de Bogue.

#### 4.2. *Probetas confeccionadas*

Con los seis cementos se han confeccionado pastas de consistencia normal, con las que se han ejecutado por vibración y revibración:

- cubos de 5 y 7,07 cm de lado, para determinar la resistencia a la compresión  $R_c$ , la velocidad de los ultrasonidos  $v$  y la densidad aparente  $\gamma_a$ ;
- cubos de 20 cm de lado, con objeto de determinar tensiones internas;
- placas de  $50 \times 50 \times 25$  cm, con el fin de determinar el contenido en agua y la densidad aparente (o la compacidad por métodos radiométricos);
- prismas de  $10 \times 10 \times 30$  cm, para determinar la retracción inicial.

TABLA 1  
*Constituyentes mineralógicos de los cementos*

Cemento	Constituyentes mineralógicos (%)			
	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
A	66	10	1	19
P	40	35	2	18

NOTA.—Los cementos Az y At proceden del cemento A por adiciones respectivas de 15 % de escoria y de 15 % de trass.

Los cementos Pz y M proceden del cemento P por adiciones respectivas de 15 y de 30 % de escoria.

TABLA 2  
*Características físico-mecánicas de los cementos utilizados*

Cemento N.º	Notación	Residuo sobre 4.900 $\mu$ /cm <sup>2</sup> (%)	Superf. esp. (cm <sup>2</sup> /g)	Cons. norm. (%)	Fraguado		Resistencia a compresión (kg/cm <sup>2</sup> )		
					P. (h-min)	F. (h-min)	(3 días)	(7 días)	(28 días)
1	A	3,0	2.980	28,5	1-15	2-15	300	420	503
2	Az	5,0	2.480	27,4	2-45	3-45	230	310	460
3	At	4,5	2.400	30,3	2-15	4-30	217	306	407
4	P	3,1	2.850	27,0	2-15	5-30	230	306	440
5	Pz	13,0	2.560	26,0	3-00	4-00	190	355	415
6	M	5,9	2.380	25,3	2-30	4-15	270	350	395

### 4.3. Establecimiento de criterios de revibración

#### GRUPO I DE EXPERIENCIAS

En este grupo se han empleado los cementos A, P, Az y M, con los que se han realizado cuatro series de cubos de 7,07 cm. Se han mantenido constantes los siguientes parámetros:

- duración de la vibración en la colocación (2 minutos);
- el utillaje de vibración (mesa vibrante con  $f = 50$  Hz y  $A = 0,8$  mm);
- la duración e intervalo de revibración (0,5 minutos todas las medias horas).

La revibración se ha efectuado en los períodos: colocación-fin de fraguado MP-FP (serie 2); principio de fraguado-fin de fraguado DP-FP (serie 3); colocación-principio de fraguado MP-DP (serie 4). La serie 1 es la serie testigo (sin revibración).

En la tabla 3 se da la densidad aparente  $\gamma_a$  y la resistencia a la compresión  $R_c$  a 28 días. Del análisis de esta tabla se deduce:

1) La revibración confiere un aumento sustancial de la resistencia con relación a las probetas testigo. Independientemente de la composición mineralógica de los cementos, el aumento máximo se obtiene para las probetas de la serie 2, revibradas en el intervalo colocación-fin de fraguado. El hecho es explicable, porque esta serie ha acumulado la mayor duración en la revibración, lo que ha determinado la anulación de las tensiones internas en mayor medida.

TABLA 3  
Densidad aparente  $\gamma_a$  y resistencia a la compresión a 28 días ( $R_c$ )

Cemento	Serie	$\gamma_a$		$R_c$	
		(kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta$ %	(kg/cm <sup>2</sup> )	$\Delta$ %
A	1	2.300	—	422	—
	2	2.410	+ 4,8	759	+ 79
	3	2.405	+ 4,6	680	+ 61
	4	2.380	+ 3,5	590	+ 39
P	1	2.260	—	416	—
	2	2.370	+ 4,9	629	+ 51
	3	2.310	+ 2,2	542	+ 30
	4	2.370	+ 4,9	530	+ 27
Az	1	2.290	—	410	—
	2	2.350	+ 2,6	594	+ 45
	3	2.360	+ 3,0	539	+ 32
	4	2.375	+ 3,6	518	+ 26
M	1	2.190	—	400	—
	2	2.270	+ 3,7	558	+ 40
	3	2.285	+ 4,4	485	+ 21
	4	2.290	+ 4,6	445	+ 11

2) Las probetas de la serie 3, revibradas en el intervalo principio de fraguado-fin de fraguado, poseen resistencias superiores a las probetas de la serie 4, aunque el número de revibraciones haya sido mayor para las últimas. Esto se explica por el hecho de que en el intervalo principio de fraguado-fin de fraguado, los valores de la retracción inicial y de las tensiones internas son mayores que las del intervalo precedente (figs. 1 y 2).

3) Los aumentos de resistencia dependen de la composición mineralógica de los cementos. Hay una correlación directa entre la composición mineralógica y la resistencia a la compresión de las probetas revibradas: el cemento A, rico en  $SC_3$ , presenta la mayor retracción inicial (fig. 1) y las mayores tensiones internas (fig. 2), así como los mayores aumentos de resistencia (tabla 3). Estos resultados son importantes, porque ponen en evidencia el hecho de que los aumentos de resistencia son debidos no sólo al aumento de la compacidad, sino también a la anulación de los efectos negativos de la retracción inicial y de las tensiones internas.

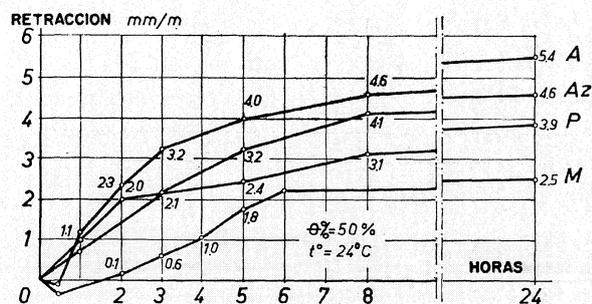


Fig. 1 a

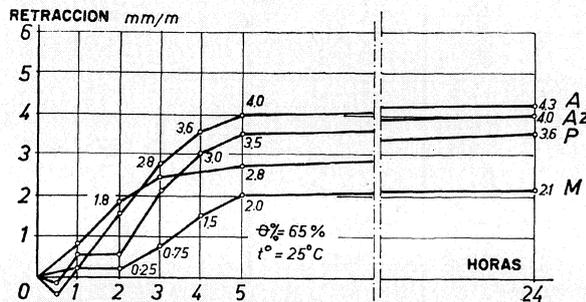


Fig. 1 b

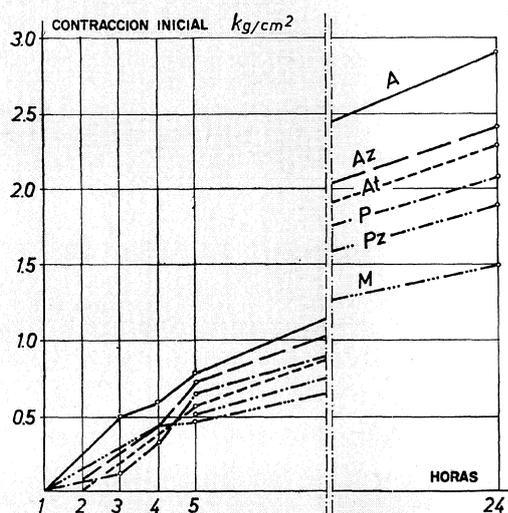


Fig. 2

#### GRUPO II DE EXPERIENCIAS

En el cuadro de este grupo, mucho más reducido que el primero, se ha investigado el doble efecto de la composición mineralógica de los cementos y de las características de la vibración-revibración.

El estudio se ha efectuado sobre los cementos A, At y M, confeccionándose las probetas con pastas de consistencia normal (tablas 1 y 2).

Se ha empleado una mesa vibrante de las siguientes características:  $f = 80 \dots 30 \text{ Hz}$ ;  $A = 0,03 \dots 1,00 \text{ mm}$ ;  $\alpha = 1 \dots 50 \text{ g}$ .

Todas las probetas se han vibrado en su puesta en molde durante 2 minutos; la mitad del número total de probetas se ha revibrado durante 0,5 min todas las medias horas en el período colocación-fin de fraguado MP-FP (período establecido como óptimo en el grupo I de experiencias).

Las probetas se han conservado 24 horas en los moldes y después en el laboratorio a una temperatura  $t^{\circ} = 20 \pm 3^{\circ} \text{C}$  y una humedad relativa  $\theta \% = 50 \pm 5 \%$  hasta la edad de 7 días, después de la cual se han roto a compresión; los resultados se encuentran en la tabla 4.

La influencia de la composición mineralógica de los cementos se confirma una vez más: a igualdad de condiciones vibración-revibración, los cementos ricos en silicato tricálcico y de gran retracción inicial dan los mayores aumentos de resistencia por revibración. Los cementos adicionados de escoria o de trass, menos ricos en  $\text{SC}_3$ , son menos sensibles a la revibración.

Para esclarecer la influencia de las características de la vibración, es necesario efectuar un gran número de ensayos. Del análisis de la tabla 4 se pueden deducir algunas conclusiones que es preciso verificar con ensayos suplementarios:

- para una misma frecuencia  $f$ , el aumento relativo de resistencia aumenta cuando la amplitud  $A$  y la aceleración  $a$  disminuyen;
- los mejores resultados se obtienen para  $f \simeq 100$  y  $a = 1 \dots 2 \text{ g}$ .

#### 4.4. Retracción inicial

La retracción inicial (durante las primeras 24 horas después del amasado) se ha medido con el dispositivo de la figura 3, cuyo elemento de base es una lupa micrométrica alumbrada eléctricamente, 1, que permite la medida de los desplazamientos de los índices metálicos, 2, fijados sobre la probeta de cemento, 3, con una precisión de 0,01 de milímetro.

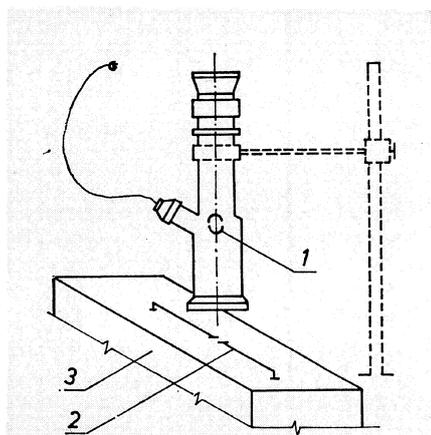


Fig. 3

- 1 - Ocular
- 2 - Índices
- 3 - Probeta

Los valores de la retracción inicial para los cementos A, Az, P y M, en función de la temperatura  $t^{\circ}$  y de la humedad relativa del aire  $\theta \%$  se dan en la figura 2. Los cementos A y Az presentan la mayor retracción inicial y el cemento M la más pequeña; el cemento P, teniendo una composición intermedia, desarrolla una retracción inicial en consecuencia. Resulta que los cementos ricos en  $\text{SC}_3$  tienen una retracción inicial mucho mayor que los cementos de contenido moderado en  $\text{SC}_3$ . Las adiciones de escoria o de trass determinan una reducción en la retracción inicial. Estas relaciones concuerdan con los aumentos de resistencias mecánicas obtenidos por revibración; la eficacia de la revibración es mayor para los cementos de retracción inicial más grande en el momento de

la revibración [ver el comportamiento de los cementos P y Az (tabla 3 y fig. 1)].

El valor de la retracción inicial se influencia mucho por la humedad relativa del aire, lo que es normal (figs. 1a y 1b).

Se observa también una evolución diferente de esta retracción en el tiempo: la retracción inicial en los cementos ricos en  $\text{SC}_3$  se desarrolla más rápidamente en las primeras horas, para luego tender a amortizarse dicho desarrollo. Esta comprobación presenta un interés para establecer criterios óptimos de revibración, siendo evidente que, con objeto de

obtener una eficacia máxima, la revibración debe efectuarse en el período de retracción crítica, es decir, en el intervalo en que se desarrolla más intensamente. Puesto que la revibración no puede realizarse después del final del fraguado, por la débil trabajabilidad de la pasta, resulta que su eficacia no puede ser la misma para todos los tipos de cemento.

T A B L A 4

*Aumento relativo de las resistencias a compresión por revibración, en función de la composición mineralógica de los cementos y de las características de la vibración-revibración*

N.º	Cemento	Características			$100 \frac{R_{cRV} - R_{cV}}{R_{cV}} (\%)$
		f (Hz)	A (mm)	$\alpha$ (g)	
1	A	80	0,50	12,80	37
2	A	80	0,30	9,60	41
3	A	80	0,05	1,28	63
4	A	80	0,03	0,96	78
5	A	100	0,05	2,00	73
6	A	100	0,03	1,20	109
7	A	150	0,30	27,00	46
8	A	150	0,12	10,80	55
9	A	200	0,07	11,20	83
10	At	100	0,05	2,00	54
11	At	150	0,30	27,00	43
12	At	200	0,07	11,20	58
13	M	100	0,30	12,00	25
14	M	100	0,05	2,00	65
15	M	200	0,07	11,20	27
16	M	200	0,05	8,00	36

Las medidas efectuadas sobre las probetas de cemento A, P y M, revibradas conforme a las indicaciones relativas a las series 2 y 3 del grupo I de experiencias, demuestran que por revibración se obtienen reducciones importantes de la retracción (figs. 4a, b y c). La reducción de la retracción es función de la composición mineralógica de los cementos y en nuestro caso decrece en el orden A-P-M; a la vez, la reducción es mayor para la serie 2 que para la serie 3.

A causa de la reducción diferenciada de la retracción inicial por revibración, se obtienen aumentos de resistencias y disminuciones de retracción diferenciadas en función de la composición mineralógica de los cementos; se puede señalar una buena concordancia entre los aumentos de resistencias y las disminuciones en retracción.

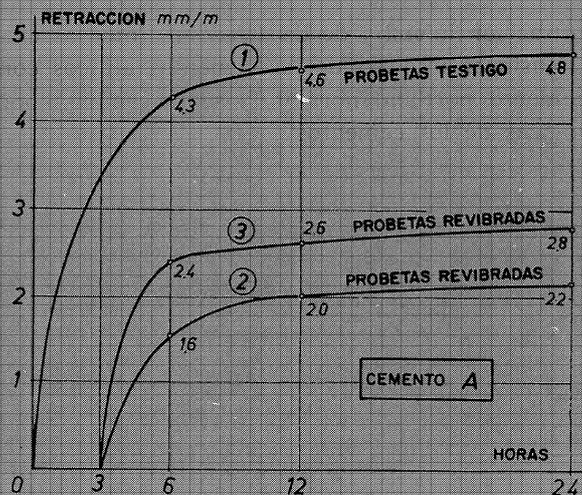


Fig. 4 a

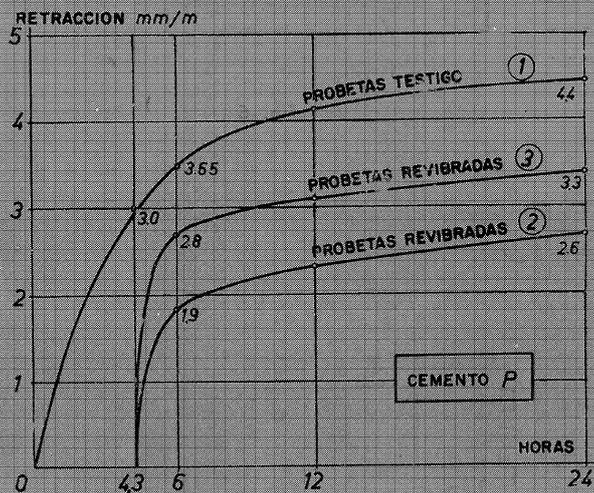


Fig. 4 b

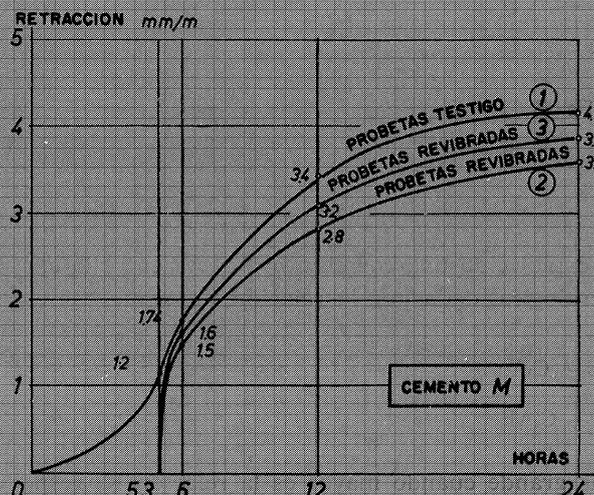


Fig. 4 c

#### 4.5. Tensiones internas

La retracción inicial da lugar durante y después del fraguado del cemento, a causa de las uniones existentes en el sistema (ver párrafo 3), a importantes contracciones internas. Para su determinación se han concebido y realizado tres tipos de captadores (figuras 5, 6 y 7).

Los captadores representados en las figuras 5 y 6 registran las deformaciones lineales por medio de calibreadores por resistividad eléctrica; la valoración de las tensiones se hace sobre la base del diagrama de calibrado tensiones-deformaciones establecido anteriormente.

Los captadores de la figura 7 son del tipo inductivo y funcionan sobre el tripolo de la frecuencia de alimentación; registran directamente las tensiones internas. El captador inductivo puede calibrarse para registrar fuerzas (kg) o deformaciones ( $\mu$ ), en función de la tensión eléctrica entre las bornas de la bobina inductora (150 Hz). La sensibilidad del captador inductivo en el dominio casi-lineal es muy grande, excediendo 0,5 V/kg (fig. 7) ó 2 V/ $\mu$ .

Para medir las tensiones internas se han introducido los captadores en el interior de los moldes cúbicos de 20 cm de lado, rellenos de pasta de cemento de consistencia normal. Los resultados se dan en la figura 2.

Comparando los valores de las tensiones internas, se observa su buena concordancia con la composición mineralógica de los cementos y su retracción inicial; los valores más elevados de las tensiones se han observado para los cementos más ricos en silicato tricálcico.

En la tabla 5 se dan los valores de la retracción inicial y de las tensiones internas cinco horas después del amasado. Las elevadas tensiones internas de los cementos alíticos con adición de escoria o trass, con relación al cemento portland normal P, se determinan por la diferencia entre las composiciones mineralógicas de los cementos.

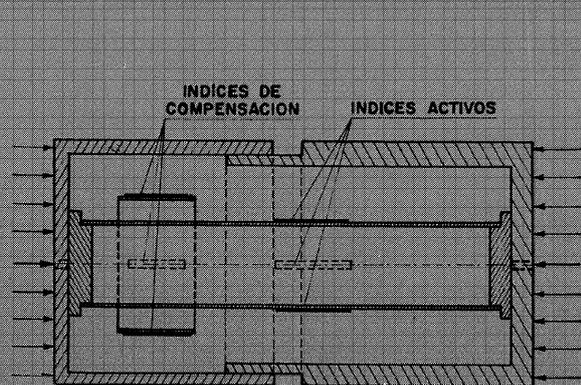


Fig. 5

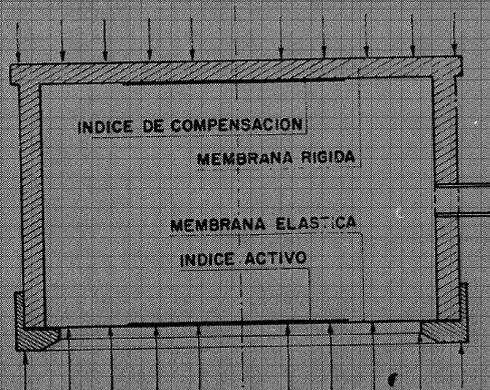
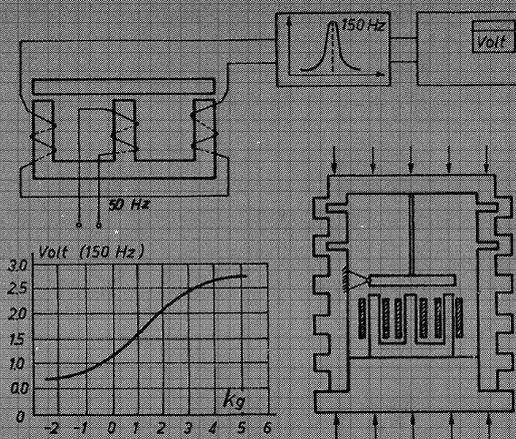


Fig. 6



En nuestros estudios anteriores hemos establecido una correlación directa entre la eficacia de la revibración y la composición mineralógica, dada por la relación K:

$$K = \frac{C_3S + C_3A}{C_2S + C_4AF}$$

La eficacia de la revibración es tanto más grande cuando mayor es la relación K; respectivamente, son mayores los valores de la retracción inicial y de las tensiones internas.

La anulación de los efectos de la retracción inicial y de las tensiones internas que resultan, así como la reposición de la estructura del hormigón fresco por revibración, se reflejan en la mejora de las características físicas y mecánicas del hormigón endurecido.

#### 4.6. Intensificación de los procesos de hidratación y de endurecimiento

La revibración determina una intensificación de los procesos de hidratación y de endurecimiento del cemento, a causa de la reducción de la relación A/C, del aumento del grado de dispersión del cemento y de la ruptura de las películas de geles que rodean los granos de cemento, facilitando así el acceso de agua hacia los núcleos inalterados de cemento.

El fenómeno se ha puesto en evidencia por estimación de la cantidad de agua unida químicamente y por medidas ultrasónicas.

La cantidad de agua unida químicamente se ha determinado por calcinación de las probetas hasta peso constante; las probetas revibradas han dado cantidades mayores de agua, a la misma edad, que las probetas testigo.

Sobre la base de medidas efectuadas todas las horas en las primeras 24 horas y todos los días durante los primeros 14 días, se han calculado las velocidades de los ultrasonidos para las probetas vibradas y revibradas, confeccionadas con los cementos A, Az, P y M. En las figuras 8 y 9 se dan los diagramas v-t para las primeras 24 horas después del amasado del cemento; se puede constatar fácilmente una diferencia evidente entre las probetas vibradas y revibradas.

T A B L A 5

Valores de la retracción inicial y de las tensiones internas 5 horas después del amasado con agua

CEMENTO	A	Az	At	P	Pz	M	RIM*
Retracción (mm/m)	4,70	4,30	4,10	4,48	—	3,10	—
Tensión (kg/cm <sup>2</sup> )	0,76	0,61	0,58	0,54	0,53	0,43	0,78

\* RIM expresa un cemento portland de altas resistencias iniciales.

Para relacionar la marcha de las curvas velocidad ultrasónica-tiempo (v-t) con los procesos de hidratación y de endurecimiento, en los trabajos, (3) y (5), se han hecho interpretaciones interesantes sobre la dinámica de estos fenómenos en función de la composición mineralógica de los cementos y de la manera de compactarlos (vibración-revibración).

En el primer período comprendido entre 5,5 y 8 horas después del amasado, las probetas revibradas poseen una rigidez menor que las probetas testigo vibradas, por causa de la perturbación de estructura por revibración y, en consecuencia, velocidades ultrasónicas más pequeñas. Después de un cierto tiempo, variable con el tipo de cemento, la estructura de las probetas revibradas se consolida más deprisa, lo que determina la intersección y la ventaja de las curvas v-t de las probetas vibradas. Es interesante señalar que la diferencia entre las probetas vibradas, y revibradas está de acuerdo con la sensibilidad de los cementos a la revibración, (1), (2); la sucesión es la misma: A, P, Az y M, siendo el desfasado medio de 10,2, 8,4, 6,4 y 4,8 por ciento.

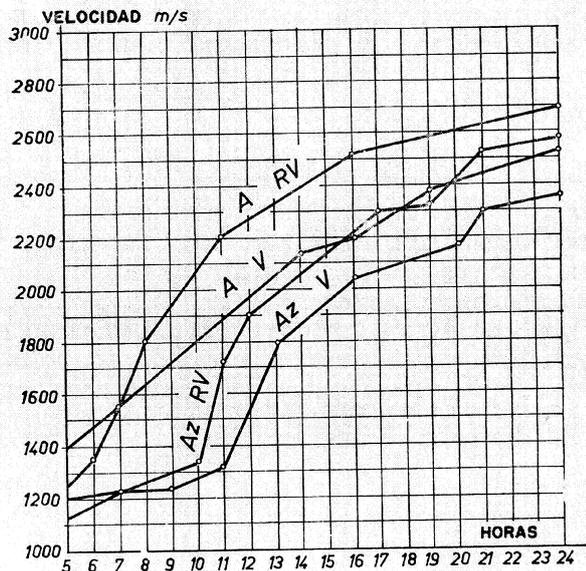


Fig. 8

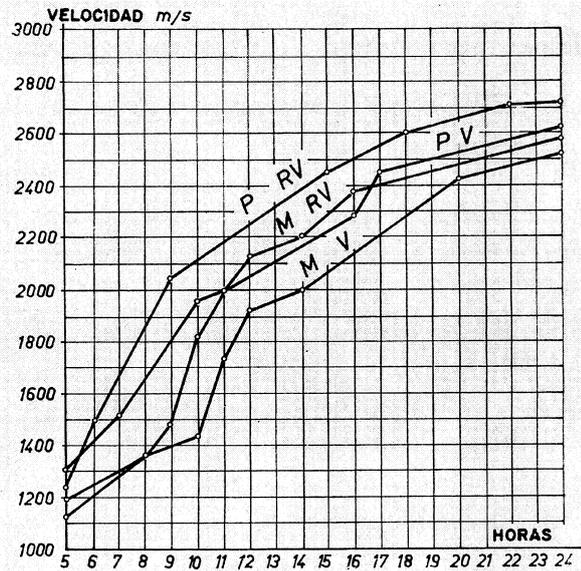


Fig. 9

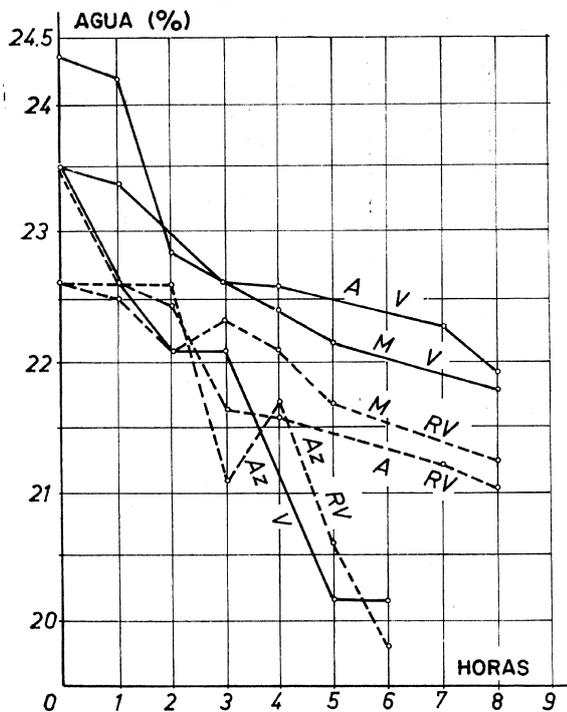


Fig. 10 a

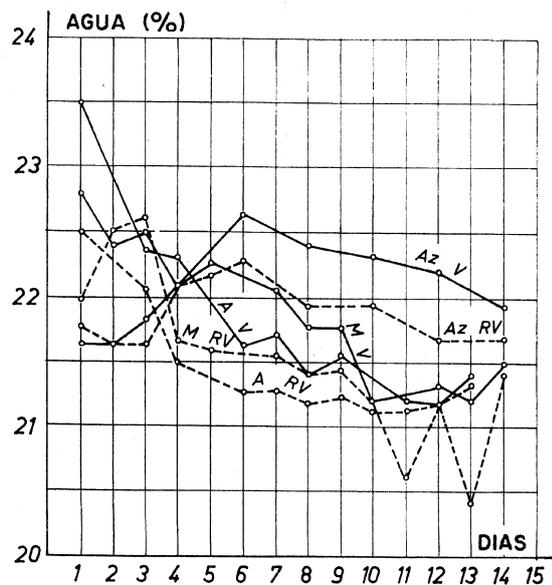


Fig. 10 b

Es preciso mencionar que las diferencias de velocidad no están de acuerdo con los aumentos de resistencia, sino con los aumentos de densidad aparente (o de compacidad) que son, por término medio, de 3-4 %. Estos resultados son normales, porque las grandes diferencias de resistencia entre las probetas vibradas y revibradas se deben en su mayor proporción a la anulación del estado de tensiones provocadas por la retracción inicial, que no se puede poner en evidencia por el método ultrasónico. Se puede pensar que será posible en el futuro diferenciar, por correlación de los métodos ultrasónicos y destructivos, los incrementos de resistencia debidos a un aumento de la compacidad de los debidos a la anulación de las tensiones internas.

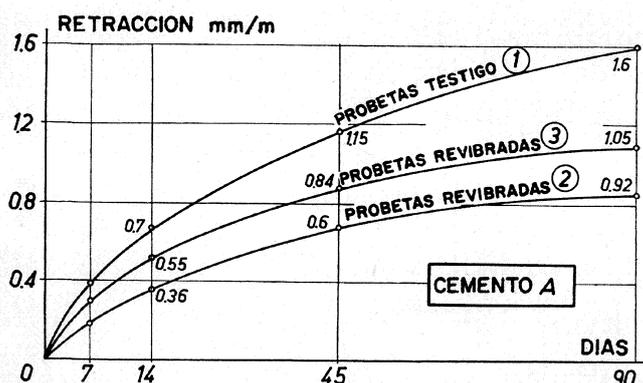


Fig. 11

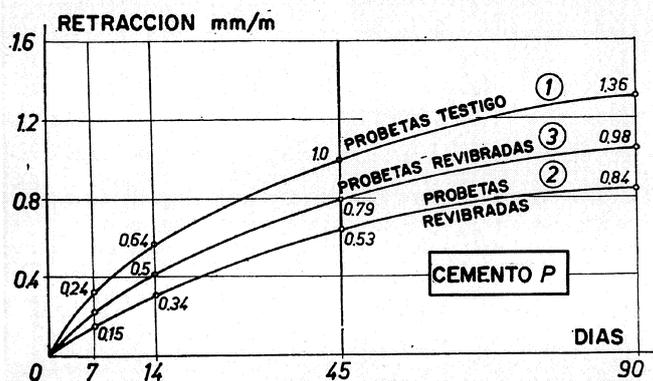


Fig. 12

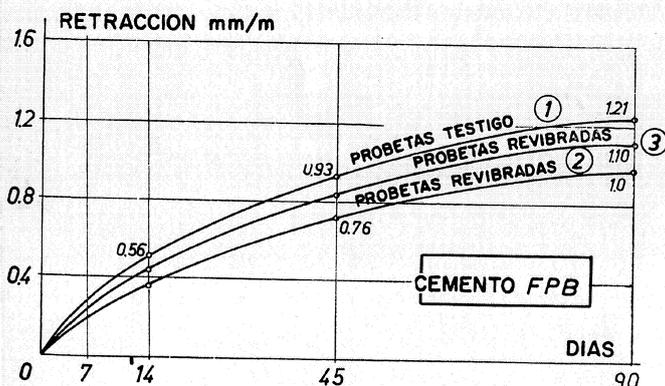


Fig. 13

La revibración intensifica los procesos de hidratación (mayor velocidad de los ultrasonidos a la misma edad), pero no acelera o retrasa de manera evidente estos procesos [los «saltos» de velocidad para los cementos Az y M vibrados y revibrados, por ejemplo, se producen prácticamente a la misma edad, figuras 8 y 9; ver también (3) y (5)].

#### 4.7. La reducción de la relación A/C por revibración

La figura 10 representa la variación del contenido en agua (en % del peso del cemento) de las probetas vibradas y revibradas.

Las determinaciones se han hecho todas las horas en las primeras 8 horas y todos los días durante 14 días, con ayuda de un humidómetro de superficie de neutrones rápidos, (5).

Independientemente del tipo de cemento, se observan entre las probetas vibradas y revibradas diferencias sensibles entre los valores de la relación A/C, aunque inicialmente todas las probetas se hayan confeccionado con la misma relación agua/cemento para cada cemento (agua de consistencia normal). La revibración reduce la relación A/C.

#### 4.8. La reducción de las deformaciones diferidas por revibración

En las figuras 11, 12 y 13 se presenta la retracción hasta 90 días de probetas confeccionadas con los cementos A, P y FPB, vibradas y revibradas (series 2 y 3, grupo I de experiencias).

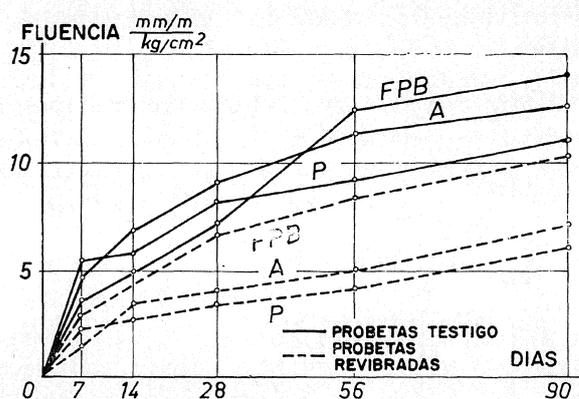


Fig. 14

En las probetas-testigo, la mayor retracción se da para los cementos A y P; en las probetas revibradas, para el cemento FPB. Esto se explica por el hecho de que el cemento FPB desarrolla poco su retracción inicial durante el fraguado, y la anulación de ésta por revibración es despreciable.

Para las probetas revibradas de la serie 2, la reducción media de la retracción es de 45, 35 y 15 % para los cementos A, P y FPB, respectivamente; estas reducciones están de acuerdo con los valores de la retracción inicial.

La figura 14 representa los valores de la fluencia para las mismas probetas (testigo y serie 2). Se comprueba que con relación a las probetas vibradas, la fluencia se reduce de 40 a 50 % para el cemento A; de 30 a 40 %, para el cemento P, y de 15 a 20 %, para el cemento FPB. En este caso también, la reducción de la fluencia está de acuerdo con la hipótesis de los autores.

(Continuará)