

# Hormigón de altas prestaciones (superior a 100 Mpa) para dovelas de revestimiento de túneles

LUIS AMADOR MÉNDEZ LANZA (\*), PABLO RABADÁN PRIETO (\*) y ROLANDO JUSTA CÁMARA (\*)

**RESUMEN** El presente artículo describe los pasos seguidos desde el diseño de la mezcla, su colocación en obra, el control de calidad de los componentes y el proceso de fabricación para obtener un hormigón de altas prestaciones (>100 Mpa), destinado a la fabricación de dovelas para el revestimiento de algunos tramos de los túneles de Pajares para la línea de Alta Velocidad ferroviaria entre León y Asturias.

## HIGH PERFORMANCE CONCRETE (HIGHER THAN 100 MPA) FOR TUNNEL LINING SEGMENTS

**ABSTRACT** This article describes the steps taken, both for the concrete mix design, its placing on site, the quality control of its components and the manufacturing process, to obtain a very high strength concrete (>100 Mpa), to be used in the manufacture of pre-fabricated segments for the lining in some sections of Pajares tunnels for the high speed railway line between Leon and Asturias.

**Palabras clave:** Tuneladora, Hormigón de altas prestaciones, Dovelas prefabricadas, Control de calidad exhaustivo.

**Keywords:** Tunnel boring machine, High performance concrete, Precast segments, Exhaustive quality control.

## 1. OBJETIVO

El presente artículo detalla los pasos dados tanto en el diseño de la mezcla, como en la puesta en obra y el control de calidad de los componentes y del proceso de fabricación para obtener el hormigón de altas prestaciones (>100 Mpa) utilizado en la fabricación de dovelas para el revestimiento de una parte de los túneles de PAJARES en la línea de ferrocarril de alta velocidad Madrid – Oviedo.

## 2. CONSIDERACIONES GENERALES

En primer lugar hay que señalar que el hormigón habitualmente usado en la prefabricación de dovelas ha de reunir unas características especiales como son: consistencia seca y ganancia de resistencia alta en un período corto que permitan un rápido desmoldeo de las dovelas y el uso de los moldes al menos dos veces por día. Los detalles y conclusiones que se exponen en este artículo no contemplan su empleo en otro tipo de estructuras ni otra puesta en obra, ya que las dosificaciones que aquí se detallan deberán sufrir las correcciones necesarias para otros usos donde se contemple bombeo u otras características específicas.

## 3. ENSAYOS PREVIOS

El estudio del hormigón de altas prestaciones que se pretendía conseguir se basó en las siguientes premisas:

- Utilización de materiales de la zona, siempre que fuera posible.
- Empleo de materiales ya utilizados anteriormente en la fabricación de dovelas, con el fin de facilitar la logística de la fábrica.

Para el estudio se utilizaron áridos calizos y cuarcíticos procedentes de canteras cercanas a la obra, así como ofitas y corneanas procedentes de Burgos, Navarra y Ávila. Se ensayaron distintos cementos de Tudela de Veguín procedentes de las dos fábricas cercanas a la obra, una en La Robla (11 Km) y otra en Aboño (Gijón), así como el cemento CEM I 52,5R Esp de Olazagutía con el que se había trabajado en obras anteriores con elevados requisitos de resistencia a edad temprana. En cuanto a los aditivos se emplearon aditivos superplastificantes de última generación de BASF, SIKA Y CHRYSO, así como distintos tipos de adiciones de sílice (humo de sílice, microsílice y nanosílice).

Como principales conclusiones de los estudios previos destacaremos:

- Los mejores resultados de resistencia se obtenían con los áridos cuarcíticos.
- Los cementos que permitían alcanzar mejores resistencias fueron el I 52,5 N de la fábrica de Aboño de Tudela

(\*) Acciona Infraestructuras S.A.



FIGURA 1.

de Veguín, y el cemento II A/S 52,5 N de la fábrica de La Robla de Tudela de Veguín.

- El aditivo que permitía alcanzar mayores resistencias fue el SIKA VISCOCRETE 20 HE que ya se estaba empleando en la obra en la fabricación de dovelas.
- Las distintas adiciones de sílice no permitían aumentos significativos de resistencias con los materiales anteriormente indicados.

En el siguiente apartado mostraremos las distintas características de los materiales seleccionados.

## 4 MATERIALES

### 4.1. CEMENTO

De entre los dos cementos indicados en el apartado anterior se optó por el cemento CEM II A/S 52,5 N de la fábrica de



FIGURA 2.

La Robla de Tudela de Veguín por la proximidad de la fábrica a la obra, lo que facilitaba la logística del suministro para los elevados consumos necesarios en la fabricación de dovelas.

Las ventajas que aporta este tipo de cemento frente a los cementos de tipo CEM I son:

- Físicas:
  - A igualdad de áridos la demanda de agua del hormigón es mucho menor por el efecto de dilución que produce la escoria, ya que en los primeros días la escoria funciona sólo como un árido fino que no absorbe agua y actúa de separador de las partículas de clinker, mejorando notablemente el nivel de hidratación del mismo.
  - Por otro lado los superplastificantes también actúan solo sobre el clinker, por lo que al estar diluido necesita menos aditivo.
  - La escoria no solo no necesita, sino que además actúa como de "rodamiento", lo que permite confeccionar hormigones con una relación agua/cemento A/C más baja.
- Químicas:
  - El agua se combina con los silicatos y los aluminatos, a la vez que éstos reaccionan con el  $SO_3$  para formar Etringita. Como el contenido de  $SO_3$  está limitado por la Norma, siempre sobra aluminato que se combina con 1,2 veces de agua, formando una estructura muy porosa que no da resistencias y retiene agua por capilaridad. Si el cemento lleva escoria, se produce un efecto de dilución del aluminato original, para la misma cantidad de  $SO_3$ .
  - La escoria posee un 35% de sílice amorfa que reacciona con la cal de hidrólisis, que siempre es muy abundante, pero esas reacciones son mucho más lentas que las del cemento (varios días después) por lo que se comienzan a formar hidrosilicatos de calcio y aluminosilicatos de calcio aprovechando la cal de hidrólisis que permanece suelta por la masa intersticial. Estas nuevas estructuras se van formando en los poros, grietas o fisuras que tiene la ya rígida trama de la hidratación del clinker. Estas nuevas estructuras, al ir rellenando los huecos van formando un bloque mucho más compacto, aumentando progresivamente las resistencias, notándose a partir de los 15/20 días y continuando hasta el año.

Resumiendo, el empleo de este tipo de cemento posee las siguientes ventajas:

- Permite rebajar la relación A/C.
- Baja el consumo de superplastificante.
- Permite obtener hormigones mucho más compactos.

#### 4.2. ÁRIDOS

El árido seleccionado se trata de un árido cuarcítico procedente de la cantera de Cuarcitas de Ciñera situada a unos 5 km de la obra cuyas principales características son:

- Se trata de de metacuarcitas originadas por deformación y recristalización de cuarzo-arenitas.
- La composición mineral alcanza el 99% de cuarzo, entre el 0,5 y el 1% de moscovita y menos del 1% de otros minerales accesorios como turmalina, apatito,

circón, opacos, rutilo, anatasa y más raramente anfíbol.

- Como consecuencia de la composición mineral de estas rocas, cuarzo con muy pequeña proporción de otros silicatos se puede establecer que estos áridos no presentan reactividad frente a los álcalis del cemento, ya que los minerales susceptibles de presentar dicha reactividad, clastos de lidita, no llegan a alcanzar el 1%. Dicha no reactividad ha sido comprobada mediante la realización de ensayos de reactividad álcali-sílice.
- En cuanto a la resistencia a la compresión, los ensayos de carga puntual Franklin realizados para la obtención de sello de calidad ADIF de la cantera dieron resultados medios de 2.760 Kp/cm<sup>2</sup>, lo que muestra la elevada resistencia a compresión de la roca explotada en la cantera.
- En cuanto al análisis granulométrico se debe indicar que en la fabricación de los hormigones objeto del presente artículo se han empleado dos fracciones granulométricas, a saber: arena 0/5 y garbancillo 5/12, ambas lavadas, cuyas principales características son:
  - Garbancillo 5/12:
    - Coeficiente de desgaste Los Ángeles: de 25 a 30.
    - Coeficiente de forma: 0,20-0,25.
    - Índice de lajas: entre 12 y 20.
    - Absorción de agua: en torno al 0,7%.
    - Peso específico: en torno a 2,5 t/m<sup>3</sup>.
  - Arena 0/5:
    - Friabilidad: entre 10 y 15.
    - Equivalente de arena medio: en torno a 80.
    - Peso específico: en torno a 2,5 t/m<sup>3</sup>.
    - Absorción de agua: en torno a 0,6%.
    - Módulo de finura medio: 3,0.

Aunque en un principio el árido no se ajusta a las recomendaciones recogidas en la bibliografía para los áridos destinados a la fabricación de hormigones de alta resistencia en lo referido al desgaste y a la forma del mismo, los resultados de su empleo en la fabricación de nuestros hormigones han sido muy satisfactorios.

#### 4.3. ADITIVO

El aditivo empleado es el SIKA VISCOCRETE 20 HE. La formulación del aditivo, de tipo poli-éter, se basa en largas cadenas de óxido de etileno que proporcionan gran capacidad de dispersión, junto con una corta cadena principal, constituida por pocos grupos de tipo carboxilo, que facilita el desarrollo de resistencias a edades tempranas. El elevado número de cadenas de óxido de etileno favorece la resistencia a la segregación.

Resumiendo, entre las ventajas que aporta este tipo de aditivo se pueden destacar:

- Pronunciada aptitud de compactación,
- Reducción muy importante del agua de amasado, lo que implica altas resistencias, gran impermeabilidad y gran durabilidad.
- Altas resistencias iniciales,
- Disminución de la fluencia y retracción.
- Resistencia a la carbonatación.

DOSIFICACIÓN POR Kg/m <sup>3</sup>										
DOSIFICACIÓN N°	TIPO HORMIGÓN	CUARCITA 5/12	CUARCITA 0/5	CEMENTO		AGUA LITROS	ADITIVO		RELACIÓN A/C	AMASADO SEGUNDOS
				Kgs	TIPO		LITROS	TIPO		
180	HA-80-S-12	1153	769	460	CEM II/AS-52,5 N	110	6,389	VISCOCR. 20-HE	0,24	210
180-1	HA-80-S-12	1153	769	460	CEM II/AS-52,5 N	110	8,519	VISCOCR. 20-HE	0,24	210
190	HA-90-S-12	1139	759	475	CEM II/AS-52,5 N	114	6,597	VISCOCR. 20-HE	0,24	300
190-3	HA-90-S-12	1139	759	485	CEM II/AS-52,5 N	110	8,981	VISCOCR. 20-HE	0,23	300
1100	HA-100-S-12	1125	750	490	CEM II/AS-52,5 N	118	6,806	VISCOCR. 20-HE	0,24	300
1100-1	HA-100-S-12	1303	559	500	CEM II/AS-52,5 N	120	9,259	VISCOCR. 20-HE	0,24	300
1105	HA-105-S-12	1303	559	500	CEM II/AS-52,5 N	120	11,574	VISCOCR. 20-HE	0,24	300
1105-1	HA-105-S-12	1303	559	500	CEM II/AS-52,5 N	125	12,269	VISCOCR. 20-HE	0,25	300

TABLA 1. Nave 1.

DOSIFICACIÓN POR Kg/m <sup>3</sup>										
DOSIFICACIÓN N°	TIPO HORMIGÓN	CUARCITA 12/20	CUARCITA 5/12	CUARCITA 0/5	CE- MENTO kg	TIPO CEMENTO	AGUA LITROS	ADITIVO LITROS	TIPO ADITIVO	RELACIÓN A/C
280	HA-80-B-12		1129	753	470	CEM II/AS-52,5 N	122	7,398	VISCOC. 20-HE	0,26
2100	HA-100-B-12		1303	559	500	CEM II/AS-52,5 N	120	9,259	VISCOC. 20-HE	0,24

TABLA 2. Nave 2.

## 5. DOSIFICACIONES

En las tablas 1 y 2 se muestran las distintas dosificaciones empleadas en la obra.

Y en la tabla 3 se muestra la hoja de diseño de la dosificación n° 190-3.

Observando las tablas se puede ver las modificaciones que se han ido introduciendo en las dosificaciones a raíz de la experiencia obtenida durante los trabajos. Indicamos a continuación las más significativas:

- Aumento del tiempo de amasado: durante la fabricación de los anillos se comprobó que las dosificaciones empleadas en la Nave 2 daban lugar a mayores resistencias, siendo la única diferencia la consistencia y el tiempo de mezclado ya que al tiempo de amasado se le unía los treinta minutos de transporte, así que se subió el tiempo de amasado a cinco minutos, y se aumentó la dosificación de aditivo para dar mayor fluidez a la muestra, lo que además facilita el amasado y la puesta en obra del hormigón.
- Aumento de la dosificación de garbancillo: se empezó con una relación Garbancillo/Arena de 60/40, subiéndose a 70/30 con lo que se mejoraba la puesta en obra del hormigón.

## 6. FABRICACIÓN DE HORMIGÓN

A lo largo de los trabajos de fabricación de dovelas hemos determinado un procedimiento de trabajo para la fabricación de los hormigones de muy alta resistencia con pequeñas dispersiones, teniendo en cuenta que los acopios de áridos se encuentran a la intemperie, y que el área donde se ubica la fábrica presenta una climatología complicada con largos periodos de lluvias y nieve.

Con objeto de minimizar los problemas de control del contenido de agua en los áridos se adoptaron las siguientes medidas:

- En los periodos lluviosos se controla la humedad de los áridos en cada cambio de tolva.
- Se purgan las dos primeras toneladas de árido cuando se empieza a utilizar una tolva.
- Se suprime la posibilidad de añadir agua de dilución desde el control de fabricación de la planta.
- Subida del tiempo de amasado, tal y como se ha comentado en el apartado anterior.
- Subida del aditivo superplastificante, para facilitar el amasado y la puesta en obra.

ESTUDIO DE DOSIFICACIÓN DE ARIDOS (FULLER)

PROCEDENCIA: ENSAYOS PREVIOS LABORATORIO. (HA-90-S-12)

FECHA: 20/07/2006

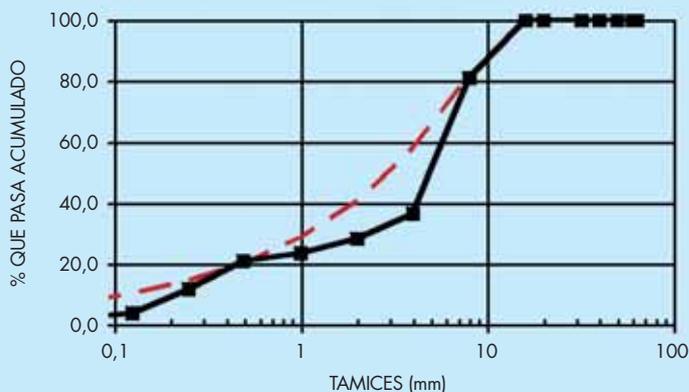
ADITIVO = SIKA VISCOCRETE 20-HE = 1,5% = 7,125 Kgs. EPL-001  
 Kg. de cemento/m<sup>3</sup> = 475 Litros de agua a añadir = 114 REL. A/C = 0,24  
 Tamaño máx. (mm) = 12 AJUSTE GRANULOMÉTRICO TEÓRICO  
 Kg. de humo/m<sup>3</sup> = 0

TABLA DE DOSIFICACIONES

	% Vol. Aridos	Vol. relat. (dm <sup>3</sup> )	Densidad (kg/dm <sup>3</sup> )	Peso (kg)	Peso litro (kg)	Vol. conjunto (dm <sup>3</sup> )	Denominación
CEMENTO		155,7	3,05	475	1,12	424	CEM II/AS-52,5-N (TUDELA)
ARIDO 1	0,00%	0,00	0,01	0	1,54	0	
ARIDO 2	40,00%	292,10	2,60	759	1,50	506	ARENA 0/5 CUARCITA LAVADA.
ARIDO 3	60,00%	438,16	2,60	1139	1,50	759	ÁRIDO 5/12 CUARCITA. (CIÑERA)
ARIDO 4	0,00%	0,00	0,00	0	1,50	0	
ARIDO 5	0,00%	0,0	0,00	0	1,50	0	
AGUA		114,0	1,00	114	1,00	114	
TOTAL	100,00%	1000,0		2488		1804	

ARIDO RESULTANTE				FULLER	ARIDO 1	ARIDO 2	ARIDO 3	ARIDO 4	ARIDO 5	
TAMIZ ASTM	TAMIZ mm	% reten. acumul.	% pasa acumul.							
	63,5	0,0	100,0	100,0	0,0	100,0	100,0	0,0	0	
	60	0,0	100,0	100,0	0,0	100,0	100,0	0,0	0	
	50	0,0	100,0	100,0	0,0	100,0	100,0	0,0	0,0	
	40	0,0	100,0	100,0	0,0	100,0	100,0	0,0	0,0	
	32	0,0	100,0	100,0	0,0	100,0	100,0	0,0	0,0	
	20	0,0	100,0	100,0	0,0	100,0	100,0	0,0	0,0	
	16	0,0	100,0	100,0	0,0	100,0	100,0	0,0	0,0	
	8	19,1	80,9	81,6	0,0	100,0	68,2	0,0	0,0	
	4	63,5	36,5	57,7	0,0	86,5	3,2	0,0	0,0	
	2	71,8	28,2	40,8	0,0	67,6	2,0	0,0	0,0	
	1	76,5	23,5	28,9	0,0	56,0	1,8	0,0	0,0	
	0,49	79,3	20,7	20,2	0,0	49,3	1,7	0,0	0,0	
	0,25	88,4	11,6	14,4	0,0	26,7	1,6	0,0	0,0	
	0,125	96,4	3,6	10,2	0,0	7,0	1,3	0,0	0,0	
	0,063	98,1	1,9	7,2	0,0	3,2	1,0	0,0	0,0	
Módulos de finura				4,949	4,461	10,000	3,069	6,202	10,000	10,000

CURVA GRANULOMÉTRICA



APORTACIÓN FINOS  
Kgs/m<sup>3</sup>

ÁRIDO N°1	0,00
ÁRIDO N°2	24,30
ÁRIDO N°3	11,39
ÁRIDO N°4	0,00
ÁRIDO N°5	0,00
CEMENTO	475,00
APORTACIÓN TOTAL	510,70

TABLA 3.



FIGURA 3.

## 7. CONTROL DE CALIDAD

Un apartado muy importante a tener en cuenta a la hora de analizar los resultados obtenidos en la fabricación de hormigones de muy alta resistencia es el control de calidad tanto de los materiales como del hormigón producido. Se resumen a continuación los controles realizados:

- Seguimiento diario por parte del personal del laboratorio de los áridos suministrados.
- Ensayos semanales completos de áridos, realizándose ensayos complementarios, en caso de estimarse necesario, después de la realización de las inspecciones diarias de los áridos suministrados.
- Ensayos semanales de resistencia a compresión del cemento, al fin de tener un seguimiento continuo de la calidad del cemento suministrado.

- Trazabilidad del material de laboratorio empleado en la toma de probetas, con objeto de rechazar aquellos en los que se observara anomalías en la rotura de las probetas fabricadas con ellos.
- Control de la temperatura del azufre de refrentado para evitar que un sobrecalentamiento afectara a las propiedades del mortero de azufre.
- Control geométrico de las probetas.
- Trazabilidad de los laborantes que realizan la toma de probetas, refrentado y rotura de las mismas para evitar los errores sistemáticos en cada uno de los pasos.

La tabla 4 muestra la hoja de control de las roturas de hormigón.

Como resultado de estos controles cabe destacar que el recorrido relativo medio para las tres tomas que se rompen por serie a 28 días es del orden de un 3%.



FIGURA 4.

HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES (SUPERIOR A 100 MPA) PARA DOVELAS DE REVESTIMIENTO DE TÚNELES

SERIE	7 días										28 días										Laborante toma	r	MEDIA	DOSIFI	Nº					
	DENSIDAD					RESISTE					DENSIDADES					MOLDES										RESISTENCIAS				
	P-1		P-2		r	MEDIA		P-1		P-2		P-1		P-2		P-1		P-2		P-1						P-2		P-3		
	P-1	P-2	P-1	P-2		P-1	P-2	P-1	P-2	P-1	P-2	P-1	P-2	P-1	P-2	P-1	P-2	P-1	P-2	P-1						P-2	P-1	P-2	P-3	
DO-23960	4	90	561	2,463	2,463	0,04	111,4	113,5	109,3	2,482	2,484	2,477	464	13	430	124,1	123,9	122,4	1					0,01	123,5	HA-90-S-12	190-3			
DO-23961	4	491	92	2,463	2,470	0,09	107,7	102,7	112,6	2,469	2,473	2,469	589	107	51	123,2	120,2	120,8	1					0,02	121,4	HA-90-S-12	190-3			
DO-23962	4	590	34	2,470	2,475	0,05	108,8	111,3	106,2	2,466	2,478	2,481	121	73	27	119,3	119,5	120,7	1					0,01	119,8	HA-90-S-12	190-3			
DO-23963	4	17	468	2,471	2,474	0,11	111,2	105,2	117,1	2,479	2,488	2,482	469	9	477	118,2	116,5	115,5	1					0,02	116,7	HA-90-S-12	190-3			
DO-23964	4	475	549	2,471	2,480	0,03	110,9	109,1	112,6	2,480	2,463	2,485	492	521	484	121,8	121,1	120,7	1					0,01	121,2	HA-90-S-12	190-3			
DO-23965	4	490	62	2,473	2,472	0,02	111,6	112,8	110,3	2,465	2,485	2,470	506	461	499	118,8	123,3	121,1	1					0,04	121,1	HA-90-S-12	190-3			
DO-23966	4	116	120	2,477	2,469	0,06	108,0	111,4	104,6	2,481	2,478	2,474	69	555	450	117,3	116,5	117,7	1					0,01	117,2	HA-90-S-12	190-3			
DO-23967	4	16	476	2,462	2,471	0,07	109,2	105,5	112,8	2,489	2,470	2,477	25	101	75	118,8	119,5	116,8	1					0,02	118,4	HA-90-S-12	190-3			
DO-23968	6	48	491	2,481	2,467	0,01	113,7	113,1	114,2	2,486	2,482	2,502	558	30	73	121,7	117,3	118,9	1					0,04	119,3	HA-90-S-12	190-3			
DO-23969	6	97	512	2,470	2,483	0,01	106,8	106,4	107,1	2,480	2,476	2,475	510	494	490	115,6	114,2	117,3	1					0,03	115,7	HA-90-S-12	190-3			
DO-23970	6	514	13	2,469	2,471	0,03	110,8	109,1	112,5	2,488	2,491	2,483	555	111	589	113,6	117,4	118,0	1					0,04	116,3	HA-90-S-12	190-3			
DO-23971	6	492	549	2,475	2,486	0,03	112,1	110,6	113,5	2,477	2,444	2,471	552	47	120	116,0	114,3	115,8	1					0,01	115,4	HA-90-S-12	190-3			
DO-23972	6	34	11	2,483	2,483	0,00	110,6	110,4	110,8	2,479	2,479	2,488	506	65	104	116,2	119,9	119,1	1					0,03	118,4	HA-90-S-12	190-3			
DO-23973	6	499	83	2,470	2,483	0,01	105,1	104,6	105,5	2,474	2,477	2,487	553	547	10	111,6	111,8	114,4	1					0,02	112,6	HA-90-S-12	190-3			
DO-23974	6	462	62	2,480	2,488	0,05	107,6	105,1	110,0	2,477	2,483	2,478	75	57	490	116,7	121,6	118,5	1					0,04	118,9	HA-90-S-12	190-3			
DO-23975	6	91	104	2,476	2,479	0,02	111,6	112,6	110,6	2,473	2,479	2,493	448	42	9	120,6	119,7	120,7	1					0,01	120,3	HA-90-S-12	190-3			
DO-23976	4	461	506	2,469	2,473	0,06	109,5	112,5	106,4	2,479	2,474	2,472	27	73	90	118,2	116,8	117,7	1					0,01	117,6	HA-90-S-12	190-3			
DO-23977	4	499	62	2,483	2,488	0,02	110,9	109,8	112,0	2,501	2,486	2,496	17	121	561	120,6	118,2	117,3	1					0,03	118,7	HA-90-S-12	190-3			
DO-23978	4	116	490	2,482	2,482	0,09	108,7	103,6	113,8	2,487	2,483	2,479	468	34	464	114,5	119,5	116,5	1					0,04	116,8	HA-90-S-12	190-3			
DO-23979	4	120	484	2,483	2,478	0,01	105,2	104,7	105,6	2,473	2,483	2,477	469	590	13	114,4	116,9	117,3	1					0,02	116,2	HA-90-S-12	190-3			
DO-23980	4	69	521	2,476	2,485	0,02	105,5	106,3	104,6	2,480	2,489	2,469	9	51	430	115,6	116,1	115,5	1					0,01	115,7	HA-90-S-12	190-3			
DO-23981	4	555	492	2,480	2,470	0,09	108,8	113,5	104,1	2,476	2,481	2,493	477	107	491	112,8	120,6	117,3	1					0,07	116,9	HA-90-S-12	190-3			
DO-23982	4	450	549	2,454	2,484	0,00	112,1	111,9	112,2	2,486	2,468	2,473	475	589	92	122,3	116,5	120,7	1					0,05	119,8	HA-90-S-12	190-3			
DO-23983	6	51	34	2,485	2,495	0,01	114,3	114,0	114,6	2,490	2,491	2,495	462	111	491	129,0	124,9	119,3	1					0,08	124,4	HA-90-S-12	190-3			
DO-23984	6	65	553	2,459	2,488	0,03	112,0	110,3	113,6	2,477	2,477	2,492	90	57	589	120,1	120,6	118,2	1					0,02	119,6	HA-90-S-12	190-3			
DO-23985	6	48	547	2,491	2,488	0,03	110,3	111,7	108,8	2,498	2,488	2,508	548	91	510	117,3	119,2	124,2	1					0,06	120,2	HA-90-S-12	190-3			
DO-23986	6	506	494	2,484	2,482	0,02	115,3	114,0	116,5	2,487	2,500	2,493	590	492	62	119,0	125,8	124,7	1					0,06	123,2	HA-90-S-12	190-3			
DO-23987	6	47	555	2,485	2,486	0,00	114,2	114,2	114,1	2,494	2,499	2,484	443	104	558	118,3	123,1	122,1	1					0,04	121,2	HA-90-S-12	190-3			
DO-23988	6	30	120	2,496	2,482	0,02	105,5	104,5	106,4	2,510	2,489	2,475	11	512	499	115,5	116,2	112,1	1					0,04	114,6	HA-90-S-12	190-3			
DO-23989	6	552	549	2,465	2,476	0,03	112,0	113,5	110,5	2,488	2,471	2,471	83	75	97	122,6	118,9	120,7	1					0,03	120,7	HA-90-S-12	190-3			
DO-23990	6	73	514	2,489	2,495	0,04	114,5	112,4	116,5	2,471	2,487	2,477	9	13	490	119,0	126,9	122,1	1					0,06	122,7	HA-90-S-12	190-3			
DO-23991	5	549	484	2,459	2,467	0,04	102,4	104,3	100,4	2,468	2,482	2,472	9	17	27	115,6	115,1	116,9	1					0,02	115,9	HA-90-S-12	190-3			
DO-23992	5	120	476	2,468	2,470	0,03	109,7	107,9	111,4	2,475	2,476	2,479	25	69	590	125,3	119,4	119,0	1					0,05	121,2	HA-90-S-12	190-3			
DO-23993	5	51	590	2,478	2,484	0,01	107,2	107,6	106,8	2,462	2,476	2,466	101	555	62	122,5	119,0	115,8	1					0,06	119,1	HA-90-S-12	190-3			
DO-23994	5	107	75	2,474	2,479	0,01	108,3	108,6	107,9	2,481	2,479	2,478	116	450	90	121,3	125,5	116,8	1					0,07	121,2	HA-90-S-12	190-3			

TABLA 4.

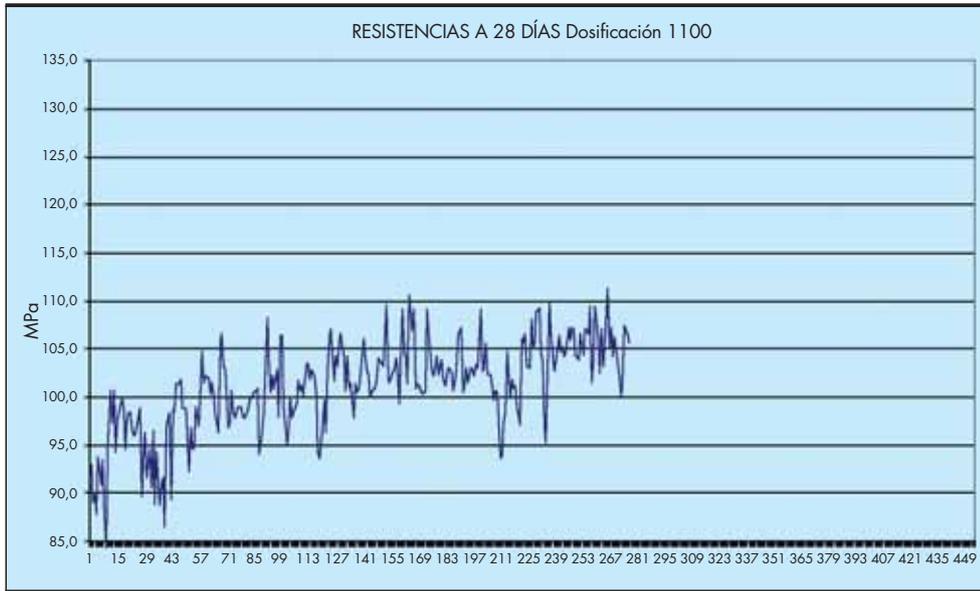


FIGURA 5.

### 8. RESULTADOS DE ENSAYOS

Dado el gran volumen de datos de que disponemos el análisis pormenorizado de los mismos sería demasiado prolijo, es por ello que presentaremos los gráficos de resultados de forma que permitan comprobar las conclusiones mostradas en los párrafos anteriores, así como las conclusiones del apartado final. De cara a facilitar el análisis se muestra a continuación el orden cronológico con el que se emplearon cada una de las dosificaciones a analizar:

- Dosificación 1100
- Dosificación 1105 (1ª Utilización)
- Dosificación 190
- Dosificación 1105 (2ª Utilización)
- Dosificación 1105-1
- Dosificación 190-3

En la figura 5 se observa la “curva de aprendizaje”, es decir, cuando se empezó a trabajar con este tipo de hormigones fue necesario que los plantistas se adaptaran a trabajar con este tipo de hormigones, además hay que destacar que los hormigones de altas prestaciones se comenzaron a fabricar durante el otoño/invierno entre finales del año 2006 y principios del 2007, siendo un periodo muy lluvioso y con abundantes nevadas, lo cual queda reflejado en los picos de las gráficas correspondientes a las dosificaciones 1100,1105 (1ª utilización) y 1105 (2ª utilización).

El comparativo entre la primera y segunda utilización de la dosificación 1105 tiene por objeto mostrar la eficacia del aprendizaje por parte del personal encargado de la fabricación del hormigón, así como mostrar la eficacia de las medidas implantadas con objeto de minimizar las incertidumbres en el control del agua introducida en la mezcla

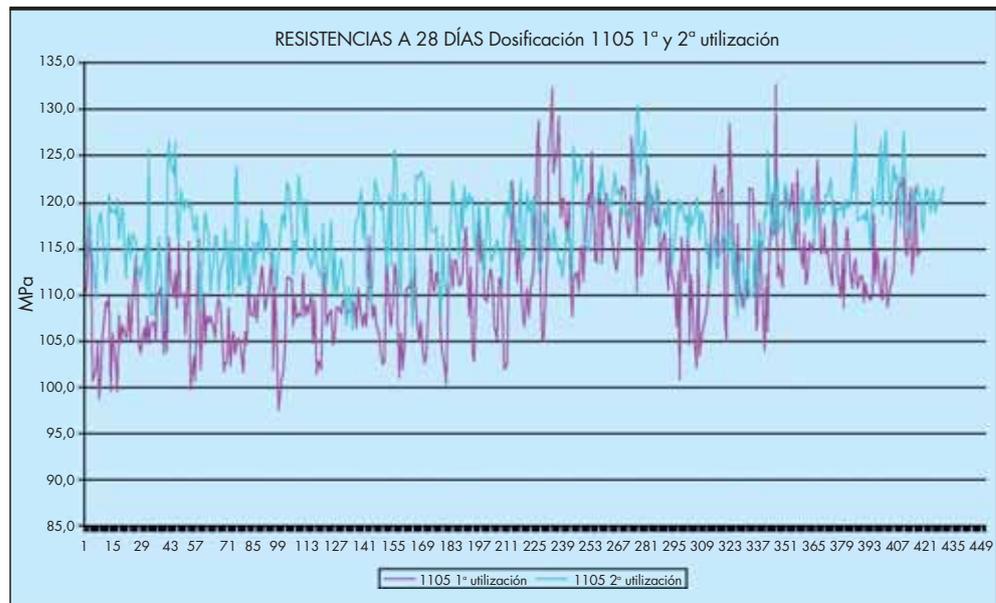


FIGURA 6.

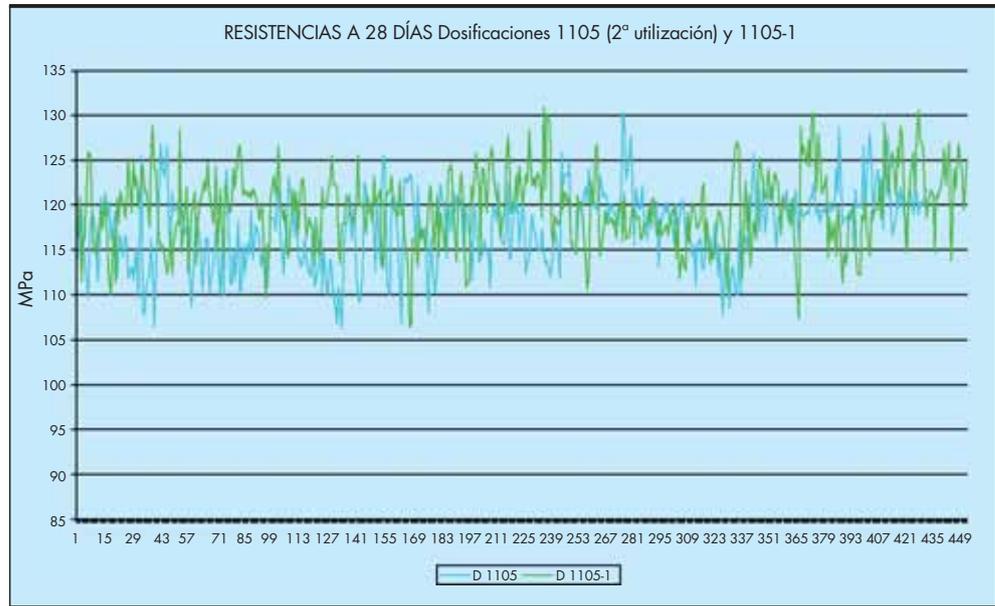


FIGURA 7.

por la humedad de los áridos en los periodos de climatología adversa.

En las figuras 7 y 8 tratamos de mostrar la mejora en las resistencias obtenida al aumentar el superfluidificante para facilitar la puesta en obra del hormigón, así como aumentar la eficacia del amasado al proporcionar mayor fluidez al hormigón aún dentro de la consistencia seca.

Del análisis conjunto de los resultados del control de resistencias en la fabricación del hormigón de dovelas pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- Es necesario un tiempo de aprendizaje y adaptación del personal encargado de la fabricación del hormigón.
- El tiempo de amasado ha de aumentarse lo suficiente para garantizar la correcta mezcla de todos los compo-

nentes, teniendo en cuenta las bajas relaciones agua/cemento empleadas.

- Las dosificaciones con mayor fluidez, siempre dentro de las consistencias secas, permiten alcanzar mayores resistencias, debido a que aumenta la eficacia del amasado, a la vez que facilita la puesta en obra, reduciendo los tiempos de vibrado.
- Es recomendable trabajar con áridos cubiertos, ya que las condiciones climatológicas influyen de forma decisiva en la resistencia final del hormigón, siendo necesario una mayor dosificación de cemento que compense las bajadas de resistencia debidas a las variaciones de contenido de agua por la humedad de los áridos.

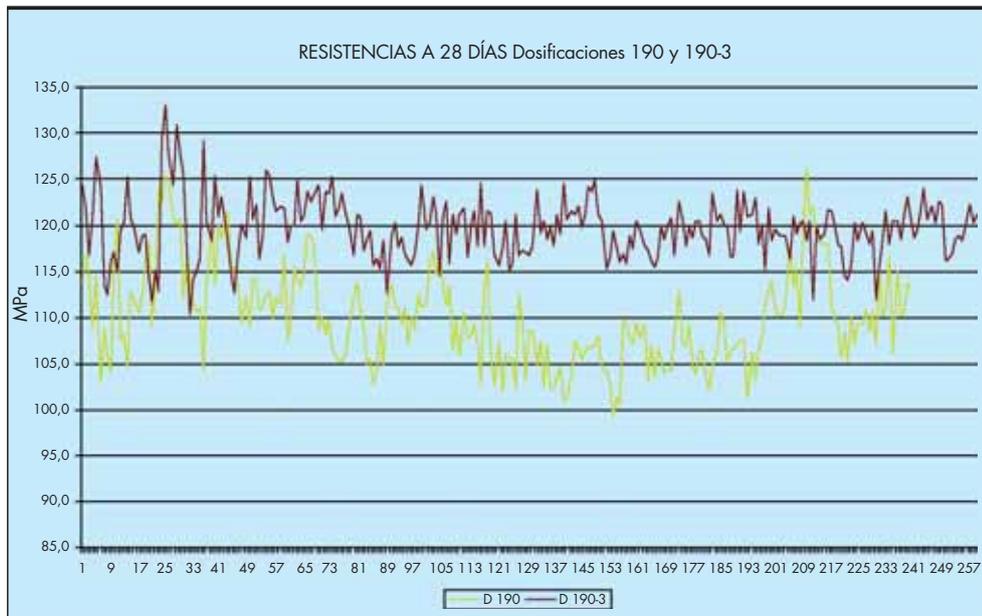


FIGURA 8.

## 9. CONCLUSIONES

En primer lugar ha de destacarse que el desarrollo de hormigones de altas prestaciones para la fabricación de dovelas en los TÚNELES DE PAJARES lote I ha sido pionero en España, que el trabajo ha sido innovador ante la falta de experiencia previa en la fabricación de dovelas con hormigones de tan alta resistencia, así como por la escasa bibliografía existente. Es de señalar que el conocimiento sobre el tema ha ido aumentando como resultado de la experiencia obtenida durante los trabajos, lo que se ha visto reflejado en la consecución de mayores resistencias con menor cantidad de cemento.

Entre las conclusiones obtenidas de nuestra experiencia en la fabricación de dovelas con hormigones de altas prestaciones cabría destacar:

- En contra de lo recomendado en la bibliografía sobre este tipo de hormigones creemos que el empleo de cementos tipo CEM II A/S presenta grandes ventajas sobre los cementos tipo CEM I debidas, principalmente a las características que le brinda la adición de escoria de alto horno, tal y como se ha explicado en el apartado 4.1, pudiendo incluso llegar a emplearse cementos de tipo CEM IIIA en estructuras de hormigón que no requieran elevadas resistencias a edades cortas, y que permitan esperar a edades mayores a 28 días para entrar en carga. El empleo de este tipo de cementos permite la fabricación de hormigones muy compactos, la densidad de las probetas supera los 2.500 g/dm<sup>3</sup> y muy impermeables, con profundidades de penetración de agua menores de 0,5 mm, lo que en el caso de los revestimientos de túneles representa una notable ventaja a la hora de pensar en la durabilidad del revestimiento, ya que esta impermeabilidad impide el ataque químico tanto al hormigón como a las armaduras.

En colaboración con el Departamento de I+D+i de Acciona, y de cara a la comprobación experimental de las propiedades anteriormente descritas se llevaron a cabo una serie de análisis termogravimétricos y de medida del flujo de calor respecto a la temperatura de análisis (STD). La tabla 5 muestra el resumen de los análisis realizados con los cementos I 52,5 R y II/A-S 52,5 N. a diferentes edades en los que, efectivamente se observa para el cemento II/A-S el gel C-S-H aumenta con la edad. En el caso de la Portlandita se observa que en el caso del cemento II/A-S a partir de los 7 días hay una disminución de la misma debido a la reacción de ésta con la escoria para formar C-H-S, con el consiguiente aumento de agua no evaporable.

EDAD	Agua GEL (C-S-H)		Agua de Portlandita Ca(OH) <sub>2</sub>	
	CEM I 52,5 R	CEM II A/S 52,5 N	CEM I 52,5 R	CEM II A/S 52,5 N
1	4.168	4.185	2.601	2.403
3	5.146	5.282	3.202	2.865
7	5.723	6.414	3.156	2.840
14	6.282	7.208	3.310	2.795
21	6.487	7.167	3.357	2.659
28	6.624	7.489	3.334	1.829

TABLA 5.

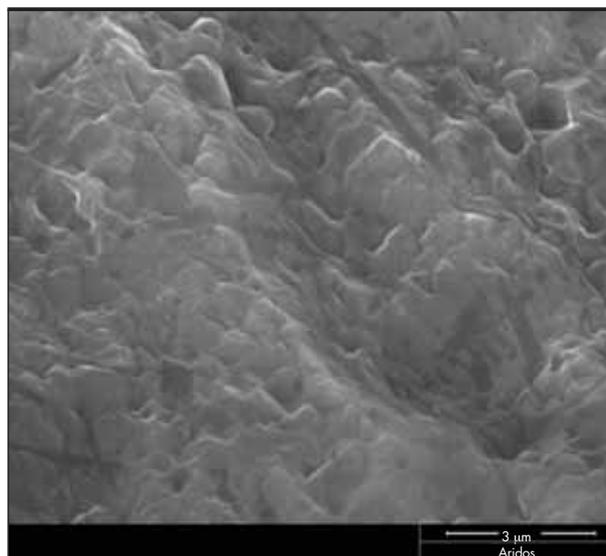


FIGURA 9.

- Al igual que en el caso del cemento los áridos cuarcíticos empleados conducen a buenos resultados en la fabricación de hormigones a pesar de no ajustarse a las recomendaciones dadas en la bibliografía, entendemos que dicho buen resultado se debe principalmente a su elevada resistencia a compresión, a pesar de que su coeficiente de desgaste parece no reflejarla. De cara a la comprobación de nuestra hipótesis de que la rugosidad del árido favorece la interacción pasta árido, con el consiguiente aumento de resistencias, en colaboración con el Departamento de I+D+i se llevó a cabo un estudio de los áridos con microscopio electrónico de barrido (SEM), del que a continuación se muestran unas imágenes en las que efectivamente se puede comprobar que la textura superficial de los áridos es muy rugosa, lo que mejora la adherencia y el empaquetamiento mecánico del árido con la pasta de cemento, con el consiguiente incremento de la resistencia de la interfase árido-pasta y, por tanto, la resistencia del hormigón. Además se llevó a cabo un estudio de fluorescencia de rayos X (EDX) del que, como elementos destacables se observó la presencia de titanio, que aunque aparece como elemento minoritario, podría aportar resistencia a la roca, debido a su gran densidad y dureza. Se muestra en la figura 10 la imagen del estudio EDX.
- Otro punto muy importante a la hora del diseño de la dosificación es la adecuada dosificación del aditivo superplastificante, que ha de ser lo suficientemente elevada para permitir además de relaciones agua-cemento muy bajas, fluidez del hormigón suficiente para permitir un correcto amasado de la mezcla.
- Tiempo de amasado suficiente para permitir la correcta homogenización del hormigón.
- Una recomendación que creemos muy importante a la hora de garantizar una baja dispersión en la calidad del hormigón es el trabajar con áridos cubiertos para controlar al máximo su humedad y por tanto la relación agua-cemento real de la mezcla, lo que permitiría además optimizar la cantidad de cemento a emplear para la fabricación de este tipo de hormigones. En nuestro caso hemos alcanzado resistencias estimadas superiores a los 100 MPa con contenidos de cemento de 465

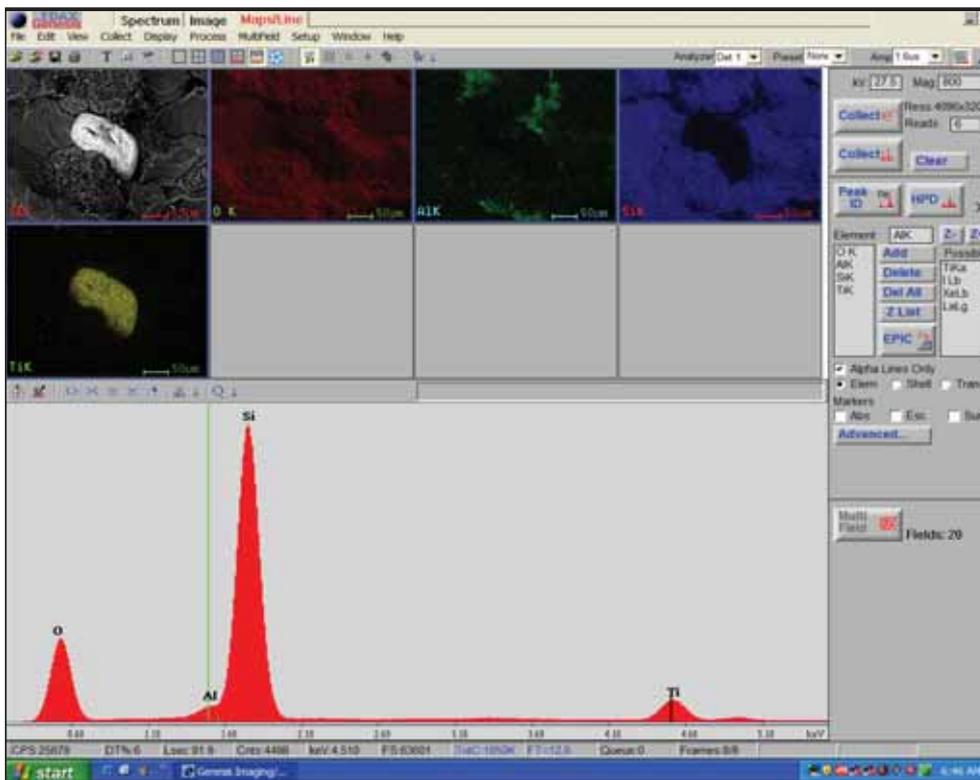


FIGURA 10.

kg/m<sup>3</sup>. Con la dosificación 190-3 mostrada en el Apartado 6 se ha llegado a alcanzar una resistencia estimada media de 115 MPa durante la fabricación de más de cuarenta lotes de anillos de dovelas (más de 4.000 m<sup>3</sup> de hormigón) siendo la resistencia mínima alcanzada por un lote 109 MPa y la máxima 124 MPa.

- Es necesario, para alcanzar estas resistencias, un control de calidad lo más exhaustivo posible tanto de los componentes como del proceso de elaboración del hormigón.

## 10. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

No queremos dejar de resaltar las líneas de desarrollo sobre las que creemos que sería interesante trabajar en un futuro:

- Posibilidad de empleo de otros tipos de cementos.  
En el caso de estructuras que no requieran elevadas resistencias a edades tempranas y que puedan esperar a edades mayores de 28 días para entrar en carga significativa de diseño puede pensarse en emplear el cemento CEM IIIA 42,5 N, e incluso la utilización de mezcla de cementos BL I 52,5 R (65%) y CEM III/B 32,5 N (35%).
- Diseño de hormigones de altas prestaciones bombeables o autocompactables.

## 11. REFERENCIAS

1. G. González Isabel. Hormigón de Alta Resistencia. INTEMAC. 1993.
2. P. Alaejos Gutiérrez y M. Fernández Cánovas. Hormigón de alta resistencia: Dosificaciones y propiedades mecánicas. CEDX. 1995.
3. Bettor MBT SA. Hormigón de altas prestaciones. II Congreso de ACHE. Puentes y Estructuras de edificación.
4. E. Dapena, F. Rodríguez y F. Alonso. Hormigones de altas prestaciones para la construcción de estructuras laminares tenso-armadas. II Congreso de ACHE. Puentes y Estructuras de edificación.
5. G. Gutiérrez Martín, J. J. Arenas de Pablo, D. C. González Cabrera y M. A. Vicente Cabrera. Estudio del comportamiento en flexocompresión de los hormigones de alta resistencia. II Congreso de ACHE. Puentes y Estructuras de edificación.
6. M. Santamaría González y D. Mediero Almendros. Hormigones de alta resistencia. IBERINSA: 1997.
7. J. Calavera Ruiz, P. Alaejos Gutiérrez, E. González del Valle, J. Fernández Gómez y F. Rodríguez García. Ejecución y Control de Estructuras de Hormigón. INTEMAC. 2004.
8. C. Patricia Garavito y J. Calavera Ruiz. Influencia del tipo de refrentado y de la clase de probeta: cúbica o cilíndrica, en la medida de la resistencia del hormigón. Cuaderno n° 57. INTEMAC. 2005.
9. J. P. Ollivier, J.C. Maso and B. Bourdette. Interfacial transition zone in concrete. Advn. Cem. Bas. Mat. 1995; 2: 30-38.
10. S. K. Al-Oraimi, R. Taha and H.F. Hassan. The effect of the mineralogy of coarse aggregate on the mechanical properties of high strength concrete. Construction and Building Materials 20 (2006) 499-503.
11. A. Kilic, C.D. Atis, A. Teymen et Alt. The influence of aggregate type on the strength and abrasion resistance of high strength concrete. Cement and Concrete Composites 30 (2008) 290-296.
12. H. Yacizi. The effect of curing conditions on compressive strength of ultra high strength concrete with high volume mineral admixtures. Building and Environment 42 (2007) 2083-2089.