

Presas de la Baells

Por ROMAN GUERRERO MARTIN-ROMERO

Ingeniero de Caminos, C. y P.

FERNANDO DEL RIO ZULOAGA

Licenciado en Ciencias Químicas.

ENRIQUE GONZALEZ

Ingeniero de Caminos, C. y P.

I. CONSIDERACIONES PREVIAS

I.1. Objeto y situación.

La construcción de la Presa de la Baells es el primer paso para llegar a la regulación de la cuenca alta del río Llobregat en la provincia de Barcelona.

La finalidad principal de esta obra es completar, respetando concesiones anteriores, el abastecimiento a Barcelona obteniéndose con la creación del Embalse de la Baells beneficios tales como:

Riego del bajo Llobregat.

Mejora de los aprovechamientos aguas abajo.

Mejora de la salinidad en las aguas del río hasta un límite aceptable.

La presa, bóveda de doble curvatura, tiene una altura total sobre cimientos de 102,35 metros y

almacena un volumen de embalse de 115 Hm³ a la cota 630 metros máximo embalse normal, encontrándose situado a unos 200 metros aguas arriba de la confluencia del río Llobregat y la riera Metjes en el término municipal de Serch (Barcelona).

I.2. Hidrología.

La cuenca objeto de la presa, se encuentra limitada por las cuencas correspondientes a los ríos Segre y Ter, y está formada por una superficie de 532 Km², aproximadamente, un 10 por 100 de la cuenca total del Llobregat, variando su altimetría entre la cota máxima 2.497 metros en la sierra del Cadí hasta la cota de 537 en el cauce del río en el lugar de ubicación de la presa.

La aportación media anual de la cuenca en cuestión es de 211 Hm³ y la avenida máxima de 500 años es de 650 m³/seg.

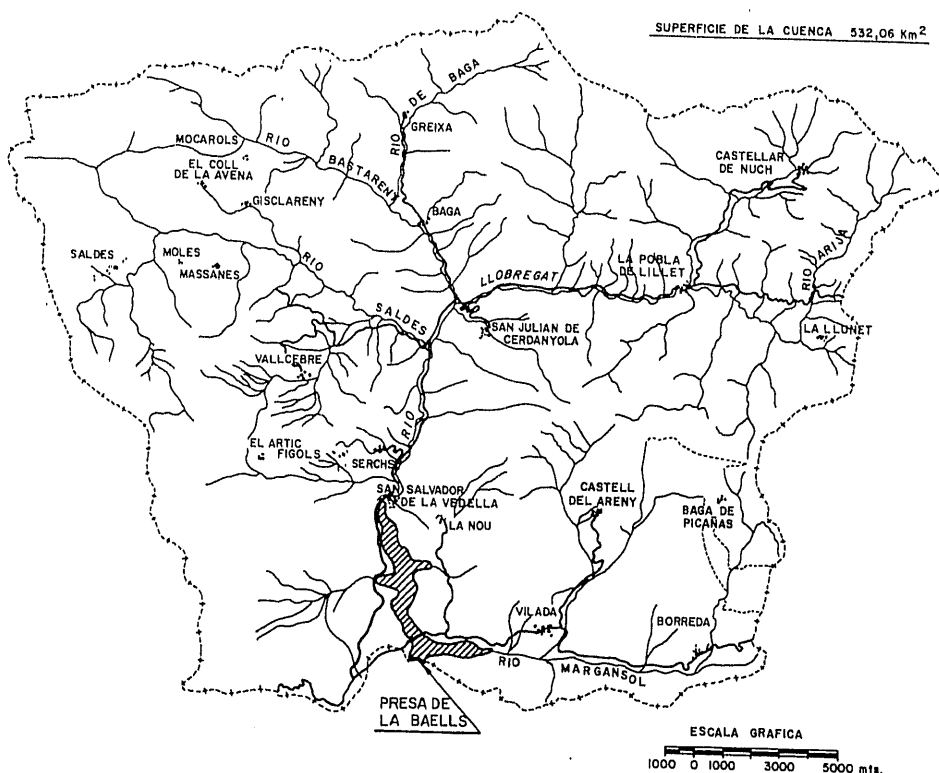


Fig.1 PLANO DE SITUACION

PRESA DE LA BAELLS

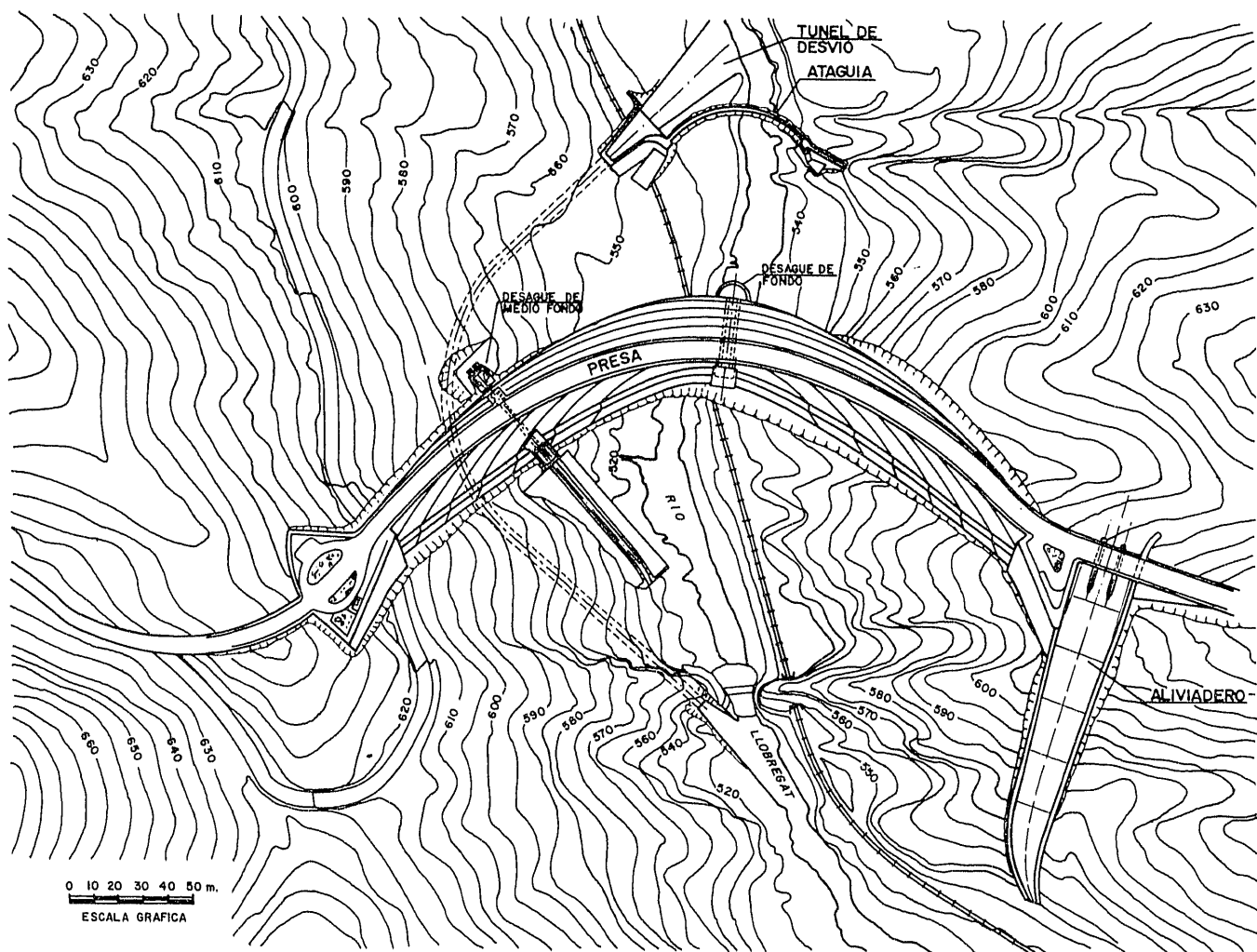


Fig. 2 PLANTA GENERAL DE LAS OBRAS

1.3. Características de la cerrada.

Topográficamente se puede observar la simetría del valle respecto al eje del río hasta la cota 605 una vez recortados los crestones salientes de la margen izquierda, la cual se suaviza a partir de dicha cota, circunstancia que se ha aprovechado para realizar en esa zona la obra del aliviadero. Tanto por sus proporciones en alzado, como por la disposición de las curvas del nivel en planta, la cerrada presenta condiciones óptimas, desde el punto de vista topográfico para el encaje de una presa bóveda.

En efecto, no sólo la relación cuerda-altura del valle 2,75 es idónea para este tipo de presas, sino que los esfuerzos transmitidos por los arcos son prácticamente normales a las curvas de nivel.

1.3.1. Geología.

Geológicamente la cerrada está situada en terrenos terciarios del Oligoceno y formada por alternancias de conglomerados y areniscas con al-

gunas intercalaciones, siempre en capas estrechas, de arenisca arcillosa y alguna argilita.

En esta composición de alternancias predomina el conglomerado sobre la arenisca y ambas juntas suponen un 85 por 100 de la formación constituyendo el resto las demás alternancias citadas.

Los bancos de la formación son planos, perfectamente transversales a la corriente y apenas están rotos, siendo el buzamiento casi vertical.

Los conglomerados están formados por cantos redondeados de caliza, granito, cuarcita, etc., con tamaños del orden de 10 centímetros con una matriz de arenisca calcárea. Son muy duros y cimentados, si bien en alguna zona localizada se hallan alterados.

Las areniscas de grano grueso poseen un cemento calcáreo bastante basto, presentándose generalmente en forma de lentejones por cambio de facies en el interior de los bancos de conglomerados.

PRESA DE LA BAELLS

El conjunto de argilitas y areniscas de grano fino, según su menor o mayor contenido en arenas, está constituido por unas rocas duras y compactas, de origen arcillo-arenoso, que han perdido el agua de combinación.

Son de destacar los pequeños tramos arcillo-arenosos, originados por laminación mecánica entre los bancos de conglomerados y areniscas de grano grueso, los cuales constituyen una junta de debilidad.

Podemos concluir afirmando que la roca de cimentación de la Presa de la Baells es bastante buena en su conjunto y únicamente cabe apreciar dos zonas: una situada en la margen izquierda en la que se sitúan una serie de pasillos cuyas anchuras oscilan entre los 2 y 10 metros comprobándose la existencia de una zona descompuesta que afecta en profundidad sólo hasta cuatro o cinco metros bajo los cuales la roca aparece completamente sana y otra en la margen derecha en donde la presencia de una zona más descompuesta ha hecho ir a un poco más de excavación.

II. DESCRIPCION DE LAS OBRAS

II.1. Desvío del río.

Las obras de desviación provisional del río han sido dimensionadas para un caudal de avenida co-

respondiente a un período de retorno de 10 años. Este caudal es de 150 m³/seg.

Fundamentalmente estas obras consisten en una ataguía aguas arriba y un túnel de desvío.

La ataguía se sitúa arriba a unos 70 metros del límite de excavación de la bóveda. La topografía aguas arriba de la presa no se adapta en absoluto para hacer un cierre económico ya que el último paquete de la serie de conglomerados existentes en la zona, coincide con la implantación de la presa y el valle a partir de ese punto se abre.

La ataguía es una presa de tipo bóveda cilíndrica con arcos circulares de un solo centro, paramento vertical aguas arriba y talud 1/10 aguas abajo. Los estribos son de tipo gravedad en una longitud de 3,50 metros cada uno, y siguiendo sólo con una pequeña aleta hasta alcanzar la cota del terreno. Esta aleta, en la margen derecha, forma uno de los muros de embocadura del túnel de desviación provisional.

El túnel de desviación provisional se ha dispuesto por la margen derecha con trazado en planta curva y de forma que no quede próximo a la cimentación de la presa.

La longitud del túnel en planta es de 275,65 metros y la embocadura de entrada está incorporada a la aleta de la ataguía en su margen derecha, y está formada por la sección de control y una rápida de 15,5 por 100 de pendiente.

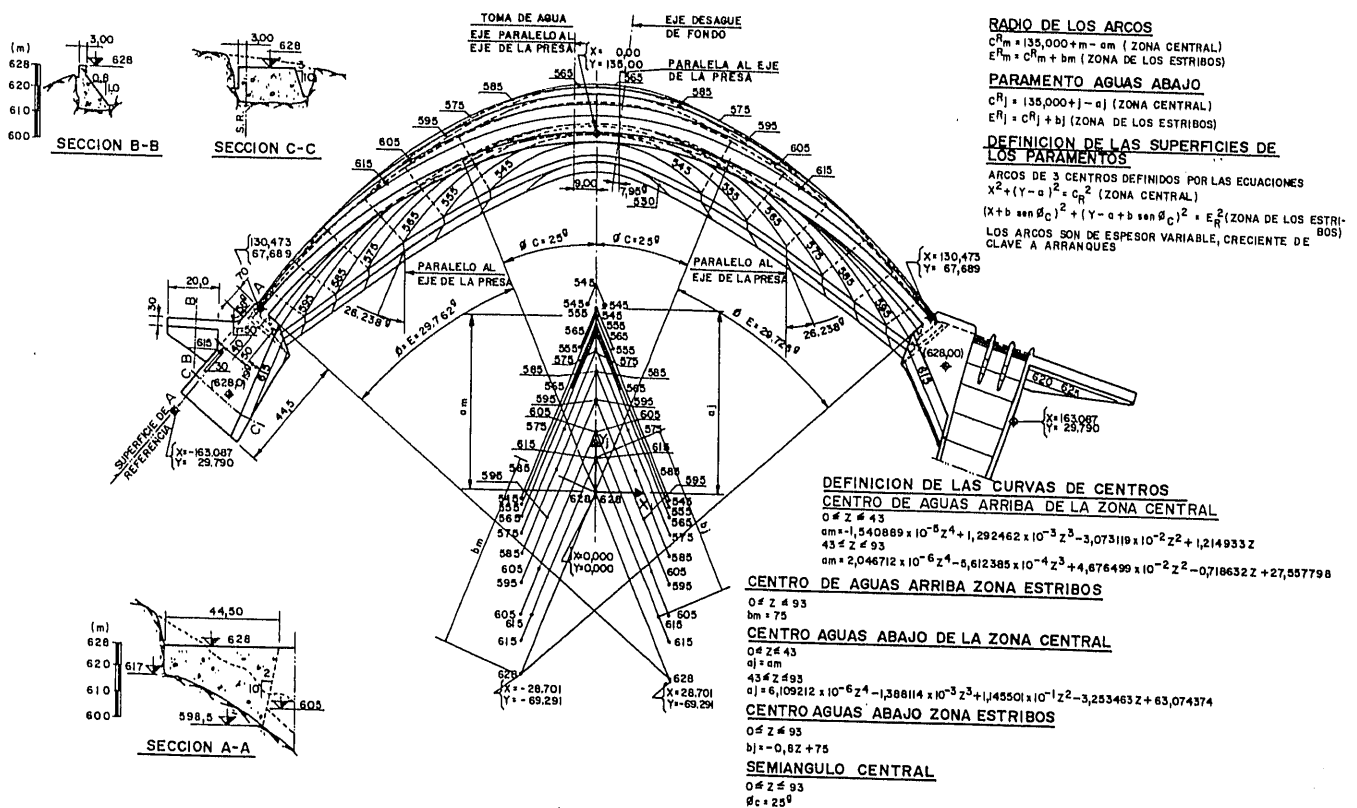


Fig. 3. DEFINICION GEOMETRICA DE LA BOVEDA. PLANTA

PRESA DE LA BAELES

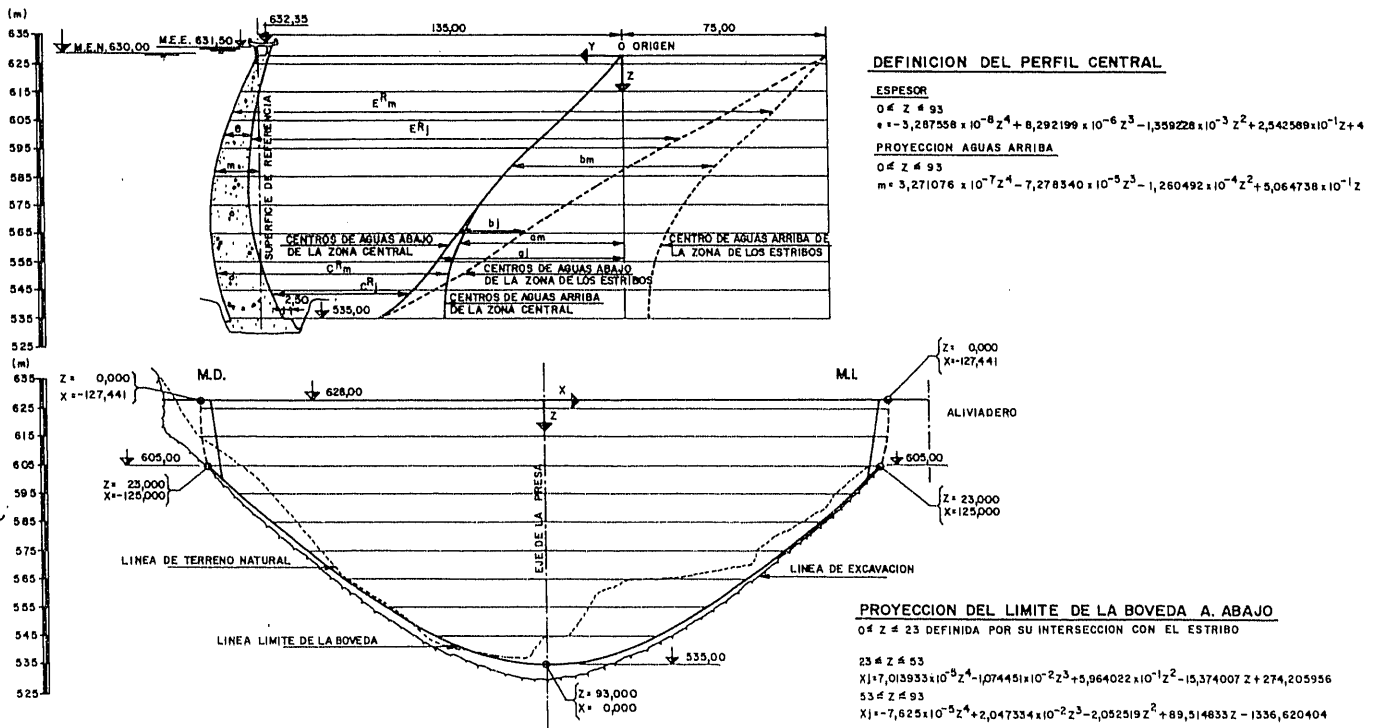


Fig. 4. DEFINICION DE LA BOVEDA, ALZADO Y MENSULA CENTRAL

II.2. Definición geométrica de la bóveda.

La forma del valle en V simétrica respecto del eje del río, la relación cuerda/altura que es de 2,75, las condiciones mecánicas de resistencia de la roca y, por último, la ausencia de accidentes en el terreno son todos ellos muy favorables para que la solución elegida haya sido una presa bóveda de doble curvatura.

En ésta las secciones horizontales o arcos están delimitados tanto aguas arriba como abajo por tres arcos de círculo, de los cuales el central presenta su centro en el eje de simetría y tiene radio menor que los dos laterales, los cuales son iguales entre sí y están acordados tangencialmente con el central. Excepto el arco de coronación que tiene un espesor constante de cuatro metros, los demás arcos son de espesor variable creciente hacia los estribos de manera que en el arco a la cota 610 metros la relación de espesores de arranques a clave es de 1,28; en el arco a la cota 592 metros de 1,45 y en él a cota 556 metros de 1,36 variando de una a otra de forma regular. Con esta configuración se consigue que la línea de presiones pase prácticamente por el núcleo central en todas las secciones del arco para las solicitaciones más desfavorables permitiendo un óptimo aprovechamiento de la capacidad de resistencia a compresión del hormigón.

Las secciones en ménsula son superficies re-

gladas cuyas generatrices horizontales tienen por directrices la vertical que pasa por el pie de la ménsula en el paramento de aguas arriba y la curva de paso de los centros de círculos que delimitan dicho paramento; siendo por tanto normales a las curvas de nivel del paramento de aguas arriba. Los espesores de las secciones en ménsula resultantes varían de forma continua siendo para la ménsula central de cuatro metros a la cota 628 metros y de 20,101 metros a la cota 535 metros que corresponde al pie. Con la curvatura vertical adoptada se consigue en la parte superior de la presa aprovechar la componente vertical hacia abajo de la presión hidrostática para mejorar la estabilidad contando en las secciones horizontales la resultante de las fuerzas verticales y disminuyendo el momento flector que se produce por efecto combinado de peso propio y presión hidrostática.

La bóveda se empotra en un zócalo más ancho que sirve para reducir y regularizar las cargas transmitidas al terreno amortiguando al mismo tiempo las concentraciones de esfuerzos en la estructura imputables a irregularidades de la excavación. En la parte superior de las laderas se supl e el zócalo por estribos de gravedad.

II.3. Aliviadero y desagües.

Dada la configuración topográfica de la ladera izquierda, formada por salientes rocosos con va-

guadas pronunciadas entre ellos, se ha decidido situar el aliviadero sobre esta ladera aprovechando una de las vaguadas y permitiendo así encajar la bóveda en arcos de gran abertura.

El aliviadero está formado por tres vanos de 6×5 metros con el labio a la cota 625 y cerradas por compuertas tipo Taintor. Su capacidad permite evacuar la máxima riada de $650 \text{ m}^3/\text{seg.}$ para un período de retorno de 500 años con una sobre-elevación de 1,50 metros de la lámina de agua sobre compuertas. El labio está formado por un perfil Bradley tipificado y pasada la sección de control comienza la rápida que enlaza con el canal de descarga mediante una parábola de acuerdo. Este canal se desarrolla por la ladera y termina en un trampolín de lanzamiento con perfil circular y planta parabólica peraltada, que permite lanzar el agua al cauce y dirigir la lámina según la dirección del río.

Los desagües de fondo se han situado en el cuerpo de presa con un eje común de simetría y están constituidos por dos tuberías metálicas de 10 milímetros de espesor y 1,20 metros de diámetro interior. La capacidad de cada desagüe es de $29,11 \text{ m}^3/\text{seg.}$ con el embalse al máximo nivel normal. La embocadura va protegida por una rejilla común de planta semicircular formada mediante una estructura de hormigón armado y rejillas metálicas.

Junto al paramento de aguas abajo se disponen dos compuertas deslizantes para cada desagüe, cuyo accionamiento se dispone con una caseta formada por una estructura de hormigón armado junto al paramento aguas abajo. Las tuberías van cerradas por una ataguía aguas arriba común a ambos y maniobrables desde la cota 590.

El desagüe de medio fondo, localizado en la margen derecha (bloque 4) entre las cotas 556 a 566, constituido por una tubería de 2,50 metros de diámetro con una capacidad de desagüe de 100 metros cúbicos por segundo.

La tubería va cerrada aguas arriba a la cota 566 con una compuerta oruga, maniobrable desde coronación y aguas abajo con una compuerta a la cota 556 y maniobrable desde una caseta adosada a la presa.

II.4. Galerías de inspección y drenaje.

La ejecución, tanto de la pantalla de impermeabilización, como la de drenaje, se realizó desde la galería general de drenaje, ubicada en el zócalo de la presa y perimetral a ésta.

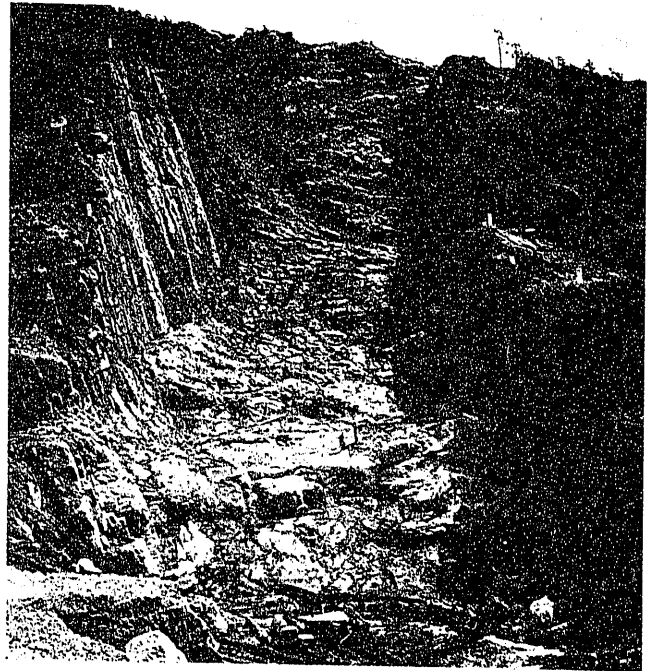
Por otro lado se han construido cuatro galerías en túnel, dos en la ladera Este y dos en la ladera Oeste a las cotas 550,40 y 589,20, que permitan el control y drenaje de cada una de las laderas a las respectivas cotas.

III. CONSTRUCCION

La construcción de la Presa de la Baells se inició en el año 1972, habiendo durado aproximadamente cuatro años y medio.

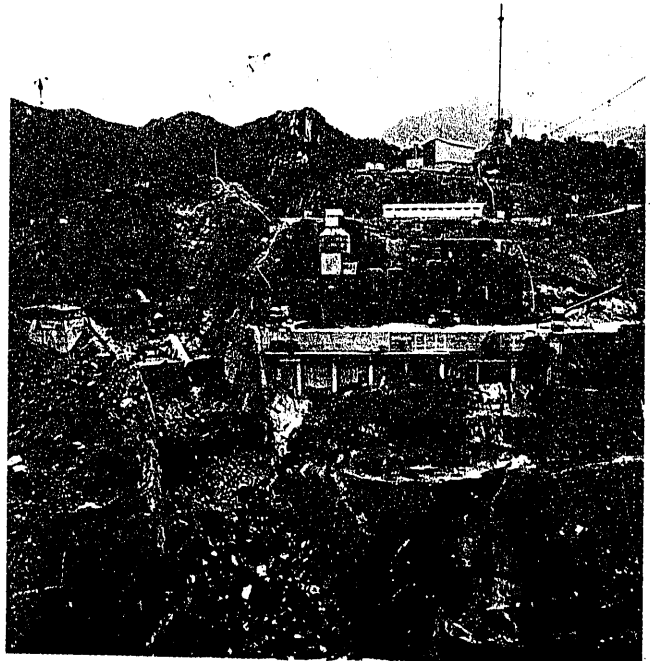
Las unidades principales que aquí enumeramos y después trataremos una a una han sido:

a) Excavación a cielo abierto con un volumen aproximado de 200.000 m^3 y excavación subterránea en galería con 770 ml de 6 m^2 de sección.



Excavacion margen izquierda.

Instalaciones de la presa.



PRESA DE LA BAELLS

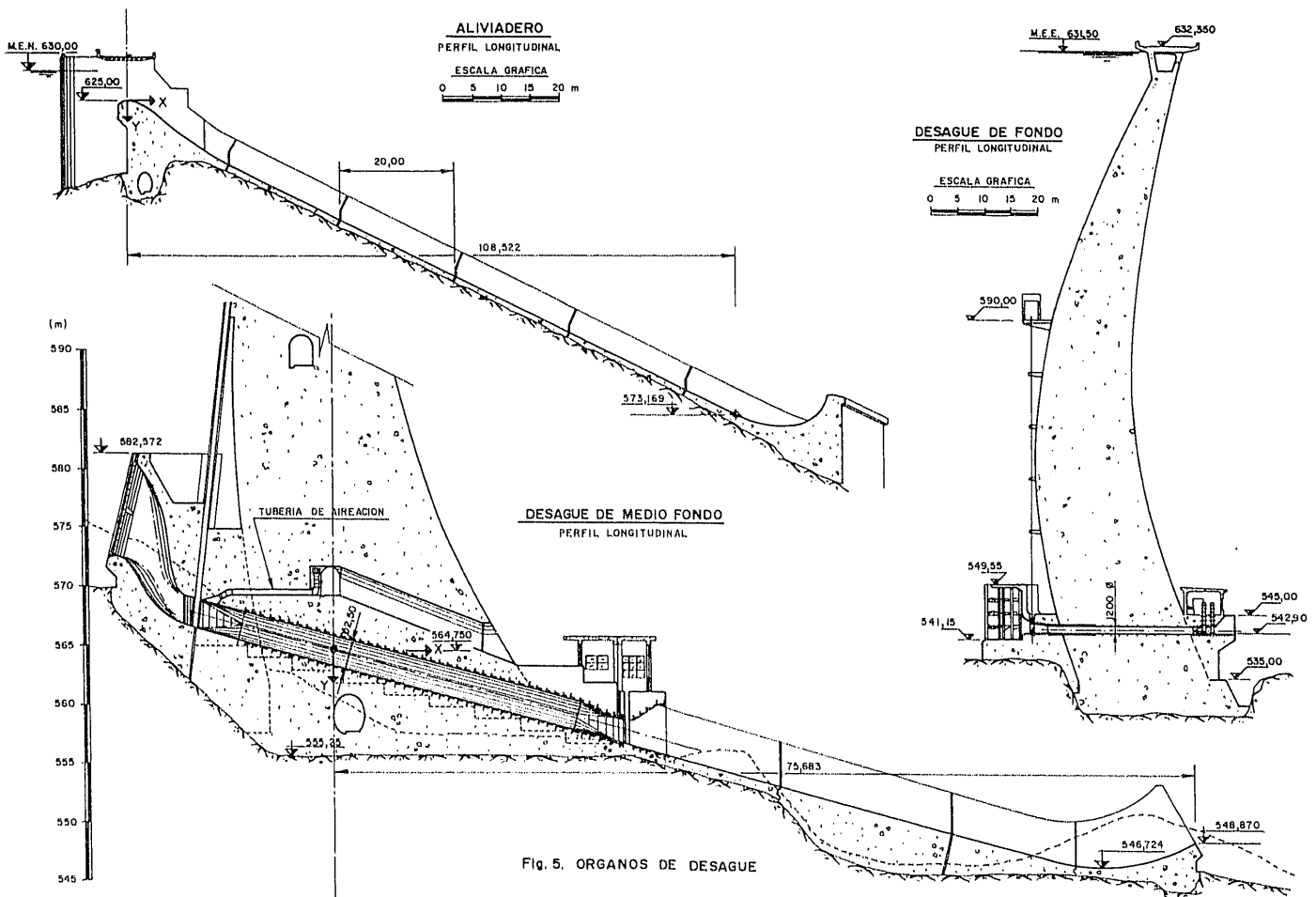


Fig. 5. ORGANOS DE DESAGUE

b) Hormigonado, con un volumen total de hormigón de 400.000 m³, de las cuales 335.000 m³ han sido colocados con los blondines, 50.000 m³ con una grúa Derrick y los 15.000 m³ restantes con dos grúas Comansa Serie SH 40120 y SH 45225.

c) Tratamiento de cimentación, formado por la consolidación del cemento con una profundidad de 5 metros. La pantalla de impermeabilización localizada aguas arriba y con una profundidad de 48 metros y la red de drenaje.

d) Inyección de juntas, con una superficie a inyectar de unos 15.000 m².

III.1. Excavación.

Como decíamos antes, para la realización de la obra ha sido necesario excavar un volumen de unos 200.000 m³ en un terreno formado por alternancias de conglomerados y areniscas.

La excavación en cimiento de presa se ha efectuado en dos fases:

- 1.^a Excavación general hasta dos metros del cimiento.
- 2.^a Excavación hasta cimiento definitivo.

Dentro de la primera fase y con el fin de proteger los hastiales de la zanja, en principio se dividió también en dos fases dejando un resguardo de cinco metros que luego se recortaba; posteriormente se hizo todo en una fase utilizando un recorte en los hastiales.

Terminada la excavación de presa, se realizó la del aliviadero, aquí no se conserva el criterio seguido en la presa, pues a excepción de la parte esencial del aliviadero en que la cota de desmorte era superior a 10 metros en el resto era inferior a seis metros, por lo que se fue a una única fase con martillo ligero.

Antes de definir y ejecutar una voladura se consideraba:

a) Estudio del terreno: Se considera la clase de roca a volar (conglomerados, areniscas, margas), dirección de la estratificación, salida más favorable a la voladura, etc.

b) Toma de datos topográficos: A partir de la excavación a conseguir según proyecto, se replantea en el terreno mediante el uso de cuerdas las hileras de igual profundidad de taladro para que no existan problemas de saber en cualquier punto la auténtica profundidad de los mismos.

PRESA DE LA BAELLS

c) Determinación del diámetro: En la obra se han utilizado los siguientes diámetros de perforación:

- 1 1/2" (martillo ligero).
- 2" (BBC-100).
- 3" (CRAWL-IR).

Al hablar de diámetro nos referimos siempre al diámetro del fondo de taladro y en la determinación de ésta influyen factores como:

- Longitud de perforación, así tenemos que los martillos ligeros están limitados por encima de los cuatro o cinco metros.
- Topografía de la zona, en lugares de fácil acceso, quizá interese perforación con una máquina grande y por consiguiente con un gran diámetro por ser más rentable, pero las dificultades de acceso obligan a hacerlo con un martillo ligero.
- Limitaciones de la máquina de perforación; cada máquina tiene una potencia y en consecuencia un tamaño ideal de perforación.
- Calidad de la perforación que queremos conseguir. En el éxito de una voladura es importantísimo hacer una buena perforación y puesto que las desviaciones de los taladros son proporcionales a la longitud del mismo si estos son largos la máquina ha de ser pesada y trabajar con holgura con la broca que le pongamos.
- Tamaño máximo de la roca que queremos obtener y así tenemos una relación que nos liga el diámetro de perforación y el volumen de la pala que utilizaremos para cargar. Diámetro de perforación en pulgadas: Volumen de cuchara de pala en metros cúbicos.

d) Cálculo de la voladura.

Daremos unas relaciones aproximadas que se utilizaron para el cálculo de la cuadrícula a perforar y la carga a utilizar por barreno.

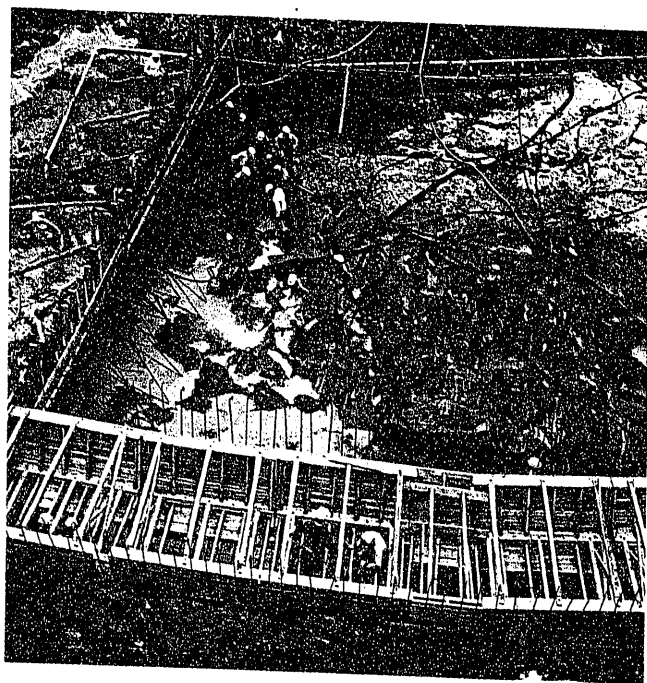
— El diámetro de la perforación, como hemos dicho debe ser tal que se cumpla que el diámetro de perforación en pulgadas sea igual al volumen de la cuchara en metros cúbicos.

— Piedra máxima:

$V \text{ máx.} = 45 \varnothing$ roca normal.

$V \text{ máx.} = 40 \varnothing$ roca dura.

Siendo \varnothing el diámetro de perforación en el fondo.



Preparación de la cimentación para el hormigonado en un bloque.

— Piedra real:

Como primera aproximación podemos decir que

$V = \varnothing$ de perforación en pulgadas.

Para $d < 37 \text{ mm.}$

$V = V \text{ máx.} (1 - 0,05 K)$. Corrección por desviación de la perforación según Langhefors.

Para $d > 37 \text{ mm.}$

$V = V \text{ máx.} (1 - 0,03 K)$. Corrección por hinchamiento en voladuras de hileras múltiples.

Siendo K la altura del banco.

-- Longitud de la perforación:

Si K es la altura del banco y el barreno es vertical, la longitud de perforación será:

$$H = K + 0,3 V$$

— Carga del fondo:

$$lb = \varnothing / 1.000.$$

Siendo \varnothing el diámetro del fondo expresado en milímetros.

lb está expresado en Kg/ml para un grado de retacado semejante a 1,27.

— La carga de columna debe estar comprendida entre el 40 y el 55 por 100 de la carga de fondo.

$$0,40 lb < lp < 0,55 lb$$

PRESA DE LA BAE LLS

Inicialmente la excavación estaba programada en dos fases como decíamos al principio. Dentro de la primera fase y al utilizar diámetros grandes, las concentraciones de las cargas también eran fuertes y la transmisión de grietas nos dañaba los hastiales; por esta causa esta primera fase se dividió a su vez en dos que fueron la destroza central de la zanja con un resguardo en hastiales de unos cinco metros y posteriormente un recorte de hastiales realizado con martillo ligero y diámetro de perforación de 1 1/2". Este procedimiento se utilizó en la margen izquierda en la excavación de los bloques 1I, 3D, 3I y 5D, zona en la que existía el mayor volumen de excavación con profundidades en algunos puntos de hasta 40 metros.

El refino de los dos últimos metros, en un principio estaba previsto hacerlo con un precorte en fondo, siguiendo la superficie definitiva. Esto obligaba a ir refinando de cinco en cinco metros de arriba hacia abajo y con la consiguiente limpieza, después de cada voladura. Este sistema de ejecución tenía el grave inconveniente de dar muy bajos rendimientos por lo que se hicieron una serie de pruebas con tiros formando un ángulo de 135° con la cimentación (lo cual facilitaba la salida de la voladura) y al comprobar que el cimientó apenas se resentía, y que lo único que habría que hacer era un mayor saneo, se procedió a excavar todo el fondo de excavación en esta forma.

Como conclusión de una buena excavación realizada con voladuras, pensamos que gran parte del éxito radica en la calidad de la perforación, pudiendo decir que la voladura mejor calculada si no tiene una adecuada perforación será un fracaso.

En los precortes y recortes, el hecho de definir un verdadero plano con todos los barrenos, nos permite un corte limpio, pudiendo incluso aumentar el espaciamiento con el consiguiente ahorro de perforación.

En la voladura de hileras múltiples es muy importante que la profundidad de los barrenos sea la correcta, pues con tiro corto nos dejará un repié

con el consiguiente perjuicio para las filas posteriores.

III.2. Hormigones.

Damos las características de sus componentes, agua, aditivos, áridos y cemento y luego sus dosificaciones, sus características fundamentales y su fabricación y colocación en obra.

Agua. — Se empleó agua del río Llobregat sin ningún problema.

Aditivos. — De los ensayos comparativos con cuatro marcas se eligió el Plastiment BV-40 con una concentración de un 4 por 1.000 sobre el peso del cemento.

Aridos. — Se escogió para su fabricación una cantera de piedra caliza situada en el término municipal de Serchs, en el paraje de la roca Musorela entre Cal Ros y Cal Marolla que al conllevar bastante arcilla exigió sobre todo en la temporada de lluvias procesos enérgicos para su lavado. Los tamaños de acuerdo a las necesidades de los hormigones fueron los siguientes:

- Arido núm. 1: de 0 a 1,68 mm.
- Arido núm. 2: de 1,68 a 5,00 mm.
- Arido núm. 3: de 5,00 a 16,00 mm.
- Arido núm. 4: de 16,00 a 40,00 mm.
- Arido núm. 5: de 40,00 a 120,00 mm.

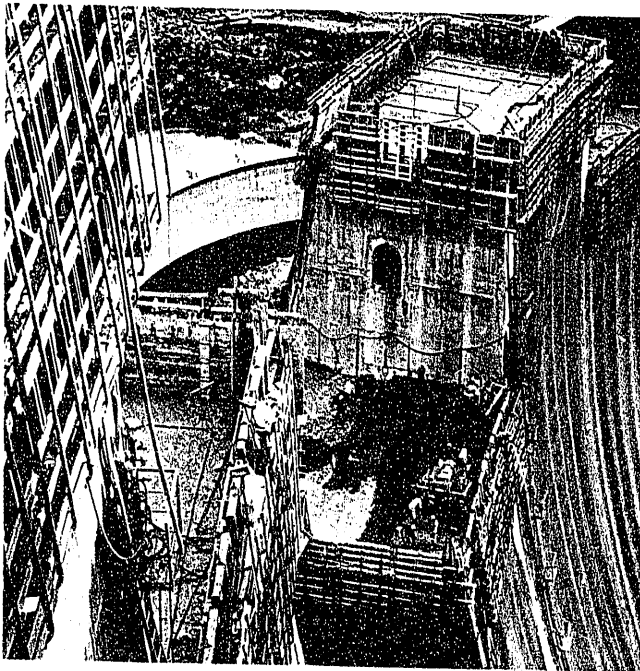
En su lavado se emplearon tres trómeles tipo TRM 6.120 de la casa Lebus y en la obtención de arenas un sistema Rheax ayudado por dos molinos de barras que utilizaban el excedente de arena gruesa (1,68 a 5,00 mm) y de tamaño número 3 (5,00 a 16,00 mm.).

Las características de estos áridos fueron las siguientes: Desgaste de Los Angeles, 25 por 100; estabilidad a los álcalis del cemento, buena. Módulos de finura, coeficiente de forma, porcentaje de absorción de agua, pesos específicos y porcentajes de finos en cuadro 1:

C U A D R O 1

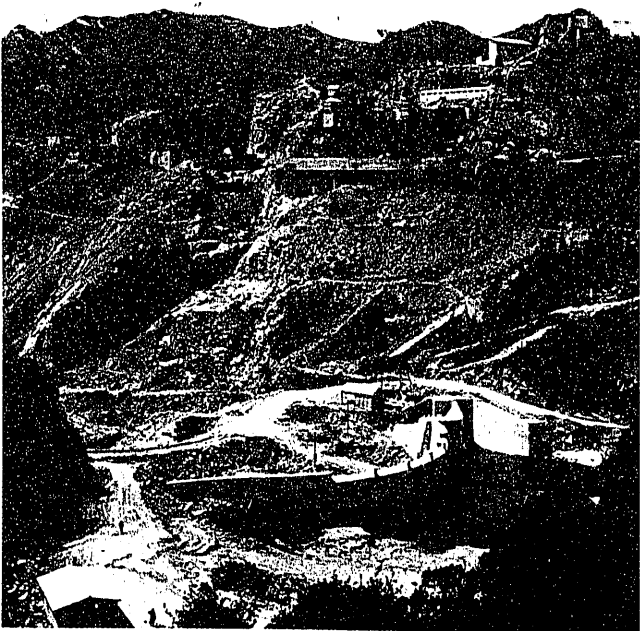
	Módulo de finura	Coefficiente de forma	% agua absorbida	Peso específico real	Peso específico s.s.s.	Peso específico aparente árido seco	% fino menores 76 micras
1 (0 a 1,68 mm)	2,75		0,95	2,61	2,57	2,52	3,6
2 (1,68 a 5,00 mm)	4,58	0,16	0,75	2,67	2,65	2,60	0,4
3 (5,00 a 16,00 mm)	6,42	0,18	0,49	2,70	2,67	2,63	
4 (16,00 a 40,00 mm)	7,59	0,21	0,31	2,71	2,70	2,69	
5 (40,00 a 120,00 mm)	9,04	0,24	0,27	2,71	2,705	2,70	

PRESA DE LA BAEELS



Hormigonado.

Ataguía y entrada túnel de desvío.



Cementos. — A la hora de la decisión acerca del cemento a utilizar en el hormigonado de la Presa de la Baells; de las diferentes posibilidades se adoptó un cemento P-350, de la fábrica Uniland, al no ser posible la consecución de un cemento puzolánico con menores calores de hidratación.

Las características medias según resultado del Laboratorio de Obra de Cemento P-350 Uniland

empleado en el hormigonado de la presa son las siguientes:

Químicas:

Módulo silíceo	2,67
Módulo hidráulico	2,26
Módulo aluminico férrico	1,52
Saturación en cal	0,94
C ₂ S	53,95 %
C ₁ S	20,68 %
C ₃ A	7,05 %
C ₄ A F	9,35 %
CaSO ₄ · 2 H ₂ O	4,13 %
CaO libre	0,92 %

Físicas:

Densidad	3,11 gr./cm ³
Superficie específica Blaine	2.665 cm ² /gr.
Finura tamiz 900 mallas/cm ² ...	0,18 % rechazo
Finura tamiz 4,900 mallas/cm ² ...	7,62 % rechazo

Físico-químicas:

Expansión en autoclave

0,04 %

Resistencias medias en Kp/cm² de probetas de mortero normalizado de 4 × 4 × 16 cm.

Edad en días	3	7	28	90
Resistencias flexo- tracción	44,8	55,9	73,1	80,4
Resistencias com- presión	220	299	415	463

Dosificación de hormigón. — Las dos más importantes empleadas han sido: A) Hormigón en masa para presa. B) Hormigón armado para presa.

A) Hormigón en masa para presa.

Cemento: 250 Kg/m³ de P-350 Uniland.
Aditivo: 4 por 1.000 en peso sobre cemento.
Consistencia: 20 mm de asiento.
Relación agua/cemento: 0,5.

	Vol. (lts.)	Peso espec. árido seco	Peso (Kg)	Vol. (%)	Peso (%)
1 (0 a 1,68 mm).	156	2,52	393	15,2	15,7
2 (1,68 a 5,00 mm).	58	2,60	151	5,6	6,1
3 (5,00 a 16,00 mm).	97	2,63	255	9,5	10,2
4 (16,00 a 40,00 mm).	226	2,69	608	22,0	24,3
5 (40,00 a 120,00 mm).	266	2,70	718	26,0	28,7
Cemento	80	3,125	250	7,8	10,0
Agua	125	1	125	12,2	5,0
Aire	17			1,7	
TOTALES	1.025		2.500	100,0	100,0

PRESA DE LA BAELLS

POTENCIA MEDIA 25 m
 BUZAMIENTO MEDIO 457
 AREA MAXIMA ABIERTA 450 m
 ALTURA DE RANCOS 12m
 COTAS DE EXPLOTACION 101,1022,1037,1052,1067,1082,1097
 PERFORACION Y VOLADURAS
 MARTILLOS LIGEROS RM-556 Y RBD-44 DE ATLAS COPCO
 PERFORADORA SOBRE ORUGAS ECM-350
 RECORD DR-48
 CUADRICULA V+E+4,00+5,00
 CARGA ESPECIFICA 285 gr/m³

LIMPIEZA Y CARGA
 D-B D-9
 CAT-977 ORUGA
 PALAS FL-14 ORUGA
 VOLVIO HUEDAS DE GOMA CON CADENAS
 CAMIONES 10

CANTERA CALIZA

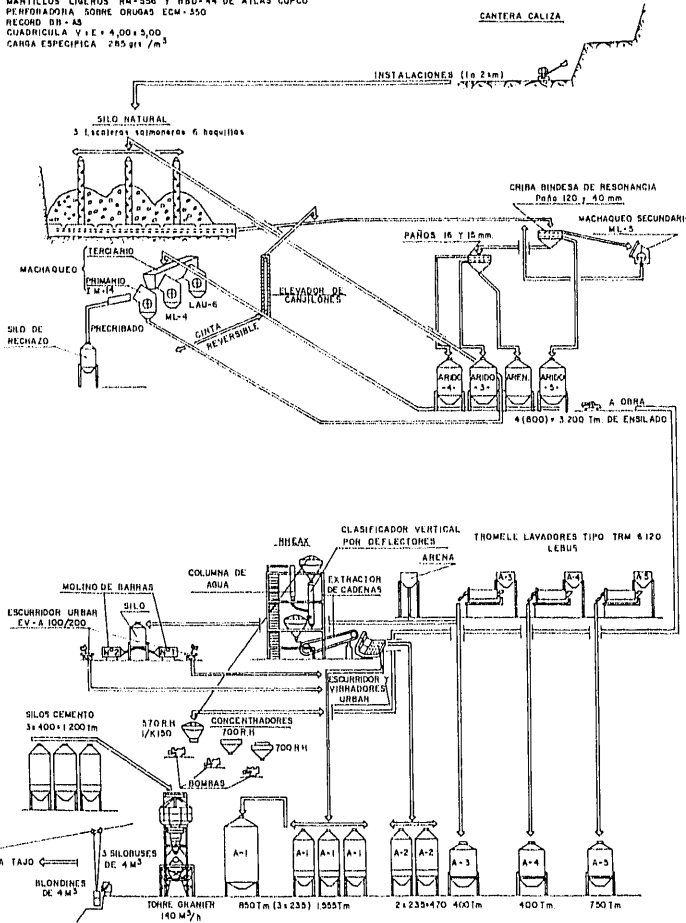


FIG. 6. ESQUEMA DE INSTALACIONES

B) Hormigón armado para presa.

Cemento: 275 Kg/m³ de P-350 Uniland.
 Aditivo: 4 por 1.000 en peso sobre cemento.
 Consistencia: 30 mm de asiento.
 Relación agua/cemento: 0,54.

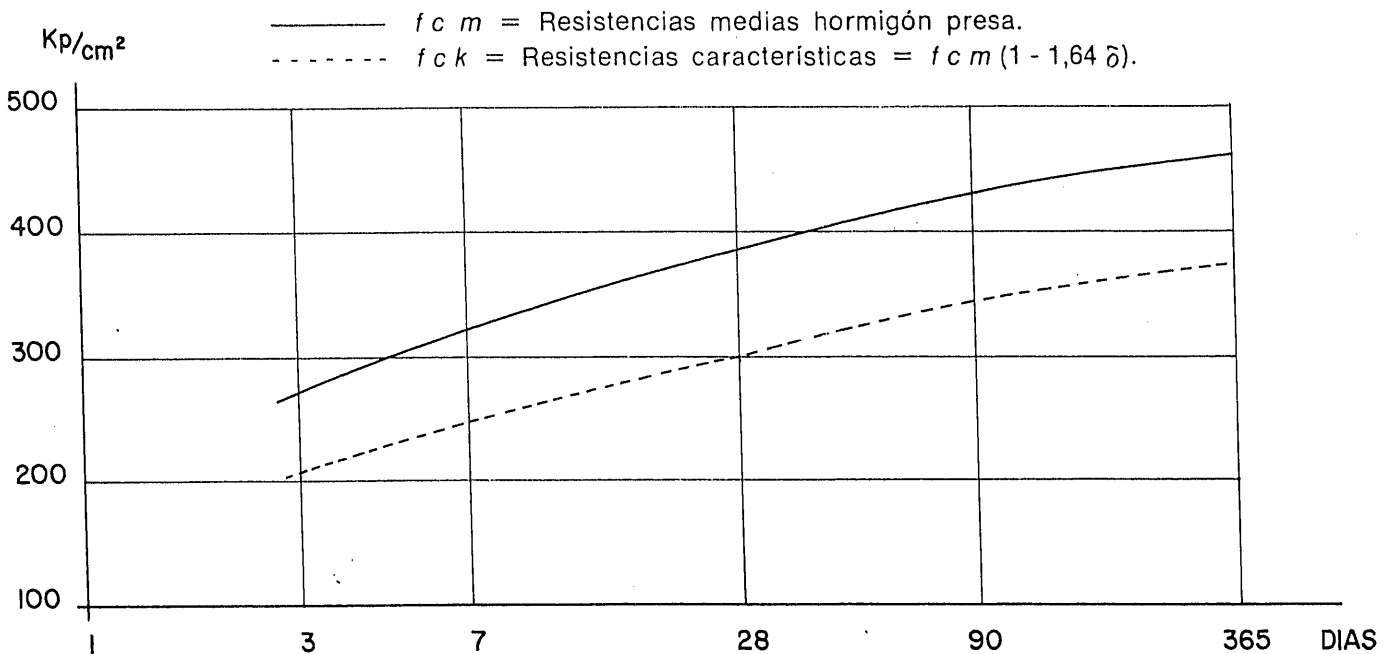
	Peso espec. apare.	Vol. seco (lts.)	Peso (Kg)	Vol. (%)	Peso (%)	
1 (0 a 1,68 mm).		209	2,52	527	20,4	21,6
2 (1,68 a 5,00 mm).		118	2,60	307	11,5	12,6
3 (5,00 a 16,00 mm).		153	2,63	402	14,9	16,5
4 (16,00 a 40,00 mm).		289	2,69	777	28,2	31,9
Cemento		88	3,125	275	8,6	11,3
Agua		150	1	150	14,7	6,1
Aire		17			1,7	

TOTALES 1.025 2.438 100,0 100,0

Las resistencias medias f_{cm} y características f_{ck} , siendo $f_{ck} = f_{cm}(1 - 1,64 \delta)$, para el hormigón de presa fueron las siguientes:

Edad en días	f_{cm}	δ %	f_{ck}
3	273	14,4	208
7	318	12,9	251
28	378	12,6	300
90	434	12,5	345

Con estos valores se obtienen las curvas de desarrollo de resistencias en función de la edad según gráfico adjunto:



La fabricación del hormigón de presa se realizó con una central de hormigonado de la casa Granier, dotada de tres hormigoneras de 2.000 litros cada una, y una producción global de 120 m³ por hora.

A continuación y mediante tres silobuses de cuatro metros cúbicos de capacidad se transportaba el hormigón hasta un muelle de carga, en donde se recogía y distribuía a los distintos tajos mediante una grúa tipo Derrick y dos blondines tipo Heckel con cubos asimismo de cuatro metros cúbicos de capacidad.

Ya el hormigón en el tajo, se procedía a su extendido mediante unos tractores Fiat AD-5 y BTD-6 a los que se acoplaba una hoja de empuje. A la vez estos tractores servían para el vibrado gracias a la colocación de una batería de cuatro vibradores de 7,5 HP y 7.200 U PM separados entre sí 490 mm. Estos tractores se transportaban a los distintos tajos gracias al cable-grúa.

Teniendo en cuenta la baja relación agua/cemento de los hormigones empleados, la utilización de este sistema ha permitido la obtención de grandes rendimientos y óptimos resultados en la puesta en obra, para una altura de tongada de dos metros.

De esta forma se ha conseguido un buen ritmo de hormigonado durante toda la obra y habiéndose conseguido en el mes de abril de 1975 un volumen colocado de 36.170 m³ con una punta diaria de 1.926 m³ el día 2 de abril.

Estos sistemas de colocación eran tan rápidos, que unido a la necesidad de un llenado de embalse urgente, obligaron a la instalación de un sistema de refrigeración cuyas características más principales fueron las siguientes:

Serpentines. — Su longitud venía dada por la fórmula $8l - 6,75$, siendo l la anchura de la tongada y su diámetro exterior era de una pulgada con paredes de 1,0 mm de espesor. Se colocaron a ras de tongada. El caudal de agua calculado para un régimen turbulento era de 0,25 l/seg.

El comienzo de refrigeración se hacía a las veinticuatro horas de empezar el hormigonado utilizando agua de río en circuito abierto y a los sesenta días de haberse iniciado la refrigeración con agua de río se refrigeraba con agua a 4° C en circuito cerrado hasta alcanzar la temperatura de inyección de juntas 9,5° C.

Gracias a una eficaz refrigeración, se consiguió disminuir las puntas de temperatura en cada uno de los bloques, aspecto importantísimo en la posible fisuración del hormigón, así como no dilatar excesivamente el proceso de inyección de las juntas, que posteriormente veremos.

III.3. Tratamiento de consolidación, impermeabilización y drenaje.

El tratamiento de consolidación que se hizo en toda la superficie de cimentación y con una profundidad de 10 metros tenía por finalidad cerrar las fisuras creadas por la utilización de explosivos en la excavación y las propias del terreno.

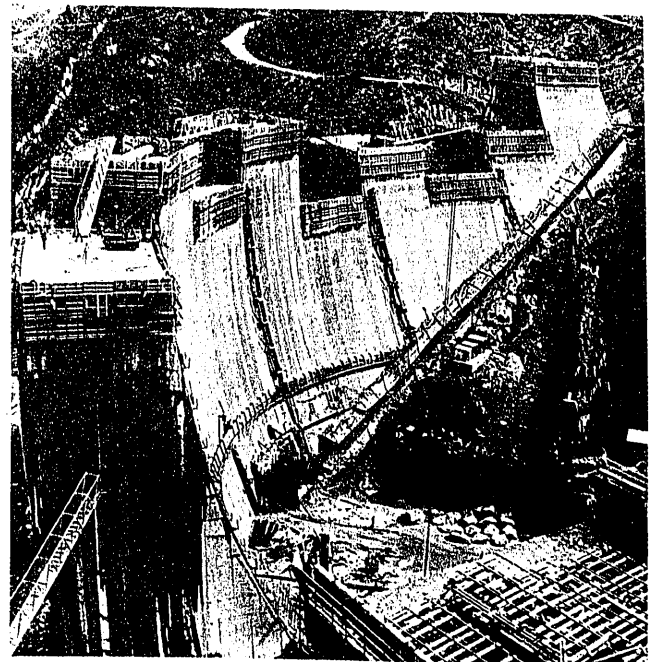
La perforación se hizo desde tres polos situados en la galería central de drenaje, zócalo y recalce aguas abajo.

La separación de los perfiles en la zona de bóveda es de tres metros y en estribos es de seis metros.

Para la realización de los trabajos de consolidación se utilizaron dos supermartillos Holman SL-16A con un peso de 62,5 Kg, perforación a rotopercusión y un avance teórico de 10 metros por hora.

Terminada la perforación se procedió de la siguiente forma:

a) *Lavado:* Colocado el obturador, se inyecta agua durante cinco minutos, a continuación se inyecta aire comprimido durante uno o dos minutos, el ciclo prosigue hasta que el agua del lavado salga completamente limpia por los sondeos adyacentes, momento en que se da por finalizado el lavado. Durante esta operación se aplicó una presión de dos kilogramos por centímetro cuadrado.



Vista de la obra en marzo de 1975

PRESA DE LA BAELLS

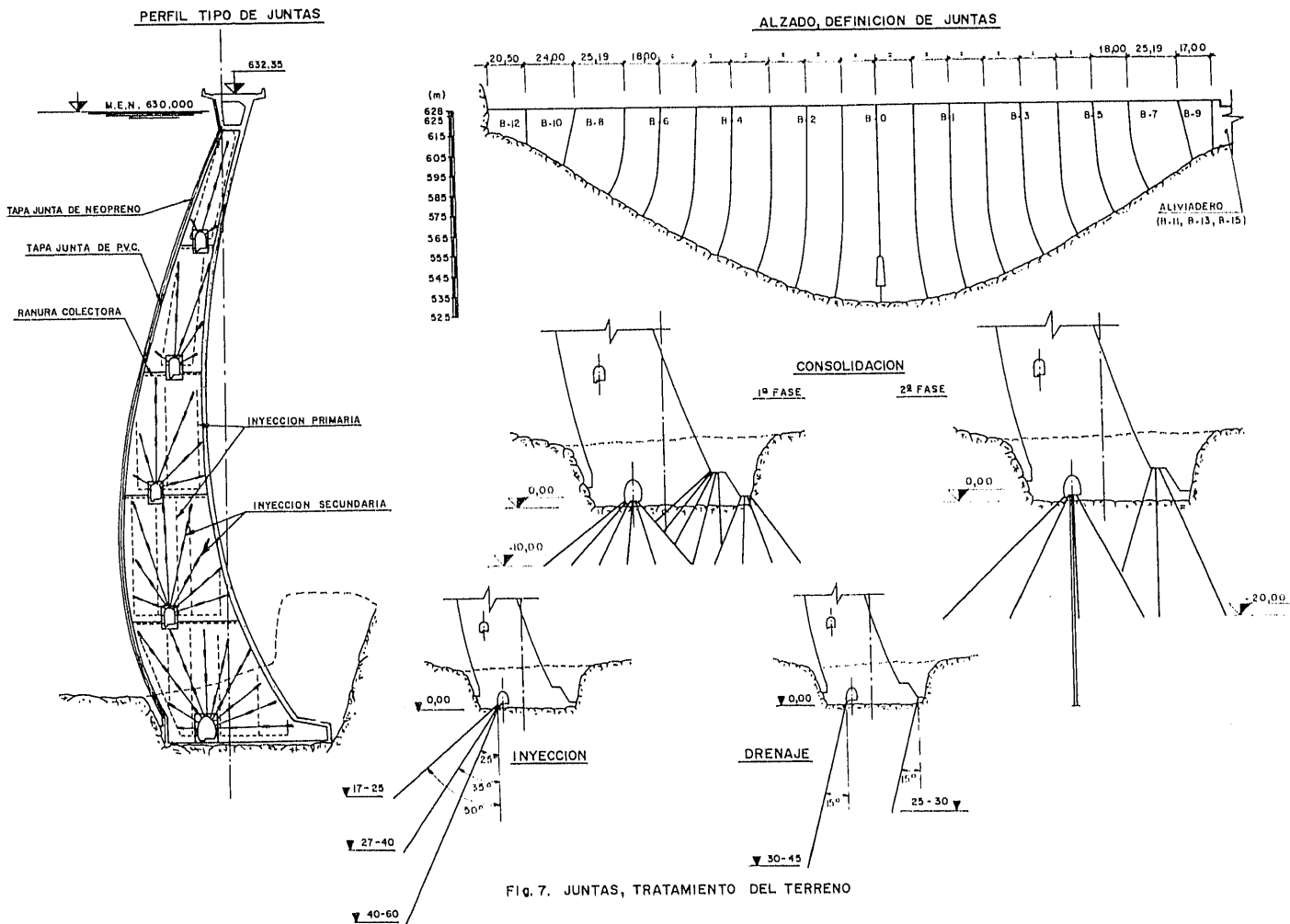


Fig. 7. JUNTAS, TRATAMIENTO DEL TERRENO

b) *Permeabilidad:* Se hizo un ensayo de permeabilidad en un taladro de cada perfil, preferentemente en uno de los situados en la galería perimetral.

Las presiones de ensayo y el tiempo de cada prueba eran:

0 Kg/cm ²	10 minutos
2,5 Kg/cm ²	10 minutos
0 Kg/cm ²	10 minutos

c) *Inyección:* Una vez lavados todos los taladros de un polo de un mismo perfil y realizado el ensayo de permeabilidad correspondiente, se procede a la inyección del perfil. Se inició la inyección por el taladro situado más agua arriba de cada perfil con lechadas fluidas con una relación agua/cemento 2/1. Si dicha lechada fuera absorbida por el taladro sin presión alguna, se espesará la lechada llegando hasta relaciones A/C = 1/1 y 1/2.

En el caso de continuar la inyección sin presión

se adoptarán lechadas más espesas, llegando incluso con relación A/C del orden de 0,4 o adicionando arena a la lechada, si fuera necesario.

Una vez alcanzada la presión máxima de inyección, deducida de la tabla que vemos a continuación, se mantenía la presión durante algunos minutos y se dará por terminada la inyección al cabo de dicho tiempo. Durante todo el proceso se mantenía abierto el retorno para que la lechada no absorbida por el taladro retorne a la batidora. Las presiones máximas de inyección se ajustan a la siguiente tabla:

Admisión Kg/m	Profundidad metros	Presión máxima Kg/cm ²
0 - 25	< 6	3
	> 6	4
25 - 50	< 6	2,5
	> 6	3,5
50	< 6	2
	> 6	3

PRESA DE LA BAELLS

Desde la galería general de drenaje se realizó la pantalla de impermeabilización con taladros de longitud comprendida entre 17 y 60 metros y formando ángulos de 25, 35 y 50° con la vertical, el diámetro de perforación utilizado fue de 66 mm en rotación y 76 mm a rotopercusión. En principio, se pensó hacer la perforación a rotación y de hecho se empezó a trabajar así; posteriormente y ante unas pruebas en las que se vio no existían problemas para obturar en los distintos tramos del taladro se continuó la perforación a rotopercusión, siempre más barata y más rápida.

Para la perforación a rotopercusión utilizamos un supermartillo de 132 Kg con un avance teórico de seis metros por hora.

La admisión total media fue de 23,78 Kg/m, lo que prueba la buena calidad de la roca, ya comentada.

Por lo que respecta a la red de drenaje se sitúa, como es lógico, aguas abajo de la pantalla de impermeabilización, con una densidad de un dren cada tres metros, con un total de 135 drenes y una longitud total de 3.921 metros.

III.4. Inyección de juntas.

La misión de la inyección de juntas es doble:

1.^a Unir los distintos bloques para obtener una estructura monolítica.

2.^a Producir una precompresión de la bóveda antes de su puesta en carga.

Denominamos zona de inyección, a las rebandas limitadas por dos bandas horizontales de estanqueidad consecutivas.

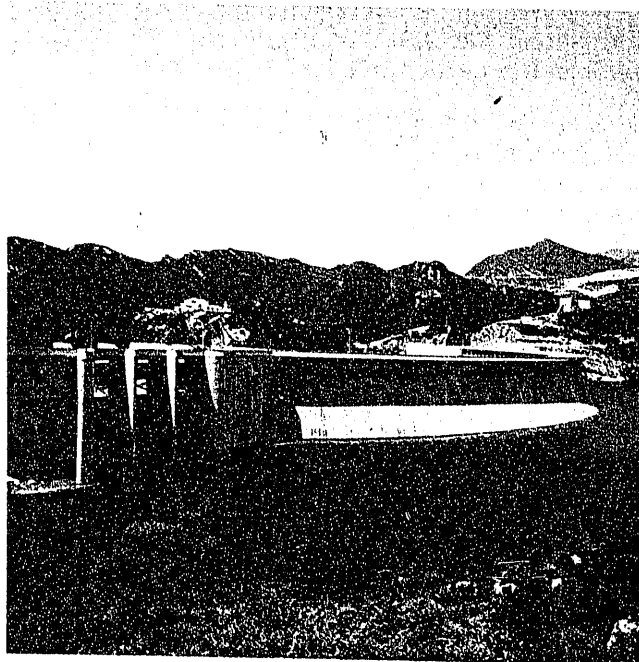
Llamaremos compartimentos de inyección, al recinto de cada junta, limitado por los tapajuntas horizontales y los de ambos paramentos de la presa.

En La Baells, el tapajuntas de estanqueidad en el paramento de aguas arriba es de neopreno y los tapajuntas de los recintos de inyección son de polivinilo.

Las juntas están divididas en cinco zonas limitadas entre las siguientes cotas:

Zona I	530	a 550,40
Zona II	550,40	a 569
Zona III	569	a 589
Zona IV	589	a 608
Zona V	608	a 628

Antes de proceder a la inyección propiamente dicha, fue necesario realizar una serie de trabajos que a continuación se detallan:



Vista desde la margen izquierda de la presa

a) Identificación y señalización de tubos:

Se realizó la identificación de cada uno de los tubos inyectores y colectores que existían con los planos y se marcaron con una (I) los inyectores, y con una (C) los colectores.

b) Lavado de juntas y comprobación de estanqueidad de los compartimentos:

Se hace circular agua a presión, tal que ésta sea como máximo el 75 por 100 de la presión de inyección, y dando por finalizado el lavado al salir agua limpia por el colector. El orden de ejecución de los lavados se hizo comenzando primero por la junta central, continuando alternativamente a uno y otro lado.

Una vez realizados los lavados de toda la zona se procedió a la comprobación de la estanqueidad del compartimento, la cual comprobada y gracias a un contador de agua se podía saber la capacidad de la junta.

c) Llenado de las juntas.

El compartimento de una junta a inyectar se mantenía lleno de agua como mínimo veinticuatro horas antes de proceder a su inyección. Agua que se dejaba salir por su colector al iniciar la inyección de cemento.

Durante las operaciones de inyección, los compartimentos contiguos al que se estaba inyectando, estaban llenos de agua a una presión estática

PRESA DE LA BAELLS

igual a la mitad de la presión máxima de inyección correspondiente a la zona y el resto de los compartimentos de la zona llenos de agua.

Se establecieron tres tipos de dosificaciones de lechada a emplear $A/C = 2/1$, $A/C = 1/1$, $A/C = 1/2$. De tal forma que si la circulación de agua era perfecta a través del circuito de inyección durante su lavado se comenzaba con la dosificación 1/1 y si era dificultosa por el contrario se comenzaba con $A/C = 2/1$.

Las presiones de inyección medias en el inyector y colector fueron las siguientes:

	Inyector (Kg/cm ²)	Colector (Kg/cm ²)
Zona I	12	7
Zona II	8	4
Zona III	6	3
Zona IV	5	2
Zona V	3,5	1

Pudiendo resumir que salvo algunos pequeños problemas en la Zona I en la margen derecha, que se piensa deben atribuirse al hormigonado muy posterior de la zona del bloque 4, el resto de la inyección discurrió sin incidentes.

IV. AUSCULTACION

En la Presa de la Baells y teniendo en cuenta sus características se han seguido en relación al tema de la auscultación unas directrices que han sido las siguientes:

1.º Cualquier magnitud que se mida debe ayudar a la interpretación del conjunto de tal modo que el plan de vigilancia resulte un todo armónico.

2.º La estructura y su cimentación forman un conjunto único e indisoluble y como tal debía controlarse. El tipo de presa y las características de su cimentación nos fijaron los medios y magnitudes a controlar.

3.º La comprobación tanto de la estabilidad de la presa, como de su comportamiento se verifica en todas las fases de la obra: construcción, puesta en carga y posterior explotación.

Según esto se controla:

A) Temperaturas. Para conocer:

- Incrementos térmicos y temperaturas máximas alcanzadas durante el proceso de fraguado.
- Tiempo durante el cual se alcanzan estas temperaturas.
- Gradientes térmicos, tanto en sentido horizontal como vertical, que pueden originar tracciones con peligro de fisuración y aiteran el sellado de las juntas de hormigonado.
- Evolución térmica del hormigón que forman las juntas para fijar las fechas más idóneas de inyección.
- Red de isotermas en algún bloque de acuerdo con la orientación del eje de la presa.
- Evolución térmica del agua a distintas alturas y del aire en algunos puntos del paramento de aguas abajo.

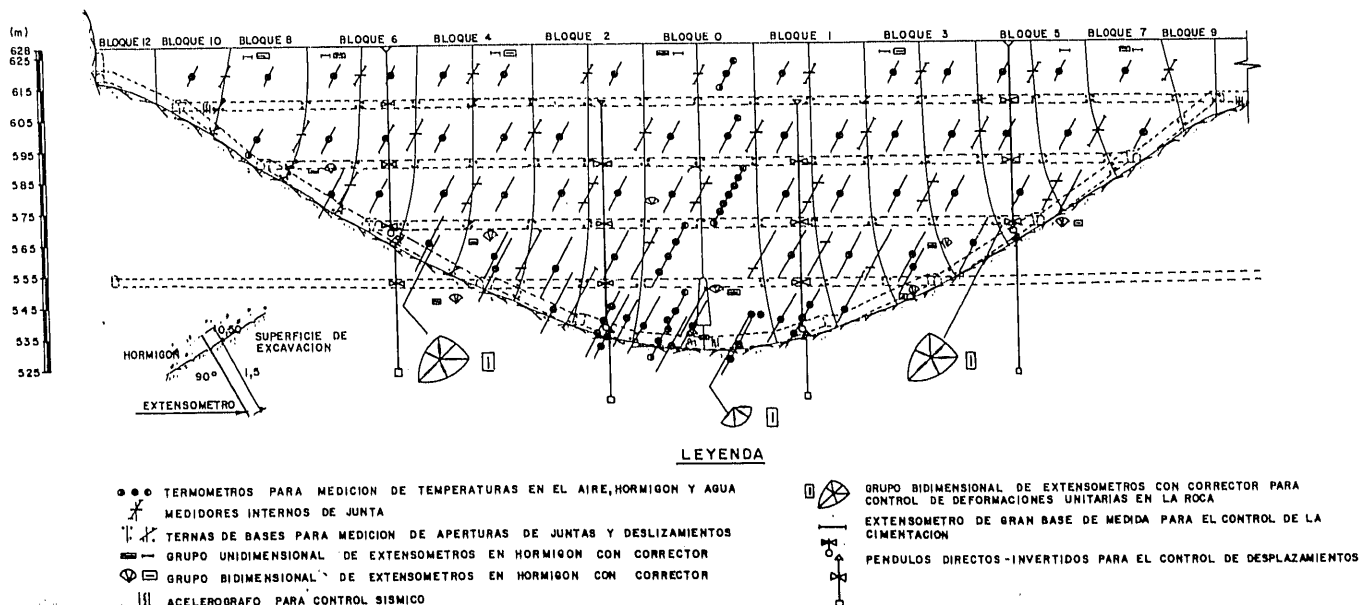


Fig. 8 LOCALIZACION DE APARATOS DE AUSCULTACION

PRESA DE LA BAELLS

Para interpretación de estos datos tenemos 90 termómetros en el hormigón, cinco en el paramento de aguas arriba y cinco en el paramento de aguas abajo.

B) Comportamiento de las juntas para:

- Conocer los desplazamientos relativos de los bloques mientras son independientes.
- Obtener información sobre el estado de apertura de las juntas para conseguir la unidad estructural.
- Obtener información sobre el estado de apertura de las juntas hasta la ejecución de las inyecciones.
- Controlar las operaciones de lavado e inyección de estas juntas para conseguir la unidad estructural.
- Aportar elementos de juicio sobre la necesidad o conveniencia de alguna reinyección posterior.

Se han colocado 67 medidores mecánicos, que se han repartido por toda la estructura, situando algunos en zonas bajas, para determinar además de las aperturas, posibles desplazamientos relativos entre bloques en sentido horizontal y vertical. Para ello se colocan en hastial, solera y techo según resulte más cómodo.

C) Comportamiento mecánico del hormigón de la presa, midiendo las deformaciones unitarias en puntos lo suficientemente representativos como para poder determinar:

- Estado temporal de la bóveda y su evolución en el tiempo.
- Red de isostáticas en cualquier momento.
- Coeficiente de dilatación lineal.

El número de puntos controlados es de 19 con 56 extensómetros activos y 19 correctores repartidos en siete grupos unidimensionales y 12 bidimensionales. Se ha utilizado como extensómetro activo el F-2 de cuerda vibrante.

D) Movimiento de la estructura y su cimentación para controlar:

- Desplazamientos horizontales absolutos.
- Desplazamientos verticales absolutos.
- Desformabilidad de la cimentación en las zonas más cargadas a embalse lleno.

Se han montado un total de cuatro conjuntos péndulo directo invertido que se unen en la galería perimetral o en galerías próximas a la cimenta-

ción. Por otro lado existen 25 extensómetros para control de la cimentación.

E) Presiones intersticiales y subpresión para conocer:

- Eficacia de la red de drenaje.
- Ley de subpresiones a lo largo de la base de los bloques, bien en la zona de contacto roca-hormigón o en zonas más profundas.
- Variaciones en la subpresión a lo largo de litoclasas que corten a la cimentación en toda su longitud.

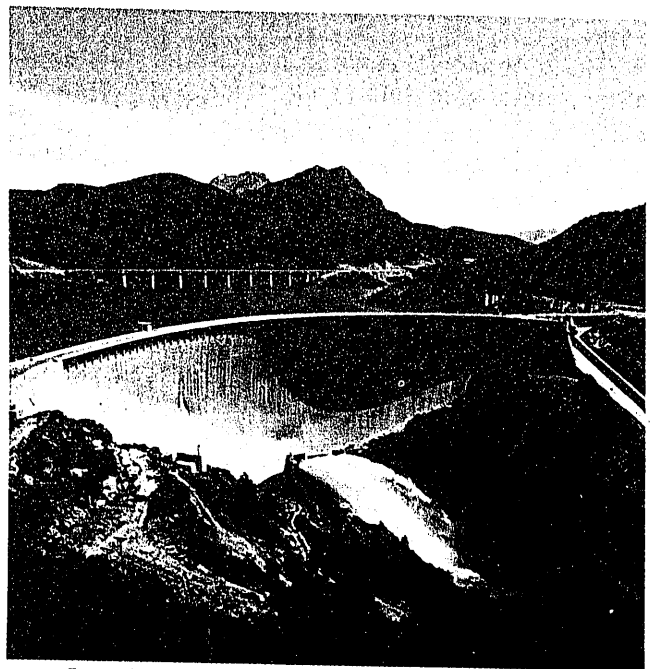
Para estas medidas hemos instalado piezómetros de cuerda vibrante que unen a un tiempo de respuesta muy corto una gran precisión y sensibilidad.

F) Control sísmico para conocer las aceleraciones creadas por un eventual seísmo.

Con la obtención de los datos sobre estas magnitudes, que por otra parte tienen una estrecha relación entre sí, se piensa que la presa queda perfectamente controlada.

V. COMPORTAMIENTO DE LA PRESA DURANTE SU PRIMER EMBALSE

Para el primer llenado del Embalse de la Baells, se planteó inicialmente un plan en el que se intentaba el mayor control posible y la máxima uniformidad en el llenado. Para ello se establecían



Vista aguas abajo

tres paradas a distintas cotas de un par de meses en los cuales se estudiaba el comportamiento de la presa durante la fase anterior antes de iniciar una nueva fase de llenado, limitándose por otra parte la velocidad de llenado a 0,20 metros por día.

Hasta la última fase del embalse en la cual nos encontramos en este momento vamos a mencionar los resultados que se han desprendido hasta la fecha de la interpretación de los aparatos de auscultación:

V.1. Comportamiento térmico de la presa.

Una vez alcanzadas en el hormigón las mínimas temperaturas de estabilización, lo cual tuvo lugar durante el invierno de 1975-76, se puede decir que sobre la estructura han actuado esencialmente dos efectos térmicos:

- Onda de aire.
- Acción del embalse.

Menor importancia han tenido los efectos de radiación solar e irradiación nocturna, los cuales han afectado sustancialmente a zonas próximas de los paramentos no embalsados.

El estudio del comportamiento térmico de la bóveda se ha realizado de dos maneras:

- A través de alzados térmicos e isothermas en fechas singulares.
- Siguiendo la evolución a través del tiempo de algunos puntos representativos dentro del conjunto de la presa.

De la observación de la primera se pueden indicar como más interesantes los siguientes aspectos:

1.º En general existe una buena simetría térmica de la bóveda, a la cual ha contribuido notablemente su orientación (eje de presa coincidente con la dirección Norte-Sur). No obstante, se aprecia una cierta asimetría, localizada en los riñones de la presa, más acusada durante el año 1976 y que tiende a desaparecer. En ella parece haber influido la lenta disipación del calor de fraguado en la correspondiente zona de la margen derecha.

2.º Como era de esperar, la influencia térmica del aire se deja sentir con mayor intensidad en la zona alta de presa.

3.º En la zona baja de la presa las temperaturas permanecen prácticamente estacionarias durante todo el año con valores próximos a los 13º C.

4.º En la zona próxima al paramento de aguas abajo es donde existen los mayores gradientes

térmicos de la presa, al ser la más influenciada por la onda térmica del aire.

Por lo que respecta a la evolución térmica en función del tiempo: Las temperaturas en hormigón evolucionan cíclicamente según la onda térmica del aire, aunque en desfase con ella. Por consiguiente, una vez alcanzada la estabilización térmica con el exterior, las temperaturas en núcleo se dan con un desfase respecto a los del aire que está básicamente relacionado con los espesores. Dicha relación es aproximadamente la que se indica a continuación:

Distancia al P. aguas abajo	Desfase
De 10 a 11 metros	3,5 meses
De 5 a 6 metros	2,5 meses
Sobre 4 metros	45 días
De 2,5 a 3,5 metros	35 días

V.2. Comportamiento de las juntas de construcción.

Se puede decir que el comportamiento de las juntas es muy satisfactorio y se confirma el excelente trabajo de inyección que se dio a las mismas. La puesta en carga parcial de la estructura no ha afectado prácticamente a las juntas.

V.3. Desplazamientos horizontales absolutos medidos con péndulos.

Los movimientos detectados son normales, evolucionando los radiales en dependencia con la onda térmica en el aire ya que los valores máximos y mínimos se miden a finales de agosto y finales de enero.

Como era de esperar los mayores desplazamientos absolutos son radiales, inferiores a 10 mm y con valores decrecientes de la coronación a la cimentación, lo cual está en consonancia con lo indicado anteriormente de una mayor sensibilidad térmica de la zona alta de la bóveda.

Los desplazamientos tangenciales no son elevados y únicamente las medidas con el péndulo del bloque no llegan a alcanzar valores próximos a los 2,5 mm.

La carga del embalse prácticamente no ha influido en los desplazamientos medidos. Se puede observar cómo los desplazamientos detectados en los meses de marzo de 1976 y 1977 (de similares temperaturas) son prácticamente idénticos.

V.4. Comportamiento deformacional y tensional de la presa.

Con el fin de seguir el comportamiento tensional de la estructura hasta el momento actual, se han considerado las tres sollicitaciones que básicamente han actuado sobre la misma:

- Inyección de juntas.
- Carga del embalse.
- Térmica.

Aunque estudiar separadamente cada uno de los efectos por las acciones consideradas anteriormente resulta complicado, ya que rara vez se consigue un período de cálculo de tensiones que corresponda a las hipótesis definidas. No obstante se han preparado separadamente los dos estados tensionales en los que se intenta analizar los efectos que corresponden a:

- Carga hidrostática, fundamentalmente.
- Acción térmica.

Para estudiar el efecto de la carga hidrostática, se seleccionó un período en el que, para una cota relativamente alta del embalse 600,29 metros; la presa estaba totalmente monolitizada y los incrementos térmicos puntuales en las diversas zonas de control fueron muy pequeños. De la observación de las tensiones se pueden indicar como más significativos los siguientes aspectos:

1.º La situación puede considerarse de una aceptable simetría de comportamiento, especialmente dentro de la zona embalsada, con valores que en general están dentro de lo normal.

2.º Los máximos valores de compresión y tracción de las tensiones principales desarrolladas dentro del período en estudio se miden en:

- | | | |
|-------------------------|----------|----------|
| — 24 Kg/cm ² | bloque 8 | cota 625 |
| 14 Kg/cm ² | bloque 0 | cota 581 |

Por lo que respecta al estado tensional generado por efectos térmicos, este estudio se hizo para un nivel de embalse constante a la cota 600,29, en el que se tuvieron como aspectos más significativos:

1.º La situación obtenida corresponde a un estado general de descompresiones.

2.º En la coronación de la presa las zonas más descomprimidas son las próximas a los estribos y al plano de simetría de la presa.

3.º Dentro de la zona embalsada y en las proximidades al paramento de aguas arriba las tensiones principales tienden, en general, a ser descompresiones con dirección próxima a la vertical y compresiones de valores muy pequeños en la horizontal.

V.5. Control de subpresiones.

Del análisis de los resultados obtenidos con los piezómetros se deduce lo siguiente:

1.º De las 15 secciones controladas únicamente se detecta subpresiones en seis de ellas y todas correspondientes a piezómetros de contacto.

2.º Antes de la pantalla de drenaje el tanto por ciento de subpresión existente aguas arriba corresponde al 88 por 100 de la altura de columna de agua pasando al 51,4 por 100, inmediatamente detrás de la pantalla.

3.º Un 60 por 100 del resto está prácticamente sin subpresión, lo que indica un drenaje fuerte a través de la cimentación.

En resumen, de la interpretación de todas las lecturas de los aparatos de auscultación, se desprende que la Presa de la Baells tiene un comportamiento lógico y positivo, fruto sin duda de una estrecha colaboración entre el proyecto y la obra.