

PRESA DE LA SERENA

Colaboración técnica en el control de los materiales utilizados en su construcción

ERNESTO MUELAS VALDEOLIVAS
JAVIER SAINZ DE CUETO TORRES

Laboratorio Central de Estructuras y Materiales (CEDEX)

1. ANTECEDENTES Y OBJETO

La construcción de la Presa de la Serena, en el río Zújar, en la provincia de Badajoz, en solución de gravedad recta, va a exigir la puesta en obra de un millón de metros cúbicos de hormigón.

Como consecuencia de la importancia de esta obra, la Confederación Hidrográfica del Guadiana, en su calidad de Administración, y la Unión Temporal de Empresas APS, como Contrata de la obra, acordaron solicitar el apoyo técnico del CEDEX, a través del Laboratorio Central de Estructuras y Materiales, para la realización de las siguientes tareas:

1ª. Asesoramiento técnico en la distribución, montaje y equipamiento del Laboratorio a pie de obra.

2ª. Formación del personal del Laboratorio de obra que, en su día, se encargará de la toma de muestras y realización de ensayos de los distintos materiales.

3ª. Caracterización de los materiales mediante los oportunos ensayos normalizados.

4ª. Ensayos con mortero normalizado para obtener las resistencias mecánicas de diferentes mezclas conglomerantes cemento/cenizas, hasta un año de edad.

5ª. Estudio de hormigones con distintas dosificaciones para determinar la idonea para alcanzar la resistencia característica prevista en el Pliego de Condiciones Particulares de la obra.

Para atender esta solicitud se firmó un Convenio de Colaboración Técnica designado como PS-1, entre el CEDEX y la Confederación Hidrográfica del Guadiana, mediante el cual el CEDEX se comprometía a realizar las mencionadas tareas,

dando cuenta de las mismas mediante dos informes parciales y uno final, en los términos contemplados en el mencionado Convenio.

2. AUTORES DEL TRABAJO

Los distintos trabajos llevados a cabo en este estudio han sido realizados por el personal técnico y operario de los Servicios de Materiales Inorgánicos y Estudios y Ensayos Mecánicos, cuyos Jefes respectivos son: D. José Luis Alonso Ramírez y D. Javier Sáinz de Cueto Torres.

La coordinación de los mismos y la dirección del Proyecto correspondió a D. Ernesto Muelas Valdeolivas.

3. RESUMEN DEL TRABAJO REALIZADO

El trabajo realizado lo podemos desglosar en las tres partes diferenciadas por su contenido y que relacionamos seguidamente:

1ª Asesoramiento técnico en el diseño y equipamiento del Laboratorio de Obra, y desarrollo de un cursillo teórico-práctico para la formación del personal del mencionado Laboratorio.

2ª Ensayos para caracterizar los materiales (agua, áridos, cenizas y cemento) a utilizar en la fabricación de los hormigones y "ensayos previos" con hormigones de acuerdo con la EH-82.

3ª Apoyo técnico a la Dirección de Obra en cuestiones relacionadas con los materiales (tipos, calidad, control, etc.).

La labor correspondiente a la primera parte queda recogida en los anexos y, en esencia, ha consistido en lo siguiente:

— Confección de un listado de máquinas, útiles, herramientas y materiales que, a nuestro juicio, se

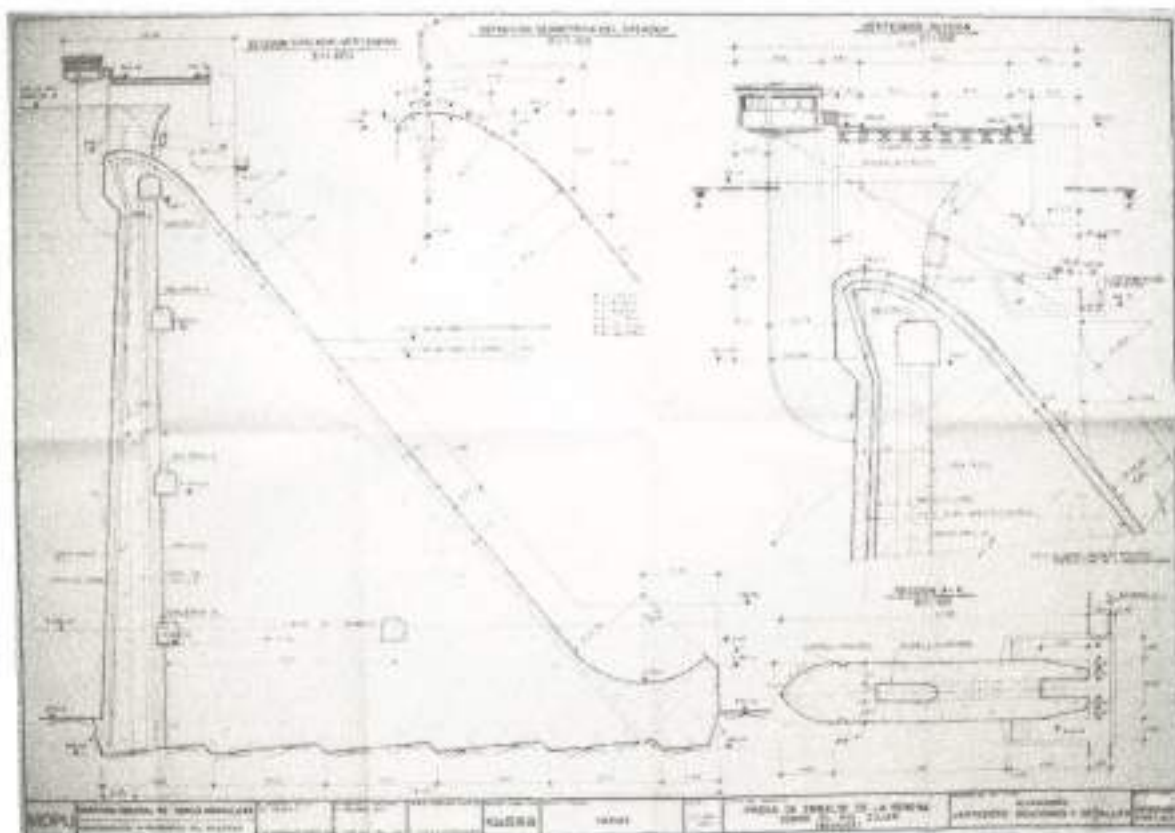


FIGURA 1. Plano de la sección del cuerpo de la presa.

han estimado indispensables para hacer los ensayos en el Laboratorio de Obra. También incluye direcciones de posibles proveedores.

— Estudio y redistribución de los espacios destinados a ensayos dentro del plano del Laboratorio de Obra, de forma adecuada a una mejor funcionalidad, señalando las dotaciones de máquinas,

herramientas, energía y agua, así como algunos detalles constructivos especiales de cada sala en función de su posterior utilización.

— Visita técnica a la obra y al Laboratorio de Obra, solicitada por el Ingeniero Director de la misma, D. Manuel Barragán, y efectuada por los técnicos del Laboratorio Central del CEDEX: D. José Luis



FIGURA 2. Laboratorio de Obra, ala Sur-Oeste.



FIGURA 3. Laboratorio de Obra, ala Sur-Este.

Alonso (Dr. en Ciencias Químicas), D. Javier Sáinz de Cucto (Ingeniero de Caminos) y D. Ernesto Muelas (Ingeniero Técnico de O.P. Y geólogo).

— Curso teórico-práctico de un mes de duración, realizado por el personal del Laboratorio de Obra en el Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX, consistente en el estudio y realización de los ensayos contemplados por la normativa vigente en relación con los materiales siguientes: agua, áridos, cenizas, cementos y hormigones.

Los ensayos correspondientes a la segunda parte se refieren a los hormigones y a los materiales constituyentes de los mismos (agua, cenizas, cemento y áridos), y se han efectuado todos los previstos en la EH-82, RC-75 y Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares de la Obra, de acuerdo con las normas UNE, con las A.S.T.M. o con las A.F.N.O.R. cuando no existían UNE. Además, se han realizado unos estudios de resistencias mecánicas hasta un año de edad en mortero normalizado, utilizando conglomerantes formados por diferentes proporciones cemento/cenizas

(90/10, 80/20, 70/30 y 60/40), al objeto de decidir la mezcla a utilizar en los hormigones de la Presa.

Finalmente, el apoyo técnico a la Dirección de Obra se ha materializado en una serie de reuniones, once concretamente, mantenidas en el Laboratorio Central del CEDEX con el personal técnico que, en cada caso, resultaba adecuado a las cuestiones a debatir.

Los temas tratados en estas reuniones fueron los que, en cada momento, la Dirección de la Obra estimaba de su interés, tales como: el uso de las cenizas en hormigones para presas, calor de hidratación de los cementos, características físicas, mecánicas y químicas exigibles a estos materiales, dosificación de hormigones, utilización de productos acretes, hormigonado en tiempo caluroso, ensayos previos, característicos y de control, etc.

4. ANALISIS DE LOS RESULTADOS Y COMENTARIOS

Para el análisis de los resultados se han tomado

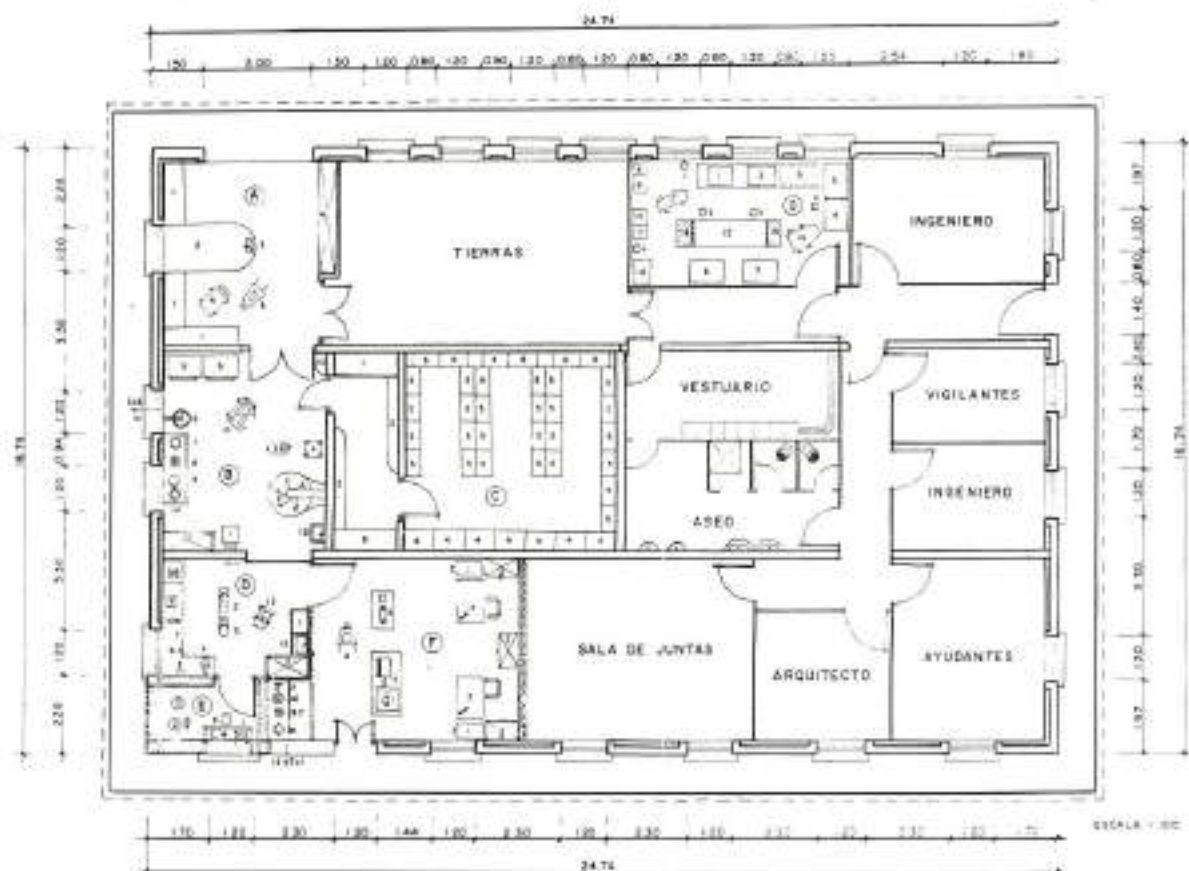


FIGURA 4. Planta del Laboratorio de Obra.

en consideración los siguientes documentos:

"Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares de la Obra", que en lo sucesivo designaremos como "P.P.T.P."

"Instrucción para el proyecto y la ejecución de Obras de hormigón en masa o armado (EH-82).

"Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para la recepción de cementos" (RC-75).

"Standard Specification for FLY ASH AND RAW OR CALCINED NATURAL PUZZOLAN FOR USE AS A MINERAL ADMIXTURE IN PORTLAND CEMENT CONCRETE" (A.S.T.M. - C 618-80).

Esta última norma americana se ha utilizado en cuanto a especificaciones a tener en cuenta para las cenizas volantes, ya que no disponemos de alguna otra equivalente española y, en estos casos, el P.P.T.P. indica que se tomen en consideración las A.S.T.M.

En los cuadros que seguidamente figuran, pueden verse comparativamente las especificaciones relativas a los distintos materiales, en los documentos antes mencionados, así como los resultados obtenidos y los comentarios pertinentes.

4.1. AGUA

CARACTERÍSTICAS	EXIGIDAS EN		OBTENIDAS EN AGUA DEL ZUJAR	¿CUMPLE?
	EH-82	P.P.T.P.		
EXPONENTE DE HIDRÓGENO pH (UNE 7234)	≥ 5	7 ± 0.5	6,2	SI Y NO
SUSTANCIAS DISUELTAS (UNE 7130)	≤ 15 g/l	≤ 15 g/l	0,12 g/l	SI
SULFATOS EN SO_4 (UNE 7131)	≤ 1 g/l	≤ 0.3 g/l	0,02 g/l	SI
ION CLORO Cl (UNE 7178)	≤ 6 g/l	≤ 0.6 g/l	0,02 g/l	SI
HIDRATOS DE CARBONO (UNE 7132)	0	0	NO SE DETECTAN	SI
SUSTANCIAS ORGÁNICAS SOLUBLES EN ÉTER (UNE 7235)	≤ 15 g/l	≤ 15 g/l	NO SE DETECTAN	SI

COMENTARIO: Como puede verse, todos los valores obtenidos cumplen holgadamente con las especificaciones, excepto el pH 6,2 en relación al valor mínimo exigido en el P.P.T.P. (pH 6,5). A nuestro entender, esto no tiene mayor importancia, ya que es admitido generalmente que valores de pH por encima 5, y éste está muy por encima, no causan problemas apreciables en hormigones en masa.

4.2. ARIDOS

4.2.1. Aridos gruesos ϕ de 5 mm.)

CARACTERÍSTICAS	EXIGIDAS EN		OBTENIDAS EN MUESTRAS ENSAYADAS	¿CUMPLE?
	EH-82	P.P.T.P.		
TERRONES DE ARCILLA (UNE 7133)	$\leq 0.25\%$	$\leq 0.25\%$	NO SE DETECTAN	SI
PARTÍCULAS BLANDAS (UNE 7134)	$\leq 5\%$	$\leq 5\%$	NO SE DETECTAN	SI
FINOS < 0.080 mm. (UNE 7135)	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$	0,37%	SI
MATERIAL RETENIDO POR EL TAMIZ 0.063 MM. Y QUE FLOTA EN UN LÍQUIDO DE DENSIDAD 2 (UNE 7244)	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$	NO SE DETECTAN	SI
COMPUESTOS DE AZUFRE EN SO_4 (UNE 7245)	$\leq 1.20\%$	$\leq 1.20\%$	0,12%	SI
REACTIVIDAD POTENCIAL (UNE 7137)	$R > 70$ Conc. $SiO_2 < R$ $R < 70 \rightarrow SO_3 < 35 + 0.5 R$		NO REACTIVA	SI
ESTABILIDAD FRENTE A SOLUCIONES DE SULFATO SÓDICO, 5 CICLOS (UNE 7136). PERDIDA DE PESO	$\leq 12\%$	$\leq 10\%$	0,14%	SI
COEFICIENTE DE FORMA (UNE 7238)	≥ 0.15	≥ 0.15	0,30	SI
ENSAYO DE LOS ANGELES (NLT-149/72)	—	$< 40\%$	26,5%	SI
PESO ESPECÍFICO NETO (UNE 7067)	—	> 2.40	2,67	SI

HORMIGONES

4.2.1. Áridos finos (< de 5 mm.)

CARACTERÍSTICAS	EXIGIDAS EN		OBTENIDAS EN MUESTRAS ENSAYADAS	¿CUMPLE?
	EH-82	P.P.T.P.		
TERRONES DE ARCILLA (UNE 7133)	≤ 1%	—	NO SE DETECTAN	SI
FINOS < 0,080 mm. (UNE 7135)	≤ 5 %	≤ 5%	0,80%	SI
MATERIAL RETENIDO POR EL TAMIZ 0,063 MM. Y QUE FLOTA EN UN LIQUIDO DE DENSIDAD 2 (UNE 7244)	≤ 0,50%	≤ 0,01	0,006%	SI
COMPUESTOS DE AZUFRE EN SO ₄ (UNE 7245)	≤ 1,20%	≤ 1,2%	0,12%	SI
MATERIA ORGANICA (UNE 7245)	< QUE LA MUESTRA PATRON		< QUE EL PATRON	SI
REACTIVIDAD POTENCIAL (UNE 7187)	R > 70 Conc. SiO ₂ < R R < 70 → SiO ₂ < 35 + 0,5 R		NO REACTIVA	SI
ESTABILIDAD FRENTE A SOLUCIONES DE SULFATO SODICO. 5 CICLOS (UNE 7136) PERDIDA DE PESO	≤ 10%	≤ 8%	0,65%	SI
EQUIVALENTE DE ARENA (UNE 7234)	—	≥ 80	97	SI
PESO ESPECIFICO	—	> 2,4	2,59	SI

COMENTARIO. Todos los valores que figuran en estos dos cuadros de los áridos son medias ponderales de los obtenidos para las distintas fracciones y para calcularlas se han tomado los pesos que figuran en las dosificaciones.

4.4. CEMENTO P-350-Y

4.3.1. Prescripciones físico-mecánicas

CARACTERISTICAS	EXIGIDAS EN		OBTENIDAS EN							
	RC-75	P.P.T.P.	MUESTRA 27-11-85	¿CUMPLE?	MUESTRA 16-12-85		¿CUMPLE?	MUESTRA 20-10-86	¿CUMPLE?	
					1º ENSAYO	2º ENSAYO				
FINURA DE MOLIDO RESIDUO SOBRE EL TAMIZ DE 4.900 mallas/cm²	≤ 15%	—	0,85	SI	1,03	—	SI	1,10	SI	
TIEMPOS DE FRAGUADO PRINCIPIO. DESPUES DE FINAL. ANTES DE	45 MIN 12 h	— —	2,30 h 4,30 h	SI SI	2,25 h. 4,15 h.	— —	SI SI	2 h. 3 h.	SI SI	
EXPOSICION EN AUTOCLAVE	≤ 1%	≤ 0,7%	0,06%	SI	0,06%	—	SI	0,03%	SI	
RESISTENCIAS MINIMAS EN KP/CM² A FLEXOTRACCION	3 DIAS	40	—	52,6	SI	43,5	45,2	SI	51,1	SI
	7 DIAS	50	—	67,7	SI	54,1	58,9	SI	63,6	SI
	28 DIAS	60	—	78,2	SI	74,1	77,0	SI	78,3	SI
COMPRESION	3 DIAS	175	—	320	SI	253	262	SI	287	SI
	7 DIAS	250	—	448	SI	357	377	SI	419	SI
	28 DIAS	350	400	557	SI	550	540	SI	512	SI

4.3.2. Prescripciones químicas

CARACTERISTICAS		EXIGIDAS EN		OBTENIDAS EN							
		RC-75	P.P.T.P.	MUESTRA 27-11-85	¿CUMPLE?	MUESTRA 16-12-85	¿CUMPLE?	MUESTRA 11-6-86	¿CUMPLE?	MUESTRA 20-10-86	¿CUMPLE?
PERDIDA AL FUEGO	(%)	< 4	—	0,94	SI	1,20	SI	1,3	SI	2,5	SI
RESIDUO INSOLUBLE	(%)	< 3	—	0,70	SI	0,70	SI	1,2	SI	1,5	SI
OXIDO MAGNESICO	(%)	< 5	—	0,80	SI	0,75	SI	1,2	SI	1,1	SI
TRIOXIDO DE AZUFRE	(%)	< 4	—	2,4	SI	2,80	SI	2,3	SI	2,9	SI
CAL LIBRE	(%)	—	< 1,2	1,1	SI	0,94	SI	1,1	SI	2,1	NO
ALUMINATO TRICALCOICO	(%)	< 5	< 6	0	SI	0	SI	0	SI	0	SI
C ₃ A + C ₄ AF	(%)	< 22	< 18	13,7	SI	14,10	SI	15,0	SI	13,4	SI
C ₃ A + C ₃ S	(%)	—	< 58	69,3	NO	62,60	NO	56,7	SI	67,7	NO

COMENTARIOS.

1º. Las cuatro partidas de cemento ensayadas cumplen con todas las especificaciones físico-mecánicas exigidas tanto en el RC-75 como en el P.P.T.P.

2º. En cuanto a las prescripciones químicas que figuran en el P.P.T.P. cumplen con todas, excepto la cal libre en la muestra del 20-10-86 y la C₃A + C₃S de todas.

3º. Todos los valores correspondientes a las determinaciones químicas cumplen con las especificaciones del RC-75 para los cementos P-350 Y.

4.4. CENIZAS VOLANTES

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS	EXIGIDAS EN		OBTENIDAS EN			
	ASTM C.618	P.P.T.P.	MUESTRA 27-11-85	¿CUMPLE?	MUESTRA 20-10-86	¿CUMPLE?
SO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (MÍNIMO, %)	70,0	70,0	84,6	SI	90,3	SI
TRIOXIDO DE AZUFRE (SO ₂) MÁXIMO, (%)	5,0	4,0	0,16	SI	0,07	SI
HUMEDAD (MÁXIMA, %)	3,0	—	0,05	SI	0,06	SI
PERDIDA AL FUEGO (MÁXIMO, %)	12,0	8	1,9	SI	2,8	SI
CARACTERÍSTICAS FÍSICO-MECÁNICAS FINURA, % RETENIDO SOBRE EL TAMIZ de 45 µm	< 34	< 12	25,3	SI y NO	32,2	SI y NO
ÍNDICE DE ACTIVIDAD PUZOLÁNICA CON EL CEMENTO, MÍNIMO % A 28 DÍAS RESPECTO AL CONTROL	75	—	108	SI	—	—

COMENTARIOS.

1º. Las cenizas volantes ensayadas cumplen sobradamente con las especificaciones de la A.S.T.M. C 618.

2º. También cumplen con las especificaciones del P.P.T.P.; excepto en lo referente a la finura que, a nuestro modo de entender, es demasiado exigente con la limitación del 12%.

4.5. MEZCLAS CONGLOMERANTES
CEMENTO/CENIZAS

Al objeto de sintetizar toda la información relativa a los valores de las resistencias a compresión del estudio en mortero normalizado, con las mezclas conglomerantes cemento-cenizas volantes estudiadas, se ha elaborado el gráfico nº 1 que figura en la página siguiente.

En este gráfico se ha interpolado una serie de curvas, una por edad, que muestran de una forma

sencilla la relación sobre las tres variables del estudio: resistencia a compresión, edad y mezcla conglomerante.

Como puede observarse, las resistencias son relativas, tomando para cada edad el valor de cien en el caso del mortero realizado con cemento puro.

Otra característica que se tiene en cuenta en el gráfico, es el distinto valor, o peso, de los diferentes puntos representados, ya que algunos de ellos

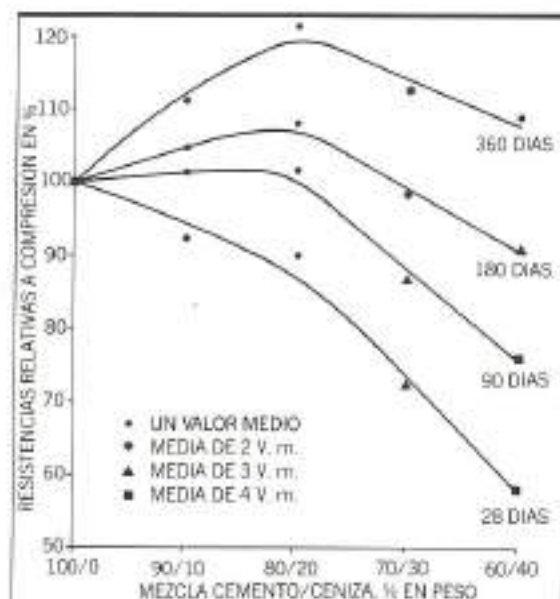


GRAFICO 1.

son valores medios de hasta cuatro ensayos realizados con cementos y cenizas de diferentes partidas y en fechas distintas. Esto queda reflejado por la simbología utilizada para la representación de estos puros y que se explica en el mencionado gráfico.

4.6. HORMIGONES

En el gráfico nº 2, se han representado las resistencias a compresión, eje de ordenadas en una escala natural, en función de la edad de las probetas, eje de abscisas en escala logarítmica.

Las tres líneas de la parte superior corresponden a los morteros normalizados hechos con cemento puro y con las mezclas conglomerantes cemento/ceniza, 70/30 y 60/40, utilizadas en la fabricación de hormigones, mientras que las cuatro situadas en la parte inferior, son las líneas de endurecimiento de los cuatro hormigones estudiados: dos cantidades de conglomerante, 190 y 150 kg/m³, y los dos conglomerantes antes mencionados.

Del examen del gráfico podemos deducir la siguiente información:

- Cuando se hace patente la reacción puzolánica de las cenizas volantes: aumento de pendiente en las líneas representativas del fenómeno.
- Línea de endurecimiento previsible para una mezcla conglomerante intermedia entre las estudiadas, tanto en mortero normalizado como en hormigón.
- Cálculo de resistencias medias probables del

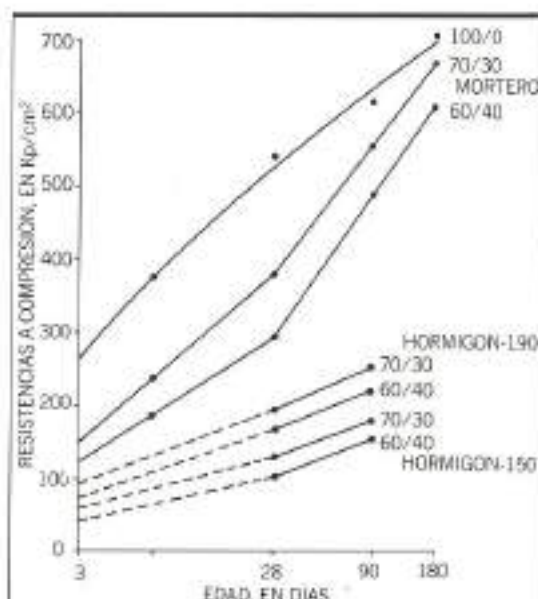


GRAFICO 2.

hormigón a 90 ó 180 días, en función de las obtenidas a 7 ó 28 días.

— Variación admisible de la resistencia a 28 días de distancias partidas de cemento, compatible con la obtención de la resistencia característica establecida para el hormigón.

5. CONCLUSIONES

5.1. A juicio de los técnicos del Laboratorio Central del CEDEX, Srs. Alonso, Sáinz de Cuetos y Muelas, los cuales realizaron la visita al Laboratorio de Obra, las instalaciones del mismo son buenas y, esencialmente, coinciden con las recomendaciones que se dieron en el 1.º informe parcial. Y respecto a la preparación y desarrollo de labores de control por parte del personal encargado del mismo se puede calificar de excelente.

5.2. El agua del Zújar ensayada en apta para la fabricación y conservación o curado de hormigones.

5.3. Las muestras de áridos ensayados, tanto finos (< 5 mm.) como gruesos (> 5 mm.), cumplen con todas las especificaciones generales y particulares, por lo que son adecuados para su utilización en hormigones.

5.5. Las cuatro partidas de cemento probadas cumplen holgadamente con las especificaciones generales (RC-75) para los cementos P-350-Y.

5.5. En relación al exceso en el contenido de cal libre de la muestra del 20-10-86, con respecto a lo indicado en el P.P.T.P., pensamos que no tiene mayor interés por las dos razones siguientes:

1º. La expansión en autoclave de esta muestra fue insignificante (0,03%).

2º. El cemento se está utilizando con cenizas volantes por lo cual quedan minimizados los posibles efectos nocivos de esa cal libre.

5.6. El alto contenido en C_3S de las muestras de cemento ensayadas tiene dos efectos de signo contrario en el caso que nos ocupa, uno negativo en lo referente al calor de hidratación mayor, liberado en las primeras edades. El positivo es su mayor y más temprana liberación de cal necesaria para que reaccionen las cenizas, lo cual permite una adición superior de las mismas a igualdad de resistencia a conseguir.

5.7. Las cenizas ensayadas se han comportado magníficamente frente al cemento P-350-Y, como lo demuestra el alto índice de actividad puzolánica obtenido 108%, frente al 75% exigido como mínimo en la ASTM C 618. Asimismo, cumplen con todas las exigencias químicas, por lo que son aptas para su empleo como adiciones al hormigón.

5.8. La proporción óptima cemento/cenizas, en peso, en cuanto a resistencia a compresión se refiere, deducida de este estudio, se sitúa entre el 80/20 y el 75/25.

5.9. Las proporciones cemento/cenizas 70/30 y 60/40, aún cuando proporcionan resistencias

menores que la óptima antes aludida, a los 360 días alcanzan valores similares al cemento sólo e incluso algo superiores.

5.10. Las cantidades por m^3 de hormigón de las mezclas cemento/cenizas 70/30 y 60/40, deducidas de este estudio como necesarias para obtener 190 Kp/cm^2 de resistencia media a la compresión a los 90 días de edad, en este Laboratorio, equivalente a los 150 KP/cm^2 de resistencia característica a los 90 días en obra (según EH-82), resultaron ser de 160 kg. y 175 kg., respectivamente.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Pliego de prescripciones técnicas generales para la recepción de cementos "RC-75" (1975) M.O.P.U.
2. Instrucción para el proyecto y ejecución de obras de hormigón en masa o armado "EH-82" (1984) M.O.P.U.
3. Instrucción para el proyecto, construcción y explotación de grandes presas (1967). M.O.P.U.
4. Ensayos y control de los hormigones (1981). F. Gorisse.
5. Manual de inspección del hormigón. Publicación SP-2 (1981). ACI.
6. ASTM. C-311 "Standard methods of sampling and testing fly ash or natural pozzolans for use as a mineral admixture in portland cement concrete".
7. ASTM. C-618 "Standard specification for fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in portland cement concrete.
8. Significance of tests and properties of concrete and concrete aggregates. STP-169 (1978). A.S.T.M.