

LOS DIQUES DE CIERRE DE LA Balsa DE LEBRIJA. UN EJEMPLO DE CONSTRUCCIÓN SOBRE SUELOS BLANDOS

*LEBRIJA RESERVOIR EMBANKMENTS.
EXAMPLE OF CONSTRUCTION IN SOFT SOILS*

JUAN F. SAURA MARTÍNEZ. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. direccion.technica@chguadalquivir.es
VICENTE RODRÍGUEZ GARCÍA. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
FERROVIAL y SANDO en U.T.E.
JUAN CARLOS DE CEA AZAÑEDO. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
D.G.O.H.C.A. jcdecea@mma.es
JOSÉ LUIS DE JUSTO ALPAÑÉS. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Universidad de Sevilla.
JOSÉ M. MARCOS MÉNDEZ. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. jaalvarez@chguadalquivir.es

RESUMEN: Se describen las obras de construcción de los diques de cierre de la Balsa de Lebrija, de unos 8 Hm³ de capacidad y el comportamiento de los mismos. Con la construcción de la balsa se ha previsto garantizar el riego de unas 15.000 Has y la transformación de los cultivos tradicionales en otros más competitivos y continuos a lo largo del año. La balsa se convierte así en el motor de desarrollo de esa zona regable, complementándose su construcción con la restauración medioambiental del entorno, con objeto de convertirla en una referencia natural de la zona.

PALABRAS CLAVE: Balsa, SUELOS BLANDOS, COMPORTAMIENTO, HUMEDAL, RESTAURACIÓN MEDIOAMBIENTAL, REVEGETACIÓN

ABSTRACT: The article describes the construction and behaviour of the embankments to the Lebrija Reservoir which has a storage capacity of some 8 Hm³. The reservoir should guarantee the irrigation of around 15,000 hectares and traditional cultivation will be transformed to the growing of more competitive and continuous crops throughout the year. The reservoir shall then serve to promote development in this irrigable area and will be supplemented by environmental restoration in the vicinity in order to convert it into a natural area of reference in the region.

KEYWORDS: RESERVOIR, SOFT SOILS, BEHAVIOUR, WETLANDS, ENVIRONMENTAL RESTORATION, REVEGETATION

1. INTRODUCCIÓN

La Balsa de Lebrija se encuentra al noreste de esta localidad sevillana del mismo nombre. Su objetivo es asegurar el riego de 14.600 Has. de la Comunidad de Regantes del Sector B-XII del Bajo Guadalquivir. Constituye el punto final

del Canal del Bajo Guadalquivir, 148 Km. después de su toma en la Presa de Peñaflo, racionalizando su uso y permitiendo garantizar una agricultura moderna con cultivos adaptados a la demanda (Fig. 1).

El Contratista principal de las obras de la balsa de Lebrija, es una UTE compuesta por FERROVIAL y SANDO y la



Fig. 1. Balsa de Lebrija. Referencia geográfica.

Asistencia Técnica a la Dirección de Obra de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir es la UTE formada por IBERHIDRA y EUROESTUDIOS.

2. ANTECEDENTES

A finales de los años ochenta a la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir se le plantean dos grandes retos en la gestión de la demanda de riegos. El primero de ellos es el ahorro de agua, de gran importancia en una cuenca deficitaria, y el segundo dotar a los agricultores de los elementos necesarios para desarrollar un regadío moderno y competitivo. A ambos responde la Balsa de Lebrija.

En lo referente al primer objetivo, la Balsa es un elemento muy importante de un plan mucho más ambicioso que la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir ha elaborado para los riegos que se alimentan del Canal del Bajo Guadalquivir (100.000 ha.). Hasta la fecha el Canal, con su longitud de 148 km., es como un río paralelo al Guadalquivir con mayor cota, derivándose el agua en la presa de Peñafior y con desagües para reintegrar al río

los caudales sobrantes. El sistema adolece de una gran rigidez, no permitiendo al explotador satisfacer las demandas puntuales de los agricultores, principalmente, por dos razones. La primera, por la gran distancia que existe entre los recursos y la demanda, sin regulaciones intermedias, y la segunda por el diseño de la infraestructura, concebida para transportar grandes caudales. Las obras previstas que, sin duda, supondrán un importante ahorro de agua son básicamente: tableado del canal, balsas de regulación y control automático del mismo. La balsa de Lebrija como punto final del canal, además de la regulación que aporta a la cuenca durante la campaña de riego, permitirá recoger y almacenar los sobrantes del mismo, ajustando la dotación de parcelas a las necesidades reales de los agricultores.

Fijándonos en el segundo objetivo, la agricultura de zonas regables, como el B-XII, han sufrido en los últimos años una importante transformación. El regante no se limita como hace años a las campañas de riego, el agricultor busca adaptarse al mercado tanto en el producto como en el tiempo, creando incluso, como es el caso de Lebrija, sus propias industrias de transformación. Esta visión moderna de la agri-

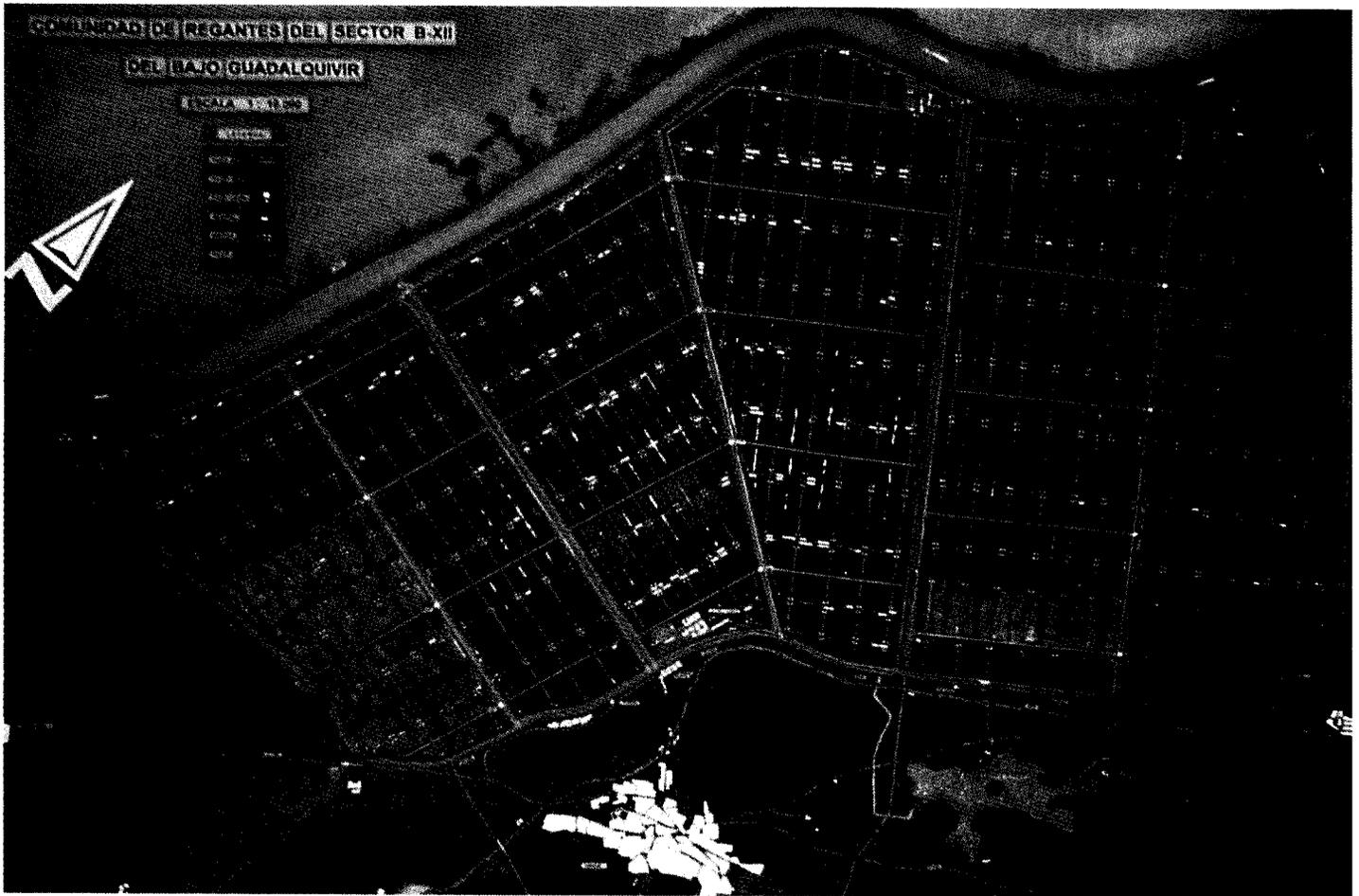


Fig. 2. Zona regable B-XII (Maqueta).

cultura exige poder generar productos de gran calidad y con enorme garantía en la producción. Es decir, debe de aplicarse el agua en la cantidad y en el momento en que el producto lo exige, no admitiendo el mercado situaciones de desabastecimiento. Con la construcción de esta Balsa, la Confederación facilita a la Comunidad de Regantes del B-XII, poder competir con otras zonas, al asegurar una dotación mínima y regular los recursos para su correcta aplicación.

3. INTEGRACIÓN MEDIOAMBIENTAL

Desde el inicio de la construcción de la Balsa, la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir vio en ella un gran potencial medioambiental, tanto por su ubicación como por su tipología. La posibilidad de integrar medioambientalmente la obra, construyendo un rico humedal, fue desde el primer momento un fin casi tan importante como el enorme beneficio que reporta. Con estas miras está actualmente desarrollando un conjunto de actuaciones encaminadas a conseguir los siguientes objetivos:

1. Generación de un espacio naturalizado que proporcione biodiversidad y estabilidad ecológica en el entorno de la Balsa y constituido por especies autóctonas a su área.
2. Convertir a la Balsa en la referencia natural de su entorno inmediato.
3. Creación de un hábitat de área húmeda que complemente a los importantes humedales limítrofes: Parque nacional de Doñana y los complejos endorreicos de Lebrija-Las Cabezas y Espera.
4. Permitir la nidificación e invernada de las aves, así como refugio y lugares de campeo para los mamíferos.
5. Establecer un tapiz vegetal que requiera un bajo nivel de intervención humana para su mantenimiento y persistencia.
6. Cumplimiento de los condicionantes ambientales de la Declaración de Impacto Ambiental del proyecto de construcción de la Balsa (B.O.E. nº 255 de 20 de septiembre de 1995).

Para la consecución de estos objetivos ya están en fase muy adelantada las siguientes actuaciones:

Fig. 3. Balsa de Lebrija.
Vista general.



1. Revegetación del margen de la Balsa para la generación de un ambiente hidrófilo que permita el refugio y nidificación de avifauna ligada al medio acuático.
2. Plantación de especies arbóreas autóctonas y diversificación con bosquetes de especies arbustivas.
3. Control de la erosión en los taludes de arroyos y caminos.
4. Aporte de tierra vegetal seleccionada, hidrosiembras, y protección de suelos con manta orgánica semillada.
5. Instalación de islas flotantes y nidales de cigüeña blanca para la mejora de los hábitats de la avifauna. (Fig. 4)
6. Instalación de observatorios de aves.
7. Integración paisajística del área de recepción y control.

4. DISEÑO DE LOS DIQUES

Para la ejecución de la Balsa se ha aprovechado una depresión natural de escasa altura y gran superficie, que permite almacenar casi 8 hm³ de agua mediante el cierre en cuatro puntos con diques de materiales sueltos de planta recta, cota de coronación 10,50 m.s.m., y cuyas dimensiones se encuentran recogidas en la tabla 1. Un esquema de la planta de la balsa, diques y obras auxiliares puede verse en la fig. 6.

En lo que se refiere a la tipología de los diques (Fig. 7), en proyecto se habían previsto de sección homogénea con taludes inclinados 3,5 (H): 1(V) aguas arriba y 3,0 (H): 1(V) aguas abajo. En ambos taludes a la cota 6,0 (dique nº 1 y nº 3) se diseñaron sendas bermas de 2,50 m de anchu-

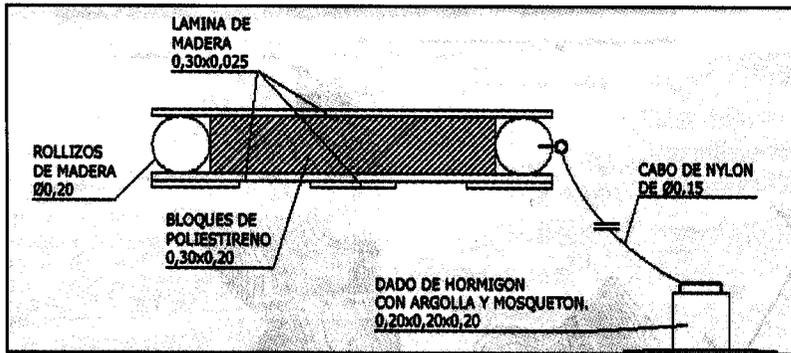


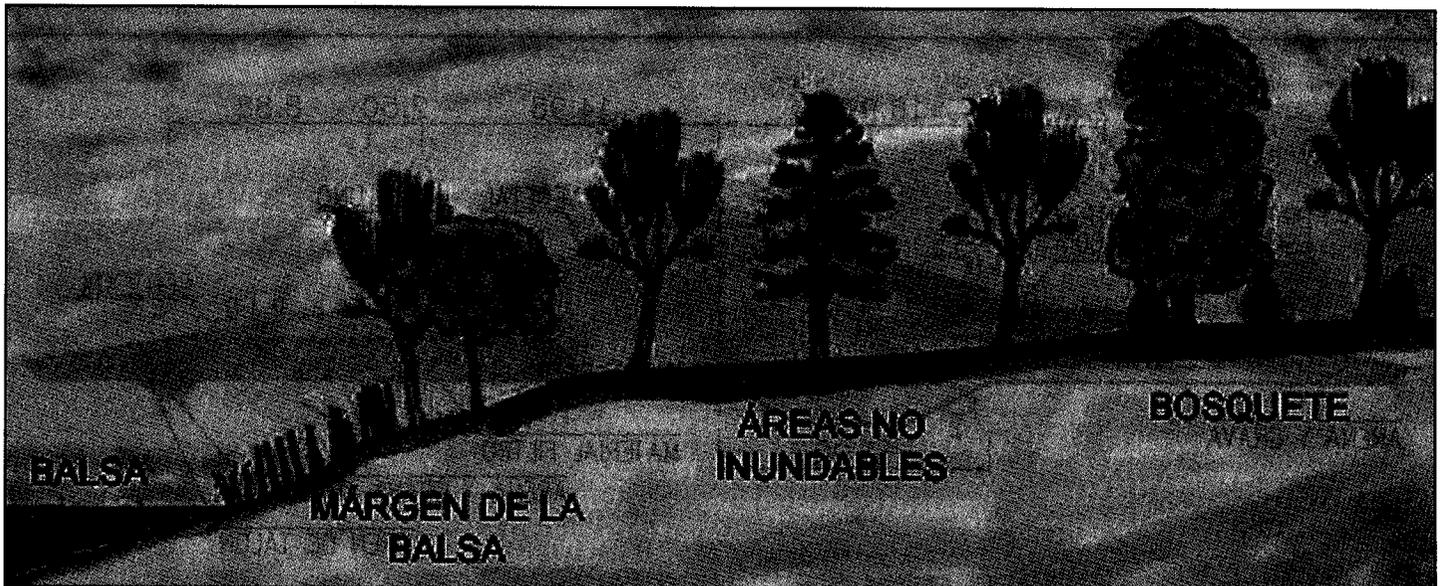
Fig. 4. Balsa de Lebrija. Isla flotante.

ra, a partir de las cuales el talud era 6,0 (H): 1 (V), con un cimiento mínimo de 2,5 m.

Antes del inicio de las obras, el Director de las mismas, procedió a realizar un reconocimiento de los futuros cimientos de los Diques y comprobó que el terreno sobre el que se estaba construyendo presentaba unas características geotécnicas bastante peores que las contempladas en el proyecto adjudicado: módulos de deformación muy bajos y reducida resistencia al corte, aspectos ambos que incidían en el desarrollo de unos importantes asentamientos constructivos, en una posible insuficiente inclinación de los taludes diseñados y en una inadecuada velocidad a la que podían construirse los diques. Por estos motivos, y mientras se re-estudiaban éstos, se adoptaron las siguientes medidas en los denominados 1 y 3, los de mayor altura:

- Fijar los ritmos máximos de construcción para permitir el asiento y drenaje de los cimientos
- Colocar un dren chimenea inclinado hacia aguas arriba de 2 m de anchura enlazado con el manto drenante

Fig. 5. Balsa de Lebrija. Restauración de márgenes.



	Altura (1) (m)	L coronación (m)
Dique nº 1	10,5	388
Dique nº 2	7,0	278
Dique nº 3	8,6	337
Dique nº 4	2,5	165

(1) Sobre el punto más bajo de la superficie general de cimientos

- Reforzar la parte inferior del dique 1 mediante la instalación de un geotextil Stablenka 1000 de 8333 KN/m de rigidez,
- Instalar en la cimentación de los diques 1 y 3 mechas drenantes de 13 m. de profundidad, separados 1,25 m entre sí y dispuestos en una malla triangular, con objeto de acelerar su consolidación, ya que de otra forma ésta tendría lugar de manera excesivamente lenta.

Al alcanzar el Dique nº 1, el de mayor altura, la cota 3 aproximadamente, se comprobó la importancia de los asentamientos y se planteó la necesidad de realizar una nueva campaña de ensayos "in situ", con objeto de caracterizar geotécnicamente las propiedades de los terrenos de marisma sobre los que se asentarían los diques.

5. ENTORNO GEOLÓGICO

La Balsa se sitúa en la gran depresión de la cuenca del Guadalquivir. En líneas generales se dice que esta la constituyen depósitos marinos de edad neógena, parcialmente

Fig. 6. Balsa de Lebrija. Planta general.

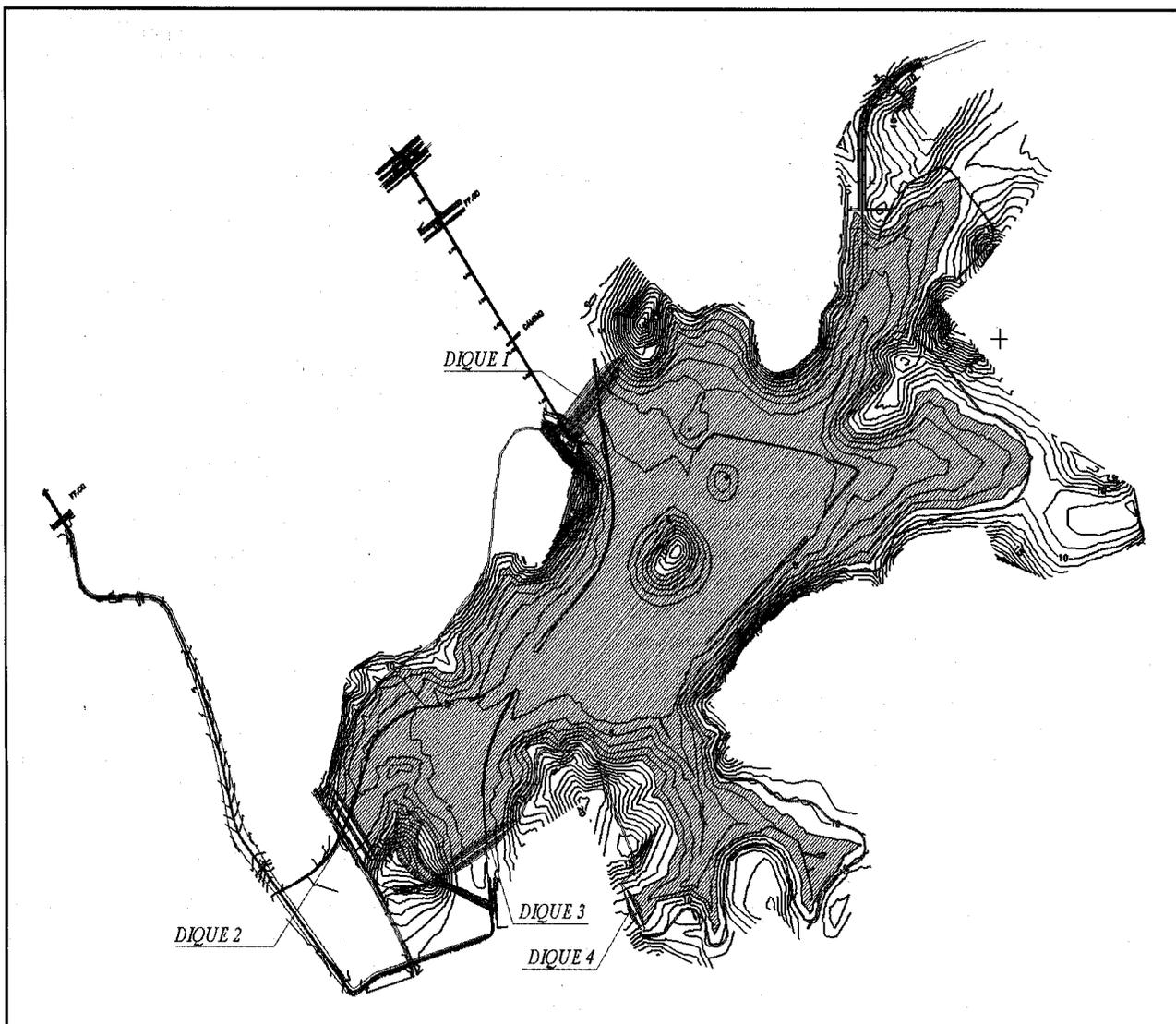
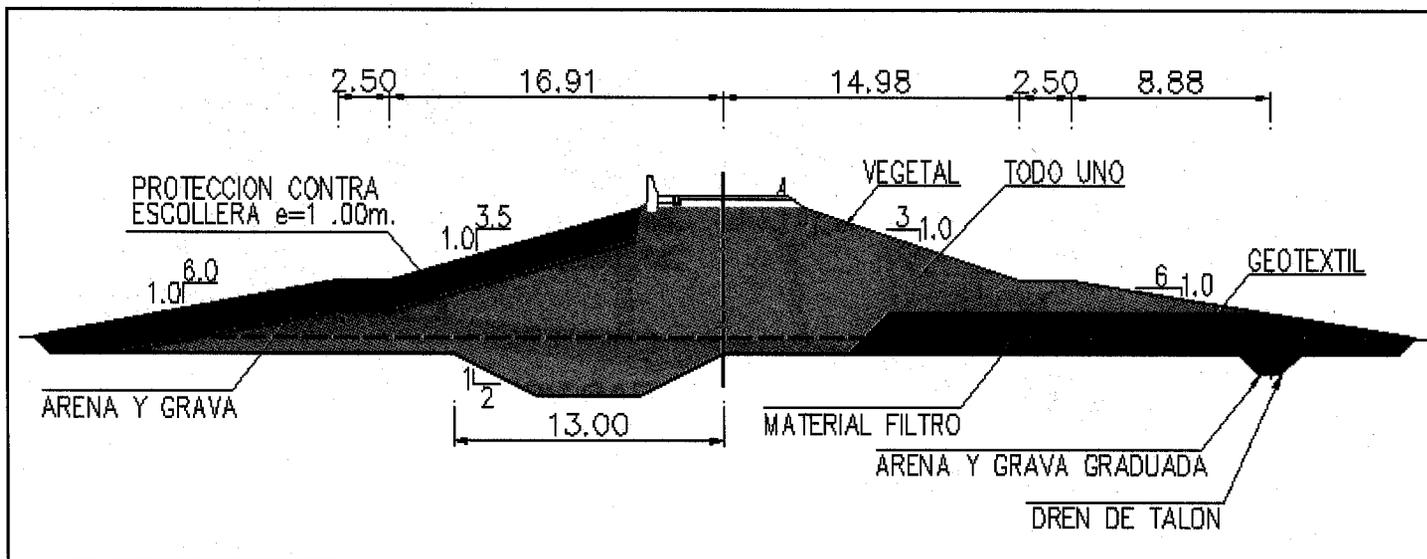


Fig. 7. Balsa de Lebrija. Sección de proyecto.



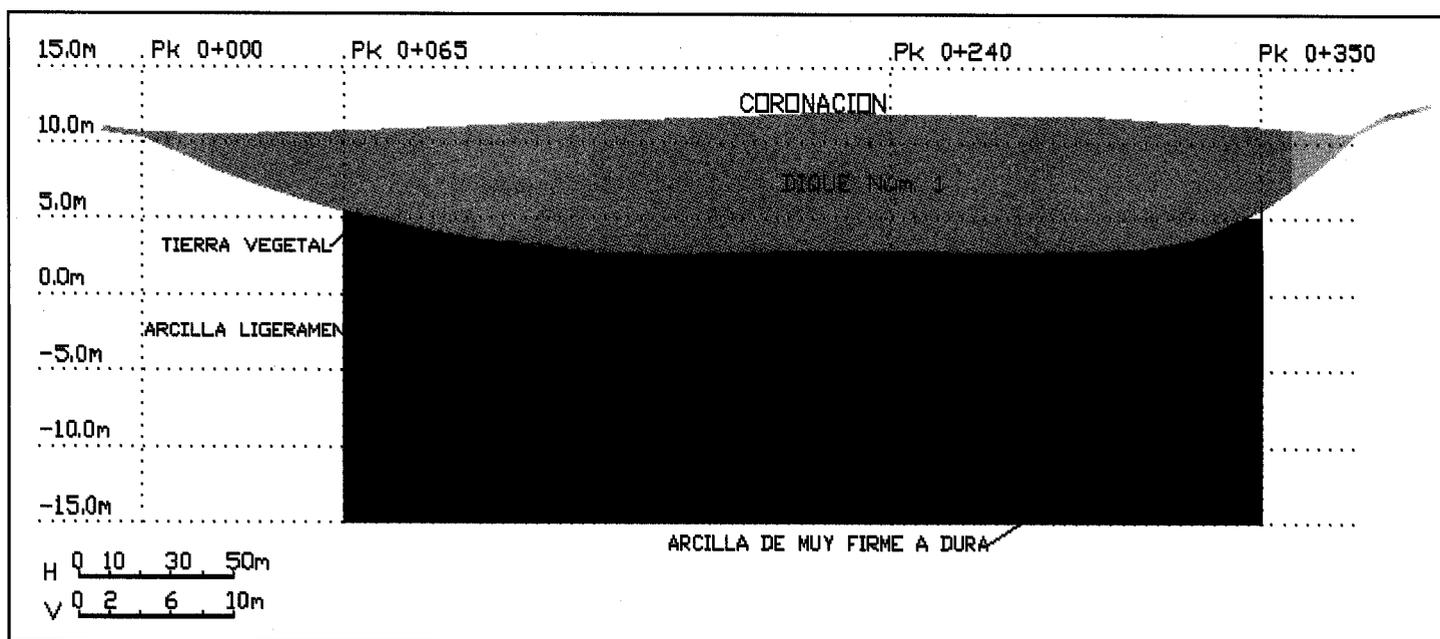


Fig. 8. Balsa de Lebrija. Cimientos Dique 1.

arrasados y/o cubiertos por sedimentos de origen continental pliocenos, o cuaternarios.

En las zonas podemos distinguir dos grandes grupos estratigráficos: sedimentos alóctonos y sedimentos autóctonos. Dentro de los primeros de gran representación en el área de la Balsa se encuentran las margas grises y blancas con niveles arenosos; esta formación descansa sobre los niveles arenosos de Paleógeno o sobre la masa marga-yesífera del Trías. Debe considerarse que la formación margosa es de carácter eminentemente arcilloso y de alta plasticidad en el área que nos ocupa. Con respecto a los sedimentos autóctonos el material dominante corresponde a las arcillas margosas gris azuladas (Mioceno-Superior-Plioceno) con potencia desconocida pero muy irregular. Está formada por suelos arcillosos o limosos con plasticidad considerable a elevada y quedan cubiertos por sedimentos cuaternarios generalmente de marisma en la zona que nos ocupa, en los cuales se han determinado potencias del orden de 15 metros en la cerrada del Dique 1. Estos sedimentos de marismas son altamente compresibles y con nivel freático prácticamente superficial

6. CIMENTACIÓN DE LOS DIQUES

Está formada por unos suelos de marisma limosos y arcillosos de elevada plasticidad (LL variable entre 65 y 75 e IP entre 30 y 40), a los que cabe calificar, además, geotécnicamente hablando, de blandos, tal y como ponen de manifiesto:

a) Los bajos golpes registrados en los ensayos S.P.T. realizados en el interior de los sondeos efectuados en la

campana de investigación llevada a cabo en el momento de la redacción del proyecto (de 0 a 5 golpes),
 b) Los valores de los índices Cc (entre 0,17 y 0,23) y los bajos módulos de deformación encontrados.
 c) Las reducidas resistencias al corte "no drenadas" registradas tanto en la antigua como en la nueva campaña de ensayos de campo realizada, que con carácter general son del orden de 20-25 kPa, aunque aparecen localmente valores tan bajos como 10 kPa.

En lo que se refiere a ensayos de campo, se han efectuado en los diques 1 y 3, los de mayor altura, un número adecuado de ensayos con piezoconos, ensayos con molinetes y ensayos con el dilatómetro de Marchetti. Como resultado del análisis de todos ellos, y teniendo en cuenta los sondeos y ensayos existentes en el proyecto original, se definieron nuevos perfiles geotécnicos (Fig. 8).

A partir de esos nuevos perfiles se calcularon por diferentes métodos los asentamientos post-constructivos previstos, resultando ser los siguientes

Dique nº 1 = 1,29 m
 Dique nº 2 = 0,44 m
 Dique nº 3 = 0,62 m

7. NUEVO DISEÑO DE LOS DIQUES. PROCESO DE EJECUCIÓN

Con los perfiles geotécnicos anteriores se han efectuado dos series de cálculos. Una primera de cálculos de estabilidad mediante el clásico análisis del equilibrio límite (Bishop

Fig. 9. Balsa de Lebrija. Simulaciones Cálculo de estabilidad.



Modificado), y una segunda en la que se aplicaba el método de los elementos finitos (Programa Plaxis) (Fig. 9).

Se ha tenido en cuenta, además, la recomendación establecida por el Bureau of Reclamation (1987) en relación a la estabilidad de presas a construir sobre terrenos blandos, de manera que los cálculos se han realizado en la situación de final de construcción suponiendo que no hay drenaje, es decir, disipación de las presiones intersticiales (corto plazo), requiriéndose que el coeficiente de seguridad mínimo a alcanzar fuese de 1,5. Indica este organismo que esta situa-

ción de cálculo es mucho más severa que las correspondientes a embalse lleno o desembalse rápido.

A la vista de los resultados que se iban obteniendo en los cálculos efectuados en los diques 1 y 3, se fueron decidiendo las modificaciones a realizar con respecto a lo inicialmente previsto, que finalmente fueron (Fig. 10):

- a) Crear zonas de transición en las zonas tratadas con drenes verticales (con menor densidad de tratamiento o con menor profundidad), tanto longitudinal como trans-

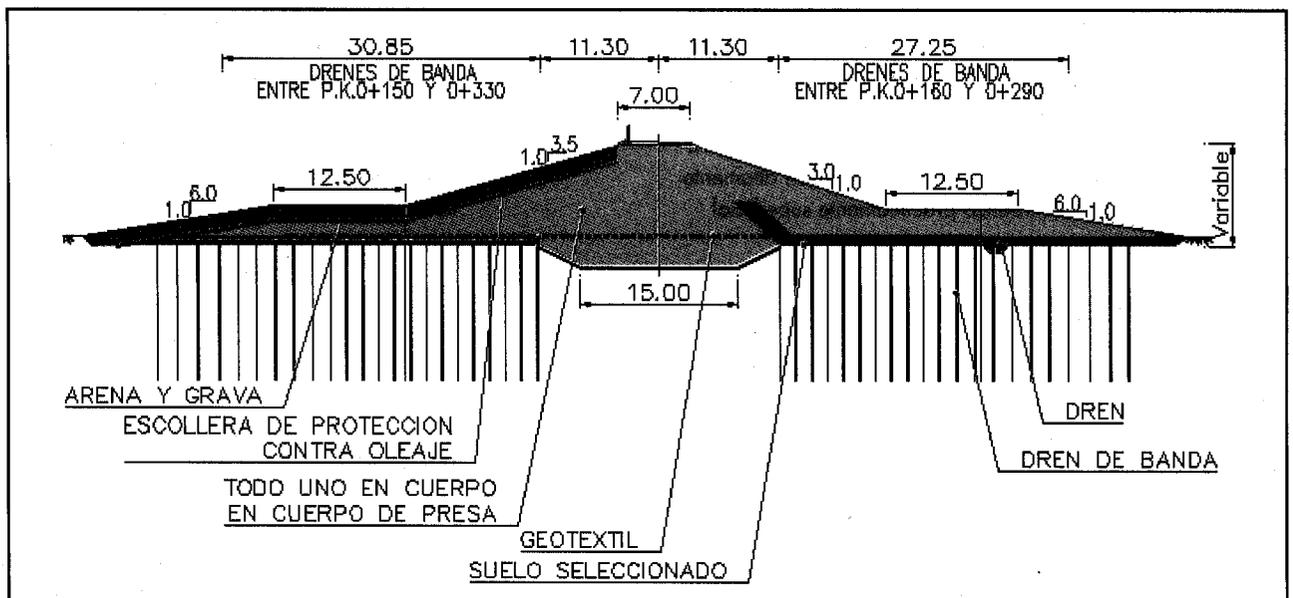


Fig. 10. Balsa de Lebrija. Sección tipo Dique 1.



Fig. 11. Balsa de Lebrija. Vista del Dique 1.

versalmente al eje de los diques, para evitar la posible formación de grietas por asientos diferenciales.

b) Dejar bermas en los taludes de aguas arriba y aguas abajo a la cota 6 con una anchura en el dique 1 de 12,5 m.

c) Establecer un conjunto de elementos de control no contemplados en el Proyecto Original (Inclinómetros, Piezómetros de cuerda vibrante y placas de asiento).

En lo que se refiere al proceso constructivo de los diques, un aspecto básico para la programación del mismo ha sido el tener en cuenta la elevada pluviometría de la zona entre los meses de Octubre y Mayo, lo cual dificultaba enormemente la puesta en obra de unos materiales –los mismos que conforman la cimentación– ya de por sí bastante húmedos. El material se ha venido colocando con unas humedades (2) de entre el 25-30%, alcanzándose tras el proceso de compactación unas densidades secas entorno a 13,5 KN/m³.

Con el fin de absorber los importantes asientos que previsiblemente se produzcan, se diseñaron los diques con una contraflecha del mismo valor que el desplazamiento calculado, diseñando elementos flexibles en la coronación.

El ritmo máximo de colocación se determinó efectuando un estudio numérico muy completo empleando el programa PLAXIS De acuerdo con los resultados del análisis efectuado se propuso que los diques se construyesen de la siguiente forma:

(2) Se admitía un intervalo de humedades de compactación desde el -2% al +5% de la óptima Proctor. Creemos que hasta el +6% hubiera sido adecuado.

- hasta 2 m por encima del nivel del terreno natural, colocando una capa de material de 20 cm de espesor cada 3 días, y
- desde 2 m hasta la coronación de los diques colocando una capa de 20 cm cada 2 días.

8. INSTRUMENTACIÓN

Con el fin de estudiar tanto el comportamiento del terreno como el de los diques a lo largo del tiempo y, para verificar que ambos lo hacen de forma semejante a la prevista en los modelos de cálculo, cuatro han sido los elementos de auscultación instalados:

- Placas de asiento en la cimentación o en el cuerpo de dique en zona próxima a ella
- Histosfeno de nivelación en la coronación
- Piezómetros de cuerda vibrante tanto en cuerpo de diques como en el terreno,
- Inclinómetros para detectar movimientos horizontales en el interior del cuerpo de los diques y en el terreno.

Un ejemplo de la distribución de estos elementos en el interior del Dique 1, en el perfil 0+240, en el que se detectó el mayor espesor de materiales blandos, se muestra en la fig. 12.

9. COMPORTAMIENTO

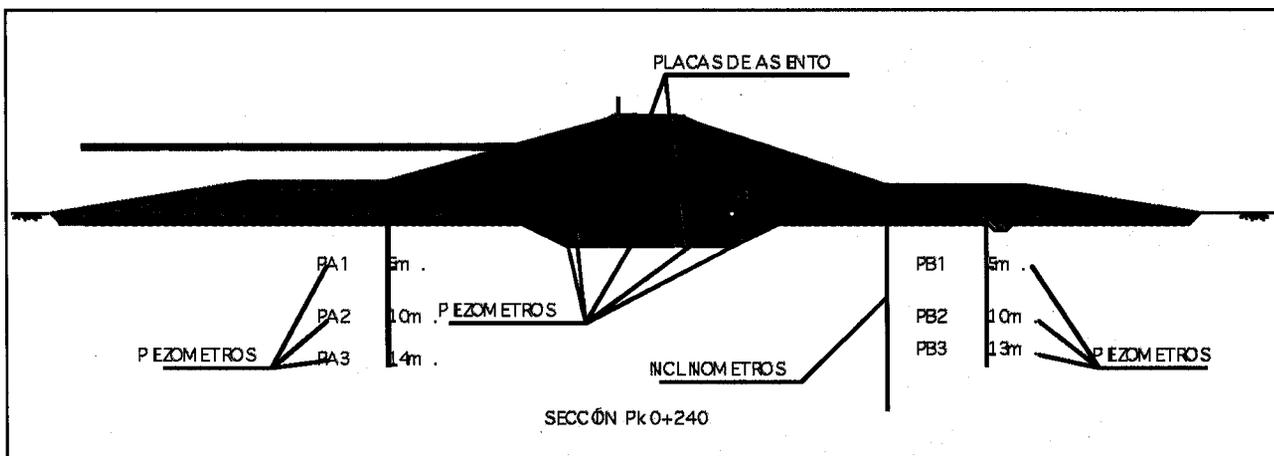
Finalizada la construcción de los diques (finales de junio de 2002), y previamente al llenado de la balsa, tal y como preceptúa el vigente Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses en su artículo 28, se definió un plan de puesta en carga que incluía los umbrales de todas y cada una de las variables de control de comportamiento de los diques: asientos, movimientos horizontales, presiones intersticiales en el cuerpo de los diques y en el cimiento, etc.

Se comenzó a llenar la balsa de forma más o menos continua hasta la cota 7 con un ritmo de variación diario

TABLA 2.			
	PLACAS DE ASIENTO	PIEZOMETROS	INCLINÓMETRO
Dique nº 1	8	18 ^(*)	5
Dique nº 2	2	0	0
Dique nº 3	6	2	2
Dique nº 4	0	0	0

(*) Dos son las columnas piezométricas con tres lecturas.

Fig. 12. Balsa de Lebrija. Dique 1 Instrumentación.



máximo del nivel del embalse de 7.5 cm hasta la cota 6 y de 3 cm hasta la 7.

En la fig. 13 se muestra la evolución de los asientos de la sección 0+240 del dique 1, 2.5 m por encima de su nivel de cimentación, a medida que avanza su construcción y progresa el llenado de la balsa. Se comprueba que hay una correlación directa entre la velocidad de aplicación de la carga y la velocidad de los asientos. El periodo de tiempo comprendido entre finales de diciembre de 2001 y Mayo de 2002 corresponde a la pa-

rada de la obra al entrar en período invernal y una vez alcanzada prácticamente la cota de coronación del Dique, que se remataría la primavera siguiente, y sobre el mismo se construye el camino de coronación. Los asientos han llegado a ser un 7% de la altura, cifra elevada pero coherente, sin embargo, con las características blandas del cimient. Pueden citarse a este respecto los valores alcanzados en la presa de Shellmouth (10%), Santa Helena (8.5%), Fresno (10%), o La Esperanza (5%). En presas situadas sobre cimientos competentes

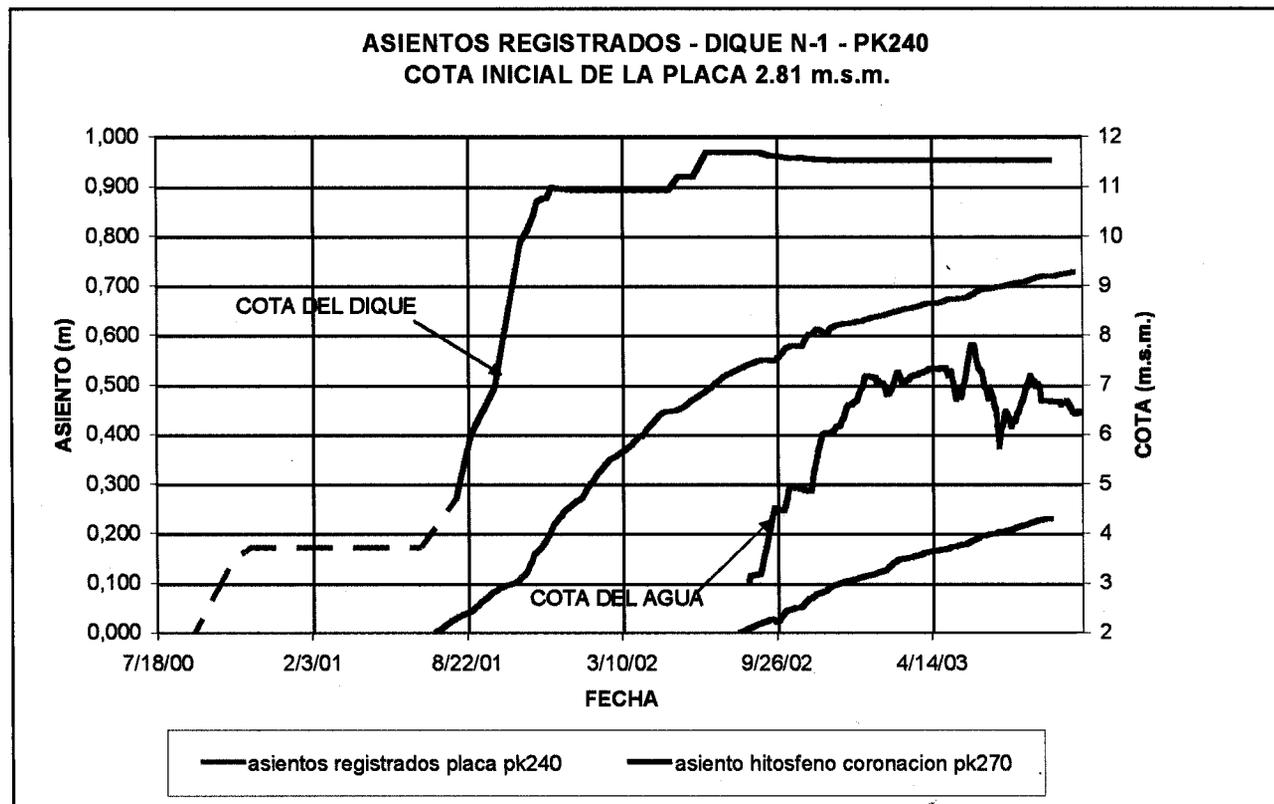


Fig. 13. Balsa de Lebrija. Dique 1. Evolución de asiento.

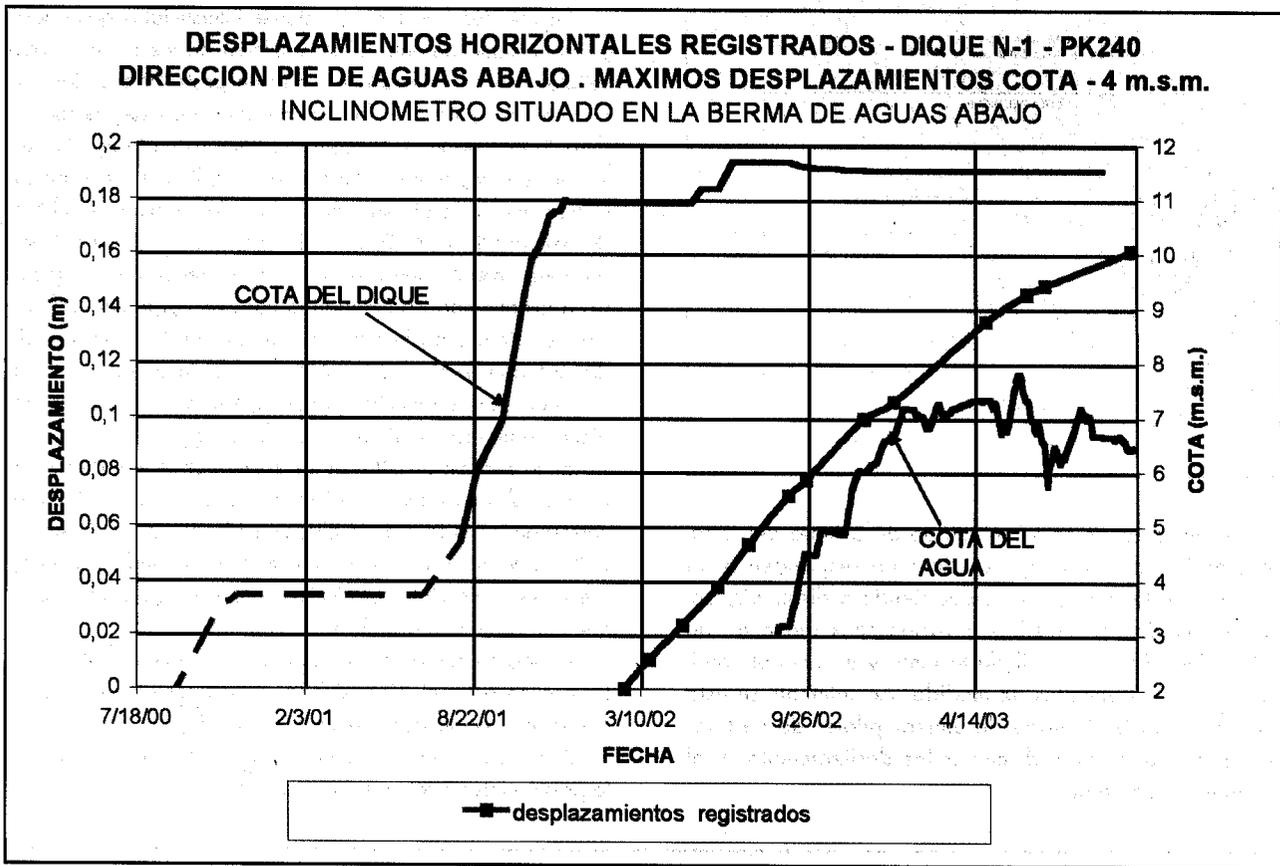


Fig. 14. Balsa de Lebríja. Dique 1. Evolución del desplazamiento lateral.

son normales valores entre el 0,1% y el 1% de la altura, cayendo en el intervalo del 0,1% al 0,5% en la mayor parte de los casos.

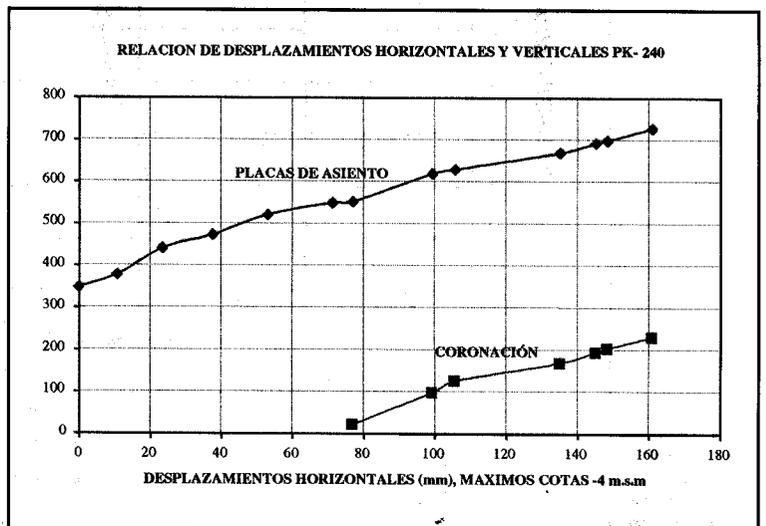
Igualmente, la fig. 14 muestra de qué forma evolucionan los desplazamientos horizontales de la cimentación del dique 1, aguas abajo, bajo la berma, en el inclinómetro de la fig. 12.

Si comparamos los movimientos horizontales que se producen en la coronación y en la placa de asiento del PK 0+240 con los máximos deslizamientos que registra la sección (a unos 5 m. por debajo de la cimentación del Dique) obtenemos una relación prácticamente constante entre 0,35 y 0,40. (Fig. 15).

Con el fin de poder visualizar la velocidad o rapidez del asiento para diferentes momentos de construcción y llenado se representa en la fig. 16 adjunta su evolución en el tiempo. Para evitar la dispersión y uniformar las medidas en cada fecha se ha tomado como velocidad de asiento la media de los últimos cinco observados (aproximadamente la media mensual). La construcción del Dique 1 se terminó en junio del año 2002, aunque estaba prácticamente coronado en diciembre del año 2001, a falta de dos tongadas de material y las capas del camino de coronación. La velocidad de asiento durante la construcción es creciente, desacelerándose a

partir de diciembre de 2001. Al iniciarse el llenado del embalse y alcanzar la cota 4,5 m. aumenta esta hasta que alcanza la cota 6. Desde este punto vuelve a descender, creándose otra pequeña punta al alcanzar la cota 7,8 m. En este punto se procede gradualmente a un vaciado de la Balsa hasta la cota 6,6 m. volviendo a estabilizarse la velocidad de asentamiento.

Fig. 15. Balsa de Lebríja. Dique 1. Desplazamientos /Asientos.



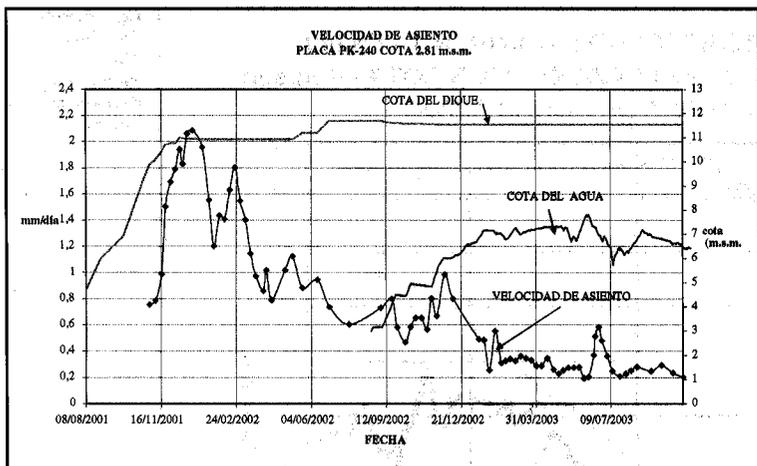


Fig. 16. Dique 1. Velocidad de asiento.

Las variaciones en la velocidad de asiento del terreno blando que constituye el cimiento responden a un proceso de fluencia (creep), que tiende a disminuir, pero que puede ser sensible a variaciones del nivel de Balsa. Ello obliga a un llenado lento y un control continuado de los elementos de medida. Actualmente se está estudiando la posibilidad de utilizar pilotes de perforación para controlar o disminuir los deslizamientos y el movimiento de creep.

En relación con las supresiones intersticiales generadas en el cimiento durante la construcción de los diques, cabe señalar que su desarrollo y evolución posterior eran los dos factores clave para examinar la estabilidad de los diques durante esa etapa. Tal y como se muestra en la fig. 17, en la que se recogen las lecturas correspondientes a dos piezómetros situados en la sección 0+240 del dique 1, en el fondo del rastrillo (cota 0; cota de coronación 11,50 m.), las presiones intersticiales medidas son, en general, muy inferiores a las que corresponderían al caso de carga sin drenaje. Con los drenes de banda funcionando las presiones medidas estarían entre el 30 y 47% de las sin drenaje calculadas, pero son, en muchos casos superiores a las correspondientes a una red de filtración establecida.

En la sección 0+240, en las zonas donde hay drenes de banda, las presiones intersticiales son superiores a las que corresponden a la red de filtración (desde un 4% hasta un 25%) en la mitad de los piezómetros, lo que indica que hay presiones intersticiales producidas por la carga del terraplén que aún no se han disipado.

Donde no hay drenes de banda, las presiones intersticiales oscilan entre el 70 y el 78% de las correspondientes a carga sin drenaje (con drenes funcionando).

Al descender el nivel del embalse disminuye, en general, la presión intersticial en los piezómetros. ■

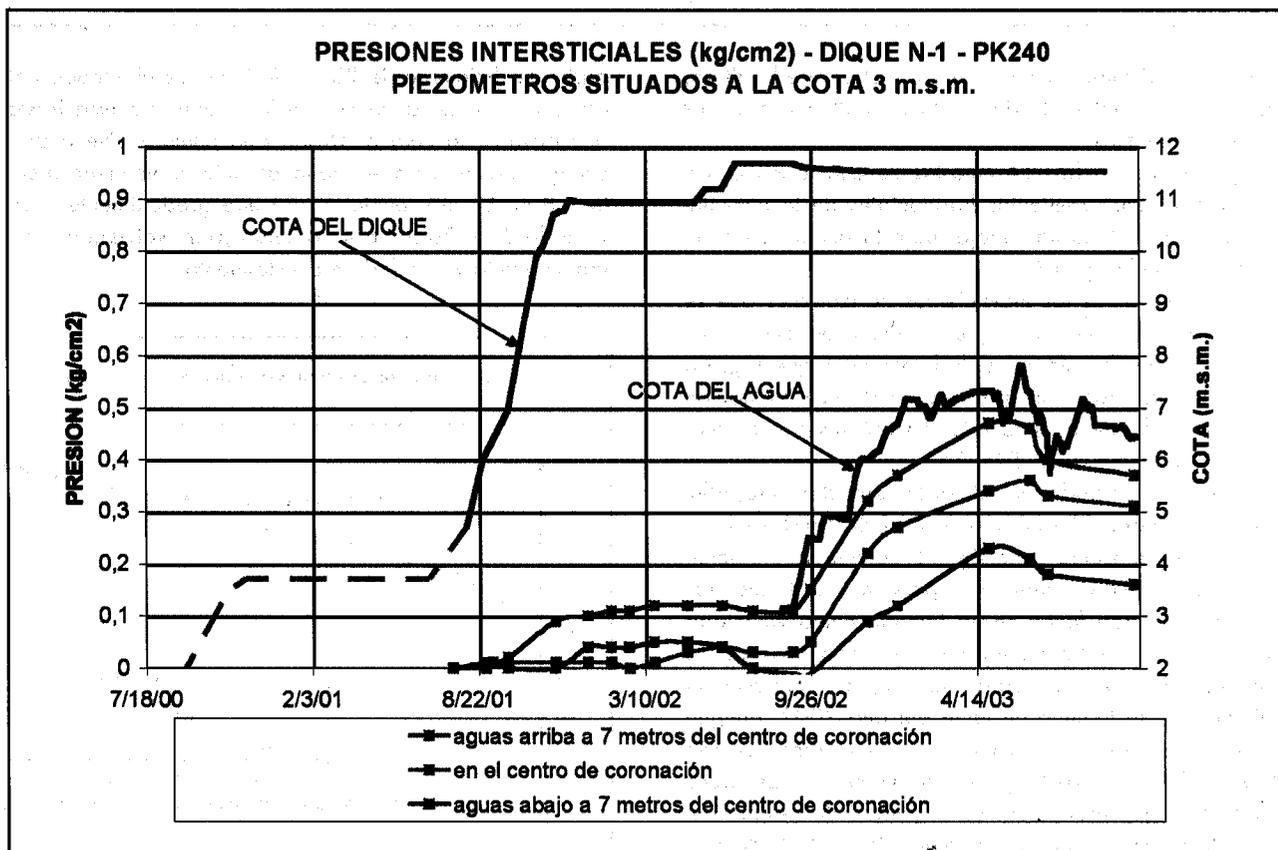


Fig. 17. Balsa de Lebrija. Dique 1. Presiones Intersticiales.