

Influencia de la consolidación del cimiento en la construcción por etapas de la presa de Barbate

Por ANTONIO SORIANO PEÑA I.C.C. y P.
CARLOS SERRANO PETTERSON I.C.C. y P.
de Ingenieros del Suelo, S. A.

JUAN LUIS RAMIREZ VACAS I.C.C. y P.
de C.H. del Guadalquivir.

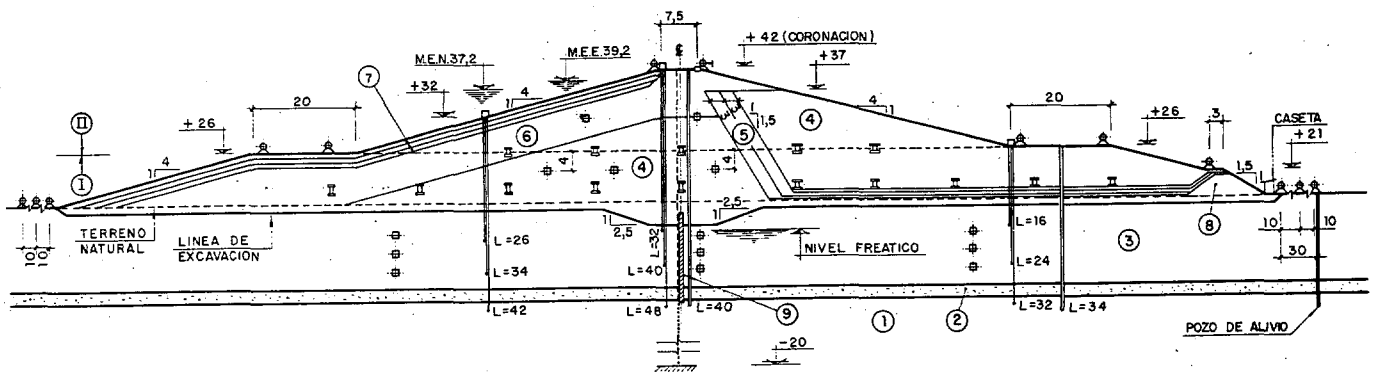
1. INTRODUCCION

La presa de Barbate se está construyendo sobre el río de igual nombre en el término municipal de Benalup (Cádiz).

El proyecto de esta presa ha estado claramente marcado por la calidad de su cimiento. La cerrada

es muy amplia, el valle del Barbate en esta zona tiene más de 1 km. de ancho y el depósito de suelos aluviales alcanza potencias de más de 20 m. El sustrato rocoso está formado, fundamentalmente, por margas con intercalaciones de areniscas y esporádicamente calizas (flysch Eoceno).

La solución adoptada para esta presa ha sido de



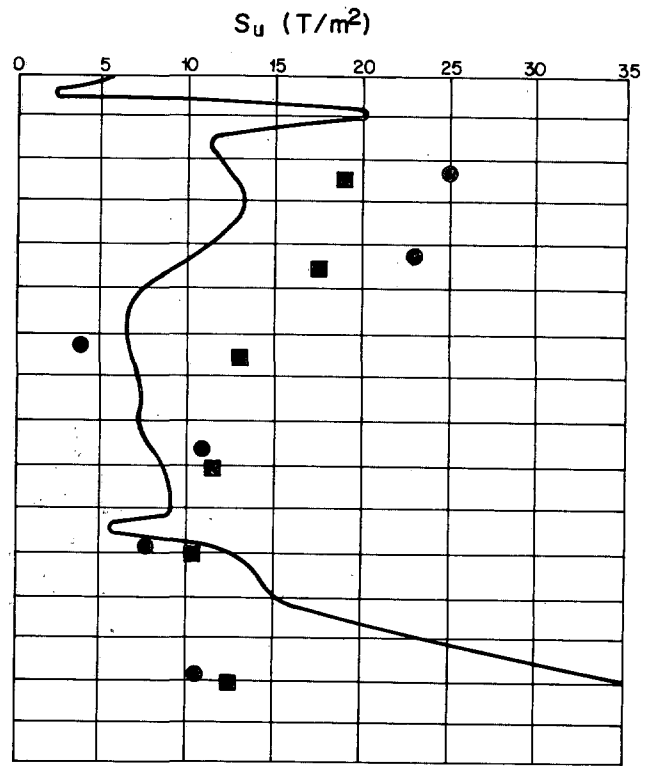
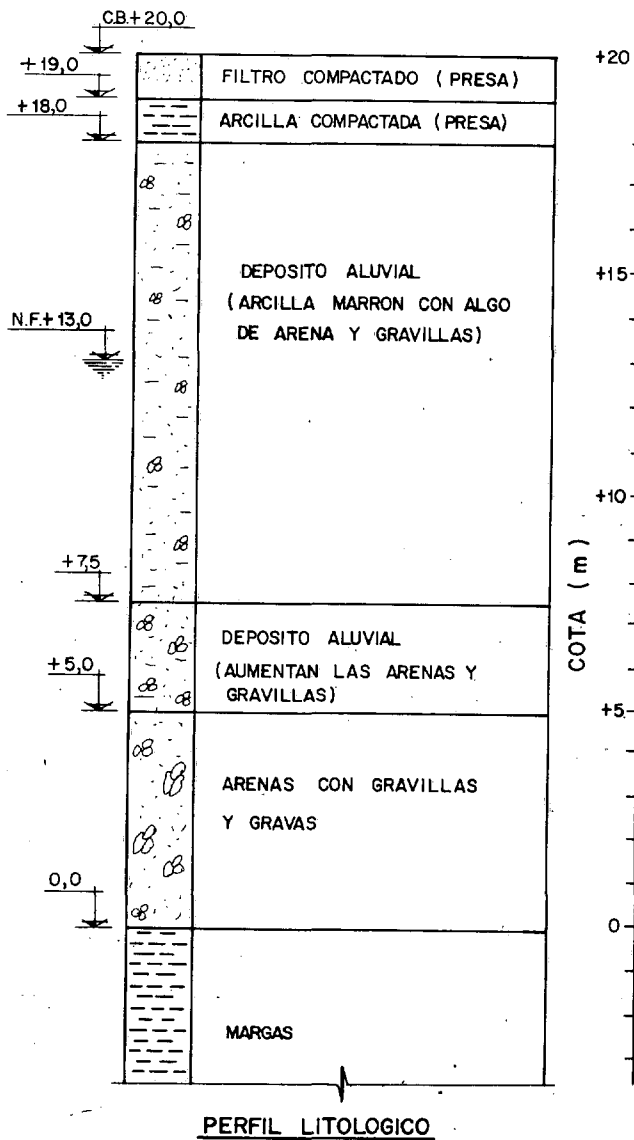
LEYENDA MATERIALES

- ① MARGAS
- ② GRAVAS
- ③ DEPOSITO ALUVIAL (ARCILLA, LIMO Y ARENA)
- ④ ARCILLA ALUVIAL
- ⑤ FILTRO Y DREN
- ⑥ ARCILLA SELECCIONADA
- ⑦ ESCOLLERA DE PROTECCION
- ⑧ DREN DE PIÉ
- ⑨ PANTALLA DE BENTONITA - CEMENTO
- ① PRIMERA FASE DE CONSTRUCCION
- ② SEGUNDA FASE DE CONSTRUCCION

LEYENDA INSTRUMENTACION

- PIEZOMETRO DE CUERDA VIBRANTE
- CELULA HIDRAULICA DE ASIENTO
- EXTENSOMETRO DE 3 VARILLAS
- INCLINOMETRO
- TUBO DE ASIENTO
- PUNTO DE REFERENCIA PARA NIVELACION TOPOGRAFICA
- PUNTO DE REFERENCIA PARA NIVELACION Y COLIMACION

Figura 1. Sección típica.



RESULTADOS DE ENSAYOS DE CORTE

LEYENDA	
●	ENSAYOS TRIAXIALES SIN CONSOLIDACION NI DRENAJE
■	ENSAYOS DEL MOLINETE
}	ENSAYOS DE PENETRACION

Figura 2. Perfil tipo del cimiento y resistencias al corte.

materiales sueltos con acción tipo zonificada con dos clases de arcillas aluviales. Tiene un sistema de drenaje interno, una protección granular importante aguas arriba, una pantalla impermeable de bentonita cemento que atraviesa el aluvial y una instrumentación abundante. La sección tipo puede verse en la Figura 1.

Uno de los aspectos más importantes de esta obra es el estudio y la observación de la consolidación del cimiento y ese es el tema de este artículo. Otros aspectos de interés tales como el sistema de control de colocación y compactación de arcillas basado en el MCV, o el estudio de asentamientos esperados, el sistema de impermeabiliza-

ción del cimiento, etc..., están descritos en otros documentos. Ver referencias.

2. CARACTERISTICAS DEL CIMIENTO

El reconocimiento geotécnico del cimiento se ha llevado a cabo en varias campañas sucesivas ya que desde la primera contratación de las obras en 1981 hasta que se llegó a la definición actual del cuerpo de presa, en 1987, se realizaron varias campañas y se escribieron varios informes relativos a la calidad de la cimentación.

Para describir de una manera breve la calidad del

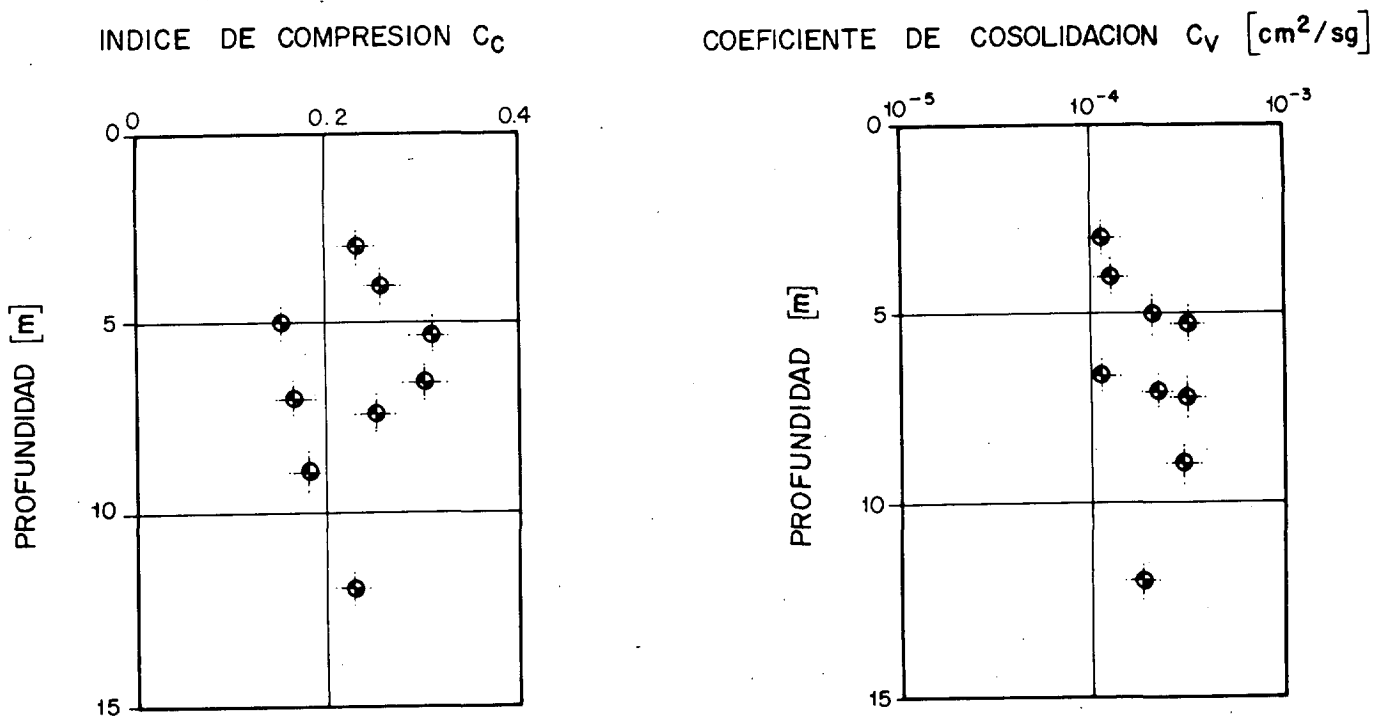


Figura 3. Valores típicos de los índices de compresión y coeficientes de consolidación.

cimiento se trae aquí la Figura 2, donde se refleja una columna litológica típica junto con datos de resistencia del cimiento medidos en profundidad.

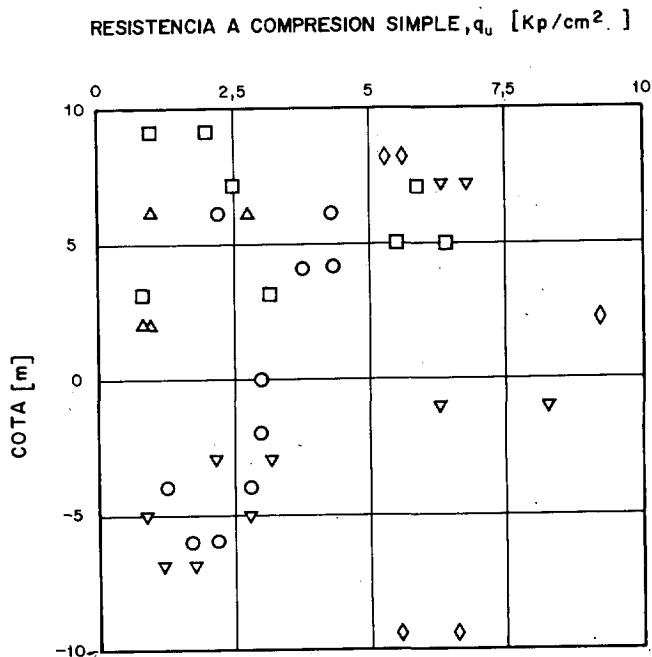
Las resistencias al corte sin drenaje fueron medidas por varios procedimientos entre ellos los tres indicados en la figura: ensayos triaxiales U.U. en muestras inalteradas, "vane test" en el fondo de los sondeos y penetración estática "in situ". Puede verse que la resistencia al corte es baja, como corresponde a sedimentos recientes poco consolidados.

La plasticidad de este aluvial es muy variable, su límite oscila entre valores nulos, en las zonas más arenosas, hasta valores superiores al 60% en las zonas más arcillosas.

La compresibilidad de estos suelos es alta y su permeabilidad puede ser, en algunas zonas, muy baja, tal como se indica en los diagramas de la Figura 3.

Las margas del sustrato son también de escasa competencia tal como se ilustra con el diagrama de resistencia de la Figura 4.

Los ensayos geotécnicos del cimiento han sido numerosos y no se pueden traer aquí todos los análisis y consideraciones que llevaron a definir los pa-



SIMBOLO	SONDEO
○	S-1
△	S-2
□	S-3
▽	S-4
◇	S-5

Figura 4. Resistencia de las margas.

rámetros de proyecto. Únicamente se quieren apuntar los principales rasgos de ese proceso.

En primer lugar y a efectos de analizar la estabilidad de la presa durante construcción se llegó a concluir, tras el análisis de toda la información disponible, que no era posible asegurar, con garantías suficientes, que la resistencia al corte sin drenaje a lo largo de una potencial línea de rotura profunda fuese superior a 3 Tn/m² en la zona aluvial arcillosa normalmente consolidada bajo el nivel freático, ni superior a 6 Tn/m² en la zona sobreconsolidada situada por encima del nivel freático. Con esas resistencias del cemento la presa habría de resultar estable.

En segundo lugar y a efectos de estudiar la estabilidad a largo plazo, tras producirse la consolidación del cemento, se postuló, tras considerar los resultados de varias decenas de ensayos triaxiales, que la resistencia en presiones efectivas media estaba dada por un ángulo de rozamiento de 17° y una cohesión nula y tales habrían de ser los parámetros de cálculo.

Finalmente y para estudiar los tiempos de consolidación y estimar el ritmo al que aumentaría la resistencia del cemento fue necesario hacer ensayos específicos de transferencia de humedad en

muestras semisaturadas y estudiar el proceso de disipación de presiones por la doble vía del flujo de agua a las gravas del fondo del aluvial, hacia abajo, y saturando la zona superior del aluvial y la parte baja del cuerpo de presa, hacia arriba. Entre los parámetros medios utilizados para estas estimaciones están:

$$\begin{aligned} \text{Difusividad} &= (w - 17) \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sg.} \\ pF &= 2 + 0.4 (23.5 - w) \end{aligned}$$

donde "w" es la humedad expresada en %

$$\begin{aligned} C_C &= 0.25 \\ C_V &= 6 \times 10^{-4} \text{ cm/sg.} \end{aligned}$$

Este último parámetro, el coeficiente de consolidación, fue elegido claramente mayor que el que resultaba como media de los ensayos edométricos realizados en laboratorio y del orden del doble del valor medio ponderado en la vertical del sondeo realizado en la zona más arcillosa. Con esto se pretendía cubrir parcialmente el hecho contrastado en otras experiencias en las que el proceso de consolidación en el campo suele resultar dos o tres veces más rápido que el deducido por aplicación directa de los ensayos de laboratorio.

PARAMETROS ADOPTADOS EN EL CALCULO

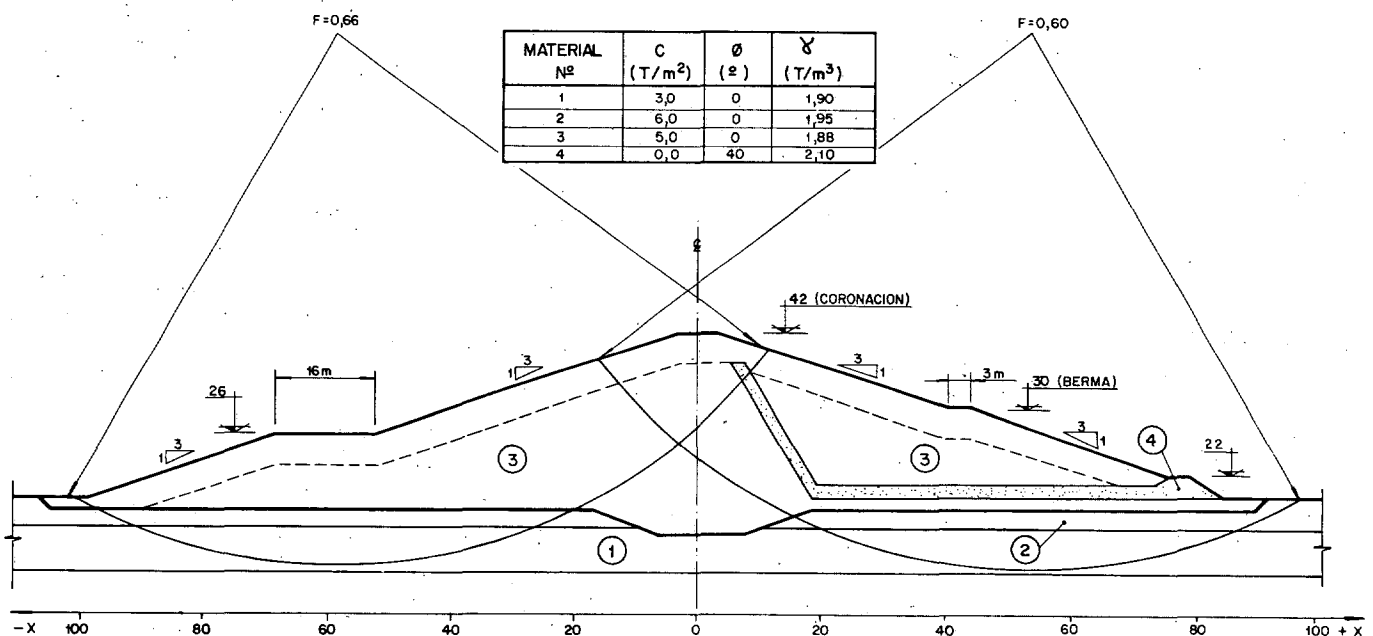


Figura 5. Estabilidad de la presa. Construcción en una Fase.

3. ESTABILIDAD DE LA PRESA, CONSTRUCCION POR FASES

Los primeros cálculos realizados fueron destinados al estudio de la estabilidad de la presa durante su construcción. La primera hipótesis postulada fue que no se producía disipación alguna de las presiones intersticiales que se pudieran generar en el cimiento debido al peso propio de la presa. En esas condiciones extremas resultaron unos coeficientes de seguridad muy bajos tal como se ilustra en la Figura 5.

Esos cálculos se completaron con otros basados en hipótesis más optimistas en cuanto a posibles presiones intersticiales en el cimiento, así como con el estudio de otras situaciones que ocurrirían a mayor plazo, tales como el llenado o posibles desembalses rápidos.

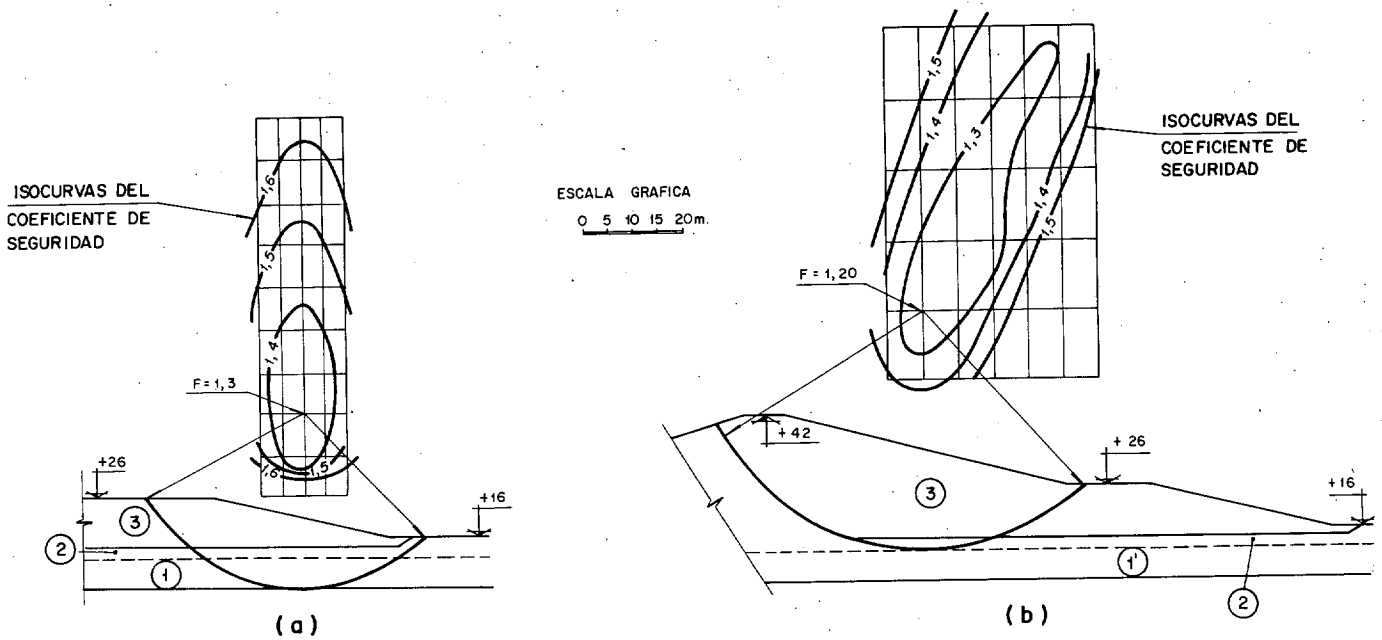
En aquellos momentos el proceso constructivo pensado implicaba que la construcción de la presa en la zona por donde discurría el río, debía hacerse en una sola campaña ya que para hacer la obra

no existían obras de desvío específicas. La presa se iría construyendo entre el río y las laderas y en la última campaña se construiría, de cimiento a coronación, la zona central sobre el cauce del río.

Aún en hipótesis relativamente optimistas de cálculo, resultó que la estabilidad de la presa era precaria y que el proceso constructivo debería ser controlado y ajustado a los ritmos de consolidación que se observasen durante la propia construcción.

Este y otros motivos llevaron al proyecto de presa hoy en construcción en el que los taludes son más tendidos, las bermas más anchas y el proceso constructivo diferente, aparte de otros detalles de tipo hidráulico (desagües, tomas y aliviadero) que también hubieron de adaptarse.

Suponiendo que las presiones en el cimiento no se disipan se calculó que la presa no podría superar la cota 26. A ese nivel el coeficiente de seguridad era ya igual a 1.3. Para elevar la presa desde ese nivel hasta su coronación a la cota 42 era preciso



PARAMETROS ADOPTADOS EN EL CALCULO

Nº	MATERIAL	C (T/m ²)	Ø (°)	γ (T/m ³)
1	PARTE DEL CIMIENTO NORMALMENTE CONSOLIDADA	3,0	0	1,94
1'		0,0	17°	1,94
2	PARTE DEL CIMIENTO SOBRECONSOLIDADA	6,0	0	2,03
3	RELLENO	5,0	0	1,95

Figura 6. Estabilidad de la presa. Construcción en dos Fases.

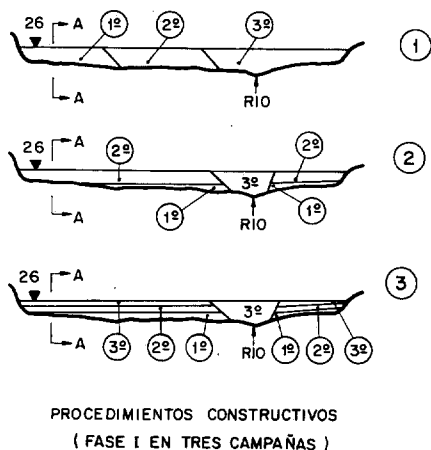
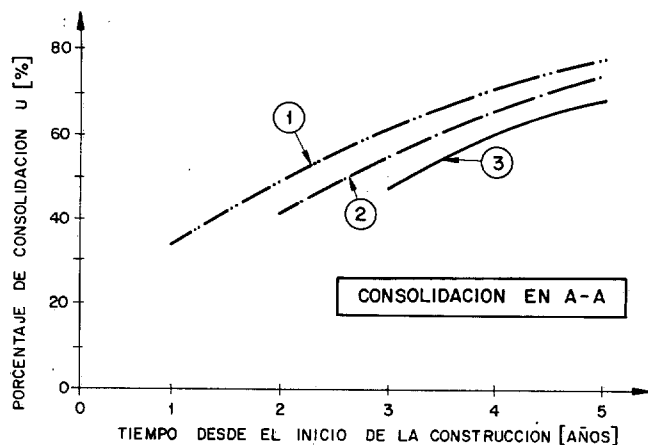


Figura 7. Definición de los plazos de espera.

esperar hasta que la consolidación del cimiento fuera, al menos, del 50%. Con esa consolidación y aún suponiendo que la construcción de la segunda fase fuese rápida, sin permitir nuevas disipaciones de presión, se podría garantizar un coeficiente de seguridad mínimo $F = 1.2$ al coronar la presa. Esta situación se ilustra en la Figura 6.

Era preciso construir la presa en dos fases diferentes una hasta la cota 26, que resultaría estable independientemente de cual fuera la velocidad de construcción o de disipación de presiones y otra segunda fase, hasta la cota 42 que sólo podría comenzarse cuando se hubiese alcanzado el 50% de la consolidación de la 1.^a Fase.

Eran posibles varios sistemas para construir la 1.^a Fase que por razones de rendimientos y plazos de obra, se sabía que habría de durar tres años, esto es tres campañas con paradas en invierno por ra-

zones climatológicas, salvo retrasos por otros motivos. Esos posibles sistemas constructivos de la 1.^a Fase se ilustran en la Figura 7.

En cualquier caso se supuso que la construcción se iniciaba extendiendo tierras en una determinada sección A-A entre el río y la ladera derecha y se estimó, con los parámetros de cálculo antes mencionados cual sería el grado de consolidación en esa sección A-A varios años después en cada uno de los tres esquemas de construcción analizados. La conclusión de esos estudios permitió pronosticar que probablemente la construcción de la presa, con cualquiera de los esquemas analizados, podría ser continua, esto es, la construcción de la 2.^a Fase podría iniciarse sin solución de continuidad, en la campaña siguiente a la terminación de la primera aunque habría de comenzarse, esta segunda fase, cargando las zonas más consolidadas y tras comprobar que el grado de consolidación había alcanzado ya el 50%.

4. OBSERVACION DEL CIMIENTO

Hasta aquí se ha realizado un resumen de la información previa a la construcción, información que se recoge, de manera más completa en el proyecto actual de la presa editado en abril de 1988.

La construcción de la presa se inició en la campaña de 1988 (en 1987 sólo se habían hecho unos rellenos previos y unas áreas de prueba del nuevo sistema de control de compactación). El procedimiento empleado fue alcanzar la cota 26 del final de la 1.^a Fase en distintos puntos según la conveniencia del sistema de explotación de la cantera de arcillas del cuerpo de presa, de las canteras de escollera y de los préstamos de molasas con los que se construían los filtros.

Una de las secciones de control de la presa, en el P-21, se construyó durante 1989 después de haberse construido, durante 1988 a uno y otro lado de tal sección donde se dejó una amplia zona para poder cruzar la obra. La observación de esa sección se resume a continuación en este artículo.

En la Figura 8 se recoge la evolución de asentamientos en el cimiento desde que se inició la construcción hasta hoy. En ese tiempo se ha completado la construcción de la 1.^a Fase (final de junio de 1989), se

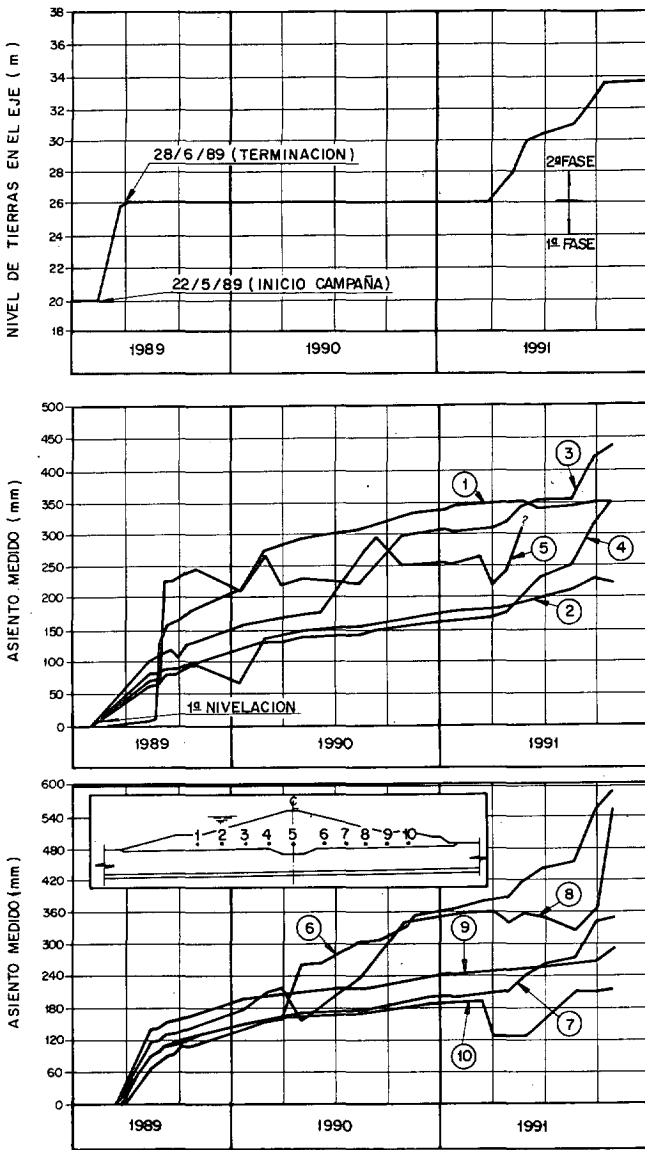


Figura 8. Evolución de asentos.

ha establecido un largo período de espera (hasta abril de 1991) y se ha alcanzado ya la cota 34 al final de la campaña de 1991. La construcción se espera completar en la campaña de 1992. Quiere destacarse, de esta figura, el carácter relativo de los asentos medidos ya que, como puede observarse, cuando se realizó la primera lectura del sistema de células hidráulicas, el cimiento ya estaba asentado debido a las cargas previas de las zonas adyacentes.

También quiere destacarse la escasa precisión que se obtiene con este sistema de medida de asentos entre otras razones por la gran longitud de las conducciones.

En cualquier caso este tipo de observación parcial de los movimientos de la base de la presa permiten obtener una idea global importante de la marcha de la consolidación y de la homogeneidad de los asentos.

En la Figura 9 se incluye un esquema de los asentos observados hasta noviembre de 1991 en las tres secciones auscultadas con células hidráulicas. Existen otros datos de asentos (tubos de asiento, extensómetros verticales, nivelaciones de galerías, etc...) que por brevedad no se comentan aquí y que figuran detalladamente en otros documentos.

Se quiere mencionar que uno de los equipos de auscultación que se creen más útiles para detectar prematuramente cualquier falta de estabilidad, es el control de movimientos horizontales mediante inclinómetros que atraviesen el cimiento. En esta presa se han colocado ya tres inclinómetros y se está en fase de colocación de varios más (control

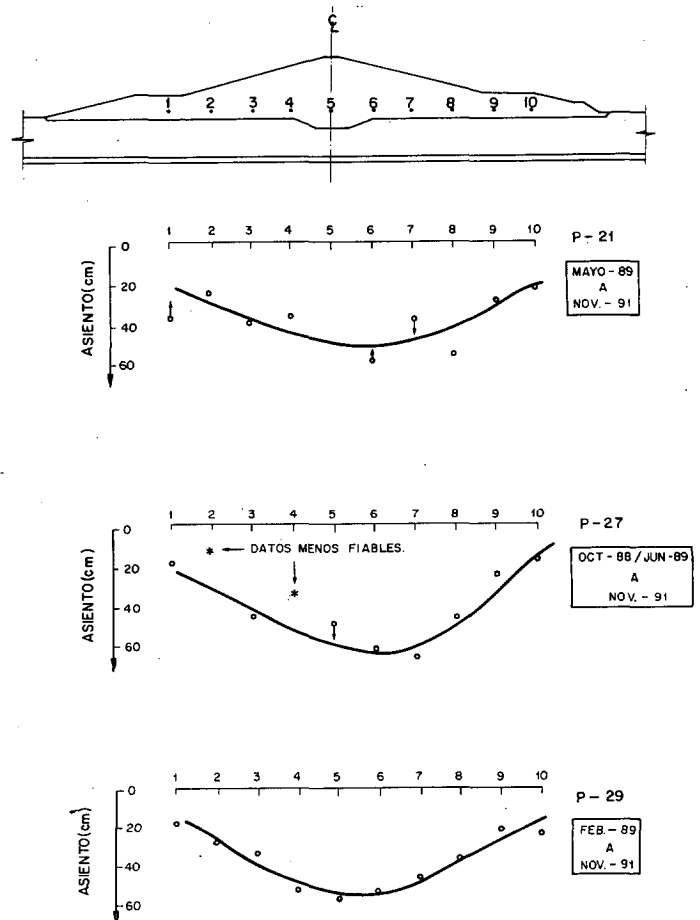


Figura 9. Asientos de la base de la presa.

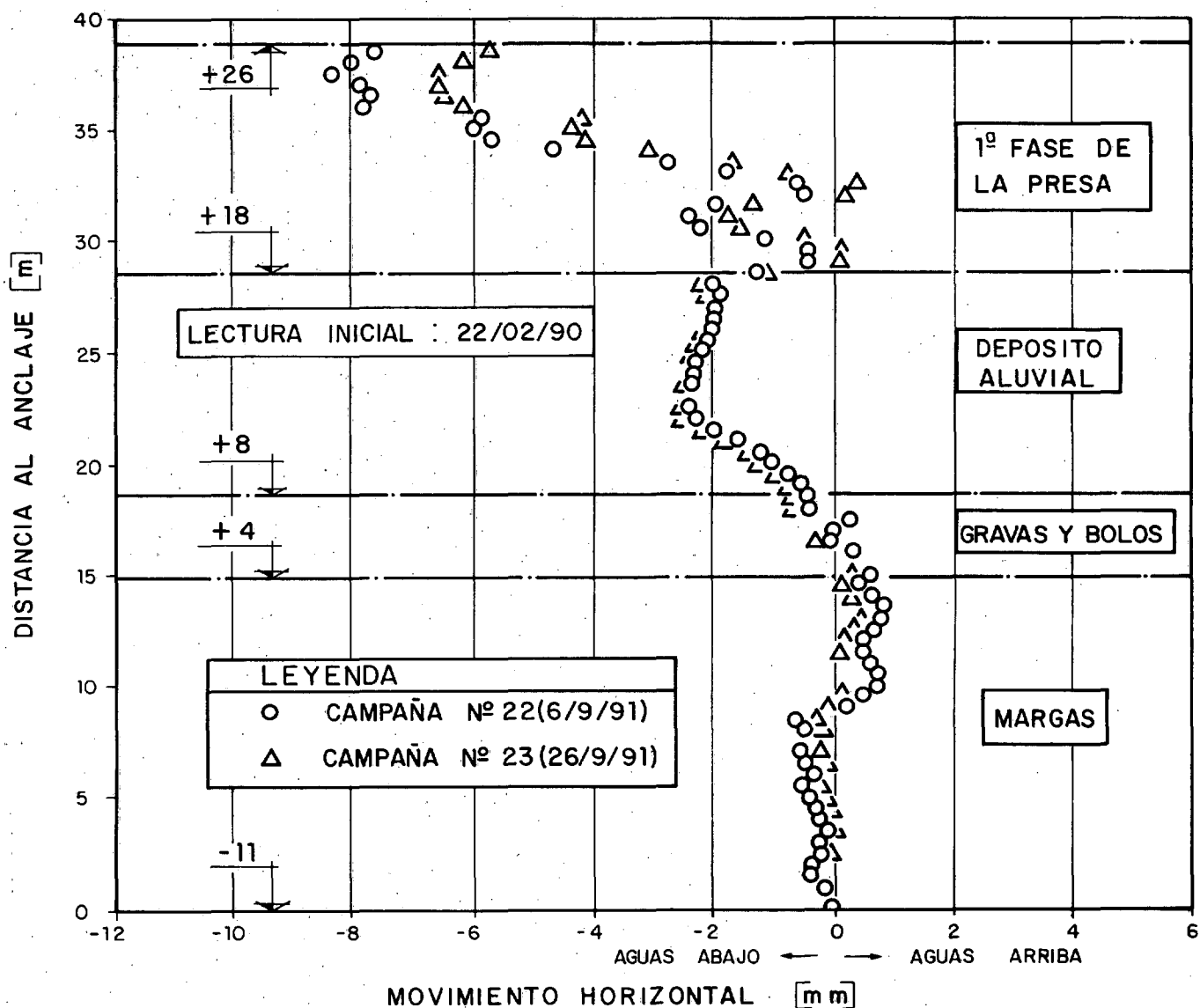


Figura 10. Movimientos horizontales.

de llenado). El movimiento acumulado por uno de ellos se ilustra en la Figura 10.

Tanto el control de desplazamientos verticales como horizontales indica que los movimientos son moderados y por lo tanto se puede inferir que no existen anomalías importantes en el cimiento.

La observación de las presiones intersticiales en el cimiento es, sin duda, el mejor elemento para conocer el grado de avance de la consolidación y en base a él, evaluar la seguridad de la presa durante su construcción. Tiene, este sistema de observación, una ventaja adicional sobre la observación de movimientos dado el carácter absoluto de sus lec-

turas ya que éstas no dependen del momento en que se instale el equipo. Los piezómetros permiten medir presiones intersticiales en procesos de consolidación aunque se instalen en cimientos que ya se están deformando.

En el cimiento de la presa de Barbate se han instalado unos cincuenta piezómetros de cuerda vibrante (hay y habrá otros en el cuerpo de presa para controlar la saturación durante el llenado). De esos piezómetros y para ilustrar la observación del proceso de consolidación, se traen aquí, a este artículo, los datos de algunos de los colocados en el cimiento del perfil P-21.

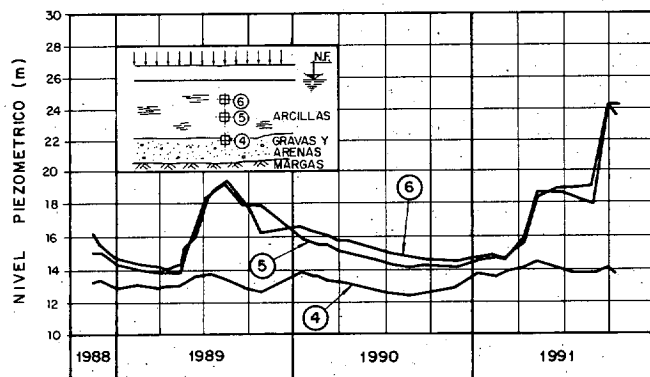
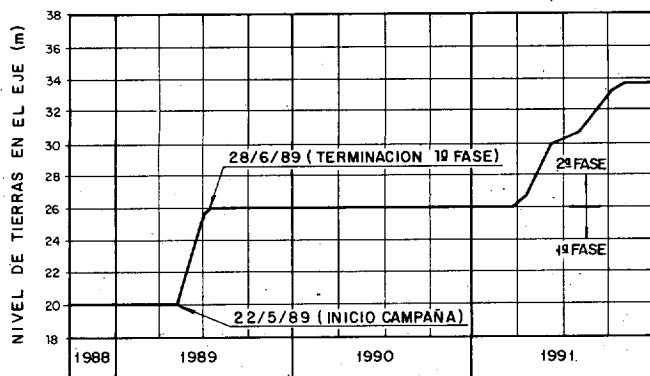


Figura 11. Evolución de niveles piezométricos.

En ese perfil existen tres piezómetros a distinta profundidad en el cimiento bajo el centro de la presa. La evolución de esos tres piezómetros durante los años pasados se recoge en la Figura 11.

Quiere destacarse que los piezómetros n.ºs 5 y 6, indicados en la figura, están situados en el centro del aluvial, debajo del nivel freático, tratando de registrar la máxima presión intersticial mientras que el número 4 está en el fondo del aluvial, en el contacto entre las gravas y las margas donde no son de esperar excesos de presión intersticial.

Es notable, en estos gráficos, el claro incremento de presión intersticial provocado por la construcción de la presa y su disipación en el plazo de espera, aparte de las oscilaciones que puedan existir por la variación estacional y local del nivel freático.

El análisis conjunto de estos tres piezómetros del P-21 y de otros seis situados en ese mismo perfil, aguas arriba y aguas abajo del eje de la presa, ha permitido elaborar gráficos de exceso de presiones intersticiales en varios momentos de la construcción, tal como se indica en la Figura 12.

En esa figura se indica los perfiles de excesos de presión en 1989, al concluir la 1.ª Fase de construc-

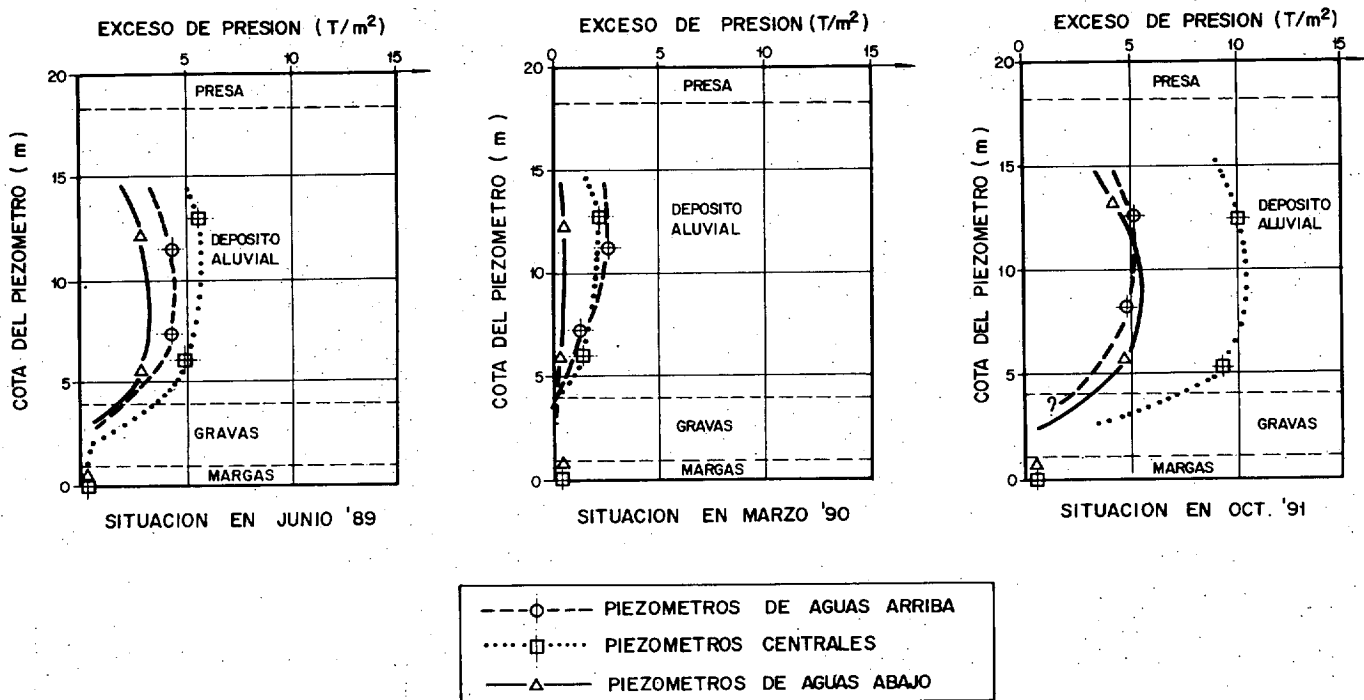


Figura 12. Perfil típico de consolidación.

ción, en marzo de 1990, cuando se esperaba el progreso de la consolidación sin colocar nuevas cargas y en octubre de 1991, con la construcción de la Fase 2.^a bien avanzada.

El incremento máximo de presiones que podía originar la construcción de la 1.^a Fase era 12 Tn/m² y según las prescripciones del proyecto la presión intersticial en exceso debiera ser, como media menor de 6 Tn/m² y como valor extremo 9 Tn/m² antes de iniciarse la construcción de la segunda Fase. Como puede verse, este sistema de observación ha permitido comprobar la situación antes de que en marzo de 1991 se autorizase el inicio de la 2.^a Fase.

En otras secciones de control la situación ha resultado más favorable, de consolidación más rápida (P-27 y P-29) y en otra (zona del desagüe de fondo) la situación resulta de consolidación más lenta.

5. CONCLUSION

Tras esta breve exposición del estudio del cimiento de la presa de Barbate, del pronóstico de su comportamiento y de algunos resultados típicos de su observación, se quiere apuntar una conclusión general que se estima de interés. Es posible, con las técnicas actuales de reconocimiento, ensayo y análisis geotécnico, proyectar obras de cierta importancia, en las que imprecisiones del proyecto, tales como la deformabilidad y permeabilidad del cimiento, sean resueltas con ayuda de la observación durante la construcción.

Se cree, tras la experiencia obtenida, que una solución al proyecto de la presa de Barbate que no incluyese una observación del cimiento, hubiera podido conducir a un encarecimiento previo innecesario o a una falta de seguridad peligrosa.

REFERENCIAS

1. RAMIREZ VACAS, J. L. "Terminación de la Presa de Barbate (Cádiz)". Proyecto de Modificación número 1. Dirección General de Obras Hidráulicas. M.O.P.U. 1988.
2. RAMIREZ VACAS J. L. y SORIANO, A. "Aplicación del ensayo MCV en la presa de Barbate". Revista de Obras Públicas. Número 3268. pp. 465-470. Madrid, abril-mayo 1988.
3. RAMIREZ VACAS, J. L. y SORIANO, A. "Application of the MCV to the construction of Barbate dam". Int. Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. pp. 2107-2110. Río de Janeiro. Agosto 1989.
4. SORIANO, A. "Puesta en obra y compactación de rellenos en obras de infraestructura viaria". Simposio sobre el Agua y el Terreno de las Infraestructuras Viarias. Ponencia número 2.1. pp. 129-149. Torremolinos. Noviembre 1989.
5. RAMIREZ VACAS, J. L. "Presa de Barbate, Construcción de la Segunda Fase". Proyecto. Dirección General de Obras Hidráulicas. M.O.P.U. 1990.
6. RAMIREZ VACAS, J. L., SORIANO, A. y SERRANO, C. "Design and Construction of Barbate Dam". XVII Congreso Internacional de Grandes Presas. Q.67. R.8. pp 129-163. Viena. Junio 1991.