

Uso de las Pruebas de Suelos para el Diseño y la Construcción de la Presa “El Palmito”

Por el Ingeniero
A. G. CADAVAL
Ingeniero Residente

Conferencia dictada por su autor en el Hogg Memorial Auditorium de la Universidad de Texas, en la celebración de la Quinta Conferencia sobre Mecánica de los Suelos e Ingeniería de Cimentación los días 6 y 7 de febrero de 1942 en Austin, Texas.—Versión del inglés por el ingeniero Manuel Solana Gutiérrez.

INTRODUCCION

LA presa “El Palmito” está localizada sobre el río Nazas, en el Estado de Durango, y en la región norte del país. Su cuenca de captación cubre una área de unos 18,000 Kms². sobre los contrafuertes orientales de la Sierra Occidental, y a una altitud que varía entre 1,500 metros y 3,000 metros sobre el nivel del mar. Desde el sitio de la presa, el río Nazas atraviesa la región oriental en una distancia de 209 kilómetros aproximadamente y por una zona de terreno montañoso hasta alcanzar la planicie del fértil valle de Torreón. Aquí la irrigación ha sido practicada en los últimos 50 años mediante el uso de canales, habiéndose desarrollado en tal forma que al presente la construcción de esta presa es de orden imperativo para estabilizar la posición económica de esta región.

La presa, actualmente en construcción, tendrá un vaso con capacidad de tres mil millones de metros cúbicos, que es aproximadamente las 2.3 veces del porcentaje anual de escurrimiento. Los registros muestran, sin embargo, que ocasionalmente el vaso puede ser llenado en un solo año. Una planta de energía eléctrica de 56,000 H. P. de capacidad instalada, se construirá a la salida de los túneles, con el objeto de suministrar fuerza al Distrito de Riego, en donde actualmente operan más de 600 bombas para pozos profundos. Hay, además, una gran demanda de energía para suministrarla a la minería y otras industrias.

DISEÑO DE LA PRESA

El sitio de la presa está localizado en una formación de tobas riolíticas. En el lecho del río

esta formación tiene una profundidad de unos 30 metros y está apoyada sobre capas sucesivas de cenizas volcánicas sedimentarias y riolíticas. Los dos bancos están constituidos por capas alternadas de tobas descompuestas, riolitas y tobas riolíticas, las que dan una formación menos permanente.

Tomando en consideración esta formación geológica, se descartó el proyecto de una estructura de mampostería, teniendo en cuenta que esta presa llegaría a tener 90 metros de altura, cuando menos, con el objeto de almacenar suficiente agua. Se proyectó una presa de enrocamiento con un delantal impermeable aguas arriba, semejante a la presa San Gabriel, en el sur de California, que estaba en construcción. Pero este proyecto pronto se desechó, puesto que después de investigaciones minuciosas se descubrieron condiciones de rotura en la formación de ambas riberas, con tobas descompuestas muy suaves en tal sitio. Esta condición señaló la conveniencia de ampliar el corazón de arcilla en lugar de la ejecución de un dique más costoso. De esto resultó el cambio de la presa original de enrocamiento en una presa de tierra. El corazón de arcilla tiene un talud aguas arriba de 2:1 y aguas abajo de 0.5:1.

Al iniciarse la construcción se ejecutó un deslinde más detallado de todos los materiales disponibles, y tomando en consideración el costo relativo de colocación de la arcilla y la roca en la presa, nuevamente se hizo un cambio en el proyecto, incrementando el ancho del corazón de arcilla. Este corazón, una vez construido, tendrá un talud de 2:1 aguas arriba, y 1:1 aguas abajo,

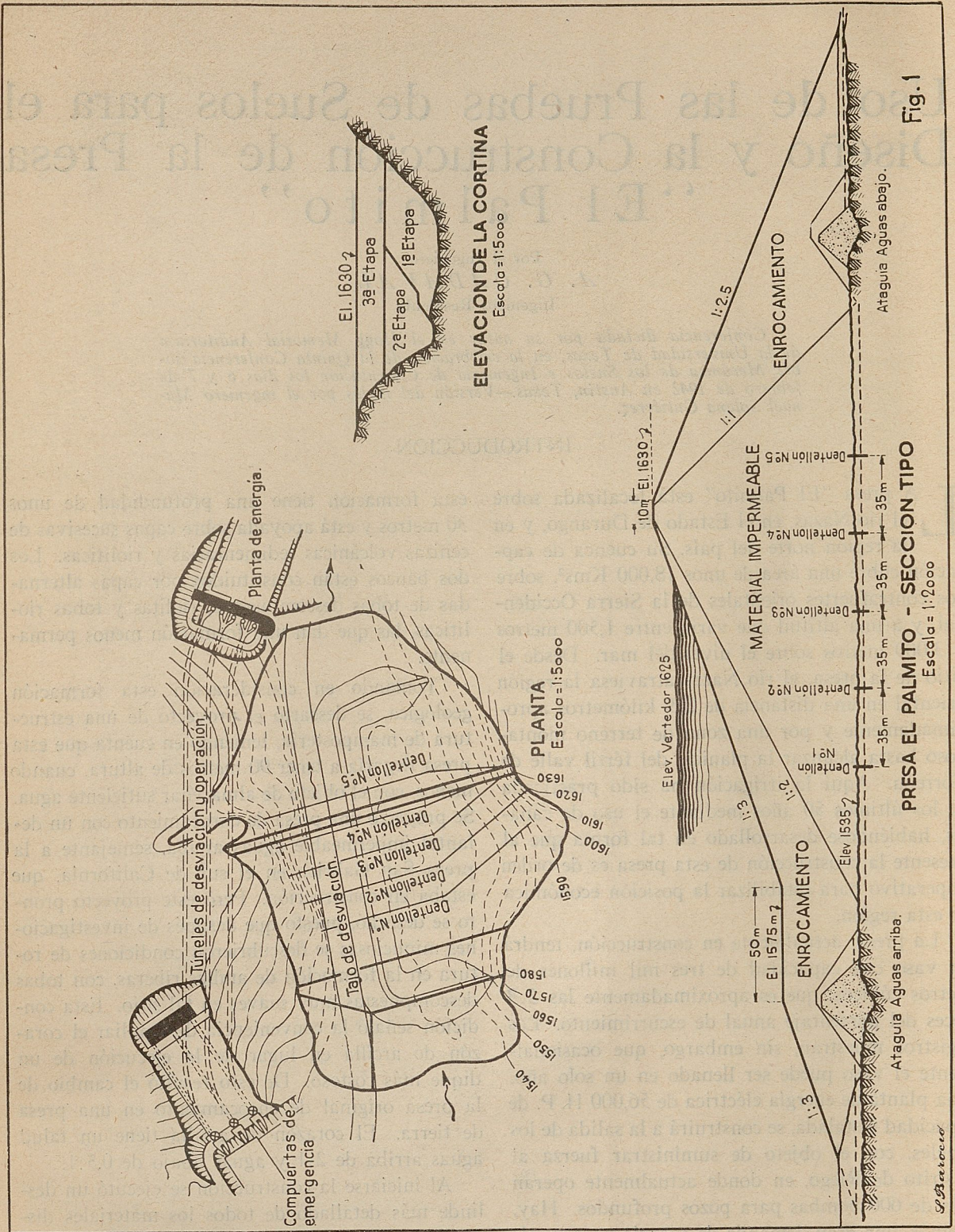


Fig. 1

como se muestra en la figura 1. Estos cambios en el proyecto se realizaron a medida que la construcción avanzaba y sin intervención de contratistas, puesto que la presa se está construyendo por administración directa. La berma de unos

50 metros de ancho, en el talud de aguas arriba, está destinada a prevenir el deslizamiento del enrocamiento cuando el corazón de arcilla de la ataguía de aguas arriba llegue a la saturación.

Lo precedente elucida las razones que se necesitaron para la modificación de los proyectos, los cuales se desarrollaron de acuerdo con la información más completa que se pudo obtener relacionada con las características geológicas del sitio y las de las cantidades de materiales disponibles. Los datos obtenidos por el Laboratorio de pruebas de suelos, contribuyeron materialmente en la determinación del proyecto definitivo, que consideramos como el más práctico y económico.

Simultáneamente con este cambio, perforaciones de prueba adicionales en el lecho del río y en las márgenes, revelaron una condición muy irregular de la formación de la roca, pues el agua invariablemente se perdía en las perforaciones en ambas riberas y se manifestaba en cantidades apreciables en las del lecho del río. La roca es de una dureza moderada, pero liviana y porosa. En algunos lugares la roca forma bloques compactos, pero generalmente está muy fracturada, con muchas grietas amplias, rellenas sueltamente. Con estas indicaciones, el número de dentellones se aumentó a cinco, como se muestra en la figura 1. Posteriormente, cuando se hicieron las perforaciones para la inyección en los dentellones, su necesidad se justificó por la gran cantidad de material consumido en la operación. A lo largo del muro del dentellón principal estas perforaciones se espaciaron 30 centímetros de centro a centro, necesitándose en algunas de ellas 1,000 sacos de cemento para lograr el propósito.

Todas las inyecciones se hicieron por etapas, siendo conocido este método con el nombre de "Inyecciones progresivas".

Se usaron compresoras y mezcladoras-inyectoras marca "Union Ivan Works", a una presión máxima de 100 lbs. por pulg², obteniéndose un trabajo bien acabado. Los dentellones penetran 4.50 m. en la roca y las perforaciones en los números 1 y 5 tienen 24 m. de profundidad; 30 m. en los números 2 y 4, y 39 m. en el número 3. Para las perforaciones en el lecho del río, se encontró que la máquina más eficiente fué la que usa brocas de 4" y 6". Aparte de que es más económico operar en estas rocas, la mayor amplitud de la perforación fué más efectiva y permitió una mejor inyección. En las márgenes, para las perforaciones inclinadas, se utilizaron, el Calyx, el taladro de diamante y las máquinas

neumáticas; obteniéndose los mejores resultados con la máquina neumática de percusión con rotación de aire independiente. Hasta la fecha se han perforado 75,000 m. lineales de pozos profundos para inyectarlos, con un consumo medio aproximado de 4½ sacos de cemento por metro lineal.

El vertedor quedará localizado en un puerto a kilómetro y medio de la presa; será de concreto, de cresta libre y para una capacidad de 6,000 m³/s.

PRESTAMOS

En un radio de 3½ km. aguas arriba de la presa, puede obtenerse todo el material necesario para el corazón impermeable. A ambas márgenes del río hay bancales de aluvión, con una profundidad aproximada de 4 m., los que constituyen una localización ideal para las zanjas de préstamo. El material de estos bancales varía desde el limo y migajones finos arenosos, situados cerca del río, hasta los migajones más gruesos y arcillosos en los terrenos elevados. Antes de iniciar la construcción se hizo un estudio general de los suelos para determinar su clasificación y volúmenes disponibles. Se excavaron pozos de muestra de 1.50 m. por lado y 1 m. de profundidad a intervalos de 100 m., en forma de tablero de ajedrez, y en donde fué necesario, se perforaron pozos adicionales intermedios. Se obtuvieron muestras específicas de cada pozo y se clasificaron de acuerdo con sus análisis granulométricos. Se siguió el procedimiento de Proctor para estudiar la compacidad y el contenido de humedad. Se usó el cilindro ordinario de Proctor con un pisón de 5.5 lbs. descargando veinte golpes desde una altura de 45 cm.

Se hicieron muchas pruebas con el permeámetro, con carga constante, abarcando las diferentes clases de suelos. Esto nos facilitó el seleccionar el mejor, entre todos los materiales disponibles, desde el punto de vista del peso, de la impermeabilidad y de su distancia a la presa.

En general todos los materiales disponibles en esta región son más bien ligeros de peso. Las tablas siguientes sirven de ilustración.

Los análisis anteriores se muestran en forma gráfica en la figura 2.

CAPACIDAD OPTIMA Y PERMEABILIDAD

Clasificación	Densidad absoluta	Densidad en seco	Permeabilidad "K" en cms/año
		Kgs. por M ³	
Migajón arenoso medio	2.50	1 665.914	0.0305
Migajón limoso	2.50	1 649.895	0.0122
Migajón arcillo-arenoso	2.55	1 858.134	0.0183
Migajón arcilloso	2.50	1 729.987	0.0061

PROMEDIO DE ANALISIS MECANICOS

Clasificación	Arena	Fango	Arcilla
	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje
Migajón arenoso medio	68	22	10
Migajón limoso	35	55	10
Migajón arcillo-arenoso	60	20	20
Migajón arcilloso	42	30	28

Se dispone de bastante material arcillo-arenoso y arcilloso para completar el corazón impermeable, puesto que los migajones arenosos y los limosos, que no son tan satisfactorios, han sido desechados.

En los préstamos, estos suelos están reforzados por bancos de arena y grava. Esta característica ha resultado muy ventajosa para obtener una mezcla de grava y tierra para el relleno, dando una mejor superficie de excavación para facilitar el trabajo de las palas mecánicas y reduciendo la distancia de acarreo a la presa. Posteriormente, en este artículo se verá cómo el relleno se mejoró con el agregado de grava y cómo se adaptó el equipo de rodillos lisos para tal propósito.

Arcilla en la roca del fondo.—El acarreo sobre el lecho del río lo forman arena y grava, de una profundidad aproximada de 9 m. Este fué removido para completar la zona del corazón de arcilla, y previamente a la colocación de la arcilla, se escombró y limpió la roca del fondo mediante un chiflón de aire comprimido. La figura 3 muestra la roca del fondo, limpia.

Para rellenar todas las grietas superficiales, se practicaron perforaciones inclinadas de 4.50

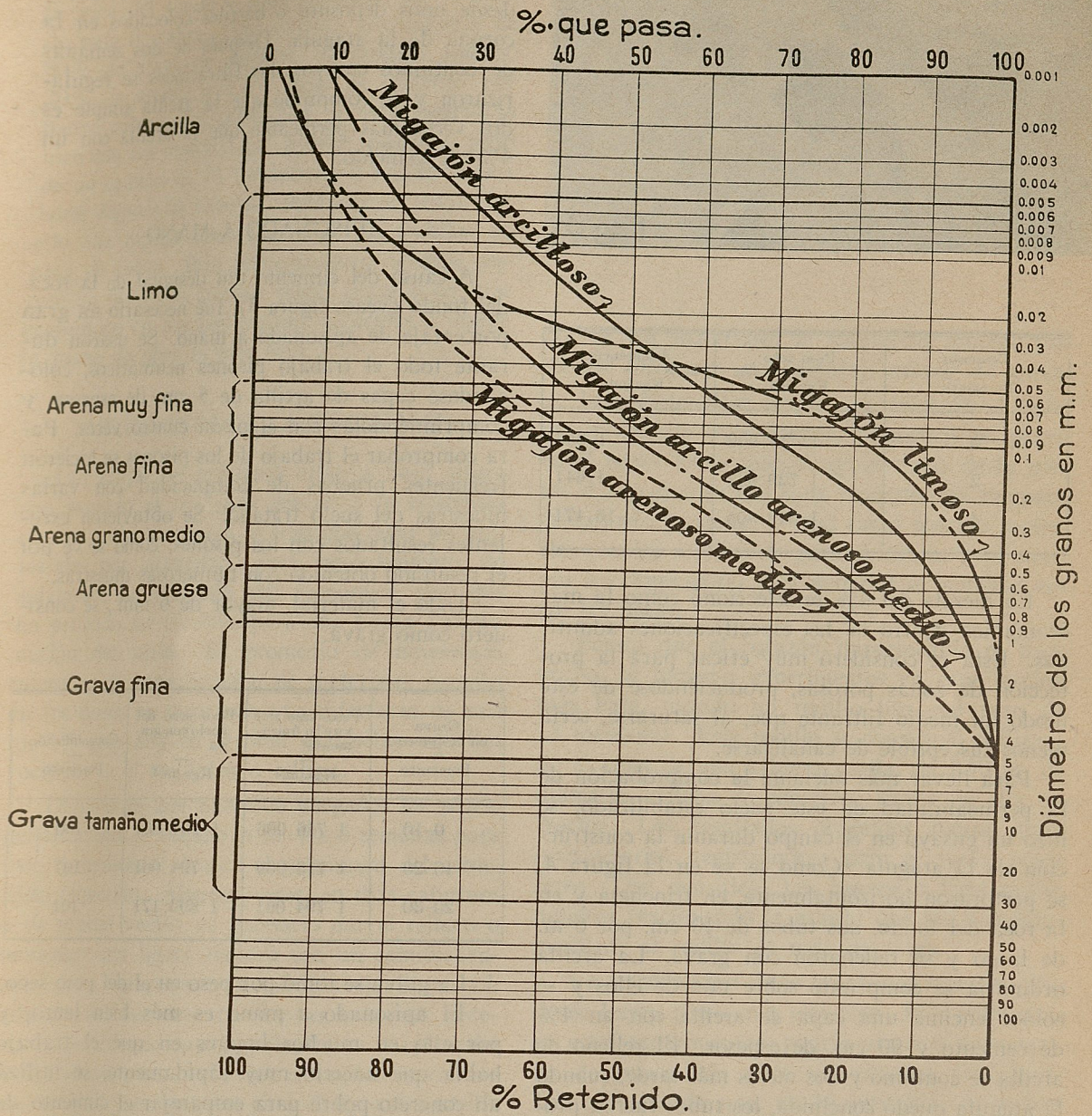
m. a intervalos de 4.50 m. para inyecciones. Hubo, sin embargo, una zona, aguas arriba, dentro del corazón de arcilla en la que la roca estaba tan fracturada y dejaba pasar tantas filtraciones, que fué necesario hacer más perforaciones para inyecciones. No obstante, en algunos lugares la roca estaba tan completamente fracturada y las tobas descompuestas eran tan suaves, que aun cuando las filtraciones principales se habían eliminado, todavía subsistió una condición de escurrimiento que dificultó la colocación de la arcilla. Indudablemente que se espera que haya filtraciones más grandes en estos lugares, cuando el vaso esté lleno.

Para asegurar un buen contacto y un relleno impermeable de arcilla sobre estos lugares húmedos y suaves, se recurrió a estabilizar el suelo, siguiendo el procedimiento empleado en la construcción de caminos; mezclar arcilla con cemento portland. Los ensayos que se hicieron en el laboratorio, consistieron en el empleo del cemento en cantidades de 4 a 10% con objeto de seleccionar la mejor mezcla. Los resultados obtenidos en cuanto a compresión y permeabilidad, se transcriben en la tabla siguiente:

CEMENTO	Ensayo a la compresión		Permeabilidad "K" en cm. ² por año
	7 días Kgs./cm. ²	28 días Kgs./cm. ²	
0	0.633	0.064
4	8.508	10.265	0.006
6	8.226	9.281
8	10.195	10.687
10	10.758	11.282

Para los ensayos de compresión los suelos estabilizados se comprimieron en piezas de 15 por 30 cm. y en formas como las usuales en el ensayo de cilindros de concreto. Para experimentar más ampliamente, los trozos de la prueba hecha con un 4% de cemento, se sumergieron indefinidamente en agua, sin desmoronarse. Esto demuestra el mejoramiento que puede obtenerse en un terreno mediante la adición de un pequeño porcentaje de cemento, al utilizarse en condiciones especiales en la construcción de una presa de tierra.

Se hizo también un ensayo de adherencia para comparar con arcilla simple. Este ensayo se



ANALISIS MECANICO DE LOS SUELOS DE EL PALMITO

Nota:—Las denominaciones consignadas, corresponden a la clasificación de tierras usadas en el Laboratorio de materiales de San Jacinto, D. F.

S. Barocio

Fig. 2

realizó comprimiendo la muestra de arcilla en forma de cilindro de 15 por 30 cm. sobre un bloque de cemento poroso, previamente colado,

y probándolo a los 7 días con un aparato de manufactura sencilla. Los resultados obtenidos fueron:



Fig. 3

bados con una carga de agua de unos 14 m., y desde unos depósitos o barriles colocados en la corona de la ataguía. Después de dos semanas de continuos ensayos, las filtraciones se regularizaron y se comprobó que la arcilla simple es dos veces más permeable que la arcilla con un 4% de cemento.

APISONADO A MANO

A causa del cimientto tan desigual de la roca del fondo (véase figura 3), fué necesario un gran porcentaje de apisonado a mano. Se usaron durante todo el trabajo pisones neumáticos, colocándose capas de arcilla de 5 cm. de espesor, y comprimiéndolas con el pisón cuatro veces. Para comprobar el trabajo de los pisones se hicieron frecuentes pruebas de compacidad con varias muestras del suelo tratado. Se obtuvieron excelentes resultados con los pisones, como se ve por el resultado obtenido con numerosas muestras.

Todo el material, mayor de 6 mm., se consideró como grava.

Cemento Por ciento	Peso seco Kgs./m ³	Adherencia Kgs./cm. ²
0	1 713.969	1.055
2	1 729.987	4.641
4	1 649.895	16.171

La mezcla del 4% se seleccionó como la más económica dentro de las especificaciones admitidas. Esta se consideró muy eficaz para la protección de zonas porosas, produciéndose de este modo un medio filtrante que, al saturarse, sería menos susceptible de canalizarse.

Para llevar más adelante la comprobación de la permeabilidad de este suelo estabilizado, se hizo un ensayo en el campo durante la construcción de la ataguía. Como se ve en la figura 4, se perforaron horizontalmente, en trinchera y en la roca del fondo, dos tubos de 10 cm. por 6 m. de largo y se rellenaron con grava. La arcilla ordinaria se comprimió sobre uno de ellos y se colocó encima una capa de arcilla con un 4% de cemento y 90 cm. de espesor. El relleno de arcilla se continuó y dos meses más tarde, cuando la ataguía quedó concluida, los tubos fueron pro-

Grava en la muestra Por ciento	Peso seco del suelo únicamente Kgs./m. ³	Peso seco del suelo con grava Kgs./m. ³	Consolidación Por ciento
0-10	1 746.006	1 794.061	100
10-20	1 713.969	1 794.061	107
20-30	1 794.061	1 890.171	101

La grava se tomó por peso en el del peso seco.

El apisonado a mano es más bien lento, y por ello en muchos lugares en que el trabajo había que hacerlo muy rápidamente, se utilizó un concreto pobre para emparejar el cimientto de

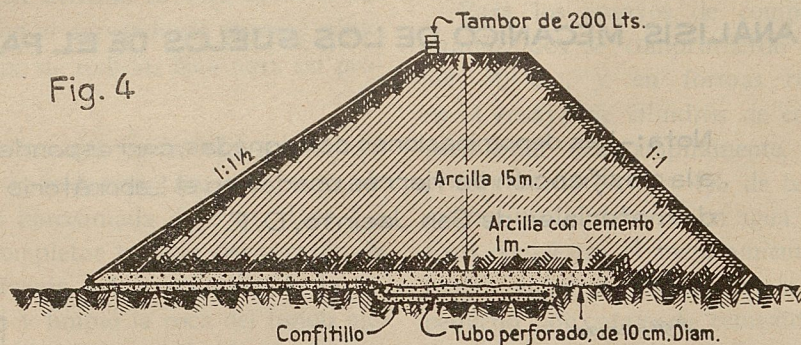


Fig. 4

PRUEBAS DE FILTRACION EN EL RELLENO DE ARCILLA CON CEMENTO

la roca del fondo y antes de pasar los rodillos de pata de cabra. Este concreto se componía de 80% de grava de depósito, ligeramente limpia, 20% de arcilla y 3 1/4 sacos de cemento por metro cúbico. La colocación de esta mezcla se hizo con tal rapidez, que podría resistir el paso de un camión de 15 toneladas sin hundirse, seis horas después de haberse colado, permitiendo con ello una rápida intervención de los rodillos de pata de cabra. Este procedimiento, aunque parece un poco más costoso, puede llegar a ser más económico en muchos lugares reducidos o donde la mano de obra es más cara.

APLICACION DE LA HUMEDAD

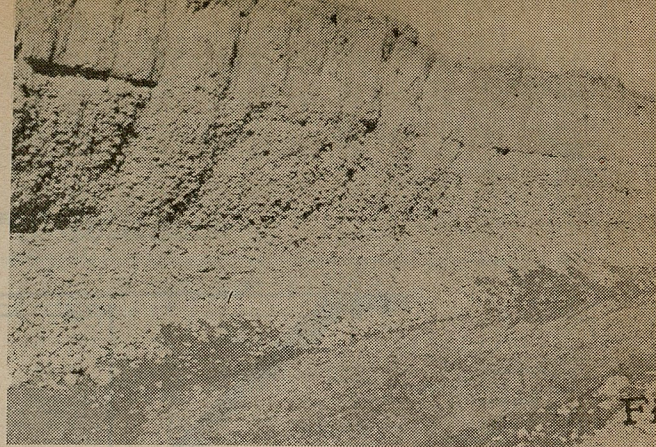
Las zanjas de préstamo están a baja altura con respecto al río, pero gracias a la existencia de una antigua acequia se consigue regar los materiales por gravedad. Este procedimiento no solamente ha resultado más económico, sino que ha probado ser efectivo para una buena consolidación del suelo. El promedio de numerosas muestras de consolidación de materiales regados en los pozos ha mostrado una diferencia de casi un 5% más alta en el peso seco sobre aquellas rociadas en el terraplén o relleno.

Después de que han sido anegados los pozos, generalmente se requieren de 4 a 6 semanas para que la humedad alcance el máximo del contenido requerido. Algunas veces, en días calurosos o de mucho viento, es necesario dar al relleno o terraplén una ligera rociada con un camión-tanque, para compensar la pérdida de humedad. Además del aumento en el peso seco, este sistema ha justificado su conveniencia en la ejecución de las obras, pues se elimina el empleo de camiones-tanques y mangueras para el agua. La arcilla que se adhiere a los cucharones de las palas ha sido notablemente eliminada mezclando un determinado porcentaje de grava con arcilla.

GRAVA EN LOS SUELOS

Ya se dijo que en los pozos, todos los suelos están reforzados por un profundo banco o depósito de grava (véase figura 5). La explotación adecuada de los pozos requirió la excavación del banco, tan profunda como fué posible, con objeto de obtener los materiales mejores a corta distancia de la presa.

El uso de una mayor profundidad del material produjo un rendimiento más alto en el trabajo de las palas Diessel de 1.90 m.³, ya que la mez-



cla de los materiales se simplificó mucho, pudiendo utilizarse un porcentaje mayor de grava.

Inmediatamente después de iniciado el relleno, se usó un determinado porcentaje de grava en el suelo, en la sección aguas abajo de la presa. La grava no fué toda uniforme ni tampoco de tamaño pequeño, lo cual causó muchas molestias con los rodillos de pata de cabra, pues rompía los limpiadores y el material se acuñaba entre las patas.

Puesto que el corazón impermeable es muy ancho, se hicieron experimentos en esta sección más baja, usando un rodillo liso con peso de 15 toneladas. Este rodillo se construyó utilizando el tubo de una caldera usada, de 1.50 m. de diámetro, rellena de concreto; tiraba de ella un tractor. Los resultados obtenidos fueron muy satisfactorios, registrándose para el suelo pesos secos (Dry densities) tan buenos o ligeramente mejores (excluyendo la grava) que los obtenidos mediante el rodillo de pata de cabra.

La combinación de la grava con el suelo, dió, desde luego, pesos más elevados. El rodillo liso, en estos experimentos, podría alcanzar porcentajes de grava más altos sin ninguna dificultad. También sucede que, en la superficie aplanada que los rodillos lisos dejan entre las capas consolidadas, las de grava más grande perforan esa superficie y ligan las dos capas.

En el laboratorio se hicieron ensayos con el permeámetro, para suelos de grava, pero no resultaron satisfactorios, aun usando un permeámetro más grande. Entonces se hicieron en el campo pruebas prácticas con objeto de obtener una comparación de permeabilidad con rellenos con menos grava.

Para el propósito de este ensayo, el corazón de arcilla se dividió en tres zonas: Zona "A", aguas arriba, apisonada con rodillos de pata de cabra por capas de 15 cm. con 12 pasadas; Zona "B", sección media, apisonada por capas del mismo espesor y con ocho pasadas del rodillo liso.

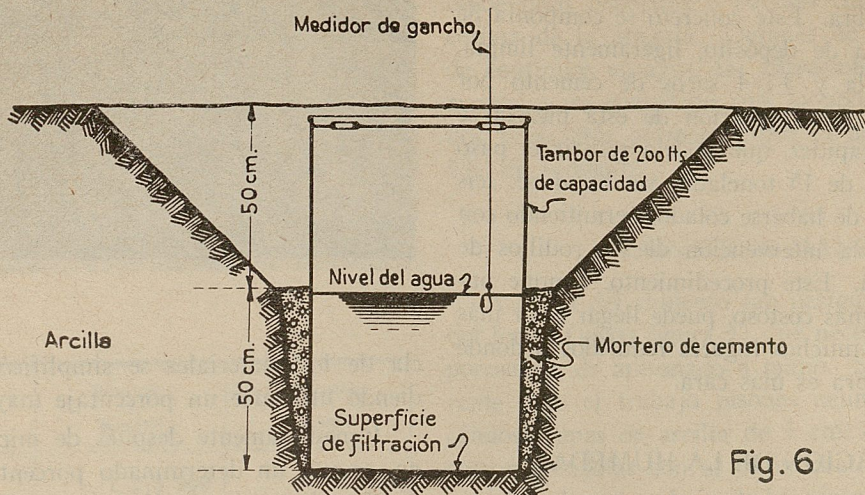


Fig. 6

PRUEBA DE FILTRACION EN EL RELLENO

más dos adicionales con el rodillo de pata de cabra, para escarificar; Zona "C", aguas abajo, apisonada con ocho pasadas del rodillo liso, sin escarificación y con capas de idéntico espesor que en las otras zonas.

Los ensayos de permeabilidad se hicieron utilizando un tambor vacío de gasolina de 200 litros, desfondado y fijándolo en el relleno o te-

rraplén, como se ve en la figura 6. La parte superior del tambor se cubrió para prevenir la evaporación.

La excavación alrededor del tambor, se empacó bien con mortero de cemento con objeto de limitar la filtración, únicamente a la base o fondo.

Los resultados obtenidos se dan en las tablas siguientes:

ENSAYOS DE PERMEABILIDAD

ENSAYOS	ZONA "A"		ZONA "B"		ZONA "C"			
	1	2	3	4	5	6	7	8
Arcilla %.....	2.4	2.4	3.3	3.4	3.9	3.0	2.4	3.3
Limo %.....	40.6	50.6	33.7	39.6	40.1	43.0	44.6	45.7
Arena %.....	57.0	47.0	63.0	57.0	56.1	54.0	53.0	51.0
Peso seco de suelo:								
Kgs. por m ³	1 762.02	1 762.02	1 858.13	1 794.06	1 906.19	1 826.10	1 713.97	1 826.10
Grava %.....	30.5	38.7	43.3	51.5	48.7	35.8	38.5	41.4
Filtración ("').....	4.83	6.10	12.7	15.49	9.65	3.56	13.21	4.83

("') Centímetros por día con la superficie del agua descendida.

RESULTADOS DE LA CONSOLIDACION

RODILLO PATA DE CABRA.—12 PASADAS				RODILLO LISO.—8 PASADAS			
Grava Porcentaje	PESO SECO Kgs. por m. ³		Consolidación Porcentaje	Grava Porcentaje	PESO SECO Kgs. por m. ³		Compacidad Porcentaje
	Suelo	Suelo y grava			Suelo	Suelo y grava	
7.8	1 697.99	1 746.00	100.6	5.0	1 617.86	1 633.88	100.7
15.8	1 649.89	1 746.00	98.7	13.4	1 681.93	1 729.99	99.3
25.1	1 665.91	1 810.08	102.6	26.2	1 778.04	1 922.20	103.5
32.9	1 762.02	1 906.19	103.4	35.4	1 810.08	1 954.24	105.7
42.5	1 681.93	1 922.21	102.2	46.3	1 794.06	2 002.30	104.9
Promedio	1 691.54	1 826.10	101.5	Promedio	1 736.39	1 848.52	102.8

Los resultados anteriores pueden resumirse como sigue:

1. Con el uso de grava en cantidades mayores de un 40%, el peso seco de la combinación del suelo con grava, aumenta un promedio de 8% en comparación con el del suelo únicamente, y para rodillos lisos y de patas de cabra.

2. Un aumento de casi 2% en la consolidación del suelo se obtiene con el uso del rodillo de pata de cabra y un 4% con rodillos lisos, cuando las cantidades de grava se aumentaron de 10 a 40%. Esta consolidación se basó en suelo únicamente, sin incluir la grava.

3. Con el uso de grava en cantidades superiores a un 40% mezclada con los suelos disponibles en El Palmito, no se manifiesta ningún aumento en la permeabilidad.

El límite de grava para un buen trabajo de consolidación parece ser aproximadamente un 40%. También ocurre que con el uso de grava, el contenido máximo de humedad queda disminuido. Desde el punto de vista de la construcción el rodillo liso tiene otras ventajas: es más fácil de arrastrar, pues exige menos fuerza y considerando que se requieren menos pasadas para hacer el trabajo, el costo de consolidación puede reducirse, cuando menos, en un tercio; y también que la superficie aplanada con el rodillo liso, facilita el movimiento del equipo de tracción. Esta superficie aplanada es de gran importancia en la época de lluvias, puesto que el agua penetra mucho menos, y casi inmediatamente después de que la lluvia ha pasado, el trabajo puede reanudarse.

Parecería natural que en la consolidación con un rodillo liso las capas superiores tuvieran un grado más alto de compacidad que las inferiores; sin embargo, no es este el caso, según se desprende de los resultados obtenidos en ensayos de muestras:

	PESO DEL SUELO Kgs. por m. ³		GRA VA Por- centaje	COM- PACI- DAD Porcentaje
	Suelo única- mente	Suelo y Grava		
Superior media.	1 762.02	1 762.02	4.4	102.9
Inferior media..	1 762.02	1 778.04	4.2	102.1

No es nuestra intención aceptar los resultados de los ensayos arriba transcritos, con el fin de llegar a la conclusión de que los rodillos lisos son preferibles a los de pata de cabra. Estos experimentos se han hecho solamente con los materiales disponibles en esta región y con el propósito de utilizar mayores cantidades de grava, y aun cuando están basados en un gran número de ensayos, estas conclusiones pueden no ser definitivas si se aplican a equipos de apisonamiento de otros tipos y pesos que los que se han empleado aquí. Nosotros los hemos cotejado con el empleo adecuado de los materiales que se encontraron en las zanjas de préstamo para ser utilizadas en un corazón de arcilla amplio. Desde el punto de vista de la Ingeniería y la construcción, el uso de la grava fué de la más grande importancia para aumentar el peso y la fricción y disminuir la unidad de costo por metro cúbico de relleno, incluyendo también otros factores, tales como la

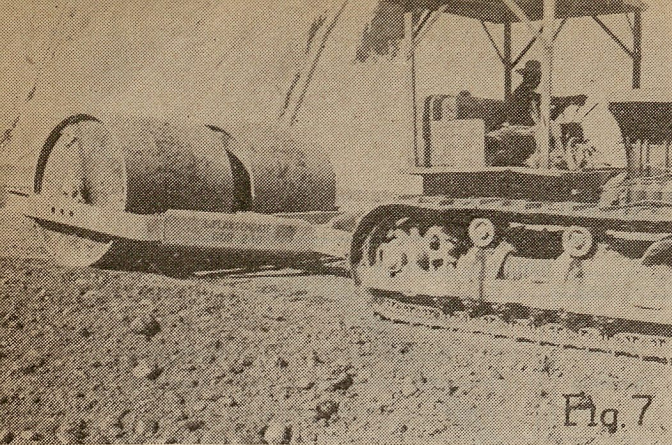


Fig. 7

permeabilidad dentro de límites aceptables. Para este objeto se diseñó un rodillo liso especial, pesado, con dos tambores de 1.75 m. de diámetro y 1.50 m. de largo, con una placa de desgaste de $1\frac{1}{2}$ " de espesor, y relleno de agua, arena y grava (véase la figura 7). Para hacer el equipo de apisonamiento de tipo lo más práctico posible, el bastidor para este rodillo se hizo exactamente igual a los de los rodillos pata de cabra que estamos usando, y que son modelos del Bureau of Reclamation, con dos tambores de 1.50 m. de diámetro por 1.50 m. de largo. Véase Fig. 8. Este rodillo de pata de cabra con agua y grava, pesa 19.5 toneladas, y el rodillo liso, con el mismo balasto, pesa 23 toneladas.

Para la colocación del corazón impermeable, se procedió de acuerdo con la información obtenida en los experimentos mencionados con anterioridad, dividiéndose el corazón de arcilla en partes iguales aproximadamente, para la mejor distribución de los materiales de las zanjas de préstamo. En la zona de aguas arriba, el migajón arcillo-arenoso, se usó con un contenido de grava no mayor del 20% y se apisonó con ocho pasadas del rodillo liso y dos pasadas con el de pata de cabra para escarificar entre las capas. Este material se encuentra en los depósitos, en frentes de unos 8 m. de altura. Cuando esta

altura de frente no proporcionó un material con 20% de grava, se excavó hasta encontrarlo y se utilizó en la zona de aguas arriba, pero en este caso la consolidación se hizo con el rodillo de pata de cabra. En la zona de aguas abajo, la arcilla del suelo se usó con un contenido de 40% de grava, aproximadamente, y se apisonó con ocho pasadas del rodillo liso, sin escarificación entre las capas. Este material aparece en los depósitos, en frentes poco profundos que no exceden de 3.60 m. de altura, lo que hace posible el agregado de la grava.

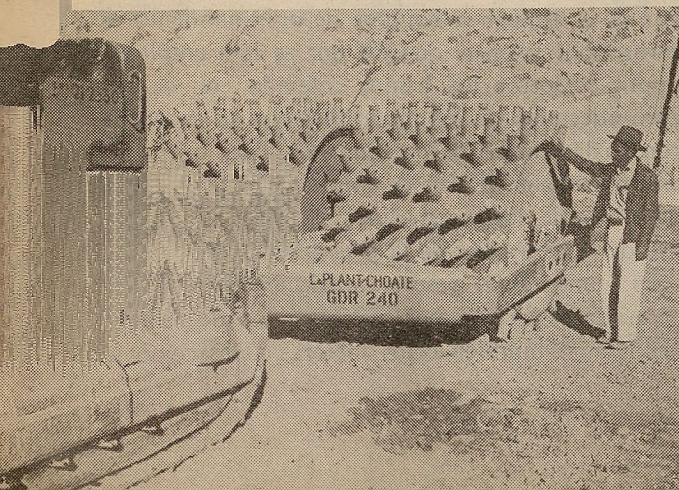
Nuestros experimentos con rodillos lisos concnieron principalmente al propósito de aumentar la cantidad de grava en el relleno, aumentando, en consecuencia, el peso sin una pérdida apreciable en la impermeabilidad. Estos experimentos, aunque no muy extensos, los hemos mencionado aquí con la idea de contribuir a un mejor conocimiento del uso de los rodillos lisos en relación con la práctica de actualidad de la Mecánica de suelos.

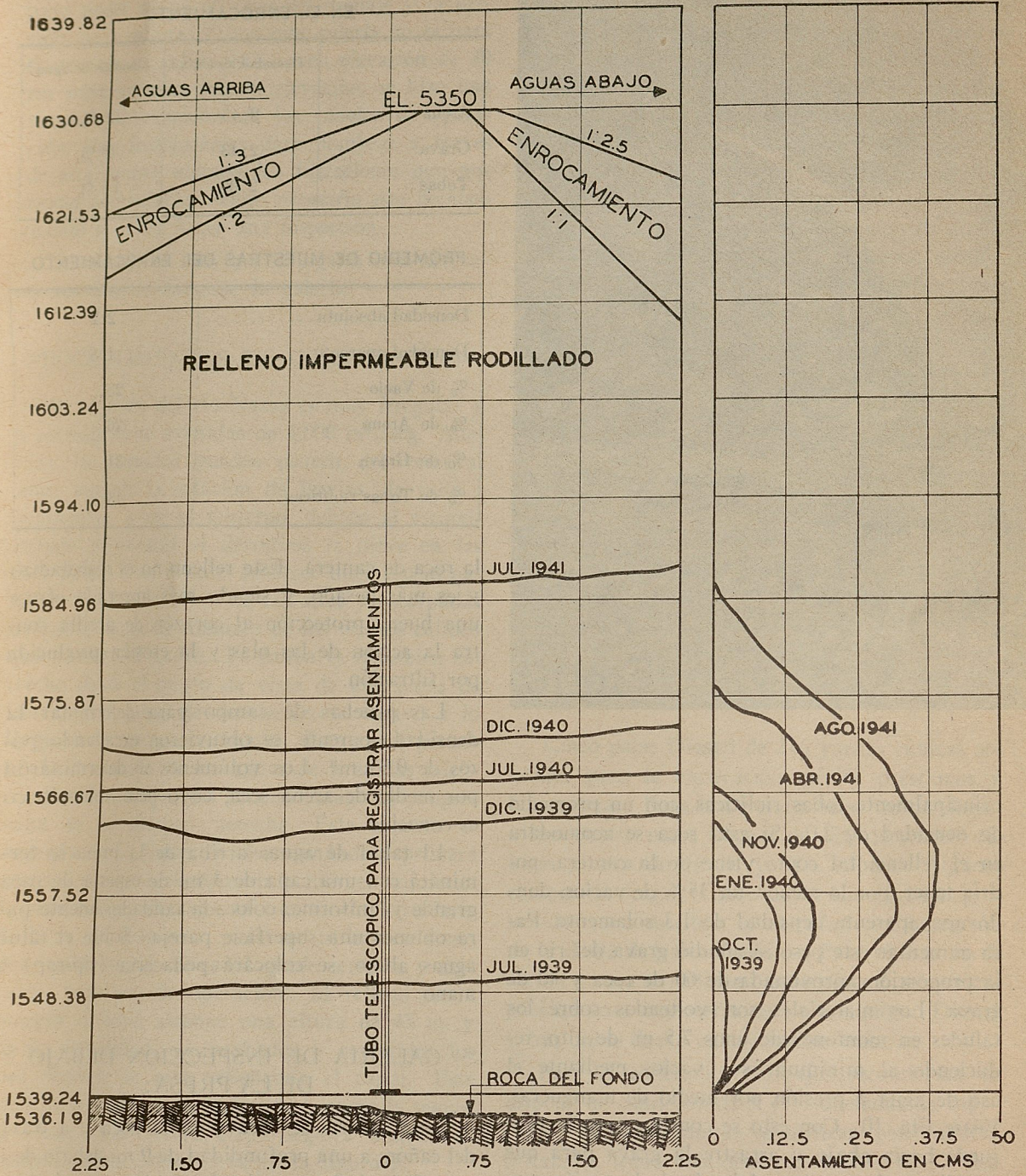
PRUEBAS DEL SUELO PARA CONTROL

Se toman diariamente muestras de los pozos de prueba en el relleno para comprobar el contenido de humedad y la consolidación obtenidas. Estas pruebas se hacen siguiendo el procedimiento usual de Proctor, para confrontar la consolidación lograda en el relleno con la máxima obtenida en el cilindro de Proctor. Para consultas futuras se lleva una memoria de la localización de cada muestra en el relleno, con sus características físicas. Se hacen también diariamente determinaciones rápidas de los porcentajes de grava y de humedad cuando son solicitadas por los inspectores de campo, para que les sirvan de guía. Todos los datos obtenidos de estas pruebas en el laboratorio, diariamente se comunican al Inspector, para mantenerlo informado. Los ensayos con el permeámetro, obtenidos en las zanjas de préstamo para diferentes materiales, se hacen también a intervalos regulares para convencerse de que el material utilizado esté de acuerdo con las especificaciones.

ASENTAMIENTO DEL RELLENO

A medida que el relleno avanza, se va instalando un tubo telescópico para determinar su asentamiento. Este tubo está hecho de tramos sucesivos, uno dentro del otro, de 2" y $1\frac{1}{2}$ " de diámetro y 1.50 m. de largo. Se utilizaron los aparatos de sondeo del Reclamation Service y





SECCION TRANSVERSAL DE LA PRESA

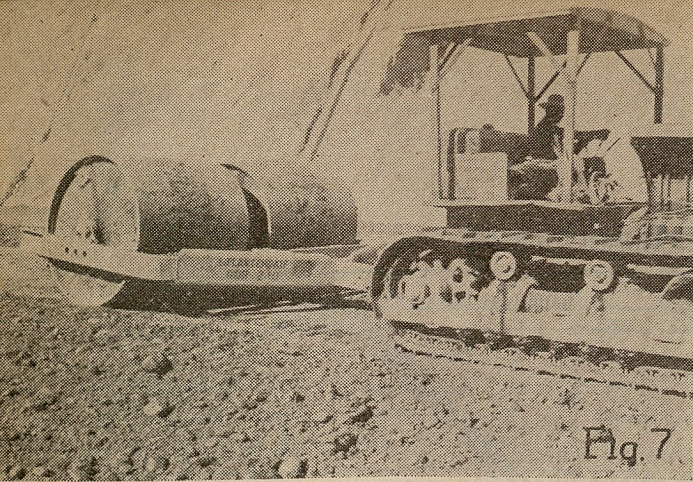
FIG. 9

los niveles se tomaron en el extremo inferior de cada tubo de 1½", en donde tiene unas orejas para levantarlo. La figura 9 muestra una gráfica construida, con datos hasta la fecha. Se notará que el relleno no se ha ejecutado muy aprisa, y sin embargo la gráfica muestra un incremento en los asentamientos a medida que la

construcción va progresando. No se han observado asentamientos en la roca del fondo.

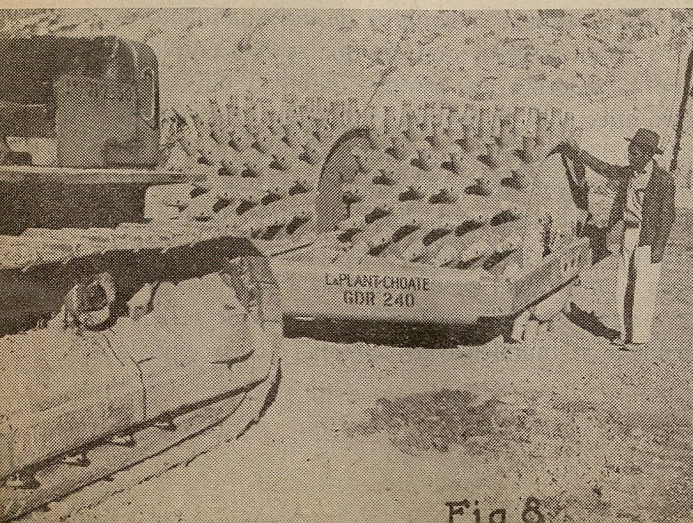
ENROCAMIENTO

Las rocas disponibles en la vecindad de la presa, son de origen volcánico, como ya se dijo.



permeabilidad dentro de límites aceptables. Para este objeto se diseñó un rodillo liso especial, pesado, con dos tambores de 1.75 m. de diámetro y 1.50 m. de largo, con una placa de desgaste de $1\frac{1}{2}$ " de espesor, y relleno de agua, arena y grava (véase la figura 7). Para hacer el equipo de apisonamiento de tipo lo más práctico posible, el bastidor para este rodillo se hizo exactamente igual a los de los rodillos pata de cabra que estamos usando, y que son modelos del Bureau of Reclamation, con dos tambores de 1.50 m. de diámetro por 1.50 m. de largo. Véase Fig. 8. Este rodillo de pata de cabra con agua y grava, pesa 19.5 toneladas, y el rodillo liso, con el mismo balasto, pesa 23 toneladas.

Para la colocación del corazón impermeable, se procedió de acuerdo con la información obtenida en los experimentos mencionados con anterioridad, dividiéndose el corazón de arcilla en partes iguales aproximadamente, para la mejor distribución de los materiales de las zanjas de préstamo. En la zona de aguas arriba, el migajón arcillo-arenoso, se usó con un contenido de grava no mayor del 20% y se apisonó con ocho pasadas del rodillo liso y dos pasadas con el de pata de cabra para escarificar entre las capas. Este material se encuentra en los depósitos, en frentes de unos 8 m. de altura. Cuando esta



altura de frente no proporcionó un material con 20% de grava, se excavó hasta encontrarlo y se utilizó en la zona de aguas arriba, pero en este caso la consolidación se hizo con el rodillo de pata de cabra. En la zona de aguas abajo, la arcilla del suelo se usó con un contenido de 40% de grava, aproximadamente, y se apisonó con ocho pasadas del rodillo liso, sin escarificación entre las capas. Este material aparece en los depósitos, en frentes poco profundos que no exceden de 3.60 m. de altura, lo que hace posible el agregado de la grava.

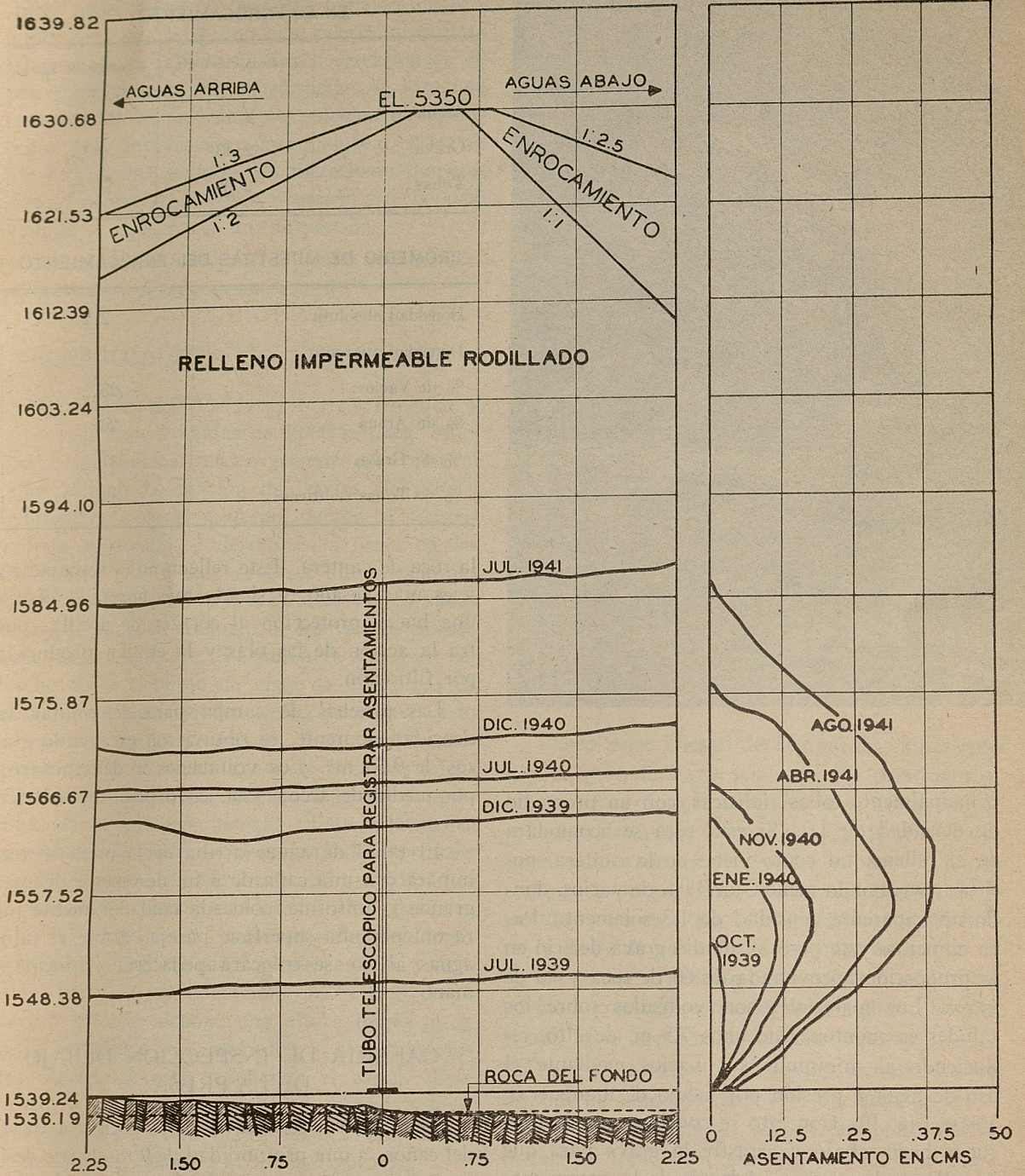
Nuestros experimentos con rodillos lisos concernieron principalmente al propósito de aumentar la cantidad de grava en el relleno, aumentando, en consecuencia, el peso sin una pérdida apreciable en la impermeabilidad. Estos experimentos, aunque no muy extensos, los hemos mencionado aquí con la idea de contribuir a un mejor conocimiento del uso de los rodillos lisos en relación con la práctica de actualidad de la Mecánica de suelos.

PRUEBAS DEL SUELO PARA CONTROL

Se toman diariamente muestras de los pozos de prueba en el relleno para comprobar el contenido de humedad y la consolidación obtenidas. Estas pruebas se hacen siguiendo el procedimiento usual de Proctor, para confrontar la consolidación lograda en el relleno con la máxima obtenida en el cilindro de Proctor. Para consultas futuras se lleva una memoria de la localización de cada muestra en el relleno, con sus características físicas. Se hacen también diariamente determinaciones rápidas de los porcentajes de grava y de humedad cuando son solicitadas por los inspectores de campo, para que les sirvan de guía. Todos los datos obtenidos de estas pruebas en el laboratorio, diariamente se comunican al Inspector, para mantenerlo informado. Los ensayos con el permeámetro, obtenidos en las zanjas de préstamo para diferentes materiales, se hacen también a intervalos regulares para convencerse de que el material utilizado esté de acuerdo con las especificaciones.

ASENTAMIENTO DEL RELLENO

A medida que el relleno avanza, se va instalando un tubo telescópico para determinar su asentamiento. Este tubo está hecho de tramos sucesivos, uno dentro del otro, de 2" y $1\frac{1}{2}$ " de diámetro y 1.50 m. de largo. Se utilizaron los aparatos de sondeo del Reclamation Service y



SECCION TRANSVERSAL DE LA PRESA

FIG. 9

los niveles se tomaron en el extremo inferior de cada tubo de 1½", en donde tiene unas orejas para levantarlo. La figura 9 muestra una gráfica construida, con datos hasta la fecha. Se notará que el relleno no se ha ejecutado muy aprisa, y sin embargo la gráfica muestra un incremento en los asentamientos a medida que la

construcción va progresando. No se han observado asentamientos en la roca del fondo.

ENROCAMIENTO

Las rocas disponibles en la vecindad de la presa, son de origen volcánico, como ya se dijo,



Fig. 10

principalmente tobas riolíticas, con un promedio de densidad de 2.0. Si esta roca se acomodara en el relleno, tal como viene de la cantera, podría tener, por lo menos, un 35% de vacíos, dando una aparente densidad de 1.3 solamente. Para aumentar este peso se añadió grava del río en la proporción aproximada de 60 de roca y 40 de grava. Los materiales son volteados sobre los taludes en montones de unos 7.5 m. de alto, reduciendo al minimum sus vacíos mediante el uso de agua a presión por medio de mangueras. Véase Fig. 10. Con esto se consigue que la roca rueda hacia abajo y arrastre la grava para que se rellenen los vacíos. Además de la acción mecánica del relleno de los vacíos con grava, el aumento del asentamiento del relleno se obtiene mediante la acción lubricante del agua. El agua se añadió en la proporción de 1.53 m³. × 1 m³. de relleno.

La grava, como se usó en este procedimiento, además de reducir los vacíos, produce también un aumento en el volumen, lo que hace que el enrocamiento sea más barato que si se hiciera con roca solamente, en vista del costo elevado de

CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES USADOS EN EL ENROCAMIENTO

	Densidad absoluta	Absorción de agua
Arena.....	2.45	2 %
Grava.....	2.43	2 %
Tobas.....	2.00	14 %

PROMEDIO DE MUESTRAS DEL ENROCAMIENTO

Densidad absoluta.....	2.2
Densidad aparente.....	1.8
% de Vacío.....	23.
% de Arena.....	26.
% de Grava.....	31.
% de Tobas riolíticas.....	43.

la roca de cantera. Este relleno no es resbaladizo y es más pesado, y siendo más apretado ofrece una buena protección al corazón de arcilla contra la acción de las olas y la erosión producida por filtración.

Las pruebas de campo para determinar la densidad aparente, se obtuvieron excavando pozos de 0.85 m³. Los volúmenes se determinaron por medio de arena seca, cuyo peso volumétrico es conocido.

El talud de aguas arriba de la presa se terminará con una capa de 3 m. de espesor de roca grande y uniforme, colocada cuidadosamente para obtener una superficie pareja. Sobre el talud aguas abajo, se colocará pedacería (rip-rap) a mano.

GALERIA DE INSPECCION DEBAJO DE LA PRESA:

Esta galería se excavó en la roca y a través del cañón, a una profundidad de 9 m. debajo de la superficie de la roca del fondo, y se elevó a través de la roca original en ambas márgenes. Esto es, tal vez, un rasgo característico único en una presa de tierra, pero en este caso se consideró necesario, teniendo en cuenta la altura de la presa y las condiciones de fractura de la roca en el lecho y en las márgenes del río. La galería permitirá en todo tiempo hacer inyecciones adicionales, si fuere necesario, facilitando, además, el libre acceso para inspección. A lo largo del piso de la galería se dejarán varios pozos verticales

para poder medir el agua del drenaje y la presión de la misma. Como esta galería no es para el drenaje, su salida está a una elevación de 30 m. sobre su piso. A esta elevación, se hizo una entrada de conexión de los túneles de operación. Hay instalaciones para bombear a través de esta misma entrada las filtraciones que pudieran acumularse, siendo necesario este bombeo cuando se desee hacer una inspección.

Solamente en muy pocos lugares será necesario revestir de concreto la galería.

PROCEDIMIENTOS DE CONSTRUCCION

El régimen del río Nazas es muy irregular y a menudo tiene avenidas de 4,000 m³./seg. Además, las avenidas pueden ocurrir dos veces al año: durante la estación de lluvias, de julio a septiembre, y en el invierno, debido al escurrimiento provocado al derretirse la nieve en las montañas. Esto último acontece muy repentinamente cuando la nieve de las altas y escarpadas sierras se funde al contacto de los vientos cálidos que vienen del Golfo. El cañón es más bien estrecho desde el punto de vista de una presa de tierra, y el canal de desviación se excavó a lo largo de la margen izquierda. Este canal permitió la desviación de las aguas de avenidas mientras la construcción del relleno (ataguía) progresaba en la margen derecha. Este aspecto se muestra en la figura 1, denominándolo primera etapa. Al mismo tiempo, en la margen izquierda la excavación avanzaba en tres túneles circulares de 6 m. de diámetro, para ser utilizados como desviación cuando el canal quede cerrado, y más tarde, para uso de operación. El relleno en la margen derecha alcanzó una altura de 45 m. y en la actualidad, ya acabados y revestidos los tres túneles, se está rellenando el canal. Este aspecto se muestra en la figura 1, como la segunda etapa. La tercera etapa seguirá inmediatamente después, como se ve en la figura 3.

En el cierre de este canal existe el peligro de una inundación en el caso de que pueda ocurrir una gran avenida durante la construcción, para lo cual se ha ideado una estratagema para salvar el relleno y prevenir el peligro de inundación de las ciudades y tierras cultivadas abajo, y consiste en lo que muy bien puede denominarse un "vertedor de emergencia". Se construyó en el canal de desviación, revistiendo de concreto el talud de aguas abajo del corazón de arcilla a me-

didada que éste se va levantando. A 7.50 m. de intervalo este revestimiento se corre horizontalmente sobre el relleno en forma de berma, protegiéndolo aguas arriba, con un dentellón, formándose así una cresta de un vertedor ordinario. En caso de avenida, los tres túneles desfugarán el agua acumulada arriba de cierta extensión, más allá de la cual el agua pasará sobre el "vertedor de emergencia" arrastrando algo de arcilla hasta que se forme su propio lecho de erosión. Para este relleno se hizo una investigación práctica para determinar la clase de material que sería seleccionada para contrarrestar mejor la erosión en el caso de una avenida. En los terraplenes se hicieron pruebas rodillándose con diferentes clases de materiales, corriendo el agua a través de canales de sección transversal homogénea, excavados en cada clase de material. Los ensayos duraron 45 minutos, y se seleccionó el mejor material para resistir a la erosión.

El volumen total del relleno impermeable es de 3,060,000 metros cúbicos, y el de enrocamiento es de 2,677,500 metros cúbicos.

EQUIPO

Cinco palas Diessel de 2½ yardas cúbicas son usadas para la excavación en los préstamos y las canteras. Para otros trabajos se tienen disponibles cuatro palas Diessel de 1¾ de yardas cúbicas y otra de ¾ de yardas cúbicas. Algunos equipos de dragas y conchas de almeja están prevenidos para sustituir estas palas, con excepción de la de ¾ de yardas cúbicas. Para el acarreo de arcilla y roca se utilizan camiones de 6 m³. de capacidad, con carrocería de volteo, motor Diessel y con doble llanta en las ruedas traseras.

Para el concreto y trabajos secundarios, se dispone de camiones de 3 y 5 toneladas de capacidad. En las canteras se utilizan perforadoras instaladas sobre camiones con brocas de 6". La energía eléctrica y el aire comprimido los proporciona una planta central de fuerza, de tres generadores eléctricos Diessel de 365 K.V.A. y tres compresoras Diessel de 1,000 pies cúbicos por minuto cada una. También hay dos compresoras de aire accionadas por motor eléctrico, con una capacidad combinada de 1,500 pies cúbicos por minuto. El concreto en los túneles y en las estructuras principales es manipulado por medio de dos bombas sencillas marca Rex de 7".

CONCLUSIONES

El propósito y esfuerzo de estas cuartillas, es el demostrar la importancia del laboratorio del campo. Con anterioridad a la iniciación de los trabajos de construcción, ya se había hecho en el Laboratorio Central una investigación de los materiales disponibles. Cuando se inició la obra, se hizo una investigación más completa y cuidadosa de estos materiales, y la experiencia obtenida en el laboratorio de campo permitió a las personas que en lo futuro iban a manejar esos materiales, obtener un conocimiento de los mismos y de primera mano. Ha sido posible con la ayuda de este laboratorio de investigaciones mejorar el diseño de la presa durante todo el período de construcción, ideando métodos para el mejor uso de los materiales, y también, pues es de importancia, utilizar todas las pruebas de suelos en la prosecución de la construcción, como una comprobación de los trabajos terminados. El laboratorio en esta presa, es un laboratorio de cam-

po, provisto de todo el equipo necesario para pruebas de suelos, rocas, agregados y concreto.

La construcción de esta presa fué planeada y está bajo la supervisión de la Comisión Nacional de Irrigación, cuyas oficinas centrales radican en la ciudad de México. La presa es parte de un vasto programa de irrigación, auspiciado por el Gobierno Federal. Miembros de esta Comisión, son: Presidente, Ing. Marte R. Gómez, Secretario de Agricultura; Ing. Adolfo Orive Alva, Vocal Ejecutivo; Ing. Juan Más, Vocal Secretario. En las oficinas centrales: Ing. Andrew Weiss, Ingeniero Consultor; Ing. Antonio Coria, Director Técnico; Ing. César Jiménez López, Jefe del Departamento de Proyectos, e Ing. Manuel Bustamante, Jefe del Departamento de Construcción.

En el campo, el Ing. H. V. R. Thorne es Superintendente General, y el que habla, Ingeniero Residente.

