

GALERIA DE PRESION DEL CANAL DE EL ATAZAR (1.º SECCION)(*)

Por JOSE ROMAN SANCHEZ DE LA NIETA
Dr. Ingeniero de Caminos
y MIGUEL GARCIA MAYO
Ingeniero de Caminos

El presente artículo se refiere a la construcción de la conducción forzada del canal que, partiendo del embalse de El Atazar, sobre el río Lozoya, puede transportar el agua hasta el Depósito Intermedio de Torrelaguna, donde enlaza con la Segunda Sección del Canal del mismo nombre construida. La conducción forzada, de la que parte el canal en régimen de lámina libre hasta Torrelaguna, se compone de las siguientes obras: 1. Torre de toma en el embalse de El Atazar con tres tomas selectivas a distinto nivel. 2. Galería de presión de 3 393 m. de longitud sometida interiormente a 7 atmósferas de presión. 3. Dispositivo de regulación con rotura de carga para el transporte del agua por la conducción sin presión, y derivación para un aprovechamiento hidroeléctrico de una producción anual de 150 MKWh. Estas obras de construcción se están realizando por la agrupación de empresas constituidas por M.Z.O.V., ENTRECANALES Y TAVORA, S. A., DRAGADOS Y CONSTRUCCIONES, S. A., y se iniciaron en el mes de agosto de 1966, habiendo quedado perforada la galería en su totalidad en marzo de 1969.

La descripción total de la obra se dividirá en cuatro capítulos: I. Galería de presión. Excavación. II. Galería de presión. Revestimiento. III. Cámara de rotura de carga. IV. Torre de Toma.

I. GALERIA DE PRESION. EXCAVACION

1. Características de la galería.

Los motivos fundamentales que influyeron para definir la traza de la conducción forzada fueron dos: las posibilidades de ataque de la excavación, y la tectónica de la zona. Un trazado recto con dos ataques por los extremos, tenía el inconveniente de una acumulación de tajos en zonas muy reducidas con el consiguiente entorpecimiento, mientras que el trazado en V, incorporaba a la excavación dos ataques intermedios que han dado a la construc-

ción una gran agilidad, como veremos más adelante. Si ahora nos fijamos en la figura 1, observaremos que también tectónicamente esta última solución es la más favorable.

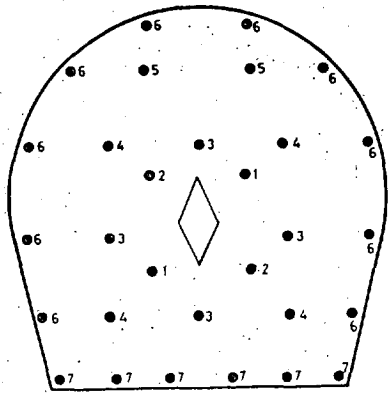
Quedó así definida la galería en una longitud total de 3 393 m. en tres tramos. Un primer tramo a partir de la torre de toma de 1 565 metros de longitud con 88 m. en galería de ataque; a continuación, un tramo entre ventanas de 176 m., y, por último, 1 652 m. hasta la cámara de rotura, con una galería de ataque de 58 metros.

Adoptada una sección de 3 m. de diámetro interior, se calculó una pendiente hidráulica me-

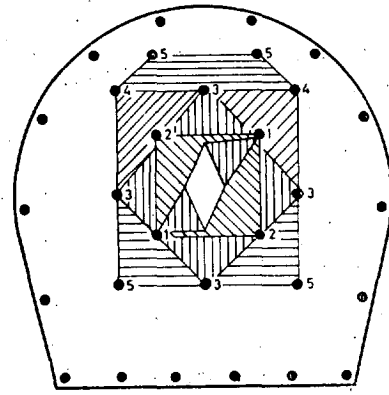
(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a esta Redacción hasta el día 28 de febrero de 1970.



Fig. 1.— Estudio geotécnico.

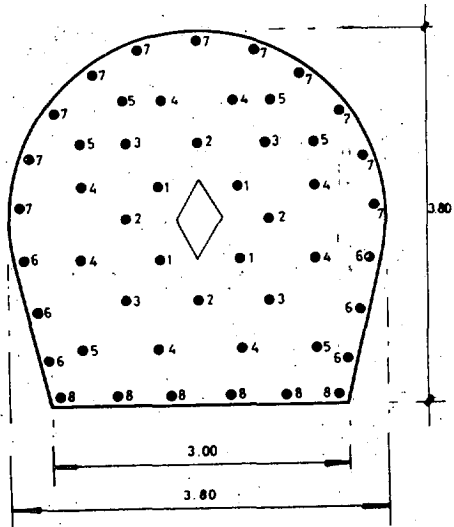
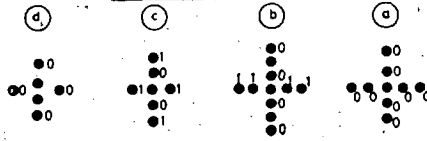


Roca blanda

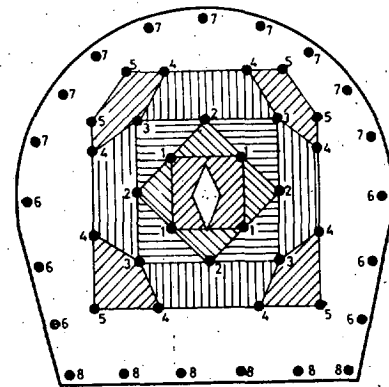


Roca blanda

C U E L E S



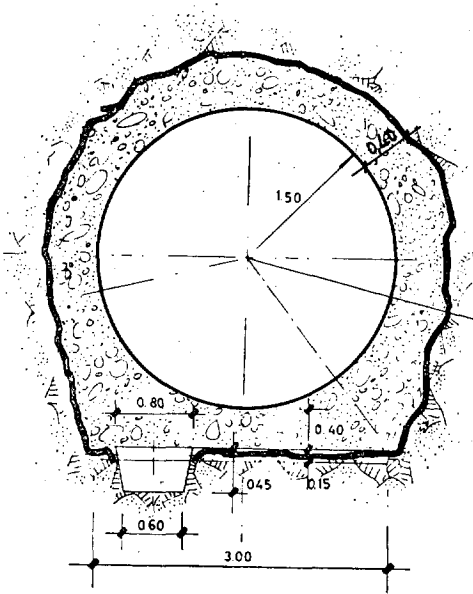
Roca dura



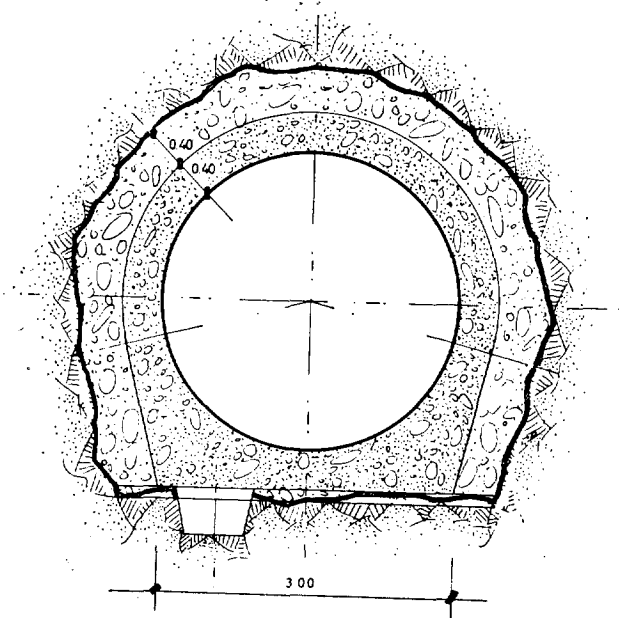
Roca dura

Fig. 2.— Esquemas de tiro.

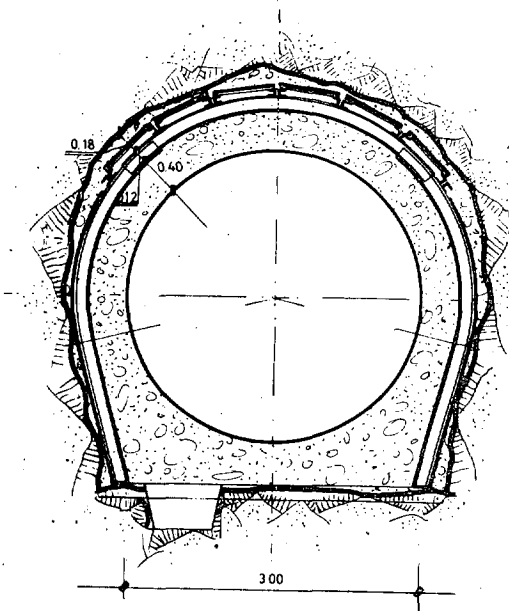
SECCION SIN ENTIBACION



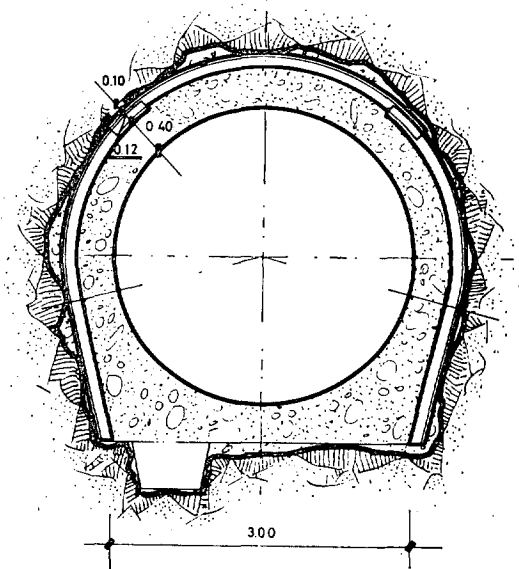
SECCION CON PREANILLO DE HORMIGON



SECCIONES CON ENTIBACION METALICA



Entibación con Marcos y piquetes metálicos



Entibación simple con Marcos metálicos

Figura 3.

dia de 0,001, que para caudales máximos de 16 metros cúbicos por segundo producía velocidades de 2,26 m./seg. La sección de excavación se proyectó en herradura, según las dimensiones de la figura 3, con una sección teórica de excavación de 12,21 m.².

2. Estudios previos: tectónica, litología y estratigrafía.

Prévio al proyecto, Ibérica de Estudios y Reconocimientos Geológicos, S. A., redactó un informe geotécnico del trazado del canal, y el Centro de Estudios Hidrográficos, una nota de su Laboratorio de reología y geotecnia sobre las características previsibles del terreno que atraviesa la conducción forzada, deducida de los ensayos que por entonces se realizaban en la cerrada de la presa de El Atazar. Asimismo, en la zona de conducción en galería forzada se hizo una prospección geofísica sísmica, realizada por Estudios Geofísicos en colaboración con la sociedad Rogers-France.

Posteriormente, la Sociedad de Reconocimientos Geofísicos, S. A., hizo una prospección geoelectrica de la traza, cuyos resultados figuran en los correspondientes planos de isorresistividades. Por último, se realizó una serie de sondeos mecánicos, localizados en puntos característicos, y que dieron mucha luz a lo largo de la excavación.

Resumiendo los informes geotécnicos, el primer fenómeno que se registra en la zona es una sedimentación de potentes capas arcillosas y arenosas durante el Silúrico, pero cuya edad es difícil de concretar por falta de restos fósiles; así, en un informe se inclinan por el Ordoviciense, y en otro, se habla de pizarras gothlandenses.

A continuación se observa el intenso plegamiento y metamorfismo de época hercínica, seguida de una intensa actividad petrogénica representada fundamentalmente por la inyección de masas graníticas, y el conjunto cristalino sufre una intensa erosión aérea que dura hasta el Paleozoico Superior.

Los siguientes ciclos epirogénicos se deben ya a las importantes transgresiones y regresiones del Cretáceo y al Terciario Lacustre. Partiendo de las facies wealdica compuesta por areniscas y arcillas abigarradas del Neocomiense se depositaron, durante el Albense, arcasas ama-

rillentas o blanquecinas debido a la regresión mesocretácica, y a continuación, las calizas y margas Turonense-Cenomanenses y las calizas silíceas Senomanenses, como consecuencia de la gran transgresión que ocupó el período que va del Cenomanense al Senonense, para terminar con las carníolas del Danense. Suprayacentes con el Cretáceo se sitúan en concordancia con una superficie de erosión y carentes de una disposición regular, dos capas paleógenas: las calizas pontienses y las margas yesíferas del Sarmantiense.

Durante las facies alpídicas tiene lugar el último episodio orogénico. El conjunto rígido reaccionó fracturándose en una serie de bloques. La cobertura sedimentaria se dobla en las zonas fracturadas en agudos pliegues o se inclinan siguiendo los basculamientos y desnivelaciones de los bloques sobre los que se apoya.

Con el Terciario Superior empieza una intensa erosión subaérea que barre la cobertura en amplias zonas y, salvo posteriores sedimentos aluviales, queda definitivamente a lo largo de la traza como sigue: la conducción forzada discurre toda ella por pizarras silúricas, mientras que el canal comienza en calizas cenomanenses sin variación, salvo afloramientos aislados de carníolas supracretácicas, hasta las proximidades de Torrelaguna, en que aparecen los yesos paleógenos.

Litológicamente ha podido observarse que las ventanas de ataque dividen a la traza en dos tramos totalmente diferentes. En el primer tramo, torre-ventana, las resistividades oscilan entre 500 Ω /ml. y 1 000 Ω /ml., que son las normales del macizo, salvo una resistiva muy localizada de 200 Ω /ml. marcando la última falla. En cambio, en el segundo tramo no alcanza la isorresistiva 50 hasta las proximidades de la cámara de rotura de carga.

El diagnóstico deducido de todo esto fue totalmente exacto; la conducción discurrió por dos tramos de distintas características: el primero fue un tramo muy rígido, formado por pizarras silíceas duras, mientras el segundo, muy deformable, estaba constituido por pizarras arcillosas con materia grafitosa y donde se encontraron filones de cuarzo normales a la foliación. El efecto de los movimientos orogénicos fue también diverso; la rigidez produjo grandes fracturas en cantidad y calidad, mientras en la parte deformable se tradujo en una fuerte compresión de la roca.

Las únicas dudas radicaban en las zonas falladas, por lo que se hicieron los sondeos mecánicos y el resultado fue lógico; en la zona rígida las fallas estaban abiertas y daban agua abundante, mientras en la parte deformable estaban cerradas y las bajas resistividades se debían a potentes capas de arcilla muy comprimida.

Por último, la esquistosidad, coincidente con la foliación metamórfica, se mantuvo en una dirección fija al hilo con el tramo ventana-cámara de rotura.

3. Descripción general de la excavación.

Aunque se comentará con más detalle en su momento, conviene destacar aquí la utilización del tren cargador Salzgitter (tren bunker) como medio de extracción de escombros, para describir el planteamiento de los ataques de excavación. El gran desembolso económico producido por la adquisición del tren bunker obligaba al contratista a sacar el máximo rendimiento del mismo, lo que suponía tener que cubrir con él el 100 por 100 de la excavación, teniendo en cuenta que por su complejidad requería un único y definitivo emplazamiento. Haberlo colocado en un extremo hubiera significado haberlo utilizado con un rendimiento mínimo durante la excavación que, por su dificultad, hubiera obligado a un avance muy lento. En previsión de todo esto se decidió atacar la excavación por las dos ventanas intermedias, y así, con un emplazamiento único del tren, podían cubrirse dos frentes de excavación, con lo cual era muy probable que, al menos uno, produjera escombros suficientes como para amortizar el equipo. Por otra parte, la construcción de la galería se independizaba totalmente de la de la torre de toma y la cámara de rotura de carga; comparemos esto con el trastorno que hubiera producido el ataque por un extremo, ya que, al menos una de ellas, no se hubiera podido construir hasta no haber terminado el revestimiento de la galería. Abundando en la ventaja del trazado adoptado, una de las galerías de ataque hace posible el acceso para que la galería sea visible durante su explotación.

3.1. Replanteo de taladros y perforación.

Aunque casi la totalidad de la excavación se hizo con cuele de barrenos paralelos, se em-

pezó con cuele en V. Como la longitud de las pegas en ningún caso superó 1,70 m., teniendo en cuenta que el ancho máximo era de 4 m., resultaba apropiado el cuele en ángulo y con él se hizo la excavación de las ventanas de ataque. Sin embargo, una vez en la galería de presión propiamente dicha, y coincidiendo con el comienzo de la entibación metálica, hubo que abandonarlo porque la fuerte proyección del escombros, propia de este tipo de cuele, deformaba las cerchas de entibación, próximas al frente. Esta decisión resultó altamente provechosa, porque dadas las características tan cambiantes del terreno, hubo que hacer más de diez esquemas de tiro con cuatro cueles diferentes; estas variaciones resultaban mucho más simples con el cuele de barrenos paralelos puesto que con el mismo replanteo de los taladros, se consiguieron efectos muy distintos variando la secuencia de encendido, y a lo sumo añadiendo o suprimiendo algún taladro con cinco de ellos siempre fijos.

En la figura 2, además de los cuatro tipos de cuele, se han dibujado los esquemas tipo de tiro correspondientes a características extremas de la roca, ésto es, muy blanda y sana muy dura. A partir de éstos, se dibujaron todos los intermedios sin más que variar los siguientes conceptos:

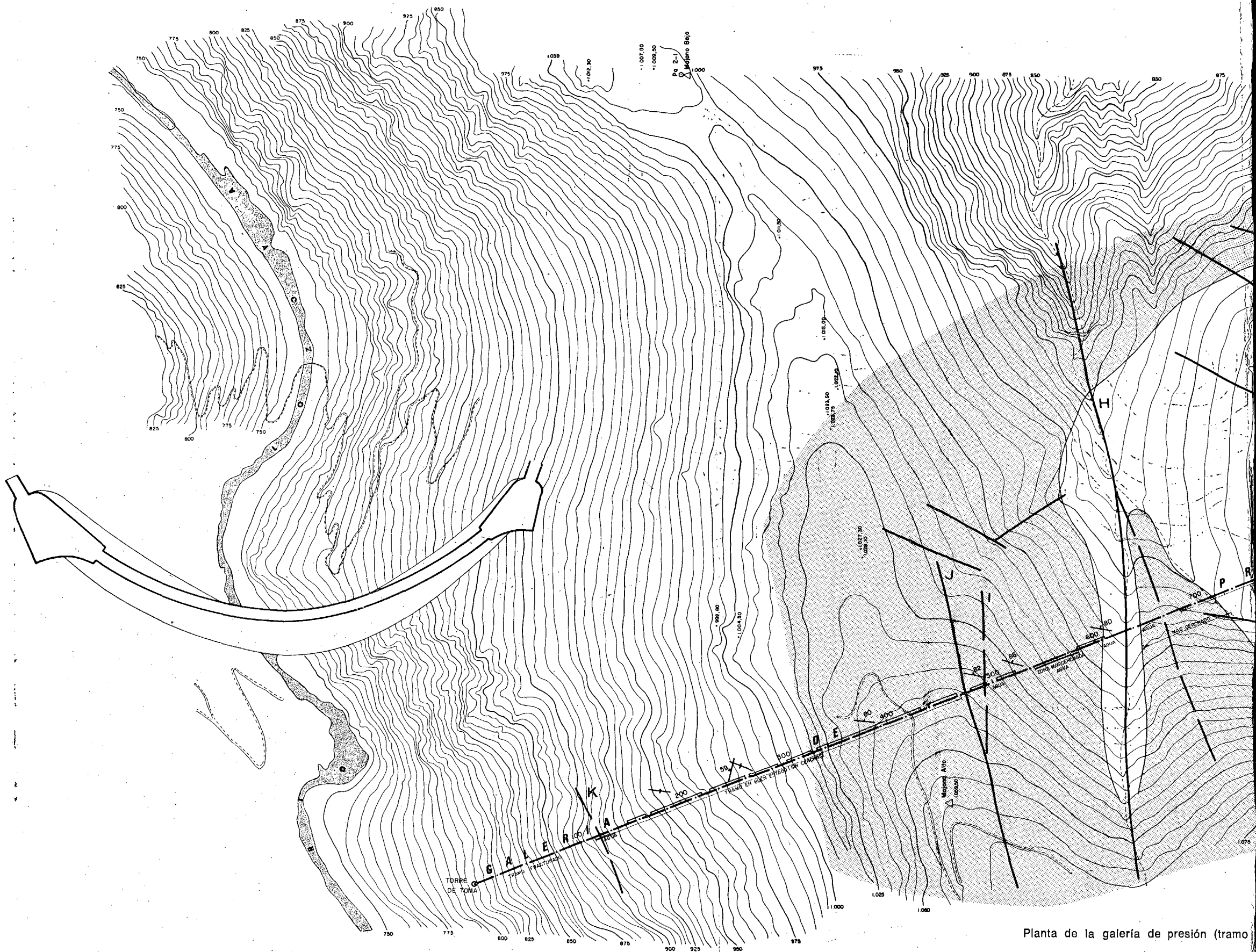
— El cuele varió entre los cuatro de la figura. El a) para rocas extremas, tanto duras como blandas; el c) y el b) para calidades medias, algo dura el primero y algo blanda el segundo. El d) se utilizó poco, porque dio peores resultados.

— El contracuele se diferenció en dos grupos, según la secuencia de encendido; en dos tiempos para la roca blanda y en uno para la roca dura.

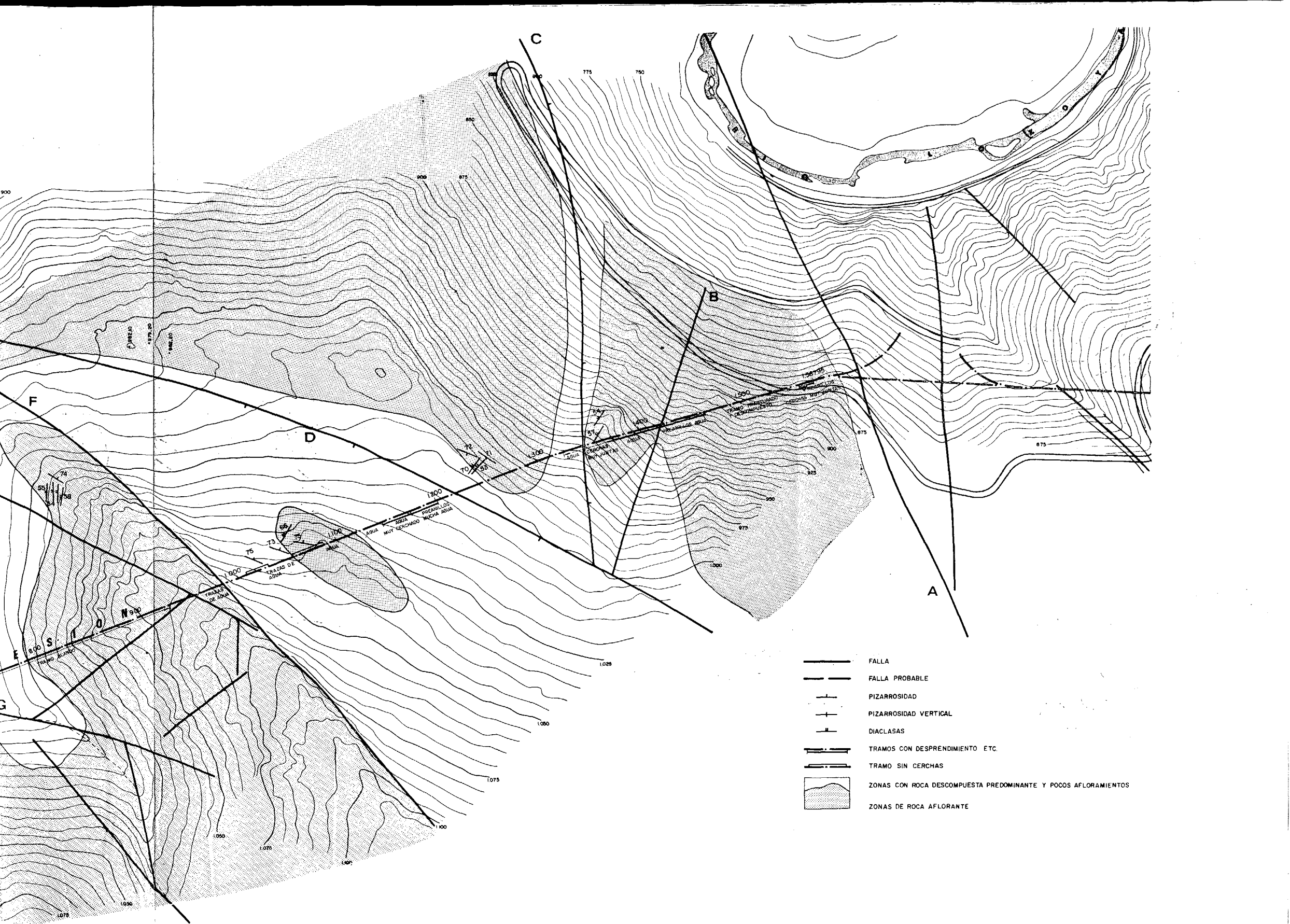
— Densidad de carga por m.², según la calidad de la roca, que varió desde 1 Kg./m.³ para la roca muy blanda y 3,5 Kg./m.³ para la roca sana muy dura.










— Replanteo del recorte; para la roca muy blanda o dura muy fracturada (fig. 2), se bajaron unos centímetros los taladros de la clave para evitar sobreexcavaciones.

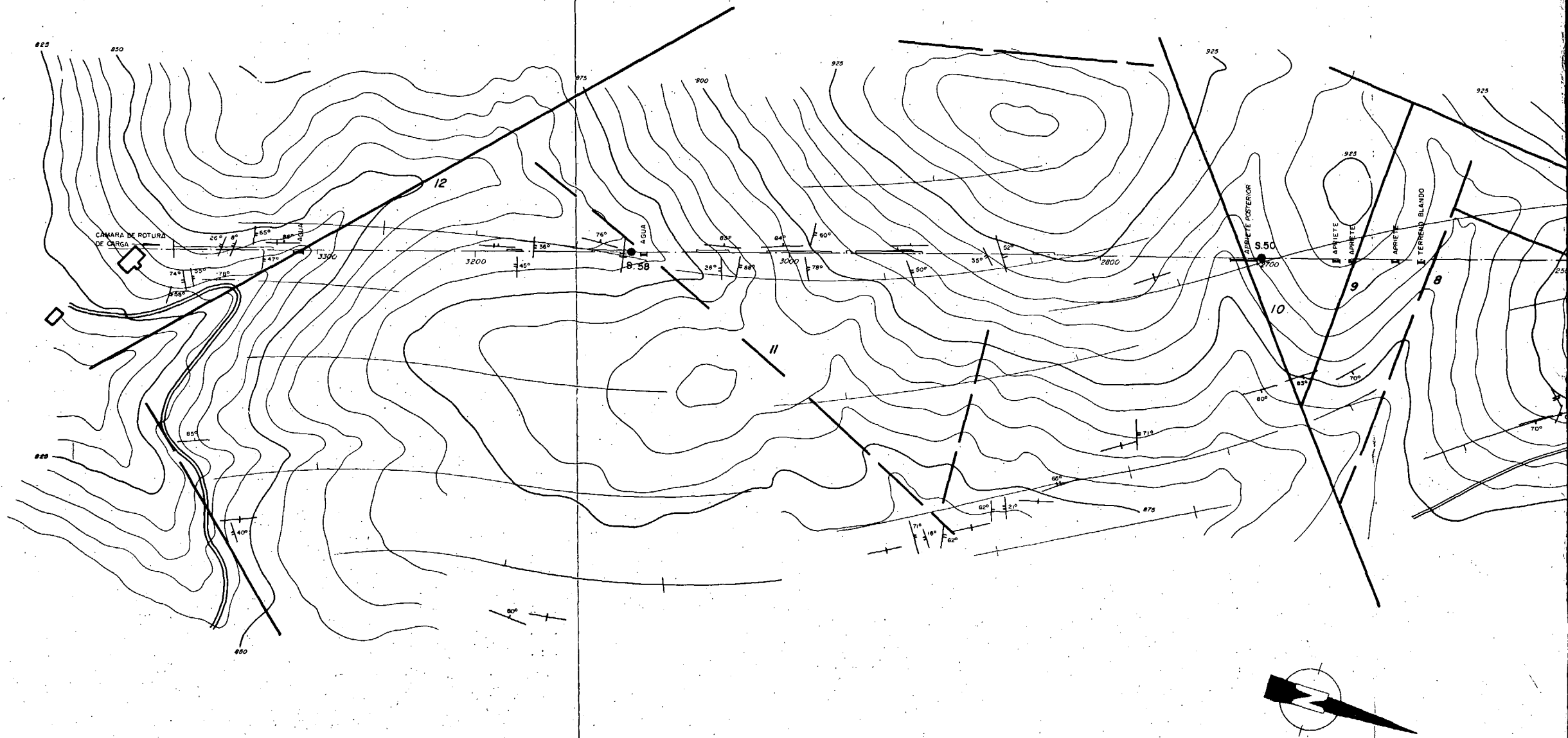
— Secuencia de encendido del recorte; para la roca blanda se encendió todo el recorte al mismo tiempo y para la roca dura y sana en dos tiempos distintos las rastreras del resto. Por último, en algunos casos de roca dura dia-



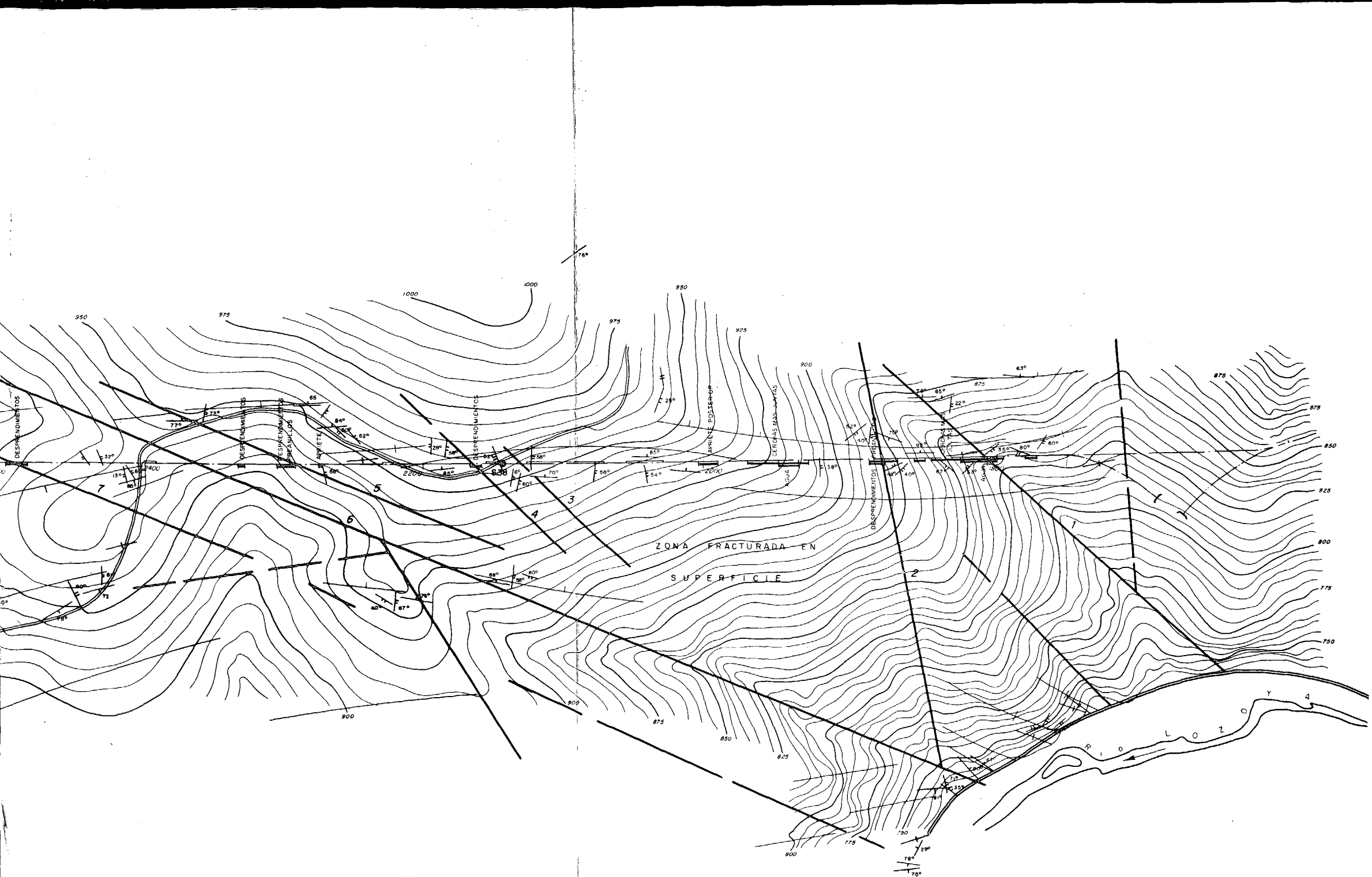
Planta de la galería de presión (tramo)



-  FALLA
-  FALLA PROBABLE
-  PIZARROSIDAD
-  PIZARROSIDAD VERTICAL
-  DIACLASAS
-  TRAMOS CON DESPRENDIMIENTO ETC.
-  TRAMO SIN CERCHAS
-  ZONAS CON ROCA DESCOMPUESTA PREDOMINANTE Y POCOS AFLORAMIENTOS
-  ZONAS DE ROCA AFLORANTE

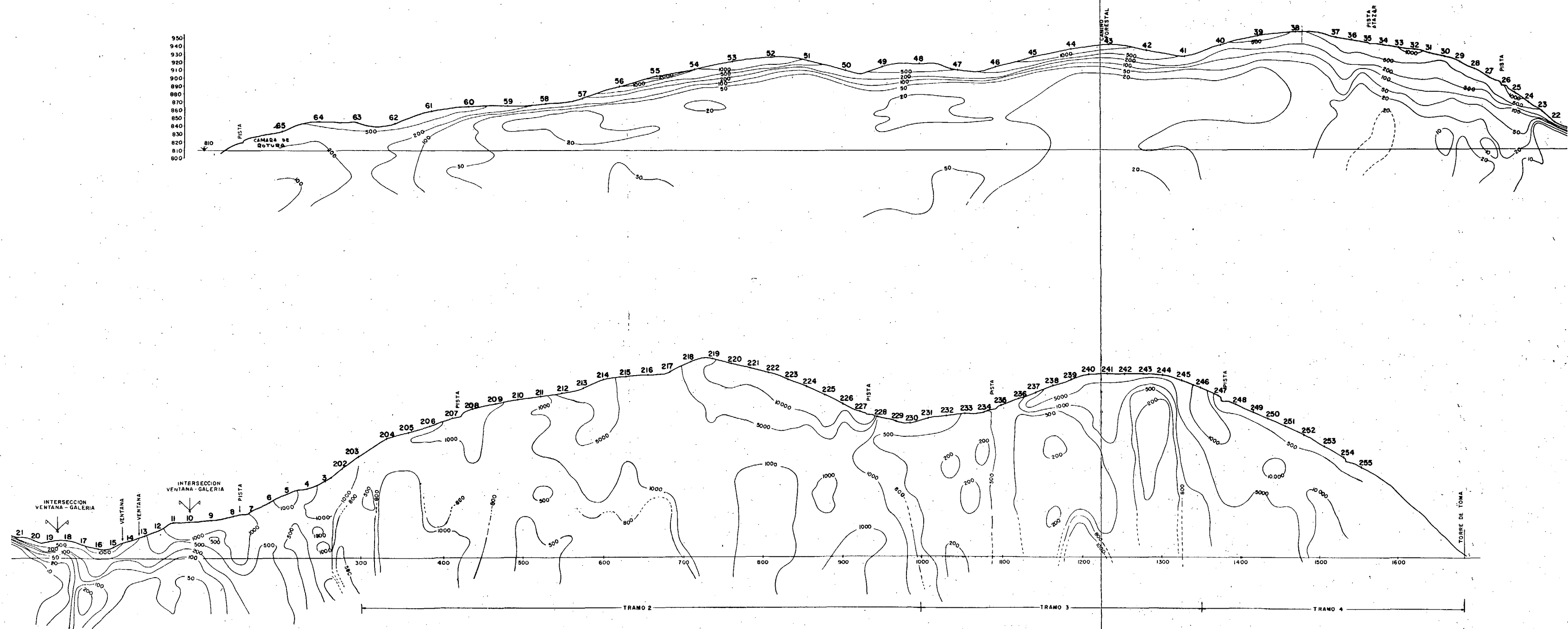


Planta de la galería de presión (tra



- | | | | |
|--|-----------------------|--|---|
| | FALLA | | TRAMO SIN CERCHAS |
| | FALLA PROBABLE | | TRAMO CON DESPRENDIMIENTOS, APRIETES, ETC |
| | PIZARROSIDAD | | SONDEO |
| | PIZARROSIDAD VERTICAL | | |
| | DIACLASAS | | |

mo ventana-cámara de rotura).



Curvas de isoresistividades sobre un corte vertical.

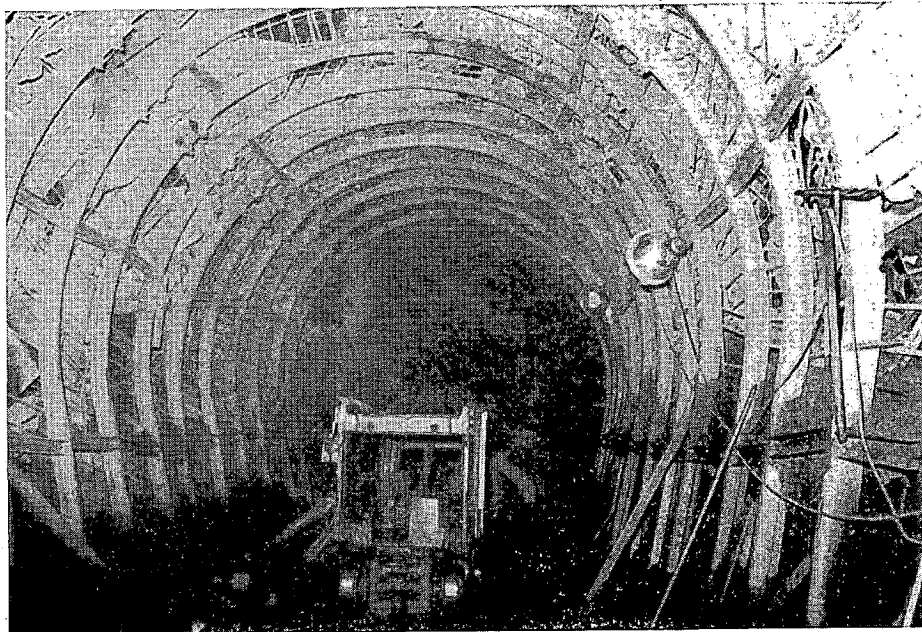


Foto 1. — Pala cargadora Salzgitter de 500 Lts. de capacidad

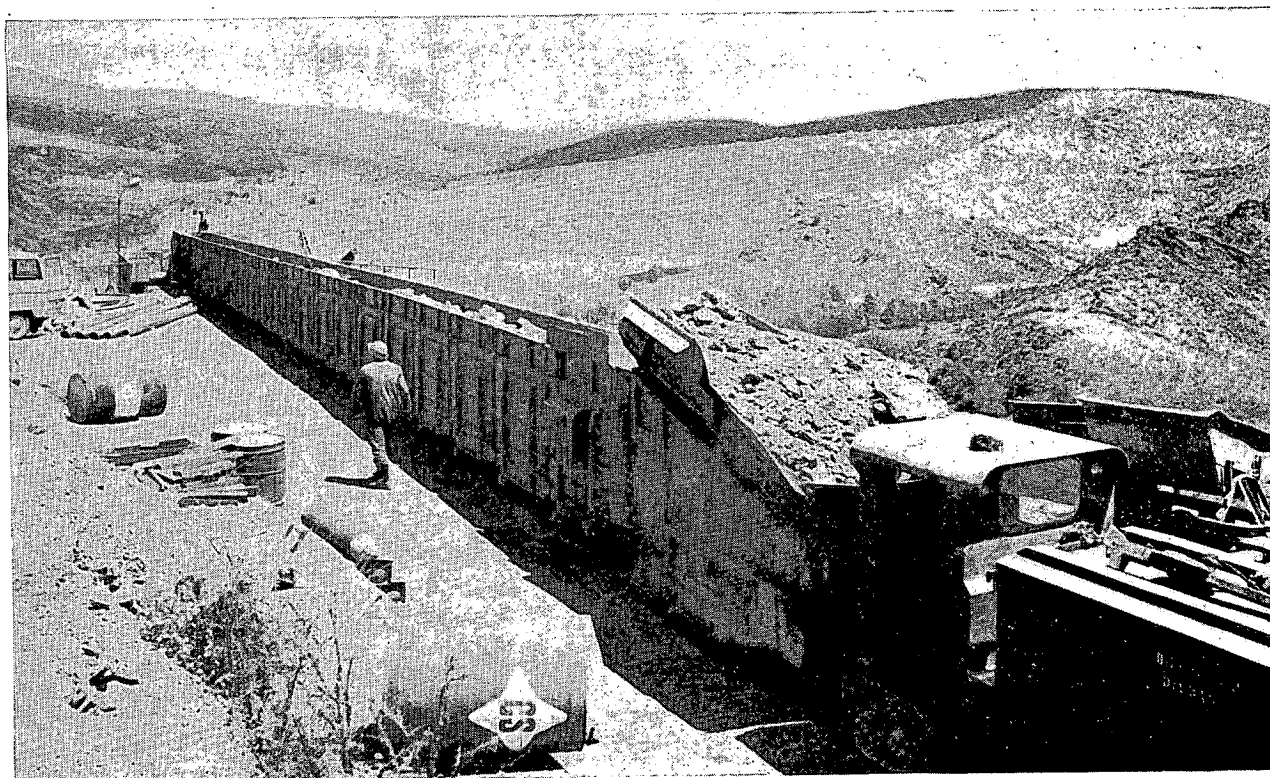


Foto 2. — Tren cargador Salzgitter.

clasada, en que el recorte era más difícil, la secuencia de encendido fue la indicada en la figura 2 para roca dura.

— Carga del recorte; se intentó alternar los taladros cargados con los vacíos, pero no dio resultado porque la anisotropía de la roca debida a las diaclasas, a la esquistosidad o a ambas cosas a la vez, desfiguraba la roca de grietas de cada taladro en una dirección dominante que no tenía por qué coincidir con la de mínima distancia entre taladros.

— La longitud de las pegas y la carga por metro lineal de taladro, también varió con la calidad de la roca. La longitud varió desde 0,70 metros para la roca blanda, hasta 1,70 m. para la roca sana muy dura y que fue la empleada mientras se pudo, puesto que arrancaba un volumen de escombro, igual a la capacidad del tren bunker. Se intentó duplicar la longitud pero se desechó por el excesivo quebrantamiento de la roca. La carga por ml. de taladro, osciló alrededor de los 0,50 Kg./ml., más concentrada en el cuele y aligerada en los recortes.

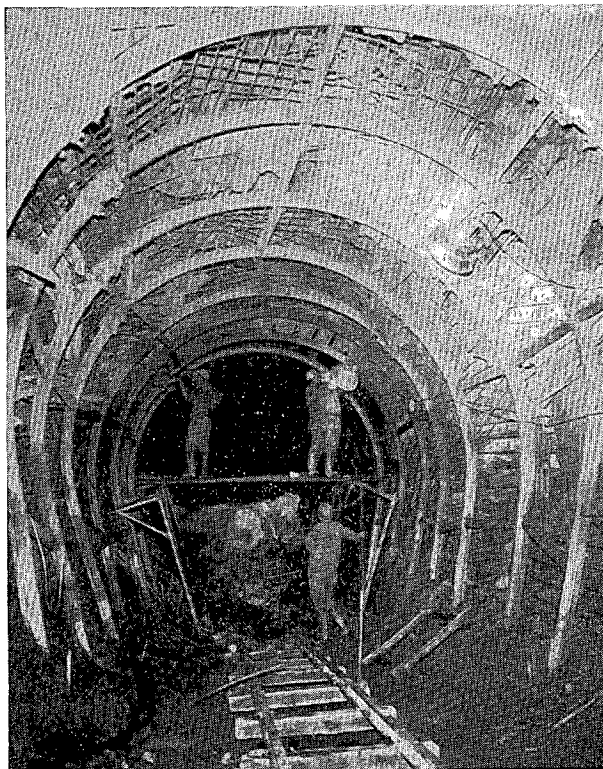


Foto 3.—Entibación metálica. Andamios de entibación, filaje en el trasdós y transillones de arriostramiento de las cerchas.

En general se consiguieron avances del 90 por 100 con respecto a la longitud perforada, con un consumo aproximado de explosivo de 1,5 a 2,0 Kg./m.³.

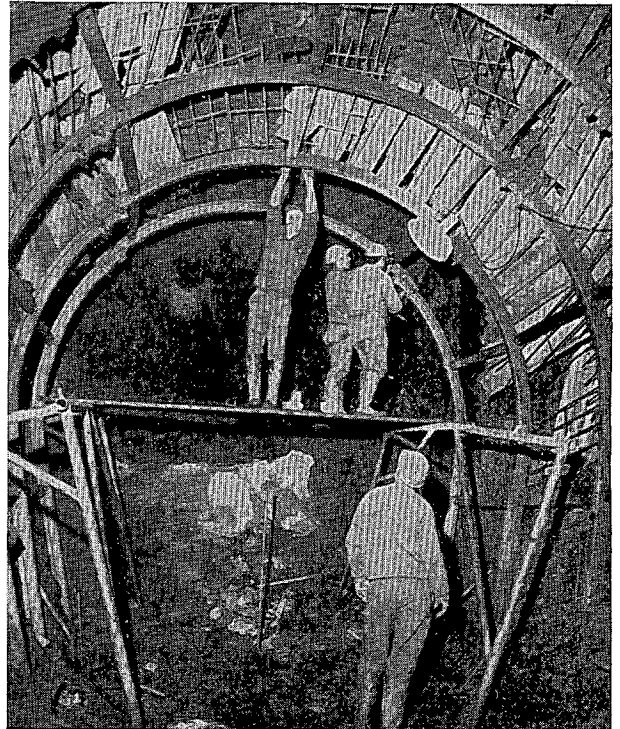


Foto 4.—Ejecución de la entibación metálica.

Para la perforación, en principio, se pensó emplear un Jumbo-Joy de dos supermartillos de 40 Kg., pero la debilidad de la roca encontrada exigió un plan de tiro con mayor número de taladros y menor diámetro del previsto. Por otra parte, la economía en mano de obra que proporcionaba el Jumbo, quedaba anulada porque las operaciones de entibación metálica requirieron un número de operarios suficientes para manejar los martillos manuales. Se utilizaron martillos perforadores Atlas-Copco neumáticos BBD-43-WK de 22,9 Kg. con empujadores neumáticos de 22,4 Kg. con soporte y barrenas enterizas en acero hueco exagonal de 22 milímetros, cabeza de 34 mm. y una cuchilla.

3.2. Carga y voladura.

Normalmente el explosivo utilizado fue la dinamita goma 2.^a, en 26 mm. ϕ , aunque en te-

rreno blando se intercaló con ella amonita número 1 en más o menos cantidad, según la calidad del terreno. Se emplearon detonadores eléctricos de retardo número 8 con tiempos del 0 al 10, y el retacado se efectuó manualmente.

3.3. Ventilación.

El sistema de ventilación empleado fue aspirante, mediante ventiladores Berry-Lille de 600

a analizar el procedimiento de avance empleado para cada uno de ellos:

— Terreno suelto muy deformable, bajo el nivel freático. Por ser éste el terreno que originó mayores dificultades, debido a la continua fluencia de las pizarras a causa del agua, se ensayaron diversos procedimientos de avance para ir constantemente mejorando el rendimiento; por tanto, si bien aquí vamos a asociar a este tipo de terreno el procedimiento de galería de



Foto 5.— Zona gunitada.

milímetros de diámetro y motor eléctrico Unelec que producían de 4 a 6 m.³/seg. de aire; se colocaron ventiladores cada 600 m. La tubería de ventilación, también de 600 mm. de diámetro, fue fabricada "in situ" con chapa de hierro de 1 mm. de espesor y empalmadas con cinta adhesiva Scotchrap número 51 de 100 mm. de ancho.

3.4. Saneamiento y entibación.

Englobando los terrenos atravesados a lo largo de la excavación en cinco grupos, vamos

avance, ensanché, bóveda de hormigón, destroza y hastiales de hormigón por bataches, más adelante se explicarán los procedimientos más rápidos utilizados, según las particularidades de cada caso.

— Blando y plástico con agua. La diferencia con el anterior tipo de terreno es que el agua estaba localizada en puntos, en lugar de extenderse a todo el frente; esto se debía a que las partes blandas de arcilla se intercalaban con un esqueleto más duro de pizarras silíceas. Mediante drenes bien estudiados se consiguió dis-

minuir el caudal del frente hasta poder avanzar a plena sección sostenida con entibación metálica. A continuación se reforzaba la entibación con preanillos de hormigón, dejando los drenes embutidos en él.

— Blando y plástico sin agua. Hubo necesidad de una entibación metálica mediante cerchas separadas 1,50 m. Cuando se intentó suprimirla hubo que colocarla varios días después por la continua decompresión del terreno.

— Duro y diaclasado. Mientras estuvo seco se pudo avanzar mediante un cosido de los bloques con bulones y un gunitado posterior, pero cuando apareció agua, la gunita no se adhería, la pizarra se descomponía al contacto con el aire y los bloques se desprendían de los bulones; hubo, pues, que entibar.

En el cuadro 1 se resume todo lo dicho.

posteriormente, y por condiciones económicas, se colocaron viguetas de hormigón fabricadas *in situ* de 0,1 × 0,1 m.² de sección. La sección cuadrada es muy interesante en este tipo de viguetas, porque así, de cualquier forma que la coloque el peón, trabaja como nosotros hemos previsto al calcular. Cuando el terreno fue más duro bastó con una parrilla metálica ligera, y en terreno especialmente peligroso se colocaron piquetes en clave de perfil I. Conviene advertir que el filaje no se colocaba uniformemente a lo largo de cada sección, sino solamente o con mayor densidad en las zonas más débiles; así, por ejemplo, en la mayor parte del tramo aguas abajo de las ventanas de ataque que se mantuvo la pizarra al hilo, el filaje se colocó casi exclusivamente en los hastiales. Posteriormente se gunitaba todo ello para cubrir las par-

CUADRO 1.

Características del terreno	Procedimiento de avance	Revestimiento previo	longitud m.	%
Terreno suelto muy deformable, bajo el nivel freático	Galería. Ensanche destroza	Prean. hormigón	124	3,5
Blando y plástico. { Con agua ... Sin agua ...	Plena sección	Prean. hormigón Entib. metálica	617 1 869	17,4 52,8
Duro y diaclasado. { Con agua ... Sin agua ...	Plena sección	Entib. metálica Gunita y bulones	221 708	6,3 20,0

Obsérvese que en la columna de longitud están incluidas las ventanas de ataque.

La entibación metálica se realizó mediante cerchas sección Ω Duro-Felguera de 21 Kg. en tres piezas, cabeza circular y patas rectas, que ensambladas daban la forma de herradura de la excavación. La distancia entre cerchas era igual a la longitud de la pega, ya que una vez volada y saneada se colocaba una sola cercha y pegada al frente. Los pies se afianzaban al terreno mediante tochos hincados y, posteriormente, estampidores, para evitar que se cerraran las cerchas, y la estructura resistente se rigidizaba longitudinalmente con transillones en clave. Como complemento se colocaba, cuando el terreno lo requería, un filaje apoyado en su trasdós. Al principio se utilizó chapa metálica perforada cuando el terreno era blando, pero

tes desnudas y conseguir, en los tramos emparrillados, una gunita armada que en cierta ocasión, como a continuación se verá, demostró su excelente resistencia.

3.5. Extracción de escombros.

El tren cargador Salzgitter (tren bunker) ha sido la máquina de extracción de escombros ideal para este tipo de terreno por su rapidez, ya que dado el fuerte diaclasado y rápida meteorización de las pizarras, era indispensable acortar al máximo el intervalo de tiempo comprendido entre la pega y el comienzo de la entibación.

La carga se hacía mediante una pala Salzgitter HL-500, con una capacidad de carga de 2-2,5 metros cúbicos por minuto sobre un vagón com-

tractador que lo vertía al tren, compuesto de 22 elementos-vagoneta continuos, y donde era distribuido mediante una triple cadena sin fin a una velocidad de 3 m./min. La capacidad de carga del tren era de 35 m.³, lo que equivalía a pegas de 1,70 m. de profundidad. El tren era

arrastrado por una locomotora eléctrica Bartz de 57 CV. de potencia.

3.6. Rendimientos conseguidos.

Los cuadros 2, 3 y 4 expresan los rendimientos conseguidos, junto con la organización de la mano de obra, exceptuando los 416 m. influidos por la cubeta de desagüe:

CUADRO 2. — *Ciclo completo para pegas de 1,70 m.*

Trabajo realizado	Tiempo empleado minutos	%
Replanteo de los taladros...	15	6,25
Perforación	60	25,00
Carga y voladura	30	12,50
Ventilación	20	8,33
Saneamiento	25	10,42
Entibación	35	14,59
Carga de escombros	40	16,66
Colocación de vías	15	6,25
Totales	240	100,00

CUADRO 3. — *Avances.*

PERIODOS	LONGITUD m.
Por ciclo	1,32
Por turno de ocho horas	2,64
Por jornada de veinticuatro horas	7,93
Por mes de veinticinco días	198,30
Máximo alcanzado en un día	12,00
Máximo alcanzado en un mes	220,00

CUADRO 4. — *Organización de la mano de obra.*

CATEGORIA	Nº	Actividad durante la			
		Perforación	Carga y voladura	Saneamiento y entibación	Carga y escombros
Capataz	1	Organiza y supervisa.			
Barrenistas	4	Perforan.	Cargan.	Sanean y entiban.	Esperan.
Maquinista de la pala ...	1	Perfora.	Carga.	Sanea y entiba.	Carga escombros.
Maquinista tren y locomotora	2	Salida, descarga y regreso al frente.			Carga escombros.
Maquinista locomotora auxiliar	1	Transporte de material a los diferentes tajos.			
Mecánicos	3	Entretimiento de maquinaria y colocación de tubería.			
Electricista y ayudante ...	2	Instalaciones eléctricas.			
Soldadores	2	Preparación de la entibación metálica.			
Compresorista	1	Atiende compresores.			
Peones	3	Colocación tuberías y tendido carriles.			
Total	20				

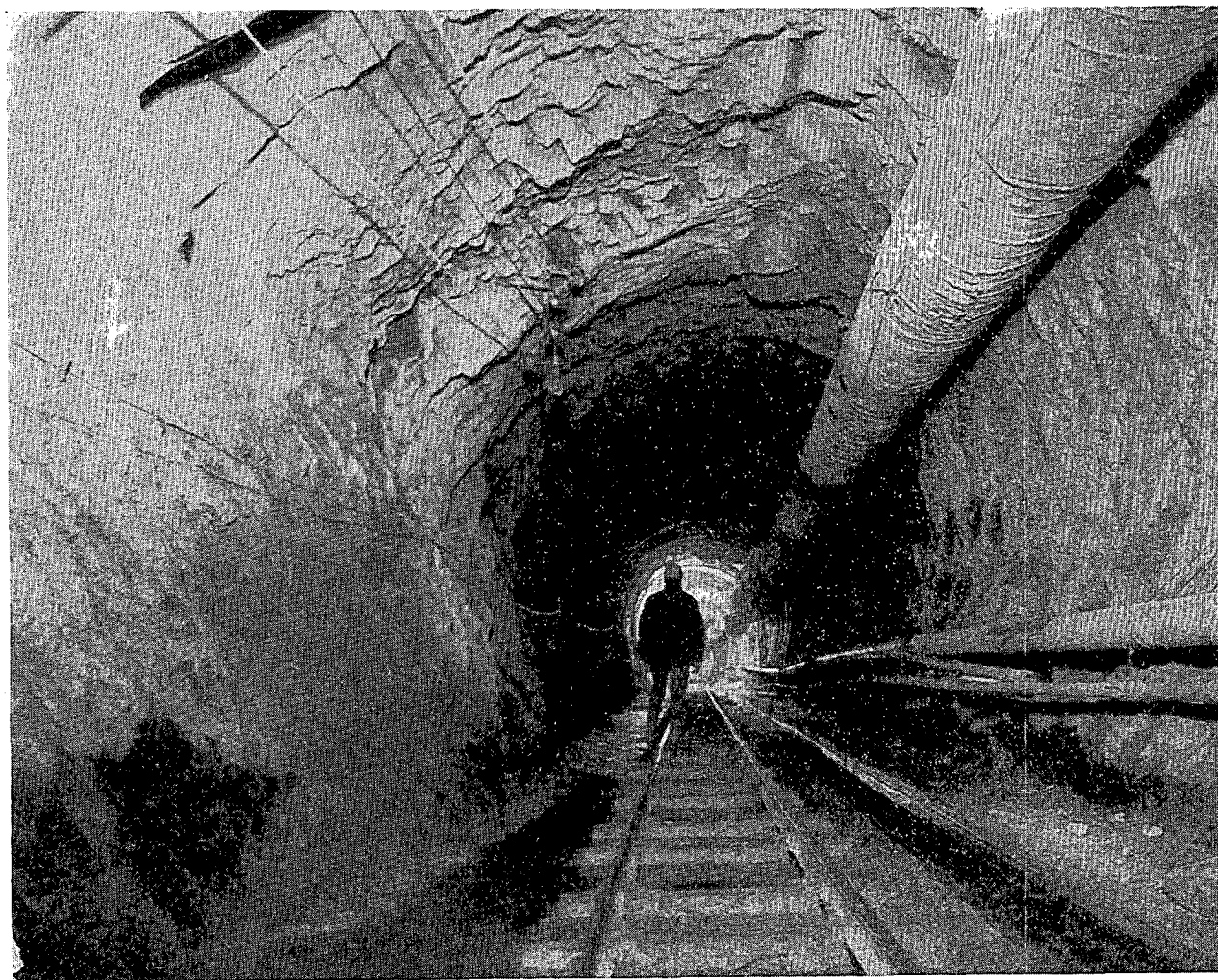


Foto 6. — Tramo gunitado. Al fondo, entibación metálica.

3.7. Consideraciones finales.

La consecuencia más importante extraída de nuestra experiencia ha sido que el fundamento para culminar con éxito la excavación de un túnel radica en la flexibilidad de los procedimientos de avance posteriores a un conocimiento pleno del terreno que se va a atravesar. Efectivamente, se consiguieron perforar los 3 393 metros de galería sin una sola chimenea gracias a que en todo momento se sabía con suficiente aproximación el terreno que se iba a atravesar mediante el reconocimiento geofísico previo amparado por los sondeos de superficie, con taladros en el frente o a través de una galería de reconocimiento, y a cada terreno se le

asignó un procedimiento de avance y un determinado tipo de entibación.

Resultó ser muy interesante el empleo de una presolera a 20 ó 30 m. del frente que a la vez que afianzaba los pies de las cerchas de entibación y procuraba una sólida base para la vía, evitaba la descomposición del terreno de solera, lo que, en caso contrario, hubiera obligado a costosas sobreexcavaciones hasta encontrar la roca sana para hormigonar el revestimiento definitivo.

El empleo de la gunita para la entibación ha sido indispensable en este tipo de terreno. Si bien al principio sólo se empleó en algunas zonas, se comprobó que donde no había gunita la roca, aun siendo buena originalmente, se iba

decomprimiendo y acababa por desprenderse, por lo que en las zonas entibadas "chinea-ba" constantemente. Por otra parte, era interesante evitar una decompresión que iba a durar meses y que nos iba a restar colaboración resistente de la roca próxima al revestimiento. En el tramo que se llevó la esquistosidad al hilo,

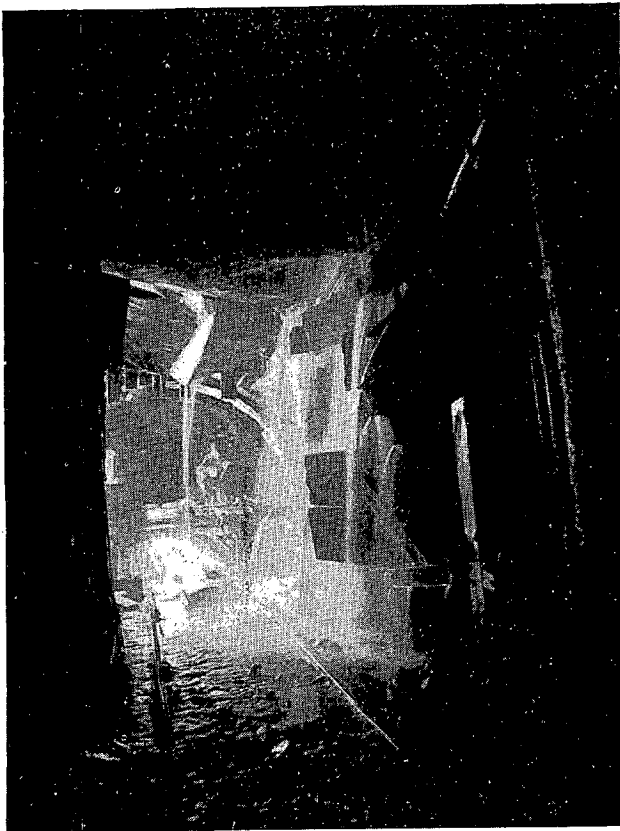


Foto 7. — Falla de los poyales.

esta decompresión era inmediata en hastiales, por lo que en muchas ocasiones, aun siendo roca buena, había que entibar. Se pensó que gunitando el terreno nada más excavado se podría avanzar sin entibación, pero hubo que desecher la idea porque la pega arrancaba la gunita en los seis primeros metros y la deterioraba en otros tantos. Hubo, pues, que alejarla del frente para, finalmente, dedicar los domingos a gunitar el avance de toda la semana. Normalmente, los espesores oscilaron alrededor de los 3 cm., salvo ocasionalmente que llegaron a 10-15 cm. cuando se le quiso utilizar como medio resistente.

Queremos, por último, referirnos al único

pericance de alguna importancia debido a un fallo de la entibación. Cortando longitudinalmente la presolera iba una cuneta a 30 cm. del hastial izquierdo. Pese a que los pies de las cerchas iban bien sujetos al terreno, el agua de la cuneta lo fue minando hasta que imprevistamente se cerró la cuneta, cediendo al empuje del terreno de dicho hastial. La gunita, que en este caso tenía los 10 cm. de espesor, junto con el filaje de entibación hicieron que el esfuerzo se transmitiera a través de ocho cerchas a la vez, se deformaron sin perder su verticalidad y se evitaron consecuencias graves. Desde entonces se reforzó la cuneta a lo largo de toda la excavación mediante la colocación de estampidores.

4. Particularidades de la excavación.

4.1. Ventanas de ataque.

El río Lozoya, a su paso por las ventanas de ataque, hiende el macizo siluriano formando una cubeta cuyo perfil está representado en la figura 4. El proceso de formación de la cubeta puede ser como sigue: si consideramos (1) como situación de partida se llega a (2) después de un largo período en que el río ha arrastrado el manto de relleno (b) para, a continuación, ir socavando el pie de la ladera. Mientras tanto, un cierto espesor de la misma se va decomprimiendo y llega un momento (3) en que al descalzarse un determinado paquete de terreno decomprimido se produce un desequilibrio de las fuerzas de gravedad en la zona rayada y se desliza hasta ocupar la posición (b) de (4); queda así el perfil en la posición actual según sus taludes naturales hasta que el curso del río, en su lento pero continuo progresar hacia el interior del macizo, vuelva a desequilibrar las fuerzas de gravedad.

La excavación en la ladera de esta cubeta supuso tres fases perfectamente diferenciadas, según se fueron atravesando las zonas (c), (d) y (e). La capa (c) estaba denigrada por un doble efecto: en primer lugar, había sufrido una decompresión como corresponde a la capa superficial de una ladera de fuerte pendiente, y por otro lado, estaba totalmente descompuesta por la oxidación debida al agua drenada por la cubeta hacia el río. Sin embargo, al atravesarse totalmente seca, si bien obligó a un avance len-

to, propio de excavación en terreno muy blando, no produjo problemas. No ocurrió así en la zona (d), puesto que a los efectos de decompresión y descomposición se unió la presencia del agua. No podemos hablar de caudales agotados porque no había agua fluyente, sino un terreno empapado que se esponjaba y derrum-

venía un equipo detrás reforzando esta entibación de avance con preanillos de hormigón como entibación definitiva. Una vez atravesada la zona (d) se llegó a (e) con la aparición de una roca dura, pero el agua no desapareció; ahora no era el típico terreno empapado bajo nivel freático, sino que el agua estaba localiza-

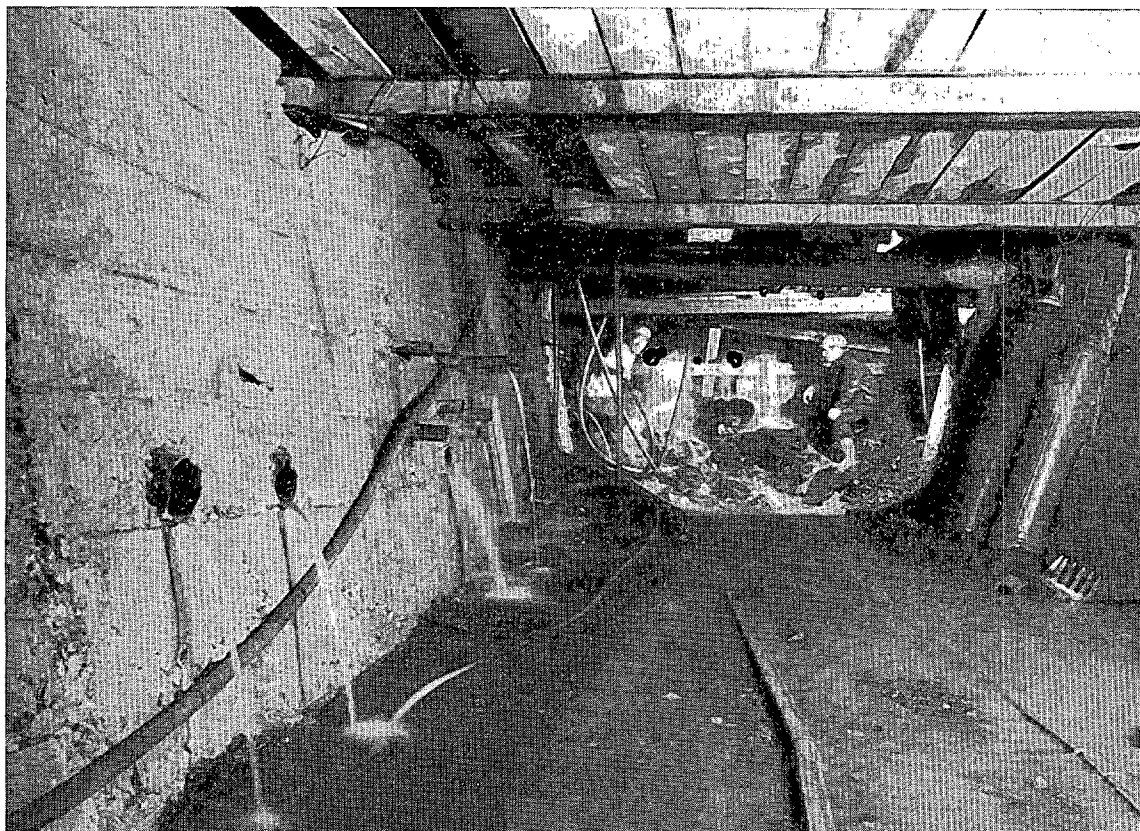


Foto 8. — Falla de los Poyales. Drenajes embebidos en el preanillo de hormigón.

baba a poco de ser descubierto; el mejor procedimiento era trabajar con celeridad y ganarle la acción al terreno. El proceso de excavación partía siempre con una cercha metálica de entibación pegada al frente de forma que el avance estaba totalmente sujeto. Apoyándose en esa cercha se clavaban en el frente piquetes formados por perfiles I contorneando la bóveda y hasta una profundidad de 50-60 cm. A continuación se excavaba con picador, hasta 40 centímetros de profundidad, el hueco estricto para alojar la cercha siguiente, y una vez colocada, se hacía la destroza del caballón central para reanudar otra vez el ciclo; mientras tanto,

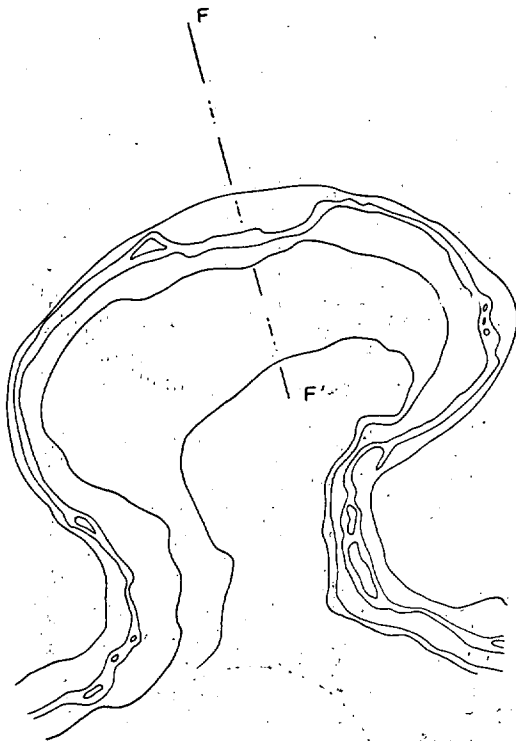
da y era fluyente. El fenómeno que se había producido no es nuevo; al cambiar el picador por las cargas explosivas cuando apareció la roca dura, el terreno circundante se iba quebrantando, la zona (d') se fisuraba totalmente, y el agua encontraba un camino nuevo y fácil por donde discurrir. Para evitar ir llamando al agua, con el avance se drenó intensamente en clave y el agua desapareció enseguida.

Este lento caminar del principio fue el único inconveniente de atacar por las dos ventanas intermedias, pero el perjuicio no fue importante porque la excavación solamente fue penosa en la ventana hacia la torre de toma, ya que en la

otra, la traza se colocó enseguida normal a la ladera y las zonas decomprimidas se atravesaron en poco tiempo. Una vez alcanzada la roca sana en esta ventana, el tren empezó a traba-

jar a pleno rendimiento hasta el final, y durante este tiempo, otra brigada atravesó la zona decomprimida por el otro ataque, de forma que el tren pudo coger el relevo a tiempo.

CUBETA DE DESAGÜE AL RIO LOZOYA



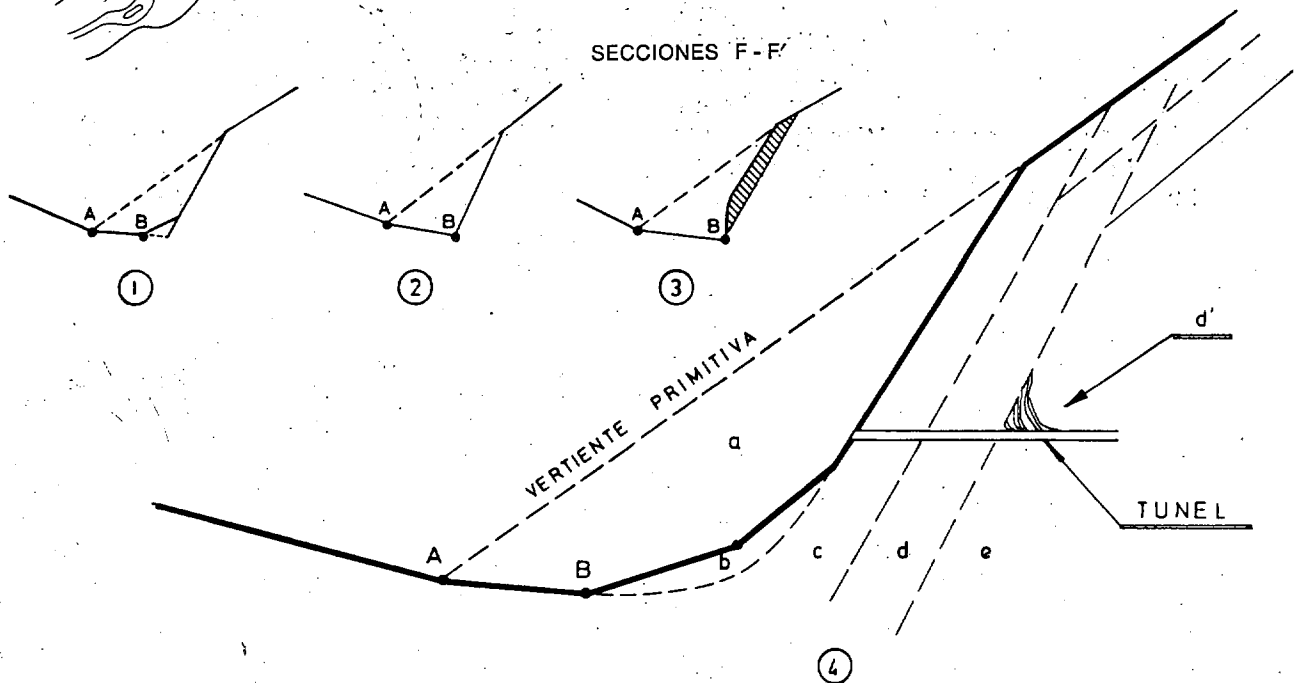
4.2. Tramo ventana-valdentaes.

Una vez pasada la cubeta de desagüe, en el tramo ventana-valdentaes, la excavación progresó sin dificultades especiales que pudieran haber existido a causa del rosario de 10 fallas atravesadas; todas ellas estaban cerradas en profundidad y nunca hubo agua.

La pizarra era en general muy arcillosa, muy comprimida y con la esquistosidad al hilo. Esto hacía que al ventearse se fueran decomprimiendo los hastiales, por lo que había que entibar muy rápidamente para evitar su exfoliación (figura 4). Sin embargo, dada su calidad arcillosa, la excavación permitió un recorte muy ajustado que únicamente en algunos despegues muy acusados, debidos a vetas de arcilla, requirieron un saneo más abundante que originaron ligeras sobreexcavaciones.

4.3. Tramo ventana-presa.

La pizarra en este tramo era silíceo, muy dura y, por tanto, muy rígida, afectada por un



A, cauce primitivo; B, cauce actual; a, zona hendida; b, manto de relleno; c, zona decomprimida drenada; d, zona decomprimida no drenada; c, roca sana correspondiente al macizo.

Figura 4.

conjunto de fracturas sin una orientación fija a lo largo del tramo, que junto con la foliación metamórfica lo dividían en bloques más o menos paralelepípicos. Era de prever, como así ocurrió, según se verá en el siguiente apartado, que con estas características las tres fallas de esta zona ocasionarían dificultades con la aparición de aguas de filtración. Por otra parte, el recorte era más difícil y el trabajo más peligroso. La mayor dureza de la roca obligaba a mayor concentración de la carga explosiva que quebrantaba aún más la roca, el recorte se producía según los planos de debilidad que eran, como es lógico, los de fractura, el saneo tenía que ser abundante, con el fin de evitar el peligro de posteriores desprendimientos, y, en fin, hubo que entibar el 70 por 100 correspondiente a las zonas donde el buzamiento de las capas producía una inestabilidad de los bloques. En el resto bastó con un cosido de los mismos mediante bulones de 4 m. de profundidad y un revestimiento de gunita de 30 mm. de espesor para evitar el contacto de la pizarra con el aire.

4.4. Tramo entre ventanas.

Pese a ser la zona en teoría más delicada, por su escasa montera, el tramo entre ventanas no originó problemas ni siquiera los correspondientes a un avance lento de 2 ml./día, puesto que se simultaneó, con una brigada aparte, con el avance normal del tramo ventana-presa. Como todo él discurría por terreno de tipo (c) (fig. 3), se escogió la época de estío para excavarlo con el fin, como así ocurrió, de que estuviera completamente drenado. Aun estando seca, la pizarra estaba totalmente oxidada y descompuesta, lo que obligó a avanzar con picador y sin la ayuda de explosivos.

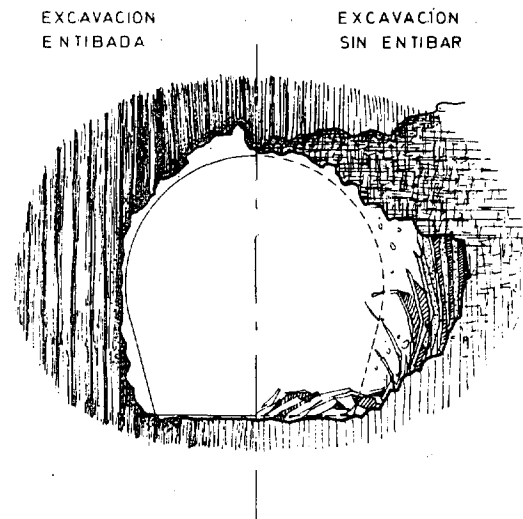
4.5. Zonas falladas.

Si bien en el tramo aguas abajo de la ventana estaban localizadas una serie de fallas, ninguna de ellas como ya hemos comentado, produjo dificultades especiales debido a que estaban cerradas en profundidad; se atravesaron importantes vetas de arcilla a su paso, pero como estaban muy comprimidas, bastó con extremar las precauciones de la excavación para que no disminuyeran el rendimiento medio.

Se preveía que no iba a ocurrir otro tanto en el primer tramo, debido a que las pizarras

más silíceas y fracturadas nos proporcionarían agua en las fallas, como así fue. Un derrumbe del frente de excavación con la aparición de un

ESQUISTOSIDAD AL HILO



ROCA DURA DIACLASADA

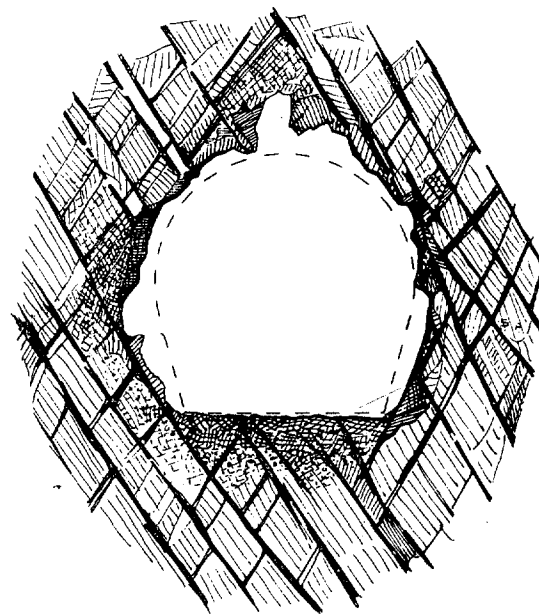


Figura 5.

caudal de 4 l./seg. de agua arrastrando un terreno totalmente descompuesto, nos indicó la aparición de la primera falla, aunque ésta aún en pizarras arcillosas. Ante la imposibilidad de avanzar debido a las dificultades producidas por los derrumbamientos originados por los arrastres del agua, se decidió consolidar el terreno mediante inyecciones de mortero y lechada de cemento, y

para ello, se construyó un tapón en el frente de ataque mediante un muro de hormigón. Como a continuación del muro había un tramo cerchado que el agua no dejaba gunitar, ésta drenaba por el arrastrando la inyección a medida que se iba metiendo; entonces, se construyó un segundo muro de hormigón a unos 5 m. de distancia, ya en zona entibada con preanillos de hormigón, y el espacio intermedio entre los dos muros se rellenó con escombros. Se inyectó mortero hasta que el agua dejó de salir por unos drenes de reconocimiento y se completó con lechada de cemento. Esto permitió un avance de 7,50 m. en galería de avance y 9 m. más a plena sección y con entibación metálica, hasta que una nueva aparición del agua con un caudal de 10 l./seg. dificultó el avance, aunque el terreno no era tan blando y, por consiguiente, los arrastres eran menores. Se decidió seguir progresando mediante inyecciones de consolidación, pero de una manera continua, es decir, evitando la pérdida de tiempo que supone taponar cuando el terreno ha vuelto a empeorar. Para ello los ciclos se ordenaron de la siguiente manera: perforación de seis taladros sobre la bóveda en abanico con una longitud de 15 metros, con lo que se aseguraban una consolidación de hasta 10 m. de profundidad, y excavación de 6 m. de galería para que quedase un tabique de 4 m. que nos permitiera reanudar el segundo ciclo de la misma manera; de esta forma los trabajos de consolidación y avance se sucedían sin interrupción. Esta vez no se llevó el primer tabique a la zona de preanillos, sino que éstos se continuaron hasta el frente, revisitando los 9 m. de entibación metálica, y allí se hizo el tapón. La zona arcillosa en que aún nos encontramos no permitió que la inyección, que llegó hasta los 25 Kg./cm.², se extendiera con normalidad, quedando localizada en forma de bolos, que si bien comprimieron el terreno no lo impermeabilizó. Sin contar un mes que, como en el anterior, se empleó en construir el tape y en inyectar la primera zona, los 50 m. de falla se tardaron en pasar tres meses.

Llegamos a la falla de Los Poyales y, como el terreno era algo más favorable, se decidió intentar el paso sin consolidación previa del mismo, con lo que se conseguía un ahorro importante de tiempo. La falla apareció otra vez antes de lo previsto con un derrumbe del frente, y los caudales de agua llegaron a los 40 l./segundo. El terreno descompuesto ya no se exten-

día a la totalidad del frente, sino que el hastial derecho estaba formado por una pizarra silíceo relativamente dura; esto localizó los arrastres en una zona más reducida, y pudieron detenerse con un simple tape de tablas para permitir la entibación de la última pega. La imprevista anticipación de la falla fue lo que retrasó esta vez la progresión de la galería; el agua se corrió rápidamente hacia la zona recién excavada, y había que entibarla enérgicamente. Se empujé la clave inmediatamente, se entibó con cerchas metálicas separadas 30 cm. y se arriostaron los pies mediante perfiles transversales para evitar que se cerraran. Finalmente, se acometió el paso de la falla con muchas dificultades en galería de avance, drenando en lo posible el hastial izquierdo; por donde surgía el agua, con taladros laterales entubados de 120 milímetros de diámetro. Después se empezó el ensanche en retroceso por la zona más favorable, el hastial derecho; se afianzó la excavación con preanillos de hormigón y, posteriormente, se ensanchó la parte más peligrosa. Se tardó un mes en atravesar los 45 m. de falla.

Las características de la última falla prevista, la más próxima a la toma, nos la presentaban (véase el gráfico de isorresistivas) como la más desfavorable. El ritmo de avance en falla se había mejorado y sólo faltaba evitar la sorpresa. Reconsiderando el proceso seguido en las anteriores fallas, unos 50 m. antes de llegar al emplazamiento de la misma hizo su aparición el agua que alcanzó su máximo caudal antes de llegar a la isorresistiva más baja; al llegar aquí el agua empezó a decrecer muy rápidamente y, por último, se atravesó un terreno descompuesto pero seco. Esto, que en un principio puede parecer un error en la localización de las fallas, se explica por el quebrantamiento del terreno producido por las voladuras. Si consideramos el agua encerrada entre dos capas impermeables y quebrantamos una de ellas con la consiguiente aparición de fisuras, producimos una llamada al agua causando la aparición de humedades prematuras que van aumentando muy rápidamente con el avance. Como contrapartida, la propia galería excavada hace de drenaje, y el último tramo de la falla, completamente drenado, corresponde al terreno descompuesto, pero seco. Esta traslación del agua al borde de la falla más próximo al frente, producía, cuando el espesor de la roca sana de dicho labio era suficientemente delgado a causa de la ex-

CUADRO 5. — *Clasificación de los terrenos.*

Terreno	Descompresión	Módulo de deformación
Tipo A.	1,5 - 2,5 m.	Menos de 70 T./cm. ² .
Tipo B.	1,2 - 2,0 m.	70 — 120 T./cm. ² .
Tipo C.	1,0 - 1,5 m.	Más de 120 T./cm. ² .

CUADRO 6. — *Distribución de los distintos tipos.*

Terreno	Longitud total m.	%	Entibación más utilizada
Tipo A.	661	19,48	Preanillos de hormigón.
Tipo A-B.	504	14,86	Entibación metálica. Cerchas cada 0,5 m.
Tipo B.	1 149	33,86	Entibación metálica. Cerchas cada 1,10 m.
Tipo B-C.	319	9,40	Entibación metálica. Cerchas cada 1,50 m.
Tipo C.	760	22,40	Bulones y gunita.

cavación, su inesperado derrumbamiento. Para evitar todo esto, en cuando aparecieron las primeras humedades se tomaron toda serie de precauciones: acortamiento de las pegas, disminución de la carga de explosivos, pequeños taladros de reconocimiento en el frente, avance con piquetes en clave, progresivo aumento de la entibación, estampidores en solera para arristrar los pies de las cerchas, etc. El éxito fue total; la falla se atravesó en once días.

5. *Calidad de la roca atravesada previa al revestimiento.*

Con el fin de poder proyectar el revestimiento definitivo de la galería utilizando al máximo la posible colaboración de la roca, a fin de obtener la solución menos costosa con las mejores condiciones de seguridad, la Sociedad de Reconocimientos Geofísicos, S. A. redactó un informe sobre las calidades de la roca atravesada. Comprendía el estudio de medidas microsísmicas en 160 implantaciones con un desarrollo de unos 21 m. por implantación (geófonos a 3 m.), y de ellas se dedujeron la profundidad de descompresión de la roca y su coeficiente de deformación.

Con los datos obtenidos se clasificó la roca atravesada en tres terrenos tipo, a los que, como primera aproximación, se les ha asignado un revestimiento tipo. A continuación se detallan los tres tipos de terreno, según una serie de características, en el cuadro 5, donde además están comprendidos en el terreno tipo A a los tramos de cobertura inferior a los 50 m. sea cual sea su calidad.

EPILOGO

A pesar de los muchos problemas encontrados en la excavación de la galería de presión, el cuadro 1 es muy expresivo en este sentido, las dificultades fueron vencidas gracias al equipo puesto por la empresa Constructora al servicio de la obra. Además de la preparación y experiencia de los técnicos, así como los medios mecánicos, queremos resaltar el inestimable valor de los mandos intermedios y obreros, capataces, barrenistas y entibadores, verdaderos pilares de este tipo de obra, ya que la más depurada técnica sería estéril si no existieran unos hombres esforzados que, trabajando en las condiciones más desfavorables, la pusieron en práctica.