

Estudio de la acción del revibrado en morteros, hormigones y prefabricados, utilizando cementos de la zona andaluza

Este trabajo ha sido realizado por Don Jesús Barrios Sevilla, Doctor en Ciencias Químicas y Director de Laboratorios Vorsevi, S. A., y Don José Orad Aragón, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, ambos profesores de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla y del Instituto Universitario de Investigación de Ciencias de la Construcción de dicha Escuela.

I. INTRODUCCION

Los autores Avram y Mirsu del Instituto Politécnico de Timisoara de Rumania, dedicaron sus estudios a los procedimientos de hidratación del cemento, teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

1. En el proceso de hidratación del cemento se forman nuevas estructuras que al aumentar de tamaño hacen aumentar de volumen al conjunto con un valor del orden de 0,1 a 0,5 %.
2. Las formaciones que más contribuyen a estos cambios estructurales son las de hidróxido cálcico, silicatos cálcicos hidratados, y aluminatos cálcicos hidratados.
3. Esta tensión de hidratación es de signo contrario al aumento de la resistencia en la pasta hidratada. Dicho de otra forma: las tensiones cristalinas que tienen lugar durante el proceso de fraguado son de signo contrario a las que generan un aumento de resistencia. Por tanto, todo aquello que contribuya de alguna forma a disminuir esa tensión, contribuirá a aumentar esas resistencias. Por otra parte, hay que pensar que ese aumento de resistencia no ha de ser sólo en las primeras edades, (3 primeros días), sino que han de aumentar a edades superiores.

Como es lógico suponer, este aumento de resistencia es función de la composición mineralógica. Además, los aumentos de resistencia serán tanto más efectivos cuanto menor sea la retracción y tensión que presenta la pasta hidratada.

El método que idearon estos autores para conseguir la acción antes descrita fue el revibrado. Este método consiste en volver a vibrar la pasta hidratada cuando está iniciándose el fraguado. Con ello se consigue eliminar las tensiones internas que se producen en este

período de hidratación. Asimismo, se logra que las nuevas estructuras ocupen los espacios libremente, sin tener que vencer fuerzas de signo opuesto. Por último, el grado de compacidad de la masa que se consigue con este método es muy superior al logrado con un tratamiento normal.

En el presente trabajo se va a estudiar el resultado de este método aplicado a los diferentes cementos que hay en la zona andaluza.

Realizar el estudio con estos cementos no es por el valor estadístico que pueda suponer, o el conocer el comportamiento de los conglomerantes de una determinada zona, sino por el hecho de que algunos de los referidos cementos presentan una composición mineralógica diferente de lo que se considera normal en términos generales.

De esta forma, podría conocerse de un modo práctico la influencia de cada uno de los componentes mineralógicos en los aumentos de resistencia del conjunto.

Seguidamente, este estudio, realizado sobre cementos, se ha aplicado a hormigones.

Se utilizaron diversas dosificaciones, pasando de menor a mayor contenido de cemento, a distintas relaciones agua/cemento, empleo de áridos rodados y de machaqueo, y por último, se ha aplicado también este método al proceso de prefabricados y de la edificación.

II. PARTE EXPERIMENTAL

II.1. Cementos

Se han tomado siete muestras correspondientes a otras tantas marcas existentes en el mercado de Andalucía.

Estas muestras han sido marcadas con letras que van desde la A hasta la G.

Para su completo conocimiento, se les ha realizado ensayos químicos y físico-mecánicos, de acuerdo con la norma RC-75.

Asimismo, para tener idea de su composición mineralógica se han aplicado las fórmulas de Bogue por un lado, y se ha hecho un estudio microscópico de las muestras, a fin de conocer las desviaciones entre las fórmulas empíricas y la realidad concreta de cada caso.

El insistir en el conocimiento de la composición de los distintos conglomerantes, es por la necesidad de conocer con exactitud las proporciones de cada uno de los constituyentes que integran los diversos conglomerantes.

De esta forma, las relaciones que se establezcan posteriormente entre aumento de resistencias por revibrado y constituyentes serán más precisas.

En las páginas siguientes se observan los resultados de los diversos análisis realizados.

ANALISIS QUIMICOS DE LOS CEMENTOS

	A	B	C	D	E	F	G
Pérdida al fuego	1,6	1,5	1,1	3,3	1,3	1,5	3,4
Residuo insoluble	0,9	1,2	0,7	1,5	0,5	1,2	1,0
Anhídrido silícico	19,3	20,3	22,2	20,2	21,3	18,9	19,0
Oxido aluminico	7,0	5,1	2,0	4,8	3,4	5,2	5,6
Oxido férrico	2,9	2,5	3,8	2,3	6,0	3,4	3,4
Oxido cálcico	63,5	64,3	67,2	63,0	61,3	63,8	61,9
Oxido magnésico	1,4	1,8	0,5	1,2	3,0	1,9	2,4
Trióxido de azufre	2,1	2,3	2,0	2,4	2,1	3,0	2,2
Oxido sódico	0,4	0,3	0,1	0,3	0,4	0,3	0,3
Oxido potásico	0,8	0,7	0,3	0,6	0,7	0,6	0,7
Cal libre	1,8	1,2	1,5	2,7	1,2	1,3	1,6

CONSTITUYENTES MINERALOGICOS (Según fórmula de Bogue)

	A	B	C	D	E	F	G
Silicato tricálcico	46,6	56,8	71,5	51,8	48,4	61,9	52,3
Silicato bicálcico	20,2	15,4	9,7	18,8	24,6	7,5	15,1
Aluminato tricálcico	13,5	9,1	0	8,3	0	8,1	14,8
Ferrito aluminato tetracálcico	9,1	7,6	9,8	7,7	16,5	10,2	10,3
Sulfato cálcico	4,0	4,2	4,0	4,4	3,5	5,2	4,7
Módulo de fundentes	2,3	2,0	0,53	1,9	0,57	1,5	1,64

ENSAYO FISICO DE LOS CEMENTOS

	A	B	C	D	E	F	G
Residuo sobre tamiz de 900 mallas/cm ²	0,2 %	0,5 %	0 %	0,5 %	1,0 %	0,2 %	0 %
Residuo sobre tamiz de 4.900 mallas/cm ²	4,0 %	4,1 %	1,5 %	7,0 %	2,0 %	6,3 %	2,6 %
Superficie específica Blaine cm ² /g	3.729	3.350	3.047	3.450	2.990	3.500	3.542
Peso específico gr/cm ³	3,13	3,08	3,17	3,04	3,12	3,03	3,06
Expansión en autoclave %	0,2	0,1	0,0	0,1	0,2	0,1	0,2
Agua de consistencia normal	25,5	24,0	24,5	25,0	24,0	24,0	24,0
Principio fraguado	2 h 15'	2 h 20'	2 h 35'	2 h 15'	2 h 40'	1 h 40'	1 h 50'
Final fraguado	3 h 30'	3 h 30'	3 h 40'	3 h 25'	4 h 05'	3 h 00'	3 h 05'

RESISTENCIAS MECANICAS

	A	B	C	D	E	F	G
Flexotracción kp/cm²							
3 días	61	51	48	43	46	53	57
7 días	77	63	60	57	60	66	69
28 días	83	77	79	72	75	78	81
Compresión kp/cm²							
3 días	374	259	215	219	232	261	284
7 días	468	347	310	292	346	364	396
28 días	580	441	469	413	441	504	560

Como puede verse por los análisis químicos, se trata de cementos con significativas diferencias entre ellos, en lo que a composición mineralógica se refiere.

El contenido de silicato tricálcico oscila desde 46,6 % en el cemento A, al 71,5 % en el cemento C.

En cuanto al silicato bicálcico hay toda una gama que va desde el 9,7 % en el cemento C a un 24,6 % en el cemento E.

Por lo que se refiere a la suma de silicatos, los valores extremos están en el cemento A con el 66,8 % y en el cemento C con un 81,2 %.

Respecto al contenido de aluminato tricálcico, oscila desde 14,8 % en el G, a 0 % en los cementos C y E.

En cuanto a los análisis físicos, los valores de mayor interés para el presente estudio son los referentes a la estabilidad de volumen, con expansiones en autoclaves que van del 0 % en el cemento C, a un 0,2 % en el cemento F, y las finuras con superficies específicas que van de 2.990 a 3.729 cm²/g.

En resistencias mecánicas hay desde valores correspondientes a un P-550 a otros más bajos como es el cemento D (P-350).

Por otra parte se ha realizado el estudio microscópico de los distintos cementos con determinaciones cuantitativas de los distintos constituyentes mineralógicos. Los resultados son los siguientes:

	A	B	C	D	E	F	G
Alita	51,4	50,3	80,1	59,3	56,3	57,3	54,1
Belita	16,8	23,1	6,8	16,8	17,5	14,7	16,2
Celita	11,7	8,9	0,0	9,1	0,0	9,3	13,9

Las sumas de silicatos son similares tanto por este procedimiento como por el de las fórmulas de Bogue, aunque hay diferencias en los parciales.

Con el aluminato tricálcico existen también bastante semejanza entre unos valores y otros.

Además se han realizado ensayos por difracción de rayos X.

Este procedimiento es aproximado en cuanto a los porcentajes de cada uno de los componentes, pero exacto en lo referente a la identificación de cada uno de los constituyentes mineralógicos. Así se ha comprobado que la belita está en la forma β en casi todos ellos. La alita y la celita se presentan en sus formas cristalográficas.

En los cementos C y E, se ve que en su fase líquida no hay celita sino solamente fase ferrítica.

II.2. Morteros

Una vez analizadas las distintas muestras de cemento, se procedió a realizar las siguientes experiencias.

Se confeccionaron probetas de mortero normalizado, según RC-75 para todos y cada uno de los cementos. El proceso ha sido el siguiente:

Una vez amasado el mortero se coloca en los moldes prismáticos situados en la compactadora. A continuación se dan los 120 golpes de rigor en la compactadora, y se llevan a la cámara húmeda. Desde este momento y cada media hora, en tanto duró el fraguado, se colocaba en la compactadora y se daban 60 golpes. Así se siguió hasta que el proceso de fraguado estaba a punto de finalizar.

En resumen, el número de veces que se ha sometido cada cemento a revibrado ha sido:

Cemento A	...	6
Cemento B	...	6
Cemento C	...	6
Cemento D	...	6
Cemento E	...	7
Cemento F	...	5
Cemento G	...	5

A continuación se dejaron en la cámara húmeda. A las 24 horas, se desmoldaron y se colocaron en las cubetas con agua a $20^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$.

Conforme se cumplían las fechas, se tomaban tres probetas para su rotura a flexotracción y, por tanto, seis para la rotura a compresión.

Los resultados han sido los siguientes:

	A	B	C	D	E	F	G
Flexotracción kp/cm^2							
3 días	73	75	69	65	47	77	74
7 días	86	82	88	75	63	86	86
28 días	98	97	102	88	82	99	96
Compresión kp/cm^2							
3 días	528	387	379	316	319	369	396
7 días	634	479	496	403	426	486	511
28 días	701	588	689	501	539	637	714

Cuando estos valores se comparan con los obtenidos en los ensayos normales, puede verse que aparecen incrementos muy significativos.

Refiriendo estas diferencias a porcentajes, se obtienen los siguientes valores unitarios y la media de todos ellos a cada una de las edades, como puede verse en la siguiente tabla:

	A	B	C	D	E	F	G	Media
				%				%
Flexotracción kp/cm^2								
3 días	19	22	43	30	20	24	21	25,5
7 días	11	17	46	19	14	13	13	19
28 días	18	25	49	18	15	12	14	21,5
Compresión kp/cm^2								
3 días	41	49	76	44	36	41	39	47
7 días	35	38	60	38	23	33	29	36,5
28 días	32	33	46	35	22	26	27	31,5

De los valores medios expresados se diferencian notablemente los cementos C y E. El primero porque lo supera, y el segundo porque da por debajo.

Posiblemente lo ocurrido con este último sea a consecuencia del exceso de revibrado, ya que se sometió a siete procesos, en lugar de los cinco y seis realizados a los anteriores.

A fin de comprobar este extremo, se realizó una nueva prueba con el cemento E, pero con cinco revibrados en lugar de los siete.

Rotas las probetas se comprobaron incrementos a flexotracción de 23, 16 y 18 % respectivamente. A compresión 43, 31 y 30 % respectivamente, valores éstos similares a las medias obtenidas.

Luego se puede sacar la primera conclusión y es que en el proceso de revibrado no es conveniente pasar de cinco ciclos.

El otro cemento que presenta un incremento excepcional es el C. Si se observa, la composición mineralógica del mismo en comparación con los demás, puede verse que es el de mayor cantidad de silicato tricálcico (71,5 %), y mayor suma de silicatos totales (81,2 %), en cambio, está exento de aluminato tricálcico.

Los cementos restantes tienen proporciones de SC_3 que oscilan entre el 47 % y el 57 % y la suma de SC_3 y SC_2 está entre el 67 % y 73 %, por tanto, las sumas de silicatos son prácticamente iguales en todas estas muestras.

En una de ellas, la E, tampoco hay AC_3 . Por tanto, como primera providencia, puede decirse que los factores importantes en este proceso de aumento de resistencia por acción del revibrado son la suma de silicatos y la mayor proporción de silicato tricálcico. Por otra parte, el aluminato tricálcico no tiene influencia significativa en este proceso. Posiblemente tenga su explicación en el superior aumento de volumen que se produce en él.

Por lo tanto, la acción de revibrado con acomodo de las nuevas fases cristalinas, tienen su acción directa casi exclusivamente con los silicatos.

II.3. Hormigones

Experiencia sobre hormigones. A continuación se ha procedido a realizar el estudio sobre masas de hormigón confeccionadas en el laboratorio.

Para no alargar el proceso en este estudio solamente se tomaron dos cementos. Los elegidos fueron el B y C.

El primero por ser un cemento con unas resistencias representativas del grupo y con un comportamiento frente al revibrado similar al resto. El C, se ha elegido por ser en el que aparece mayor índice de aumento de resistencias con el revibrado.

Los áridos tomados son de río y con las siguientes granulometrías:

<i>Porcentaje que pasan</i>				
<i>Ley de malla en mm</i>	<i>Grava</i>	<i>Gravilla</i>	<i>Garbancillo</i>	<i>Arena</i>
38,1	100	100	100	100
25,4	81	100	100	100
19,1	10	92	100	100
12,7	0	28	99	100
9,5		4	85	100
6,3		0	30	100
4,76			8	91
2,00			0	77
0,84				45
0,42				18
0,21				9
0,115				4
0,074				1

A los áridos se les hicieron los siguientes análisis dando los resultados que a continuación figuran:

	Arena (%)	Arido grueso (%)
Terrones de arcilla	0	0
Finos que pasan por el tamiz 0,08 UNE 7 050	1	0
Material retenido por el tamiz 0,063 UNE 7 050 y flota en un líquido de peso específico 2,0	0	0
Sulfatos solubles en agua	0	0
Sulfatos solubles en ClH	0	0
Sulfatos solubles en NO ₃ H	0	0
Partículas blandas	—	0
Equivalente de arena	87	—
Materia orgánica	No tiene	No tiene
Coefficiente de forma	—	0,33-0,42 (1)

(1) El valor 0,39 es de la grava y 0,42 del garbancillo

El agua tomada es la potable de Sevilla.

Los cementos a utilizar B (Portland normal) y C (P-Y) en su categoría de 350.

Por lo demás, se han combinado todas las variables posibles a fin de estudiar completamente el fenómeno de revibrado en hormigones.

Así, por ejemplo, se han tomado dos resistencias para estudiar: una de 125 kp/cm² y otra de 250 kp/cm².

Consistencias, se han considerado tres: seca, plástica y fluida.

Tamaños máximos de áridos, también se han considerado tres: 40, 25 y 15 mm.

TAMAÑO MAXIMO 40 mm

Resistencia 125 kp/cm ²			
Consistencia	Seca	Plástica	Fluida
Grava	453	432	419
Gravilla	436	419	398
Garbancillo	454	431	417
Arena	772	736	720
Agua	140	160	190
Cemento	214	228	257
Resistencia 250 kp/cm ²			
Consistencia	Seca	Plástica	Fluida
Grava	416	392	365
Gravilla	398	377	341
Garbancillo	427	413	394
Arena	716	672	626
Agua	175	185	200
Cemento	329	341	379

Después se han realizado las mismas dosificaciones para un tamaño máximo de 25 mm.

Tanto en ésta como en la anterior, como en la siguiente, se ha seguido el método de la Peña, con algunas modificaciones en lo que se refiere a composición de áridos y cantidad de agua.

Los resultados son los que siguen:

TAMAÑO MAXIMO 25 mm

Resistencia 125 kp/cm²			
Consistencia	Seca	Plástica	Fluida
Gravilla	638	615	538
Garbancillo	607	603	571
Arena	852	820	798
Agua	140	165	195
Cemento	226	245	267

Resistencia 250 kp/cm²			
Consistencia	Seca	Plástica	Fluida
Gravilla	586	553	522
Garbancillo	549	527	497
Arena	784	736	700
Agua	185	200	215
Cemento	335	352	396

Idénticos cálculos se repiten para el tercer tamaño máximo a estudiar que es el de 15 mm.

Resistencia 125 kp/cm²			
Consistencia	Seca	Plástica	Fluida
Garbancillo	1.050	1.000	970
Arena	1.020	1.008	941
Agua	150	179	200
Cemento	237	258	287

Resistencia 250 kp/cm²			
Consistencia	Seca	Plástica	Fluida
Garbancillo	985	965	926
Arena	934	893	858
Agua	195	215	225
Cemento	349	371	410

Una vez calculadas las dosificaciones se procedió a la fabricación de las correspondientes amasadas en el Laboratorio. Se hicieron diez probetas de cada una de ellas. Cinco por el procedimiento normal y cinco por el de revibrado. De cada cinco, dos se destinaron para romper a 7 días y las tres restantes para 28 días.

Para la fabricación de las probetas se ha seguido la norma UNE 7 240. Las destinadas a proceso normal se separaron y las de revibrado se sometieron a la acción de un vibrador por la parte exterior de la probeta durante 10 segundos, cada media hora.

A fin de unificar criterios, esta acción se repitió cuatro veces, o sea, este proceso duró dos horas.

A las 24 horas se desenmoldaron y se conservaron en cámara de húmedo con el 95 % de humedad y una temperatura que oscilaba entre los 20 y 22°C.

En relación con el revibrado ha de decirse que la acción se ha realizado con un vibrador en U, de forma que las guías laterales abarcaban el molde. En las consistencias seca y plástica, el procedimiento iba bastante bien, aunque con algunas dificultades.

Las vibraciones se lograron reducir hasta unos 3.500 ciclos ya que con valores superiores había grandes dificultades en la realización del trabajo. Cuando la masa de hormigón se reducía se rellenaba con hormigón y se volvía a enrasar.

En el caso de los hormigones fluidos, la acción del revibrado, con vibrado exterior, no resultó, por cuanto que se producía segregación en las probetas, como pudo comprobarse en las probetas rotas.

Para solucionar el problema se pensó en la mesa de sacudidas. Se programaron para 10 golpes, esto es en total, se le dieron 40 golpes. Al descender el hormigón se rellenaba el molde.

Hay que presentar en relación con este punto, que esta acción de relleno es solamente necesaria en la primera revibración y que aún así el descenso de la masa en la probeta era muy pequeño, hasta el punto que el añadido que se hacía a la probeta era mortero únicamente, ya que la parte a cubrir apenas si alcanzaba 1 mm.

Después se han roto las probetas a 7 y 28 días, refrentándolas previamente con azufre fundido.

Los resultados se expresan a continuación. Con cemento B.

TAMAÑO MAXIMO 40 mm

	7 días			28 días		
	N	R	%	N	R	%
Resistencia 125 kp/cm²						
Seca	108	137	27	149	191	28
Plástica	101	123	22	143	176	23
Fluida	107	119	11	157	177	13
Resistencia 250 kp/cm²						
Seca	216	282	30	289	374	29
Plástica	198	251	27	276	336	24
Fluida	206	256	24	272	342	26

TAMAÑO MAXIMO 25 mm

	7 días			28 días		
	N	R	%	N	R	%
Resistencia 125 kp/cm²						
Seca	109	146	33	139	185	35
Plástica	113	147	28	144	184	28
Fluida	102	129	26	132	171	27
Resistencia 250 kp/cm²						
Seca	198	258	31	265	339	29
Plástica	211	276	30	273	351	30
Fluida	216	277	27	269	338	25

TAMAÑO MAXIMO 15 mm

	7 días			28 días		
	N	R	%	N	R	%
Resistencia 125 kp/cm²						
Seca	108	144	34	139	185	32
Plástica	99	133	31	131	169	28
Fluida	103	136	28	142	176	23
Resistencia 250 kp/cm²						
Seca	184	252	37	257	348	35
Plástica	195	254	33	269	354	31
Fluida	201	261	31	263	350	32

CON CEMENTO C**TAMAÑO MAXIMO 40 mm**

	7 días			28 días		
	N	R	%	N	R	%
Resistencia 125 kp/cm²						
Seca	111	150	34	159	206	30
Plástica	109	145	31	161	208	30
Fluida	113	146	27	166	202	24
Resistencia 250 kp/cm²						
Seca	208	282	36	294	388	22
Plástica	203	270	32	289	380	31
Fluida	217	275	28	278	354	26

TAMAÑO MAXIMO 25 mm

	7 días			28 días		
	N	R	%	N	R	%
Resistencia 125 kp/cm²						
Seca	113	151	35	148	196	33
Plástica	116	154	30	136	181	32
Fluida	114	149	29	151	189	28
Resistencia 250 kp/cm²						
Seca	203	277	38	289	391	35
Plástica	223	301	35	285	383	34
Fluida	211	282	32	277	354	29

TAMAÑO MAXIMO 15 mm

	7 días			28 días		
	N	R	%	N	R	%
Resistencia 125 kp/cm²						
Seca	116	155	37	151	203	34
Plástica	107	144	35	156	210	35
Fluida	114	146	31	147	189	28
Resistencia 250 kp/cm²						
Seca	201	284	43	273	378	38
Plástica	198	276	38	281	389	39
Fluida	207	274	33	279	366	31

Las conclusiones que pueden deducirse de esta serie de ensayos en hormigones son las siguientes:

- 1.º Los incrementos por revibrado en hormigones son más acusados con el cemento C, que con el B.
- 2.º Como regla general, los incrementos son más sensibles con dosificaciones altas (250 kp/cm²) en cemento que con bajas (125 kp/cm²).
- 3.º Los incrementos son mayores para tamaños máximos inferiores (15 mm) que con los superiores (40 mm).
- 4.º Los aumentos de resistencia son menores para consistencia fluida, que para seca en todos los casos.
- 5.º A 7 días, los incrementos son menores que a 28 días.

II.4. Prefabricados

La realización de estas pruebas en prefabricados ofrecía gran interés por:

- Proceso mecanizado y por tanto regularizado.
- Facilidad a la hora de aplicar el revibrado, por ser el proceso de vibrado normal el de mesa vibratoria.
- Posibilidad de conocer los incrementos de resistencia mediante ensayos y controles.
- Posibilidad de que sea factible su utilización desde un punto de vista económico por ser los gastos de revibrado mínimos.

La ocasión para la realización de estas experiencias, se presentó cuando una Empresa de prefabricados había de realizar unas vigas autorresistentes situadas en un medio agresivo constituido por aguas selenitosas con una concentración de SO₄⁼ de 7.800 mg/litro.

En este caso era condición imprescindible la utilización de un cemento P-Y. Se eligió para ello el cemento C.

El hormigón debía tener una resistencia mínima a 28 días de 350 kp/cm². El tamaño máximo del árido debía ser 12 mm. El hormigón se sometía a curado a vapor a fin de que sus resistencias a las 24 horas fuesen como mínimo de 250 kp/cm², a fin de poder destensar.

Los áridos empleados fueron:

TAMICES	GRAVILLA	GARBANCILLO	ARENA
Luz de malla en mm	% pasa	% pasa	% pasa
19,1	100	100	100
12,7	77	100	100
9,5	8	82	100
6,3	0	31	100
4,76	0	13	92
2,00	0	0	73
0,84	0	0	47
0,42	0	0	21
0,21	0	0	8
0,149	0	0	4
0,074	0	0	0

Por los análisis efectuados a las muestras, (terrones de arcilla, sulfatos, materia orgánica, finos que pasan por el tamiz 0,08, material que flota en un líquido de densidad 2,0), puede decirse que los áridos cumplen las normas marcadas en la instrucción del hormigón.

La dosificación por metro cúbico queda como sigue:

Cemento	416
Agua	180
Gravilla	671
Garbancillo	453
Arena	739
Relación a/c	0,43
Densidad	2,4

Se hicieron las probetas correspondientes dando los siguientes resultados:

3 días	192 kp/cm ²
7 días	277 kp/cm ²
28 días	381 kp/cm ²

Estos resultados son media de tres roturas cada uno de ellos. Otras tres probetas se curaron a vapor y se rompieron a 24 horas. La medida de resultados fue de 16 kp/cm², valor suficiente para la realización del destensado que era de 250 kp/cm².

En la dosificación anterior estaban utilizando 380 kp/cm² de un P-450. La diferencia entre una y otra es de 36 kp.

Con estas premisas se inició la experiencia. El encofrado de la viga estaba dispuesto de forma que en la parte baja y lateralmente, tenía vibradores con funcionamiento automatizado.

Una vez terminado el hormigonado y transcurrido el tiempo de fraguado, se cubría con unos elementos metálicos y se procedía al curado a vapor.

Con la dosificación que se estaba utilizando a base de un cemento P-450 se estableció el proceso de revibrado de la siguiente forma:

Una vez colocado el hormigón y enrasado el molde, se esperó media hora, al final de la cual y durante 10 segundos se sometió a vibración.

En este proceso apenas si bajó el nivel del hormigón. Este revibrado se repitió otras dos veces más, con una diferencia de tiempo entre uno y otro de media hora.

Encima del molde se colocaron seis probetas y otras seis se pusieron abajo, de forma que las primeras recibieran el proceso de revibrado y las otras no. Una vez finalizado, se siguió el proceso de forma normal. Se sometió a curado a vapor y se rompieron las probetas a las 26 horas. Los resultados fueron los que siguen:

Probetas sin revibrado	318 kp/cm ²
Probetas con revibrado	365 kp/cm ²

Esto supone un aumento de resistencias del 14 %. En las probetas rotas a 28 días se registró el siguiente incremento:

Probetas sin revibrado	383
Probetas con revibrado	432

Esta diferencia significa un 13 % de aumento.

A continuación se repitió el proceso, pero utilizando el cemento P-350-Y (C).

Se realizaron las mismas operaciones que antes y los resultados fueron los que siguen a las 26 horas:

Probetas sin revibrado	285
Probetas con revibrado	362

Esto supone un aumento del 27 %.

A los 28 días los resultados fueron:

Probetas sin revibrado	367
Probetas con revibrado	448

Como puede verse, la acción del revibrado significa un incremento efectivo de resistencias, en este caso del 22 %. Los aumentos no son tan fuertes como los ensayos realizados en el laboratorio, pero sí lo suficientemente importantes como para ser tenidos en cuenta.

Por otra parte, los gastos son mínimos, ya que la acción del revibrado se hace de forma automática y en tres fases, cada una de ellas de 10 segundos.

Aplicaciones en la edificación

Hasta aquí todo el desarrollo experimental ha tenido lugar en el laboratorio o instalaciones industriales. Quedaba por sancionar el método con aplicaciones prácticas y directas en la edificación.

Para ello se eligió una estructura normal. Los elementos que se daban en la misma eran: pilares, vigas y forjados.

De estos tres, solamente dos, los primeros, tienen unos encofrados y disposición como para permitir la acción del revibrado. A la hora de actuar se eliminó la parte de vigas, por la dificultad de realizar un buen vibrado y la disposición del encofrado. Quedaba por tanto únicamente los pilares.

El hormigón que se estaba poniendo en estos elementos era de resistencia característica = 175 kp/cm² y del tipo C (exento de AC₃ y alta suma de silicatos), consistencia plástica, (asiento en el cono 5 cm), áridos rodados, (en la composición entraban grava, grava y arena), el tamaño máximo era de 30 mm, y por último, el hormigón era preamado.

La colocación en el elemento era mediante vibrado y puede considerarse como buena. Para la acción del revibrado se pensó en la aplicación del vibrador por los laterales del encofrado y a todo lo largo del mismo.

Se eligieron seis pilares que iban a hormigonarse de una sola vez. Tres seguirían un proceso normal, y los otros tres serían revibrados. Una vez colocado el hormigón en los seis elementos, se aplicó durante 10 segundos y cada media hora, durante dos horas el vibrador lateralmente y a todo lo largo del pilar de forma que se actuaba sobre cada una de las cuatro caras de forma consecutiva. Además se sacaron probetas según UNE 7 240.

Los resultados fueron:

A 7 días 146 - 149

A 28 días 207 - 204 - 211 - 203

Para ver si había alguna diferencia entre los seis pilares a los 7 días se realizó un estudio esclerométrico, según las indicaciones del Dr. Tobío en su libro "Ensayos no destructivos". Los resultados fueron similares en los seis elementos y oscilan entre 137 y 154.

A los 28 días se volvió a repetir el ensayo sucediendo lo mismo. Los valores oscilaban entre 215 y 225 kp/cm² (en probetas cilíndricas).

Como se trataba de pilares de última planta, se apearon dos de ellos (uno normal y otro revibrado). Se sacaron seis probetas testigo cilíndricas a lo largo de cada uno de ellos. En el corte de las probetas podía observarse que había uniformidad en las granulometrías y no se notaron diferencias entre unas y otras.

Los resultados fueron:

	Pilar normal	Pilar revibrado
N.º 1	194	186
N.º 2	188	209
N.º 3	194	183
N.º 4	185	206
N.º 5	197	181
N.º 6	186	195

Los datos van dispuestos de forma que el más bajo (1) corresponde a la parte baja, y el más alto (6) a la más alta.

Como puede verse, no hay diferencias notables entre un procedimiento y otro.

En un principio se pensó en un defecto en el proceso de revibrado, para lo cual se dispuso un nuevo ensayo. Todo fue idéntico al anterior, únicamente que el revibrado se hizo aplicándolo sobre las cuatro caras, y en cada una de ellas, cinco segundos. Verificadas las pruebas de resistencias a los 28 días con esclerómetro en los seis pilares, no se apreció diferencia:

No pudieron apearse los pilares, pero en los datos esclerométricos aparecía una cierta dispersión en los pilares revibrados: por lo que parecía en principio que podría haber habido una segregación en el hormigón que hubiese sido provocada por el revibrado.

Por último, se hizo el sistema de revibrado aplicándolo directamente sobre la masa de hormigón durante 10 segundos.

La primera y segunda vez se pudo hacer, aunque sin llegar al fondo del pilar. A la tercera aplicación quedaba la señal del vibrador como consecuencia de un aumento de rigidez de la masa. Por tanto, sólo se aplicó en dos pilares dos veces el revibrado.

Los resultados fueron asimismo desalentadores y en este caso pudo apreciarse una gran dispersión en los resultados esclerométricos en los pilares revibrados, entre la parte baja y la alta.

Se apearon estos dos pilares y pudo comprobarse que había una segregación intensa en la parte alta de los pilares, lo cual provocaba alteración de resistencia, pero en sentido descendente.

En resumen, puede decirse que una aplicación directa a obra de este método no logró encontrarse por la dificultad de hallar un buen método de revibrado.

Por otra parte, la aplicación lateral del vibrador además de encerrar dificultades para el operario, en algunos casos alteraba la disposición y verticalidad de los encofrados.

Como puede verse, existen grandes dificultades a la hora de aplicar el revibrado a una obra normal. Por otra parte, un posible aumento de resistencias no compensaría seguramente el aumento de coste por mano de obra a utilizar para la acción del revibrado.

Asimismo, no hay posibilidad de establecer un control real sobre los incrementos de resistencia. Había que basarse en cálculos empíricos de dudosa aplicación a un control de obra.

III. CONCLUSIONES

- En el proceso de hidratación del cemento se producen alteraciones cristalinas y cambios de volumen que consumen una energía de signo contrario a la que origina el aumento de resistencias.
- Los silicatos tricálcicos y bicálcicos son los constituyentes que más cambios de volumen pueden producir en el conjunto desde un punto de vista teórico. En este estudio se demuestra que el factor que más contribuye al aumento de resistencias con el revibrado, es la suma de silicatos y en especial el contenido en silicato tricálcico.
- El aluminato tricálcico no tiene influencia alguna en los incrementos de resistencias. En este punto se difiere de otros autores que consideran importante la contribución de este componente.
- En morteros pueden conseguirse aumentos de resistencias entre el 20 y el 40 %, siendo función de la composición mineralógica del cemento. El proceso de revibrado no debe ser superior a cinco ciclos.
- En hormigones, los aumentos de resistencias son variables, siendo función del tipo de conglomerante. Influye también la cantidad de cemento por metro cúbico, (a más cantidad, mayor incremento); el tamaño máximo del árido, (a mayor tamaño menos in-

cremento de resistencia); la consistencia, (las secas y plásticas, tienen más incremento que la fluida) y por último, a 7 días los incrementos son menores que a 28 días.

- En la edificación no tiene aplicación directa el procedimiento por dificultades de control, de aplicación del revibrado, encarecimiento, segregación, etc.
- En la industria de prefabricados se consiguen aumentos sustanciales de resistencias del orden de un 15/25 %, siendo función este aumento de las mismas variables que en el apartado del hormigón.

IV. CITAS BIBLIOGRAFICAS

- (1) C. AVRAM, N. VOINA y O. MIRSU: La influencia de la revibración sobre las propiedades de la pasta de cemento endurecida y de los hormigones. *Revue des Matériaux de Construction*, núm. 619, págs. 141-153, (1967).
- (2) K. A. EVERARD and K. B. BHAGAT: Los efectos de la revibración del hormigón sobre su resistencia a compresión y su módulo de elasticidad. *Indian Concrete Journal*, núm. 8, pás. 346-351, (1970).
- (3) J. CALLEJA: Importancia de la microscopía del clínker. *Materiales de Construcción, Ultimos Avances*, núm. 147, (1972).
- (4) MANUEL DE LUXAN BAQUERO: Otros cementos con base Portland. Los ternarios. *Cemento-Hormigón*, número 476, (1973).
- (5) BLONDIAU: L. *Rev. Mat. Const.* núm. 524, págs. 189-200, (1961).
- (6) RC-75: Pliego de prescripciones técnicas generales para la recepción de cementos.
- (7) J. M. FERNANDEZ PARIS: Microscopía del clínker de cemento Portland. *Publicaciones I.E.T.c.c.*, (1968)
- (8) FRANCISCO SORIA SANTAMARIA: Cementos: Problemática actual. *Cementos especiales. Revista Cemento-Hormigón*, págs. 602, (1973).
- (9) J. CALLEJA: La estructura del clínker de cemento Portland. *Monografía del I.E.T.c.c.*, (1954).
- (10) Criterios sobre roturas para cementos. *Materiales de Construcción. Ultimos Avances*, núm. 128, (1967).
- (11) J. CALLEJA: Consideraciones sobre el cálculo de la composición potencial de los conglomerantes hidráulicos. *Materiales de Construcción. Ultimos Avances*, núm. 125, (1967).
- (12) H. F. W. TAYLOR: Silicatos cálcicos hidratados. *La química de los cementos*. Vol. 1. Edic. Urmo, (1967).
- (13) L. HELLER y H. F. W. TAYLOR: *Crystallographic Data for the calcium silicates*. Hmso. Londres, (1956).
- (14) G. BROW: *The X-ray Identification and Crystal Structures of clay minerals*. 2.^a edic. pag. 544. *Mineralogical Society*, Londres, (1961).