

EL PROBLEMA DE LOS CANALES EN LOS TERRENOS YESIFEROS MEDIO SIGLO DE EXPERIENCIA EN EL CANAL DE ARAGON Y CATALUÑA

Por FERNANDO HUÉ HERRERO
y MANUEL RAMON LLAMAS MADURGA

Ingenieros de Caminos.

En esta segunda y última parte del artículo se estudian las causas de las averías producidas en el Canal de Aragón y Cataluña por los distintos tipos de terrenos yesíferos que fueron estudiados en la primera parte de este artículo aparecido en el número 2948 de la REVISTA. Finalmente se proponen una serie de normas prácticas que se deben tener en cuenta cuando se construyen canales en esta clase de terrenos.

(Conclusión.)

III. El comportamiento de los canales según los tipos del terreno yesífero y las soluciones adoptadas.

En primer lugar, quizá no sea exagerado el recordar, una vez más, que siempre que sea posible, aun a costa de alargar el trazado del canal o de perder alguna zona de regadío, debe evitarse el atravesar terrenos yesíferos. A la larga será siempre más barato por lo que respecta a la conservación de la obra y, desde luego, mucho más productivo para la gran mayoría de los posibles beneficiarios del canal.

No obstante, la precende solución muchas veces, como en nuestro caso, no es viable. Además, deja nuestro espíritu insatisfecho, ya que equivale a sentirse impotente para superar este obstáculo que la naturaleza nos presenta. Vamos, pues, a lo largo de las páginas que siguen, a intentar aportar algunos datos para conocer mejor el problema y a insinuar algunas soluciones.

Nos limitaremos a la experiencia concreta del Canal de Aragón y Cataluña, sin aludir, prácticamente, a otras obras análogas nacionales o extranjeras, pues queremos dar a este trabajo un carácter muy concreto y realista. Adelantaremos, desde ahora, que las soluciones que propondremos son caras y requieren una esmerada conservación, pero, a pesar de ello, son las más económicas si se las mira con unos lustros de perspectiva.

Como ya vimos en la página 6, de los factores causantes de las averías, el primero, la agresividad química, apenas preocupa actualmente. Es la solubilidad y la erosionabilidad de los terrenos la causa primordial de la mayor parte de las averías; será, pues, a su estudio a lo que dediquemos mayor atención.

La formación de las peligrosas cavernas, simas o calamas, que de las tres formas suelen denominarse en la región, depende de: a) El tipo de terreno (dentro del grupo general de los terrenos yesíferos). b) De

la circulación del agua en las proximidades del canal (bien sea su origen pluvial o del mismo canal).

El tipo de revestimiento influye en las filtraciones, según su mayor o menor impermeabilidad, y en el tamaño de las roturas, según su rigidez o elasticidad y resistencia mecánica, ya que hay que tener en cuenta que es en la etapa final del proceso destructivo cuando se producen los grandes arrastres de tierras y éstos son proporcionales a la fracción del agua que circula por el canal, que sale por la fisura o rotura del revestimiento, y dicha rotura está en íntima relación con la naturaleza del revestimiento.

Por último, dedicaremos unas pocas líneas a comentar el uso de las inyecciones de arcilla estabilizada para prevenir o corregir averías. Decimos sólo unas líneas, pues el procedimiento se empezó a utilizar hace pocos meses y queremos limitarnos casi exclusivamente a transmitir lo comprobado por la experiencia de bastantes años.

T. - LA AGRESIVIDAD QUÍMICA DE LAS AGUAS SELENITOSAS.

No vamos a recordar ahora las teorías químicas acerca de la acción de las aguas selenitosas sobre los diversos aglomerantes hidráulicos.

El único tipo de cemento utilizado en el Canal de Aragón y Cataluña ha sido el Portland corriente. Tan sólo en un tramo de canal al aire libre, de 200 metros de longitud, se utilizó cemento aluminoso; dicho tramo ha dado un resultado análogo a los demás, pero dada su escasa longitud y la delicadeza que exige la puesta en obra de los hormigones de cemento aluminoso, este ensayo no merece ser tenido en cuenta.

Como antes dijimos, no es el ataque químico un problema que preocupe seriamente. Se ha registrado nada más en el tramo de los yesos oligocenos basales plegados y tan sólo en los túneles números 10 y 15, lo cual no tiene nada de extraño, ya que son los túneles de mayor longitud, y lógicamente las aguas que en ellos manan son más abundantes y más carga-

das de sales, puesto que hacen un recorrido mayor a través del terreno antes de aflorar en el túnel.

No hemos hecho el análisis químico de dichas aguas, pero su sabor algo amargo nos habla de la presencia del catión Mg^{++} ; realizados unos sencillos

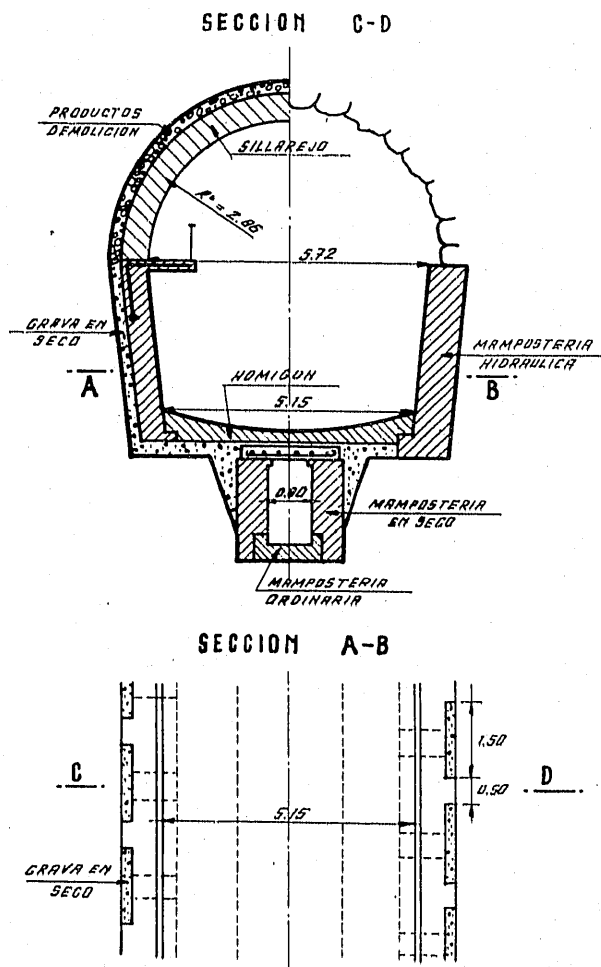


Fig. 10. — Revestimiento con drenajes del túnel de Caballos, en el Canal de Aragón y Cataluña.

ensayos químicos de una eflorescencia de uno de los manantiales del interior del túnel, vimos claramente la abundante presencia de los aniones $CO_3^{=}$ y $SO_4^{=}$ y la ausencia del $Ca^{=}$. Por tanto, puede decirse que en la composición de estas aguas predominan los carbonatos y sulfatos de calcio y magnesio; probablemente, la concentración en $SO_4^{=}$ es superior la que corresponde a la saturación del SO_4Ca , debido a la presencia del Mg^{++} . En la zona de Valfría-Caballos hay seis túneles, numerados del 10 al 15 (ver fig. 6.^a). Los números 10, 11, 14 y 15 se revistieron primitivamente de hormigón y se les dispuso un drenaje de grava alrededor y una pequeña galería central de drenaje, no visitable por sus reducidas dimensiones.

La bóveda está en todos ellos sin revestir, salvo en aquellos puntos en que la falta de consistencia del terreno lo hizo necesario; en dichos puntos, el revestimiento es de hormigón o de sillería de arenisca. Los túneles 12 y 13, construidos en el año 1912 con motivo de una variante, están revestidos de ladrillo.

Como dijimos, el ataque al hormigón del túnel número 15, denominado de Caballos, hizo preciso renovar su revestimiento. El nuevo revestimiento, que se detalla en la figura 10, se compone, en su parte inferior, de una galería de drenaje central (visible hasta hace pocos años, aunque con dificultad) formada por dos muretes de mampostería en seco, una solera de hormigón y una losa armada de recubrimiento. Los laterales de la zanja abierta para la galería se rellenaron de grava que forma, además, una capa de 20 cm. bajo la solera del túnel, que es de hormigón.

El revestimiento de las paredes hasta los arranques de la bóveda es de mampostería de conglomerado calizo, tomada con mortero de cemento; detrás de ella, salvo en los contrafuertes de apoyo, hay una capa de grava de 50 cm. de espesor, que comunica con la inferior a la solera antes mencionada. Para prevenir las filtraciones a través del revestimiento, hace ya quince años se cubrió solera y cajeros con un enlucido de mortero de cemento de 400 Kg. de clasificación.

En las zonas en que fué preciso rehacer la bóveda, en algún punto todavía se conserva el revestimiento primitivo; se hicieron arcos de sillarejo de conglomerado calizo.

Veamos cuál ha sido el comportamiento de las distintas partes de este revestimiento. El conglomerado calizo resiste perfectamente; los sillarejos de arenisca están algo corroídos, sobre todo en su superficie (X); el mortero de las juntas está bastante degradado, aunque, a pesar de ello, los arcos se mantienen bien.

En los puntos en que por estar la bóveda sin revestimiento se pueden localizar goteras de agua salinosa, se procura evitar, mediante chapas de cinc, que dichas aguas tomen contacto con el hormigón de la pasarela de inspección o con el mortero del enlucido, pues de no hacerlo así, uno y otros son corroídos con relativa celeridad.

La solera de la galería de drenaje tuvo que ser reconstruida a los pocos años de entrar en servicio, pues había sido totalmente destruida por las aguas cargadas de sales que evacuaba. Se rehizo a base de mampostería del citado conglomerado y juntas de arcilla, y continuó en buen servicio hasta hace pocos años. Hoy día, los muretes se encuentran movidos

(1) El comportamiento de las areniscas, profusamente utilizadas en los primitivos revestimientos del Canal, ha sido muy desigual; lo cual ya fué previsto a principios de siglo por E. Hernández Pacheco (1927), mediante el estudio microscópico de su composición mineralógica.

y en algunos sitios han llegado a juntarse, haciendo el paso imposible, salvo en las zonas próximas a la salida. En la primera etapa de uso del nuevo revestimiento se hacía, cada dos o tres años, una limpieza a fondo de la galería, para lo cual había que utilizar el largo y penoso procedimiento de abrir ventanas cada 100 m. a través de la solera; la progresiva disminución del número de días del corte invernal fué haciendo cada vez más difícil dicha limpieza, hasta llegar a prescindir de ella. En su actual estado, la influencia de la galería es más bien perniciosa, pero el tema de los drenajes será tratado con detalle más adelante.

En el túnel núm. 10 el ataque químico se da con mayor intensidad. Este túnel, que está al comienzo de la zona peligrosa de Valfría-Caballos, atraviesa el contacto de las arcillas y areniscas del oligoceno de facies normal con los yesos basales, y en dicha zona, como es lógico, ya que es el contacto de dos tipos de rocas de muy distinta permeabilidad, los manantiales de aguas saladas son más abundantes y más concentradas éstas que en el túnel de Caballos. Se conserva el revestimiento primitivo, análogo al de Caballos, salvo en que los laterales son de hormigón, y que la galería de drenaje, de más reducidas dimensiones, nunca fué visitable. Cada dos o tres años, en una longitud de unos 20 m., la capa de gravas de laterales y solera se colmata de sales y se hace preciso levantar el revestimiento y reponer grava limpia. Como para hacer esta operación se aprovecha el corte invernal, puede decirse que la acción de las sales no repercute apenas en la explotación del Canal.

En resumen, en nuestra zona de estudio puede decirse respecto a la agresividad: 1) Solamente se da en los túneles cuya longitud es suficientemente larga como para que las aguas que caen en la zona suprayacente tengan alguna importancia. 2) Dentro del túnel, el ataque se localiza en zonas reducidas, que coinciden con los manaderos de aguas selenitosas. 3) El drenaje sólo es eficaz para combatir la agresividad, cuando las aguas selenitosas son poco abundantes y poco concentradas; de no ser así, se colmata rápidamente por la precipitación de las sales disueltas sobre la grava. Esto, por lo que respecta exclusivamente a la agresividad química, ya que desde el punto de vista de la solubilidad de los terrenos, la construcción de los drenajes parece ser muy contraproducente en casi todos los casos, como estudiaremos más tarde.

2. - SOLUBILIDAD Y EROSIONABILIDAD DE LOS DISTINTOS TIPOS DE TERRENOS YESÍFEROS.

Como ya hemos dicho, el principal inconveniente que tienen los terrenos yesíferos como elemento de sustentación del Canal, es la facilidad con que en ellos se producen, por la acción de las aguas, huecos y cavernas.

Vamos a ver que, dentro de la universal peligro-

sidad de todos los terrenos yesíferos por los que discurre el Canal de Aragón y Cataluña, podemos distinguir distintos grados.

Para mayor claridad, separaremos los terrenos según la clasificación siguiente:

- | | | |
|----------------------------------|---|---|
| Roca sana sin meteorizar | } | 1. Yesos oligocenos sin plegar. |
| | | 2. Yesos triásicos. |
| | | 3. Yesos oligocenos basales plegados. |
| Derrubios de meteorización | } | 4. "Tierra blanca" de los yesos oligocenos. |
| | | 5. Derrubios triásicos. |

Suponemos al lector al corriente de las páginas previas dedicadas al estudio geológico de la región y, por tanto, seremos breves en la descripción de las características petrográficas de los distintos terrenos.

1. *Yesos oligocenos sin plegar.* — Denominaremos así a los que se encuentran desde el kilómetro 7,3 hasta el 9,2 de la traza del Canal. No se trata de un paquete continuo de yesos, sino que alternan con margas y areniscas flojas. El conjunto de los estratos buza ligera y monoclinalmente hacia el Cinca.

Esta zona es la que mayor porcentaje de averías por kilómetro produce, como puede verse en la figura 1.ª. Sin que ello pueda atribuirse exclusivamente a la naturaleza del terreno (más tarde hablaremos de la influencia de las líneas de fuga), ésta es, indudablemente, bastante desfavorable, ya que por la inclinación de los estratos yesíferos hacia el vecino Cinca (figura 4.ª), las filtraciones ven notablemente facilitado su camino.

En estos terrenos no creemos que pueda con propiedad hablarse de redes de filtración, ya que las filtraciones que han dado lugar a distintas averías aparecen con frecuencia en un mismo sitio, algo lejano del canal, a pesar de localizarse la grieta del revestimiento por la que escapan las aguas, en puntos distantes entre sí. Esto parece hablarnos de la existencia en los estratos de yeso de una red de conductos relativamente fijos y grandes que captan todas las filtraciones de una determinada zona; lo cual, por otra parte, parece lógico si se considera que el yeso compacto es impermeable.

2. *Yesos triásicos.* — Pasa por terrenos de este tipo el tramo comprendido entre los kilómetros 9,2 a 11,4, si bien parte de esta zona está cubierta por depósitos fluviales cuaternarios (figs. 4.ª y 5.ª). Estos yesos presentan las características típicas del keuper diapírico, es decir, están violentamente plegados, rotos y confusamente mezclados con margas que igual que ellos son de variados colores, predominando, por lo general, el rojo.

Las averías en esta zona también son frecuentes (figura 1.ª), salvo en la zona cubierta de cuaternario o donde el canal va en túnel o trinchera.

Es característica la gran fluidez de las arcillas del Keuper cuando se mojan, y, por tanto, los terraplenes construidos con estas arcillas precisan taludes muy tendidos para que sean estables. Tenemos un ejemplo en la curva situada en el kilómetro 10,600, en la ribera izquierda del barranco de Estadilla; el

en las dos anteriores y se dan especialmente en las zonas de derrubios de que en el párrafo siguiente hablaremos. Las filtraciones suelen aparecer cada vez en un sitio diferente y muy próximos del canal, al contrario que en los yesos de los kilómetros 7,3-9,2; quizá se deba a que el terreno es más accidentado y

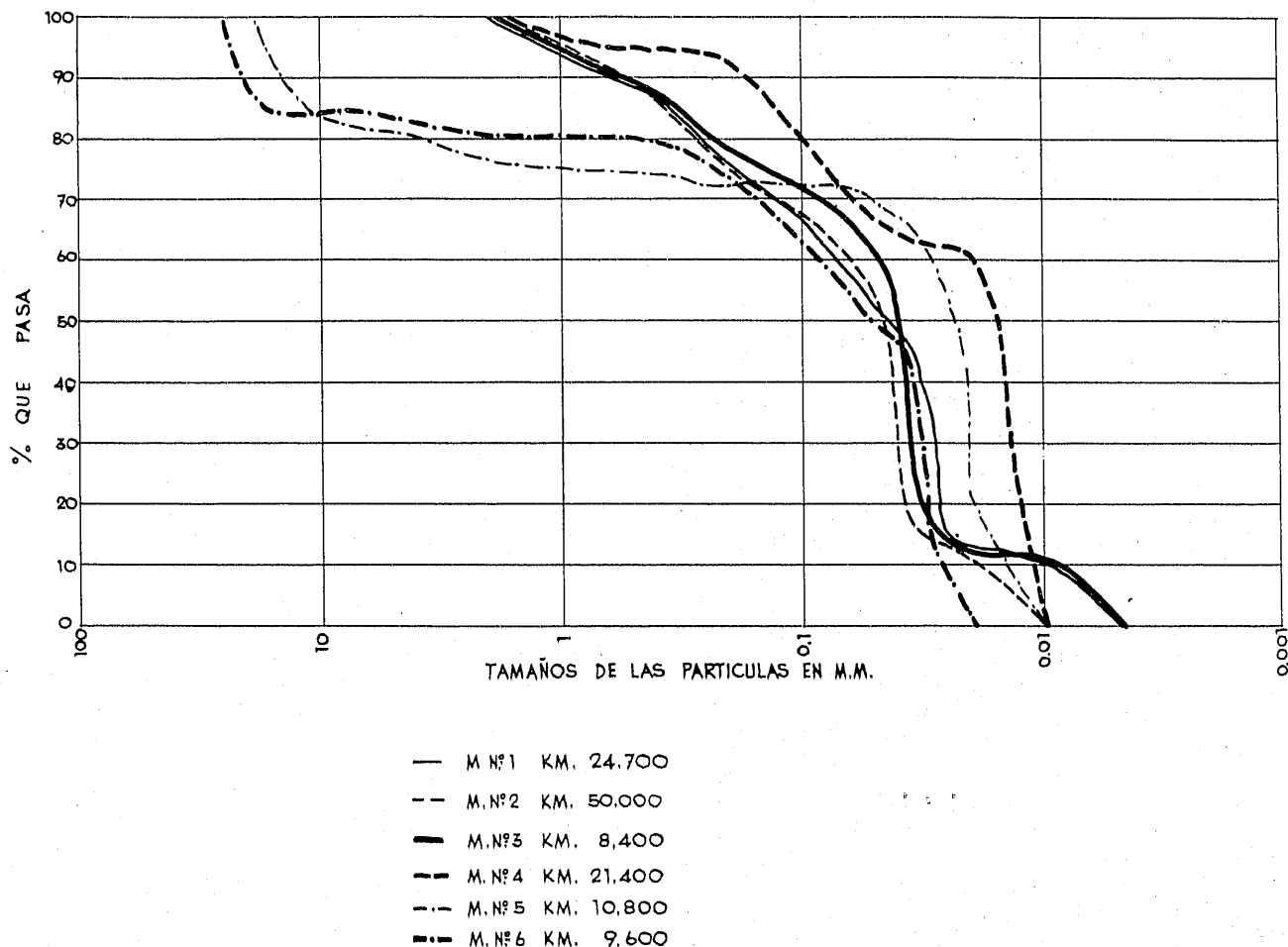


Fig. 11. — Curvas granulométricas de las muestras de tierras del Canal de Aragón y Cataluña.

canal va a media ladera y el terraplén del lado derecho, construido con los productos de la excavación del izquierdo, fué objeto de constantes reparaciones hasta que se decidió sustituirlo por unos contrafuertes de hormigón cimentados con pilotes en la capa del Keuper seca y sin meteorizar.

3. *Yesos oligocenos plegados*. — Constituyen la sierra diapírica anticlinal que el canal atraviesa en la zona de Valfría-Caballos; presentan algunas intercalaciones margosas, pero pocas y de escasa potencia, sobre todo en comparación con los dos tramos anteriores.

Las averías en esta zona son menos frecuentes que

los estratos de yeso se encuentran tan desordenadamente plegados, que no hay ninguna dirección preferente de filtración.

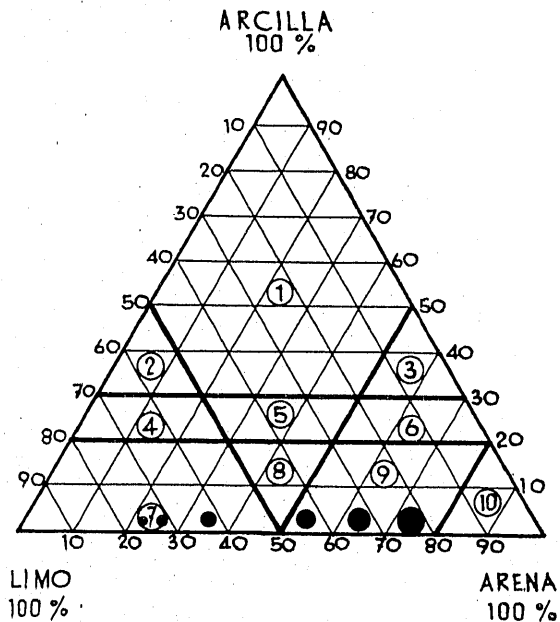
La traza del canal influye definitivamente en las averías, pudiendo decirse que en los túneles y trincheras, donde con seguridad no hay terrenos meteorizados y las líneas de fuga son largas, nunca hay averías.

4 y 5. *Derrubios de meteorización*. — Vamos a estudiar bajo esta denominación a los terrenos inconsistentes, formados esencialmente por partículas de calizas y margas con una proporción de yeso que no llega al 5 por 100 y que están formados por productos

de la meteorización de los terrenos antes estudiados, arrastrados por las aguas de escorrentía y acumulados en el fondo de los barrancos. Los que proceden de los

lizados para el proyecto de un acueducto demuestran un espesor de acarreo de algo más de 15 metros.

Son, sin duda, los terrenos más peligrosos, y los



ARENA: $0,06 \text{ M.M.} < d < 2,0 \text{ M.M.}$
 LIMO: $0,02 \text{ M.M.} < d < 0,06 \text{ M.M.}$
 ARCILLA: $d < 0,002 \text{ M.M.}$

- | | | | |
|---|-------------------------|---|--------------------------|
| ① | ARCILLAS | ⑥ | TIERRAS ARENO-ARCILLOSAS |
| ② | » LIMOSAS | ⑦ | » LIMOSAS |
| ③ | » ARENOSAS | ⑧ | » |
| ④ | TIERRAS LIMO-ARCILLOSAS | ⑨ | » ARENOSAS |
| ⑤ | » ARCILLOSAS | ⑩ | ARENAS |

- | | |
|---------|---|
| M. N° 1 | • |
| M. N° 2 | • |
| M. N° 3 | • |
| M. N° 4 | • |
| M. N° 5 | • |
| M. N° 6 | ● |

Fig. 12. — Clasificación de las muestras de tierras del Canal de Aragón y Cataluña.

yesos oligocenos recordamos que suelen ser denominados en el país con el nombre de "tierra blanca".

Su espesor sobre el fondo de los barrancos es muy variable y lógicamente depende de las dimensiones del valle. En el barranco de Valfría, los sondeos rea-

encontramos en los tres tramos citados anteriormente, sobre todo en el de Valfría-Caballos y sobre las areniscas y arcillas del oligoceno de facies normal, a la salida de los barrancos procedentes de la sierra yesosa anticlinal (figs. 8.^a y 9.^a).

Hemos incluido también en este grupo los derrubios triásicos, cuyas características son algo distintas a las de la "tierra blanca", por su mayor proporción de arcilla y por estar mezcladas con los materiales próximos cuaternarios de origen fluvial (figs. 4.^a y 5.^a). En realidad, el paso de los derrubios al terreno *in situ* es bastante difuminado. La presencia de la arcilla puede ser la causa de que en las averías de esta zona,

aunque tan frecuentes como en la inmediatamente anterior, los arrastres de terreno sean menores y, por consiguiente, las reparaciones más rápidas.

Hemos tomado muestras de estos terrenos, que han sido analizadas en el Laboratorio de la Confederación Hidrográfica del Ebro, y los resultados pueden verse en el cuadro siguiente y en las figuras 11 y 12:

TERRAS DEL CANAL DE ARAGÓN Y CATALUÑA.

Resultado de los ensayos (según las Normas MELC 16.01-a) efectuados en el Laboratorio Central de la Confederación Hidrográfica del Ebro.

MUESTRA N.º	GRANULOMETRICO POR SEDIMENTACION			Sulfatos en SO ₄ Ca %	Cloruros en ClNa %	Clasificación
	2-0,06 Arena %	0,6 - 0,002 Limo %	0,002 Arcilla %			
1. Kilómetro 8,4	25	75	0,0	4,8	0,9	Loam-Limoso.
2. Kilómetro 50,0	26,9	73,1	0,0	3,6	0,46	»
3. Kilómetro 24,7	33,68	66,32	0,0	4,6	0,70	»
4. Kilómetro 21,4	49,4	50,6	0,0	3,8	0,306	»
5. Kilómetro 10,8	62,5	37,5	0,0	6,63	0,78	Loam-Arenoso.
6. Kilómetro 9,4	73,7	26,3	0,0	1,53	0,204	»

Las tres primeras muestras corresponden a "tierras blancas" tomadas en los kilómetros 8,4, 50,0 y 24,7, respectivamente; es decir, a derrubios procedentes de los yesos oligocenos. La núm. 4 corresponde a un banco margoso interestratificado entre los yesos oligocenos en el kilómetro 21,4. La núm. 5, a derrubios triásicos en el kilómetro 10,800, y, por último, la núm. 6 a los sedimentos cuaternarios que atraviesa el canal a la salida del túnel núm. 9; es el tramo que estuvo bastante tiempo sin revestir en solera y en el que nunca ha habido averías.

Los análisis granulométricos han sido efectuados de acuerdo con la Norma MELC 16,01-a del Laboratorio Central de Ensayo de Materiales de Construcción de Madrid. Como puede verse en la figura 12, las cuatro primeras muestras quedan clasificadas en el grupo de las tierras limosas y las dos últimas en el de las tierras arenosas. La arcilla no está presente, según los resultados, en ninguna de las muestras, pero, probablemente, esto no es cierto, especialmente en la muestra núm. 5, ya que es difícil que las arcillas triásicas no estén representadas en estos derrubios. Hay que tener en cuenta (ver Jiménez Salas, 1954, páginas 23 y 24) que los resultados vienen con seguridad algo falseados, por la acción coagulante del sulfato cálcico y de la todavía mucho más abundante caliza que no fué previamente destruída con ClH.

Como se ve, la composición de las tres primeras

muestras es extraordinariamente similar. El menor porcentaje en SO₄Ca de la segunda es lógico, si se considera que está tomada más lejos de la roca madre yesífera que las otras dos. La cuarta muestra se tomó para explicar el origen de las componentes calizas y margosas de las tres primeras muestras; la mayor abundancia de limo en las tres primeras muestras, en comparación con la cuarta, quizá pueda explicarse por la acción de la meteorización, reductora del tamaño de las partículas arenosas.

La abundancia de arenas de la muestra núm. 5 puede explicarse por la abundancia de los depósitos cuaternarios a que antes aludimos y de los cuales se tomó la muestra núm. 6.

El contenido de sulfatos no difiere mucho de unas muestras a otras. Es curioso que las tierras arenosas de los depósitos cuaternarios, a pesar de tener un contenido elevado de SO₄Ca (un 1,5 por 100), no hayan dado nunca lugar a averías.

En la foto núm. 10 puede verse el aspecto de la "tierra blanca" en contacto con los yesos *in situ*.

* * *

¿A qué se deben las pésimas cualidades de la "tierra blanca" como elemento de sustentación del canal? Es difícil contestar a la pregunta, pues no conocemos ningún estudio acerca de este tema de algún especia-

lista de Edafología o Mecánica del Suelo. De todas formas, nos aventuramos a lanzar algunas hipótesis que no deben ser sobrevaloradas, ya que ninguno de nosotros es un especialista en suelos.

Es posible que la estructura de estos terrenos tenga un cierto parecido, por lo que respecta a sus cualidades técnicas con el Loess.

Son los norteamericanos y los rusos los que parecen tener más experiencia en construcción de canales en este tipo de terrenos. Traduzco a continuación unas

cubicar hasta 200 m.³, con relativa frecuencia. Cuando el revestimiento se rompe y parte de agua del canal sale fuera, los volúmenes de tierra arrastrados son muy superiores; por ejemplo, en la rotura del kilómetro 8,300, de 1953, el arrastre de tierras pasó de 2 000 m.³.

Si imaginamos que las partículas limosas y arenosas de la "tierra blanca" están ligadas con finos cristales de yesos procedentes de las aguas saturadas de SO₄Ca, podemos tener una posible explicación

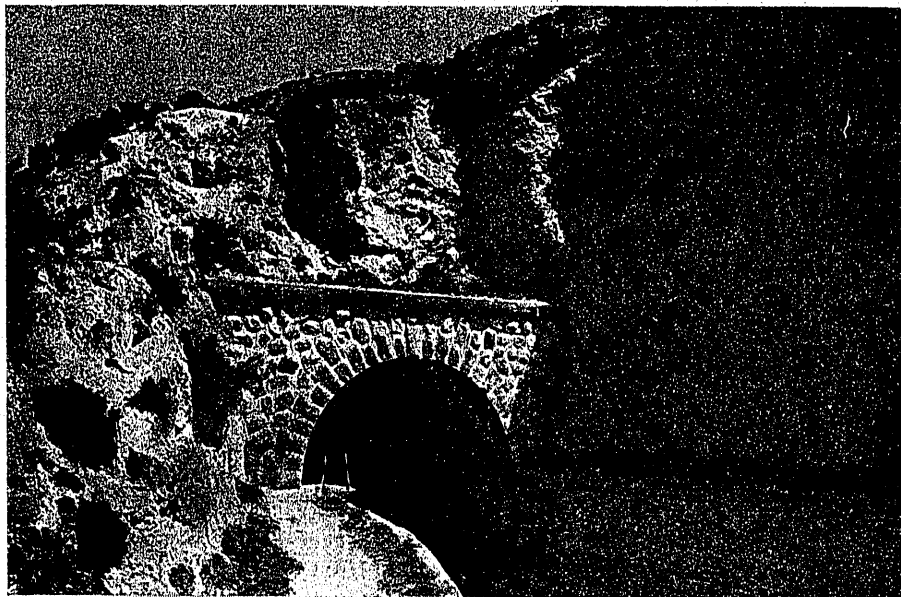


Foto 11. — Salida del túnel de Caballos. Observar la "tierra blanca" a la izquierda y los yesos *in situ* a la derecha.

líneas de Krynine (1957), pág. 108: "Otro inconveniente del Loess es su aptitud para formar galerías subterráneas bajo la acción del agua. Si el agua comienza a escapar de un canal, forma un pozo dentro de la masa del Loess, que progresa gradualmente y se ensancha, a menudo irregularmente, hasta que ocurre un hundimiento. Se conocen cavidades que alcanzan hasta los 3 m. de diámetro." Otro fenómeno interesante de los loess es su hidroconsolidación, es decir, su disminución de volumen al mojarse. Denisov (1957, pág. 163) habla sobre la hidroconsolidación producida por las filtraciones de los canales, y en una carta particular nos ha comunicado que en algunos canales rusos se producen por este motivo hundimientos que pueden alcanzar hasta 2,5 m. de profundidad.

Este fenómeno de la hidroconsolidación no parece producirse con tanta frecuencia en la "tierra blanca"; en cambio, su aptitud para formar conductos subterráneos es, quizá, mayor. Cuando aprovechando el corte invernal se repara el canal, es frecuente encontrar huecos bajo el revestimiento que han llegado a

de la profunda diferencia de cualidades que presenta la tierra blanca, según que esté seca o húmeda. El yeso vendría, en cierto modo, a representar un papel análogo a los puentes de CO₃Ca del loess.

De todas formas, esto no deja de ser una hipótesis sin demasiado fundamento; tanto más cuando hoy día parece estar en crisis la teoría de los puentes de CO₃Ca del loess (Krynine, 1957, pág. 107).

3. EL MOVIMIENTO DEL AGUA EN EL TERRENO CIRCUNDANTE AL CANAL.

Como ya hemos dicho más de una vez, los terrenos yesíferos, cualesquiera que sea de los tipos antes mencionados, nunca son peligrosos para las obras públicas si no están en contacto con agua en movimiento. El agua puede proceder del propio canal, de donde se fuga por las grietas del revestimiento, o de las corrientes subálveas originadas por la filtración de las aguas de lluvia. Vamos a estudiar el movimiento de cada uno de estos tipos de aguas por separado.

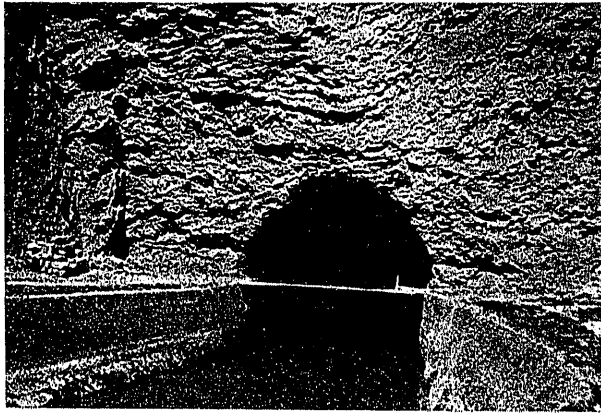


Foto 12.— Salida del túnel núm. 10. La resistencia de los yesos *in situ* permite no revestir la bóveda. En los túneles las averías son poco frecuentes.

A) La influencia de las aguas subálveas de origen pluvial.

Ya el primero de los firmantes de este estudio indicó, en 1957, que gran parte de las averías se producían en los tramos en que el canal cruza una vaguada. Por el fondo de estas vaguadas o barrancos, que como antes dijimos son las zonas donde se acumula la "tierra blanca", o los derrubios triásicos en los kilómetros 9,2 a 11,4, corre el agua caída en su mayor o menor cuenca de recepción. En las zonas de tierra blanca, muy rara vez, el agua corre por la superficie del tahlweg, sino que, debido a la permeabilidad de este terreno, desciende subálvea, bien sea a modo de lámina difusa, como pudiera correr en un depósito de limos y arenas de origen fluvial, bien canalizada en conductos subterráneos más o menos caprichosos. Tampoco sabemos si su caudal principal va en contacto con la roca *in situ* infrayacente, ya sean los yesos, areniscas o arcillas, o bien las capas inferiores de "tierra blanca", se han compactado tanto por el peso de las capas superiores, como para ser prácticamente impermeables. Pero sea por un procedimiento u otro, el hecho fundamental es que se producen arrastres de terreno que dan lugar a pequeños asientos superficiales que pueden ser el origen de grietas en el revestimiento del canal y de que entre en juego, de la forma que luego estudiaremos, el agua del canal que por éstas escapa.

El Canal de Aragón y Cataluña pasa los barrancos rodeándolos a media ladera, en terraplén o en acueducto. Las dos primeras soluciones han dado lugar a importantes roturas.

Cuando el canal cruza un barranco a media ladera, se suele dar un paso, inferior al canal, a las aguas de dicho barranco haciendo una simple alcantarilla; pero nunca se hicieron sistemas de drenaje que hiciesen pasar canalizadas bajo dicha alcantarilla las aguas subálveas que descienden por el barranco. Han sido

especialmente importantes las averías del barranco del Resol (kilómetros 8,0 a 8,4), que han determinado la construcción de un gran acueducto para abandonar el tramo a media ladera (ver foto núm. 13).

Las averías en el canal, en las zonas en que corre sobre la "tierra blanca" de los conos de deyección que, procedentes de los barrancos de la zona de yesos basales, cubren el oligoceno de facies normal, son bastante frecuentes, como puede verse en la figura 1.ª, y dieron lugar a la construcción de las "cubetas armadas". Para apercibirse de cómo las averías son causadas inicialmente por las aguas subálveas, basta observar en la figura 8.ª cómo los tramos de cubeta armada coinciden sensiblemente con la desembocadura de los actuales barrancos procedentes de los yesos basales sobre la llanura del oligoceno de facies normal. La frecuencia de la avería depende de la distribución de la tierra blanca, del caudal del barranco, que es, a su vez, proporcional a la cuenca de recepción, y de la proximidad del canal a la desembocadura del barranco, ya que, lógicamente, el agua en dicho punto se dispersa en abanico y su acción erosiva subterránea es cada vez menor.

De todas formas, no hace falta pensar en grandes barrancos como el de Valfría o el del Resol, o los de la zona Albelda Coll de Foix, para que ocurran averías. Es frecuente el hecho de que los accesos a los túneles, con objeto de abreviar la longitud del túnel, vayan un trecho más o menos largo por el fondo de un pequeño barranco que, como antes dijimos, suelen estar cubiertos de "tierras blancas". Pues bien, esos accesos, salvo en el tramo en trinchera (véase, por ejemplo, el túnel núm. 15), suelen ser zonas de averías, si bien hay que tener en cuenta también la influencia desfavorable de la galería de drenaje del túnel, que suele ir durante cierto tramo bajo la solera del canal, aun después de abandonar el túnel.

Los terraplenes, en general, han dado mal resultado, debido en buena parte a los rudimentarios conocimientos de la mecánica del suelo que se tenían a principios de siglo. Normalmente, los terraplenes se hacían con los productos yesíferos de las excavaciones más próximas y sin compactar apenas. En el tramo de Valfría-Caballos todos los terraplenes fueron abandonados y sustituidos por acueductos en el año 1912, con excepción del terraplén de Valfría, que ha dado lugar a algunas averías importantes. En la zona yesífera superior se conserva el terraplén del barranco de Estadilla, que aguanta bastante bien, posiblemente debido a que en su construcción se emplearon tierras de los inmediatos depósitos cuaternarios.

Los acueductos no han dado lugar a la menor complicación y solamente cuando las cimentaciones de las pilas no descendieron a la roca *in situ*, ha sido después necesario recalzarlas hasta alcanzar dicho cimiento firme. En cambio, los terraplenes de acceso a los acueductos suelen ser puntos peligrosos.

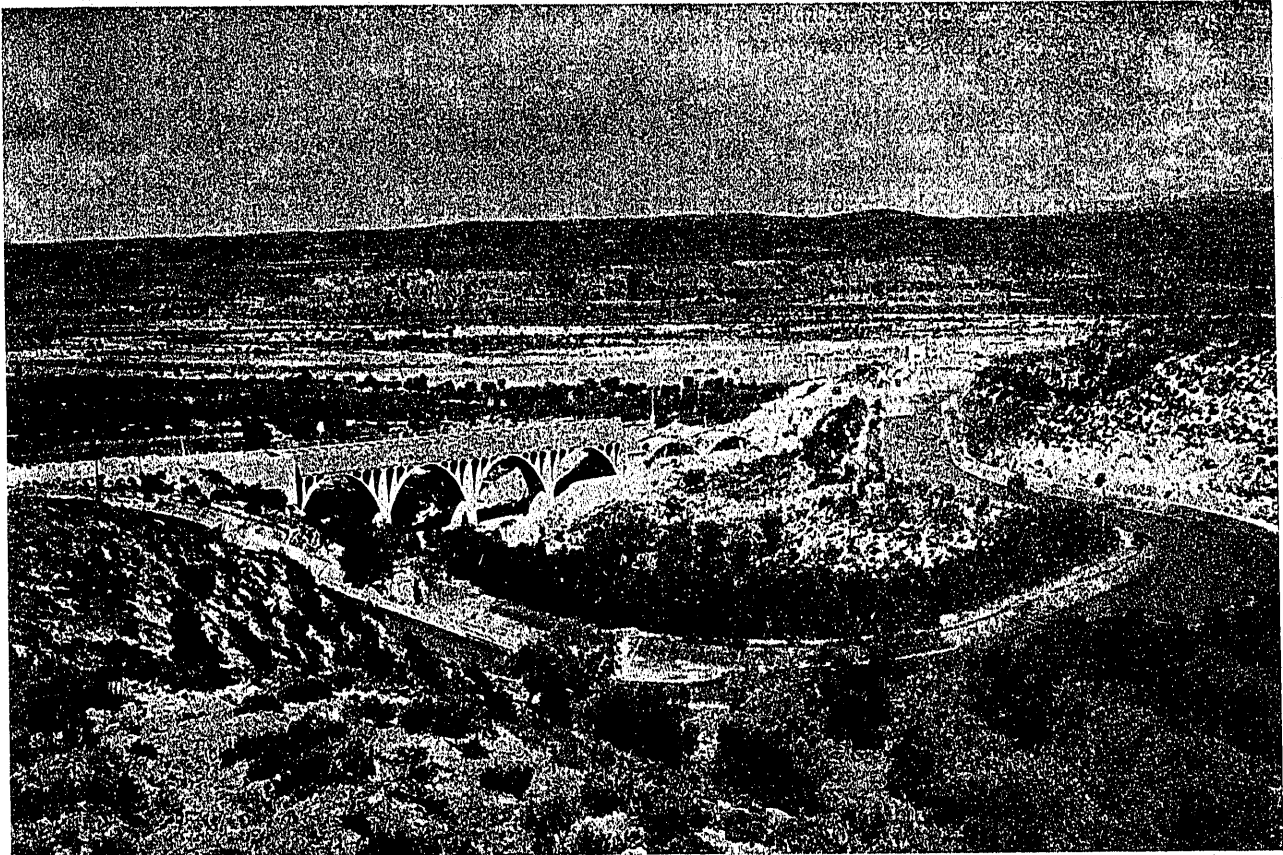


Foto 13.—Barranco del Resol. Zona de frecuentes e importantes averías, que han motivado la ejecución de un importante acueducto todavía en construcción.

B) *La influencia de las aguas del Canal.*

Las líneas de fuga no son siempre la causa inicial de las averías, como ya hemos visto, pero sí las que coronan el proceso destructivo y los agentes de transporte de la mayor parte de los volúmenes de terreno arrastrados. Podría decirse que si consiguiésemos un revestimiento perfectamente impermeable y suficientemente elástico para amoldarse a los pequeños asientos originados por las aguas exteriores, los canales en terrenos yesíferos apenas tendrían más problemas que los que marchan por terrenos normales. Pero éste es un desiderátum, hoy por hoy, no conseguido. En el apartado siguiente estudiaremos los revestimientos utilizados en el Canal de Aragón y Cataluña, pero antes vamos a considerar la influencia que tiene el tipo trazado del canal en el caudal de las filtraciones.

No creemos que sea de interés el hacer una aplicación a nuestro caso de la teoría de las redes de filtraciones, ya que ésta sólo tiene un valor práctico cuando se trata de terrenos isotropos o de casos de anisotropía muy sencillos, como suelen ser, por ejemplo, las presas de tierra. Ni siquiera en el caso de

que todo el canal fuese en "tierra blanca", el trazado teórico exacto de las líneas de filtración tendría interés, ya que las aguas filtradas suelen circular no de una manera difusa sino canalizadas por conductos invisibles exteriormente y suelen aflorar en un punto muy concreto y localizado.

De todas formas, a la vista de la figura 13, vamos a hacer algunas consideraciones teóricas de tipo cualitativo. Las aguas que pasen a través del revestimiento tenderán a reunirse bajo solera, y si no encuentran camino fácil a lo largo del eje del canal, buscarán los puntos bajos más próximos a través del terreno inmediato. Si éste es totalmente impermeable, los pequeños huecos entre el revestimiento y el terreno se llenarán rápidamente de agua y el canal no continuará perdiendo agua. Pero la realidad es que el terreno inmediato siempre filtra algo, el caudal que puede filtrarse a través de dicho terreno depende esencialmente de dos factores: 1) De su permeabilidad. 2) Del gradiente hidráulico de las líneas de fuga.

Es evidente que las secciones del canal a media ladera; es decir, parte excavada y parte en terraplén, son mucho más desventajosas, ya que casi siempre tendrán parte de su revestimiento en contacto con

terrenos meteorizados y sueltos, y además, su gradiente hidráulico, que podemos suponer *grosso modo* igual a

$$\frac{C_1 B_1}{A B_1}$$

siempre será mayor que el de la sección en desmonte igual a

$$\frac{C_2 B_2 = C_1 B_1}{A B_2}$$

Además, la sección en desmonte prácticamente nunca tendrá terrenos sueltos meteorizados en contacto con

4. REVESTIMIENTOS ENSAYADOS.

Vamos a tocar este tema con especial brevedad, ya que ha sido tratado detalladamente, como ya hemos dicho, por Hué Herrero (1957) con anterioridad, y a dicha publicación deberá acudir el que desee conocer con más precisión los revestimientos ensayados en el Canal de Aragón y Cataluña.

Una buena parte de los tramos del canal que discurren por las arcillas y areniscas del oligoceno de facies normal están todavía sin revestir, como puede verse (fig. 4.^a) y no han dado lugar prácticamente a problemas.

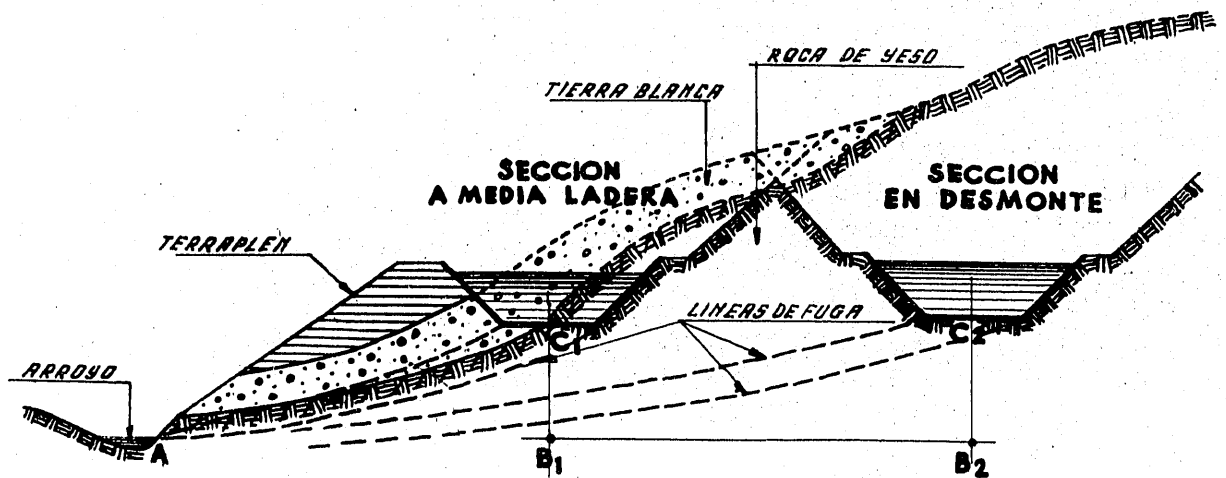


Fig. 13. — Sección.

el revestimiento. Si en vez de un pequeño desmonte se trata de una trinchera o túnel, las condiciones son más favorables, ya que el gradiente hidráulico de las líneas de fuga, de no existir drenajes o corrientes subterráneas, será indudablemente menor.

La estadística de las averías (fig. 1.^a) comprueba plenamente las anteriores consideraciones. En los tramos a media ladera comprendida entre los kilómetros 7,5 y 11,4, las averías han sido constantes. En los tramos del kilómetro 59 al 65, el canal va en desmonte pero sobre tierra blanca, y la mayor longitud de las líneas de fuga queda desfavorablemente compensada por la mayor permeabilidad del terreno y por la influencia de las aguas subálveas, como anteriormente vimos. En cambio, en los tramos en trinchera (foto núm. 12) o túnel del Keuper o de los yesos oligocenos, casi nunca ha habido averías. Es más, en dos tramos de trinchera en yesos y margas triásicas estuvo sin revestir la solera durante un período superior a diez años.

El primitivo revestimiento de mampostería de arenisca o conglomerado calizo se conserva en muchos tramos; pero en aquellos en que las averías eran frecuentes, fué sustituido por hormigón, o al menos cubierto con un enlucido armado con varillas de hierro y tela metálica. En cambio, el revestimiento de hormigón en el túnel de Caballos fué sustituido por uno de mampostería caliza, que ya fué detalladamente descrito al hablar del problema de la agresividad química.

Los revestimientos de hormigón han sido en las zonas peligrosas protegidos con un enlucido de mortero de cemento análogo al antes mencionado para la mampostería. En algunos sitios, anteriormente a este enlucido armado, se puso uno a base de tela alquitranada protegida con un mortero de cemento; pero esta solución resultó poco satisfactoria.

La solución de la capa de arcilla (fig. 14) bajo el revestimiento de hormigón ha sido utilizada en un corto tramo de la zona de Valfría-Caballos, con buen

SECCION A-B

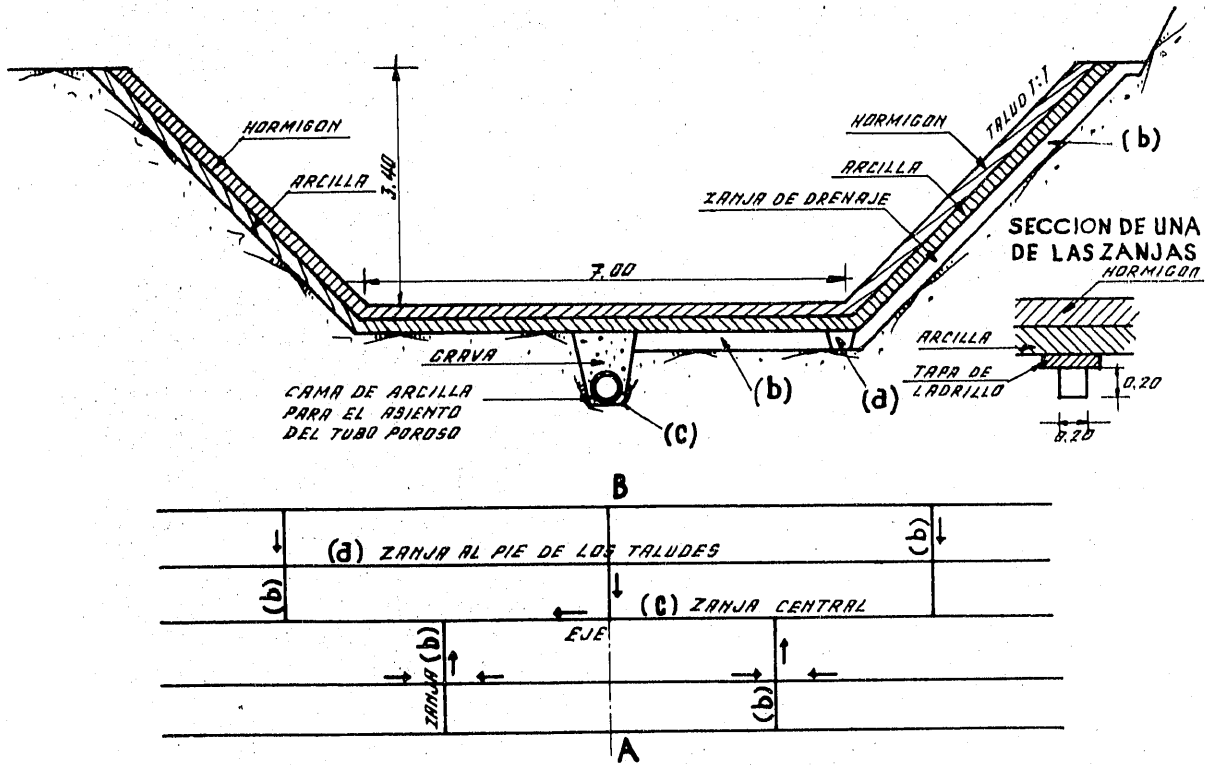


Fig. 14. — Revestimiento de hormigón y arcilla en el kilómetro 24 del Canal de Aragón y Cataluña.

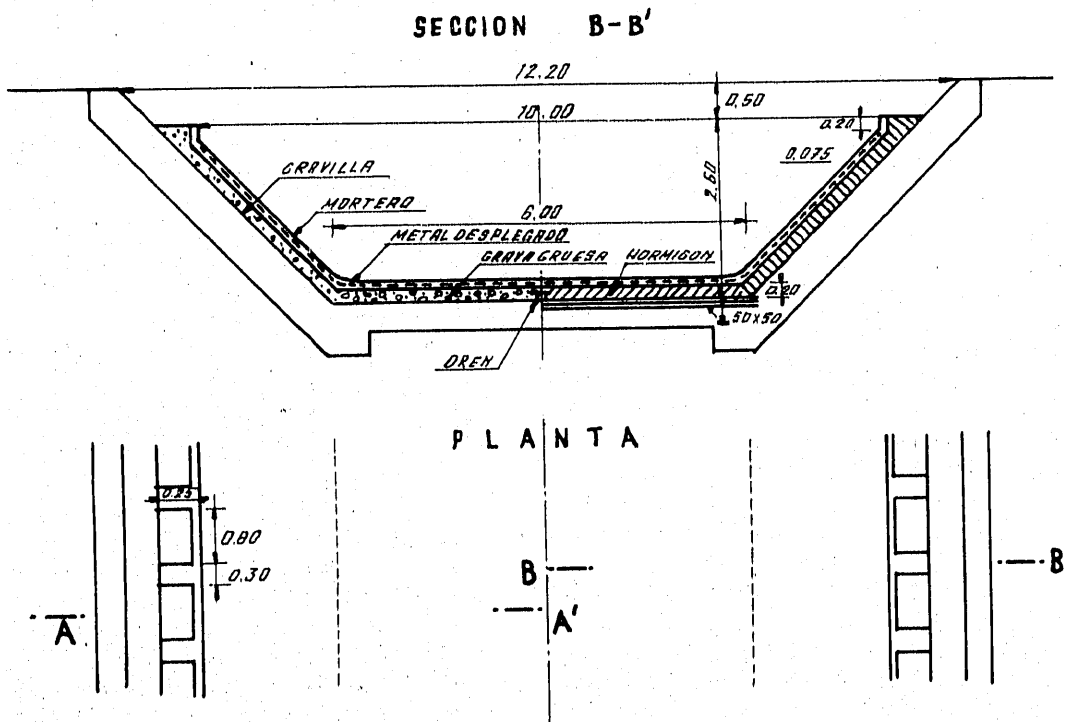


Fig. 15. — Revestimiento de cubeta armada en la zona de Albelda, del Canal de Aragón y Cataluña.

resultado. No obstante, la zona de ensayo es demasiado corta para sacar conclusiones generales acerca de la bondad de este revestimiento. Por otra parte tenemos noticias de que revestimientos análogos en terrenos yesosos han fracasado.

El ingenioso procedimiento de la "cubeta armada" (fig. 15) prestó eficaz servicio durante cerca de veinticinco años, pero hoy, su actuación, debido a la colmatación de la capa de grava de drenaje, puede considerarse como contraproducente y se está sustituyendo por un revestimiento de hormigón corriente, directamente apoyado sobre el terreno y protegido con un enlucido armado.

Conviene advertir que en todos estos revestimientos ni existen juntas de dilatación ni la ejecución recibió ningún especial tratamiento. Sin embargo, no creemos que pueda atribuirse a las fisuras originadas por los esfuerzos térmicos, una parte importante de las filtraciones, sobre todo en aquellos tramos en que existe el enlucido armado con tela metálica, donde dichas fisuras quedan notablemente aminoradas.

Los revestimientos de los túneles ya fueron descritos al hablar del ataque químico.

El tema de los drenajes creemos que merece ser tratado con un poco más de extensión. Los drenajes construidos en el Canal de Aragón y Cataluña persiguen uno de los dos objetivos siguientes: a) Impedir que los posibles filtraciones a través del revestimiento circulen anárquicamente por el terreno circundante. b) Evitar, cuando las aguas del terreno sean agresivas, que dichas aguas entren en contacto con el revestimiento (caso de los túneles números 10 al 15). En ambos casos la solución adoptada consiste, en esencia, en poner una capa o unos conductos permeables de grava que capten las posibles filtraciones y las dirijan a un conducto central por el que sean evacuadas hasta un punto del terreno alejado del canal, donde ya no pueda perjudicar.

El resultado de los drenajes sólo ha sido eficaz durante los primeros años de su funcionamiento. Las capas de grava se han colmatado parcialmente, bien sea por los arrastres del canal o de los terrenos circundantes, como el caso de las "cubetas armadas", o por la precipitación de las sales de las aguas del terreno, como en el caso del túnel 10. Las galerías o tuberías de drenaje se han obstruido o roto por las mismas razones o a causa de los asientos del terreno, y las aguas, más que por ellas, circulan por las zonas inmediatas efectuando una constante labor de disolución y arrastre del terreno. A esta labor destructiva se atribuyen las roturas frecuentísimas que se producen a las salidas de los túneles 10 y 15, donde las aguas que vienen por los alrededores de las galerías de drenaje entran en contacto con las tierras blancas del fondo del barranco, por el que se trazaron los accesos a los túneles.

Parece, pues, evidente que la construcción de drenajes del tipo anteriormente señalado es contraproducente; solamente en el caso de galerías fácilmente visitables y cuidadosamente conservadas podría pensarse en que fueran eficaces, pero aun en este caso pensamos en que daría más resultado el procurar, mediante inyecciones, por ejemplo, mantener el revestimiento en íntimo contacto con el terreno. De esta forma, las aguas no tendrán fácil camino a lo largo del

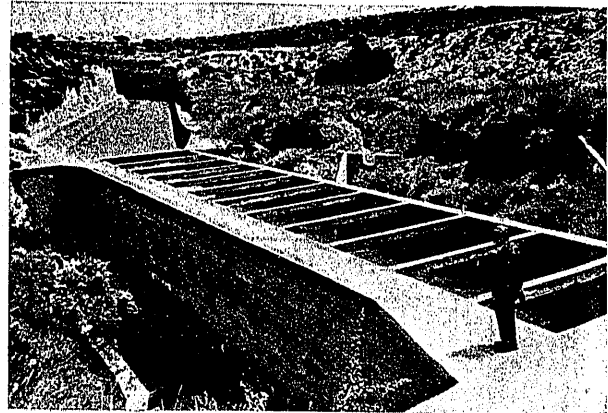


Foto 14. — Acueducto típico del tramo Valfría-Caballos. En estas estructuras, construidas en 1912, nunca ha habido averías.

eje del canal y siendo las líneas de fuga largas, las filtraciones serán muy pequeñas.

Los únicos tramos del canal en terrenos yesíferos que no han sido motivo de preocupación han sido los cinco acueductos de hormigón armado que se hicieron en sustitución de algunos terraplenes en la zona de Valfría-Caballos (foto núm. 14). Su único inconveniente es su coste elevado. El buen resultado de los acueductos fué la razón por la que Hué Herrero proyectó una solución similar en el año 1956 para las variantes de la zona Valfría-Caballos y la de Estada-Notguera, cuyos trazados pueden verse en las figuras 4.^o y 6.^o. La solución detallada en las figuras 16 y 17 consisten esencialmente en un acueducto continuo de hormigón en masa cimentado sobre pilas de mampostería de cal. Para su descripción detallada, ver el trabajo repetidamente citado del primero de los autores de estas líneas. La solución indudablemente es la más segura y casi con seguridad definitiva, siempre que se continúe manteniendo una cuidadosa vigilancia, como se hace hoy día. No tiene otro inconveniente que su precio, muy elevado en comparación con la solución clásica. Después de realizado este estudio, pensamos que su costo podría disminuir algo haciendo secciones análogas a las actuales, pero sin drenaje, en aquellos túneles o tramos de túnel en los que la roca de yeso apareciese seca y consistente. El riesgo de averías, teniendo en cuenta todo lo dicho anteriormente, no parece aumentar prácticamente nada.

5.º LAS INYECCIONES.

En vista de los resultados favorables que parece haber dado en otros canales en análogas circunstan-

El sistema consiste en hacer unas perforaciones cada dos metros y medio en el terreno por detrás del revestimiento y paralelas a éste. En estas perforaciones se inyecta por su propio peso o con pequeña pre-

SECCION TRANSVERSAL

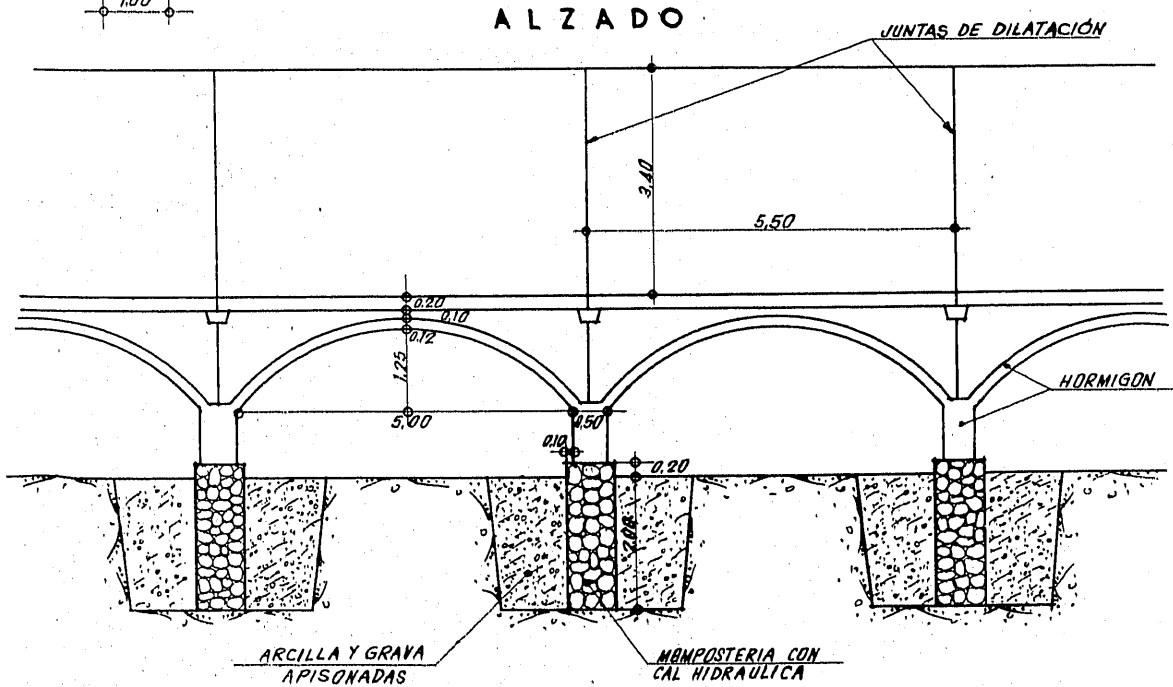
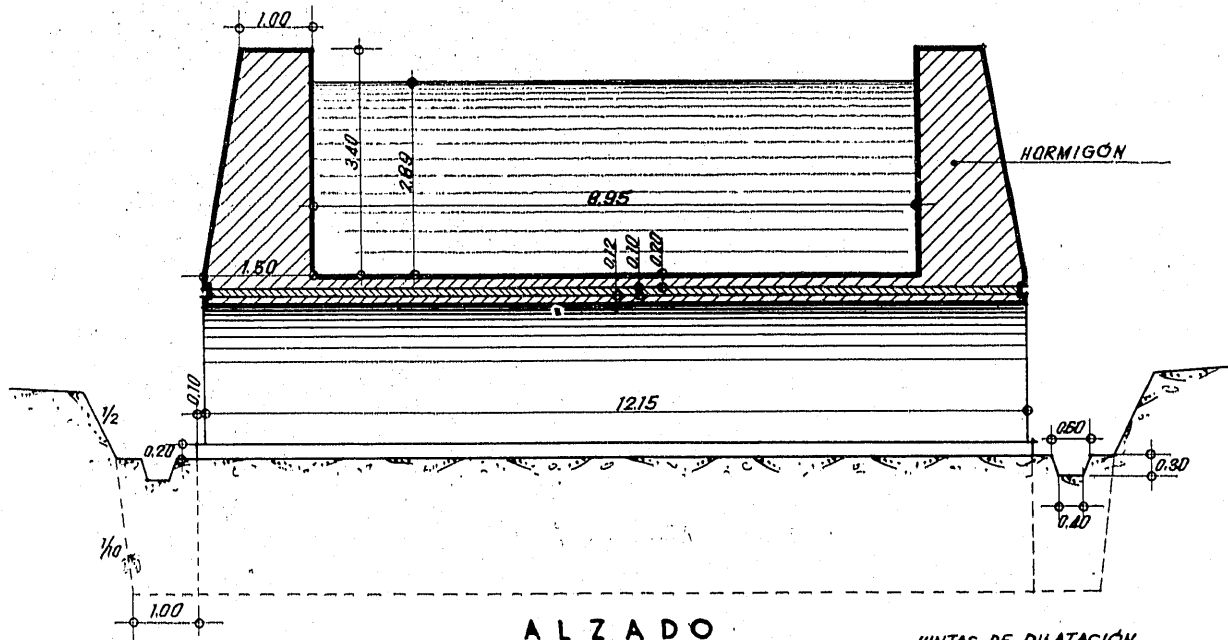


Fig. 16. — Sección rectangular sobre bovedillas en terreno de yeso, proyectada para el Canal de Aragón y Cataluña.

cias el sistema de inyecciones de arcilla estabilizada con cemento siderúrgico, se decidió ensayarla también en este canal.

Una mezcla de tres partes de arcilla y una de cemento siderúrgico.

Como anteriormente dijimos, la aplicación del sis-

tema está todavía realizándose y no tenemos experiencia suficiente para poder formular una opinión definitiva. Sin embargo, vamos a adelantar algunas sugerencias provisionales (*), mejor o peor fundamentadas. El procedimiento, que es caro, no parece ser definitivo. Los derrumbios anteriormente estudiados no admiten apenas inyección, a no ser que haya un hueco o caverna, y tampoco, con mayor razón, la roca *in situ*. Es decir, que con este sistema casi solamente

riodicidad y posiblemente bajo estas condiciones sea más económico y, desde luego más seguro, el construir las variantes proyectadas en 1956.

En cambio, puede decirse que las inyecciones parecen mostrarse como un gran procedimiento — hay ya experiencia de varios casos — para atajar las filtraciones, siempre que no sean muy grandes, y sin necesidad de cortar el agua del canal, lo cual supone una enorme ventaja para la explotación.

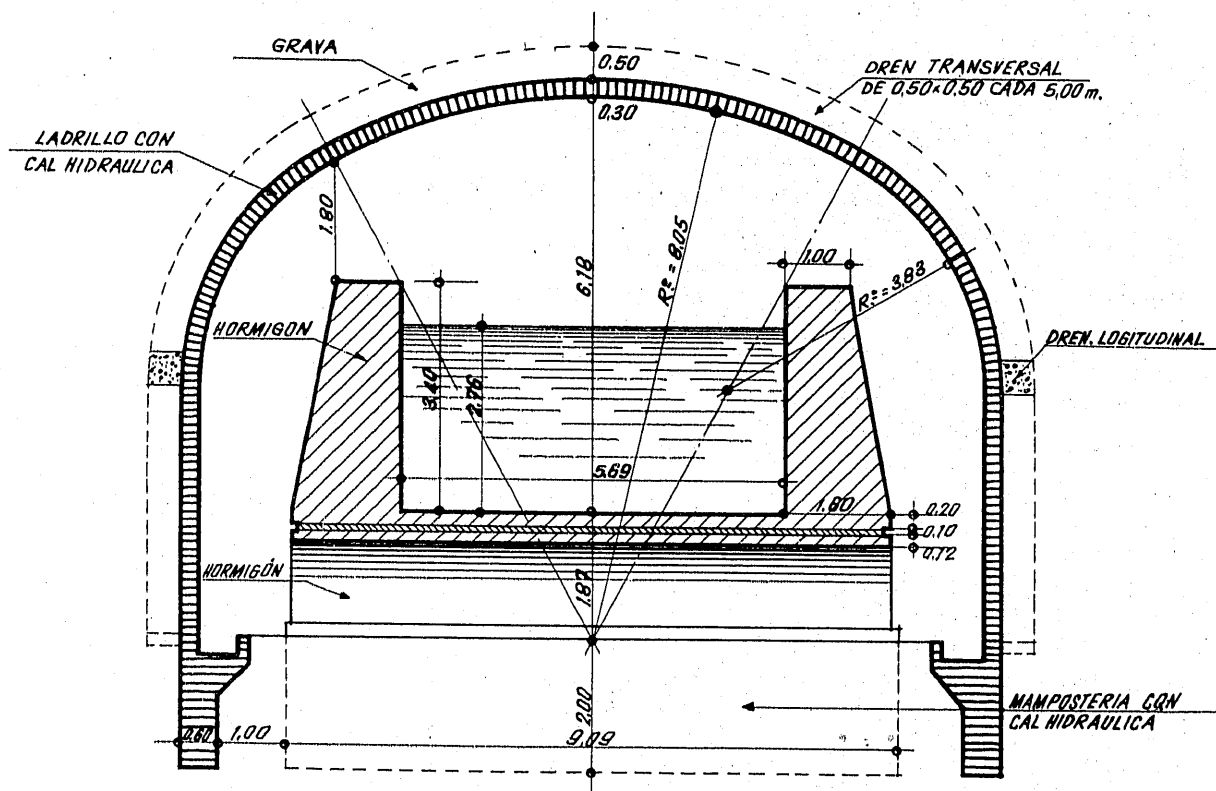


Fig. 17.— Sección con bovedillas dentro de túnel en yeso, proyectada para el Canal de Aragón y Cataluña.

se puede aspirar a rellenar los huecos existentes actualmente. Cuando cada año, en el corte invernal, se repara el canal, es corriente detectar por sondeo acústico, al menos dos o tres cavernas de más de 100 m.³ bajo el revestimiento, intacto; indudablemente, estas cavernas se han formado en un plazo inferior a un año, ya que no fueron localizadas en la revisión anterior. Lo cual quiere decir que, para que el sistema inspire confianza habría de repetirse con cierta pe-

(*) La Jefatura de Sondeos del Ministerio de Obras Públicas publicará en breve plazo un extenso informe sobre las inyecciones efectuadas recientemente en los tramos yesíferos de los canales de la Violada y Monegros. La validez de nuestras tímidas sugerencias al hablar de este procedimiento de consolidación del terreno, queda supeditada a su concordancia con las conclusiones formuladas por los ingenieros de la Jefatura de Sondeos.

IV. Conclusiones.

Vamos a reunir en este último apartado aquellas conclusiones que se deducen con más evidencia de las anteriores observaciones del comportamiento del Canal de Aragón y Cataluña durante su media centuria de azarosa vida.

1. La agresividad química solamente se ha manifestado con carácter peligroso en dos túneles en los que afloraban aguas con gran contenido de sulfatos. Dichos manantiales pueden, hasta cierto punto, preverse teniendo en cuenta la topografía de la zona subyacente al túnel.

2. Los terrenos procedentes de la meteorización de las rocas yesíferas son mucho más peligrosos que la misma roca-madre.

Las vaguadas o barrancos en que se acumulan di-

chos terrenos es conveniente cruzarlos con acueductos cimentados en la roca yesífera sin meteorizar, al precio que sea.

4. Hay que tener en cuenta la estratificación de los estratos yesíferos; puede ser especialmente desfavorable, como vimos en el tramo 8,500-9,200.

5. No hacer nunca los accesos a los túneles, con abjeto de acortar su longitud, por el *thalweg* de un barranco, aunque no sea grande; es zona de acumulación de derrubios.

6. En los túneles es más seguro, siempre que la consistencia del terreno lo permita, no revestir la bóveda. Además, es más económico. En caso de revestir, es preferible, si es suficiente hacerlo a base de arcos sueltos en vez de una bóveda continua. Así es más fácil controlar las aguas agresivas.

7. En los túneles, si la roca está seca, el drenaje es, con seguridad, inoportuno. Lo mejor es inyectar entre el revestimiento y la roca para que no queden huecos que faciliten la marcha de las filtraciones bajo la solera.

8. Si en la excavación aparecen manantiales de aguas agresivas, aparte de usar cementos especiales, resistentes a las aguas sulfatadas, podría ser oportuno intentar captarlas con una galería transversal al eje del túnel o desviarlas lejos del túnel mediante una pantalla de inyecciones. El drenaje, casi con seguridad, sería contraproducente.

9. Las trincheras en yeso sin meteorizar son, por lo general, muy seguras.

10. Ningún revestimiento ensayado ha sido definitivo. Además de ser el más económico, parece dar mejores resultados el de hormigón de Portland cubierto con enlucido de mortero armado con varillas de tela metálica.

11. La solución más definitiva, y tal vez más económica a largo plazo, es el acueducto, pero quizá sea un lujo innecesario en las trincheras en yeso inicialmente seco.

Bibliografía.

- ALASTRUE, E.; ALMELA, A., y RÍOS, J. M.: "Explicación al mapa geológico de la provincia de Huesca". Inst. Geol. Min. Esp. Madrid, 1957.
- ALMELA, A., y RÍOS, J. M.: "Explicación al mapa geológico de la provincia de Lérida". Inst. Geo. Min. Esp. Madrid, 1947.
- CASAS TORRES, J. M.: "Unidad y variedad geográfica del valle del Ebro". Pub. Univ. Intern. Menéndez Pelayo. Santander, 1952.
- DIENISOV: "Propiedades de los suelos arcillosos con relación a la construcción y a su utilización en obras hidráulicas" (en ruso). Moscú-Leningrado, 1957.
- H. PACHECO, E.: "Los areniscos del alto Aragón y sus condiciones de resistencia a las acciones de la intemperie". *Ingeniería y Construcción*, 66, 587-594, 8 figuras. Madrid, 1927.
- HUÉ HERRERO, F.: "Canals problems in gypseous Soils". Therd Congres on Irrigation drainage. San Francisco, 1957.
- JIMÉNEZ SALAS, J. A.: *Mecánica del suelo*. Dossat. Madrid, 1954.
- KRYNINE, D. P., and JUND, W. R.: *Principles of Engineering Geology*. McGraw-Hill. London, 1957.
- RÍOS, J. M., y ALMELA, A.: "Estudio geológico de la zona subpirenaica aragonesa y de sus sierras marginales". Actas del primer Congreso Int. Est. Pirenaicos. T. II. Zaragoza, 1952, págs. 327-350.
- RÍOS, J. M.: "Algunas consideraciones acerca del enjuiciamiento del valle del Ebro en sus posibilidades petrolíferas". N. C. Inst. Geol. Min. Esp. núm. 53, páginas 107-148. Madrid, 1959.
- SÁENZ, C.: "Estructura general de la cuenca del Ebro". Est. Geográf. núm. 7, págs. 249-279. Madrid, 1952.
- SCHMIDT, R.: "Das Klima von Altkastilien und Aragonien auf Grund der Wetter Beobachtungen der Jahre 1906 bis 1925". Giesen, 1935. Trad. esp. Estudios Geográficos núms. 20-21, 1945.
- SOLÉ SABARIS, L.: *Geografía física de España*. Muntaner y Simón. Barcelona, 1955.
- VALDÉS, J. M.: "Los yesos en el terreno y su relación con las Obras Públicas". Boletín núm. 4 de la Jefatura de Sondeos, M. O. P. Madrid, 1958.