OCICARBON

ASOCIACIÓN GESTORA PARA LA INVESTIGACIÓN

Informes de Difusión de Proyectos

Hormigón Proyectado por Vía Húmeda

(C-12-452)

Titular: GEOCONTROL

MINISTERIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Ciemat Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas

OCICARBON
ASOCIACIÓN GESTORA PARA LA INVESTIGACIÓN

Informes de Difusión de Proyectos

80

Hormigón Proyectado por Vía Húmeda

(C-12-452)

Titular: GEOCONTROL

MINISTERIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Ciemat Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas

Depósito Legal: M-4557-1998
ISSN: 1138-7041
NIPO: 402-01-007-8

ABSTRACT

This project has been carried out by Geocontrol during the period September 1997-november 2000.

The main target of this project was to establish a better knowledgement about the influence of the accelerator, silica fume, steel fibres and superplasticizer on the wet shotcrete properties.

This project has been developed in three phases focused in three specifical targets:

I. Effect of the accelerator, superplasticizer and silica fume dosages on shotcrete strength.

II. Influence of steel fibres and silica fume on shotcrete characteristics.

III. Steel fibres dosage and type effect of shotcrete absorbed energy.

The main conclusions obtained from this research are the following:

1. Accelerators free of alkalis have a very little influence on the shotcrete strength reduction.

2. The best results are obtained when the accelerator dosage is the lowest, with a reference of the 4 % of cement weigth.

3. The superplasticizer is very important in order to reach the lowest water/cement ratio.

4. Silica fume has a strong and positive influence on shotcrete characteristics but only if the dosage is higher than 30 kg/m^3.

5. The best results with silica fume are obtained when this product is added as a separate product, instead to be mixed with other additive as superplasticizer.

6. Steel fibres addition improves dramatically the shotcrete post-failure characteristics.

7. A shotcrete without steel fibres and with a strength ranged between 25 and 40 MPa absorbes 130-180 Joules and another one with a steel mesh of 150x150x6 mm absorbes 1100 Joules.

8. Steel fibres shotcrete can reach the same energy absorption that another one reinforced with wire mesh.

9. During shotcreting the steel fibres dosage has a loss of 10 to 30 % due to shotcrete rebound.

This research project allows to improve the knowledgement of shotcreting technique in order to use it with more efficiency than in the past.

RESUMEN DEL INFORME FINAL SOBRE EL PROYECTO "HORMIGÓN PROYECTADO POR VÍA HÚMEDA" (C-12-452)

ÍNDICE

1.- INTRODUCCIÓN 1

2.- OBJETIVOS DEL PROYECTO 3

3.- DESARROLLO DEL PROYECTO 3

3.1.- ACTIVIDADES Y RESULTADOS DE LA FASE I 5

3.1.1.- Puesta a punto de la formulación base 5

3.1.2.- Selección de aditivos 6

3.1.2.1.- Conclusiones sobre el superfluidificante combinado con el humo de sílice y sobre el acelerante 9

3.1.2.2.- Conclusiones sobre el superfluidificante y humo de sílice, utilizados por separado, y sobre el acelerante 10

3.1.3.- Evaluación de la mejor dosificación proyectada 10

3.1.3.1.- Acelerante 12

3.1.3.2.- Superfluidificante 14

3.1.3.3.- Humo de sílice 15

3.1.4.- Conclusiones obtenidas en la Fase I 15

3.2.- ACTIVIDADES Y RESULTADOS DE LA FASE II 16

3.2.1.- Dosificaciones investigadas 17

3.2.2.- Ensayos realizados 17

3.2.3.- Conclusiones obtenidas en la Fase II 21

3.3.- ACTIVIDADES Y RESULTADOS DE LA FASE III 22

3.3.1.- Dosificaciones investigadas 22

3.3.2.- Ensayos realizados 23

3.3.3.- Conclusiones obtenidas en la Fase III 25

4.- CONCLUSIONES 26

RESUMEN DEL INFORME FINAL SOBRE EL PROYECTO "HORMIGÓN PROYECTADO POR VÍA HÚMEDA" (C-12-452)

1.- INTRODUCCIÓN

El proyecto de investigación denominado HORMIGÓN PROYECTADO POR VÍA HÚMEDA ha sido financiado, a partes iguales, por OCICARBÓN y por Geocontrol, S.A.

El objeto de este proyecto radicaba en conocer la influencia que tienen los distintos aditivos del hormigón proyectado por vía húmeda sobre la calidad de este elemento de sostenimiento, cada día más utilizado en la construcción de obras subterráneas.

A principio de los años 90 las empresas S.A. HULLERA VASCO-LEONESA y CARBONES PEDRAFORCA, S.A., empezaron a utilizar, con bastante intensidad, el hormigón proyectado por vía seca como elemento de sostenimiento en las obras de infraestructura subterránea de sus minas, empleando el proceso de vía seca.

Este método supone que el hormigón se crea mezclando en la tobera de proyección los áridos y el cemento del hormigón, que previamente se mezclan entre sí, con agua y con un acelerante de fraguado.

Este procedimiento, que se ilustra en la **Figura 1.a**, tiene el grave problema de la gran cantidad de polvo que se produce en su puesta en obra, lo cual es particularmente nocivo en los ambientes cerrados en que se deben construir las obras subterráneas.

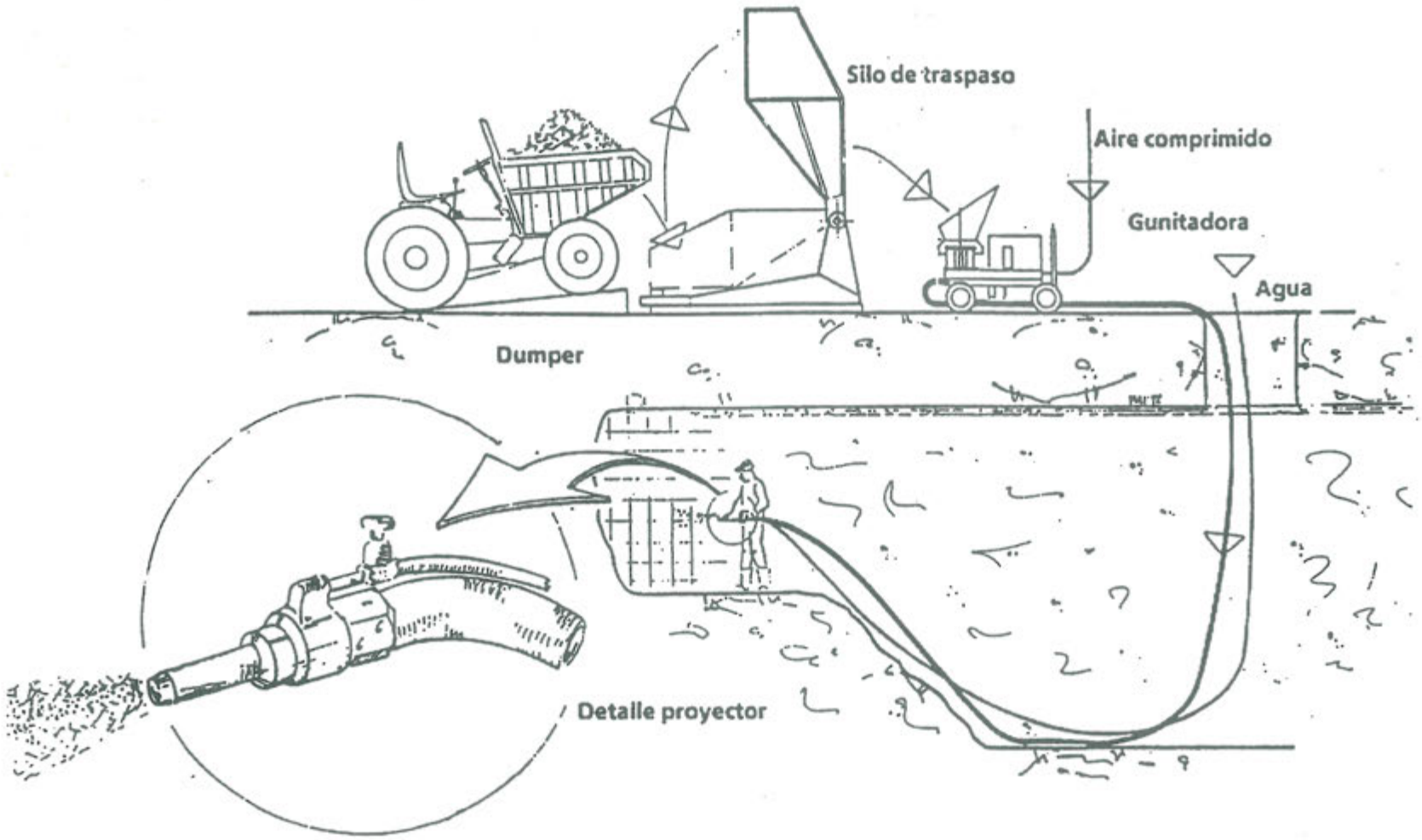


Figura 1.a.- Esquema de una instalación para proyección de hormigón por vía seca.

El proceso de proyección de hormigón por vía seca presentaba el inconveniente adicional del escaso caudal de proyección que, normalmente, estaba comprendido entre 1 y 3 m^3/h.

El proceso de hormigón proyectado por vía húmeda, ilustrado en la **Figura 1.b**, eliminó los problemas que presentaba el proceso de vía seca; ya que, en este caso, la mezcla preparada para proyectar es un auténtico hormigón fabricado en una planta y en la tobera de proyección sólo se añade el acelerante de fraguado.

Respecto al rendimiento de proyección hay que señalar que las máquinas, inicialmente comercializadas, superaban los 10 m^3/h, lo cual supuso un claro avance sobre el rendimiento que se obtenía en la vía seca.

A lo largo de los años 90 se fueron incorporando, a las formulaciones para proyectar hormigón por vía húmeda, nuevos aditivos que consiguieron mejorar espectacularmente las características del hormigón proyectado. Entre los más importantes cabe citar: las fibras de acero para armar el hormigón, los acelerantes libres de álcalis, el humo de sílice y los superfluidificantes.

2.- OBJETIVOS DEL PROYECTO

Los objetivos básicos de este proyecto se concretan en establecer la influencia que tienen los aditivos que se incorporan al hormigón proyectado por vía húmeda sobre la calidad final del hormigón, para poner a punto una metodología que permita disponer de una formulación de hormigón proyectado con las proporciones de aditivos más apropiadas.

3.- DESARROLLO DEL PROYECTO

El proyecto se empezó en el mes de septiembre de 1997 y, básicamente, las actividades con él relacionadas se han llevado a cabo en las instalaciones que la Mina Escuela El Bierzo tiene en Folgoso de la Ribera (León); utilizando, sobre todo, el denominado Túnel Experimental, la planta de hormigonado y el robot de proyección allí existentes.

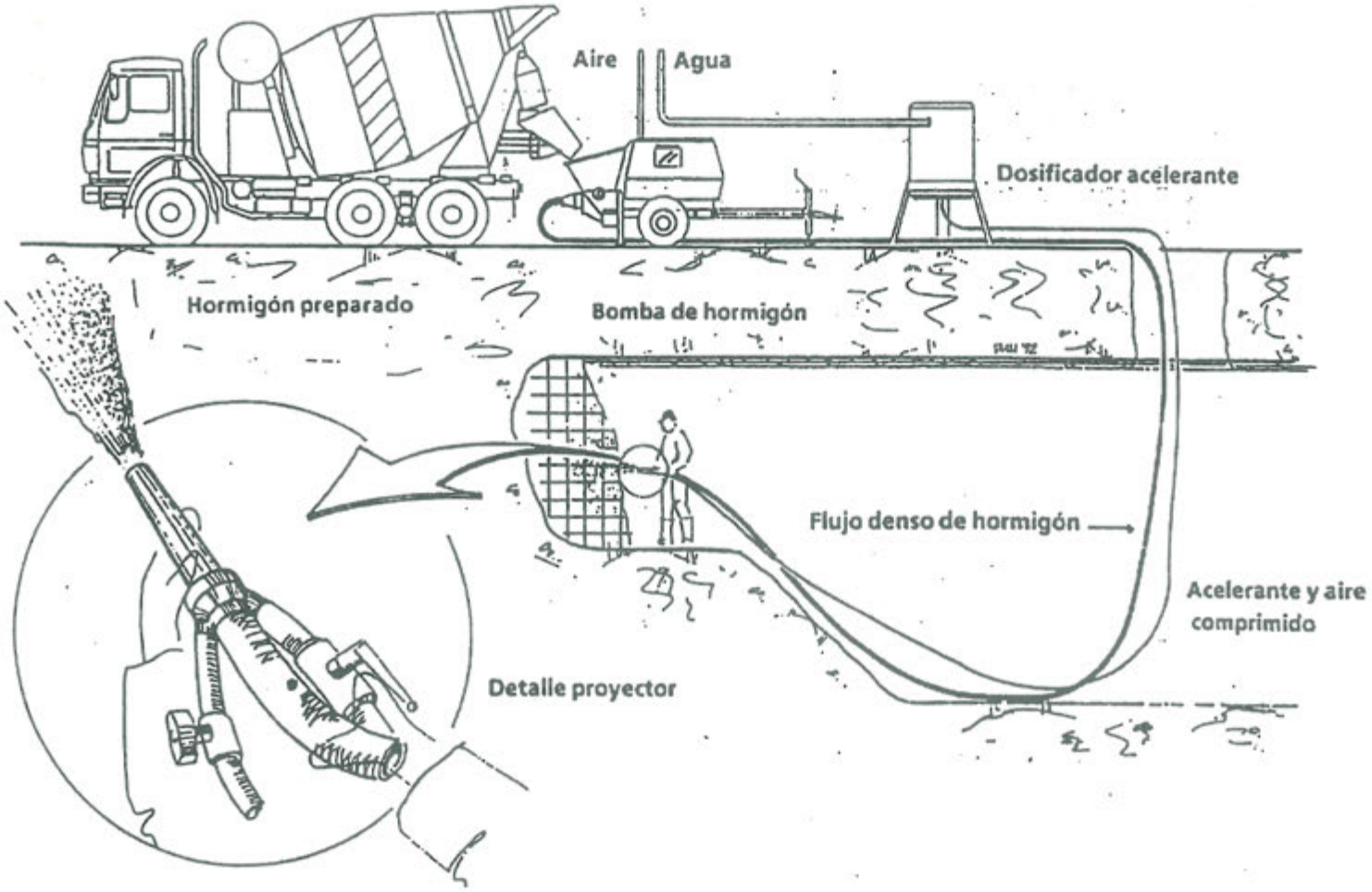


Figura 1.b.- Esquema de una instalación para proyección de hormigón por vía húmeda.

Las actividades del proyecto pueden estructurarse en las tres fases siguientes:

FASE I.- Puesta a punto de la dosificación patrón y efecto sobre la resistencia de las proporciones de acelerante, superfluidificante y humo de sílice.

FASE II.- Investigación del efecto del tipo y proporción de fibras de acero y humo de sílice, sobre dosificaciones fabricadas en laboratorio.

FASE III.- Investigación del efecto del tipo y proporción de fibras de acero sobre dosificaciones proyectadas.

A continuación se presentan, resumidos, las actividades realizadas y los resultados obtenidos en cada fase del trabajo.

3.1.- ACTIVIDADES Y RESULTADOS DE LA FASE I

La primera actividad que se realizó consistió en poner a punto la dosificación base para proyectar hormigón, es decir, aquella que no tiene aditivos.

A continuación se prepararon, en el laboratorio, 16 dosificaciones para escoger el tipo de aditivos a utilizar. Finalmente, se investigaron seis dosificaciones que se han proyectado con el robot de la Mina Escuela El Bierzo.

En los apartados siguientes se describen los resultados obtenidos.

3.1.1.- Puesta a punto de la formulación base

Para establecer la dosificación base se ha utilizado un cemento de fraguado rápido tipo CEM I42, R, los áridos habitualmente utilizados en la planta de hormigonado de la Mina Escuela El Bierzo.

Tanto los áridos como el agua empleados fueron objeto de los correspondientes análisis de identificación para poder determinar sus características y poder actuar ante un posible cambio de suministro.

En el **Cuadro 3.1.I** se presentan las características de la formulación base adoptada.

COMPONENTES	PESO (kg)	PESO ESPECÍFICO (g/cm^3)	VOLUMEN (l)	COSTE (Ptas)
Cemento	400	3,15	127	6024
Árido 0-5mm	1098	2,728	402	988
Árido 5-12mm	590	2,665	221	502
Agua	283	1	283	--
TOTAL	**2371**	**2,295**	**1033**	**7514**

Cuadro 3.1.I.- Formulación de la dosificación base.

Con la formulación base elegida se confeccionaron 12 probetas que se rompieron a compresión simple, dando un valor medio de resistencia a 28 días de 342 kp/cm^2.

Este valor es sensiblemente más alto que la media habitual en España, que es de 250 kp/cm^2. Este hecho, en sí mismo, no tiene gran importancia; pues esta formulación base sólo se utiliza para comprobar el efecto de los aditivos sobre la resistencia y no es objeto de la investigación obtener un hormigón proyectado de una resistencia determinada.

3.1.2.- Selección de aditivos

Como aditivos de partida se seleccionaron los productos fabricados por SIKA, que se relacionan a continuación:

- Acelerante libre de álcalis: SIGUNIPA L-SORF
- Superfluidificante: SIKAMENT TN-100
- Humo de sílice: SIKACRETE-P
- Superfluidificante combinado con humo de sílice: SIKAMENT TUNELCRETE

Para establecer las proporciones de aditivos más convenientes y conocer si es mejor utilizar el humo de sílice sólo o combinado, se fabricaron las 16 dosificaciones cuyas características se indican en los **Cuadros 3.1.2.I** y **3.1.2.II.**

		DOSIFICACIONES DE LABORATORIO (1ª ETAPA)								
		LR-1	LR-2	LR-3	LR-4	LR-5	LR-6	LR-7	LR-8	LR-9
Cemento (kg/m^3)		400	400	400	400	400	400	400	400	400
Árido 0-5mm (kg/m^3)		1098	1098	1098	1098	1098	1098	1098	1098	1098
Árido 5-12mm (kg/m^3)		590	590	590	590	590	590	590	590	590
Agua (l/m^3)		268	268	268	255	249	249	237	237	237
Superfluidificante conjuntamente con Humo de sílice	(%)	6	6	6	8	8	8	10	10	10
	(kg/m^3)	24	24	24	32	32	32	40	40	40
Acelerante	(%)	4	5	6	4	5	6	4	5	6
	(kg/m^3)	16	20	24	16	20	24	16	20	24
Relación A/C		0,5	0,49	0,49	0,46	0,44	0,44	0,41	0,41	0,41
Peso específico teórico (g/cm^3)		2,286	2,284	2,282	2,296	2,301	2,299	2,313	2,311	2,308
Cono de Abrams (cm)		10	7	7	12	7	8	11	12	12
Coste aditivos (Ptas/m^3)		2880	3240	3600	3360	3720	4080	3840	4200	4560
Coste dosificación (Ptas/m^3)		10394	10754	11114	10874	11234	11594	11354	11714	12074

Cuadro 3.1.2.I.- Dosificaciones de laboratorio con humo de sílice incorporado en el superfluidificante y acelerante.

	DOSIFICACIONES DE LABORATORIO (2ª ETAPA)						
	LB-1	LB-2	LB-3	LB-4	LB-5	LB-6	LB-7
Cemento (kg/m^3)	400	400	400	400	400	400	400
Árido 0-5mm (kg/m^3)	1098	1098	1098	1098	1098	1098	1098
Árido 5-12mm (kg/m^3)	590	590	590	590	590	590	590
Agua (l/m^3)	253	260	263	280	251	256	261
Superfluidificante (%)	0,8	0,8	0,8	0,8	1	1	1
Humo de sílice (kg/m^3)	15	20	25	30	15	20	25
Relación A/C	0,49	0,50	0,49	0,52	0,48	0,48	0,49
Peso específico teórico (g/cm^3)	2,296	2,281	2,266	2,236	2,298	2,281	2,265
Cono de Abrams (cm)	11	13	11	13	12	12	11
Coste aditivos (Ptas/m^3)	1338	1688	2038	2388	1410	1760	2110
Coste dosificación (Ptas/m^3)	8852	9202	9552	9902	8924	9274	9624

Cuadro 3.1.2.II.- Dosificaciones de laboratorio con superfluidificante, humo de sílice y acelerante separados.

3.1.2.1.- Conclusiones sobre el superfluidificante combinado con el humo de sílice y sobre el acelerante

Tras los ensayos de las dosificaciones en las que se han empleado proporciones variables de acelerante y de humo de sílice combinado con superfluidificante, se pueden formular las conclusiones siguientes:

A) Al aumentar la proporción de acelerante disminuye la resistencia del hormigón a 28 días. Para una proporción del 6%, la resistencia a 28 días es el 85% de la resistencia de la formulación patrón.

B) Al aumentar la proporción de superfluidificante + humo de sílice aumenta la resistencia de la formulación. Para una proporción de superfluidificante + humo de sílice del 10% la resistencia a 28 días de la formulación llega al 114% de la resistencia de la formulación base.

C) La adición de superfluidificante + humo de sílice y acelerante hace que el hormigón sea más rígido que el hormigón patrón.

   Para una proporción del 6% de superfluidificante + humo de sílice y del 4% de acelerante, el cociente E_{28}/σ_{28} vale 593; mientras que ese valor para la mezcla patrón es de 470.

D) El módulo de Young del hormigón aumenta al aumentar la proporción de superfluidificante + humo de sílice; aunque las variaciones son pequeñas, pues son menores que el 14% del módulo de Young de la formulación patrón.

E) Al aumentar la proporción de superfluidificante + humo de sílice, la rigidez del hormigón disminuye. Para unas proporciones del 8% de superfluidificante + humo de sílice y del 6% de acelerante la rigidez del hormigón es similar a la de la dosificación patrón.

F) Se ha encontrado una cierta interacción entre el acelerante y el aditivo que contiene el humo de sílice + el superfluidificante. Esta interacción produce resultados anómalos para proporciones bajas de superfluidificante + humo de sílice y altas de acelerante.

3.1.2.2.- Conclusiones sobre el superfluidificante y humo de sílice, utilizados por separado, y sobre el acelerante

Los resultados de los ensayos realizados ponen de manifiesto que por debajo de una proporción de 25 kg de humo de sílice por metro cúbico de hormigón, los resultados que se obtienen son poco significativos.

Esta conclusión es totalmente lógica ya que el papel inicial que juega el humo de sílice es el de rellenar los huecos que se crean entre las partículas de cemento para, a continuación, producir unas reacciones químicas que refuerzan el papel aglomerante del cemento.

Es razonable suponer que proporciones inferiores a 25 kg/m^3, que suponen el 6,25% del peso de cemento del hormigón, tengan un efecto poco significativo e incluso errático sobre las propiedades del hormigón.

Admitiendo que la proporción de humo de sílice debe ser como mínimo de 25 kg por metro cúbico, dado que el aditivo SIKAMENT TUNELCRETE contiene, además del superfluidificante, el 40% de humo de sílice; resulta que, para conseguir 25 kg de humo de sílice, harían falta 62,5 kg de SIKAMENT TUNELCRETE.

Dado que el precio de este aditivo es de unas 60 Ptas/kg; resulta que el coste para dosificar con 62,5 kg será de 3.750.- Ptas/m^3.

Este coste es realmente más caro que el que se consigue utilizando humo de sílice por separado y, por ello, se recomienda utilizar el humo de sílice como aditivo separado. De esta forma se podrá obtener una formulación más económica y se podrá variar la proporción de superfluidificante con independencia de la dosificación que se desee en humo de sílice.

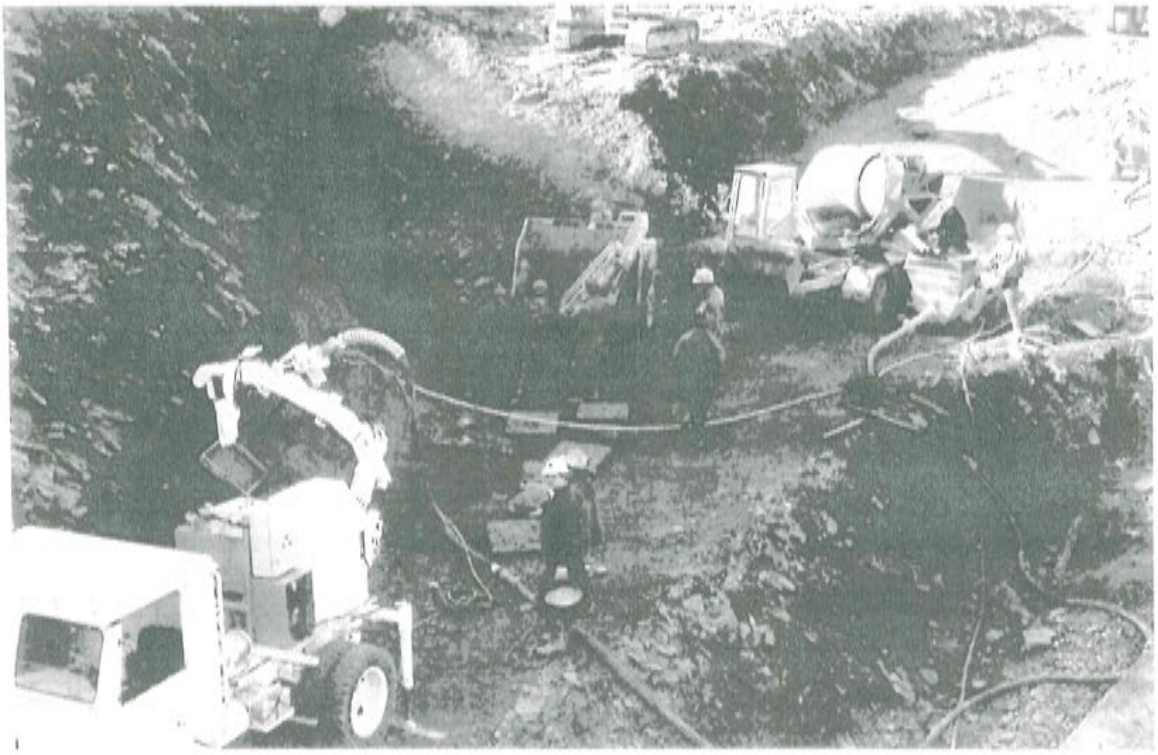
3.1.3.- Evaluación de la mejor dosificación proyectada

Una vez comprobado el tipo y proporción más favorable de los aditivos ensayados, se confeccionaron las nueve formulaciones que se muestran en el **Cuadro 3.1.3.I** con objeto de determinar que proporciones de aditivos daban mejores resultados al utilizar un robot de proyección.

Para ello, estas nueve formulaciones se proyectaron con el robot Putzmeister, que se muestra en la **Fotografía 3.1.3.A**, que permitía obtener un caudal de proyección de 9,6 m^3/h.

		DOSIFICACIONES PROYECTADAS					
		R-1	R-2	R-3	R-4	R-5	R-6
Cemento (kg/m^3)		400	400	400	400	400	400
Árido 0-5mm (kg/m^3)		1098	1098	1098	1098	1098	1098
Árido 5-12mm (kg/m^3)		590	590	590	590	590	590
Agua (l/m^3)		265	265	265	245	245	245
Superfluidificante conjuntamente con Humo de sílice	(%Cemento)	6	6	6	8	8	8
	(kg/m^3)	24	24	24	32	32	32
Acelerante	(%Cemento)	4	5	6	4	5	6
	(kg/m^3)	16	20	24	16	20	24
Relación Agua/Cemento		0,49	0,49	0,48	0,44	0,44	0,43
Peso específico teórico (g/cm^3)		2,289	2,287	2,285	2,309	2,306	2,304
Cono de Abrams (cm)		9	8	8	7	7	7
Coste aditivos (Pta/m^3)		2880	3240	3600	3360	3720	4080
Coste dosificación (Pta/m^3)		10394	10754	11114	10874	11234	11594

Cuadro 3.1.3.I.- Componentes de dosificaciones proyectadas.



Fotografía 3.1.3.A.- Vista del robot de proyección, bomba de gunitado y autohormigonera.

Para poder controlar la calidad del hormigón proyectado se utilizaron unas artesas normalizadas que se rellenaron de hormigón con el robot, tal como se ilustra en la **Fotografía 3.1.3.B**.

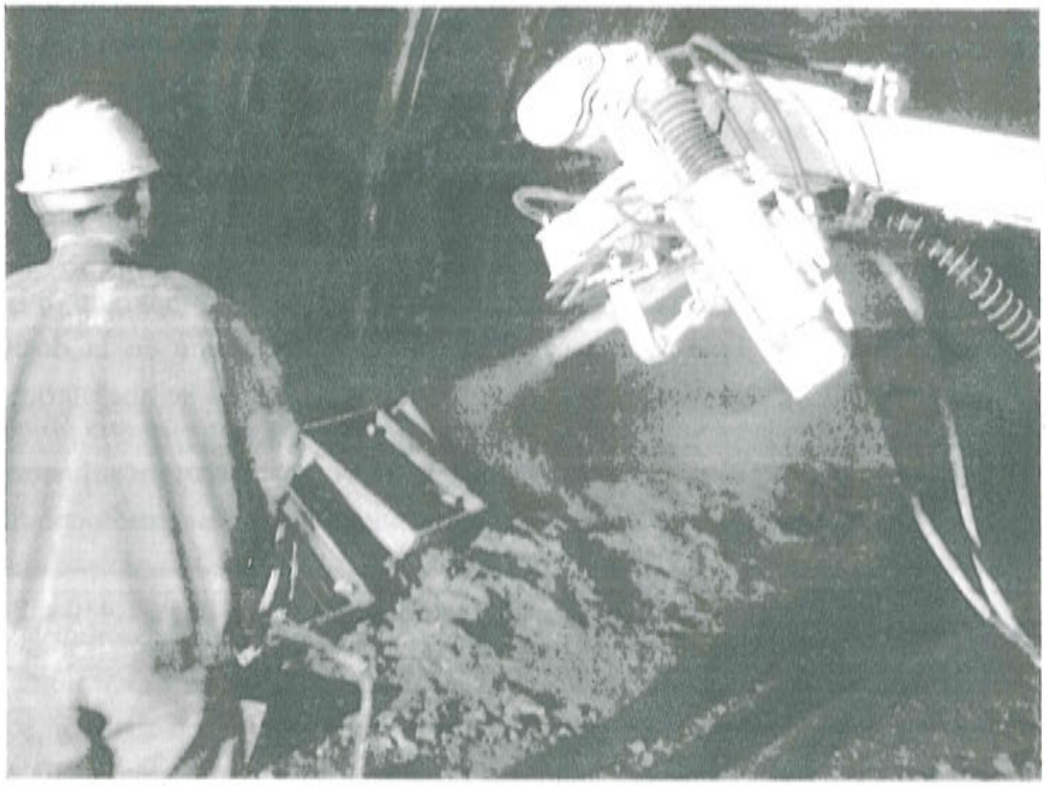
Una vez curadas las artesas rellenas de hormigón, se obtenían de ellas probetas de 6 cm de diámetro y 12 cm de longitud para realizar los correspondientes ensayos mecánicos.

En la **Fotografía 3.1.3.C** se ilustra el proceso de obtención de testigos a partir de las artesas de hormigón proyectado.

En los apartados siguientes se presentan las principales conclusiones obtenidas sobre la proporción de los distintos aditivos ensayados.

3.1.3.1.- Acelerante

A medida que aumenta la proporción de acelerante se constata una disminución de la resistencia del hormigón.



Fotografía 3.1.3.B.- Proyección sobre las artesas para preparar las losas de ensayo.

Fotografía 3.1.3.C.- Extracción de las probetas de hormigón de las artesas proyectadas.

El acelerante sólo ejerce una función positiva durante las primeras horas de vida del hormigón; pues al disminuir el tiempo de fraguado, facilita la colocación de espesores importantes de hormigón proyectado.

En el caso de que el espesor de las capas a proyectar sea moderado, inferior a 10 cm, cabría plantearse la conveniencia de no utilizar acelerante en la dosificación. Esta decisión tendría dos efectos positivos ya que por un lado se abarataría el coste de la formulación, y por otro, se conseguiría una mayor resistencia.

En la investigación realizada los mejores resultados se han logrado con una proporción de acelerante del 4% del peso del cemento. Esto supone 10 kg de acelerante por metro cúbico de hormigón y un coste, por este concepto, de unas 1.440.- Ptas por metro cúbico.

3.1.3.2.- Superfluidificante

Los resultados obtenidos en esta investigación indican que no parece interesante utilizar un aditivo que contenga conjuntamente el superfluidificante y el humo de sílice.

Probablemente la razón para ello estriba en que, en caso de que se utilice un aditivo con humo de sílice y superfluidificante, se condiciona las proporciones de humo de sílice y superfluidificante a las proporciones en que estos dos aditivos se encuentran en el producto comercial utilizado.

La utilización del superfluidificante resulta imprescindible en cualquier formulación de hormigón proyectado ya que permite reducir considerablemente el agua de amasado y, para una misma dosificación de cemento, trabajar con relaciones agua/cemento más bajas con el consiguiente aumento de la resistencia del hormigón proyectado.

Los resultados de los ensayos realizados en esta investigación indican que la proporción más favorable de superfluidificante es del 1% del peso en cemento.

En este caso esto ha considerado una dosificación de 4 kg de fluidificante por metro cúbico de hormigón; con una repercusión en el coste de unas 360.- Ptas/m^3.

3.1.3.3.- Humo de sílice

El humo de sílice tiene la posibilidad de densificar el hormigón proyectado; ya que las partículas de sílice se acomodan entre las de cemento rellenando los huecos existentes. Además el humo de sílice produce un cierto efecto aglomerante que reduce el índice de rebote.

De acuerdo con esto es lógico pensar que para proporciones bajas de humo de sílice no se aprecien los efectos positivos de este aditivo. De hecho en esta investigación se han encontrado efectos erráticos, incluso caída de resistencia respecto a la formulación patrón, para proporciones bajas de humo de sílice.

Ya se ha indicado antes que es conveniente utilizar por separado este aditivo a fin de poder emplear la dosificación adecuada. En esta investigación la proporción de humo de sílice, a partir de la cual se aprecian claramente los beneficios de este aditivo, ha sido de 30 kg por cada metro cúbico. Esto supone una repercusión, por este concepto, de 2100.- Ptas por metro cúbico de hormigón.

3.1.4.- Conclusiones obtenidas en la Fase I

Los trabajos realizados en la Fase I de este proyecto de investigación han permitido analizar la influencia en las propiedades del hormigón de tres aditivos esenciales: superfluidificante, humo de sílice y acelerante. Para completar la investigación se consideró necesario investigar los efectos que produce en el hormigón proyectado la adición de fibras de acero; lo cual ha sido objeto de las fases posteriores.

Para ello se ha investigado el comportamiento de 25 formulaciones de hormigón y se han realizado los siguientes ensayos:

257 Ensayos de compresión simple, con determinación de parámetros elásticos.

257 Determinaciones del peso específico.

25 Determinaciones del asiento de una mezcla de hormigón.

12 Ensayos de absorción de energía en placa de hormigón.

6 Ensayos de permeabilidad en cámara triaxial.

3 Determinaciones de granulometría por tamizado.

2 Determinaciones de la densidad relativa y absorción de áridos.

1 Ensayo de desgaste de Los Ángeles.

1 Determinación de arcillas en áridos.

1 Análisis completo de la calidad del agua.

Además de estos ensayos y determinaciones, que corresponden a las dosificaciones consideradas como válidas, hay que tener en cuenta que en el otoño de 1998 se realizaron numerosos análisis que dieron resultados erráticos por efecto de las bajas temperaturas en el Túnel Experimental de la Mina Escuela.

Estos trabajos han permitido obtener las conclusiones siguientes:

1. Interesa dosificar por separado el humo de sílice del superfluidificante.

2. Interesa trabajar con la mínima proporción posible de acelerante; ya que la adición de este producto rebaja siempre la resistencia de la formulación.

3. El efecto del superfluidificante es fundamental para conseguir relaciones agua/cemento muy bajas que, por lo tanto, dan dosificaciones con resistencias elevadas. La proporción de superfluidificante que resulta más adecuada es del 1% del peso del cemento.

4. El humo de sílice densifica el hormigón y permite aumentar la resistencia y rigidez de la formulación, con lo cual se puede contrarrestar, en su caso, la pérdida de resistencia que produce el acelerante.

   Por debajo de una dosificación de 25 kg de humo de sílice, por metro cúbico de hormigón, los efectos de este aditivo son poco significativos.

3.2.- ACTIVIDADES Y RESULTADOS DE LA FASE II

En la Fase II se han confeccionado 27 formulaciones diferentes con objeto de evaluar la influencia que tiene, sobre las características del hormigón, la adición de fibras de acero y, complementariamente, comprobar la influencia que tienen las proporciones del acelerante y humo de sílice.

3.2.1.- Dosificaciones investigadas

En la fabricación del hormigón, en esta fase, se ha empleado el mismo tipo de cemento que en la primera; aunque el tamaño del árido se ha limitado a 8 mm.

Las fibras de acero que se han utilizado han sido las tipo ZP-305 y 65/35 fabricadas por BECKAERT.

Se ha partido de tres dosificaciones base para la investigación:

- P1 (sin fibras de acero)
- P2 (con 40 kg de fibras tipo ZP-305 por metro cúbico de hormigón)
- P3 (con 40 kg de fibras tipo 65/35 por metro cúbico de hormigón).

y veinticuatro dosificaciones (1, 2, 3, ..., 24) en las que se ha variado:

- el tipo de fibra (ZP-305 y 65/35)
- la cantidad de fibra (30, 40 y 50 kg de fibras por metro cúbico de hormigón)
- el acelerante (4 y 6 % en peso del cemento)
- el humo de sílice (30 y 40 kg de humo de sílice por metro cúbico de hormigón).

En los **Cuadros 3.2.1.I, 3.2.1.II** y **3.2.1.III** se presentan las características de las dosificaciones investigadas en la segunda fase de este trabajo.

3.2.2.- Ensayos realizados

A lo largo de esta fase se han realizado los siguientes ensayos:

- 3 determinaciones de granulometría por tamizado
- 2 determinaciones de densidad relativa y absorción de áridos
- 1 ensayo de desgaste de Los Ángeles
- 27 medidas de la consistencia del hormigón mediante el ensayo del cono de Abrams
- 17 ensayos del penetrómetro

				DOSIFICACIONES PATRÓN		
				P1	P2	P3
COMPONENTES	CEMENTO	CEMENTO	(kg/m3)	400	400	400
	AGUA	AGUA	(kg/m3)	240	243	245
	ÁRIDOS	ÁRIDO 0-5 mm	(kg/m3)	1207	1207	1207
		ÁRIDO 5-10 mm	(kg/m3)	481	481	481
	ADITIVOS	ACELERANTE	(% en peso de cemento)	0	0	0
			(kg/m3)	0	0	0
		SUPERFLUIDIFICANTE	(% en peso de cemento)	1	1	1
			(kg/m3)	4	4	4
	ADICIONES	HUMO DE SÍLICE	(kg/m3)	0	0	0
	FIBRA	FIBRA ZP305	(kg/m3)	0	0	0
		FIBRA 65/35	(kg/m3)	0	0	0
CARACTERÍSTICAS	Relación agua/cemento			0,47	0,48	0,48
	Densidad teórica		(g/m3)	2,342	2,366	2,363
	Cono de Abrams		(cm)	15	18	19
COSTES	Costes de la dosificación		(ESP/m3)	7879	16679	17079

Cuadro 3.2.1.I.- Fase II. Dosificaciones patrón.

				DOSIFICACIONES DE LABORATORIO CON FIBRA ZP-305											
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
COMPONENTES	CEMENTO	CEMENTO	(kg/m3)	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
	AGUA	AGUA	(kg/m3)	260	260	272	270	250	250	255	260	248	254	250	264
	ÁRIDOS	ÁRIDO 0-5 mm	(kg/m3)	1207	1207	1207	1207	1207	1207	1207	1207	1207	1207	1207	1207
		ÁRIDO 5-10 mm	(kg/m3)	481	481	481	481	481	481	481	481	481	481	481	481
	ADITIVOS	ACELERANTE	(% en peso de cemento)	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6
			(kg/m3)	16	24	16	24	16	24	16	24	16	24	16	24
		SUPERFLUIDIFICANTE	(% en peso de cemento)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
			(kg/m3)	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	ADICIONES	HUMO DE SÍLICE	(kg/m3)	30	30	40	40	30	30	40	40	30	30	40	40
	FIBRA	FIBRA ZP305	(kg/m3)	30	30	30	30	40	40	40	40	50	50	50	50
		FIBRA 65/35	(kg/m3)												
CARACTERÍSTICAS	Relación agua/cemento			0,48	0,48	0,50	0,50	0,46	0,46	0,46	0,47	0,46	0,47	0,45	0,48
	Densidad teórica		(g/m3)	2,265	2,264	2,231	2,230	2,283	2,279	2,257	2,248	2,293	2,281	2,270	2,250
	Cono de Abrams		(cm)	18	18	19	19	19	19	17	19	18	19	18	19
COSTES	Costes de la dosificación		(ESP/m3)	18099	18859	18799	19559	20299	21059	20999	21759	22499	23259	23199	23959

Cuadro 3.2.1.II.- Fase II. Dosificaciones con fibras ZP-305.

				DOSIFICACIONES DE LABORATORIO CON FIBRA ZP-305											
				13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
COMPONENTES	CEMENTO	CEMENTO	(kg/m3)	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
	AGUA	AGUA	(kg/m3)	245	250	255	255	242	252	256	250	244	250	250	260
	ÁRIDOS	ÁRIDO 0-5 mm	(kg/m3)	1207	1207	1207	1207	1207	1207	1207	1207	1207	1207	1207	1207
		ÁRIDO 5-10 mm	(kg/m3)	481	481	481	481	481	481	481	481	481	481	481	481
	ADITIVOS	ACELERANTE	(% en peso de cemento)	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6
			(kg/m3)	16	24	16	24	16	24	16	24	16	24	16	24
		SUPERFLUIDIFICANTE	(% en peso de cemento)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
			(kg/m3)	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	ADICIONES	HUMO DE SÍLICE	(kg/m3)	30	30	40	40	30	30	40	40	30	30	40	40
	FIBRA	FIBRA ZP305	(kg/m3)												
		FIBRA 65/35	(kg/m3)	30	30	30	30	40	40	40	40	50	50	50	50
CARACTERÍSTICAS	Relación agua/cemento			0,45	0,46	0,46	0,46	0,44	0,47	0,46	0,45	0,45	0,46	0,45	0,47
	Densidad teórica		(g/m3)	2,283	2,273	2,251	2,247	2,293	2,277	2,256	2,259	2,298	2,286	2,270	2,254
	Cono de Abrams		(cm)	16	17	19	18	16	17	19	16	17	19	18	19
COSTES	Costes de la dosificación		(ESP/m3)	18399	19159	19099	19859	20699	21459	21399	22159	22999	23759	23699	24459

Cuadro 3.2.1.III.- Fase II. Dosificaciones con fibras 65/35.

- 216 determinaciones de la densidad

- 162 ensayos de rotura a compresión simple, con determinación del módulo de elasticidad

- 53 ensayos para la determinación de la energía absorbida en placa

3.2.3.- Conclusiones obtenidas en la Fase II

En base a los resultados obtenidos en estos ensayos se pueden establecer las siguientes conclusiones:

1) La adición de fibras de acero en el hormigón origina un importante aumento de la energía absorbida durante la rotura y ese aumento es prácticamente lineal para proporciones de fibras de acero comprendidas entre 30 y 50 kg de fibras por m^3 de hormigón.

2) En contra de lo que en un principio cabría esperar, las dosificaciones con menor cantidad de fibras han proporcionado las resistencias a compresión simple más altas. La explicación a estos paradójicos resultados puede estar en el hecho de que las fibras hayan ejercido un efecto de aireación durante el amasado de la mezcla, generando una porosidad superior a la habitual que ha debilitado el hormigón reduciendo sus propiedades resistentes. La justificación aquí expuesta se apoya en los siguientes hechos observados durante el proceso de fabricación y ensayo de los hormigones:

   - las dosificaciones con más fibra produjeron una efervescencia al verterlas en las placas

   - las dosificaciones con más fibra presentaron una mayor porosidad

   - las dosificaciones con más fibra presentaron una menor densidad.

   Este efecto se debería eliminar al proyectar el hormigón con un robot pues se produciría una mayor compactación que eliminaría la nociva purosidad que ahora se producido. Por ello se ha llevado a cabo la Fase III de esta investigación, en la que se ha trabajado con formulaciones proyectadas mediante un robot, a fin de tratar de eliminar estos errores operativos.

3) No se han apreciado reducciones significativas en la resistencia de los hormigones al añadir el acelerante libre del álcalis. Esta conclusión se sitúa en la misma línea que las presentadas en el Tercer Simposium Internacional de Hormigón Proyectado (Gol, Noruega 26-29 de Septiembre de 1999) donde se sostiene que los acelerantes libres de álcalis no tienen, a diferencia del resto de acelerantes, una gran influencia en las resistencias finales.

4) Se puede afirmar que el humo de sílice aumenta la resistencia del hormigón; aunque este aumento es sólo del 4 al 6% para el rango de dosificación del humo de sílice utilizado que está comprendido entre 30 y 40 kg de humo de sílice por m^3. Probablemente este incremento sería más significativo si se analiza su resistencia a los 90 días.

   En cualquier caso se considera que, como mínimo, la dosificación en humo de sílice de un hormigón proyectado debe ser como mínimo de 30 kg/m^3 y esta dosificación aumentará en proporción inversa de la calidad de la arena.

3.3.- ACTIVIDADES Y RESULTADOS DE LA FASE III

En la tercera fase de la investigación se ha comprobado, proyectando las dosificaciones investigadas con un robot, el efecto que tiene sobre la calidad del hormigón proyectado distintas proporciones de fibras de acero.

3.3.1.- Dosificaciones investigadas

Al igual que en las fases anteriores, en la fabricación del hormigón se ha utilizado cemento tipo I 42.5 R; aunque el tamaño máximo del árido, en este caso, ha sido de 10 mm.

Por lo que se refiere a los aditivos habituales se han utilizado los siguientes:

Acelerante de fraguado: SIGUNITA L-50 RF, libre de álcalis, en la proporción del 4% del peso de cemento.

Superfluidificante: SIKAMENT TN 100, en la proporción del 1% del peso de cemento.

Humo de sílice: SIKACRETE-P, en la proporción de 40 kg/m^3.

Se han utilizado dos tipos de fibras de acero, del tipo DRAMIX ZP-305 y DRAMIX 65/35.

Las dosificaciones empleadas han sido 30, 40 y 50 kg de fibras de acero por metro cúbico de hormigón.

Para alcanzar los objetivos marcados en este estudio se han realizado las siguientes dosificaciones:

- Una dosificación patrón P1 sin fibras.
- Seis dosificaciones en las que se ha variado el tipo de fibra (ZP-305 y 65/35) y su cantidad (30, 40 y 50 kg de fibra por metro cúbico de hormigón).

En el **Cuadro 3.3.1.I** se presentan las características de las dosificaciones investigadas en esta fase.

3.3.2.- Ensayos realizados

En cada una de las ocho dosificaciones ensayadas en esta fase se ha determinado el asiento, según el cono de Abrams, que ha estado comprendido entre 12 y 18 cm.

Se han hecho un total de 19 ensayos a compresión simple con probetas extraídas de artesas normalizadas, que han dado valores medios comprendidos entre 351 y 459 kp/cm^2 a los 28 días de edad.

Asimismo, de cada formulación, se ha determinado el contenido real de fibras de acero y la energía absorbida en el ensayo de punzonamiento de placa.

En la **Figura 3.3.2.a** se presentan los datos de energía absorbida en cada ensayo en función del contendo teórico en fibras de la dosificación de todas las dosificaciones ensayadas.

				DOSIFICACIÓN PATRÓN	DOSIFICACIONES PROYECTADAS CON FIBRA						DOSIFICACIÓN PROYECTADA SOBRE MALLAZO DE 150x150x6
				P1	1	2	3	4	5	6	7
COMPONENTES	CEMENTO	CEMENTO	(kg/m3)	400	400	400	400	400	400	400	400
	AGUA	AGUA	(kg/m3)	213	213	213	213	213	213	213	213
	ÁRIDOS	ÁRIDO 0-5 mm	(kg/m3)	1207	1207	1207	1207	1207	1207	1207	1207
		ÁRIDO 5-10 mm	(kg/m3)	481	481	481	481	481	481	481	481
	ADITIVOS	ACELERANTE	(% en peso de cemento)	4	4	4	4	4	4	4	4
			(kg/m3)	16	16	16	16	16	16	16	16
		SUPERFLUIDIFICANTE	(% en peso de cemento)	1	1	1	1	1	1	1	1
			(kg/m3)	4	4	4	4	4	4	4	4
	ADICIONES	HUMO DE SÍLICE	(kg/m3)	40	40	40	40	40	40	40	40
	FIBRA	FIBRA ZP305	(kg/m3)		30	40	50				
		FIBRA 65/35	(kg/m3)					30	40	50	
CARACTERÍSTICAS	Relación agua/cemento			0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41
	Densidad teórica		(g/m3)	2,223	2,243	2,250	2,257	2,243	2,250	2,257	2,223
	Cono de Abrams		(cm)	17	12	14	15	14	15	18	17
COSTES	Costes de la dosificación		(ESP/m3)	12199	18799	20999	23199	19099	21399	23699	12199 *

* Costes referentes al mallazo no incluidos.

Cuadro 3.3.1.I.- Dosificaciones preparadas.

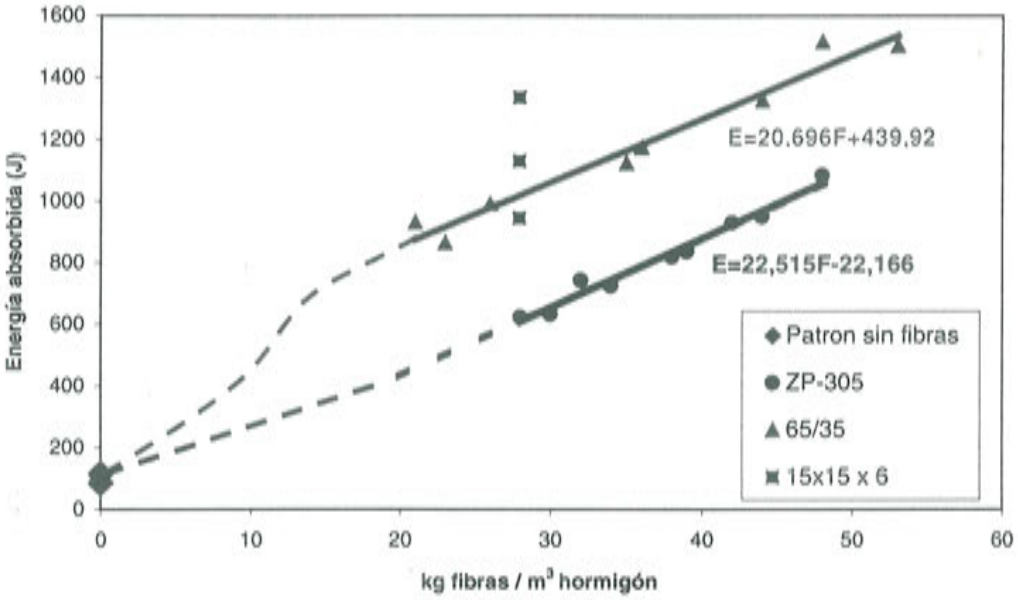


Figura 3.3.2.a.- Resultados de los ensayos de absorción de energía.

3.3.3.- Conclusiones obtenidas en la Fase III

A partir de los resultados de los ensayos realizados en la Fase III, se pueden obtener las conclusiones siguientes:

I.- La energía media que puede absorber un hormigón proyectado sin fibras de acero y con una resistencia de 358 kp/cm^2 es de unos 130 julios.

II.- La energía media que puede absorber un hormigón proyectado, con una resistencia de 358 kp/cm^2, armado con un mallazo 15x15ϕ6 es de unos 1100 julios.

III.- Existe una diferencia muy importante entre la energía que puede absorber un hormigón proyectado, según el tipo de fibra de acero que se añada. En los ensayos realizados, las fibras DRAMIX 65/35 han dado mucho mejores resultados que las fibras DRAMIX ZP-305.

IV.- En el rango entre 20 y 50 kg de fibras por metro cúbico de hormigón, la energía absorbida varía proporcionalmente con el contenido en fibras.

V.- En las dosificaciones estudiadas, para absorber una energía de 1100 julios bastan unos 32 kg/m^3 de las fibras DRAMIX 65/35; pero hacen falta unos 50 kg/m^3 si se utilizan las fibras DRAMIX ZP-305.

4.- CONCLUSIONES

Este proyecto de investigación, que se empezó a proponer en 1995 y fue aprobado por OCICARBÓN en 1997, se ha alargado mucho más de lo que estaba previsto; pues ha finalizado en noviembre de 2000.

Las mayores dificultades con que se ha debido enfrentar esta investigación se han derivado de la puesta a punto de los equipos de proyección, de la disponibilidad del sitio adecuado para realizar las proyecciones y del montaje y puesta a punto del laboratorio necesario para controlar y ensayar las dosificaciones estudiadas.

No obstante lo anterior hay que resaltar que sin la amplia colaboración que Geocontrol ha recibido de la Fundación Sta. Bárbara, que ha puesto a disposición de esta investigación las instalaciones del Túnel Experimental de El Bierzo, esta investigación se hubiera llevado a cabo con unos costes y unos plazos mucho mayores que los que han sido necesarios.

Así mismo hay que expresar el público agradecimiento a las empresas SIKA y BEKAERT que han prestado una ayuda material y técnica muy importante en lo que se refiere a los aditivos del hormigón proyectado que se ha utilizado en esta investigación.

Como principal activo de esta investigación hay que señalar el notable conocimiento que Geocontrol ha adquirido, a lo largo de los cuatro años que ha durado esta trabajos, sobre la influencia que los distintos aditivos actualmente empleados en la fabricación del hormigón proyectado por vía húmeda tienen sobre la calidad del hormigón proyectado.

Entre las conclusiones más relevantes que se han obtenido en esta investigación cabe señalar las siguientes:

1. La utilización de los acelerantes libres de álcalis tiene enormes ventajas desde el punto de vista de las condiciones de salubridad y afección al medio ambiente; además, se ha constatado que la utilización de estos acelerantes disminuye muy poco la resistencia del hormigón a largo plazo.

2. No obstante lo anterior, en esta investigación se ha puesto de manifiesto que los mejores resultados se obtienen empleando la menor proporción posible de acelerante.

   Como dosificación de referencia se puede retener, que el acelerante debe suponer el 4% del peso de cemento; aunque, si el hormigón proyectado no debe cumplir unas fuertes exigencias de resistencia a corto plazo se debe intentar trabajar con proporciones menores de acelerante.

3. El efecto del superfluidificante es fundamental para conseguir relaciones agua/cemento muy bajas que se proyecten sin dificultad; que, por lo tanto, dan dosificaciones con resistencias elevadas. La proporción de superfluidificante que resulta más adecuada es del 1% del peso del cemento.

4. El humo de sílice densifica el hormigón y permite aumentar su resistencia y rigidez; con lo cual se puede contrarrestar, en su caso, la pérdida de resistencia que pueda producir el acelerante.

   En cualquier caso se considera que, como mínimo, la dosificación en humo de sílice de un hormigón proyectado debe ser de 30 kg por metro cúbico de cemento.

5. En esta investigación se ha puesto en evidencia que los mejores resultados obtenidos con el humo de sílice corresponden al empleo de humo de sílice en polvo y no en forma líquida, mezclado con otros aditivos.

6. La adición de fibras de acero de hormigón mejora notablemente su comportamiento en la post-rotura y aumenta la resistencia del hormigón hasta un 10%, aproximadamente, para dosificaciones en fibras que varían entre 30 y 50 kg/m^3.

7. El ensayo de absorción de energía realizado, punzonando a velocidad constante una placa de 600 x 600 x 100 mm, midiendo la energía absorbida para una reflexión en el centro de la placa de 25 mm es muy representativo y tiene gran utilidad para controlar la cantidad y calidad de las fibras añadidas de hormigón.

8. Los ensayos realizados han puesto de manifiesto que un hormigón proyectado sin fibras ni mallazo, absorbe una energía entre 130 y 180 julios, en función que su resistencia a 28 días varíe entre 250 y 400 kp/cm^2.

También se ha comprobado que un hormigón de 400 kp/cm^2 de resistencia a 28 días armado con un mallazo de 150 x 150 x 6 mm absorbe una energía de unos 1100 julios.

9. La adición de fibras de acero al hormigón proyectado permite que pueda absorber sin problemas la misma energía que si estuviera armado con un mallazo convencional. Sin embargo hay que señalar que, a igualdad en la dosificación de fibras, el tipo de fibra tiene una influencia fundamental sobre la energía absorbida por el hormigón.

10. Al proyectar el hormigón se producen pérdidas por rebote en la proporción de las fibras que, como mínimo, suponen el 10% y aumentan hasta el 30% para dosificaciones del orden de 50 kg/m^3.

    Por ello interesa utilizar fibras de buena calidad que permitan obtener la energía deseada utilizando dosificaciones comprendidas entre 20 y 30 kg/m^3.

Finalmente hay que resaltar que la resistencia del hormigón proyectado no ha sido objeto específico de esta investigación; pero, no obstante lo anterior, a lo largo de los trabajos realizados se han adquirido unas experiencias muy importantes que han permitido establecer las siguientes conclusiones complementarias:

I. Para poner a punto una dosificación de hormigón proyectado resulta muy importante seguir la metodología expuesta en la norma UNE 83-607-94 que se basa en poner a punto una dosificación patrón sin aditivos y, una vez conseguida la resistencia deseada, estudiar las dosificaciones más convenientes de los aditivos a emplear.

II. El factor que más influye en la resistencia del hormigón es el equivalente de arena del árido fino. Si el equivalente de arena es superior a 70 no hay, actualmente, ningún problema para obtener un hormigón proyectado por vía húmeda que tenga una resistencia a 28 días de 300 kp/cm^2 con una dosificación de unos 375 kg de cemento por metro cúbico.

III. Si hay problemas con el equivalente de arena del árido fino se puede rebajar el tamaño máximo de la gravilla hasta 8 mm, forzar la proporción de arena/gravilla hasta el 70/30 y aumentar la proporción de cemento; teniendo en cuenta que la dosificación total de áridos en el hormigón debe estar entre 1600 kg y 1750 kg por metro cúbico.

IV. El tipo de cemento empleado tiene una gran influencia en la calidad del hormigón proyectado. Normalmente se utilizarán cementos de alta resistencia inicial, del tipo 52,5; pero, cuando esto no sea posible, se puede fabricar un buen hormigón proyectado con cementos de fraguado normal y menor resistencia, aumentado la dosificación de cemento hasta 450 kg por metro cúbico y utilizando los aditivos apropiados.

V. La capacidad de absorción de energía de un hormigón proyectado depende de la resistencia del hormigón y del contenido en fibras de acero.

Normalmente un hormigón con una resistencia a 28 días de 400 kp/cm^2 podrá absorber, con dosificaciones de fibras aceptables, unos 1200 julios en el ensayo de punzonamiento de placa. Sin embargo, si su resistencia sólo es de 250 kp/cm^2 la energía que puede absorber difícilmente pasará de 750 julios con dosificaciones normales en fibras de acero.

VI. Cuando la temperatura ambiente del lugar en que se produce el fraguado del hormigón proyectado desciende por debajo de 5ºC se retarda notablemente el proceso de fraguado.

Esta circunstancia debe tener muy en cuenta cuando se vaya a utilizar un hormigón proyectado como elemento de sostenimiento y se necesite una resistencia a corto plazo importante en taludes y emboquilles de túneles que estén ubicados en lugares donde la temperatura pueda descender de 5ºC.