

# OBRAS DE TIERRA DEL SALTO DE CASTREJON

Dr. Ing. C. C. P. L. FEDRIANI

Dr. Ing. C. C. P. E. M. - BARON

## DESCRIPCION GENERAL DEL APROVECHAMIENTO

El salto de Castrejón está situado a unos 30 kilómetros de Toledo, en el curso medio del río Tajo, y constituye un complejo hidroeléctrico clásico en los ríos de cierta importancia en su transcurso por las zonas llanas. La Empresa propietaria del aprovechamiento es Unión Eléctrica Madrileña, S. A., que encargó la redacción del proyecto y la realización de los planos de construcción a la Empresa consultora E.P.T.I.S.A.

La presa de derivación está integrada por la obra del aliviadero sobre el cauce, capaz para las máximas avenidas previsibles del río Tajo en este punto, y por un prolongado espigón de tierra de poca altura, que da lugar a un pequeño embalse, cuyo nivel de explotación es prácticamente constante.

La toma y el canal de derivación, si bien podemos considerarlos de envergadura muy superiores a la media, son, por otro lado, de tipo igualmente convencional y análogos a otros de dimensiones parecidas, tales como los correspondientes a los saltos de Jouques y Saint Estève, en la Basse Durance, que han sido proyectados y construidos casi simultáneamente al salto de Castrejón.

Al extremo de la conducción rodada se encuentra la cámara de carga, auténtica presa de hormigón, cuya altura máxima desde cimientos a coronación es de unos 23 m. Se ha dispuesto una conducción forzada para cada uno de los cuatro grupos instalados que, como corresponde a este tipo de salto con un caudal máximo de 280 m<sup>3</sup>/s. y unos 30 m. de altura, están constituidos por unidades de eje vertical con turbinas tipo Kaplan.

Las características generales del salto, así como los esquemas de cada uno de los principales elementos integrantes del mismo, están recogidos, en la figura 1.<sup>a</sup>, y únicamente vamos a ceñirnos en esta exposición a algunos de los puntos que consideramos de cierta peculiaridad en relación con las presas y el canal.

## CONDUCCION: CANAL Y PRESAS EN TIERRAS

Por las dificultades que ha supuesto, tanto de proyecto como de ejecución de obra, es el canal lo que imprime carácter al salto, con casi 20 Km. de longitud, dos

presas intermedias y con anchuras de 58, 62 y 42 m. a lo largo de sus tres tramos. El movimiento de tierras ha sobrepasado los 8,5 millones de m.<sup>3</sup>, lo que da lugar a que se pudieran considerar sus tramos de cajero en terraplén como auténticas largas presas de tierra de poca altura.

Los materiales disponibles en la falla del río Tajo con cobertura miocena, en que se ubica la obra, permitieron pensar, después de los reconocimientos previos, en construir un canal de tierras, al tener arenas y gravas en los depósitos cuaternarios, por un lado, y arena arcillosa terciaria de calidad adecuada, por otro, para obtener tanto espaldones resistentes como la necesaria impermeabilidad con soluciones económicas. Además, los áridos que se hubieran necesitado para una solución convencional con revestimiento de hormigón no abundaban en las cantidades y calidades que hubieran hecho económica su utilización en gran escala.

En cuanto al aspecto hidráulico de la conducción se refiere, después de varios tanteos se llegó a la solución de proyectar un canal con cajeros horizontales y regulación en cola, con nivel constante en el extremo de aguas arriba.

Para los diversos caudales derivados en régimen permanente las configuraciones superficiales van desde la horizontal para  $Q = 0$ , hasta la línea paralela a la solera (en regímenes retardados y uniformes) y desde ésta a la curva de remanso correspondiente a  $Q = Q$  máximo (regímenes acelerados).

Fue necesario estudiar los regímenes variables con gran minuciosidad, preparando un programa de cálculo electrónico para resolver el correspondiente sistema de ecuaciones diferenciales, con las diferentes condiciones de borde que suponen las múltiples hipótesis de variación en el caudal turbinado. Y esto por dos razones principales: en primer lugar, por dotar a los cajeros del resguardo necesario ante una disminución o anulación brusca del caudal, proyectando si hubiera sido preciso, el aliviadero correspondiente para evitar la producción de la onda positiva remontando el canal. En segundo término, para estudiar la posibilidad de dar puntas y obtener la duración posible de los períodos de caudal superior al máximo a

derivar del río sin sobrepasar las velocidades admisibles en cada tramo.

En relación con este último aspecto, surgió la conveniencia de incorporar al volumen de aguas disponible en el propio canal, la capacidad útil por encima de la solera del mismo de dos embalses intermedios en sendos barrancos, que se consiguen sin más que cerrarlos con el cajero del canal del lado río, suprimiendo el otro. Con ello, aparte de la ventaja apuntada de reserva hidráulica para energía de puntas, se economizaba, aproximadamente, la mitad del volumen de tierras que suponía atravesar el barranco con el canal en terraplén constituyendo un doble trapecio con altura máxima de 28 m. desde el fondo del barranco. La única contribución era la pérdida práctica de cota correspondiente a la energía cinética en la conducción rodada, pero dicha pérdida resultaba despreciable por la razón obvia de que, en un canal en tierras, la velocidad debe ser muy pequeña (del orden de 1 m/s.) para evitar que se produzca erosión en solera y cajeros.

También del estudio del régimen variado y de la repercusión aguas arriba de las oscilaciones de la cámara de carga, se dedujo la conveniencia de proyectar un tramo de 2 km. del canal, revestido de hormigón, lo que permitió una mayor pendiente y menor sección que en el resto.

Como resultado de todo ello, se marcan a lo largo de la conducción tres tramos diferenciados: el primero entre la toma de agua y el embalse de Cañares; el segundo entre éste y el de El Carpio, ambos con sección en tierras revestidas de arena arcillosa compactada; y el tercero, entre el embalse de El Carpio y la cámara de carga con sección revestida de hormigón.

En las figuras 2.<sup>a</sup>, 3.<sup>a</sup> y 4.<sup>a</sup> se muestran las principales características y dimensiones del espigón de la presa de derivación y de las presas de Cañares y de El Carpio. Puede observarse cómo, casi con carácter general, se ha confiado en todos los elementos del salto la impermeabilidad necesaria a la arena arcillosa terciaria en estado natural o en núcleos y revestimientos compactados. También en el canal, las secciones que no están excavadas en ese material, y las que están en terraplén, se impermeabilizan con un revestimiento grueso compactado. Las presas que cierran los barrancos se han resuelto a base de un cuerpo de presa en material todo uno y un espaldón, de espesor variable con la altura, construido con arena-arcillosa compactada. En la presa de derivación, por estar ubicada sobre manto permeable de gran espesor situado bajo el nivel de aguas medias del río, se llegó a la solución de establecer la continuidad del núcleo en arena arcillosa compactada hasta el estrato impermeable mediante la hinca de una pantalla de tablastacas.

Es curioso observar cómo en una misma obra ha sido necesario cambiar la tipología de cada una de las tres presas para conseguir aprovechar y adaptarse mejor a las características de los materiales disponibles en las cercanías.

Aunque las presas intermedias de Cañares y El Carpio son muy parecidas, en esta última fue necesario disponer una capa permeable detrás del espaldón de arena arcillosa, ya que no había tierra abundante para construir el cuerpo de presa con un coeficiente de Darcy suficientemente bajo. De esta forma, con un volumen de arena relativamente reducido, traído de unos 2 km., se pudo hacer una presa de sección prácticamente homogénea, aprovechando la arena arcillosa existente en el lugar de la presa. Naturalmente las condiciones impuestas en la colocación del espaldón impermeable eran mucho más duras que las del resto, y por ello el coste de la compactación del cuerpo de presa resultó bastante menor que el del espaldón.

#### ESTUDIOS DE SUELOS.

El plan de ensayos, tanto para la concepción como para la ejecución y control de obra, especialmente en lo concerniente al aspecto peculiar de obtener la impermeabilidad necesaria a base de un revestimiento grueso de arena arcillosa compactada, y a la importante mecanización precisa para realizar en forma económica los trabajos masivos de excavación, transporte y compactación que constituirían la base de la obra, se realizó muy cuidadosamente y con el asesoramiento de los profesores Haefeli y Schaerer.

Los estudios e investigaciones geotécnicas, permitieron un conocimiento suficiente de la constitución y características fundamentales de los diferentes suelos y materiales.

En la zona de la presa y toma de agua, el terreno compacto lo forman arenas limoarcillosas del mioceno continental, posiblemente tortonienses.

Las curvas granulométricas de los ensayos indican la existencia de una gran variedad con un 50 por 100 de elementos superior al diámetro 0,10-0,40 mm. y del 1 al 4 por 100 de contenido de arcilla. Los índices de plasticidad oscilan entre 10 y 20 y son suelos muy compactos, con elementos poco rodados, a veces con aspecto de un granito descompuesto *in situ*, variando su coloración del verde azulado, al gris y rojo, tonos que por meteorización pasan a amarillos y pardoamarillos.

Sobre las arenas limoarcillosas compactas descansan los depósitos fluviales formados por gravas, en unos casos; gravas, gravillas y arenas en otros; simplemente por arenas y, ocasionalmente, por limos fangosos.

Estos acarreo se presentan con una compactación natural, a veces sucios, con débil proporción de elementos finos, y en ocasiones limpios y lavados, con predominio de los elementos silíceos, igualmente rodados.

Constituyen buenos áridos para la fabricación del hormigón, aunque, por zonas, a veces escasos de elementos gruesos. Su ángulo de rozamiento es de 25 a 35°, y en ellos puede contarse con poca o ninguna cohesión.

Después de esta primera zona el canal transcurre por

# SALTO DE CASTREJON CASTREJON DEVELOPMENT

## CARACTERISTICAS GENERALES

Superficie de la cuenca afluente .....	24,900 km <sup>2</sup> .
Altitud media de la cuenca...	750,00 m.
Caudal medio anual .....	109,30 m <sup>3</sup> /s.
Caudal de estiaje .....	38,00 m <sup>3</sup> /s.
Máxima avenida prevista ....	5:100,00 m <sup>3</sup> /s.
Capacidad total del embalse.	41 Hm <sup>3</sup> .
Nivel normal del embalse ...	425,00 m.
Nivel en el canal de descarga .....	393,70 — 392,25 m.
Salto neto máximo (Q = 70 m <sup>3</sup> /s) .....	32,59 m.
Salto neto mínimo (Q = 280 m <sup>3</sup> /s) .....	29,45 m.
Caudal de equipo: 4 x 70 m <sup>3</sup> /s .....	280,00 m <sup>3</sup> /s.
Potencia instalada: 4 x 24 MVA .....	96 MVA.
Producción media anual .....	240 x 10 <sup>6</sup> kWh.

## PRESA DE DERIVACION

Espigón de tierras con núcleo de arcilla y pantalla de tablestacas.  
Aliviadero sobre perfil de gravedad, con seis vanos cerrados por compuertas Taintor de 15 x 9 metros y clapetas automáticas en los vanos extremos.  
Ataguía para un vano, constituida por cuatro elementos.  
Longitud del espigón de tierras: 1 336 m.  
Altura máx. del espigón de tierras: 16 m.  
Desagüe por el aliviadero: 5 100 m<sup>3</sup>/s.  
Volumen de hormigón: 37 500 m<sup>3</sup>.  
Movimiento de tierras: 590 000 m<sup>3</sup>.  
Pantalla de tablestacas: 4 500 m<sup>2</sup>.  
Acondicionamiento del cauce (movimiento de tierras) 111 000 m<sup>3</sup>.

## TOMA DE AGUA

Ancho del bocal, con ocho vanos entre pilas: 40 m.  
Reja gruesa, separación de pletinas a 20 cm.  
Dos vanos para compuertas vagón de 8,25 x 6,50 m.

## CAMARA DE CARGA Y CONDUCCION FORZADA

4 Tomas de 14 x 11 m., equipadas con rejillas de 10 centímetros de separación entre pletinas.  
4 Compuertas de 5,40 x 4 m. y una ataguía utilizable en cada uno de los vanos.  
4 Tuberías de palastro, reforzadas y revestidas de hormigón, de 55 m. de longitud y  $\phi$  5 m.

## CENTRAL Y SUBESTACION

4 Grupos de eje vertical a 214 r. p. m.  
4 Turbinas Kaplan de 27 100 CV.  
4 Alternadores de 24 MVA.  
Factor de potencia: 0,8.  
Tensión: 11 000 V.  
Frecuencia: 50 p. p. s.  
PD<sup>2</sup>: 1 100 tm<sup>2</sup>.  
4 Transformadores de 24 MVA. y 10,5/140  $\pm$  5 % kV.  
1 Autotransformador trifásico de 120/120/50 MVA. y 220/132  $\pm$  15 %/15 kV.  
3 Salidas (San Juan, Cijara y Añover), a 138 kV.  
2 Salidas (Malpica y Loeches), a 220 kV.

## GENERAL CHARACTERISTICS

Surface of drainage area .....	6.15 x 10 <sup>6</sup> acres.
Mean elevation of watershed.	2,460 feet.
Average annual flow .....	3,860 cu.ft./sec.
Dry season flow .....	1,340 cu.ft./sec.
Maximum expected flood .....	180,100 cu.ft./sec.
Overall capacity of reservoir.	14.5 x 10 <sup>9</sup> cu.ft.
Normal elevation of reservoir headwater .....	1,377.92 ft.
Discharge channel water surface elevation .....	1,291.62 — 1,286.86 ft.
Maximum net head (Q = 70 m <sup>3</sup> /s = 2,472 cu. ft./sec.) .....	106.93 ft.
Minimum net head (Q = 280 m <sup>3</sup> /s = 9,888 cu. ft./sec.) .....	96.62 ft.
Flow of plant units: 4 x 70 m <sup>3</sup> /s (4 x 2,472 cu. ft./sec) .....	9,888 cu.ft./sec.
Power of plant units: 4 x 24 MVA .....	96 MVA.
Average annual energy output.	240 x 10 <sup>6</sup> kWh.

## DIVERSION DAM

Earth wing dam with clay core and sheet piling cutoff.  
Spillway in gravity cross-section, with six spans closed by Taintor gates, 15 x 9 m. (49.2 x 29.5 ft.) and self-operating flap-gate at end spans.  
Plank for one span, consisting of four components.  
Length of earth wing dam: 1,336 m. (4,383.3 ft.).  
Max. height of wing dam: 16 m. (52.5 ft.).  
Spillway discharge: 5,100 m<sup>3</sup>/s. (180,100 cu.ft./sec.).  
Concrete volume: 37,500 m<sup>3</sup> (1.32 x 10<sup>6</sup> cu.ft.).  
Earthwork: 590,000 m<sup>3</sup> (20.8 x 10<sup>6</sup> cu.ft.).  
Sheet piling cutoff: 4,500 m<sup>2</sup> (5,382 sq.yd.).  
River bed carthwork: 111,000 m<sup>3</sup> (3,92 x 10<sup>6</sup> cu.ft.).

## WATER INTAKE

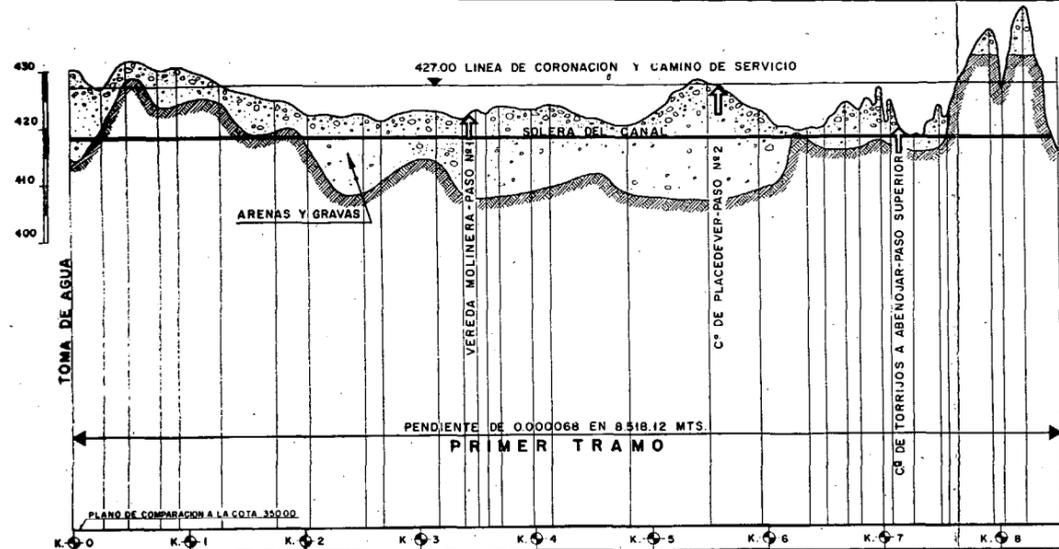
Forebay width, with eight spans between piers: 40 m. (131.23 ft.).  
Thick trashrack, flat bars — 20 cm. (8 in.) centers.  
Two spans for wagon gates, 8,25 x 6,50 m. (27 x 21.3 ft.).

## SURGE CHAMBER AND PRESSURE CONDUIT

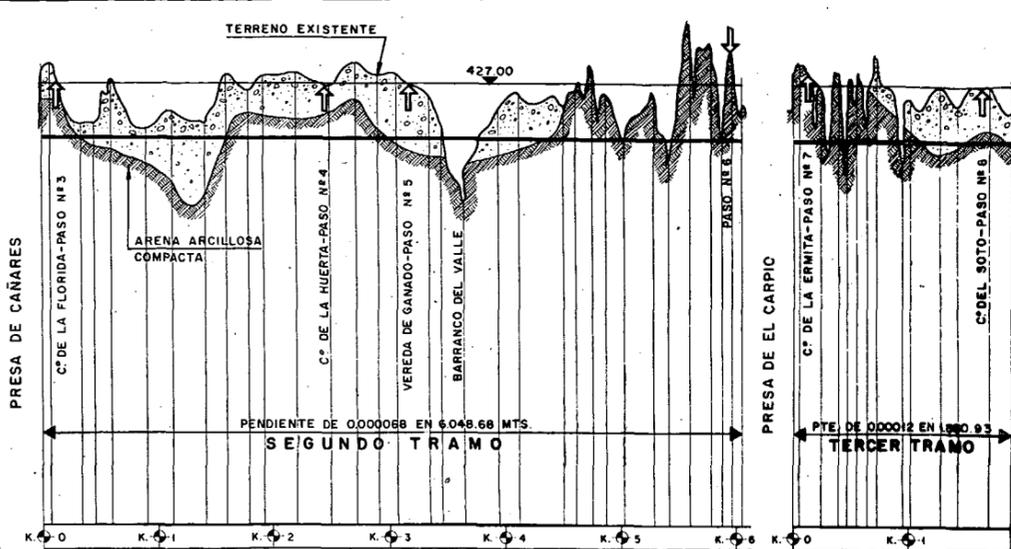
4 — 14 x 11 m. (45.9 x 36 ft.) intakes, provided with racks, flat bars 10 cm. (4 in.) centers.  
4 — 5.4 x 4 m. (17.7 x 13.1 ft.) gates, and one plank usable for each span.  
4 — Iron pipe-lines, reinforced and concrete lined, 55 m. (180.45 ft.) long, and  $\phi$  5 m. (16.4 ft.).

## POWER PLANT AND SUBSTATION

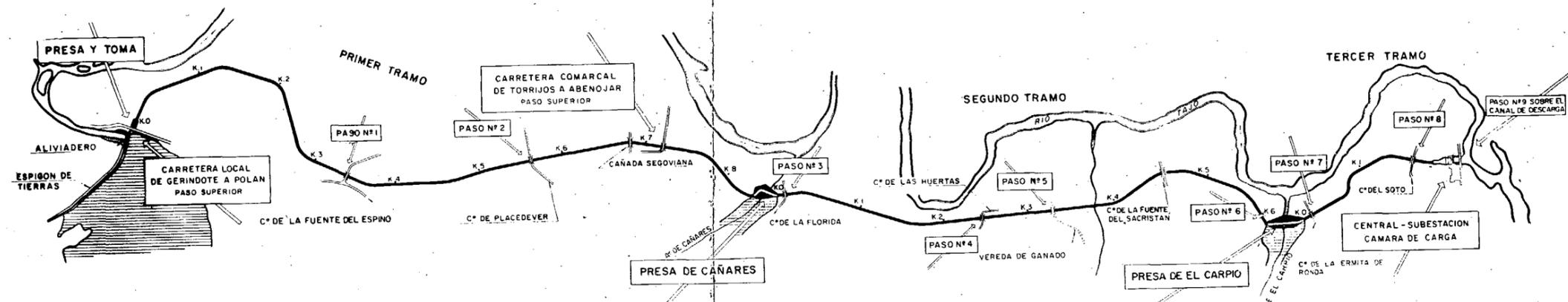
4 Vertical shaft generating units, 214 r.p.m.  
4 Kaplan turbines, 27,100 CV (26,200 HP).  
4 A.C. Generator, 24 MVA.  
Power factor: 0.8.  
Voltage: 11,000 V.  
Frequency: 50 p. p. s.  
PD<sup>2</sup>: 1,100 tm<sup>2</sup>.  
4 Transformers, 24 MVA, 10,5/140  $\pm$  5 % kV.  
1 Three-phase autotransformer, 120/120/50 MVA, 220/132  $\pm$  15 % kV.  
3 Outlets (San Juan, Cijara, and Añover), at 138 kV.  
2 Outlets (Malpica and Loeches), at 220 kV.



PERFIL LONGITUDINAL DEL CANAL



CANAL LONGITUDINAL PROFILE



PLANTA GENERAL DEL APROVECHAMIENTO

DEVELOPMENT LAY-OUT

## CANAL DE ALIMENTACION

3 tramos de 8,5—6,2—1,9 km. Los dos primeros en tierras con impermeabilización de arena arcillosa compactada, y el tercero revestido de hormigón; separados por dos embalses (Cañares, de 0,3 Hm<sup>3</sup>, y El Carpio, de 1,5 Hm<sup>3</sup>) cerrados por presas de tierras de 19 m. y 28 m. de altura.  
Secciones trapezoidales con taludes 2:1 en tierras y 1,75:1 en hormigón, cajeros horizontales a la cota 427 y anchuras máximas de 58—62—42 metros.  
Movimiento total de tierras: 8 850 000 m<sup>3</sup>.

## FEED CANAL

3 STRETCHES, 8.5—6.2—1.9 km. (5.3—3.9—1.2 miles). The two first stretches in earth, imperviousness achieved with compacted clayey sand, and a third stretch concrete lined; inserted, two reservoirs (Cañares, 0.3 Hm<sup>3</sup> = 10.59 x 10<sup>6</sup> cu.ft., and El Carpio, 1.5 Hm<sup>3</sup> = 52.97 x 10<sup>6</sup> cu.ft.) with earth dams 19 m. and 28 m. (62.3 and 91.9 ft.) high, respectively.  
Trapezoidal sections with 2:1 slope of sides, in earth, and 1.75:1 in concrete, with horizontal crest at 427 m. (1,401.9 ft.) elevation, and maximum widths of 58—62—42 m. (190.29—203.41—137.80 ft.).  
Total earthwork: 8,850,000 m<sup>3</sup> (312.5 x 10<sup>6</sup> cu.ft.).

1 Puente en la carretera comarcal de Torrijos a Abenojar.  
Volumen de hormigón: 1 150 m<sup>3</sup>.  
Longitud de la variante de carretera: 750 metros.  
1 Puente en la carretera comarcal de Gerindote a Polán.  
Volumen de hormigón: 1 250 m<sup>3</sup>.  
Longitud de la variante de carretera: 1 000 metros.

1 Bridge for district road from Torrijos to Abenojar.  
Concrete volume: 1,150 m<sup>3</sup> (40,600 cu.ft.).  
Length of changed road: 750 m. (2,460 ft.).  
1 Bridge for district road from Gerindote to Polán.  
Concrete volume: 1,250 m<sup>3</sup> (44,140 cu.ft.).  
Length of changed road: 1,000 m. (3,281 ft.).

## OBRAS AUXILIARES EN EL CANAL

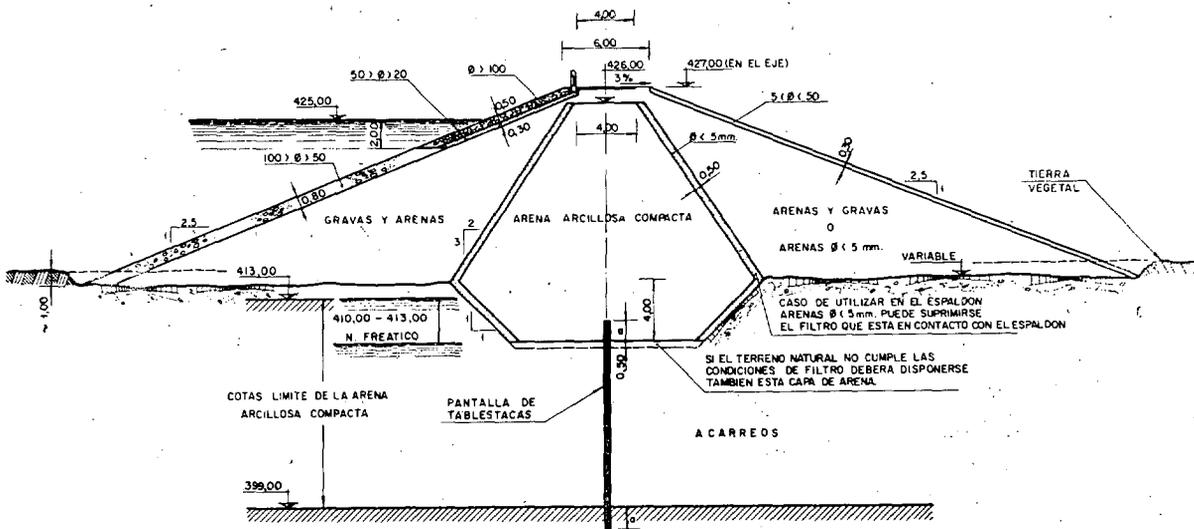
8 Pasos para una carga máxima de 7 toneladas.  
1 Pasarela de servicio, sobre el canal de descarga.  
1 Acueducto para paso de aguas pluviales con una longitud de 80 metros.  
900 m. de galerías para drenaje de aguas freáticas.  
750 m. de tubería de  $\phi$  1,20 en alcantarillas bajo el canal.

## AUXILIARY WORKS FOR CANAL

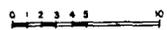
8 Passes for 7 t. maximum load.  
1 Service walkway over discharge canal.  
1 Water conduit for rainfall waters, 80 m. (262.47 ft.) long.  
900 m. (2,953 ft.) drifts for ground water drainage.  
750 m. (2,460 ft.),  $\phi$  1.20 m. (3.94 ft.) pipe-line for culverts under canal.

Figura 1.<sup>a</sup>

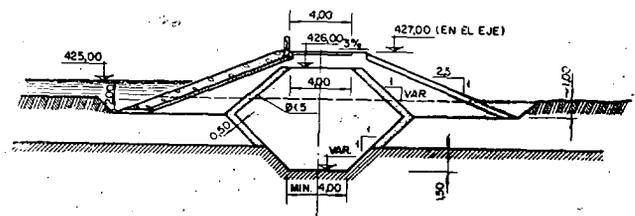
Figure 1.



PERFIL TIPO CON PANTALLA DE TABLESTACAS



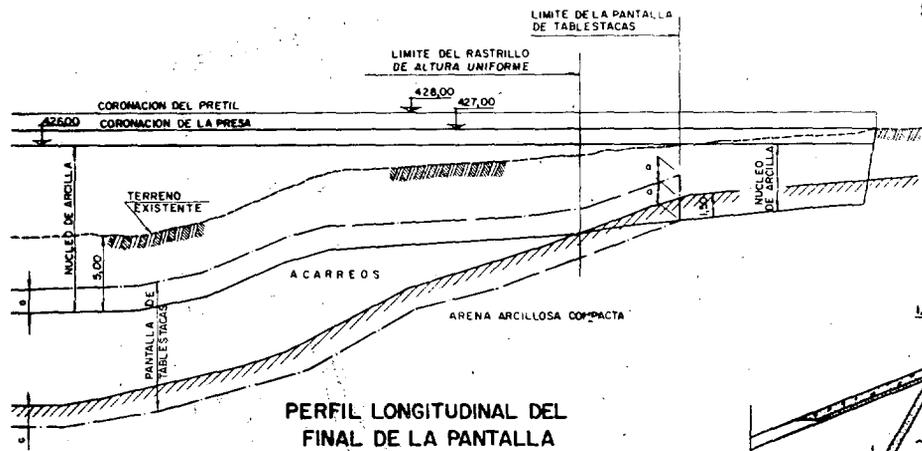
TYPICAL CROSS-SECTION WITH SHEET PILING CUTOFF



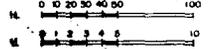
SECCION TIPO SIN PANTALLA DE TABLESTACAS



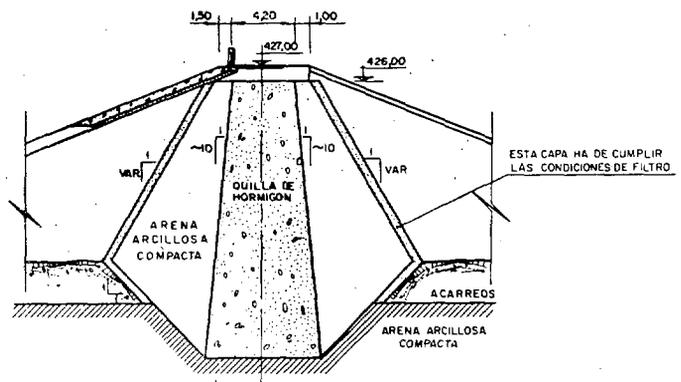
TYPICAL CROSS-SECTION WITHOUT SHEET PILING CUTOFF



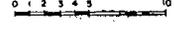
PERFIL LONGITUDINAL DEL FINAL DE LA PANTALLA



LONGITUDINAL PROFILE OF END OF SHEET PILING CUTOFF



UNION DE MURO CAJERO CON EL ESPIGON DE TIERRAS



CONNEXION OF TRAINING WALL WITH EARTH WING

Fig. 2.<sup>a</sup> — Espigón de tierras de la presa de derivación (Earth wing of diversion dam).

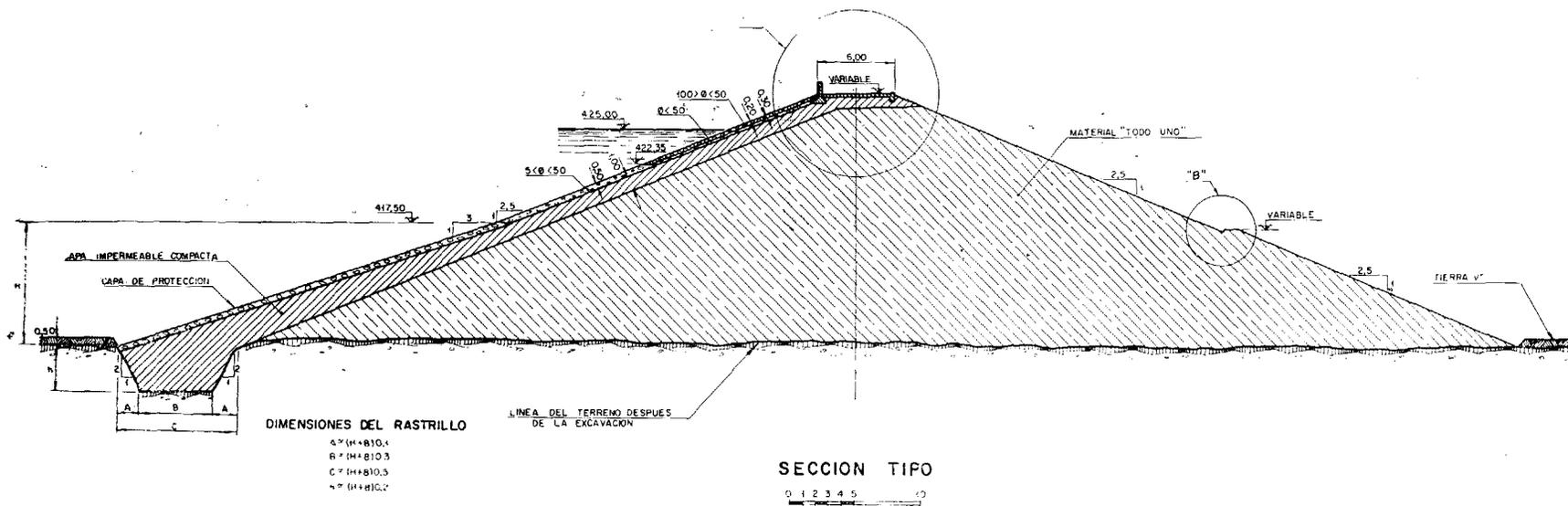


Fig. 3.<sup>a</sup> — Sección tipo de la presa de Cañares. (Typical cross-section of Cañares).

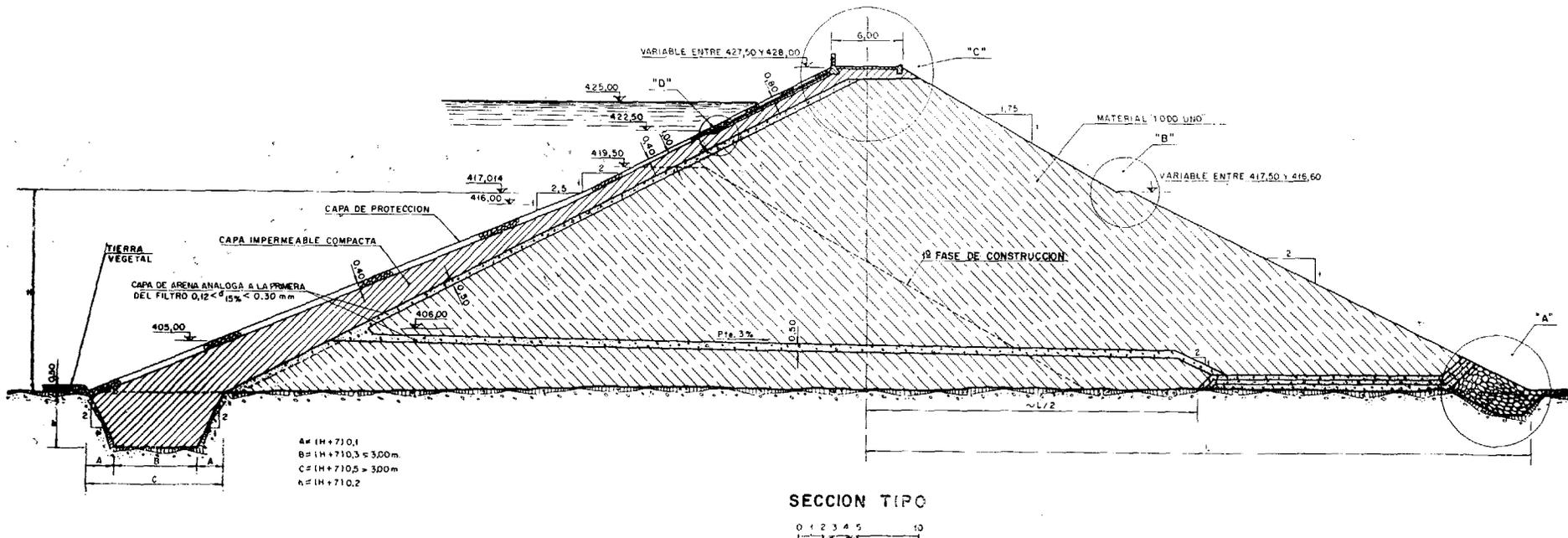
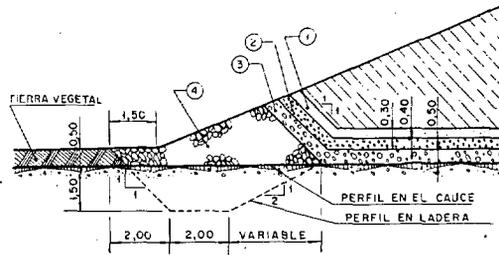
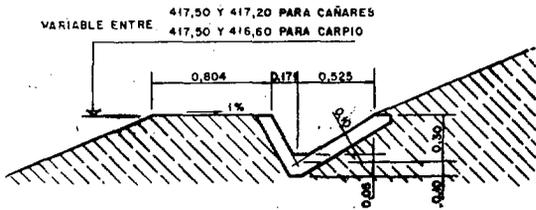


Fig. 4.<sup>a</sup> — Sección tipo de la presa de El Carpio. (Typical cross-section of El Carpio Dam).

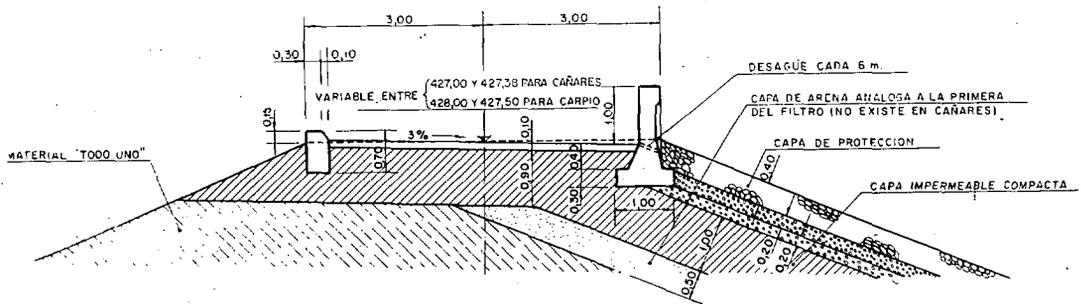


- |   |  |                                    |
|---|--|------------------------------------|
| 1 | $0,12 < d_{15\%} < 0,30 \text{ mm.}$   | } $\frac{d_{60\%}}{d_{15\%}} < 10$ |
| 2 | $1,10 < d_{15\%} < 6,00 \text{ mm.}$   |                                    |
| 3 | $25,00 < d_{15\%} < 75,00 \text{ mm.}$ |                                    |
| 4 | $75,00 < d_{15\%}$                     |                                    |

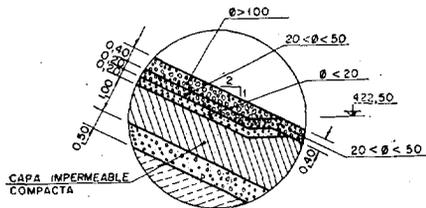
DETALLE "A"



DETALLE "B"



DETALLE DE CORONACION "C"



DETALLE "D"

Fig. 5.<sup>a</sup> — Detalles de las presas de Cañares y El Carpio (Details of Cañares and El Carpio Dams).

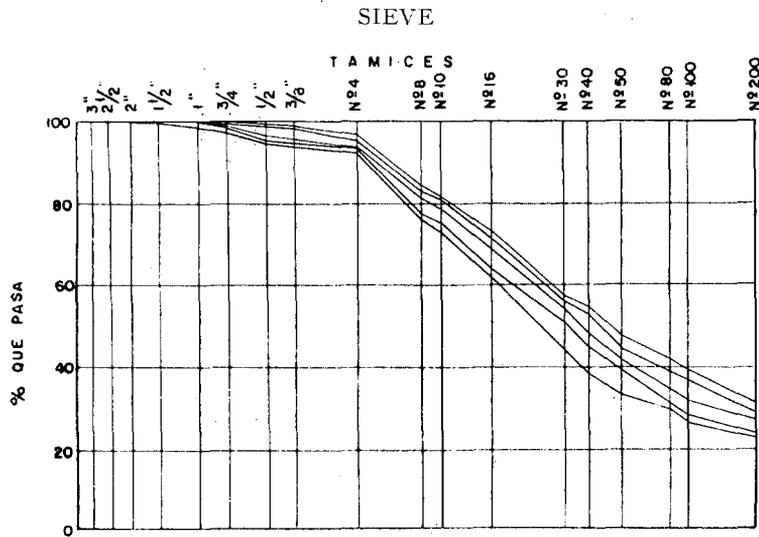


Fig. 6.ª — Algunas curvas granulométricas características de arenas arcillosas, utilizadas para el núcleo impermeable de la presa de derivación.

(Some grading curves, characteristic of clayey sands, used for impervious core of diversion dam).

Fig. 7.ª — Algunas curvas granulométricas de arenas arcillosas, utilizadas para el revestimiento impermeable de la presa de El Carpio.

(Some grading curves of clayey sands, used for impervious lining of El Carpio Dam.)

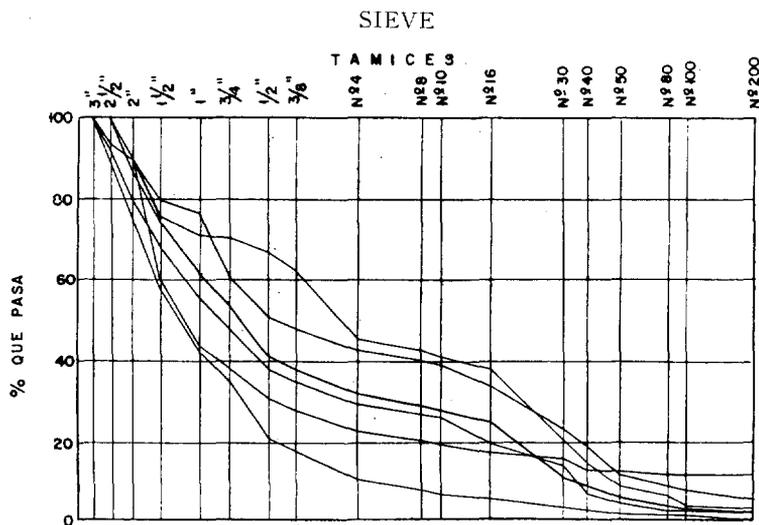
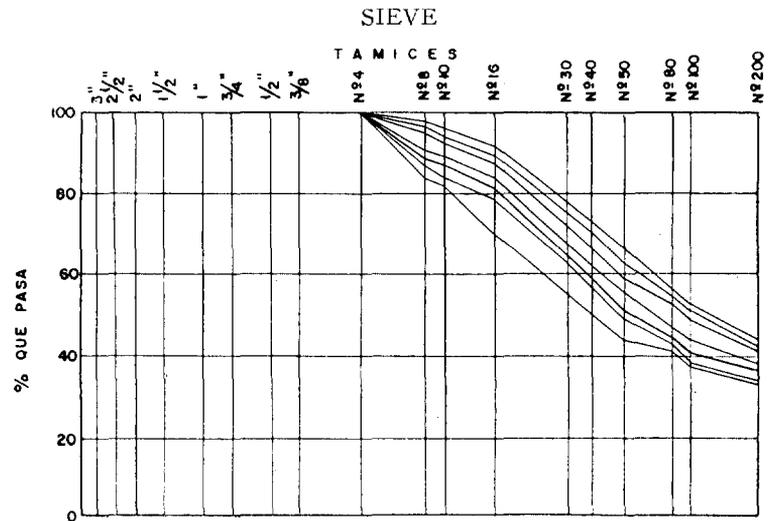


Fig. 8.ª — Algunas curvas granulométricas características de gravas arenosas, utilizadas para el cuerpo de presa de derivación.

(Some grading curves, characteristic of sandy gravels, used for body of diversion dam.)

terrenos compactos arenociliosos terciarios y, ya dominando la zona en que se ubican la cámara de carga y la central, unas rañas pliocenas constituyen las Peñas de San Bartolomé, a 190 m. sobre el cauce del río.

Sobre una topografía pliocena, ha labrado el Tajo un

valle en forma de artesa con desplazamientos laterales característicos de su cauce divagante.

Las arenas arcillosas terciarias están constituidas por granos de arena fina, limos y una cantidad variable de arcilla propiamente dicha. El equivalente de arena halla-

CLASIFICACION DE LOS SUELOS PARA SU EMPLEO EN OBRAS HIDRAULICAS  
SOIL CLASSIFICATION FOR USE IN HYDRAULIC WORKS

DIVISIONES FUNDAMENTALES DE LAS TIERRAS			Símbolo del grupo	Propiedades físicas			Idoneidad para obras hidráulicas	
				Permeabilidad	Resistencia al esfuerzo cortante	Densidad compactado	Resistencia a la erosión	Calidad del revestimiento
SUELOS DE GRANO GRUESO Más del 50 por 100 del material es retenido por el tamiz número 200	GRAVAS Menos del 50 por 100 pasa por el tamiz núm. 4	Gravas sin finos.	SW	14	16	15	2	—
		Pocos o ningún finos	GP	16	14	8	3	—
		Gravas con finos. Apreciable cantidad de finos	GM	12	10	12	5	6
			GC	6	8	11	4	2
			GW-OG	8	13	16	1	1
	ARENAS Más del 50 por 100 pasa por el tamiz núm. 4	Arenas sin finos. Pocos o ningún finos	SW	13	15	13	8	—
			SP	15	11	7	9	—
		Arenas con finos. Apreciable cantidad de finos	SM	11	9	10	10	Erosión crítica
			SC	5	7	9	7	4
			SW-SC	7	12	14	6	3
SUELOS DE GRANO FINO Más del 50 por 100 del material pasa por el tamiz núm. 200	LIMOS Y ARCILLAS Límite líquido mayor que 50	ML	10	5	5	—	Erosión crítica	
		CL	3	6	6	11	5	
		OL	4	2	3	—	9 Erosión crítica	
	LIMOS Y ARCILLAS Límite líquido menor que 50	MH	9	3	2	—	—	
		CH	1	4	4	12	10 Estabilidad de vol. crítica	
		OH	2	1	1	—	—	
		SUELOS MUY ORGANICOS			Pt	—	—	—

do para estos terrenos y las curvas granulométricas, indican, en general, poco contenido de arcilla.

Los depósitos cuaternarios están constituidos por arenas, gravas y gravillas que, incidentalmente, aparecen compactadas con un conglomerado calcáreo, habiéndose podido localizar dos terrazas no bien diferenciadas en esta margen del río que pueden asimilarse al Wurmiense y Rissense.

Los conglomerados de grava, gravilla y arena, aparecen en dos niveles, en el tercio central de la terraza, no pasando de 2 m. los espesores correspondientes.

Las mezclas de grava, gravilla y arena tienen una composición análoga a la de los conglomerados, figura 8.<sup>a</sup>, pero sin el elemento aglomerante. Aparecen en capas de 4 a 8 m. de espesor y su compactación natural mantiene sus taludes casi verticales.

Las arenas, a veces perfectamente lavadas, son uniformes, de tipo medio o grueso, presentando dos máximos sus curvas granulométricas.

El esquema general presentado en el resumen que antecede, permitió concebir el conjunto de la obra en tierras aunque con no pocos elementos de fábrica de hormigón (aliviadero, alcantarillas, puentes, último tramo del canal, cámara de carga, etc.).

En el cuadro de clasificación de los materiales, según el Bureau of Reclamation, observamos que la arena con ligante de arcilla (SW-SC) ocupa el número 3 en cuanto a conjunto de propiedades para revestimientos, y con relación a las propiedades físicas de permeabilidad, resistencia al esfuerzo cortante, compactación y resistencia a la erosión, los números 7, 12, 14 y 6, respectivamente.

Por ello, fue necesario comprobar, mediante el oportuno plan de ensayos, si las propiedades físicas citadas eran suficientes, en nuestro caso, para las misiones encomendadas a los materiales de que disponíamos.

Por lo que a la permeabilidad se refiere, las arenas arcillosas resultaron impermeables, con coeficientes de Darcy, obtenidos por ensayos *in situ*, que oscilan entre  $10^{-7}$  y  $10^{-9}$  cm./s., y entre  $10^{-8}$  y  $10^{-9}$  cm./s. con ensayos de laboratorio.

Con el espesor constante de 1,45 m. del revestimiento en los cajeros del canal y variable en los espaldones de aguas arriba de las presas, suponiendo un coeficiente de permeabilidad  $K = 10^{-6}$  cm./s., que es un valor muy conservador, las pérdidas por filtración se estimaron para el canal en 4 l./m.<sup>2</sup>/día, valor muy bajo si se tiene en cuenta que las cifras normales con revestimientos de hormigón de gran calidad, son del orden de los 15-30 l./m.<sup>2</sup>/día.

Es indudable que las pérdidas locales podrán aumentar esta cifra, pero en conjunto se llegó a la conclusión de que con arena arcillosa compactada, cabía esperar un resultado excelente, como así se ha comprobado después de la ejecución de la obra.

La resistencia al esfuerzo cortante determinada en los ensayos, fue más bien baja, aunque de los taludes naturales existentes se puede deducir que en determinados casos se alcanzan los 2 kg./cm.<sup>2</sup>. Sin embargo,

no se ha considerado prudente contar más que con 0,2 kg./m.<sup>2</sup>, lo cual ha obligado a proyectar las distintas obras con taludes tendidos.

En cuanto a la compactación, el comportamiento del material en los ensayos de apisonado fue excelente, con densidades máximas del orden de 1,90 t./m.<sup>3</sup> en los ensayos Proctor normal. Este valor era muy favorable para garantizar la estabilidad de las obras con dimensiones económicas, influyendo favorablemente en el caso de que pudiera presentarse alguna subpresión por deficiencias locales en los drenajes, en aquellas zonas en que alguna capa freática quede por encima de la línea de agua a causa de un descenso brusco del nivel de explotación.

Se comprobó que con los espesores proyectados y con cohesión de 0,2 kg./cm.<sup>2</sup> y ángulo de rozamiento de 23°, el revestimiento puede resistir sin deslizar una subpresión interior de 4 m. de agua, haciendo ensayos a escala natural en una gran artesa preparada con este fin antes de iniciarse las obras.

El mayor inconveniente del revestimiento de arena arcillosa compacta, es su poca resistencia a la erosión. Sin embargo, el problema se reduce a limitar la máxima velocidad del agua en el canal, de manera que se garantice la integridad del revestimiento. Para este tipo de tierras se puede admitir una velocidad máxima de 1,20 m./s., pero se quiso ser conservador en este aspecto, adoptándose el valor máximo de 0,90 m./s.

Por otra parte, al preverse el funcionamiento de esta conducción para diferentes regímenes variables, la acción del oleaje producido por el viento afecta a una banda bastante amplia de los paramentos, al contrario de lo que sucede en otro tipo de canales en que el efecto de "beaching" es muy localizado, a una determinada altura y, en consecuencia, la profundidad afectada en el revestimiento es despreciable.

Por esta razón no se quiso dejar sin proteger los cajeros del canal, y se realizó un detenido estudio con ensayos en gran escala, especialmente concebidos teniendo en cuenta no sólo la acción del oleaje en los paramentos de aguas arriba de las presas y en los tramos rectos del canal, sino también especialmente en las curvas que suelen ser la parte más afectada por la erosión, sobre todo por el lado exterior, en donde rompen las olas formadas a lo largo de los tramos rectos contiguos.

Con la protección elegida a base de revestimientos de grava con capas diferenciadas, cuyos espesores y granulometría variaban según las zonas y cotas de los mismos, se consigue que el coeficiente de seguridad de las fuerzas de arrastre sea del mismo orden en la solera del canal en arena arcillosa compacta, que en los paramentos.

Otra solución que se hubiera podido adoptar, pero que en nuestro caso se rechazó por antieconómica, fue la de mezclar y compactar la arena arcillosa con grava, con procedimiento semejante al utilizado en el canal Welton-Mohawk, en los Estados Unidos.

No obstante lo anterior, las investigaciones demos-

traron que los volúmenes de grava disponibles eran insuficiente para atender las necesidades de áridos para hormigones y protecciones y hubo que recurrir a otro tipo de protección utilizando la arena sobrante, para prefabricar ladrillos de mortero de cemento, que se colocaban sobre los paramentos con separación, disposición y espesor de capas tales que resultaran equivalentes a las protecciones de grava.

**ENSAYOS REALIZADOS.**

La ejecución de los ensayos a que nos hemos referido en párrafos anteriores, ha tenido lugar desde los primeros momentos del proyecto hasta el final de la obra, como complemento fundamental en la concepción y control de la ejecución de sus distintos elementos. Podemos clasificarlos como sigue:

1. Ensayos de tierras.
2. Ensayos en modelo reducido.
3. Ensayos a escala natural.
4. Ensayos de protección contra el oleaje.
5. Ensayos de control de ejecución.

1. Los ensayos de tierras, a partir de las muestras obtenidas en sondeos y catas, han sido realizados en los Laboratorios del Politécnico de Zürich, Transporte de Madrid y, la mayor parte, en el de obra montado en Puebla de Montalbán.

Dentro de ellos podemos distinguir los grupos siguientes:

- a) Obtención de curvas granulométricas, límites de Atterberg y equivalente de arena.
- b) Determinación de humedad natural y densidad "in situ":

Los resultados de estos ensayos a) y b) realizados por los procedimientos usuales, a lo largo de toda la traza y de los emplazamientos de las presas, se recogieron en gráficos y sobre perfiles geotécnicos que en todo momento han permitido al proyectista el conocimiento del terreno en cada punto.

c) Pruebas de penetración.

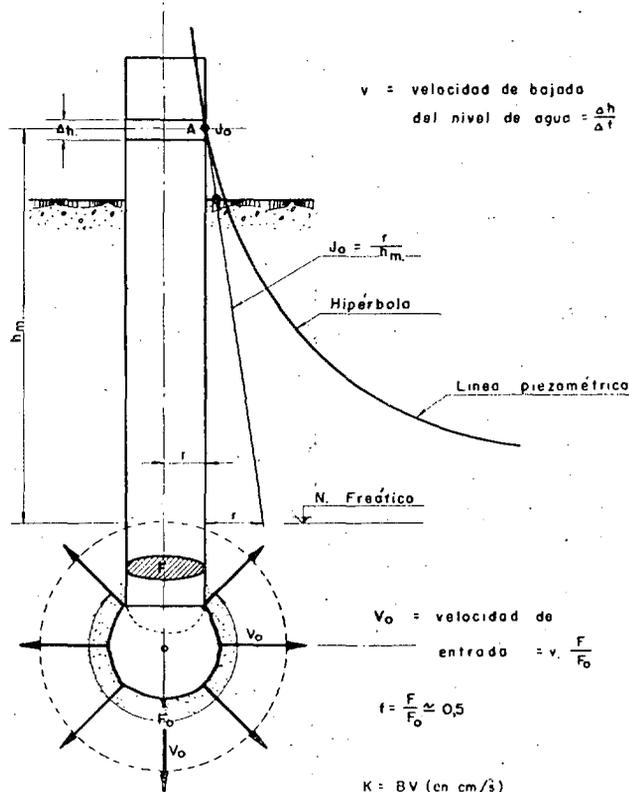
Se ha empleado un "penetrómetro", de características especiales, diseñado para estos trabajos por el Profesor Haefeli. En la fotografía n.º 5, se puede observar el penetrómetro durante un ensayo.

Las dimensiones de la punta, peso de la maza y altura de caída, son tales, que la resistencia a la penetración dinámica en kg./cm.<sup>2</sup> está expresada por el número de golpes necesarios para que la barra se hunda 20 cm. en el terreno.

Aun cuando las pruebas de penetración no son en general concluyentes en valor absoluto, han sido de gran utilidad para relacionar y matizar las propiedades de los distintos terrenos de una zona con características generales comunes, sin necesidad de repetir en cada punto otros ensayos más costosos, difíciles o lentos.

d) Pruebas de permeabilidad.

Para la determinación de los coeficientes de permeabilidad, se han utilizado diferentes procedimientos. *In situ* se ha seguido el procedimiento del "hoyo" para las



Ensayo de permeabilidad *in situ* en sondeos. (In site perviousness tests, for drillings).

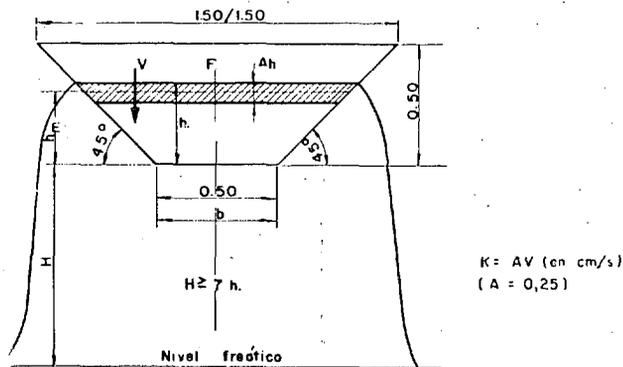


Figura 9.<sup>a</sup>.

Figure 9.

Ensayo de permeabilidad *in situ* en superficie. (Surface in site perviousness tests.)

pruebas de superficie, y en las profundas se han utilizado los propios sondeos, excavando, con ayuda del trépano

en el extremo del mismo, según se avanzaba, una especie de esfera, sobre cuya superficie se supone que se realiza la filtración (fig. 9.<sup>a</sup>).

En la zona del espigón de tierras de la presa de derivación se han utilizado pozos que llegaban por debajo de la capa freática, y se ha procedido al achique siguiendo el método clásico. En los ensayos por el procedimiento del "hoyo", con las dimensiones adoptadas, se obtiene una sencilla proporcionalidad entre el coeficiente de permeabilidad y el descenso en cm./s. del agua en la pequeña artesa artificial ( $K = 0,25 V$  en cm./s.).

Los valores así obtenidos son, en general, por exceso, ya que en las zonas superficiales se encuentran capas más permeables que enmascaran los resultados, sobre todo en las arenas arcillosas. Asimismo tiene influencia en este ensayo, el hecho de que se basa en una saturación previa del terreno que es difícil comprobar, por lo que en caso de no llegarse a ella, también la permeabilidad obtenida será mayor que la real.

En los sondeos situados en la margen izquierda de la presa de derivación, se han hecho las pruebas de permeabilidad normales en sondeos, inyectando agua con diferentes presiones, y se han obtenido valores comprendidos entre  $10^{-3}$  y  $10^{-5}$  cm./s., en los acarreo, y del orden de  $10^{-6}$  y  $10^{-7}$  en la capa de arena arcillosa, lo que concuerda con los resultados de las otras pruebas.

Como complemento, también para comprobar la permeabilidad en los acarreo sobre los que se cimenta el espigón de tierras, se han abierto pozos entre los sondeos, profundizándolos por debajo de la capa freática con objeto de hallar los coeficientes de permeabilidad achicando por medio de bomba, con el procedimiento normal en estos casos. También se han obtenido así valores concordantes.

#### e) Pruebas de compactación.

Se ha empleado el método habitual de los ensayos Proctor normal y modificado. Especial atención se prestó a los ensayos de apisonado de la arena arcillosa, y se hicieron los ensayos de una larga serie de muestras que se consideraron representativas, a fin de disponer de suficientes elementos respecto a las densidades y humedades exigibles a los diferentes tipos de suelos empleados.

Las máximas densidades Proctor están comprendidas entre 1,88 y 1,96 t/m<sup>3</sup>, fluctuando las humedades óptimas entre el 11 y el 14 por 100 (fig. 10).

#### f) Ensayos edométricos y pruebas de hinchamiento.

Realizados los primeros con una serie de muestras representativas, compactadas previamente con humedades inferior, igual y superior a la Proctor, saturando antes y después del ensayo con presión de 1 kg./cm.<sup>2</sup>, se pudo observar gran influencia de la humedad de compactación en el comportamiento del material en la saturación posterior.

Los compactados del "lado húmedo" de la curva Proctor no acusaban entumecimiento ni asentamientos bruscos,

mientras que el mismo material, con humedad inferior (lado seco de la curva) entumecía ligeramente antes de la saturación, y del orden del 1,0 por 100 al llegar a ella.

A la vista de estos resultados, dada su trascendencia práctica en los procedimientos de compactación a emplear, se completaron con la determinación del hinchamiento libre y la presión de hinchamiento para distintas humedades y densidades.

#### g) Ensayos triaxiales, de compresión simple y de corte directo.

Aparte de los dos primeros grupos de ensayos realizados con las normas usuales, se realizaron también ensayos de corte directo con el aparato de Hvorslev (también denominado de Haefeli) sobre muestras anulares de suelo.

A cada una de las probetas ensayadas se le aplicaban cargas verticales escalonadas, dejando consolidar la muestra entre cada aplicación de nueva carga. Las cargas verticales fueron de 1, 2 y 3 kg./cm.<sup>2</sup>, y los esfuerzos cortantes resultaron de 0,42, 0,80 y 1,20 kg./cm.<sup>2</sup> en el primer grupo de ensayos, y de 0,53, 1,08 y 1,68 kg./cm.<sup>2</sup> para el segundo grupo.

Por lo que a los ensayos triaxiales se refiere, cabe señalar que a causa de la gran impermeabilidad del material, los tiempos de consolidación fueron muy importantes, estando comprendidos entre cinco y ocho días. Las representaciones gráficas de Mohr permitieron obtener ángulos de rozamiento del orden de 23° y cohesiones de unos 0,5 kg./cm.<sup>2</sup>, con humedades al final del ensayo, próximas al 13 por 100.

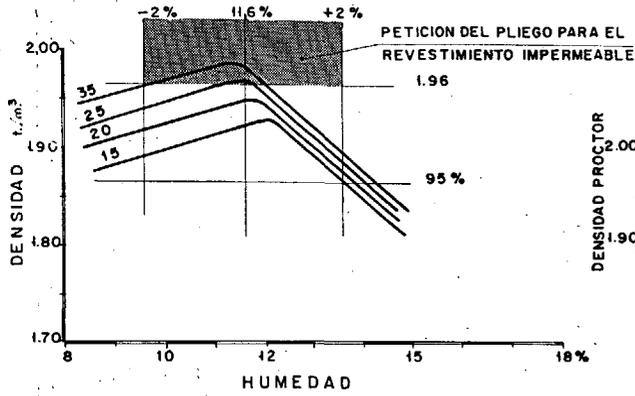
Como resumen, pudo aceptarse, para los cálculos de estabilidad de la arena arcillosa compactada, este ángulo de rozamiento de 23° y una cohesión variable con el contenido de humedad, pero que, en cualquier caso, podía admitirse superior a 0,2 kg./c.<sup>2</sup>.

## 2. Ensayos en modelo reducido.

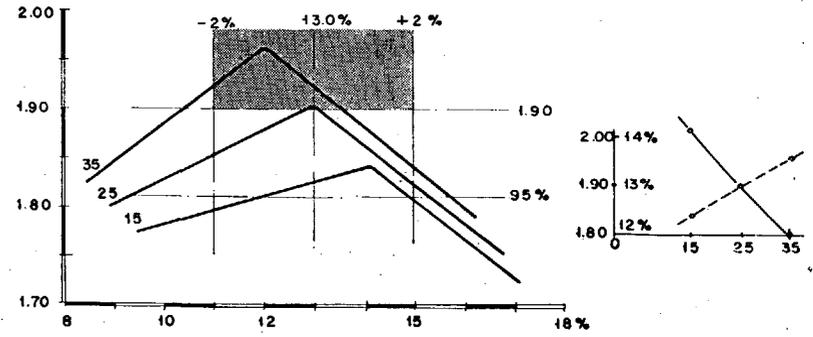
#### a) Erosión y rugosidad.

Para estos estudios se construyó en el poblado de la obra un circuito cerrado, formado por una estación de bombeo, un canal de alimentación y otro de retorno, con las correspondientes compuertas y aforadores, entre los que se intercalaron varios tramos de canales trapeciales a ensayar. Así se investigaron los revestimientos y protecciones más convenientes. Pudo comprobarse que el material se comporta de acuerdo con la teoría general de la fuerza de arrastre, obteniéndose valores críticos de velocidad media que están dentro de los límites fijados experimentalmente en la U.R.S.S. y en los Estados Unidos.

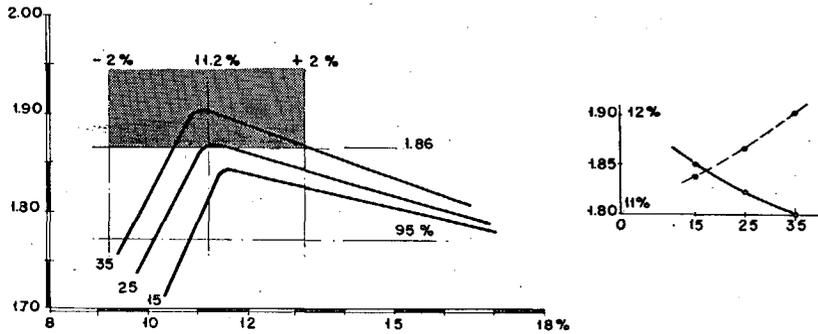
La rugosidad se ha estudiado siguiendo las teorías de Colebrook y Nikuradse. Con los datos experimentales de construcciones análogas se inició el tanteo, deduciéndose que el régimen es turbulento, con un número de Reynolds del orden de 10<sup>7</sup>. El valor medio del espesor hidráulico oscila alrededor de 4,5 m., y con el revestimiento de grava



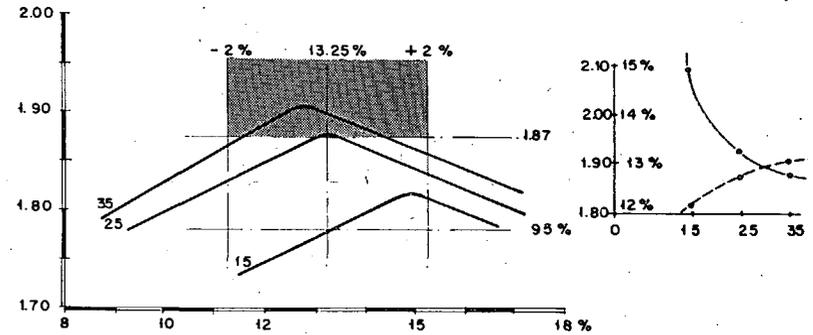
ROJIZA Y GRIS AZULADA, ARENOSA



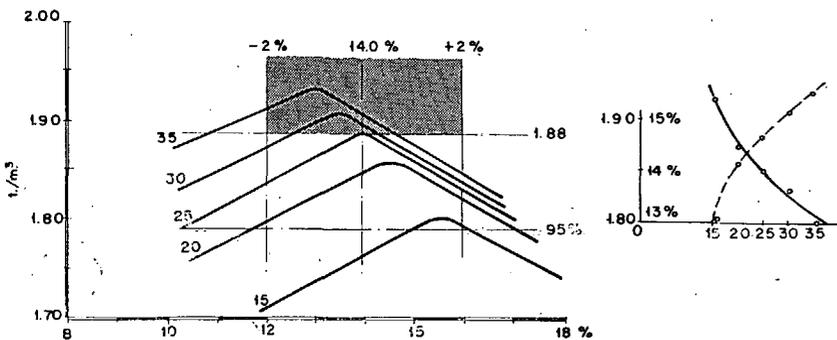
GRIS AZULADA, ARCILLOSA



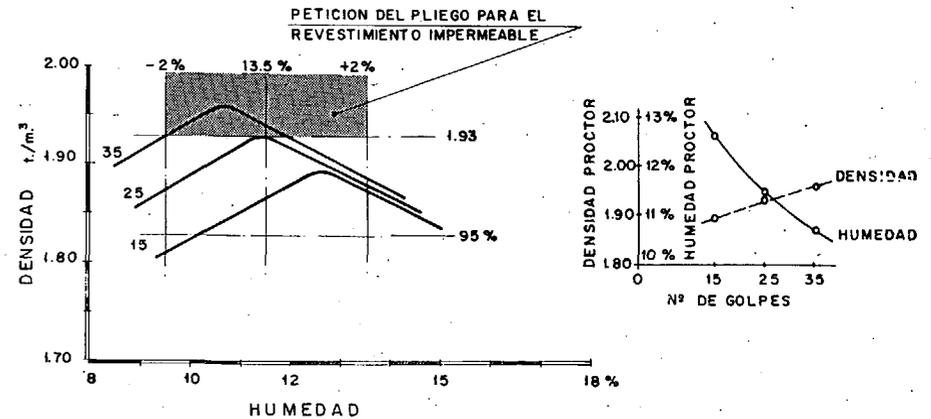
ROJIZA Y GRIS AZULADA, ARENOSA



SIENA ARCILLOSA



SIENA, ARCILLOSA



SIENA Y GRIS AZULADA, ARENOSA

Fig. 10. — Ensayos Proctor de algunas muestras de arena arcillosa.

(Some clayey sands samples Proctor tests).



Foto 1.— Presa de derivación y toma de agua.

(Diversion dam and intake.)



Foto 2.— Presa de El Carpio y tramo de canal revestido de hormigón.  
(El Carpio Dam, and concrete lined canal stretch)

proyectado se puede considerar una rugosidad equivalente de 0,06 m., que se corresponde con un coeficiente de Manning  $n = 0,023$ .

Experimentalmente se han comprobado estos valores para distintas magnitudes de caudal, cañado y pendientes,

y se ha adoptado finalmente un coeficiente  $\frac{1}{n} = 40$ , que supone una rugosidad equivalente de 0,08 m., valores que dejaban plenamente del lado de la seguridad, como se ha comprobado una vez puesto en funcionamiento el salto.

b) Además de los ensayos correspondientes a la obra de tierras, se realizaron en modelo reducido los del aliviadero y toma de agua, por el Laboratorio de Hidráulica de la Escuela Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, estando recogidos los resultados en el correspondiente informe oficial.

El cuenco del aliviadero, después de los primeros ensayos, se decidió profundizarlo un metro, así como, por la erosión de las laderas, hubo que prolongar la protección de éstas con los muros cajeros. En cambio resultó innecesario zampeado alguno en la solera, quedando el pie del cuenco satisfactoriamente protegido.

Las pilas también sufrieron sucesivas modificaciones,

consiguiéndose finalmente unas formas hidrodinámicas de las mismas que uniformaban el resalto en toda la anchura del aliviadero.

### 3. Ensayos a escala natural.

#### a) Esfuerzo cortante.

En el Laboratorio de Mecánica del Suelo, de la Puebla de Montalbán, se montó un aparato de corte directo, pudiéndose considerar, por el tamaño de la probeta, que los ensayos corresponden a escala natural. Es un paralelepípedo con sección horizontal de 1 000 cm.<sup>2</sup> y altura de 20 cm. Las presiones normales se consiguen por gravedad con un brazo de palanca multiplicador, y las fuerzas de cizallamiento mediante el correspondiente gato hidráulico. Un sistema de dos comparadores mide las deformaciones, tanto normales como transversales. Se han ensayado probetas de arenas y gravas y gravas machacadas, tanto en muestras secas como inundadas, y en líneas generales los resultados fueron los siguientes:

1.º No hay alteración del ángulo de rozamiento, por el hecho de inundar la probeta.



Foto 3. — Obtención de muestra profunda por sondeo manual.  
(Obtaining a deep sample by hand driller.)

2.º Los áridos rodados no tienen un ángulo de rozamiento menor que los áridos obtenidos al machacar los mismos.

3.º Las arenas tienen un ángulo de rozamiento de 34º; las gravas y arenas bien graduadas 38º, y las gravas y finos 42º.

También se realizaron pruebas con arena arcillosa compactada, confirmando los resultados anteriormente obtenidos.

Asimismo, a escala natural se hicieron algunos ensayos en la zona de cimentación del aliviadero, a base de un dispositivo especial con gatos hidráulicos, para obtener el comportamiento *in situ* de la arena arcillosa compacta.

b) *Estabilidad de taludes.*

Sobre la que había de ser traza del canal se excavó una "artesa" con las mismas características de aquél, salvo que los paramentos se construyeron con diferentes taludes de ensayo.

El experimento del vaciado brusco de la "artesa", después de permanecer llena durante tres semanas, dio como resultado el comportamiento estable de los taludes proyectados, apareciendo en los aparatos de medida movimientos entre 0 y 10 mm. como máximo, con una sensibilidad de medida de 2 mm. Posteriormente al vaciado, se hicieron pruebas de penetración en los taludes, observándose que la alterabilidad era mínima.

Comprobados los taludes anteriores, se repitieron los ensayos, colocando sobre el talud 2/1 un revestimiento de arena arcillosa compactada del espesor calculado en el proyecto, drenándola en su contacto con el "compacto", en principio, y suprimiendo el drenaje, después. Sobre este recubrimiento se extendió la capa de grava de protección.

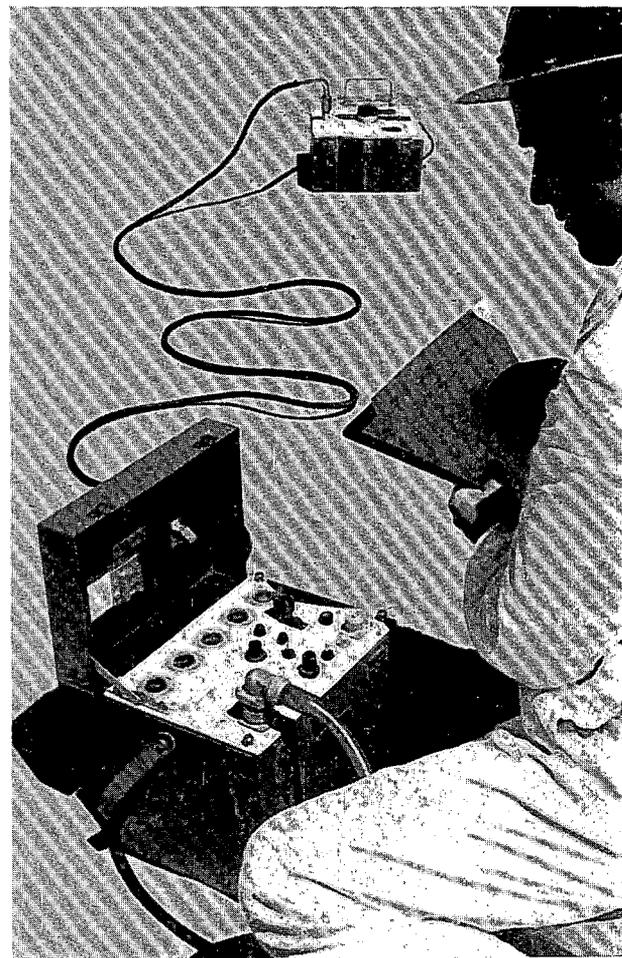


Foto 4. — Determinación de la humedad por el método de isótopos radiactivos.  
(Moisture measurement by the Method of radioactive isotopes).



Foto 5.— Ensayos de penetración.  
(Penetration tests).

Los ciclos seguidos fueron los mismos, no manifestándose ni deslizamientos en cimientos, ni movimientos del revestimiento ni de la capa de protección. Los valores medidos de carga de agua o subpresión alcanzaron cifras del orden de los 4 m. en el ensayo sin drenaje.

#### c) Permeabilidad.

La "artesa" también ha servido para medir la permeabilidad de la arena arcillosa, la superficie de filtración era de 1 400 m.<sup>2</sup> y los volúmenes de agua considerados fueron los de lluvia, evaporación, aportación de un manantial aparecido en el contacto de acarreos y arena arcillosa, así como el total embalsado. Se obtuvo una filtración media de 2,15 m.<sup>3</sup>/día en la totalidad de la superficie, es decir, unos 2 l./m.<sup>2</sup>/día.

#### d) Compactación.

El revestimiento de arena arcillosa en la "artesa" se efectuó en su mayor parte con rodillo de neumáticos de 12 t., y en algunas zonas extremas con pisones neumáticos. Se realizaron más de un centenar de ensayos y los resultados dan una compactación media de un 99,7 por 100 con una desviación cuadrática de 1,6 por 100.

En las humedades, el control mostró más dispersión de resultados. La zona más abundante de puntos corresponde al lado húmedo, estando más del 80 por 100 de las muestras dentro de la zona de  $\pm 2$  por 100 de la humedad óptima.

#### 4. Ensayos de protección contra el oleaje.

El procedimiento consistió en fijar las protecciones de paramento mediante ensayo en modelo, que si era reducido en comparación con las dimensiones de las presas y del canal, era a escala natural en cuanto se refiere al tamaño de los áridos y a la amplitud de las olas. (Método preconizado en casos análogos por el Bureau of Reclamation.)

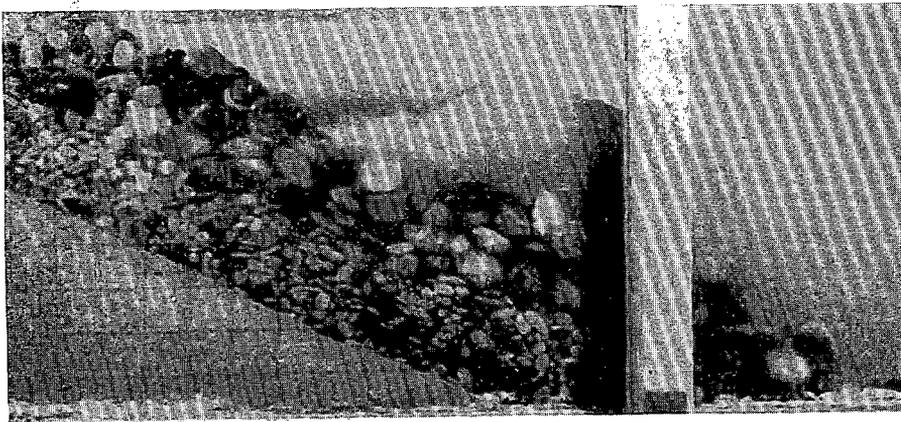
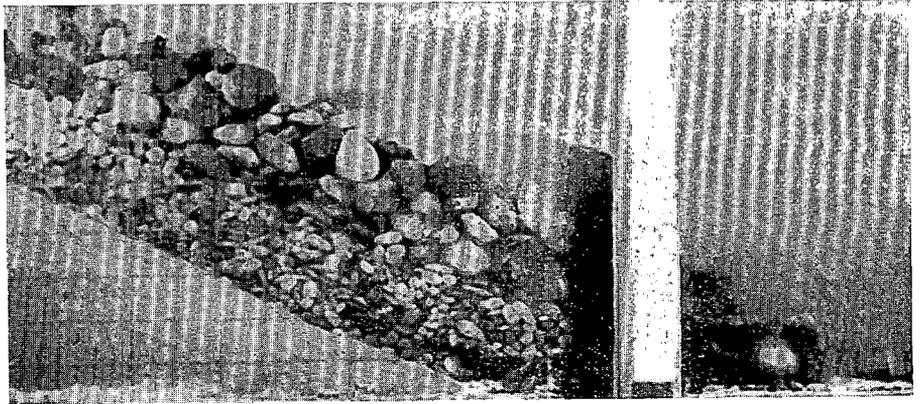
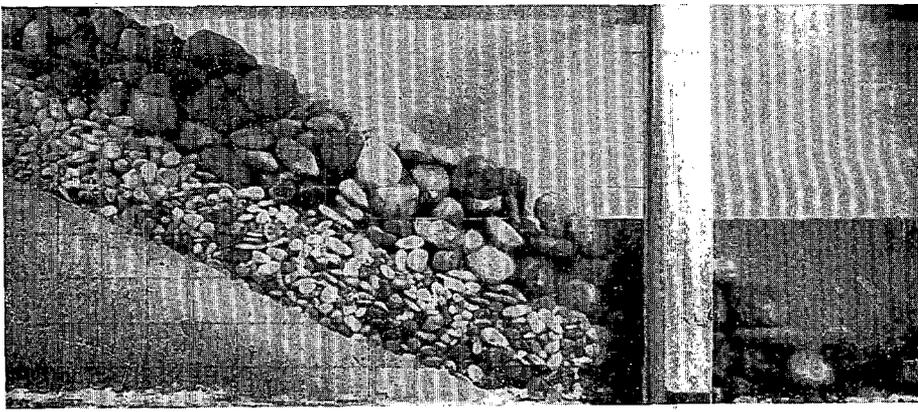
Se procedió a ensayar el efecto del oleaje utilizando un canal de sección rectangular, en el que en uno de los extremos se situó el paramento en cuestión con el revestimiento ensayado, y en el otro el dispositivo de producir las olas. Así se llegó a resultados que comprobaban o corregían las disposiciones teóricamente obtenidas con las fórmulas usuales en función de la altura de la ola, y que, después de realizar la obra, se ha podido comprobar que funcionan perfectamente, tanto en el paramento aguas arriba de la presa como en los cajeros del canal.

#### 5. Ensayos de control de ejecución de la obra.

Durante el transcurso de los trabajos se han realizado de una forma sistemática todos los controles normales en



Foto 6.— Determinación de la densidad *in situ*.  
(Density in place test.)



*Protección contra el oleaje.*

Fotografías antes, durante y después de uno de los ensayos.

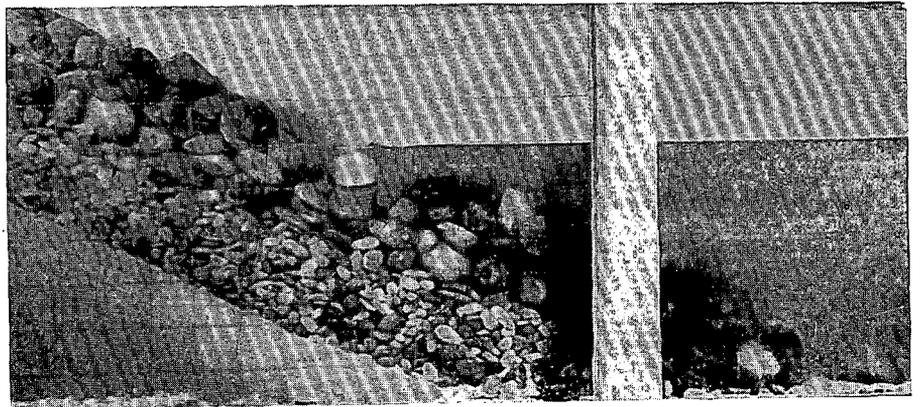


Foto 7.—Ensayos de protección contra el oleaje.  
(Wave protection tests.)

obras de tierra de esta envergadura, que comprenden las características de los materiales empleados, con las indicaciones y limitaciones prescritas por el Pliego de Condiciones del proyecto, así como cuanto se refiere a las condiciones finales obtenidas de la puesta en obra y compactación.

Para ello se montó en el poblado un laboratorio central que extendía su actuación a los diferentes tajos, cuando se consideraba preciso, con las correspondientes unidades móviles.

Los principales problemas en este tipo de obra están relacionados con la humedad de los materiales, tanto en lo que se refiere a conseguir la prevista, como a su determinación frecuente y suficientemente aproximada: en un espacio corto de tiempo para la posible corrección de las áreas.

Como ya hemos mencionado anteriormente, de los ensayos realizados durante el proyecto se dedujo que con compactación correspondiente al lado húmedo de la curva Proctor no se producía entumecimiento posterior con la saturación, pero que, por necesidades de tipo práctico en la utilización de maquinaria, convenía permanecer ligeramente del lado seco. Por ello, hubo que multiplicar los ensayos de obra, realizándose en todos los casos, capa por capa de los terraplenes compactados, y se especificó en el Pliego que, aun alcanzando el porcentaje exigido de la densidad Proctor, era preceptivo que la humedad superase el 60 por 100 de la de saturación. El cumplimiento de esta última norma es evidente que podía conseguirse por la adición de agua o, lo que en general resultaba más fácil, aumentando la compactación.

Para obtener los resultados de densidad y humedad con la necesaria rapidez, evitando el lapso de dieciocho o veinte horas que supone el secado de la muestra en estufa a 105-110° C., se han utilizado con los suelos plásticos dos procedimientos distintos, según los casos. El primero consistía en obtener ambos datos por la aplicación *in situ* de métodos basados en los isótopos radiactivos. Cuando la multiplicidad de tajos lo requería, también se operó obteniendo la densidad húmeda por el método de arena y la humedad con auxilio del picnómetro de aire; este procedimiento, puesto a punto en la obra, ha dado excelentes resultados prácticos, con una aproximación suficiente que fue estadísticamente controlada con los ensayos completos más afinados.

En los suelos granulares, no aptos para obtener la curva Proctor, se ha empleado para el control de compactación el método Humphreys, con la determinación previa de las curvas que, en cada tipo de suelo, relacionaban la granulometría con la densidad exigible en la compactación.

El laboratorio extendía también su actuación a los ensayos de cementos, morteros y hormigones, tanto en la determinación de las características de los materiales como en el control de la planta y rotura sistemática de probetas.

También como control de la obra ejecutada se han realizado una serie de trabajos topográficos y geodésicos para registrar, durante el transcurso de la puesta en carga y del funcionamiento del salto, las deformaciones

de los distintos elementos, previendo los mecanismos de precisión adecuados (clinómetros; péndulos, etc), tanto en el exterior como en el interior de las obras. Asimismo se ha establecido una serie de piezómetros que registren los niveles de la capa de agua de filtración a lo largo de espaldones y canteras.

El número total de ensayos normalizados registrados en la obra durante el transcurso de la misma, se eleva a más de 180 000, que podemos agrupar en la forma siguiente:

#### I. Ensayos singulares.

Resistencia a la erosión de la protección del canal.

Estabilidad de taludes a escala natural.

Determinación *in situ* de la resistencia al corte del terreno.

Hinca de tablestacas y determinación de la permeabilidad de la pantalla.

Compactación a escala natural.

#### II. Ensayos especiales normalizados.

De apisonado por el método de Humphreys.

Proctor normal y modificado, utilizando el picnómetro de aire.

De apisonado utilizando isótopos radiactivos.

Determinación de la humedad por medio de picnómetro de aire.

Determinación de la humedad por medio de isótopos radiactivos.

#### III. Ensayos normales.

Sondeos a mano y extracción de muestras.

Preparación de muestras.

Análisis granulométricos completos.

Equivalente de arena.

Límites de Atterberg.

Determinación de materia orgánica.

Determinación de la humedad.

Entumecimiento.

Densidad *in situ*.

Peso específico.

Proctor normal y modificado.

Edométrico.

Compresión simple.

Permeabilidad *in situ* y con permeámetro.

Penetración con aguja Proctor y penetrómetro de Haefeli.

#### IV. Ensayo de hormigones.

Características de los áridos: granulometría, contenidos de arcilla, materia orgánica, etc.

Toma de muestras de hormigón.

Docilidad.

Contenido de aire.

Maduración de probetas.

Rotura a compresión simple.