

Preparación de la dosificación de un hormigón con humo de sílice, cuya RMC¹ sea > 40 kp/cm², a edades iniciales (5-10 horas)

M. R. BOLLATI*, R. TALERO* y F. HERNÁNDEZ-OLIVARES**
(*) Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja-CSIC
(**) E. T. S. de Arquitectura de Madrid

Fecha de recepción: 25-XI-97
Fecha de aceptación: 7-IV-98

ESPAÑA

RESUMEN

Al humo de sílice (HSE) o microsilíce, se le relaciona, principalmente, con la preparación de hormigones de alta resistencia. Esta peculiar característica, ha justificado su utilización -junto a cemento portland (un I-42,5/SR,MR) y un aditivo superfluidificante- en la preparación de un hormigón cuyo valor de resistencia mecánica a compresión a edades iniciales (5 a 10 horas, solamente) fuera superior a 40 kp/cm², en lugar de prepararlo con dicho cemento portland y un acelerador de fraguado o dosificación "patrón".

Las técnicas experimentales utilizadas para alcanzar dicho objetivo han sido: la energía de ultrasonido y una prensa para la rotura de probetas de 30x15 cm, de 200 t de carga máxima. Mediante la primera de las técnicas, el sistema de tanteo y en tan sólo 25 días, se logró preparar hasta un total de 13 dosificaciones diferentes, las cuales fueron comparadas con dicha dosificación "patrón" y otras dos que no poseían ni acelerador de fraguado, ni HSE; es decir, que habían sido preparadas con el mismo cemento portland, los mismos áridos gruesos y finos y la misma consistencia plástica, las cuales actuarían como "referencia" de todas las anteriores.

De esta manera se logró la dosificación buscada, la E, en este caso, que fue la misma que la "patrón" en cuanto a la cantidad de áridos-gruesos y finos (arena), que no, en cambio, en cuanto a la cantidad de cemento portland utilizado, la cual pasaría a ser de 360 kg/m³ en lugar de 400 kg/m³, de HSE, que fue de 40 kg/m³, y de agua de amasado, que fue de 144 l/m³.

SUMMARY

Silica fume (SF) or microsilica is related mainly with preparation of High Resistance Concrete. This has justified its use -together with portland cement (I-42.5/SR,MR) and an superfluidifying additive- in the preparation of a concrete whose value for compressive mechanical resistance at early ages (only 5 to 10 hours) is higher than 40 kp/cm², instead of preparing it with the portland cement plus a setting accelerator or "model" dosage.

The experimental techniques used to reach that objective have been: ultrasound energy and a press for breaking 30 x 15 mm specimens, and a maximum load of 200 t. With the first technique, in only 25 days, 13 different dosages were prepared, which were compared to the "model" dosage, and two more that did not contain neither setting accelerator nor SF, this means that they had been prepared with the same portland cement, same fine and coarse aggregates and the same consistency, and that they would act as "reference" for all previous ones.

In such a way the dosage was found: E, in this case, that was the same as the "model" as for the amount of fine and coarse aggregates, but not as for the amount of the portland cement used which this time was 360 kg/m³ instead of 400 kg/m³, SF content 40 kg/m³, and water 144 l/m³.

1) Resistencia Mecánica a Compresión

1. INTRODUCCIÓN. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Introducción

Como es sabido, la determinación del tiempo de fraguado de un conglomerante hidráulico se realiza mediante el método de la Aguja de Vicat(3). Con esta técnica, se obtienen y deducen algunas características y propiedades de la pasta de cemento únicamente que, por lo común, se extrapolan- en gran medida- al hormigón, cuando, en realidad, son materiales muy diferentes. Resultando que la acción conjunta que sobre la pasta de cemento ejercen el resto de los componentes del hormigón, a saber:

- los **áridos**, gruesos y finos, ya sean éstos de naturaleza ácida o básica, rodados o de machaqueo, y su absorción de agua y aditivos, entre otras características, y/o

- las **adiciones**,

. **activas**: escorias siderúrgicas, puzolanas naturales y artificiales y, entre éstas, más concretamente cenizas volantes, humo de sílice, esquistos calcinados, etc., ya sean silícicas, aluminicas, férricas, silico-aluminosas, aluminosilícicas, etc. (4), y

. **menos activas** o mal llamadas **inertes**: filler (calizo o silíceo) y/o

- los **aditivos**: reductores de agua, de mediana o alta actividad (superfluidificantes), aireantes, aceleradores, retardadores de fraguado, etc.

puede, en ocasiones, cambiar notoriamente los tiempos de fraguado y endurecimiento de la primera, así como también su reología inicial, la cual afecta a su trabajabilidad y a las condiciones de puesta en obra.

Por otra parte, las proporciones volumétricas de las fases de la pasta de cemento y del hormigón son totalmente distintas, por lo que no cabe realizar extrapolación alguna entre un material y otro.

Por ello, y para conocer la acción conjunta que todos y cada uno de tales componentes del hormigón (y, en el caso de los aditivos, centrando la atención, en esta ocasión, en los reductores de agua de alta actividad, según el objetivo de esta investigación) ejercen sobre su fraguado y endurecimiento, fue necesario utilizar una nueva técnica

ca experimental para hormigones, que no es destructiva y que se denomina "**energía ultrasónica**"(5).

Esta técnica de la energía ultrasónica, consiste en hacer pasar un haz de ondas ultrasónicas a través de una probeta de hormigón *densificado*² previamente, en las mismas condiciones de obra. Como la energía emitida por el transductor-emisor es constante, la que recibe el transductor-receptor, será igual a la emitida menos la absorbida o reflejada por el hormigón que se ha preparado menos las pérdidas; es decir,

$$E_{\text{emitida}} = E_{\text{absorbida}} + E_{\text{recibida}} + \text{pérdidas}$$

Como las "pérdidas" se pueden considerar mínimas y prácticamente nulas, dados los equipos que se utilizan, al final, nos quedaría que:

$$E_{\text{emitida}} = E_{\text{absorbida}} + E_{\text{recibida}}$$

En tal sentido, hay que considerar, además, que como el volumen de la probeta y la distancia y presión de los transductores sobre la misma son constantes, al igual que el resto de las condiciones del ensayo, dichas pérdidas no afectan en nada a la resultante de la determinación.

Y todo ello en base a que la energía ultrasónica es un parámetro físico que tiene en cuenta la atenuación que sufre, en todo instante y desde el momento inicial, el haz de ondas ultrasónicas al atravesar el hormigón recién preparado y en estado fresco.

Esta técnica permite encontrar, desde el momento inicial de la fabricación de una probeta de hormigón, una relación entre su resistencia mecánica y los productos de hidratación que se generan en la misma. Por ello y, en un cierto sentido, permite conocer, en alguna medida, su más que probable comportamiento mecánico-resistente ulterior, ya sea éste inmediato o más tardío.

Planteamiento del problema

En la construcción de una determinada presa de hormigón compactado con rodillo, HCR, se empleó un hormigón vibrado (HV) que se utilizó como encofrado de confinamiento de las diversas capas del primero, o sea, del HCR. La dosificación "patrón", P1a, que se propuso del HV, en base a utilizar como conglomerante hidráulico el cemento portland en exclusiva con un acelerador de fraguado, fue la siguiente:

2) La acción física resultante de un proceso de vibración, compactación, vibro-compactación, picado, etc., del hormigón, es su dosificación. En consecuencia, es más adecuado este término que la inadecuada traducción del término anglosajón "compacted concrete".

DOSIFICACIÓN PATRÓN (kg/m ³) = P1a	
Árido 15/30	760
Árido 5/15	390
Arena	800
Cemento: I-45 SR-MR	400
Agua	180
Acelerante: lubracel	35,25

2. OBJETIVO

Conseguir la dosificación de un hormigón, pero, esta vez, en base a la utilización de cemento portland, humo de sílice español, HSE, y un aditivo superfluidificante, que, a las 6 horas de preparado y compactado, proporcionase un valor de resistencia mecánica a compresión, RMC, > 40 kp/cm², medida en probeta cilíndrica de 15x30 cm.

3. PARTE EXPERIMENTAL

Los resultados del análisis químico (1) y la composición potencial, según Bogue (2), del cemento portland I-45/SR,MR(3), utilizado para preparar la dosificación patrón, fueron los siguientes:

-Análisis químico: P.F.=3,04%; R.I.=0,08%; SiO₂=19,57%; Al₂O₃=4,26%; Fe₂O₃=3,86%; CaO=63,97%; MgO=1,5%; SO₃=3,53%;

-Composición potencial: C₃S=63,1%; C₂S=8,51%; C₃A=4,76% y C₄AF=11,75%.

Por otra parte, los resultados del análisis químico del HSE, fueron los siguientes: P.F.=4,00%; R.I.=0,20%; SiO₂=90,26%; Al₂O₃=0,57%; Fe₂O₃=1,05%; CaO=1,22%; MgO=1,00%; Na₂O=0,90%; K₂O=1,50%; SO₃=0,00%.

Los áridos gruesos y finos empleados fueron silíceos, de machaqueo, mientras la consistencia del hormigón fue plástica.

Conocidos dichos datos, todo el procedimiento experimental de este trabajo se dividió en dos partes: una primera, en la que se analizó y estudió -mediante energías ultrasónicas- la evolución del fraguado de diferentes dosificaciones de hormigones que habían sido previamente programadas; y otra segunda, en la que se cuantificó y determinó, en definitiva, la variación de los correspondientes valores de RMC a edades iniciales (horas), de cada una de

ellas, eligiendo, finalmente, la más adecuada de acuerdo con el parámetro **alta RMC_i³/coste**. La determinación del valor de la **RMC_i³** de cada probeta, se obtuvo mediante una prensa de 200 t de carga máxima.

Dado el objetivo de esta investigación y teniendo en cuenta la dosificación "patrón", **P1a**, véase al final del apartado 1, se prepararon sendas familias de cuatro probetas cada una, sin acelerador de fraguado -dosificaciones: **P11** y **P12**, respectivamente, véase el cuadro 1- para determinar, en una de cada cuatro probetas de 15x30 cm, la evolución de su fraguado mediante la energía de ultrasonido. En el resto -tres probetas- su endurecimiento, mediante la determinación de su **RMC_i**. Los resultados experimentales de ambas dosificaciones, actuarían como "referenciales", tanto para la dosificación "patrón" **P1a**, como para la dosificación del hormigón que se trataba de obtener, según el objetivo de esta investigación, mediante:

- la inclusión de HSE y de un superfluidificante,
- la exclusión del acelerador de fraguado utilizado para preparar dicha dosificación "patrón" o **P1a**.

Y, para llegar a la misma, cabía la posibilidad de obtener, en principio, más de una posible, aunque, no obstante, todas ellas habrían de tener:

- por un lado, un principio, fin y tiempo de fraguado,
- por otro y, sobre todo, unos valores de resistencias mecánicas a igualdad de entorno de edad inicial(horas), que habría(n) de ser inferiores y superiores, respectivamente, a los proporcionados por la dosificación "patrón".

4. RESULTADOS

4.1. De la Parte 1ª

En el Gráfico 1 se muestra la evolución del fraguado de algunos de los hormigones estudiados, determinado mediante energía de ultrasónica.

En el Gráfico 2 se presentan los resultados obtenidos al evaluar las resistencias mecánicas a compresión de algunos de los hormigones respecto al tiempo transcurrido desde su compactación, en horas.

Del análisis de estos Gráficos, se pudo seleccionar con rapidez, aquellas dosificaciones que, en principio, parecían ser las más interesantes, según el objetivo de esta investigación y el parámetro **alta RMC_i/coste**, antes aludido. Tales dosificaciones seleccionadas, fueron las siguientes:

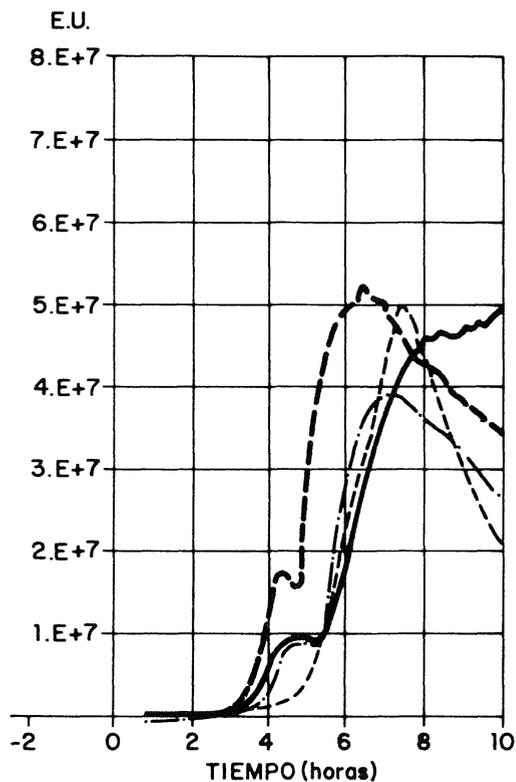
3) Resistencias Mecánicas a Compresión a edades iniciales (horas).

CUADRO 1

DOSIFICACIONES HORMIGÓN VIBRADO: FRAGUADO RÁPIDO

Datos			Componentes (kg/m ³)								Relación Árido/arena	Relación Agua/conglomerante	Relación liq./conglomerante	Relación Micros./conglomer. %	Resistencias a compresión (kg/cm ²)			Densidad húmeda gr/cm ³	Denominación
Fecha	Temp. amasado °C	Temp. ensayo °C	Cemento Portland I-45	Micro- silice	Árido (5/15)	Árido (15/30)	Arena	Agua	Superf.	Acele- rante					(a) horas	(b) horas	(c) horas		
06/06/94	20	20	400	-	390	760	800	164	-	-	1,44	0,41	0,41	-	-	-	2,44	P11	
07/06/94	20	20	400	-	390	760	800	164	-	-	1,44	0,41	0,41	-	24,6(6h)	71,6(8h)	240,7(24h)	2,44	A
07/06/94	21,2	20	360	40	390	760	800	164	-	-	1,44	0,41	0,41	10	20,0(6h)	51,5(8h)	158,3(24h)	2,39	B
14/06/94	21	20	360	40	390	760	800	144	6,3	-	1,44	0,36	0,38	10	-	-	-	2,44	E
15/06/94	22	20	324	40	430	760	800	131	5,5	-	1,49	0,36	0,38	11	-	-	-	2,44	F
16/06/94	21,5	20	324	40	430	760	800	118	4,9	-	1,49	0,39	0,34	11	-	-	-	2,44	G
17/06/94	22	20	342	40	410	760	800	118	5,2	-	1,46	0,31	0,32	11	-	-	-	2,44	H
20/06/94	28	20	360	60	390	740	800	149	5,7	-	1,41	0,35	0,37	14,3	-	-	-	2,41	I
22/06/94	26,5	20	360	60	390	740	800	149	5,7	-	1,41	0,35	0,37	14,3	-	-	-	2,41	J
23/06/94	26,4	20	400	-	390	760	800	164	-	-	1,44	0,41	0,41	-	32,8(6h)	44,2(7h)	55,8(9h)	2,31	P12
23/06/94	27	20	360	40	390	780	800	144	5,4	-	1,44	0,36	0,37	10	9,7(5h)	48,7(7h)	80,6(9h)	2,40	E1
24/06/94	26,9	20	360	40	390	760	800	140	5,4	6	1,44	0,35	0,38	10	-	-	-	2,37	K
27/06/94	26,5	20	360	40	390	760	800	109	5,4	35,3	1,44	0,35	0,37	10	-	-	-	2,43	L
28/06/94	27	20	360	40	390	760	800	144	6(*)	-	1,44	0,36	0,38	10	-	-	-	-	E2
01/07/94	25,8	20	360	40	390	760	800	144	6	-	1,44	0,36	0,38	10	-	-	-	2,43	E3

Dosificación Patrón	Otros productos que se utilizaron
Árido 15/30 760 kg/m ³ 5/15 390 kg/m ³ Arena 0/5 800 kg/m ³ Cemento I-45 400 kg/m ³ Agua 180 l/m ³ Acelerante 35,25 l/m ³ (Lubrancel-Bettor)	<u>Superfluidificante:</u> A base de Melamina: Sikament 300 A base de Naftaleno sulfonado: Eucoplast 200 (*ensayo realizado con) HSE: suministrada por el peticionario



LEYENDA: DOSIFICACIONES		CÁMARA CLIMÁTICA	
P11 ó P12	—	TEMPERATURA:	20°C
E	- - -	HUMEDAD:	60%
P1a	· · ·	VELO. VIENTO:	4 km/h
H	- · - ·	INT. INTEGRAC.:	210

Gráfico 1.- Evolución del fraguado del hormigón a edades iniciales.

-Dosificaciones que mostraron un tiempo de fraguado superior al de las "referenciales" P11 y P12: la E1, E, E3 y H.

-Dosificación que mostró un tiempo de fraguado igual al de las "referenciales" P11 y P12: la G.

De todas ellas y de acuerdo con sus resultados de energía de ultrasonido y la relación alta RMC/coste acabada de

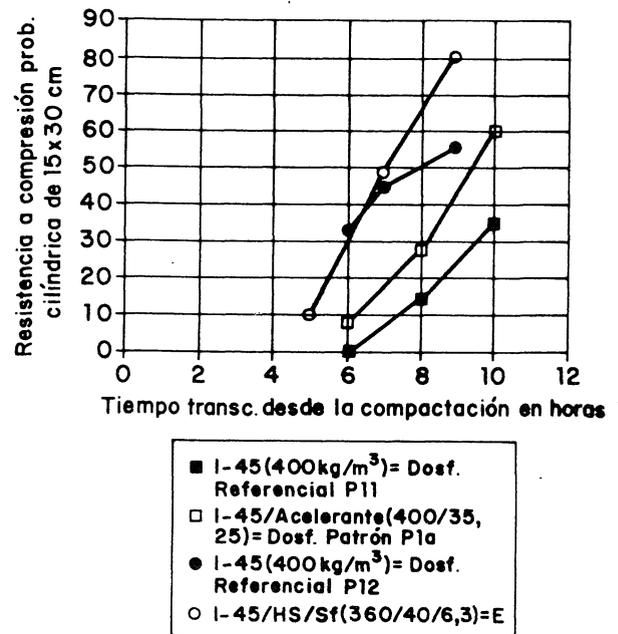


Gráfico 2.- Evolución de la resistencia a compresión a edades iniciales.

citar, resultaron ser las más interesantes la E y la H, pero, en especial, la primera, por su clara supremacía en el primer parámetro citado, lo que proporcionaba una mayor seguridad de consecución del objetivo pretendido mediante esta investigación.

4.2. De la Parte 2ª

Antes de todo comentar, respecto de la dosificación E, que la misma se repitió por tres veces, incluso para verificar la constancia del material durante su fraguado, si bien la determinación de las resistencias mecánicas a compresión se realizó únicamente sobre una sola familia de tres probetas. Los resultados experimentales obtenidos de dicha familia y de las demás familias "patrones" P11 y P12, con las que se comparaba, pueden verse en el cuadro 2 y en el gráfico 2.

CUADRO 2

Valores de RMC_i v Tiempo (horas, h)

Dosificaciones:	Designación	5h	6h	7h	8h	9h	10h
1-45/Acelerante (400/35,25) Patrón	P11		0	14,2	14,2		35,1
1-45(400 kg/m ³) Referencial	P1a		7,9	27,7	27,7		60,5
1-45 (400 kg/m ³) Referencial	P-12		32,8			55,8	
1-45/HS/Sf (360/6,3) Propuesta	E	9,7				80,6	

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Con la dosificación E, determinada mediante la energía de ultrasonido, se consiguió alcanzar el objetivo que se pretendía en esta investigación, gracias a la utilización del humo de sílice y del aditivo superfluidificante empleado.

Por otra parte, con la dosificación "patrón", P1a, se obtuvieron en el laboratorio mayores valores de densidad,

así como también de RMC a tales edades iniciales, las cuales, no obstante, no llegaron a superar, en ningún caso, los resultados obtenidos mediante la citada dosificación E.

El aumento de densidad y RMC de la dosificación "patrón" P11, fue debido, muy posiblemente, al sistema de vibrocompactación utilizado en el laboratorio de "Hormigones" del IETCC, mediante el cual se consigue una mejor y más compacta distribución y posicionamiento de los áridos y de la pasta cementante del hormigón.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Norma UNE 80-215-88: "Método de ensayo de cementos. Análisis químico de cementos"(3)(EN 196-2).
- (2) Norma UNE 80-304-86: "Cementos. Cálculo de la composición potencial del clínker portland".
- (3) Instrucción para la Recepción de Cementos en España RC-93(R.D. 776/1997 de 30 de mayo).
- (4) R.TALERO: "Contribución al Estudio Analítico y Físico-Químico del Sistema: Cementos Puzolánicos-Yeso-Agua".- Tesis Doctoral; Univ. Complutense de Madrid. Ftad. de C.Químicas, 20-11-86.
- (5) M.R.BOLLATI: "Properties of Roller Compacted and Vibrated Concrete at Early Ages. Evaluation Through Ultrasonic Energy Measurements".- 6th Int.Symp. on Concrete Roads,pp.83-92: Madrid,8-10 oct.,1990.

* * *