

La Cimentación de la Cortina de la Presa de la Angostura y Métodos del Inyectado de la Roca

POR EL ING. MANUEL ANAYA S.

SUBJEFE DEL DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS DE LA COMISION NACIONAL DE IRRIGACION

I.—CIMENTACION DE LA CORTINA

La cimentación de una cortina requiere tales condiciones de impermeabilidad, resistencia y uniformidad que para satisfacerlas es necesario hacer, en ocasiones, determinadas excavaciones que no pueden ser fijadas de antemano con precisión. Sin embargo, el proyectista de la obra debe dar los perfiles probables de la excavación de acuerdo con los requisitos de diseño y los datos geológicos de que disponga, pero en la mayoría de los casos esos perfiles irán sufriendo modificaciones durante el progreso de las excavaciones a fin de adaptarlos a las condiciones reales del terreno.

En la cimentación de la presa de la Angostura se distinguen cinco zonas en las cuales se hicieron trabajos de excavación a fin de tener un cimientado formado por roca sana que reuniera requisitos de resistencia, impermeabilidad y uniformidad. Tales zonas son:

III.—Empotramiento de la margen izquierda.

II.—Desplomes de la margen derecha.

III.—Empotramiento de la margen izquierda.

IV.—Contrafuerte.

V.—Lecho del río.

1.—**EMPOTRAMIENTO DE LA MARGEN DERECHA.**—El arco de la presa de la Angostura empotra en la margen derecha de un cantil en el que se distinguen tres clases de diferentes rocas:

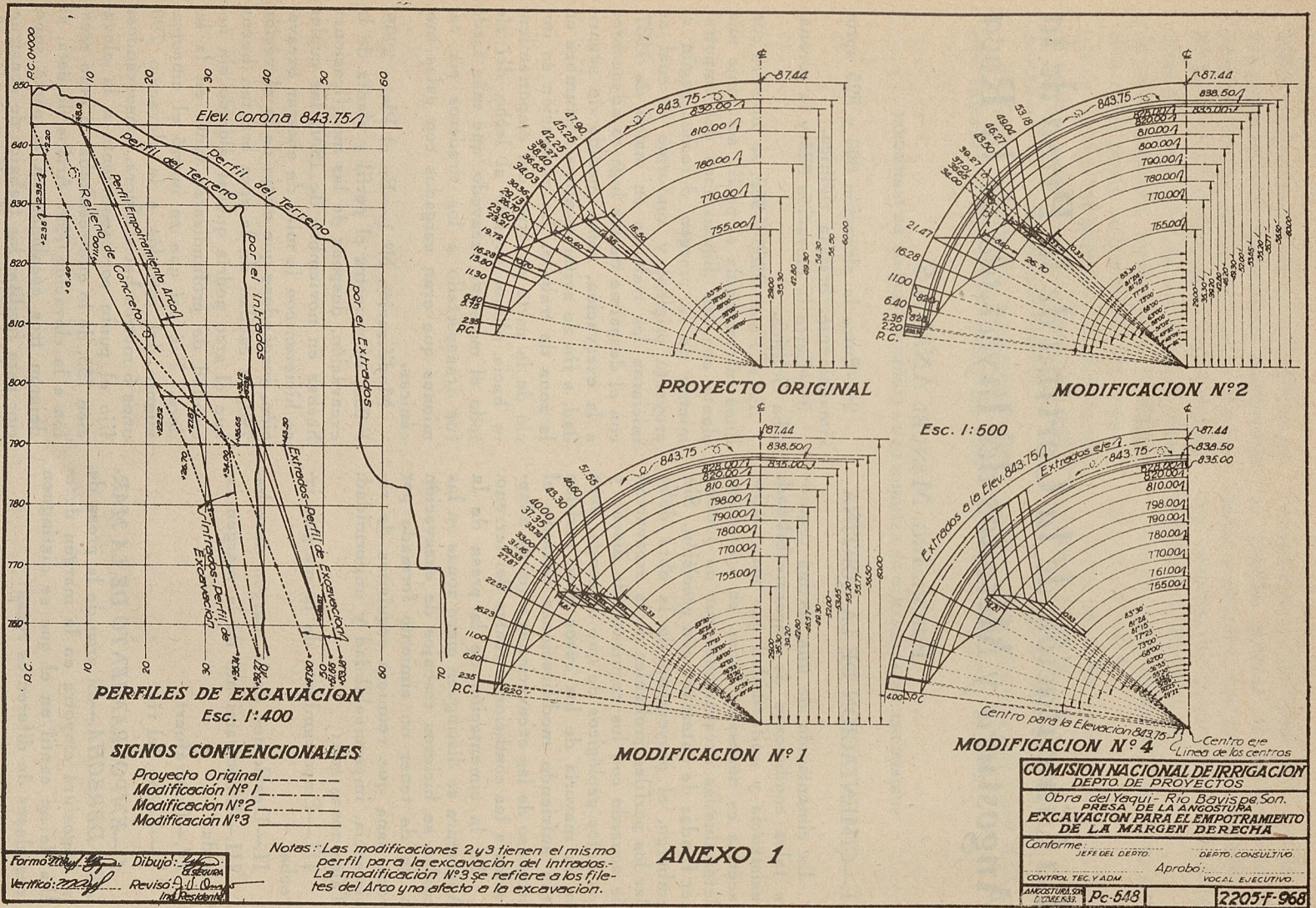
1ª—Entre el fondo del río elevación 754 a la elevación 800, riolita traquítica.

2ª—Entre la elevación 800 y 825 aproximadamente, breccia riolítica.

3ª—Entre la elevación 825 y la corona, toba riolítica.

En el Plano 2205-F-968, se muestra con línea interrumpida el perfil, así como una planta con las dimensiones del empotramiento de la margen derecha, según el proyecto original y conforme al cual se iniciaron los trabajos en marzo de 1937, con el despalme de los lugares adyacentes a la excavación, como medida de seguridad, a fin de evitar posibles derrumbes en la zona de trabajo. La excavación se inició de la parte superior del empotramiento hacia abajo, tirando al lecho del río todo el material excavado, que más tarde fué transportado a los tiraderos por camiones que eran cargados con palas mecánicas.

Modificación N° 1.—En el Plano 2205-F-968, se muestra el perfil y planta de la excavación, después de las modificaciones hechas en noviembre de 1937, las cuales se hicieron con la mira de ahorrar excavación, juzgándose que abajo de la elevación 790, la calidad de la roca era tan buena que el arco podría quedar alojado sin necesidad de profundizarse tanto en la ladera. Fué así que se movió el empotramiento del intradós a la elevación 790, unos 6 metros hacia afuera, conservándose fijo el punto correspondiente a la elevación 755, de lo que resultaba un gran escalón a la elevación 790. Arriba de ésta, se dejaron tres escalones en la parte superior para facilitar los trabajos de construcción, además se tomó la determinación de acortar los arcos de la cortina considerán-



dose entre el empotramiento teórico de éstos y la excavación, un relleno de concreto a fin de distribuir mejor los empujes, disminuyendo las fatigas en la breccia y la toba de esa parte del empotramiento. En cuanto a la forma en planta de la excavación se conservó como la del proyecto original, es decir, radial en todo su espesor arriba de la elevación 790, mientras que abajo se dejó radial en la mitad del espesor correspondiente al intradós, y la otra mitad formando un ángulo de 10° con el eje de simetría en lugar de 15° que se consideraron en el proyecto original.

Entre estas dos formas de excavación había en el proyecto original una transición de 20 metros de longitud que se dejó de 10 metros únicamente después de estas modificaciones.

Modificación N^o 2.—En diciembre del mismo año de 1937, se observó que a partir de la elevación 798 hacia abajo, la riolita tenía ya las características de roca sana y homogénea; por lo tanto, el escalón que se había proyectado para la elevación 790 se subió a la 798. Abajo de la elevación 790 se movió el empotramiento hacia el cerro unos tres metros con el objeto de eliminar una zona muy junteada del lado intradós. En cuanto a la forma, en planta, de la excavación, continuó siendo radial arriba de la elevación 798, en tanto que abajo de ésta, la parte radial del intradós se redujo de un medio a un tercio del espesor, en tanto que los dos tercios restantes del lado del extradós, quedaron formando un ángulo de 10° con el eje de simetría, suprimiéndose la transición entre las dos formas de excavación. El objeto de esta modificación fué el ahorro de excavación y, por lo tanto, de concreto.

El perfil de la excavación después de las modificaciones número 2, se muestra con punto y línea en el Plano 2205-F-968, en donde también figura la planta respectiva, conforme a los cuales se terminó este trabajo en mayo de 1938.

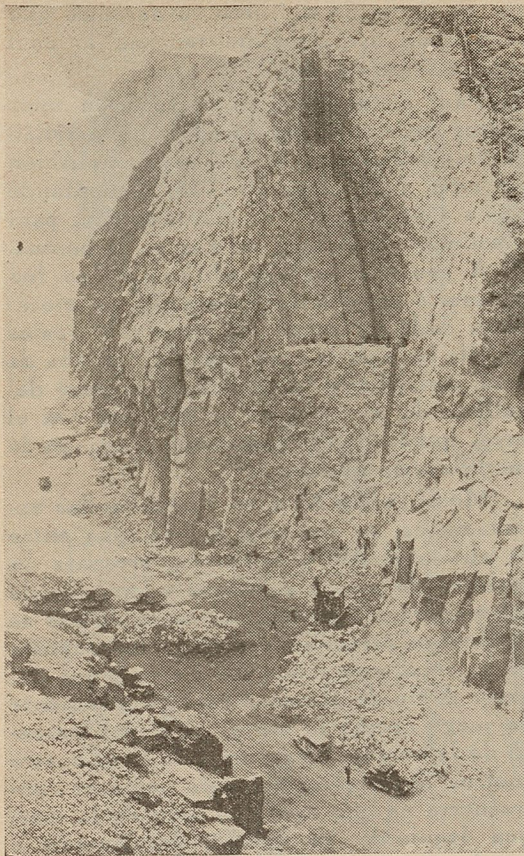
Modificación N^o 3. — Estudiadas las propiedades físicas de la roca del empotramiento se encontró un cambio brusco de resistencia, así como de propiedades elásticas a la elevación 798, precisamente en el cambio de la riolita traquítica a la breccia. Analizados en las Oficinas Centrales de la Comisión, en la ciudad de México, las consecuencias que esta condición acarrea-

ría en el diseño del arco se encontró que resultaban esfuerzos de tensión, lo cual era un inconveniente.

Para evitar esto, se proyectaron unos filetes en la zona del intradós, que amplían el empotramiento, siendo esta ampliación de cero a la elevación 755, aumentando hasta 4.30 metros a la elevación 790, para disminuir hasta 0.88 metros en la corona.

A pesar de esta modificación, no fué necesario ampliar la excavación ya ejecutada, dada la forma y dimensiones reales de ella bajo de la elevación 798. Arriba de ésta, únicamente se afectó el espesor del relleno de concreto en su contacto con el arco, quedando la excavación como en la modificación número 2.

Modificación N^o 4. — Ya hechas las excavaciones, se encontró que la toba entre la elevación 830 y la corona, presenta un sistema de juntas o grietas orientadas de tal manera que pueden ser causa de que se produzcan esfuerzos cortantes indeseables en la roca, motivados por los empujes del arco. A fin de eliminar este inconveniente se juzgó necesario mover el empotramiento de la corona, elevación 843.75 en cuatro metros hacia el cerro, pero como el contrafuerte en que apoya el arco en la margen izquierda ya estaba desplantado e igual cosa ocurría con el propio arco en el lecho del río, hubo necesidad de adaptar la forma de la estructura a las nuevas condiciones, es decir, conservar como en el proyecto original el arranque del arco en el contrafuerte de la margen izquierda así como en el lecho del río hasta la elevación 761, modificándolo a partir de esta elevación a fin de mover los cuatro metros hacia el cerro en el empotramiento de la margen derecha a la elevación de la corona. Esto se consiguió aumentando los radios del extradós a partir de la elevación 761, moviendo al mismo tiempo los centros a lo largo de la línea. *P. T. Centro original* a fin de conservar como fijo dicho *P. T.*, que está en el contacto del arco con el contrafuerte de la margen izquierda. De esto resultó que el extradós del arco que originalmente era vertical, se desplomara, siendo nulo este desplome en el *P. T.*, aumentando poco a poco hasta su valor máximo en el *P. C.*, en donde es de 5 centímetros aproximadamente de desplome por cada metro de diferencia de nivel. Los perfiles de excavación, desarrollados por el extradós original son los mismos que los



Vista de la excavación para el empotramiento del arco en la margen derecha entre las elevaciones 770 y 745.

de la modificación N° 2 y en cuanto a la forma en planta, del empotramiento, se usó el mismo criterio empleado en esa misma modificación N° 2. No, fué necesario hacer ningún trabajo de excavación extra abajo de la elevación 798 en vista de que esta modificación no afectó prácticamente el trabajo ya realizado. Arriba de esa elevación hay necesidad de excavar un volumen extra aproximado de 1,800 m³.

2.—DESPLOMES DE LA MARGEN DERECHA.—En el Plano 2205-F-973 se muestra una sección por la línea A-A, entre el lecho del río y la elevación 850, en la que se aprecia en el cantil un fuerte desplome dividido en dos salientes, uno de ellos, a la elevación 795 y el otro a la elevación 765.

De una manera general, en esta zona como en el resto del bloque geológico que comprende el sitio de la cortina, hay dos sistemas de juntas más notables en la roca, normales prácticamente entre sí y orien-

tadas en este lugar, uno de Norte a Sur y otro de Este a Oeste, con echados entre 70° y 80°. Un tercer sistema de juntas con echados entre 20° y 30° corta a las anteriores formando grandes bloques.

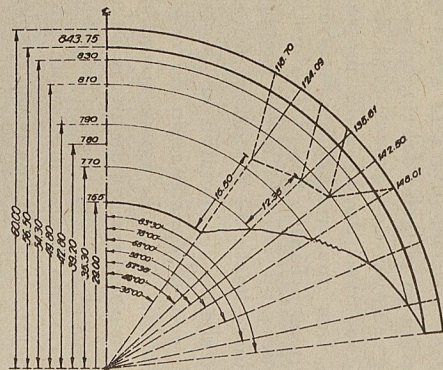
El peso de la roca desplomada tendía a separar las juntas del sistema Este-Oeste y siendo la Angostura un lugar en que pueden ocurrir temblores, había la posibilidad, aunque muy remota, de que ocurriera algún derrumbe, que pudiera abarcar hasta la parte superior del empotramiento de la margen derecha, comprometiendo la seguridad de la cortina. Por otra parte, cualquier derrumbe en la saliente superior, aun cuando no afectara al empotramiento, caería sobre la planta hidroeléctrica que se construye en el lecho del río, trayendo las consiguientes pérdidas de equipo y destrozos del edificio. Estos fueron los factores que determinaron la excavación de toda roca desplomada del saliente superior, en cuanto al saliente inferior del desplome se procedió a recibirlo en un contrafuerte de concreto.

La excavación del saliente superior se hizo con explosivos, en cantidades muy pequeñas, habiéndose ejercido la vigilancia necesaria para controlar la longitud, el espesor y la carga de los barrenos a fin de no dañar la roca detrás de ellos.

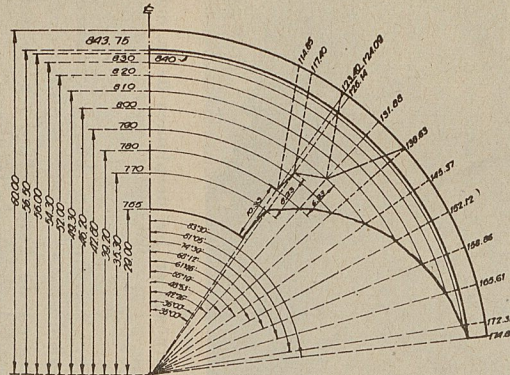
Durante los trabajos ocurrieron dos hechos que justificaron plenamente la determinación de eliminar el saliente superior. En el momento de una dinamitación en la parte superior de la excavación, ocurrió un derrumbe como de unos doscientos metros cúbicos de roca. Un segundo derrumbe tuvo lugar en un bloque como de cincuenta metros cúbicos, cuando cuatro trabajadores con sus respectivas perforadoras neumáticas procedían a barrenarlo para su dinamitación, los trabajadores quedaron suspendidos en el aire por medio de cables.

3.—EMPOTRAMIENTO DE LA MARGEN IZQUIERDA.—En la margen izquierda, el arco de la cortina empotra desde el lecho del río hasta la elevación 790 en la riolita traquítica y de la 790 hasta la corona, en un macizo de concreto llamado contrafuerte de la margen izquierda.

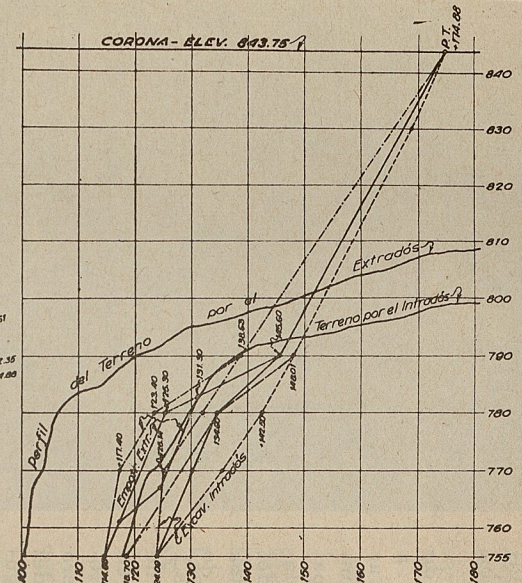
En el Plano 2205-F-969, con línea discontinua se muestra el perfil y las dimensiones de la excavación en su forma original y de acuerdo con los cuales se iniciaron los trabajos en noviembre de 1937. La forma del empotramiento desde el lecho del río



PROYECTO ORIGINAL



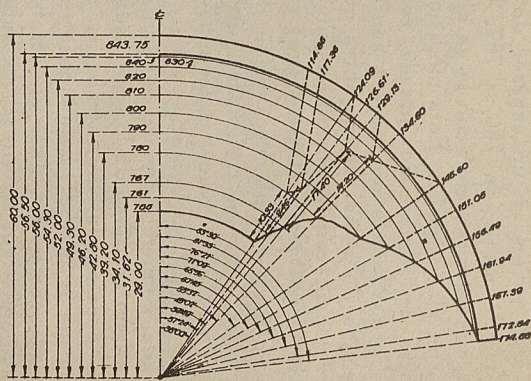
MODIFICACION No. 1



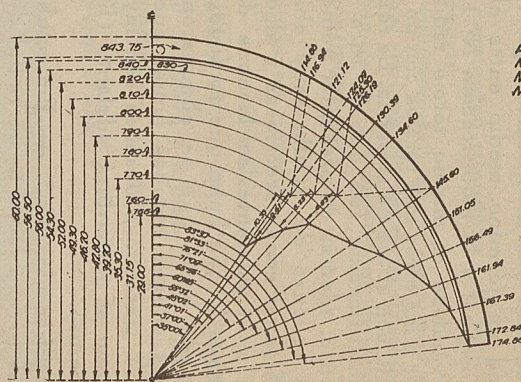
PERFILES

SIGNOS CONVENCIONALES:
 PROYECTO original _____
 Modificación No. 1 _____
 Modificación No. 2 _____
 Modificación No. 3 _____

Las Modificaciones 2 y 3 tienen el mismo perfil de excavación en el Intradós.



MODIFICACION No. 3



MODIFICACION No. 2

ESCALA=1:500

COMISION NACIONAL DE IRRIGACION
 DEPTO. DE PROYECTOS
 Distrito de Riego del Vaquí-Río Bavisque, Son.
PRESA DE LA ANGOSTURA
EXCAVACION PARA EL
EMPOTRAMIENTO EN
LA MARGEN IZQUIERDA
 ANEXO No. 2

ANEXURA 204
 D.C. P.R. 1936

P-C-549 2205-F-969

Dibujo: M.M.C. Calko: M.M.C.
 M.M.C. M.M. CABREIRA
 Verificado: J. U. Revisó: J. U.
 ING. M. ANAYA YS. ING. PRESIDENTE

197

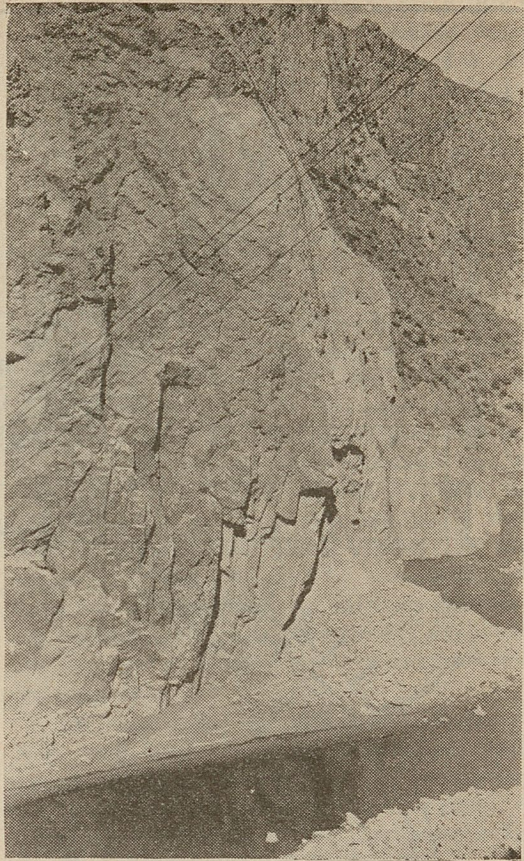
hasta la elevación 790 era radial en la mitad del espesor correspondiente del intradós, en tanto que la otra mitad formaba un ángulo de 15° con el eje de simetría.

Modificación N^o 1.—En diciembre de 1937 se hizo la primera modificación a este empotramiento con la mira de ahorrar excavación, moviendo el perfil afuera un promedio de 6 metros. Pero la principal modificación consistió en adaptar solamente un tercio del espesor del lado del intradós como empotramiento radial y los otros dos tercios formando un ángulo de 10° con el eje de simetría. (Línea y punto.)

Modificación N^o 2.—En diciembre de 1937, se hizo una modificación que fué en realidad un término medio entre el proyecto original y la modificación N^o 1, pero conservándose el mismo tercio radial del espesor y los otros dos tercios con un ángulo de 10° con el eje de simetría. La razón de esta modificación fué que la roca de la superficie, además de presentar numerosas juntas rellenas de arcilla muy abiertas, tenía algunas zonas brecciosas y algo alteradas, principalmente en la zona del intradós por lo que hubo que profundizar la excavación hasta que se eliminaron esos defectos aunque algunas juntas quedaron abiertas, tratándose después con inyecciones como se describirá adelante (línea y dos puntos).

Modificación N^o 3. — En octubre de 1938 se excavó la parte no radial del empotramiento del lado del extradós, paralelamente a sí misma en un espesor de 4 metros entre la elevación 780 y 767, ligando esta nueva excavación con la ya ejecutada con un plano de 1:1. Esta modificación se hizo en virtud de que la roca continuaba presentando numerosas juntas siendo algunas de ellas tan notables que podrían ser consideradas como discontinuidades de la cimentación (línea llena).

4. *Contrafuerte*.—Toda excavación del contrafuerte se hizo en riolita traquítica y no se sujetó a un proyecto determinado sino que se atendió únicamente a descubrir roca sana, homogénea y con sus juntas libres de relleno arcilloso de lo que resultó una forma escalonada. Los trabajos se iniciaron en mayo de 1937, habiéndose terminado la excavación en bruto en octubre de 1938; sin embargo, en virtud de haber resultado la zona más difícil de preparar por las razones que se expondrán adelante, los trabajos de afinamiento en algunos



Vista del trabajo en los desplomes de la margen derecha.

lugares se terminaron hasta octubre de 1939, habiéndose interrumpido durante cuatro meses de este período para activar los de otros lugares de la obra.

5. *Lecho del río*.—Para la cimentación de la cortina en el lecho del río, hubo necesidad de remover una gruesa capa de material de acarreo de 12 a 15 metros de espesor. Los materiales consistieron en arena, grava y cantos rodados, abundando piedras de gran tamaño en la parte inferior, algunas hasta de 2 metros cúbicos.

Los trabajos se iniciaron en diciembre de 1937, con la construcción de dos ataguías, una del lado de aguas arriba de la cortina con once metros de altura sobre el lecho original del río y otra del lado de aguas abajo con cuatro metros de alto.

En marzo de 1938 quedaron concluidas las ataguías conitnuándose la excavación en el lecho del río la que se terminó en mayo de 1938.

Para dominar las filtraciones se instalaron 4 bombas centrífugas de 11,300 litros por minuto, de capacidad cada una, dos del lado de aguas arriba y dos de aguas abajo de la cortina, de las cuales solamente trabajó una de ellas en cada lugar; la otra trabajó intermitentemente. El gasto medio de las filtraciones de aguas arriba era de 12,000 lts./min., el de las aguas abajo de 7,200 lts./min.

Los colados de concreto en el lecho del río se iniciaron el 27 de mayo, pero se suspendieron porque el 7 de agosto de ese año de 1938, una creciente destruyó las ataguías, rellenando completamente la excavación. Se inició la reexcavación del lecho del río y la reconstrucción de las ataguías en octubre de ese año de 1938. Para éstas se emplearon materiales extraídos de la reexcavación, a excepción de una parte del enrocamiento para el que se abrió una pequeña cantera. En esta ocasión la ataguía de aguas arriba se hizo de 3 metros de altura, en tanto que la de aguas abajo quedó prácticamente como la primera.

La reexcavación del lecho del río se extendió hasta la cimentación de la planta de fuerza, terminándose en enero de 1939.

6. *Cantidades de trabajo.*—En la tabla siguiente se muestran los volúmenes de excavación en bruto, de los distintos materiales, es decir, no se incluyen las excavaciones para la preparación o afine de la cimentación.

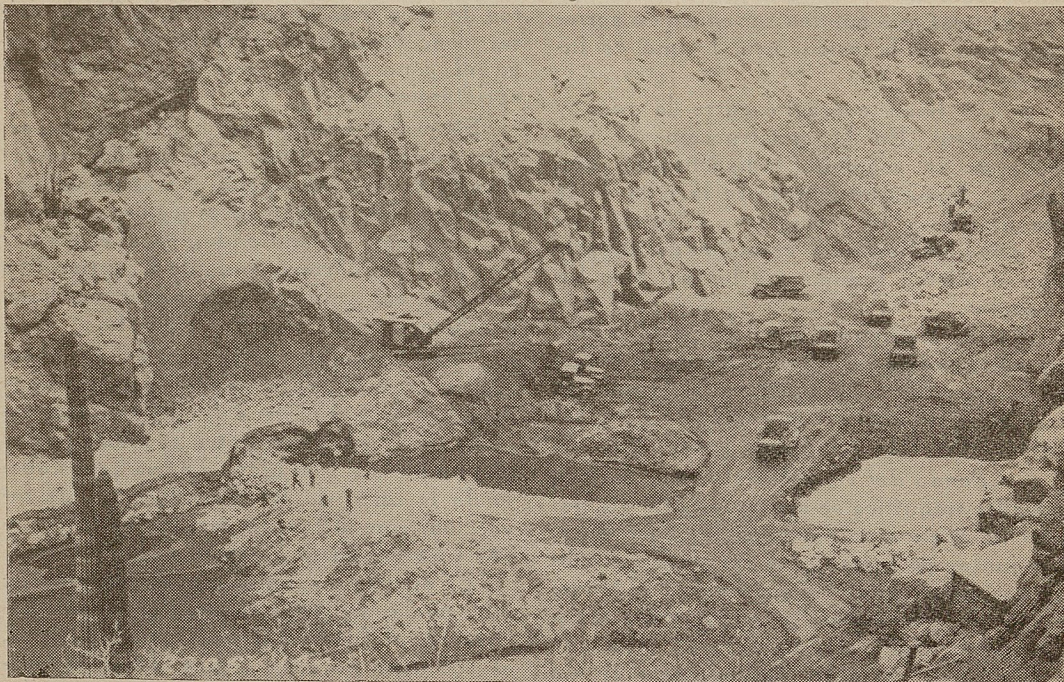
Zona de trabajo	Despalme M ²	Excavación grava etc. M ³	Exc. Ro- ca fija M ³
Margen derecha....	390	.....	55158
Desplomes M. D...	.....	.....	2750
Lecho del río.....	.....	63845	.....
Margen izquierda...	1795	.....	33483

En la margen izquierda está incluido el contrafuerte.

El volumen de trabajo ejecutado en las ataguías, incluyendo la reconstrucción hecha después de las crecientes de 1938, se da a continuación:

Excavación en tierra	5,184 m ³
Relleno de materiales impermeables.	22,041 ..
Relleno de grava y arena.....	2,560 ..
Enrocamiento.	7,503 ..

Vista general de la ataguía de aguas arriba.



II.—CARACTERISTICAS DE LA ROCA EN LAS DIFERENTES ZONAS DE LA CIMENTACION. TRATAMIENTO SEGUIDO EN CADA UNA DE ELLAS.

Terminada la excavación en bruto de una zona de la cimentación y antes de proceder a la colocación de concreto para desplantar la cortina, se ejecutaron en ella algunos trabajos de preparación, a fin de garantizar principalmente, los tres requisitos siguientes:

1º Que la roca sea sana. Es decir, que la cimentación esté libre de roca alterada o en proceso de alteración o dañada por las dinamitaciones previas, pues su resistencia en este caso, se reduciría apreciablemente, provocándose mayores deformaciones que en el resto de la cimentación y hasta posibles agrietamientos en la estructura y además de constituir vías potenciales de filtración bajo el cimientado de la cortina.

2º Que la roca sea homogénea. La cimentación no debe presentar juntas abiertas, huecos o zonas de materiales de diferentes propiedades físicas que impidan una distribución uniforme de los esfuerzos transmitidos a ella. Cuando hay juntas abiertas o huecos, hay también concentraciones de esfuerzos y, por lo tanto, algunas zonas resultan con fatigas y deformaciones muy severas que pueden ser causa de agrietamientos en la estructura, lo que es indeseable.

3º Un buen contacto entre la roca y el concreto. En la construcción de una presa es un requisito indispensable proveer un buen contacto entre la roca de la cimentación y la estructura, a fin de evitar principalmente la creación de subpresión al mismo tiempo que las posibles filtraciones.

En las siguientes páginas se describen las condiciones de la roca de cimentación en la presa de La Angostura, así como los tratamientos a que fué sometida para satisfacer los tres requisitos anteriores.

7. *Fondo del río.*—En el fondo del río, la riolita traquítica se presenta como un macizo de roca sana homogénea, muy dura, con juntas perfectamente cerradas formando una masa que el río erosionó en el transcurso de los siglos, prácticamente a la elevación 754 y con numerosas pozas de profundidad variable, estimándose en un

metro la profundidad media, que ofrecieron un magnífico contacto entre la roca y el concreto y un obstáculo natural en contra de las filtraciones. Hacia el lado de aguas abajo, algunas pozas alcanzaron la elevación 752. Se juzgó que estas irregularidades en la superficie de la roca, suministraban la suficiente resistencia al deslizamiento, por lo que se abandonó el proyecto original de excavar unos escalones en forma de dientes de sierra, trabajo que de haberse ejecutado hubiera causado más perjuicios que beneficios por los efectos adversos de la dinamitación en la roca.

Las siguientes propiedades físicas se determinaron en el laboratorio de la obra, y dan idea de la calidad de la roca.

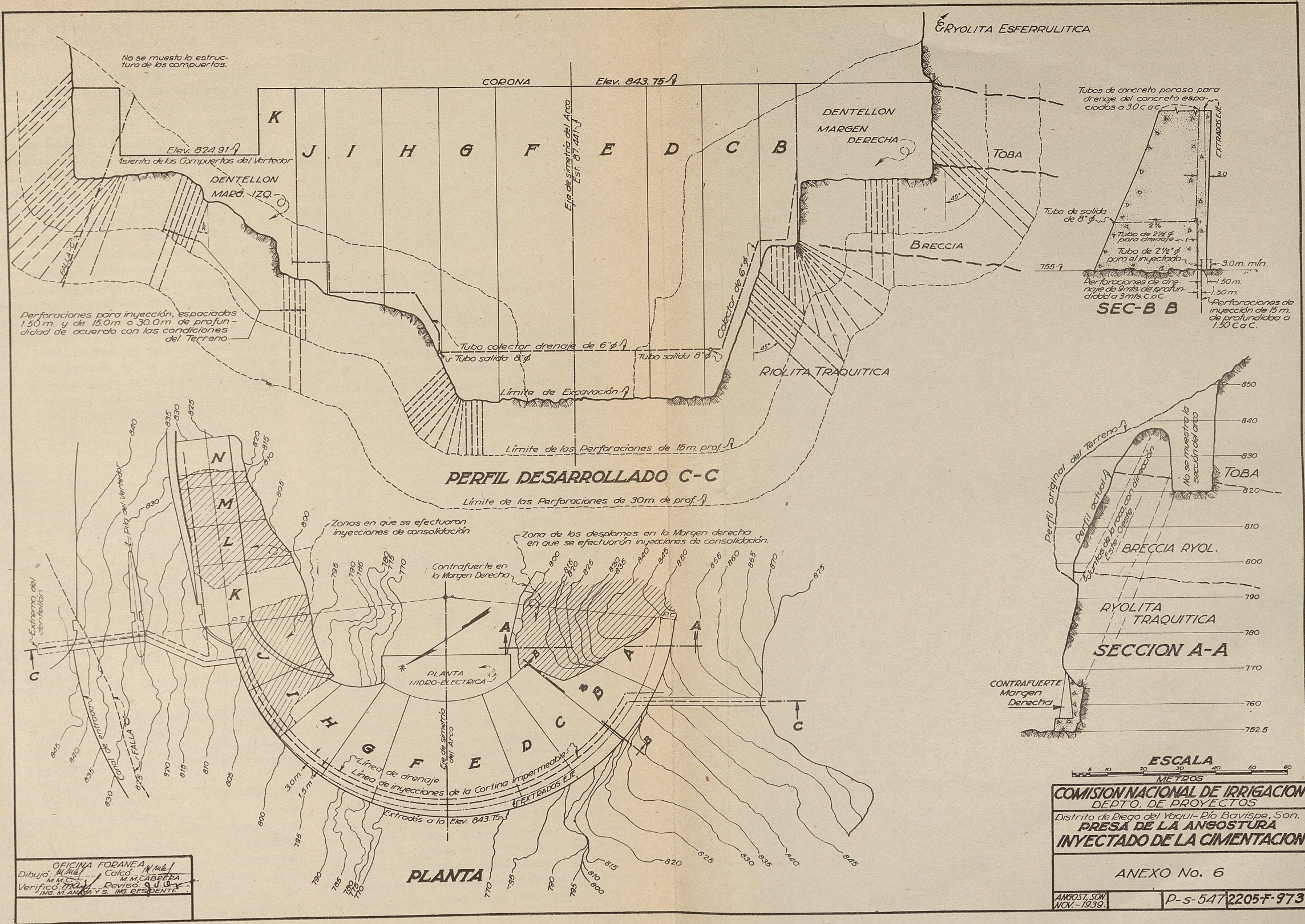
Densidad.	2.42
Absorción a las 72 horas.	0.8 %
Resistencia a la compresión	570 kg/cm ²

No obstante su aspecto de roca sana y homogénea, se reconoció toda la zona comprendida en el desplante de la cortina, golpeándola con un martillo de minero que no acusó ninguna irregularidad. Dada su magnífica calidad, el tratamiento a que se sometió antes de iniciar los colados de concreto consistió simplemente en lavarla con chiflones de agua a una presión 14.1kg./cm² (200 lbs./pulg.²), soplándose con aire comprimido a 7 kg./cm² (100 lbs./pulg.²) de presión; además se eliminaron las salientes de roca más prominentes, a fin de evitar concentraciones severas de esfuerzos en el concreto que pueda ser causa de agrietamientos.

Se practicaron perforaciones de inyección correspondientes a la cortina impermeable de la cimentación y tras de colocar y alinear las formas se procedió al colado de concreto, extendiendo, para principiar una capa de mortero como de 2 centímetros de espesor, a fin de garantizar un buen contacto entre la roca y el concreto.

Posteriormente al inyectado, se hicieron, a través del concreto, perforaciones de drenaje de 9 metros de profundidad, espaciadas tres metros entre sí y localizadas en una línea a 1.50 metros hacia aguas abajo de la línea de las perforaciones de inyección, con el fin de drenar las filtraciones y evitar en lo posible la subpresión.

Es oportuno señalar que el consumo de la lechada de todas las perforaciones hechas en el fondo del río, fué en general, el volumen necesario para llenar la per-



foración, siendo prácticamente nulos los volúmenes tomados por la roca, de donde se deduce que las juntas estaban bien tapadas.

8. *Margen derecha.*—En el empotramiento de la margen derecha, entre el fondo del río y la elevación 765 aproximadamente, la riolita no mostraba ninguna irregularidad que tuviera que ser objeto de algún tratamiento en particular. Las juntas estaban perfectamente tapadas y los bloques formados entre ellas, eran de grandes dimensiones. Entre la elevación 765 y la 798, la riolita presentó mayor número de juntas, principalmente del lado del intradós, estando bien tapadas con calcita la mayor parte de ellas; para tapar el resto se practicaron perforaciones de inyección de 6 metros de profundidad, localizadas de manera que cortaron el mayor número de juntas, siendo su espaciamiento no mayor de tres metros en el sentido horizontal, y 1.50 metros en el sentido vertical. Estas perforaciones interceptaron algunas juntas o grietas más abiertas que presentaron un fácil camino a la lechada hacia el lado de aguas abajo del empotramiento a la zona de los desplomes de la margen derecha, en donde se tuvieron algunas fugas de lechada. Del lado de aguas arriba, las juntas no son tan numerosas y están perfectamente rellenas con calcita, de allí el escaso consumo de lechada de cemento de las perforaciones de la cortina impermeable que se hicieron a 45° de inclinación con una longitud de 16.70 metros.

Las características físicas de la roca en esta zona son las siguientes:

Densidad entre	2.42	y	2.50
Absorción a las			
72 horas entre	0.62%	y	1.05%
Resistencia a la			
compresión	465 kg/cm ²	y	570 kg/cm ²

Se nota un descenso en la resistencia a la compresión de la riolita en los niveles superiores con relación a la parte inferior del empotramiento, pero de todas maneras esa resistencia es muy amplia.

Como las excavaciones se hicieron con explosivos, era natural que la roca se encontrara dañada en un cierto espesor por efecto de las dinamitaciones. Se procedió a remover dicho espesor que alcanza máximos de un metro con un promedio aproximado de 60 centímetros. Para este trabajo se prohibió el uso de los explosivos

y en algunos casos hasta el uso de rompedoras neumáticas, teniendo que hacerse la mayor parte con barras, cuñas y marros. Se suspendía la remoción de roca cuando el sonido que producía al golpearla con el martillo de minero y la inspección minuciosa de una zona no acusaban que la roca hubiera sido afectada en su posición original. Frecuentemente, la calcita que rellenaba algunas juntas se encontraba en estado de alteración, caracterizándose entonces, por su aspecto granuloso y su fácil desintegración. En este caso la calcita alterada era removida hasta que desaparecía totalmente, para lo que se usaba una barra delgada o alambres, según el espesor de la junta.

Finalmente, para garantizar un buen contacto de la roca con el concreto, se lavó ésta con un chorro de agua a una presión de 14.1 Kg./cm² (200 lbs./pulg.²), y en seguida con un soplete de aire comprimido a 7 Kg./cm² (100 lbs./pulg.²), de presión. A menudo la roca presentaba gran cantidad de manchas de aceite que provenían de la lubricación de los cablevías, acentuándose este inconveniente en los días calurosos del verano; en este caso la roca, se limpiaba antes del lavado, por medio de un chorro de arena y aire hasta que el aceite desaparecía completamente. Al efectuarse el colado se tenía cuidado que el agregado grueso no quedara en contacto con la roca, siendo la pasta la que llenaba todas las pequeñas ondulaciones del empotramiento, formando así una liga impermeable entre el concreto y la roca.

Posteriormente al inyectado de la cortina impermeable, se hicieron perforaciones de drenaje para coleccionar filtraciones a través de la roca.

Entre las elevaciones 798 y 825, la roca del empotramiento es una breccia riolítica, transición entre la riolita traquítica de la parte inferior y la toba de la parte superior. Como es natural, no es una roca homogénea y contiene numerosas vetas de calcita y huecos en forma de pequeñas bolsas no mayores de 30 centímetros en su máxima dimensión. No obstante, su resistencia y calidad son suficientemente amplias para apoyar en ella el arco. De las propiedades físicas determinadas en el laboratorio de concreto de muestras de roca tomadas a diferentes elevaciones, se nota un descenso de resistencia de la breccia de los niveles superiores con relación a

la de los niveles inferiores. De las propiedades siguientes puede juzgarse la calidad de la roca.

Resistencia a la compresión		
entre	220Kg./cm. ²	y 337Kg./cm. ²
Densidad entre . . .	2.15	y 2.47
Absorción a las 72 horas, entre	2.21%	y 3.50%

Aun cuando no se han ejecutado trabajos de preparación en esta zona, ellos consistirán principalmente en remover la capa de roca dañada por las dinamitaciones que como en el caso de la riolita tiene un espesor medio de 60 centímetros. Hacer el suficiente número de perforaciones de inyección a más de las de la cortina impermeable, con el fin de tener una roca más homogénea, tapando al mismo tiempo las vetas de calcita y rellenando las pequeñas bolsas. Después de este proceso de inyectado se harán perforaciones de drenaje para colectar filtraciones.

Arriba de la elevación 825, la roca del empotramiento es una toba amarillenta, bastante dura y homogénea, pero es relativamente porosa, por lo que se construirá un dentellón que, partiendo de la estación 24.50, del arco va a empotrar en un cantil de riolita. El fondo del dentellón estará a la elevación 817, aproximadamente por lo que estará desplantado dentro la breccia, en donde se harán las perforaciones de inyección, que será la continuación de la cortina impermeable. Así se aumentará la longitud de la trayectoria de percolación en los niveles superiores del empotramiento de la margen derecha.

Las siguientes propiedades físicas de la toba fueron obtenidas las pruebas hechas en el laboratorio de concreto, presentándose la misma particularidad señalada en el caso de la riolita y la breccia del descenso de resistencia a la compresión en los niveles superiores con relación a los inferiores.

No se han hecho hasta la fecha trabajos de preparación en la toba, pero ellos consistirán principalmente en remover la roca dañada por las dinamitaciones, que en este caso tiene un espesor muy pequeño (probablemente 20 centímetros en promedio) y hacer el suficiente número de perforaciones de inyección para rellenar algunas juntas o grietas de la roca en la parte superior del empotramiento.

9. *Margen izquierda.*—La riolita del empotramiento de la margen izquierda es

de buena calidad, aunque en términos generales, presente mayor número de juntas que la riolita de la margen derecha a la elevación correspondiente. Entre el fondo del río y la elevación 765 aproximadamente la roca estaba en inmejorables condiciones, las juntas se presentaron perfectamente tapadas y los bloques, como en la margen derecha, eran de grandes dimensiones. Entre la elevación 765 y la 780, el número de juntas aumentó considerablemente, siendo muy notables las de un sistema que en este lugar tenía la dirección norte-sur, que es prácticamente normal a la dirección de los empujes del arco y que presentaban la característica de estar rellenas parcialmente de calcita, que en la mayoría de los casos se presentó en proceso de alteración. Tanto por la dirección de las juntas como por la naturaleza y condiciones del relleno, su consolidación con inyecciones de lechada, se consideró de primera importancia, ya que de otra manera, los empujes del arco hubieran obrado sobre espesores relativamente pequeños de la roca, produciéndose fatigas considerables al esfuerzo cortante y a la flexión, provocándose severas deformaciones que hubieran inducido esfuerzos indeseables en la cortina. El tratamiento completo de esta zona se describe a continuación:

La roca que presentaba juntas parcialmente rellenas con calcita alterada o arcilla, era removida totalmente; en ocasiones, aun tratándose de roca dura, hasta el relleno de calcita sana y dura y la arcilla desaparecerían totalmente. Se presentaron dos juntas, sin embargo, una del lado del intradós y otra a medio empotramiento, ambas en planos normales prácticamente a la dirección de los empujes, que se encontraron prácticamente sin relleno, con un ancho aproximado de dos centímetros. Se trató de excavar la roca como en los demás casos, hasta encontrar un buen relleno de las juntas, pero la roca adyacente se presentó tan dura y de buena calidad, que se juzgó suficiente el inyectado de lechada para el cual se tomaron precauciones especiales. En la parte expuesta de las juntas se hicieron perforaciones en el plano de las juntas, de unos sesenta centímetros de profundidad; a unos ochenta centímetros de separación, en los cuales se pusieron tubos de fierro galvanizado de 1-1/2" de diámetro que servirían en el momento de la inyección para expulsar

el aire contenido en la junta; entre dos tubos las juntas se calafateaban con estopa alquitranada, a fin de impedir que el mortero del concreto pudiera penetrar, tapano las perforaciones de inyección. Las perforaciones para la inyección se hicieron transversalmente a los planos de las juntas y de manera que estas fueran cortadas a diferentes elevaciones, especial atención pusieron los perforistas para cruzar la junta, acusándose en todos los casos la misma separación, aproximadamente, que en la parte expuesta, es decir, alrededor de dos centímetros; la roca antes y después de cruzar las juntas era dura compacta, sin ninguna alteración. Cuando el contacto ya había cubierto toda la parte expuesta de las juntas, se procedió al inyectado de lechada, colocando válvulas en todos los tubos de la junta que se estaba inyectando, a fin de cerrarlas a medida que la lechada aparecía en cada una, ya que todas estaban comunicadas entre sí; la inyección se inició por la perforación que cortó a la junta en el punto más bajo, a fin de expulsar la mayor cantidad de aire posible, y se continuó por los tubos superiores, inyectándose por último, los tubos que sirvieron de ventilas.

Arriba de la elevación 780, en la zona del extradós, correspondiente a las columnas I y J la estructura rocosa estaba formada por pequeños bloques que aun cuando se presentaban amoldados perfectamente entre sí, no ofreciendo ninguna dificultad a la transmisión de los esfuerzos, constituían un fácil camino a las filtraciones por lo que su eliminación se juzgó necesaria, haciéndose previamente dos perforaciones con máquina de diamantes, que acusaron una roca compacta a 6 metros de profundidad, con relación a la excavación ya ejecutada, por lo que se determinó excavar un dentellón de unos cinco metros de ancho, a fin de cortar la zona de los bloques pequeños; el fondo del dentellón se llevó hasta la roca compacta acusada por las perforaciones de diamantes, que presentaba menor número de juntas.

En las mismas columnas I y J, fuera de la zona de este dentellón, la roca se presentó con juntas rellenas, en parte con calcita y en parte con arcilla, en espesores que variaron entre 1 y 2 centímetros. Las zonas en que esas juntas eran más notables, se excavaron, pero llegó el momento en que la calidad de la roca era tal, que no se juzgó necesario continuar la excavación

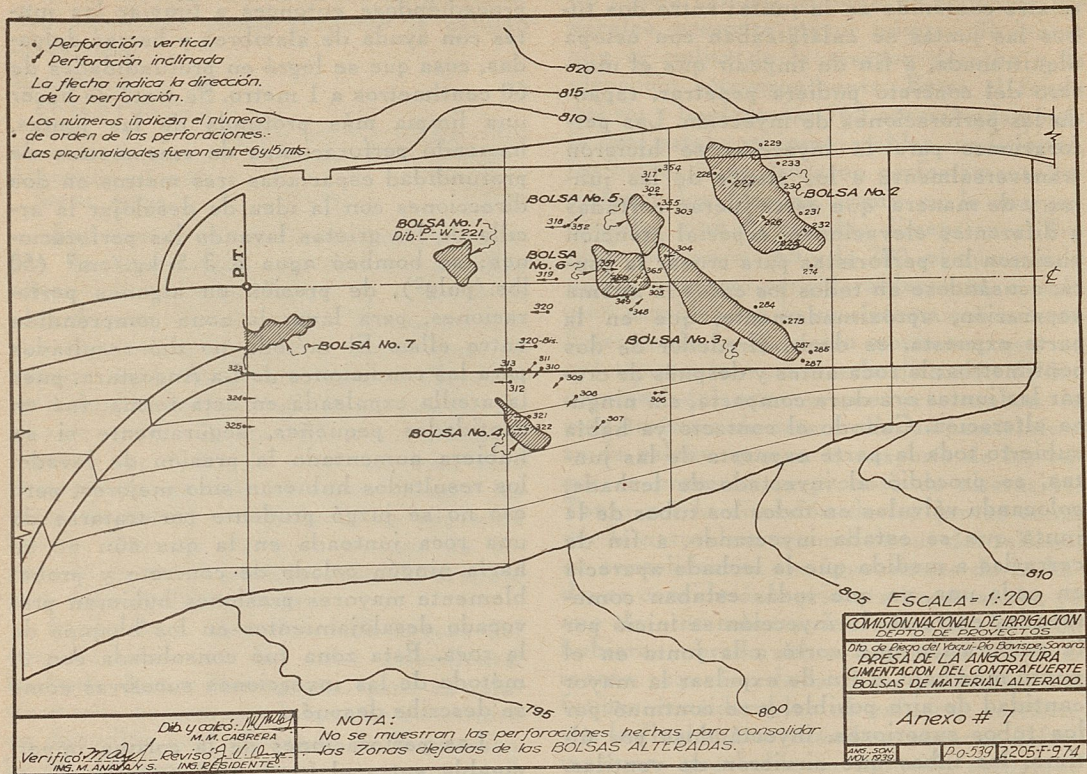
procediéndose entonces a limpiar las juntas con ayuda de alambres y barras delgadas, cosa que se logró en profundidades de 60 centímetros a 1 metro. Se trató de hacer una limpia más profunda de las juntas, haciendo perforaciones de seis metros de profundidad espaciadas tres metros en dos direcciones con la idea de desalojar la arcilla de las grietas lavando las perforaciones; se bombeó agua a 3.5 kg./cm² (30 lbs./pulg²), de presión en algunas perforaciones, para lavar la zona comprendida entre ellas. El método no dió resultados para las condiciones de La Angostura, pues la arcilla expulsada en esta forma, fué en cantidades pequeñas, seguramente si se hubiera aumentado la presión de lavado, los resultados hubieran sido mejores, pero eso no se juzgó prudente por tratarse de una roca junteada en la que aún no se hacía ningún colado de concreto y probablemente mayores presiones hubieran provocado desalojamientos en los bloques de la roca. Esta zona fué consolidada con el método de las inyecciones sucesivas como se describe después.

Las perforaciones de la cortina impermeable entre el fondo del río y la elevación 780, se hicieron a 45° de inclinación y de 16.15 metros de longitud; entre la elevación 780 y el dentellón del vertedor; las perforaciones de la cortina impermeable se hicieron originalmente de 15 metros de profundidad, después de la inyección de éstas se hicieron nuevas perforaciones de 30 metros de profundidad en las zonas de mayor consumo de lechada; la razón que motivó esta reperfuración a mayor profundidad, fué que se trataba de uno de los lugares más junteados en la cimentación alojada en la zona de máximas fatigas transmitidas por el arco.

La continuación de la cortina impermeable hacia el vertedor se hizo por el fondo de un dentellón, localizado en riolita de muy buena calidad, con las juntas perfectamente cerradas y prácticamente sin arcilla.

La remoción de la roca dañada por las dinamitaciones se hizo siguiendo los métodos y el criterio empleado en la margen derecha.

10. *Contrafuerte de la margen izquierda.*—La riolita para la cimentación del contrafuerte de la margen izquierda es de buena calidad en general, alternándose zonas de roca compacta y homogénea con



zonas de roca con juntas abiertas o rellenas de arcilla o calcita que generalmente se presentó en estado de alteración, en espesores variables, algunos hasta de cinco centímetros. Hubo, además, algunas zonas de roca muy alterada, presentándose en forma de bolsas con abundante cantidad de arcilla.

En las zonas de roca compacta el tratamiento se reducía a la remoción de la roca dañada por las dinamitaciones y al lavado con un chiflón de agua primero, y con un chiflón de aire después. Las zonas de roca junteada eran excavadas totalmente hasta que desaparecía la arcilla de las juntas o era factible limpiar éstas, en cuyo caso se procedía a la limpia y lavado, usándose barras delgadas o alambre y un chorro de agua a 14.1 kg./cm² (200 lbs. pulg.²), de presión. Con este procedimiento se pudieron lavar las juntas hasta una profundidad de un metro para rellenarse con mortero ya fuera antes o en el momento del colado. Se encontraron numerosas juntas sin ningún relleno, formando verdaderas discontinuidades en la transmisión de los esfuerzos, por lo que se practicaron numerosas perforaciones de inyección a efec-

to de consolidarlas a mayores profundidades. Las bolsas de materiales alterados, mostrada en el Plano 2205-F-974, fueron objeto de tratamientos especiales, semejantes entre sí, que se describen a continuación.

En la bolsa N^o 1, y localizada en la columna "K" entre las elevaciones 801 y 789, el tratamiento consistió en limpiar el material que servía de relleno que era una arcilla de color rojizo muy suave con algunos fragmentos de riolita en completo estado de alteración. Como este relleno no era impermeable, el agua de las lluvias al infiltrarse había iniciado la alteración de las paredes rocosas de riolita que confinaba la bolsa. Por tal motivo, a la vez que se extraía el material de relleno se removía la roca alterada de las paredes para dejarlas completamente sanas. El relleno fue haciéndose más consistente, aumentando la proporción de roca fragmentada con relación a la arcilla. A los ocho metros de profundidad aproximadamente la bolsa se divide en dos ramas, una continúa prácticamente vertical y la otra, se extiende hacia un lado, en forma de un socavón. Se consideró innecesario continuar la lim-

pia cuando la arcilla del fondo se había agotado prácticamente y en su lugar las juntas estaban rellenas de un material blancuzco y consistente. El agua empleada en el lavado de las paredes de la bolsa, al caer en el fondo se perdía en ambas ramas, principalmente, en el lado izquierdo de la vista A-A (plano 2205-F-974); lo cual indica que las juntas permanecieron parcialmente abiertas. En vista de lo angosto de la bolsa no fué posible barrenar desde el interior para inyectar estas juntas, dejándose únicamente un dispositivo de tres tubos para llenar, posteriormente al relleno de concreto, el hueco de la parte superior de la rama izquierda.

Bolsas números 2 y 3. Se encuentran localizadas en la columna "M", muy próximas una de la otra de 5 a 4 metros de profundidad, respectivamente, con relación al resto de la excavación. Su tratamiento fué muy semejante al de la bolsa N° 1, excepto que en la número 2, las perforaciones para el inyectado de la roca se hicieron desde el interior de la propia bolsa.

Bolsa de arcilla N° 4. Está localizada en la columna "L". El relleno consistía en su mayor parte de arcilla, en tanto, que las paredes eran de roca no alterada y de buena calidad.

Dada la forma alargada y angosta de esta bolsa, la limpia se llevó hasta 6 metros de profundidad en donde tenía un ancho medio de unos treinta centímetros continuando la arcilla hacia abajo. Se coló el relleno de concreto sobre esta arcilla, juzgándose que esto no era un inconveniente en vista de la forma de cuña de la bolsa que hará que las presiones transmitidas por el relleno, serán recibidas por las paredes que como ya se dijo, son de roca de buena calidad.

Bolsas números 5, 6 y 7. Fueron muy semejantes a la número 1, ya descrita, tanto en la naturaleza del relleno, como en las condiciones de la roca de las paredes. En todas ellas se hicieron suficientes perforaciones de inyección para la consolidación de la roca adyacente.

III.—INYECCION DE LA CIMENTACION.

11. *Generalidades.* — Las inyecciones de la Presa de La Angostura, tienen por objeto:

Impermeabilizar la roca de la cimentación, llenando con cemento las fisuras o

grietas por las cuales, pueda escapar el agua, o consolidar la roca, a fin de que el cimientado sea una masa homogénea en el que ocurran deformaciones y esfuerzos uniformes.

El procedimiento consiste en inyectar lechada de cemento a presión a través de perforaciones practicadas en la roca, la lechada va llenando las grietas y fisuras interceptadas por la perforación y éstas a su vez, la conducen a otras grietas más alejadas, según sea la presión de inyectado y las condiciones de los agrietamientos en la roca. Es así como se han observado fugas de lechada en grietas muy alejadas de la perforación que se inyecta.

Los conductos por los que circula la lechada entre la roca, son pasillos tortuosos de diferentes formas y secciones que presentan gran resistencia al paso de la lechada, la que tiene que ser vencida con la aplicación de presión por medio de una bomba de lechada o un inyector de aire comprimido.

La capacidad del agua para arrastrar el cemento, aumenta con la velocidad de escurrimientos de la lechada, y es natural, que la misma velocidad haga el mismo arrastre de partículas de cemento, por lo tanto, las condiciones ideales de la circulación serían aquéllas en las que pudiera conservar una velocidad elevada y constante a través de todos los conductos por los que circula, teniendo así capacidad para arrastrar las partículas de cemento que contiene y evitar los asentamientos que provocarían la obstrucción prematura de los pasillos, antes de que la lechada hubiera alcanzado las grietas y fisuras más alejadas de la perforación.

Una alta velocidad de escurrimiento de la lechada se obtiene con el uso de la bomba de lechada que también puede mantener una velocidad constante durante todo el tiempo que dure la inyección, sin embargo, la velocidad de la lechada dentro de los pasillos de la roca, estará afectada por las diferentes resistencias al escurrimiento que ellos presentan, así como por las secciones variables, que indudablemente impiden la circulación a velocidad constante.

Los inyectores neumáticos tienen el gran inconveniente de que la inyección no es constante, sino que interrumpe para cargarlos, además que la presión máxima de inyectado está limitada a la

presión del aire comprimido suministrado por la planta de compresoras que en la mayoría de los trabajos de construcción es de 7.0 kg./cm.² (100 lbs./pulg.²). En las bombas de lechada esta presión se traduce en una presión de inyección cuatro o cinco veces mayor, dependiendo de la relación de áreas de los cilindros del motor a los de la bomba.

En la presa de La Angostura, se ha usado un inyector neumático para inyecciones de mortero en huecos conocidos con anterioridad a la colocación de concreto y para lo cual, se usaron dispositivos especiales de tubos, tanto para la inyección como para la expulsión del aire confinado en ellos. Salvo estos casos especiales todas las inyecciones han sido de lechada de cemento por medio de una bomba de lechada.

El sistema de inyecciones principales de la presa de La Angostura, está mostrado en el Plano 2205-F-973, y tiene por objeto formar una cortina impermeable en la zonada de aguas arriba de la presa, continuándola por el Vertedor, en la margen izquierda a lo largo de un dentellón y en la margen derecha continúa por otro dentellón que empotra en un cantil de riolita.

Las perforaciones están situadas 1.50 metros de la cara de aguas arriba, espaciadas 1.50 metros, y tienen una profundidad mínima de 15 metros, y máxima de 30 metros.

En la roca de la cimentación predominan las grietas muy delgadas o finas, pero en aquellas zonas en que presenta muchas juntas, que llegan a estar abiertas, no siendo económico ni necesario continuar la excavación hasta extraer todo el material junteado, se practican las inyecciones con el principal objeto de consolidarlas, mejorándose de paso su impermeabilización. Las perforaciones se localizan de manera que corten el mayor número posible de juntas y su espaciamiento debe ser tal, que se garantice una completa consolidación de la zona junteada, generalmente no debe exceder de 3.00 metros, siendo su profundidad de 6 metros, como mínimo.

12. *Inyecciones sucesivas.*—Este método consiste en hacer perforaciones a escasa profundidad, que se inyectan a baja presión, posteriormente son reperforadas, aumentando la profundidad para inyectarse a mayor presión, y así sucesivamente. En La Angostura se usó este método en la cimentación de las columnas I y J. Después

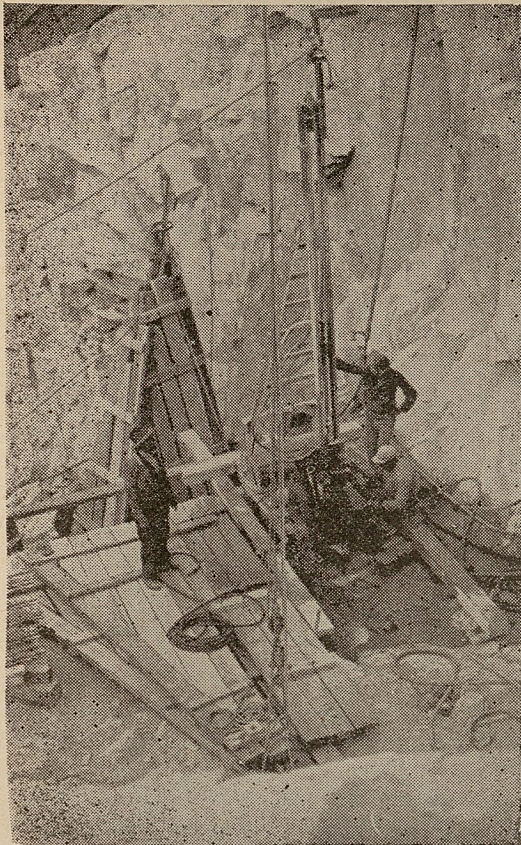
de lavar la roca como se describe en páginas anteriores, a través de perforaciones de 6 metros de profundidad, que se inyectaron a una presión de 3.5 kg./cm.² (50 lbs./pulg.²), aquellas que se consumieron más de cuatro sacos de cemento se reperforaron a 15 metros, inyectándose por segunda vez, a una presión de 7.0 kg./cm.² (100 lbs./pulg.²); y de éstas, las que consumieron más de seis sacos se profundizaron hasta 30 metros, inyectándose por tercera vez, a una presión de 14 kg./cm.² (200 lbs./pulg.²).

13. *Presiones de inyectado.*—En vista de que las grietas predominantes son sumamente finas, las perforaciones de la cortina impermeable se inyectan a una presión de 14.1 kg./cm.² (200 lbs./pulg.²), o sea algo más que vez y media la presión hidrostática que se producirá en el lecho del río a presa llena. Las perforaciones de la margen derecha arriba de la elevación 800 a lo largo del dentellón, serán inyectadas con una presión de 7.0 kg./cm.² (100 lbs./pulg.²), o sea aproximadamente dos veces la presión hidrostática que se producirá a presa llena en esa zona.

Las presiones usadas en las inyecciones para consolidación son inferiores a las usuales en inyecciones para impermeabilización y para fijarlas se atiende a los espesores de la roca, a la dirección de las juntas, a su separación y a otros factores determinados por las condiciones de cada lugar. La experiencia tenida en esta obra, demuestra que rocas con juntas paralelas, separadas un centímetro o más entre sí, son inyectables fácilmente a una presión de 2.1 kg./cm.² (30 lbs./pulg.²). Rocas con juntas parcialmente selladas con calcita u otros materiales y de aberturas de 5 mm. o menores, deben inyectarse con presiones entre 3.5 kg./cm.² y 7.0 kg./cm.² (50 lbs./pulg.² y 100 lbs./pulg.²), para tener un relleno satisfactorio de los huecos.

14. *Perforadoras.*—El equipo de perforación usado por la Superintendencia en este trabajo, consiste en 6 perforadoras "Ingersoll Rand Water Leyners", modelo S70, montadas sobre vagones perforadores de torre móvil, con tres ruedas de llantas de acero. El vagón es trasladado de una perforación a otra, usando los cablevías o la grúas de la cortina.

Las barras de perforación consisten en varillas de acero perforado de 2.85 cm. (1-1/8"), de diámetro y de 2.44 m. (8' pies), de largo que se van acoplando entre



Máquina perforadora trabajando en los pozos de inyección de la margen izquierda.

sí, hasta completar la profundidad que se desea dar a la perforación. Inicialmente se usaron barras de una pieza para perforaciones hasta de 15 metros, pero se abandonaron por las dificultades de transportarlas y colocarlas en la perforación. El diámetro de la perforación varía desde 10.2 cm. (4"), en la boca hasta 4.1 cm. (1-5/8"), en el fondo en perforaciones de 30 metros. En la tabla siguiente se dan los diámetros de las brocas para distintas longitudes de las barras.

Largo de la barra Mts.	Pies	Diámetro de la barra Cms.	Pulg.
1.22	4	10.2	4
1.22	4	10.2	4
2.44	8	9.8	3-7/8
3.66	12	9.5	3-3/4
4.88	16	9.2	3-5/8
6.10	20	8.9	3-1/2
7.32	24	8.6	3-3/8
8.53	28	8.3	3-1/4

Largo de la barra Mts.	Pies	Diámetro de la barra Cms.	Pulg.
9.75	32	7.9	3-1/8
10.97	36	7.6	3
12.19	40	7.3	2-7/8
13.41	44	7.0	2-3/4
14.63	48	6.7	2-5/8
15.85	52	6.3	2-1/2
17.07	56	6.0	2-3/8
18.29	60	5.7	2-1/4
19.51	64	5.6	2-3/16
20.73	68	5.4	2-1/8
21.95	72	5.2	2-1/16
23.16	76	5.1	2
24.38	80	4.9	1-15/16
25.60	84	4.8	1-7/8
26.82	88	4.6	1-13/16
28.04	92	4.4	1-3/4
29.26	96	4.3	1-11/16
30.48	100	4.1	1-5/8

15. *Aguzadora*.—La máquina aguzadora de barras es marca "Ingersoll Rand" tipo I R 50, movida por aire. El transporte de las barras se hace por medio de cablevías o con gente.

16. *Equipo de inyección*.—Para inyecciones de lechada se usa una bomba "Gardner Denver Duplex", de doble acción, modelo AG6, accionada con un motor de aire de dos cilindros.

La revolvedora de lechada es marca "Rex", de 3.5 pies cúbicos, accionada con motor de gasolina "Stover" de 2.5 HP.

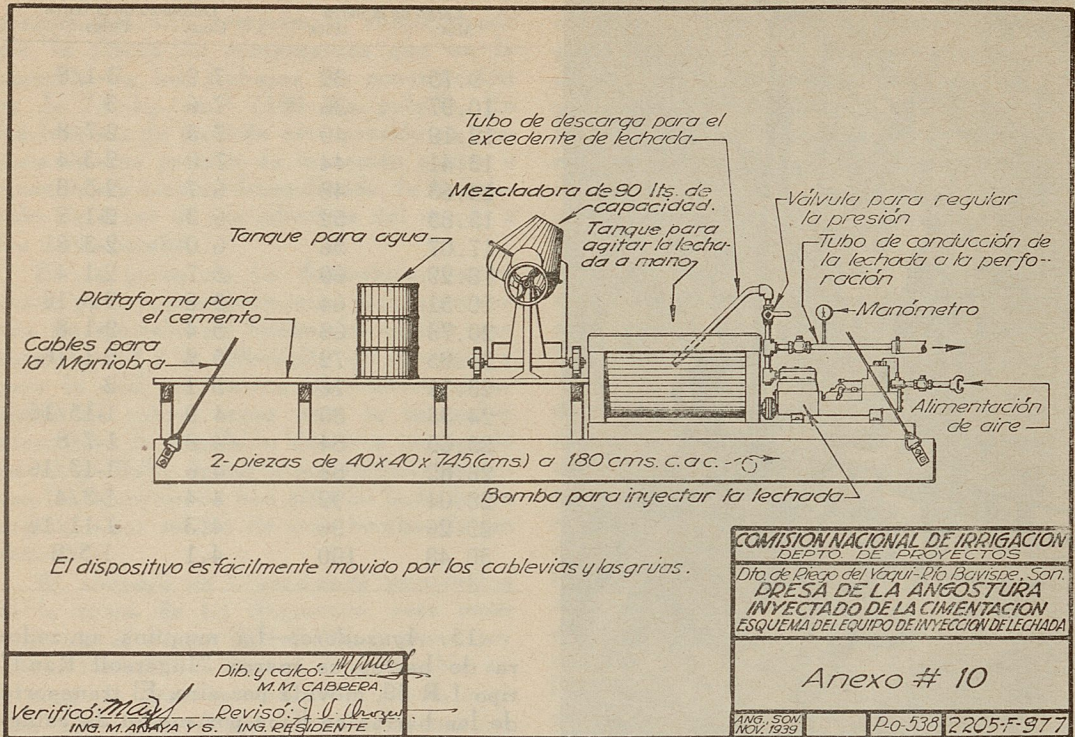
Como agitador de lechada se usa un tanque de lámina de acero, abierto y de sección triangular, la lechada es agitada a mano.

La manguera de lechada es de 5 cm. (2"), de diámetro interior, reforzada para soportar una presión de 17.6 K./cm² (250 lbs./in.²).

El plano 2205-F-977, muestra el dispositivo del equipo de inyecciones de lechada, el que puede ser trasladado de un lugar a otro de la cortina por medio de las cablevías o grúas, enganchando la plataforma en que está montado.

Cuando hubo necesidad de inyectar mortero, se usó un inyector neumático "Ramsome", modelo 62, de 150 litros de capacidad, aproximadamente.

17. *Personal*.—Un sobrestante de perforaciones tiene a su cargo todas las máquinas perforadoras de la presa. El perso-



nal necesario para cada máquina, es ordinariamente el que sigue:

- 1 Maquinista.
- 2 Encargados de cambiar barras.
- 2 Encargados del transporte de barras a la aguzadora (que pueden servir para dos o tres máquinas).

1 Inspector, que depende de la Residencia, es el encargado de la vigilancia de estos trabajos, tal como se indica en el párrafo **CONTROL DE LOS TRABAJOS**.

El personal encargado de las inyecciones está organizado como sigue:

- 1 Maquinista encargado de la bomba.
- 1 Encargado de la mezcladora.
- 3 Encargados de cargar la mezcladora.
- 2 Encargados de calafatear y conectar la manguera.
- 3 Encargados de agitar el tanque de lechada.

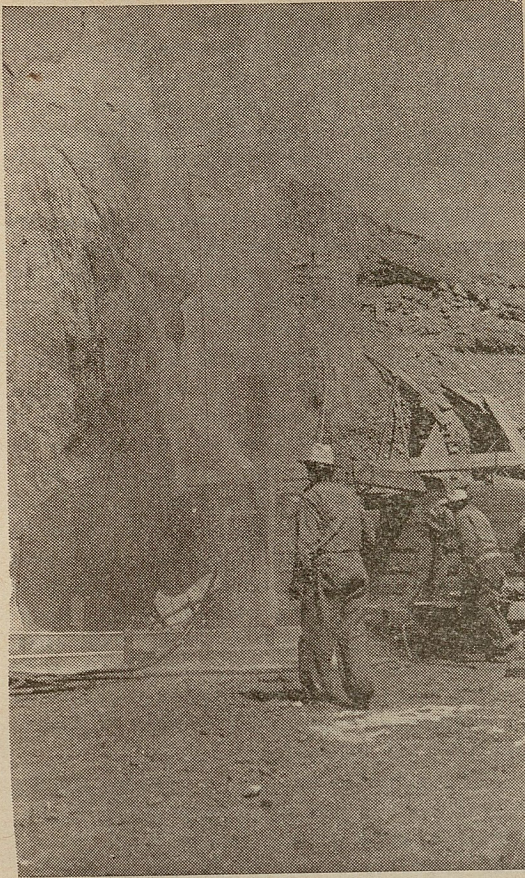
Las operaciones de esta cuadrilla son dirigidas personalmente por el inspector de la residencia, a excepción del suministro del cemento que está a cargo del ayudante del superintendente en turno.

18. *Control de los trabajos.*—En el caso de las perforaciones, un inspector de la residencia, es el encargado de marcarlas

en el campo y ejercer la vigilancia necesaria para que se cumplan los requisitos de dirección, profundidad e inclinación de los barrenos, llevando al mismo tiempo un registro relativo a localización del barreno, dureza y carácter de la roca, en el que se anotan a la vez todos aquellos datos que se creen útiles para juzgar de la calidad y permeabilidad de la estructura rocosa atravesada.

El trabajo de la presa de La Angostura, ha permitido que el mismo inspector de la residencia sea el encargado de vigilar las perforaciones y el inyectado de la roca. Ha sido ésto muy conveniente, pues al llevar el registro de las perforaciones se ha formado una idea muy aproximada de las condiciones de la roca y generalmente al proceder a inyectar, va mejor preparado para resolver los problemas que de antemano se le van a presentar.

Terminada una perforación, es recibida por el inspector de la residencia, que comprueba su profundidad. Se tapa provisionalmente la boca de la perforación con un tapón cónico de madera para evitar que le caigan materias extrañas. Antes de colocar concreto en esa zona, se pone un tubo de fierro galvanizado de 2-1/2", de diámetro



Lavado de una perforación con aire comprimido y agua.

mínimo. Este tubo será de 3", mínimo cuando se desea reperfilar el pozo, en este caso se tendrá cuidado de alinear el tubo con la perforación, a fin de que, posteriormente se puedan meter las barras; se cuidará de que este alineamiento no se pierda durante el colado. Estos tubos tendrán rosca en su extremo libre, quedando sujetos a la perforación, rellenando el espacio entre ésta y el tubo con estopa alquitranada.

Ninguna perforación es inyectada, si no tiene sobre ella un mínimo de 1 metro de concreto, las perforaciones de la cortina impermeable que son inyectadas a una presión de 14.1 kg./cm^2 (200 lbs./pulg.^2), se inyectan con un mínimo de 3 metros de concreto sobre ellas o sean dos capas de 150 metros, siendo la edad de la última capa por lo menos de seis días, en el invierno, o tres días en el verano.

19. *Proceso de inyección.* — General-

mente las perforaciones se inyectan por grupos que cubren una zona completa, pero antes de proceder al inyectado, propiamente dicho, se somete cada una de ellas a las operaciones que se citan en detalle.

20. *Lavado de la perforación.*—El lavado de las perforaciones del grupo que se va a inyectar, se hace con agua, por medio de una manguera delgada y flexible, que se introduce en la perforación, saliendo el agua por la boca del tubo que permanece libre. Cuando la manguera ha llegado al fondo del barreno y el agua sale clara, se da por terminado el lavado y se procede a secar el pozo, introduciendo la misma manguera u otra semejante con aire comprimido.

Se pone entonces, en la boca del tubo, independientemente de la válvula de la manguera de lechada una válvula de 5 cm. (2"), de diámetro, a fin de que al terminar la inyección, la lechada confinada en la perforación permanezca con la presión de inyectado. Válvulas iguales se colocan en las dos o tres perforaciones más cercanas, que se operarán en caso de que se comuniquen con la que se está inyectando.

21. *Relación agua-cemento.*—La relación A/C de la lechada es medida por volumen, y se ha variado desde 7:1 hasta 2:1, pero siendo las grietas predominantes, muy finas, es natural que las lechadas delgadas sean las usuales. En el lecho del río, en que las juntas de la roca están muy cerradas se usó para iniciar el inyectado una lechada con relación A/C de 7:1 y en muy pocos casos hubo oportunidad de espesarla, ya que las grietas no la admitieron prácticamente.

En las laderas en que las grietas están ligeramente más abiertas, la lechada con que se inicia una inyección tiene una relación A/C de 5:1; y en ningún caso se usa una lechada más espesa para iniciar el inyectado. No se sigue la práctica de iniciar el inyectado de un pozo con agua, juzgándose que no es recomendable porque en aquellas perforaciones en que no se presentan fugas de lechada y las grietas interceptadas, tienen una capacidad limitada, al terminarse el inyectado se encontrarían llenas en gran parte de agua, que no ha encontrado salida, lo que equivale a usar una lechada más delgada, y por lo tanto, de inferior calidad.

Es cierto que la roca absorbe parte del agua de la lechada, de ahí que se use agua

en fuerte proporción al iniciarse la inyección para evitar su secado rápido y la obstrucción prematura de las fisuras o grietas. Por otra parte, la absorción de la roca, en el caso de La Angostura, es muy pequeña.

22. *Bombeo de lechada.*—El uso de la bomba en inyecciones de lechada presenta la ventaja sobre los inyectores a que la operación es continua, controlándose perfectamente, tanto la presión, como la velocidad de la bomba.

La presión se va aumentando lentamente, hasta alcanzar la especificada de acuerdo con el criterio expuesto en el párrafo relativo a PRESIONES DE INYECTADO. No es conveniente dar bruscamente la presión máxima, pues se forzaría el agua de la lechada a introducirse en las grietas más pequeñas, disminuyendo la relación agua-cemento del resto de la lechada que acabaría por obstruir hasta las grietas mayores.

El consumo de lechada y la presión se van registrando cada diez minutos aproximadamente.

Se considera terminada la inyección de una perforación cuando en un intervalo de 10 minutos, no hay consumo de lechada.

En ocasiones al inyectar una perforación, se comunica con las adyacentes, que no han sido inyectadas. En este caso antes de proceder a inyectar éstas hay que lavarlas completamente para expulsarles la lechada, pues puede ocurrir que la comunicación entre los pozos sea a través de grietas secundarias, que se tapan antes de que la lechada haya llenado completamente las grietas del pozo adyacente. El inyectado de este pozo debe hacerse tan pronto como sea posible.

23. *Fugas de lechada.*—Frecuentemente al inyectarse una perforación, la lecha-

da se fuga por las grietas o fisuras que salen a la superficie de la roca. Tapar esas fugas es de mucha importancia, ya que la presión de la lechada en el interior de la roca se reduce por efecto de la fuga y además hay en ocasiones considerable pérdida de cemento.

El procedimiento seguido en La Angostura para calafatear las fugas, es muy sencillo y efectivo en la gran mayoría de los casos. Se usa estopa alquitranada que es introducida en la junta, con ayuda de una barra de hierro de punta plana, inmediatamente después de la estopa se colocan cuñas de madera que se golpean hasta asegurarse de que la presión interior de la lechada no es capaz de sacarlas. Lo más probable es que continúe saliendo lechada por algunos minutos hasta que el cemento que va quedando entre la estopa, termina por sellar completamente la fuga. Es conveniente iniciar el tratamiento para calafatear una fuga por uno de los extremos, introduciendo una cantidad conveniente de estopa que permita un filtrado eficiente de la lechada de manera de retener la mayor cantidad de cemento.

El ancho de las cuñas usadas en La Angostura, es por lo general de diez centímetros, pero se han usado cuñas mucho más angostas a efecto de que se acomoden lo mejor posible a las sinuosidades de la grieta o fisura de la fuga, procurándose que una cuña quede completamente pegada a la anterior.

La herramienta de la cuadrilla de calafateadores consista en dos marros, de tres a cuatro cinceles de diferentes tamaños, y en unas cinco barras de punta plana que permitan introducirse en las grietas más pequeñas.