

Geología de los Sitios de Vasos de Almacenamiento y Cortinas

POR KIRK BRYAN

Traducción del inglés por Manuel Miguel Ramos Galván, Ing. Civil

Revisado por el Dr. Paul Waitz

Geología aplicada a la Ingeniería

TODAS las estructuras de ingeniería constituyen una carga sobre la corteza terrestre. Si esta corteza fuera en todas partes del mismo carácter y resistencia, el diseño de tales estructuras podría simplificarse mucho; pero la heterogeneidad de los materiales de la corteza terrestre y la complejidad de su disposición son notorias y estas condiciones geológicas intervienen en la mayor parte de los problemas de Ingeniería.

Ciertas estructuras, tales como pilas de puentes, presas, túneles y edificios pesados, requieren tanto para su diseño como para su construcción un conocimiento de precisión poco usual respecto a la resistencia, comportamiento y contenido de aguas de las rocas locales. Otras estructuras, tales como trabajos de rectificación de ríos o protección de costas y trabajo de puertos, que pretendan guiar o restringir las fuerzas naturales, requieren un conocimiento igualmente preciso de los cambios geológicos que constantemente tienen lugar en la superficie terrestre. Además, frecuentemente movimientos extraordinarios en la tierra y los temblores y terremotos resultantes ponen en peligro los trabajos del hombre y en ciertas localidades deben precaverse ampliamente contra estos efectos al diseñar las estructuras.

Se ha dicho que la tarea del ingeniero es "venecer por el arte, las dificultades de la naturaleza". Mucho de su esfuerzo se emplea en la lucha con el medio, tiempo y clima o en el ingenioso aprovechamiento de fuentes de energía, pero en las grandes empresas constructivas antes mencionadas, se lucha también con los materiales de la tierra y con las fuerzas que operan en ellos, y así el ingeniero debe resolver problemas dentro del campo de la Geología. Muchos ingenieros y grandes empresas han contribuido a aumentar nuestros conocien-

tos geológicos. Siempre que un ingeniero excave para una cimentación, está investigando la geología local, y cuando levanta el más simple edificio realiza un experimento acerca de la resistencia de los materiales de la corteza terrestre. Dentro de los límites de su prueba, y en las construcciones ordinarias los límites son reducidos, el ingeniero obtiene los datos geológicos que le son necesarios conocer. Sin embargo, en grandes empresas los rudimentarios procedimientos, son inadecuados y se requiere una investigación elaborada por medio de zanjas, perforaciones con taladro, cargas de prueba y demás, con el objeto de obtener la información necesaria para un diseño inteligente. En un número creciente de presas se está llamando a los geólogos para que den el beneficio de su conocimiento especializado y su habilidad para reducir el número de pruebas requeridas localizándolas en lugares realmente adecuados. Además, se necesita al geólogo para la interpretación correcta de los resultados obtenidos.

Las responsabilidades de un geólogo que intervenga en esta clase de trabajos son muy grandes. Por mucho que conozca su profesión se ve restringido en su labor en la misma relación en que ignora la construcción de ingeniería. Poco se ha publicado acerca de la aplicación de la geología a los problemas de ingeniería. La mayor parte de los libros que llevan el título "La Geología Aplicada a la Ingeniería", son simples textos de colegio destinados a dar a conocer a los estudiantes de ingeniería aquellas partes de la geología que son de mayor valor e interés para ellos.

Excepciones son: el muy interesante aunque ahora anticuado libro de Penning (1); un reciente libro algo esquemático por Fox (2); el valioso tratado de De Launay (3), la tercera edición del libro de texto de Ries y Watson (4), y el libro altamente individual de Kranz (4a). (El traductor ha-

ce especial mención de un reciente libro de R. Legget que es muy recomendable tanto por su contenido, como por su extraordinariamente extensa e interesante bibliografía.) (4b).

Un folleto por Lapworth contiene muy sabias observaciones de las condiciones geológicas en la cimentación de presas, ilustrado con secciones detalladas; pero debe leerse teniendo presente que trata de presas británicas, construidas de acuerdo con la opinión inglesa que acostumbra el uso de profundos dentellones, generalmente de arcilla pisoneada.

Se puede encontrar una información interesante en un ensayo de Dumas (6), y acerca de ciertas fases de problemas de almacenamiento, en un libro de Collet, (7) (8).

La aplicación de la Geología a la ingeniería se recomienda en un número de artículos y citas, pero éstas contienen muy poca información acerca de los principios expuestos. Se han publicado sólo unos cuantos informes sobre la geología de proyectos de ingeniería, escritos como una guía práctica para la construcción, y algunos de éstos están escondidos en los documentos de ingeniería o en publicaciones difíciles de obtener. En el apéndice bibliográfico se citan las publicaciones que conozco que tratan de geología de presas, almacenamientos y túneles en los Estados Unidos, y se han agregado breves notas acerca de su alcance. Unos cuantos de estos artículos fueron escritos por ingenieros, pero contienen una información geológica altamente especializada o muy detallada con discusiones de la aplicación de esta información a los problemas considerados. Los artículos escritos por el finado W. O. Crosby y los de Charles P. Berkey son del más alto valor y un estudiante serio de geología aplicada a la ingeniería debiera asimilarlos completamente.

El presente artículo se ofrece con la esperanza de que sea útil para fomentar la aplicación de la geología a muchos proyectos de irrigación y de otros problemas de ingeniería, y para que guíe a los geólogos encargados de la investigación de tales proyectos para la presentación de sus estudios.

La infinita variedad de condiciones geológicas posibles hacen impracticable anticipar el tipo de trabajo que será necesario para cualquier proyecto, del cual está encargado un geólogo, pero algunos principios de la aplicación de la geología son más o menos comunes a todas las investigaciones. Aquí se da un pequeño resumen de tales principios como se han aprendido en el curso de varias investigaciones. El elemento personal en tales trabajos

es de gran importancia y se incluyen algunas notas acerca de las relaciones entre geólogos e ingenieros.

SITIOS DE ALMACENAMIENTO

Requisitos generales

Los requisitos de un sitio de almacenamiento son muchos e ineludibles; los principales según lo dicho por Lippincott (8) aunque modificando su expresión son:

1° Un vaso impermeable y grande;

2° Un estrechamiento que requiera una cortina relativamente pequeña y económica, con un suelo y subsuelo adecuados para soportar la construcción;

3° Una topografía que facilite la construcción de un vertedor seguro y amplio para desfogar los excesos de agua;

4° Materiales disponibles para la construcción de la cortina;

5° Seguridad de que el vaso no se llenará con lodo y arena acarreadas en el agua en un lapso breve.

6° Disponibilidad de agua en cantidad suficiente;

7° Destino del agua almacenada o alguna otra razón que justifique el costo.

Es obvio que al geólogo sólo conciernen los cinco primeros requisitos. Que el vaso debe ser amplio es por sí mismo evidente, y su tamaño se determina por los métodos ordinarios de ingeniería; pero el asunto de su impermeabilidad no puede contestarse fácilmente con un simple sí o no, pues a pesar de las filtraciones, algunos almacenamientos son costeables. El geólogo, por lo tanto debe hacer de este asunto no sólo una determinación cualitativa sino también una cuantitativa para conseguir su máxima utilidad. Debe considerar también si las filtraciones ensancharán progresivamente las grietas, y si, por lo tanto, aumentarán las pérdidas y si las filtraciones perjudicarán la estabilidad del terreno.

El tamaño y, por lo tanto, el costo de la presa requerida quedan determinados en gran parte por un levantamiento topográfico del sitio, pero el tipo de la cortina y sus detalles están en muchas localidades regidos por la geología, especialmente por las condiciones del fondo y de las laderas respecto a permeabilidad y resistencia para las fatigas. Estos problemas requieren la más estrecha cooperación del geólogo y del ingeniero, dado que el nú-

mero de procedimientos de ingeniería para vencer las dificultades naturales aumentan continuamente. Materiales de buena calidad obtenibles en la localidad disminuyen el costo, y el geólogo debe actuar como explorador para localizar y estimar los volúmenes de roca, arena y arcilla que existan cerca. Tales estudios cualitativos preliminares son generalmente insuficientes para una decisión final en cuanto a la utilidad de estos materiales, y pueden ser necesarios exámenes detallados en el laboratorio de muestras extraídas de pozos de pruebas; pero estas investigaciones caen dentro del campo de la ingeniería ordinaria y no requieren necesariamente la atención del geólogo aunque él pueda dar consejos útiles durante su progreso.

Los materiales acarreados por una corriente se sedimentarán en todos los almacenamientos formados al embalsar la corriente de un valle; en corrientes cargadas de sedimentos la cantidad de este material, generalmente llamado "azolve", puede ser muy grande y el almacenamiento llenarse o "azolvase", en tan poco tiempo que haga inadmisible su construcción. La medida de la carga de azolve que lleva una corriente (9) es del resorte de la ingeniería, pero en levantamientos y estimaciones preliminares, el geólogo puede dar consejos útiles y pertinentes, porque la cantidad de detritus que lleva una corriente, es una función de la distribución y área de las rocas del vaso drenado. Collet describe varios ejemplos. (10)

HIDROLOGIA DE UN VASO

Cuando un almacenamiento se llena, el agua escapa del vaso a los terrenos adyacentes. Aún los almacenamientos revestidos de concreto tienen filtraciones apreciables y como consecuencia de estas filtraciones las cimentaciones de algunos almacenamientos han sido minadas con resultados desastrosos (11). Por supuesto, los grandes almacenamientos son sin revestir, porque el costo de su revestimiento es prohibitivo. Por lo tanto, a menos que el terreno por sus condiciones naturales impida las filtraciones, o que éstas sean relativamente tan reducidas que sus consecuencias sean pequeñas, el almacenamiento será un fracaso. Como las filtraciones deben ser impedidas por la naturaleza del terreno, el estudio de un sitio de almacenamiento es un problema geológico y más particularmente un problema de aguas subterráneas. Para resolver este problema completamente, deben determinarse la posición y los movimientos del agua subterránea bajo condiciones naturales, y debe anticiparse

el efecto que un nuevo régimen tiene en las aguas subterráneas del área, régimen originado por el del agua del vaso hacia el terreno exterior cuando se llena el vaso.

ALMACENAMIENTO EN AREAS CON NIVEL DE AGUA FREÁTICA POCO PROFUNDO

Ordinariamente los suelos y rocas están saturados con agua desde cierta profundidad; la superficie de esta zona se conoce como nivel de aguas freáticas. Está profunda debajo de los cerros y aflora a la superficie en pantanos, lagos y corrientes. Así, en términos generales, en lo que puede considerarse como condiciones normales, la superficie del agua tiene una forma que se aproxima a la topografía superficial. En un valle se inclina hacia aguas abajo, y de ambos lados hacia el centro del valle como lo sugiere la figura 1-a. Tal forma es debida a la resistencia que el escurrimiento presenta por la fricción en los intersticios del terreno. El gradiente de las aguas freáticas en cualquier lugar es función del tamaño y número de los intersticios o aberturas del terreno y de la cantidad de agua. Una superficie muy inclinada del agua freática indica así, un terreno compacto con pequeños intersticios o muy grandes cantidades de agua; recíprocamente, una superficie horizontal del agua freática indica grandes aberturas en las rocas o muy pequeñas cantidades de agua.

Si un valle se cierra con una cortina, el agua del lago que se forma se filtra en el terreno hasta que encuentre el nivel de aguas freáticas circunvecino. De allí en adelante se establecerá una nueva pendiente del agua freática. Si la altura del almacenamiento queda bajo el nivel del parte-aguas freático, no sólo no habrá pérdidas por filtraciones del almacenamiento sino que habrá afluencia de agua freática al almacenamiento y un almacenamiento subterráneo entre la antigua y la nueva posición del nivel de las aguas freáticas (lado derecho en la figura 1-a). El volumen de este terreno de nueva saturación depende del nivel del agua en el almacenamiento y de la pendiente del nivel freático. El valor de este almacenamiento de aguas subterráneas depende del porcentaje de espacios de poro y también de la proporción a la cual el agua fluya hacia dentro o hacia fuera del terreno a medida que el nivel del almacenamiento cambie.

En la discusión anterior no se ha dicho nada acerca de las filtraciones en el sitio de la cortina. Es obvio, sin embargo, que en los empotramientos de la presa existirá un alto gradiente entre el

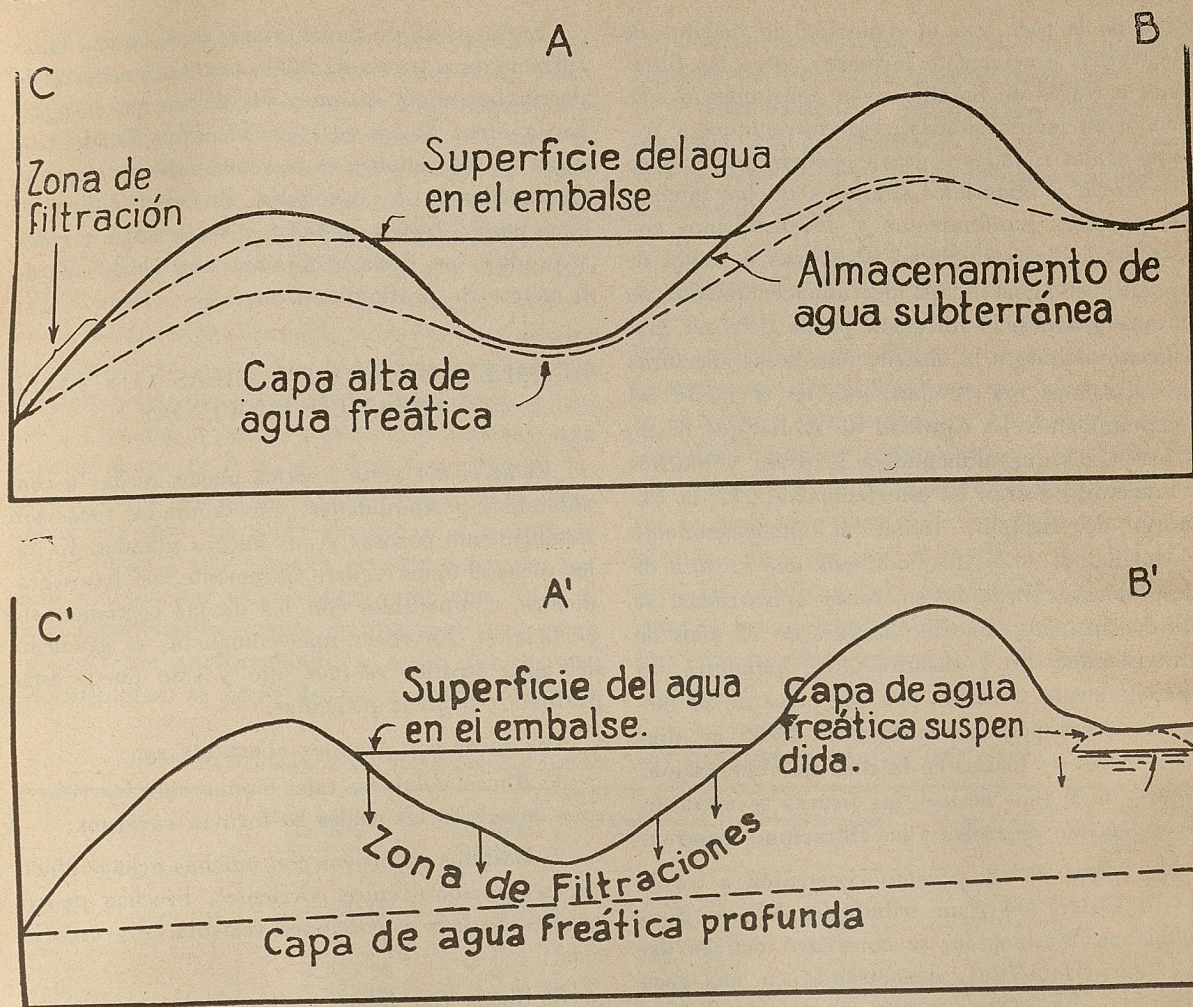


FIGURA 1.- Diagrama que muestra la relación de los embalses a la capa de agua freática.

agua dentro del almacenamiento y el nivel del agua subterránea inmediatamente aguas abajo. Como este es el lugar donde el nuevo nivel de aguas es el más alto con respecto al nivel original, las condiciones aquí son críticas. Los empotramientos de la cortina deben ser prácticamente impermeables, pues de lo contrario ocurrirán serias filtraciones. Como el carácter de los empotramientos entra en el problema de la construcción de la cortina, la discusión de este tópico se pospondrá para un párrafo ulterior.

Con presas construidas en áreas en que el nivel del agua freática es alto, se experimentan en general pocas dificultades cuando el almacenamiento ocupa el cauce de un valle cuyo río es alimentado por aguas subterráneas. Bajo las condiciones mos-

tradas en el punto "C" figura 1, las filtraciones son posibles porque el nivel de aguas de filtración queda arriba del punto relativamente bajo del parteaguas subterráneo primitivo, pero serán moderadas si el material de la loma es de grano fino.

Cuando parte de las orillas del almacenamiento es de material de textura abierta tal como basalto, calizas cavernosas, o una acumulación de cantos glaciales, el nivel del parteaguas freático es siempre bajo, por lo que, si se encuentra una baja posición del nivel freático, esto debe su motivo de precaución, ya que la presencia de este material poroso permite asegurar que habrá grandes filtraciones. Debe anotarse que las filtraciones a través de yeso o de roca de sal, y en un grado menor a través de calizas, aumentarán debido a la diso-

lución de la roca y a la remoción de detritus de las cavernas previamente formadas, pero las filtraciones a través de basalto serán constantes o sólo ligeramente incrementadas. Las filtraciones a través de cantos rodados o grava pueden, por acarreo de la arena y materiales similares de los intersticios, provocar hundimientos y deslizamientos con consecuencias serias. Si las aberturas a través de las cuales el agua escapa del almacenamiento no son muy grandes, la filtración puede decrecer gradualmente debido a la obstrucción de las aberturas con sedimentos que se depositan en el fondo del almacenamiento. La cantidad de azolve que llevan las corrientes que alimentan a la presa y muchos otros factores entran en este fenómeno. En la Colecturía de Bijápur, India, el almacenamiento de Muchkundi (12), formado por una cortina de mampostería cimentada en rocas apizarradas, se obturó e hizo impermeable después de 12 años de sedimentación. En Yorkshire, (13), Inglaterra, un almacenamiento, formado por una presa de 24 metros de altura permitía la fuga de 1,666 m³ diarios a través de fisuras en la roca de cimentación. Después de 2 años de uso, las fisuras se cerraron por el depósito de azolve y las filtraciones cesaron.

Una presa de cal y canto construida a través del río Cedar (14), un tributario del río Snoqualmie en Wáshington, se construyó con su extremo sur (izquierdo), descansando en una roca fracturada. El extremo norte (derecho), descansaba en material glacial. Hubo algunas filtraciones a través de la roca en el extremo sur y tras del extremo norte de la cortina, pero una grande y desastrosa filtración ocurrió a través del material glacial a una altura de 474 metros, apareciendo manantiales en el valle Snoqualmie a una altura de 302 metros. La carga hidrostática era de 172 metros y la distancia de 1,980 metros, lo que da un gradiente de uno a once. La aparición de estas fugas en el valle Snoqualmie provocó hundimientos en la ladera de la colina. Las pérdidas totales de agua eran de 13,563 m³ diarios, 1,317 m³ por segundo, y desde 1914 no se ha permitido llenar la presa. Debido a continuos litigios, no se dispone de la descripción detallada de los materiales y de las pruebas hechas antes y después de la construcción. Sin embargo, los materiales glaciales de la loma eran obviamente tan grandes y porosos que ya antes de la construcción era de esperarse como queda asentado por Fowler, que era evidente que la loma no podía resistir el movimiento de agua del almacenamiento a un gradiente de 1 a 11.

En la presa de Santa María en Colorado, hubo filtraciones a través de 3,200 metros de material de derrumbes en el extremo sur del cuerpo de agua. En la presa Mosca (15) en el mismo Estado, han ocurrido filtraciones a través de rocas volcánicas fracturadas y de canchales. En estas últimas el agua pasó a través de 457 metros de arena y grava y produjo un deslave dejando una hondonada de 6 metros de profundidad.

ALMACENAMIENTO EN AREAS CON NIVEL FREÁTICO PROFUNDO

El nivel del agua freática puede quedar a considerables profundidades, sólo donde las rocas son notablemente porosas y sus huecos grandes. En tales rocas el agua escurre libremente con bajos gradientes, comparables con los de las corrientes superficiales. En rocas más compactas el gradiente del agua freática es más alto y sólo puede estar profundo en áreas pequeñas.

Las rocas con grandes aberturas son:

1° Rocas solubles, tales como calizas, yeso y roca de sal, en las cuales se forman cavernas;

2° Basaltos extrusivos con muchas grietas abiertas, separaciones entre corrientes, brechas de corrientes de lava y porciones vesiculares y escoriáceas;

3° Rocas con fallas y fracturas, generalmente en áreas pequeñas, y

4° Lechos de cantos rodados acarreados por los ríos, por glaciares o más raramente por deslizamientos o derrumbes.

En la figura 1 b, el almacenamiento A' está construido en una área cuyas aguas freáticas se encuentran a un nivel muy profundo y se drenan con un gradiente suave hacia el valle C'. Las pérdidas del almacenamiento son proporcionales a la carga hidráulica y a la capacidad de la roca para transmitir el agua. Cuando se carezca de datos por medio de los cuales puedan estimarse estas pérdidas, se debe emplear el criterio para juzgar de si serán o no excesivas. En una localidad, parte del fondo de un almacenamiento propuesto y localizado en basalto extrusivo era anualmente inundado por los agricultores con agua de las avenidas primaverales de arroyos cercanos. El agua con un tirante de 4.57 m. desaparecía en seis semanas, y como la presa propuesta se proyectaba para un tirante de 18.29 m. era de esperarse que el contenido total de la presa podría perderse en, digamos,

tres meses. Parte del fondo estaba cubierto con suelo finamente granulado que retardaba las filtraciones, pero con las altas velocidades engendradas por una carga de 18.29 m., mucho de este material sería indudablemente arrastrado dentro del basalto y la cantidad de filtración tendría que crecer. En consecuencia, el proyecto se abandonó.

La Presa Jerome en Idaho, está situada en una depresión cuyo subsuelo está formado por una serie de corrientes basálticas de varios cientos de pies de espesor. El nivel de las aguas freáticas está bastante abajo de la superficie, y las fugas a través del basalto, a pesar de estar protegido por una capa de tierra de 3 m. de espesor en algunos lugares, fueron tan grandes que obligaron a abandonar este vaso. La presa Hondo en el sureste de Nuevo México, está situada en una depresión natural rodeada por calizas muy compactas. Bajo el suelo superficial hay capas de pizarra y yeso, como lo mostraron perforaciones, y según las mejores informaciones el nivel de las aguas freáticas se

encuentra como a unos 60 metros de profundidad. Después de construida la presa, las fugas a través de la roca cavernosa, que quedaba debajo, fueron tan rápidas que se formaron sumideros en el suelo, y la pérdida de agua fué tan grande que hubo que abandonar la presa.

La Presa Deer Flat, también conocida por Lago Lowell, forma parte del proyecto de riego de Boise, Idaho, y está situada en una planicie ondulante entre los ríos Boise y Snake. El vaso está formado por dos terraplenes que cierran puertos en el lomerío que lo confina. Estos terraplenes no son absolutamente impermeables y permiten algunas filtraciones en la base. Cuando por primera vez se llenó este vaso tenía relativamente grandes pérdidas de agua por el fondo y por los lados, pero las pérdidas han disminuido gradualmente, como se muestra en la tabla siguiente, cuyos datos han sido suministrados por el Bureau of Reclamation:

PERDIDAS DE AGUAS EN EL "DEER FLAT RESERVOIR, IDAHO, 1909-1921"

AÑO	Area máxima inundada Hectáreas	Area media inundada Hectáreas	Evaporación (Hect. M.)	Pérdidas totales (Hect. M.)	Filtraciones (Hect. M.)	Pérdida media por filtración (Hect. M.)
1909.....	1 250.00	548.77	585.67	7 089.75	6 504.07	11.85
1910.....	1 579.50	1 215.81	1 294.65	11 526.45	10 231.80	8.42
1911.....	2 551.50	1 805.89	1 923.48	18 598.33	16 674.85	9.23
1912.....	2 835.00	1 873.12	1 997.46	10 491.47	8 494.01	4.53
1913.....	3 321.00	2 126.25	2 244.06	11 033.99	8 789.93	4.13
1914.....	3 402.00	2 161.48	2 305.71	10 120.96	7 815.24	3.62
1915.....	3 280.50	2 074.82	2 207.07	8 310.42	6 103.35	2.94
1916.....	2 794.50	1 952.10	2 083.77	5 421.50	3 337.73	1.70
1917.....	3 057.75	1 822.50	1 356.30	3 994.92	2 638.62	1.44
1918.....	3 770.95	2 499.25	1 651.97	6 758.82	5 106.83	2.04
1919.....	3 861.67	2 437.69	1 672.56	5 545.29	3 872.73	1.58
1920.....	3 956.04	2 587.14	1 845.55	7 762.23	5 916.67	2.28
1921.....	3 983.17	2 948.00	3 086.81	8 220.16	5 133.34	1.74
MEDIA ANUAL.....	3 126.44	1 863.88	1 865.77	8 625.40	6 970.71	4.27
TOTAL.....	24 255.06	112 130.17	90 619.17

a). La media de la última columna es el resultado de dividir la pérdida media por filtración entre el área media sumergida.

Los materiales subyacentes consisten en lechos de sedimentos suaves, horizontales, principalmente arcilla, tobas y arena del Payette y posiblemente de la formación Idaho. Unas cuantas corrientes de basalto están intercaladas entre los otros materiales y en la superficie de la planicie hay depósitos aislados de grava. Antes de que se construyera la presa, las aguas freáticas se elevaban bajo esta planicie a un nivel arriba del de los ríos adyacentes, pero no se aproximaban mucho a la superficie. Las pérdidas en los primeros años del embalse sa-

turaron los lechos subyacentes y levantaron el nivel de las aguas freáticas. La irrigación de las tierras circunvecinas se principió en ese tiempo y esto ayudó a la saturación, de manera que en la actualidad el almacenamiento descansa sobre terreno saturado por el cual se pierde sólo el agua necesaria para restituir la que se drena por movimiento lateral a lugares pantanosos de las laderas, o a los ríos. Indudablemente la sedimentación en el fondo del embalse ha ayudado también a evitar pérdidas. Es evidente que, si el material subyacente fuera más permeable requeriría más agua para reemplazar la pérdida por el escurrimiento lateral. Si, por ejemplo, el material fuera una grava gruesa, las pérdidas de agua habrían

sido tan grandes que hubieran aniquilado el valor del embalse.

En el río South Platte, en Colorado, varias presas de almacenamiento (16) se han construido en depresiones naturales entre los médanos de arena adyacentes al río. Las pérdidas de estos almacenamientos han sido grandes, pero como se muestra en la tabla siguiente, han disminuido con la edad

de los embalses. Este hecho indica que la filtración ha hecho que la zona de saturación suba en el terreno a un nivel más alto y así ha disminuido el gradiente de la nueva superficie del agua freática, y en consecuencia, el movimiento de agua a través del terreno. También es probable que el depósito de sedimentos en el vaso haya tendido a impermeabilizar el fondo y así haya contribuido a impedir filtraciones.

FILTRACIONES EN LOS VASOS DEL VALLE SOUTH PLATTE, COLORADO, EN 1909

Nombres	Fecha de Construcción	Edad a la que se hicieron las determinaciones (En años) (1920)	Capacidad en Ha. m.	Altura máx. del embalse en m.	Area inundada en aguas máx. en Ha.	Pérdida de agua por filtración y evaporación en 12 meses Ha. (a)	Porcentaje de agua que entró al almacenamiento
Lago Jackson	1903	17	4366.555	6.096	1030.333	1308.733	24
Presa Riverside	1909	11	7092.567	7.620	1454.850	7505.787	46
Presa Prewitt	1912	8	4045.847	11.280	983.794	4315.982	58

(a) No se dispone de datos suficientes para separar las pérdidas por evaporación de las pérdidas por filtración.

En la investigación de los sitios de presa, el geólogo debe abstenerse de aceptar evidencia sin análisis. Una de las más engañosas condiciones es la presencia de corrientes perennes en el valle que se propone emplear como vaso. ¿Está alimentada la corriente por aguas subterráneas?, y ¿representa la corriente la línea más baja del nivel de las aguas freáticas locales? En general, las áreas en que el manto de agua freática (es decir, cerca de la superficie del terreno), se caracterizan por muchas corrientes perennes, y las áreas de aguas freáticas profundas tienen drenaje superficial debidamente desarrollado. Como se aclaró con las investigaciones del Vaso N° 3 del proyecto de riego de Carlsbad (17), en Nuevo México, el río Pecos corre en el sitio de la presa en un terreno impermeable suspendido arriba de un manto freático más profundo. Los pozos de prueba encontraron en este lugar el agua entre los 7.30 m. y 12.80 m., estableciéndose su nivel a 7.30 m. bajo de la superficie y a 3.70 m. debajo del nivel del río. Bajo esta zona saturada, las rocas cavernosas estaban secas hasta una profundidad de 22 m. Desde esta profundidad hasta 56.30 m. se encontró agua, con su nivel hidrostático a 22 metros, y es probable que esta sea la principal zona de saturación en la región. El río Pecos corre encima de roca seca en una especie de acueducto natural, que sin duda fué formado por depósitos de carbonato de calcio

del agua del río que cementa la grava y las brechas cavernosas abajo de su lecho. Naturalmente, tal "acueducto", es de capacidad limitada, como se indica en la figura 1 b, en B', y si el nivel del río sube arriba del canal impermeabilizado, el agua que rebosa se puede infiltrar hasta la capa de agua freática profunda.

Si la mayor parte de las filtraciones o fugas está confinada en áreas pequeñas, una medida lógica es el aislamiento de dichas áreas por medio de diques. Un dique de esta naturaleza construido en la presa de Mc Millan, en Nuevo México, fracasó en impedir las filtraciones, por un lado, porque unas aberturas en el yeso que en un principio no parecían ser sospechosas, se agrandaron y dieron salida a la misma cantidad de agua que se perdía antes de la construcción del dique, y por otro lado, porque se colaba debajo del dique, el cual carecía de un dentellón impermeable. Intentos semejantes en otras presas han sido de dudosa utilidad. Sin embargo, donde las filtraciones tienen lugar a través de un solo canal subterráneo definido, como es el caso en las aguas del Black River, N. Y. (18), desde la entrada a una serie de cavernas en calina que conducen a su meandro encajonado hacia la salida de este, Black River (18), se pudo encontrar el canal y obturarlo, pero tales remedios sólo son adecuados cuando la presión del agua es baja. El vaso de la presa Malad (19)

en Idaho, tiene (como se muestra en el mapa de isohipsas en el aluvi6n de su fondo), filtraciones en una 1rea peque1a, y excavaciones hechas en esa 1rea mostraron muchas peque1as cavidades a lo largo de los planos de estratificaci6n de una caliza. Las inyecciones de esta 1rea est1n indicando y si no hay otras 1reas similares, este remedio convertir1a una presa hoy inservible en una propiedad 1til.

Tambi6n otros factores se presentan ocasionalmente en el problema, como en la presa y la cortina de Cataract para el abastecimiento de agua potable, de Sidney, Australia (20). Ah1 existen debajo de la presa a una profundidad de 244 m. valiosos yacimientos de carb6n. Era indicada la prohibici6n de la explotaci6n de los mantos de carb6n bajo toda la cuenca de captaci6n, o por lo menos, bajo el embalse. Opinaron tambi6n que la cubierta encima de carb6n, consiste principalmente de arenisca, era suficientemente resistente para permitir trabajos mineros no s6lo en la cuenca de captaci6n sino hasta debajo del embalse. Debajo de la cortina se fij6, especialmente un pilar de 550 m. de ancho como barrera. Sin embargo, el acierto de minar debajo del embalse espera su prueba en el futuro, cuando el valor relativo del agua almacenada y del carb6n hayan cambiado. Ser1 entonces factible que a medida que se extraiga el carb6n, se introduzcan soportes de mamposter1a para el techo y que as1 se asegure que no habr1 lugar a hundimientos y a las consecuentes filtraciones.

El estudio de un vaso de almacenamiento encierra grandes responsabilidades para el ge6logo, debido a que rara vez es factible tomar medidas que eliminen las filtraciones. Que sus conclusiones sean correctas no puede probarse como no sea por el costoso m6todo de construir y llenar la presa. Si aprueba el vaso y despu6s de la construcci6n falla para retener el agua, la inversi6n se pierde; si condena el vaso y no se encuentra sustituto, el proyecto aborta. En ex1menes de otros tipos de sitios, las dificultades que pueda notar se pueden subsanar con ingenio y experiencia, pero, por lo que hace a un vaso, 6l s6lo debe llevar la responsabilidad. Corresponde, por lo tanto, al ge6logo encargado del estudio del lugar determinar las condiciones de las aguas subterr1neas con exactitud, requerir la perforaci6n de pozos de prueba en puntos cr1ticos y analizar despu6s sus datos con cuidado y modestia.

SITIOS DE CORTINAS

Condiciones generales

El estudio de los sitios de cortina excita el inter6s de los ge6logos, debido a la necesidad de un trabajo preciso y detallado, ya que generalmente se dispone de fondos para pozos de prueba y perforaciones para conseguir informaciones que no se pueden obtener por un an1lisis superficial. Cada uno de los muchos dispositivos de que dispone el ingeniero para subsanar las dificultades en el sitio est1n limitados por varias condiciones relacionadas entre s1. En consecuencia, el ge6logo debe ser escrupuloso para dar a conocer todos los hechos de que disponga. Debe tambi6n darse cuenta o percatarse de que, si se dispone de fondos suficientes, se puede subsanar toda dificultad y de que los sitios para presa s6lo se abandonan porque el costo de la obra propuesta excede a su utilidad probable. Los cambios econ6micos del futuro pueden cambiar la relaci6n de valores, y estructuras hoy impracticables podr1an construirse alg1n d1a. La factibilidad de una presa es as1 un problema econ6mico y afirmaciones, por lo que respecta a su costeabilidad est1n fuera del campo del informe del ge6logo, el cual debe concretarse a las condiciones f1sicas.

Una presa consiste en una membrana impermeable o casi impermeable, soportada por algo contra el empuje del agua almacenada (21). En las cortinas de mamposter1a ordinaria o de concreto, la membrana impermeable est1 formada por la capa de las primeras pulgadas o pies de la pared de aguas arriba; en otros tipos, la membrana puede ser una estructura independiente y en presas de tierra puede no haber parte alguna totalmente impermeable, pero la filtraci6n del agua es retardada por la resistencia por fricci6n que ofrecen las porciones sucesivas del terrapl6n. Al ge6logo no le corresponden los m6todos por medio de los cuales se haga la membrana y la estructura que lo soporte, salvo con respecto a las dificultades geol6gicas, y debiera evitar expresiones que lo hagan aparecer como dictando detalles estructurales al ingeniero proyectista. As1, en un reciente reporte geol6gico, su autor, debido a una desigual resistencia del terreno en las laderas norte y sur del sitio de una cortina, recomendaba con gran 6nfasis una presa de tierra que pudiera asentarse desigualmente sin romperse y condenaba una presa de concreto. Como no hab1a presa disponible, los proyectistas adoptaron una estructura celular de concreto

reforzado con taludes suaves, porque este tipo de presa también es flexible. El geólogo quedó, por lo tanto, en una situación embarazosa al haber condenado el tipo de presa elegida, aunque sus consejos, por lo que hace a las condiciones geológicas se aceptaron y se tuvieron en cuenta en el diseño.

El geólogo está interesado principalmente en la carga que la presa representará y en la localización de la membrana impermeable y en la profundidad a la cual deberá llevarse con objeto de evitar las filtraciones. Las presas de concreto y mampostería, que resisten el empuje del agua almacenada por su peso y por la resistencia de un arco simple, tienen bases reducidas y originan una fatiga grande en cada unidad de área de su cimentación. Si la roca parece inadecuada para tal cargo, el geólogo debe recomendar una presa de base amplia, en vez de una de base reducida, pero debe evitar expresar una opinión acerca de si se adaptará mejor a las necesidades una presa de enrocamiento, de tierra, de concreto celular u otra de las numerosas alternativas. Los mejores términos a emplear son "base amplia" y "base reducida", pues no dan al proyectista instrucciones superfluas. De manera semejante el geólogo debe especificar que la membrana impermeable será llevada a través de ciertas rocas porosas hasta dentro de algunas rocas impermeables, o puede indicar que se debe hacer una liga mecánica entre la porción impermeable o casi impermeable de la cortina y cierta formación rocosa. La elección de los métodos por medio de los cuales lograr el objeto, pertenece propiamente al ingeniero, el cual podrá emplear tablestacados metálicos, inyecciones a presión o un dentellón de mampostería, concreto o tierra pisoneada.

La geología de los sitios de cortina se puede considerar bajo los siguientes encabezados: cimentaciones; empotramientos (filtraciones); vertederos, túneles (derivación, toma, etc.); materiales de construcción. Sin embargo, esta división es completamente arbitraria debido a que los factores están de tal manera ligados que en el examen de cualquier sitio todos han de considerarse. El costo de la construcción es también parte del problema, y un trabajo geológico inteligente sólo puede hacerse en cooperación con el ingeniero, para el cual esta consideración es importantísima. Por ejemplo, en un sitio donde se dispone de grandes cantidades de tierra, y se carece, en cambio de roca apropiada para mampostería o concreto, los costos relativos muestran generalmente que la cortina debe ser una estructura de tierra. Como en este tipo de presa

la carga por centímetro cuadrado en la cimentación es moderada, debido a la base ancha, el examen de la cimentación a este respecto puede, en consecuencia, ser menos cuidadoso. Sin embargo, hay terrenos tan suaves que el peso por unidad de área, aun de presas de tierra ordinaria, excede a su resistencia.

CIMENTACION DE CORTINAS

El tipo más común de sitios de cortina es una parte angosta de un valle donde la roca de los empotramientos de la presa es más o menos visible, mientras que el fondo de la sección transversal está cubierto por el aluvión de la corriente. La primera pregunta que debe contestarse es el espesor de este aluvión. Si hay muchos afloramientos aislados de roca que se vean a través del aluvión, el geólogo puede atreverse a hacer una estimación de su espesor promedio. Sin embargo, en lo general, la profundidad de la roca no puede predecirse con ninguna certeza. El autor tiene viva en la memoria una estrecha garganta de 85 metros de anchura con paredes casi verticales en una extensión de cerca de un kilómetro a lo largo de un pequeño río en el suroeste de los Estados Unidos, en la cual se había propuesto la colocación de una baja presa derivadora. En la entrada del cañón afloraba la roca del fondo a través de la grava del cauce de la corriente y varios afloramientos semejantes existían en el extremo inferior de la garganta. Parecía que la corriente estaba erosionando la roca del fondo y que la grava del cauce hasta el lecho de la roca era puesta en movimiento por cada avenida. Considerando el tamaño de la corriente parecía que un espesor de 10 metros para la grava era una estimación segura y que tal profundidad haría posible una presa de concreto o de mampostería cimentada en el lecho de la roca. Sin embargo, una perforación de prueba penetró 25 metros en arena y grava sin alcanzar roca. Bajo las condiciones económicas prevalecientes, ésta era una profundidad prohibitiva y, en consecuencia, se diseñó para el sitio un dique o cortina flotante o del tipo indio.

En la mayor parte de los sitios, antes de hacer estimaciones de costo, se hacen perforaciones de prueba para determinar la profundidad de la roca, pero en los reconocimientos iniciales, frecuentemente se llama a un geólogo para que exprese una opinión; llevando en la mente la posibilidad de equivocarse, debe pesar cuidadosamente los datos más o menos inadecuados que pueda obtener. Pri-

mero: ¿Está la corriente degradando o agrandando su lecho?, si lo está agrandando, la profundidad del relleno de aluvión puede ser muy grande, en tanto que si la corriente aún está excavando su lecho, el aluvión sobre el cual corre en épocas ordinarias, es arrastrado en las crecientes y se dice que la corriente "excava y rellena". La profundidad a la cual pueden llegar excavación y relleno es función del tamaño y de la velocidad de las crecientes y de la cantidad de material que es arrastrado a través del cauce rocalloso. Rara vez es posible obtener datos adecuados para resolver la ecuación antes indicada, pero reuniendo los resultados obtenidos por otros razonamientos, se puede obtener una conclusión de cierto valor, como hábilmente lo ha demostrado Miser (22) en su estudio del depósito de acarreo del cañón de San Juan.

En una estrecha garganta del noroeste de los Estados Unidos se había proyectado la cimentación de dos pilas de puente en el cauce, en un lugar donde existía un banco de arena. Se llamó al geólogo para que indicara, a qué profundidad se encontraría la roca bajo este banco de arena, con el objeto de poder hacer las estimaciones preliminares de costo. En los valles aguas arriba y aguas abajo de este cañón existían depósitos de 100 o más metros de aluvión, y es característica para los ríos de esta región en general, la presencia de cauces profundos llenos de grava. Las investigaciones mostraron, sin embargo, que el curso actual del río en el cañón no corresponde a su antiguo curso. El cambio del curso tuvo lugar por la formación de meandros laterales al nivel de una terraza situada de 50 a 60 metros arriba del lecho actual del río. El curso antiguo está lleno de grava hasta el nivel del río o tal vez hasta más abajo. El curso nuevo es, sin duda, postglacial. El sitio de las pilas del puente se encuentra en el nuevo cauce del río, y parecía improbable que el río hubiera formado en éste un cauce profundo en tan corto tiempo, y por lo tanto, la profundidad de la roca no debería exceder a la profundidad de arrastre y azolve. Se predijo que la profundidad de la roca no excedería de 10 metros y una perforación posterior mostró una profundidad de 9.70 metros.

Las perforaciones preliminares para una presa construida recientemente indican una profundidad moderada para el lecho de roca. Sin embargo, cuando se limpió el lecho del río para hacer la cimentación, se descubrió una angosta hendidura longitudinal o canal en la roca que tenía 23 metros de profundidad y había quedado entre dos perforaciones separadas sólo 15 metros. Esta irregulari-

dad en el fondo del cauce por inesperada resultaba todavía más costosa. Por la experiencia obtenida en este sitio quedó claramente indicada la cautela que debe tenerse en la interpretación de resultados de las perforaciones, así como la ejecución de un mayor número de exploraciones para definir la sección del fondo rocalloso del cauce.

Si el espesor del relleno aluvial es moderado y la garganta es estrecha se podrá considerar una cortina de sección gravedad o de arco. Tal cortina tiene una base reducida y transmite una carga concentrada a la cimentación. La roca debe ser capaz de resistir esa carga. Se estima que las rocas que se consideran buenas para la construcción de edificios tienen ordinariamente una resistencia suficiente, ya que su resistencia compresiva excede a la de la mampostería o a la del concreto. Sin embargo, las juntas, los planos de estratificación y otras fracturas naturales de las rocas, reducen su resistencia que queda abajo de la mostrada en los ejemplares de prueba, y es usual emplear un amplio margen de seguridad debido a que el efecto de estos debilitamientos naturales no se puede estimar con precisión.

La presencia de arcilla en las grietas o la de capitas muy delgadas a lo largo de los planos de estratificación en las rocas que por otros conceptos son sanas y resistentes, es una fuente de peligro. Bajo la presión incrementada, debido al almacenamiento de agua en el vaso, el agua puede ser forzada dentro de esas vetitas de barro y convertirlas en planos de resbalamiento, en los cuales un movimiento puede tener lugar con pura fricción. Esta lubricación de los planos de sedimentación en las rocas estratificadas en lechos delgados, tales como algunas areniscas y calizas, pueden permitir que la presa se deslice hacia río abajo y que se produzca su ruptura. En tales sitios, la roca con vetillas de arcilla se deberá quitar, o deberá evitarse la filtración a través de la cimentación con inyecciones a presión, o se empleará un tipo de presa de base ancha.

Areniscos pobremente cementadas, calizas porosas, tobas, ciertas brechas, aglomerados y rocas similares pueden ser compactas, pero su resistencia es deficiente. En un aglomerado en el sitio de cortina de la propuesta presa de Iron Canyon (23) en California, una prueba aislada de carga hecha en el terreno indicó que la roca aguantaría una carga de 40 kg./cm², sin mostrar señales de rompimiento, pero un Consejo de Ingenieros decidió que la presa transmitiera al terreno sólo la mitad de esa carga. Así introdujeron un factor de segu-

ridad aparentemente muy grande, para prevenir la incertidumbre proveniente de haber hecho una sola prueba con sólo una porción de la roca, y por otras dos incertidumbres, a saber, el hecho de que la prueba fué ejecutada en roca seca, es tanto que la cimentación de la presa estaría mojada, y a que la prueba duró sólo un tiempo corto, mientras que se espera que la presa servirá por muchos años, durante los cuales podrán tener lugar asentamientos lentos. Siguiendo un razonamiento similar, los ingenieros que ejecutaron las notables pruebas de campo de la arenisca escasamente cementadas, de Dakota, en el sitio elegido para el nuevo capitolio del Estado en Lincoln, Nebr. (24) hicieron ver que la roca aguantaría más de 60 kg./cm², pero decidieron que la máxima carga admisible era 15 kg./cm². El arquitecto que proyectó la cimentación de la torre mayor de este edificio, redujo la carga a 12 kg/cm²

Con relación a las investigaciones de las condiciones de cimentación de un alto edificio en Columbus, Ohio (25) se compararon las pruebas de arcilla hechas en el lugar con las de laboratorio. Las pruebas hechas en cubos mostraron una resistencia compresiva en promedio, de sólo el 31% de la del material *in situ*. La resistencia de la arcilla suave se incrementa mucho cuando se le conserva seca, como lo demuestra el drenaje de cimentaciones que, con todo éxito, se logró en Cleveland (26).

La Rue (27), y en Bryan (28) dieron datos cualitativos para determinar la capacidad de cimentaciones naturales para soportar la carga de una cortina alta de mampostería en un sitio en que se requerían datos cuantitativos. Un examen de los reportes antes mencionados y la consideración de la siguiente tabla, dará al geólogo una buena idea de la resistencia de compresión de las más suaves rocas y materiales no consolidados.

CAPACIDAD DE CARGA SEGURA PARA ROCAS Y SUELOS

CLASE DE MATERIAL	Kg. por cm ² .	
	Carga Mínima	Carga Máxima
Roca, la más dura, en capas gruesas e <i>in situ</i>	200	—
Roca igual a la mejor mampostería de roca.	25	30
Roca igual a la mejor mampostería de ladrillo.	15	20
Roca igual a la mejor mampostería de ladrillo pobre.	5	10
Arcilla en lechos gruesos, siempre seca.	6	8
Arcilla en lechos gruesos, moderadamente seca.	4	6
Arcilla suave.	1	2
Grava y arena gruesa, bien cementada.	8	10
Arena, seca, compacta y bien cementada.	4	6
Arena limpia, seca.	2	4
Arena, movediza, suelos aluviales, etc.	0.5	1

Sin embargo, estos datos sólo conducen a resultados empíricos. Los principios del asentamiento de arena y arcilla bajo una carga, han sido hábilmente discutidos por Terzaghi (29), cuyos trabajos debieran ser estudiados por todos los geólogos que tratan con tales problemas.

En sitios donde ocurren rocas de diferentes capacidades de carga, pueden presentarse asentamientos diferenciales. Si, por ejemplo, los empotramientos laterales están en roca dura y la presa descansa principalmente en el aluvión del valle (que se va a excavar), debe preverse un mayor asentamiento del centro de la presa que de sus extremos. De manera semejante, un valle cortado en rocas dispuestas en lechos horizontales puede tener laderas

de roca dura, tales como arenisca o caliza, y una pizarra en el fondo del valle. Son numerosas las condiciones geológicas que presentan tales desigualdades, pero son casi igualmente numerosos los medios con los que se procura dar flexibilidad a la membrana impermeable y a la estructura que la soporta y estos medios pueden ser planeados muy económicamente cuando las condiciones geológicas han sido definidas exacta y precisamente.

En la construcción de una presa recientemente concluida, una mala interpretación de las condiciones geológicas durante los reconocimientos preliminares creó problemas y gastos adicionales. (30) Lo que parecía ser una arenisca de grano grueso y casi un conglomerado, resultó ser una arenisca sua-

ve con capas de pizarra suave. La carga se redujo de 15 kg./cm² a 6 kg./cm². Se construyó un dentellón de 3 metros de profundidad y se hicieron muchas inyecciones para evitar las filtraciones a través de la roca debajo de la cortina.

Además de la resistencia de carga de la roca de las cimentaciones, debe considerarse el número y clase de fracturas y poros de la roca. Si hay una libre comunicación desde el almacenamiento a través de estas aberturas, se presentará una subpresión (31) en la base de la cortina, proporcional a la altura del agua en el almacenamiento. Esta presión debe tenerse presente al diseñar la presa. Deben esperarse también filtraciones, aunque la cantidad de agua perdida pueda ser tan pequeña que sea despreciable. Sin embargo, si la roca es soluble o contiene partes solubles, o si el material fino, tal como arena, es arrastrado y extraído de la roca por la corriente de agua, las filtraciones pueden aumentar, causando así una pérdida de agua y un debilitamiento en la cimentación.

Por esta razón, la porción impermeable de una cortina se lleva hasta la "roca sana", y se emplea el inyectado a presión para eliminar las filtraciones. Las cuestiones involucradas en la determinación de lo que es "roca sana", se discuten en el siguiente capítulo. El inyectado a presión es un proceso por medio del cual un material, como una mezcla delgada de cemento portland, se forza a través de perforaciones con taladro, en la roca para llenar las cavidades e impedir el paso del agua. Este proceso es relativamente barato y es notablemente eficaz bajo condiciones adecuadas. La mezcla, como se aplica ordinariamente, penetra y llena todas las grietas y fisuras entre las perforaciones, pero no penetra en los poros de la roca. Sin embargo, el sistema de inyectado Francois, recientemente inventado por un belga, hace uso de un tratamiento preliminar con sustancias químicas, generalmente silicato de sodio y sulfato de alumina, que facilita el movimiento de la mezcla inyectada posteriormente. Por el uso de este proceso (32) se han inyectado con éxito grietas y juntas llenas de arena suelta en areniscas y se han cementado lechos de grava, de tal manera que quedaron interceptadas las filtraciones de agua y que ha sido posible hacer las excavaciones con pico y pala. Así, previo inyectado, pudo abrirse con facilidad un tiro en material suelto y saturado con agua, consiguiéndose que el 80% del agua que antes penetraba en la excavación ya no se filtrara (33).

Hasta ahora, esta modificación del proceso de inyectar la lechada de cemento no se ha popula-

rizado en los Estados Unidos, aunque se han hecho con algún éxito experimentos de cementación de grava (34). La dificultad de probar que el inyectado ha tenido éxito y la posibilidad de que queden algunas áreas sin inyectar, han ejercido bastante influencia, hasta ahora, para que no se tenga demasiada fe en el inyectado tanto para reforzar la cimentación como para proveer dentellones adecuados. En la forma acostumbrada generalmente, el inyectado es muy efectivo en fisuras limpias. Así en la presa Hales Bar (35) en Tennessee, donde la cimentación es de caliza en la cual hay muchas cavernas, la mayor parte de ellas llenas de barro, las que estaban libres de barro se obturaron con éxito empleando unos 4 y medio millones de kilogramos de cemento Portland. En otras cavidades y cavernas en donde por el relleno de barro la lechada no pudo entrar, el barro se fué deslavando gradualmente y entonces sobrevinieron serias filtraciones a través de la cimentación debajo de la cortina, pero un inyectado reciente con asfalto caliente parece haber reducido efectivamente las filtraciones (36).

En conexión con la presa Estacada, en Oregón (37), se han discutido las dificultades de inyectar efectivamente a ciertas brechas volcánicas y si conviene formar el dentellón por medio de inyecciones. Con mucho mayor éxito se llevó a cabo un inyectado en la roca metamórfica con fracturas limpias, subyacente a la presa Lahontan, en Nevada (38), y en la arenisca y pizarra debajo de la cortina de Olive Bridge, en Nueva York (39). En estas dos presas el inyectado fué completamente adicional a los dentellones, que de por sí solos ya podían haber evitado filtraciones peligrosas bajo la cortina aun sin la precaución adicional de inyectar. El geólogo debe, por lo tanto, hacer tales observaciones que le permitan establecer el número y espaciamiento de las grietas, los planos de estratificación, y la probabilidad de la existencia de cavidades y cavernas. Debe también estar en capacidad de indicar si esas aberturas han sido cerradas con materias minerales depositadas por procesos naturales, o han sido llenadas con arena y arcilla, o si están tan limpias y abiertas que puedan inyectarse con éxito. Debe llevarse en la mente la probabilidad que la caliza sea cavernosa, pero por otro lado debe recordarse que se han construido aun en esta roca, con pocas dificultades, cortinas muy grandes (40) de estabilidad e impermeabilidad indiscutibles. Una en la parte sur de España en caliza Jurásica es de 83.20 m. de altura y 61

m. de longitud, y otra, construida para la planta eléctrica Baker, en Wáshington, es de 80.20 m. de altura y 147.20 m. de largo y descansa en caliza que bajo el nivel del río estaba cacariza por la presencia de "marmitas de los gigantes" y rugosa por la presencia de crestas y espinazos. La cimentación de la presa Keokuk a través del Mississippi, es caliza, que estaba tan dura y sana que, salvo la zanja para un pequeño destellón, fué simplemente cepillada para que recibiera el concreto y no se emplearon inyecciones a presión. Sin embargo, muchos ingenieros sostienen que el inyectado a presión es tan barato que siempre debiera emplearse en el asiento de una cortina como un factor adicional de seguridad.

La historia de la vieja presa de Austin, sobre el río Colorado, en Texas, tal como la relató Taylor, (41) así como la nueva inspección de la vieja cortina y las dificultades en la construcción de la nueva como las reseñó Mead (42), debe hacernos precavidos al pretender cimentar una cortina grande en caliza de estratificación horizontal, especialmente si la roca está fracturada e intemperizada, a menos que se haya hecho una investigación completa y que se tomen todas las precauciones. En esta presa de Austin se filtraban, después de la terminación de la antigua cortina por lo menos unos 2,450 litros por segundo a través de las zonas detrás de los empotramientos de la cortina, y a través de los estratos permeables y fisuras en las paredes del cañón a cierta distancia de la obra. Parte de esta filtración se efectuó a través de fisuras llenas de arcilla debajo de la cimentación, y produjo con la socavación del pie de la cortina originada por las aguas de las crecientes que lo rebasaban, un peligro inminente de deslizamiento del muro hacia adelante. Un estudio completo de las dificultades encontradas en este sitio y los fracasos habidos por la adopción de medidas inadecuadas para subsanar esas dificultades, proporcionan la manera de formarse un juicio competente de los peligros en sitios similares, con estratos poco inclinados de calizas, o menos fracturadas e intemperizadas.

En muchos sitios de presa, la profundidad de la roca en el cauce del río es tan grande que es

Nota.—La presa española que menciona K. Bryan sólo puede ser la de Montejaque que mide 83 m. de altura y de unos 60 m. de longitud en la corona. El arco y la caliza jurásica en que está empotrada son impermeables pero el agua del vaso se pierde a través de cavernas. No obstante costosísimas inyecciones no ha sido posible obturar los conductos por los que se pierde toda el agua de la presa que nunca podrá llenarse. Waitz.

impracticable o muy costoso construir una cortina de mampostería cimentada en roca. En tales lugares se usan ordinariamente presas de tierra o de enrocamiento, pero también se han construido presas de arcos múltiples, (43) presas celulares de cubierta plana, o secciones de compuertas de esclusas en mampostería.

En presas construidas sobre rocas suaves y porosas, el requisito concerniente a filtraciones es que la percolación del agua debajo de la cortina está de tal manera restringida que la velocidad de la corriente sea incapaz de poner en movimiento arenas o arcillas, y arrastrar este material fino y extraerlo de debajo de los cimientos. Es obvio que, si el material fino es arrastrado fuera de la cimentación, la filtración aumentará, los conductos se agrandarán y finalmente tendrán lugar asentamientos. Como consecuencia de éstos se abrirán grietas en la cortina, y con la presión del agua almacenada que obra sobre ella, la estructura se derrumbará.

El escurrimiento bajo estas cortinas es una función de la altura de la presa y de la permeabilidad del material en que está cimentada. Teóricamente las ecuaciones representativas de esta función pueden resolverse por la recopilación de datos adecuados, y se recomienda al lector el interesante intento de dicha solución, hecho por Justin (44), cuyo libro contiene una amplia lista de presas de tierra que han tenido perfecto éxito, y otra de las roturas y de fallas parciales de tales estructuras.

En general, los materiales en que queda cimentada una cortina son de permeabilidad irregular y pueden variar desde grava hasta arcilla. Los dentellones y los tabla-estacados metálicos o ambos se usan, donde es posible, para retardar la corriente, pero a menos que estas estructuras alcancen la roca, sirven simplemente como obstáculos para aumentar la distancia que la corriente tiene que recorrer. De manera semejante, también se puede construir al pie mojado de la cortina, un delantal de arcilla o concreto que cubre el fondo del almacenamiento y que queda conectado con la parte impermeable de la cortina, aumentándose así el mínimo que tienen que recorrer las filtraciones. La relación del camino del escurrimiento (incluyendo el delantal, el dentellón y la parte impermeable de la presa) a la carga del agua almacenada se llama factor de filtración (45). Este factor varía de 5 a 20 en las cortinas que han tenido éxito. El factor más chico se usa para grava, en la cual hay menos peligro de acarreo del material o

el "entubamiento" (piping) debajo de la cortina, y el factor 20 se emplea para material fino descrito como arena movediza.

La naturaleza de los materiales del subsuelo del valle de un río generalmente se desconoce hasta que se pueden hacer exploraciones con perforadora. Disponiendo de muestras de corazones y de los informes de perforación el geólogo puede frecuentemente interpretar los datos y resolver algunos de los problemas de presas de tierra y de enrocamiento.

En cierto sitio de presa una angosta garganta en gneiss granítico, por otros motivos adecuada para una cortina, estaba relleno hasta una profundidad de 25.30 metros con depósitos de pantano que en la superficie formaba tembladeros cenagosos en dos fajas angostas, una a cada lado de la corriente. Por la interpretación de los resultados obtenidos en el primer cupo de perforaciones, se supuso la presencia de lechos de arcilla en el fondo, descansando sobre roca. Tales lechos de arcilla habrían ofrecido un buen material impermeable para encajar el tabla-estacado, tanto para un dentellón, como para asentar encima una ataguía. Las muestras de un segundo grupo de perforaciones fueron examinadas por un geólogo, que demostró que la supuesta arcilla era tierra diatomácea, impura, sin estabilidad. Este material y el cieno que lo cubría eran tan finamente granulados y poco consolidados teniendo además tan alto contenido de agua, que la excavación en este sitio hasta la roca, para cualquier tipo de presa, hubiera exigido taludes de 4 a 1 ó más suaves. La enorme excavación requerida al aplicar estos taludes se estimó como demasiado costosa para considerar factible la presa. El sitio fué abandonado, y se eligió otro cercano, aunque menos favorable topográficamente.

Si se puede demostrar que un lecho impermeable de arcilla, se extiende aguas arriba y aguas abajo por alguna distancia, la parte impermeable de la cortina se puede prolongar hasta este lecho, y el factor de filtración puede entonces considerarse como la relación de la longitud de dicho lecho a la altura del agua almacenada. Si los materiales aluviales se conocen suficientemente bien por las perforaciones de exploración, se pueden proyectar varios dispositivos de este tipo para obtener con el costo mínimo el factor de filtración deseado. Es obvio que es necesaria una asociación muy cercana entre el geólogo y el proyectista para tomar en cuenta todas las dificultades del sitio.

EMPOTRAMIENTO LATERAL DE LAS CORTINAS

Las laderas en que hay que empotrar la cortina, pueden ser de roca dura o suave. En las más duras rocas, las fracturas, grietas y planos de estratificación, pueden formar conductos por los que pueden tener lugar la filtración, pero si esas grietas están limpias, se pueden inyectar a presión y hacerse impermeables. Los basaltos deben considerarse con desconfianza debido a las muchas aberturas que pueden ocurrir en esa roca. Estas aberturas pueden permitir filtraciones pero no suelen agrandarse y la estabilidad del empotramiento no está amenazada por ellas. En cambio las calizas y las rocas aun más solubles como el yeso y la roca de cal, dan lugar a grandes cavidades que, a medida que las filtraciones progresan, aumentan en tamaño. Es obvio decir que, si los macizos en que queda empotrada la cortina son anchos, estos defectos son relativamente de poca importancia, en tanto que, si las laderas son angostas crestas, no mucho más anchas que la misma cortina, las grietas de las fracturas y otras hendeduras tienen mayor peso como factores desfavorables.

La roca de las laderas que ha estado expuesta a la intemperie está más o menos deteriorada y debe excavarse a una profundidad suficientemente para que la parte impermeable de la cortina, pueda descansar en "roca sana". El costo de esta excavación y el costo del material colocado en su lugar debe ser estimado por el ingeniero antes que la construcción empiece. De manera semejante, si la base de la cortina o los dentellones han de colocarse en la roca del fondo, debe estimarse la profundidad de la "roca sana". Desafortunadamente esta estimación está rodeada de dificultades. Nunca se han compilado datos comparativos a este respecto (46). El geólogo está en este caso en una situación desventajosa, debido a la elasticidad del término "roca sana", debido a los caprichos del intemperismo; pero está acostumbrado a observar la extensión y profundidad del intemperismo, y debe ser capaz de ayudar al ingeniero en la formación de un juicio correcto acerca de la profundidad a la que se puede suponer la roca sana. La zanja del dentellón de una presa americana, se llevó donde la cortina debía descansar en andesita, teniéndose la precaución de excavar 12.20 metros más allá de la línea de "roca sana", estimada según el examen de los corazones de las perforaciones. Por otro la-

do, la presa Sennar, (47) recientemente terminada, en Egipto, descansa en un gabbro que se encontró menos intemperizado de lo que se había supuesto, y se ahorró una parte considerable de la excavación que se había creído necesario.

Las laderas constituidas por rocas no consolidadas, presentan problemas serios, porque si se producen filtraciones, la presa puede ser amenazada. Un sitio ya propuesto para una presa, puede tener como apoyo de la cortina en un lado, una loma situada entre dos afluentes laterales, y esta loma puede ser tan angosta como la cortina misma. Rara vez el material de la loma será tan compacto o drenado por sí mismo, como una presa de tierra correctamente construida. Si, por ejemplo, está compuesta de capas alternadas de arena y arcilla, la arena permitirá el paso del agua que mojará la arcilla y la convertirá en lodo resbaloso, de manera que pueden sobrevenir desplazamientos y deslizamientos. En general, las laderas de empotramiento constituidas por materiales no consolidados, deben ser, por lo tanto, laderas de lomas anchas o de macizos comprendidos entre valles laterales.

Si el material de las laderas de apoyo es completamente uniforme, se puede determinar el gradiente normal de las aguas freáticas en un material semejante en la misma región. Este gradiente desde el nivel del embalse en el almacenamiento, debiera abatirse dentro de la masa de la loma de apoyo con buen margen de seguridad. Así en el estudio de empotramientos, entran en juego muchos de los principios de la hidrología de aguas subterráneas antes analizadas con respecto a los almacenamientos. Hay, sin embargo, esta diferencia, la ladera del empotramiento tiene un área pequeña que puede ser abierta con un delantal de material impermeable, o las partes de mucha filtración de la ladera, pueden ser aisladas del almacenamiento por medio de diques, o parte de su material, se puede emplear finalmente para construir la presa y reemplazarlo por una extensión de la estructura. Para obtener datos que puedan servir para escoger entre estas alternativas, se requieren las observaciones detalladas y profundas del geólogo.

La importancia de estos problemas puede apreciarse con el examen de la historia de una presa americana, bien conocida. Como se propuso inicialmente esta presa, una estructura de tierra con una pantalla de corazón de concreto, habrían de cerrar un valle glacial en el sitio donde el ventisquero había depositado su canchal final. En el

lado izquierdo, la cantidad de material de morena era poca y se pudo localizar el túnel de la toma y el vertedor en la andesita de este lado. En el lado derecho, el alero de la cortina habría de descansar en el canchal terminal. Cuando se inició la excavación para la pantalla de concreto en este lado, los depósitos glaciales de grano fino del canchal, se encontraron mojados y arcillosos. Este material comenzó a deslizarse hacia la excavación en tal grado, que hubo que abandonar el sitio. Se construyó posteriormente la presa, 300 metros aguas abajo, donde ambos lados eran de andesita. El costo del trabajo abandonado y del cambio de planos, fué muy elevado, y hay que admitir que existía la evidencia de que la excavación de este lugar, era impracticable, aun antes que los ingenieros hubieran excavado zanjas de prueba, en las que se obtuvo una confirmación no deseada. Bastante aguas arriba de esta presa proyectada, el lemerío de canchales mostraba una marcada topografía de derrumbes, segura evidencia de no muy remotos deslizamientos. La causa de éstos también era patente, porque el mayor número de los bloques de los depósitos glaciales, son de la andesita del tipo local que fácilmente se descompone, y cada canto está rodeado de una cubierta de arcilla que, cuando mojada, forma un lubricante ideal. El hecho de que los bloques están parcialmente convertidos en arcilla por el intemperismo se puede ver en los afloramientos naturales, y era evidente en los pozos de prueba. La única ventaja de aquel primer sitio sobre el segundo, era una cubicación ligeramente menor que, comparada con los costos causados por el cambio de uno a otro sitio, solamente pudo haber presentado un ahorro insignificante. Es difícil predecir en detalle el efecto que la presión del agua almacenada hubiera tenido en el material inestable de la morena, si a pesar de las dificultades, la presa hubiera sido construida como se inició, pero difícilmente podría haber sido otra cosa que desastroso.

Filtraciones a través de la zona detrás de los empotramientos, es descrita por Henny, (48) en su informe de las presas de Cold Spring, Oreg., y Conconully, Wásh. En las laderas de la presa Cold Springs aflora roca basáltica de buena calidad, pero esta roca no se extiende muy adentro de ambos lados. Es evidente la filtración a través de la roca y a través de la arena y arcilla detrás de la roca, pero no ha sido grande, ya que las lomas de ambos lados son anchas y el trayecto recorrido

por las aguas que se escapan, es muy tortuoso. Junto con la filtración a través de la roca debajo de la cortina, la cual está ligada a la roca del fondo por un dentellón de concreto, el movimiento total es considerable, aunque no serio. La corriente visible en el arroyo, aguas abajo de la presa, varía de 20 a 50 litros por segundo, de los cuales una cuarta parte puede atribuirse a pérdidas del canal de salida. En la presa Conconully, la cortina está empujada en el lado derecho o sea el del vertedor, en una cresta angosta de granito y caliza, no mucho más ancha que la misma cortina, y de cerca de 180 metros de longitud. Un pequeño manantial en el lado de aguas abajo de esta cresta tenía un gasto normal de 3.26 litros por segundo. Cuando el almacenamiento se llenó, el gasto de este manantial y de nuevos que aparecieron en otros lugares a lo largo de la cresta, aumentó gradualmente a 28.32 litros por segundo, y decreció a medida que el almacenamiento se vaciaba. El agua del manantial es clara, lo que demuestra que no arrastra material en su curso a través de la cresta y como la filtración no puede afectar la estabilidad de la loma, no es de mucha importancia. La pérdida de agua es tan pequeña que no se han tomado medidas para remediarla, no obstante que el área afectada por las filtraciones es suficientemente pequeña para que fuera fácil este remedio, bien por medio de un recubrimiento de la cresta o en su lado mojado o con inyecciones a presión en la zona fisurada.

La presa Zuñi en Blanck Rock, N. Mex. (49), es un enrocamiento con un recubrimiento de tierra como parte impermeable de la estructura. En el sitio de la cortina, descansa una corriente de basalto de 9 m. de espesor sobre 12 metros de arena y arcilla, que a su vez descansa sobre "arcilla azul" 6 metros abajo del cauce del río. La lava forma la cubierta de las mesetas planas a ambos lados del estrecho cañón. La máxima altura de la cortina es de unos 21.5 metros y la longitud de 220 metros. El recubrimiento de tierra está ligado a la "arcilla azul" por un dentellón de arcilla pisoneada. Un vertedor de 30.50 metros de ancho y 3 metros de profundidad había sido excavado en el basalto, en el lado sur (izquierdo), donde la loma tenía un ancho relativamente corto de 180 a 250 filtraciones en el extremo norte (derecho) de la presa, llegando a 470 litros por minuto, y a la mañana siguiente este escurrimiento había aumentado a 1,770 litros por minuto, pero fué detenido por un revestimiento del talud de aguas arriba, con tierra en sacos. Al siguiente día, septiembre 6, se

observó agua lodosa saliendo del extremo sur (izquierdo), de la cortina, y a pesar de los esfuerzos que se hicieron para detenerla, la corriente aumentó. El agua estaba pasando a través de grietas en el basalto y arrastrando la arena fina que queda debajo de esta roca. A medida que la corriente aumentaba de volumen, ocurrieron deslizamientos, y pronto el vertedor quedó minado y grandes porciones de la loma y parte de la cortina se deslizaron hacia aguas abajo y fueron arrastradas. La máxima cantidad de agua descargada a través de la loma y alrededor de la cortina fué de 140 m³. por segundo, pero a medida que el nivel del almacenamiento bajaba y las providencias para remediar el mal se hacían efectivas, el escurrimiento decreció. El 10 de septiembre el escurrimiento era moderado, y para el 20 de septiembre había cesado. La extensión del daño en la mesita y en la cortina, como aparecía el 20 de septiembre, se muestra en la lámina 1.

Es obvio decir que la corriente de agua a través de las grietas en el basalto, pudo tener lugar aun con bajos gradientes a una velocidad suficiente para arrastrar la arena, y aún si la mesa hubiera sido más ancha se habría visto amenazada por esta acción. Como la cortina no mostraba ninguna filtración y solamente sufrió daños en la parte que descansaba en la ladera, el fracaso sirve como un excelente ejemplo del hecho de que una loma angosta de roca en su estado natural puede ser mucho más débil que una cortina artificial del mismo tamaño o menor.

Beemer (49a) ha descrito sucintamente una presa donde las filtraciones previstas fueron reducidas a cantidades inofensivas.

VERTEDORES

Siempre debe preverse algún método por medio del cual el agua de las crecientes pueda pasar la presa. Aun cuando haya obras para extraer el agua almacenada para su uso, deben proveerse vías de agua adicionales. La capacidad necesaria de los vertedores, varía de acuerdo con el tamaño del almacenamiento y del régimen del río. Hay también varias formas de vertedores. El tipo de cortina llamada vertedora se construye de tal manera que el agua de la creciente pueda pasar sobre su cresta. Otras cortinas tienen algunas compuertas en el cuerpo de la estructura. El geólogo debe interesarse por el efecto de erosión al pie de la presa vertedora y por los vertedores construidos a un

lado de la cortina o más o menos lejos de ella. Los libros de texto de Ingeniería tratan casi totalmente los métodos de protección para el pie de una presa vertedora, y el geólogo podrá dar a este respecto, sólo ayuda vital. Sin embargo, en los sitios de vertedores el geólogo debe considerar la capacidad de la roca para resistir el desgaste originado por la caída de agua. Si el sitio del vertedor está ubicado en una de las laderas de la cortina o en algún lugar bajo de la orilla del vaso donde aflora arcilla, pizarra, arenisca suave o material similar que sea fácilmente erosionado, se debe construir generalmente un canal de concreto para llevar el agua a un dren natural. Por otro lado, puede haber tan poca agua en demasía, o la posibilidad de una creciente suficientemente grande para mandar agua a través del vertedor puede ser tan remota, o la pendiente del terreno ser tan suave, que la protección del vertedor puede costar más de lo que valen los beneficios que se obtengan. Puede ser más barato permitir que la erosión tenga lugar y reparar después el daño. Sin embargo, esta elección debe hacerse en el campo de ingeniería y no en el geológico, y el ingeniero basará su decisión en principios bien entendidos.

Surge un problema serio si el único sitio satisfactorio para el vertedor es una loma o cresta de poca anchura y si la pendiente de esta loma hacia el dren natural es fuerte. Aquí la acción erosiva puede debilitar la loma y poner en peligro la estructura. Las rocas ígneas compactas resisten bien la acción erosiva del agua clara, pero muchas rocas fracturadas o más o menos consolidadas sufren seriamente. Las areniscas compactas de la presa Roosevelt han sido tan erosionadas por el agua que cae casi verticalmente de las bocas de los túneles vertedores, que el costo de las reparaciones de los daños, y el de los intentos hechos para prevenir erosiones futuras ya han alcanzado una suma fuerte. Una sola creciente arrastró 7650 m³ de roca del vertedor de la presa Sweetwater, en California (50), requiriendo la construcción de un delantal de concreto. En los sitios donde se proyecta una presa, el informe geológico debe incluir una descripción de las rocas en los vertedores propuestos y una estimación, aunque tosca de su resistencia a la erosión, en cuyo informe el ingeniero, teniendo presente todos los otros factores del problema, puede basar un juicio respecto a la necesidad de revestir los canales de los vertedores.

En la presa Sherbourne Lakes, en Montana, fué destruído un vertedor de concreto construído sobre uno de los lados, por deslizamiento lento del suelo (creeping), y derrumbes en la colina de pizarras arriba del vertedor. Aquí el daño fué causado por un corte demasiado profundo en una ladera inestable de la colina. No se encontró aquí un remedio adecuado inmediato, por lo que se ha limitado a reemplazar el concreto por un canal provisional de madera para que sirva de vertedor hasta que el movimiento haya cesado.

TUNELES EN SITIOS DE PRESAS

Los túneles construídos en conexión con las presas pueden dividirse por su finalidad en tres clases: 1º, túneles para la desviación de la corriente durante la construcción de la presa; 2º, túneles para la toma o extracción de agua para su uso; 3º, vertedores. Por lo que a su construcción respecta, estos túneles son como los túneles de cualquier otra clase. Sólo rara vez será la loma que hay que atravesar con el túnel tan angosta o débil que la construcción de un túnel pudiera dañarla seriamente. Sin embargo, la localización de estos túneles está sujeta a muchos dispositivos ingeniosos por medio de los cuales un túnel puede servir para más de un objeto. Por lo tanto, si un lado del sitio tiene roca más favorable que el otro para perforar el túnel, o si por la geología está indicada la construcción a un nivel con preferencia a otro, se tendrá que considerar un factor adicional entre las alternativas. Por lo tanto, el geólogo, en estrecha asociación con el ingeniero, deberá considerar todas las localizaciones posibles de los túneles y describir las rocas con respecto a las operaciones de su perforación.

TUNELES EN GENERAL

La geología de túneles incluye problemas más familiares para el geólogo que cualquier otra clase de geología para ingeniería, ya que su principal deber es predecir por los afloramientos superficiales la posición de las rocas al nivel del túnel—esto es—, debe construir un corte geológico. El trabajo debe ser de la precisión que las operaciones mineras requieren. Sin embargo, en los sitios de los túneles rara vez se dispone de las mismas facilidades que en la minería, porque generalmente no haya excavaciones extensas cercanas por medio de las cuales se puedan obtener datos

geológicos. Si la cubierta arriba del nivel del túnel no es demasiado grande, se deben hacer exploraciones con perforadora, y ya por sólo unas cuantas perforaciones hábilmente localizadas será posible hacer predicciones bastante precisas.

La perforación de túneles es, sin embargo, un arte altamente complejo. El uso de métodos adecuados y una cuidadosa organización tienen una mayor influencia en el costo que las dificultades que se encuentran. Por ejemplo, los túneles de gran diámetro abiertos en tierra, que requieren madera para su ademe, cuestan tanto como los túneles del mismo diámetro excavados en roca dura que deben barrenarse y excavar usando dinamita, pero el tipo de trabajadores empleados y la organización del trabajo son totalmente diferentes, de lo que resulta que si inesperadamente se encuentra roca dura en un túnel en tierra, el costo aumenta mucho. En túneles de gran diámetro, por lo tanto, la naturaleza de los materiales no interviene en las estimaciones de costos tanto como en los planes de ataque. Es más barato excavar túneles de diámetro chico en tierra, aun cuando se requiera madera, que abrir túneles en roca; la resistencia de la roca a la excavación también afecta al costo. La facilidad de barrenación, la posición de las fracturas, el efecto de los explosivos y el tamaño de la roca tumbada también afectan materialmente el costo.

En túneles de todos tamaños las características de la roca que producen desastres son de vital importancia, y si pueden controlarse, el costo final se reduce así como vidas humanas. "Terreno bufado" es un nombre que se aplica a la expansión de la roca de las paredes de un túnel. Esa expansión tiene lugar debido a la falta de contrapresión producida por la excavación misma, y esta puede ser la causa única. Pero también la absorción de humedad del aire y también otras condiciones más, tienden a debilitar la roca recién expuesta del túnel y la hacen aumentar de volumen. Es más frecuente que esta acción ocurra en pizarras y productos arcillosos provenientes de la descomposición de rocas ígneas. Cuando tal material se encuentra, la madera del ademe se aplasta y se rompe, la forma y el alineamiento del túnel se pierden y surgen otras dificultades. Todavía no se conocen bien las causas del abultamiento del terreno, pero el geólogo debe hacer notar que la presencia de la bentonita o de cualquier mineral característico de la bentonita (51) es señal de alarma, y si estas substancias ocurren en cantidad se puede anticipar el "bufamiento" del terreno.

Los terrenos mojados, o la irrupción repentina de agua causan fuerte gasto, o son peligrosos, o ambas cosas, y el perforar un túnel bajo el nivel del agua freática en arena no consolidada, grava o arcilla, requiere ordinariamente aparatos complicados y el uso de aire comprimido para dominar el agua. Si se encuentra de improviso tal terreno, como cuando el curso enterrado de un antiguo río cruza la línea del túnel, sobreviene un desastre. Conductos abiertos de grietas de las rocas ígneas o las obras y cavernas de las calizas producen invasiones similares. Largos túneles abiertos bajo una gruesa cubierta pueden encontrar manantiales calientes o irrupción repentina de agua, provenientes de lagunas o ríos situados en su alto (52). En algunas rocas pueden presentarse gases explosivos o nocivos.

Las temperaturas de la tierra en túneles con una cubierta gruesa pueden ser altas y aumentar dificultades del trabajo. En algunas localidades, como era el caso en el proyecto Owyhee, Oregón, se dispone de las observaciones de la variación local del gradiente geotérmico y puede predecirse con gran aproximación. En otras localidades el geólogo debe, después de una revisión de todos los datos disponibles, estimar la probable temperatura de la tierra, o si se hacen perforaciones, puede hacer observaciones directas.

Afortunadamente ha sido publicada una descripción detallada del trabajo geológico de Berkeley (53), que fué confrontado con los resultados mostrados por la construcción, y constituye un manual muy completo para el trabajo geológico en túneles. Se pueden obtener también muchos datos pertinentes en los libros de texto de De Launay (54), y Ríes y Watson (55) que han hecho una buena introducción al tema.

LABOR DEL GEOLOGO

La posición del geólogo con relación a su trabajo y personalidad, son quizá los principales factores en su actuación profesional dentro de la geología aplicada a la ingeniería, en mayor escala que en otra clase de trabajos geológicos. Debe inspirar confianza en sus conclusiones no obstante que está sujeto a una rígida verificación, en la cual los errores que haya hecho se descubren desagradablemente.

En muchos trabajos geológicos el peligro de cometer errores se ha considerado muy a la ligera. Sólo la reputación y propia apreciación del geó-

logo están en peligro, él siente que, si la mayor parte de su trabajo está correcto, los investigadores futuros al descubrir por medio de las obras la verdad completa, serán benignos con sus pequeños errores. Pero el trabajo geológico hecho para proyectos de ingeniería, frecuentemente se relaciona con el gasto de grandes sumas de dinero, y el geólogo debe sentir esta responsabilidad así como el sentido de la obligación con el ingeniero cuya reputación está también en peligro. Debe ser escrupulosamente franco en mostrar al ingeniero la naturaleza de la evidencia y las bases por las cuales ha llegado a una conclusión. La ciencia de la geología hasta ahora sólo está parcialmente desarrollada, y sólo en unas cuantas áreas se han investigado la estructura y la historia geológica generales, elaboradas con la perfección a que en la actualidad se puede llegar. Así, el geólogo, tiene sólo un instrumento imperfecto para trabajar y puede encontrar que precisamente en el lugar particular elegido para una estructura de ingeniería es imposible obtener una evidencia adecuada. Debe por lo tanto ayudar al ingeniero a formarse un juicio respecto al valor o grado de seguridad de las conclusiones indicadas por la investigación geológica. Por ejemplo, en cierta investigación, se propuso llevar un canal a través de un Valle creando en él un lago, en el cual descargara el canal por un extremo y saliera por el otro. Un cruce en sifón era también posible, pero requería cerca de 3,200 metros más de canal. El costo de las dos alternativas era aproximadamente el mismo, pero el lago suministraría un vaso de regularización que sería una ventaja para la operación. Las laderas de apoyo de la cortina propuesta eran angostas crestas interfluviales entre arroyos tributarios; pero las deducciones geológicas, ya que había muy pocos afloramientos, se suponían que consistían en unos 10 metros de arena descansando sobre arcilla, y eran por lo tanto propensas a permitir filtraciones. Localizando la presa unos 800 metros aguas arriba, se podía apoyar la cortina en lomas más anchas en un material que parecía ser similar, pero se requería una mayor cubicación en la cortina y 800 metros adicionales de canal. Aunque las deducciones geológicas descansaban en una base inadecuada, el ingeniero decidió probar este nuevo sitio con perforaciones, que confirmaron la predicción por lo que respecta a la composición de las laderas del estrechamiento.

Los nuevos datos indicaron que con precauciones adecuadas se podría construir una cortina

segura en la boquilla más abierta y el ingeniero abandonó el estrecho original y se decidió a aceptar el nuevo sitio con su ligero costo adicional.

Como se pueden necesitar todas las ramas de la ciencia geológica, el geólogo debe estar ampliamente entrenado. Es claro que el estar familiarizado con la geología local o con geología del mismo tipo es ventajoso, pero dándole tiempo, un geólogo bien entrenado puede dominar estos detalles, y es probablemente de mayor importancia el que tenga algún conocimiento de los problemas y métodos de ingeniería. Pero por encima de todo, no debe dejarse distraer con problemas geológicos por interesantes que sean, si no están ligados por el asunto que tiene delante de sí.

Todo lo que debe esperar es un éxito razonable en la predicción. En la figura 3 se ilustra lo que puede estimarse como una predicción poco usual. En el mapa del sitio (Fig. 2) se muestran los afloramientos de basalto, siendo los únicos materiales visibles fuera de esta roca, las arenas y gravas de las vegas y terrazas. En la sección transversal A, figura 3, a lo largo de la línea central de la cortina propuesta, está la predicción basada en un estudio general de la geología, ya que las perforaciones 1, 2 y 3 hechas entonces no se pudieron interpretar. En B, figura 3, se ve la sección transversal como se construyó después de 13 perforaciones de prueba. Las tres primeras perforaciones se pudieron interpretar entonces, y la sección transversal conjeturada se confirmó excepto para la profundidad del canal del río y el espesor de arena en la terraza en el lado derecho.

RELACIONES ENTRE EL GEOLOGO Y EL INGENIERO

Las relaciones entre el geólogo y el ingeniero deben estar inspiradas por la confianza mutua. Si el ingeniero estima al geólogo como un teorizante, y el geólogo siente que el ingeniero es simplemente un individuo cuyo criterio no le permite pensar en otra cosa sino en números, se obtendrá muy poco provecho de esta asociación. Pero con mutuas consideraciones, por la unión de dos puntos de vista divergentes, llegarán a una mayor aproximación a la verdad en el asunto, con la misma cantidad de trabajo independiente. En general, el geólogo lleva a una investigación o a un proyecto en construcción el carácter de consultor. No debe ser estorbado en su trabajo, pero es responsable ante el ingeniero encargado de la obra y sus actividades deben estar ajustadas de tal manera que pueda suministrar informaciones en

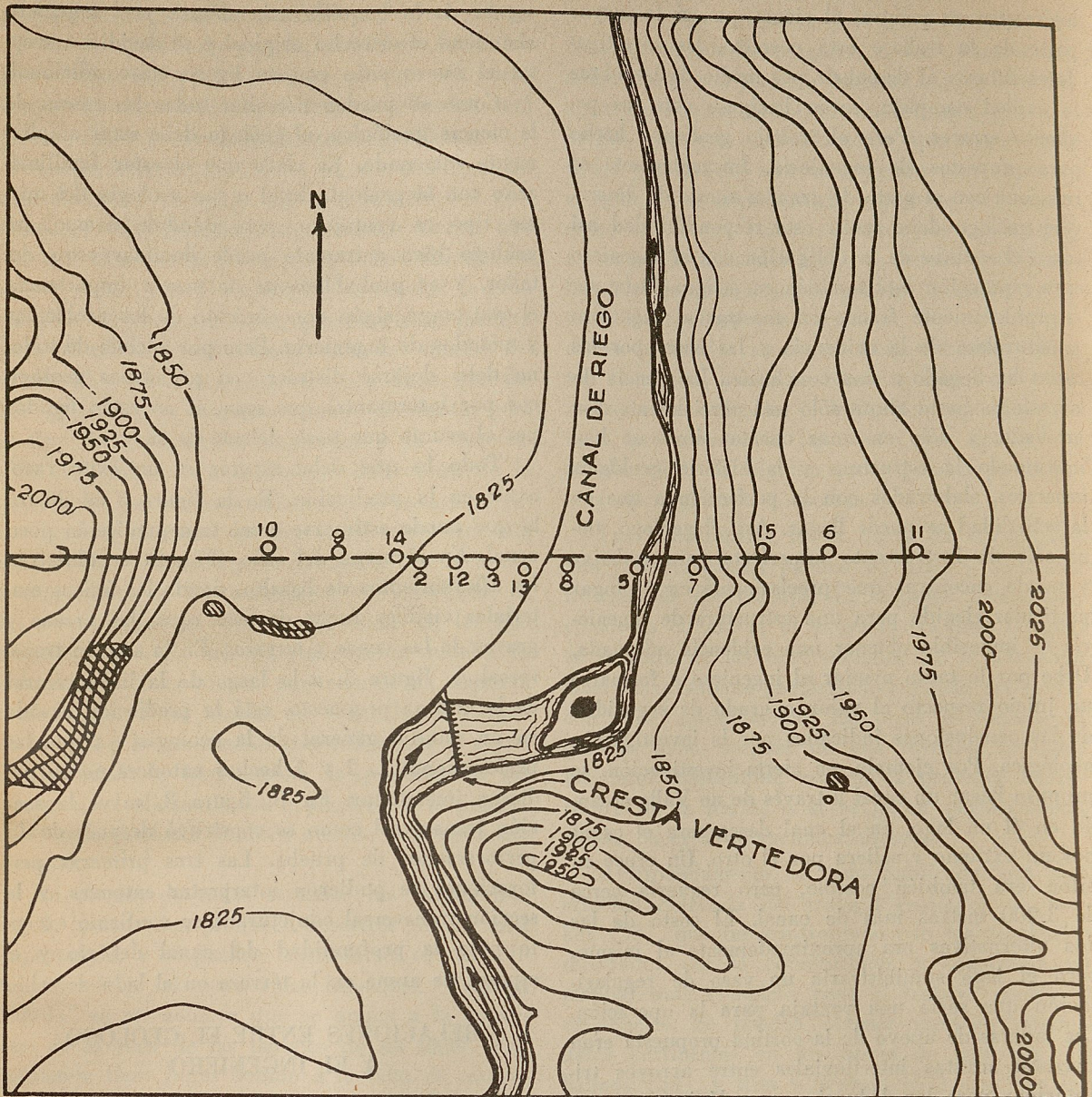


FIGURA 2. - Mapa que muestra la geología del sitio de la presa Latah Creek del proyecto de riego Columbia Basin, Washington, tal como se interpretó con las afloraciones y pozos de exploración. El sombreado diagonal indica afloraciones de basalto; el resto del área está ocupado por arena y grava. Los círculos numerados indican perforaciones; la línea cortada, es el centro de la cortina propuesta. Véase también la figura 3.

el momento en que los trabajos de ingeniería las requieran, y no tiene que estar necesariamente de acuerdo con un programa que resolverían de manera más lógica, los problemas de la geología local.

En el ingeniero recae la responsabilidad del diseño de estructuras y habitualmente también la

del costo de las investigaciones. A menos que confíe al geólogo, sus ideas y decisiones preliminares tal como están formadas, el trabajo geológico puede ser dirigido por campos improductivos.

En cierto proyecto de importancia se proponía la construcción de una presa con muchas compuertas a través de un estrecho, y la primera idea

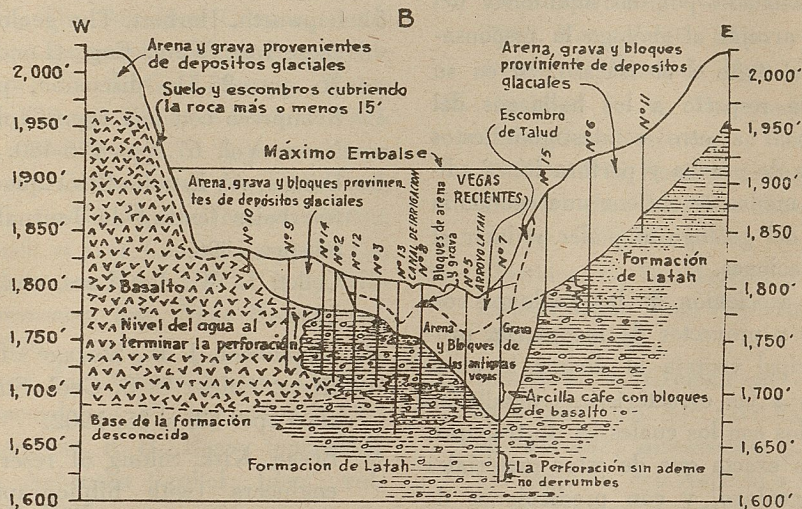
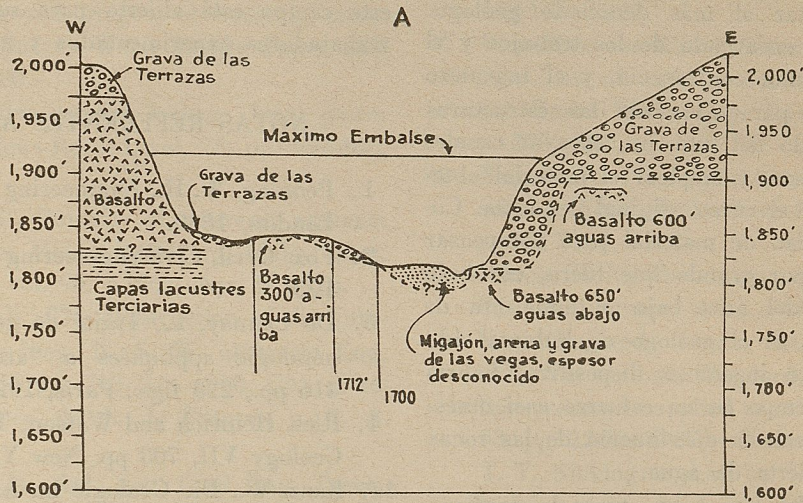


FIGURA 3.- Corte geológico del sitio de la cortina en el Arroyo Latah, del proyecto de irrigación de la cuenca de Columbia, Washington. A, muestra las relaciones conocidas y las inferidas; B, los resultados basados en el examen completo y en las pruebas de los pozos perforados.

propuesta fué que esta cortina consistiera de una serie de cajones de concreto. El cuerpo de agua era como de 1,830 metros de ancho y en algunos lugares de 38 metros de profundidad y su fondo era suave. La predicción de las condiciones geológicas bajo este extenso cuerpo de agua era una tarea para espantar al más denodado geólogo. Pero el ingeniero encargado de los trabajos y el geólogo tuvieron una conferencia, y el ingeniero propuso un plan para construir las estructuras en tierra a un lado del estrecho, excavar canales profundos hacia éste, y emplear el material obtenido para obtener el curso original del agua. Como había un exceso de material para compensar el asentamiento, por grande que fuera, es obvio que la geología del área bajo el agua era de poca importancia. Si el geólogo no hubiera sido informado de este ingenioso dispositivo, habría gastado mucho tiempo en un esfuerzo casi desperdiciado para predecir la distribución de las rocas en esta área cubierta de agua.

El geólogo debe, por tanto, tener la confianza del ingeniero, pero no se deduce de esto que el ingeniero esté maniatado por las opiniones del geólogo, ni puede arrojar al geólogo la responsabilidad final por el éxito o el fracaso. Si en su concepto hay duda respecto a los hallazgos del geólogo, debe llamar a otro o atestiguar estos hallazgos por pozos de prueba y perforaciones adicionales. De todos modos se obtiene una economía real en el empleo del geólogo al poder reducir el número de exploraciones.

En general, la asociación de los geólogos con las investigaciones y proyectos de ingeniería, proporciona su principal ventaja al dirigir la atención del ingeniero a las características detalladas de las rocas y suelos con los cuales ha de trabajar. Con la descripción exacta que de estos materiales le suministra el geólogo, y con predicciones de exactitud razonable de su forma y extensión subterránea, el ingeniero está en posibilidad de aplicar su ingenio para sortear las dificultades de construcción. Al geólogo le corresponde la satisfacción de poder poner su esfuerzo en obras magnas que beneficiarán a las comunidades afectadas, aunque probablemente tenga que hacer mayor número de reportes para muchos ante-proyectos que nunca serán construidos, que para aquellos proyectos factibles que en vida verá desarrollarse. Sin embargo, su mejor recompensa la lleva en la rigurosa comprobación de sus observaciones por medio de las perforaciones y excavaciones. Muchos de sus resultados pueden tener sólo valor

local, pero otros serán de utilidad general y se incorporarán al conjunto de los conocimientos geológicos. Los principios de aplicación de la geología a los problemas de ingeniería civil se han desarrollado incompletamente hasta la fecha, como se ha indicado en este pequeño trabajo, y este campo está abierto para su cultivo por los trabajadores experimentados y ambiciosos.

NOTAS REFERENTES AL TEXTO

1. Penning, W. H., Engineering geology, 164 pp., London, 1880.
2. Fox, Cyril, Civil engineering geology, London, 1923.
3. De Launay, L., Traité de géologie et de minéralogie appliquées a "art de l'ingénieur", 416 pp., 228 figs., Paris, 1922.
4. Ries, Heinrich and Watson, T. L. Engineering Geology VII, 708 pp. New York, 1925.
- 4a. Ranz, W., Die Geologie im Ingenieur-Baufach, 425 pp. 7 lámines, 53 figs. Stuttgart, 1927.
- 4b. Legget Robert. Geology an Engineering, 1939.
5. Lapworth, Herbert, The geology of dam trenches: Inst. Water Eng. (London) Trans., vol. 16, pp. 25-51; discusión, pp. 51-66, 1911. Reimpreso con una figura solamente, en Eng. News, Vol. 67, pp. 476-480, 1912.
6. Dumas, A., Estudio théorique sur les barrages-réservoirs (extrait du Journal de génie civil), 164 pp., 1896.
7. Collet, L. W., Les Lacs, etc., 320 pp., Paris, 1925.
8. Lippincott, J. B., Storage of water on Kings River, Calif.: U. S. Geol. Survey Water Supply Paper 58, p. 25, 1902.
9. Bryan, Kirk, Silting of reservoirs, studies by engineers (with bibliography): Nat. Res. Council Researches in Sedimentation in 1925-1926, en mimeógrafo, pp. 88-94, 1926.
10. Collet, L. W., Les lacs, pp. 198-274, Paris, 1925.
11. Purdue, A. H., Geology and engineering: Resources of Tennessee, Vol. 3. pp. 105-109, 1913.
12. Strangs, W. L., Reservoirs with high earthen dams in western India: Inst. Civil Eng. London Proc., vol. 132, p. 137, 1898.
13. Hill, G. M., discussion of Strange's paper: I dem. p. 208.
15. Atwood, W. W., Relations of landslides and glacial deposits to reservoir sites in the San Juan Mountains, Colo.

16. Parshall, R. I., Return of seepage water to the lower South Platte River in Colorado: Colorado, Agr. Coll. Exper. Sta. Bull, 279, pp. 58-64, 1922.
17. Mainzer, O. E., y otros, Geology of Núm. 3 reservoir site of the Carlsbad irrigation project, New México, with respect to water-tightness: U. S. Geol. Survey Water-Supply Paper 580, pp. 1-39. 1926.
18. Stopping under ground leakage from power dam: Eng. News-Record, vol. 76, pp. 459-460, 1916.
19. Stearns, H. T., Porosity of reservoir prevents water storage, Malad Reservoir, Idaho: Eng. News-Record, vol. 96. p. 561. Apr. 8, 1926.
20. Wade, L. A. B., The construction of the Cataract Dam. Sydney, N. S. W. abstract: Eng. News. Vol. 63 pp. 713-716, 1910. Cita el reporte geológico de E. J. Pittman y A. A. Atkinson.
21. Dillman, G. L., Am. Soc. Civil Eng. Trans., vol. 75, p. 52, 1912. Para tipos de cortinas, véase los numerosos libros de texto.
22. Misser, H. D., The San Juan Canyon, south-easterns Utah, a geographye and hydrographic reconnaissance: U. S. Geol. Survey Water-Supply Paper 538, pp. 58-71, 22 láminas, 1924.
23. Gault, H. J., y McClure, W. F. Report on Iron Canyon Proyect, California. p. 66, U. S. Real. Service, 1921. Cault, H. J., Test of bearing capacity of rock at Iron Canyon dam site, California: Reclamation Record, vol. 11, pp. 378-379, 1920; resumen. Eng. News Record, vol. 85 p. 417, 1920.
24. Foundation test for Nebraska State Capitol: Eng. News-Record, vol. 89, pp. 606-609, Oct. 12, 1922, Chambers, R. H., Heavy foundation on Sandrock, Nebraska Capitol; Idem., vol. 94, pp. 107-108, 1925.
25. Waring, R. L., and Morris, C. T., Bearing-power test on deep caisson foundations: Eng. News-Record, vol. 96, pp. 109-112, 1926.
26. Betz, F. H. Deep Drainage of foundation soil for heavy building: Eng. News-Record, vol. 80, p. 363, 1918.
27. La Rue, E. C., Water power and flood control of Colorado River Below Green River, Utah: U. S. Geol. Survey Water-Supply Paper 556, pp. 20-24, 1925.
28. Bryan, Kirk, Discussion on geologic setting of rock-fill dam at Lees Ferry, Ariz.: Am. Soc. Civil Eng. Trans., vol. 86, pp. 228-240, 1923.
29. Terzaghi, Charles. Principles of soil Mechanics; Eng. News-Record, vol. 95, 7 artículos, noviembre y diciembre, 1925.
30. McEwen, A. B., Combined railway bridge, and dam built at cutlet of Grand Lake, Newfoundland. Eng. News-Record, vol. 99, pp., 128-132, 1927.
31. Consúltese los libros de texto de presas, tambien Test of water pressures under Brule River Dam (Wis): Eng. News-Record vol. 96, p. 275, 1926.
32. Ball, H. S., The application of cementation to mining: South Wales Inst. Eng. Proc. vol. 36, pp. 517-565, 1921.
33. Mitton, H. E., The sinking of a colliery in the East Nottingham, shire coal field: Inst. Min. Eng. (England) Trans., vol. 70, pp. 345-367, 1926. Ver también Blandord, T., The cementation process as applied to minning: Idem., vol. 53, pp. 22-29, 1917, y Horsam, A., y Mawson, T. T., Sinking: a shaft by the Francois cementation process: Idem, vol. 58, pp. 16-28, 1920.
34. Cartwright, H. H., Test of grouting gravel in river beds: Eng. News, vol. 69, pp. 979-984, 1913. Ver también idem. pp. 969-970, y discusión de Estacada Dam citada en pág.
35. Switzer, J. A., The power development of Hales Bar: Resources of Tennessee, vol. 2, pp. 86-99, 1912. Rock grouting and caisson sinking for the Hales Bar Dam: Eng. News, vol. 70, pp. 949-956, 1913.
36. Chistians, G. W., Asphalt grouting under Hales Bar Dam: Eng. News-Record, vol. 96, pp. 798-802, 1926.
37. Rands, H. 4., Grouted cut —off for the Estacada Dam: Am. Soc. Civil Eng. Trans., vol. 78, pp. 447-482; discussions, p. 483, 546, 1915. Ver también, con respecto a inyecciones, Wait, B. H. Driving a wet aqueduct tunnel in hard rocks: Eng. News, vol. 63, pp. 660-662, 1911; Angan, W. M., Repairing leaks in a dry dock by grouting: Am. Civil Eng. Trans, pp. 579-596; discussion, pp. 597-598, 1925; y Dreyer, W, Volcanic Formations govern design in Pit River Núm. 3, hidroelectric development (Calif.): Eng. News-Record, vol. 96. pp. 144-149, 1926.
38. Cole O. V., Making a out off wall by groutig fissured rock, artículo Lahontan Dam: Eng. News, vol. 69, pp. 647-651, 1913. Ver también artículo editorial, idem., pp. 969-970 y carta de H. A. Rands, Idem., p. 1190.

39. Groutin the Olive Bridge Dam: Eng. Record, vol. 63. pp. 385-386. 1911.
40. Vegenstein, M. E., High arch tipe dam built in south Spain: Eng. News-Record, vol. 93, pp. 128-180, 1924. High overflow dam, main unit of Baker power plant (Wash.) Eng. News Record, vol. 96. pp. 360-362, 1926, Gowen, C. S., The foundations of the new Croton Dam: Am. Sec. Civil Eng. Trans., vol. 43 pp. 668-542, 100.
41. Taylor, T. U., The Austin Dam: U. S. Geol. Survey Water-Supply Paper, 40-52 pp. 16 láminas, 12 fig., 1900.
42. Mead, D. W., Report on the dam and water-power development at Austin, Tex., 205 pp. impresión privada, noviembre, 1917.
43. Parson, H. de B., Sharman Island dam and power house: Am. Soc. Civil Eng. Trans. vol. 88, pp. 1257-1292; discusion, pp. 1293-1328, 1925.
44. Justin J. D., The desing of earth dams: Am. Soc. Civil Eng. vol. 87, pp. 1-61; discusion, pp. 62-141, 1924.
45. Bligh, W. G., Dams, barrages, and weirs on porous foundations; Eng. News, vol. 64 pp. 708-710, 1910, Lessons from the faulure of a weir and sluices on porous foundations; Idem vol. 69. pp. 266-270, 1913. Véase como ejemplos de presas altas construidas bajo estos principios, Henny, D. C., Two earth dams of the United States Reclamation Service: Am. Soc. Civil Eng. Trans. vol. 74 pp. 38-86; discusion, pp. 87-93, 1911.
46. Véase, sin embargo, Lapworth, H., The Geology of dam trenches; Ins. Water Eng. Trans., vol. 16, págs. 25-51; discusion, págs. 51-66, Londres, 1911.
47. Sennar dam on the Blue Nile in Egypt completed: Eng. News-Record, vol. 96, págs. 316-317, 1926.
48. Henny, D. C., Two earth dams of the United States Reclamation Service: Am. Soc. Civil Eng. Trans., vol. 74, págs. 38-87; discusion págs. 87-93, 1911.
49. Partial failure trough undermining of the Zuñi Dam. N. Méx.: Eng. News, vol. 62, págs. 597-600, 10 figs., 1909.
- 49a. Beemer, J. A., Novel solution of Bridgeport Dam (Calif) spillway problem: Eng. News Record, vol. 98 págs. 108-110, 1927.
50. Schuyler, J. D., Reservoirs for irrigation, 2ª edición, pág. 226, 1908. Véase también Hill, R. A., Repairing spillway to Gibraltar Dam: Eng. News Record, vol. 89, págs. 798-801, 1922; Oram, H. P. Concentrated flow erodes rock below Wilson Dam: Idem, vol. 98 págs. 190, 1927.
51. Ross, C. S., and Shannon, W. V., The minerals of bentonite and related clays and their physical properties: Am. Ceramic Soc. Jour., vol. 9 págs. 7796-338, 1926.
52. Kusida, K., Difficulties in long tunnel for Japanese spillways: Eng. News Record, vol 95, págs. 336-338, 1925.
53. Berkey, C. P., Geology of the New York City (Catskill) aqueduct: N. Y. State Mus. Bull 146-283, págs. 1911.
54. De Launay L., obra citada.
55. Ries, Heinrich y Watson, T. L., obra citada.

BIBLIOGRAFIA

En seguida se da una lista comentada de notas sobre geología de sitios de almacenamientos, cortinas y túneles en los Estados Unidos de Norteamérica.

Clarke, J. M. The geologic conditions at the site of the proposed dam and storage reservoir on the Tennessee River Storage Surveys, págs. 106-122, 1897, también New York State Eng. and Surveyor Ann. Rept. for 1896, págs. 730-746, 1897.

Grosby, W. O. Geology of the Wachusett Dam and Wachusett Aqueduct tunnel of the Metropolitan waterworks in the vicinity of Clinton, Mass.: Tech. Quart., vol. 12, págs. 68-96, 1899. Magnífica presentación de los resultados geológicos detallados obtenidos en relación con una gran empresa de ingeniería que fué realizada con éxito.

Grosby, W. O. Geological History of the Nashua Valley (Mass.) during the Tertiary and Quaternary periods: Tech. Quart., vol 12, págs. 288-324, 1899. Contiene más geología aplicada que en el trabajo antes citado, incluye un plano del almacenamiento Wachusett, y discute la permeabilidad de cauces enterrados de antiguos ríos.

Grosby, W. O. Notes on the geology of sites of proposed dams in the valleys of the Housatonic and Tenmile Rivers: Tech. Quart., vol. 13, pp. 120-127, 1900. Es un informe favorable para dos sitios de cortina, uno en gneiss y otro en caliza.

Gowen, C. S. The foundations of the new Croton Dam: A.S. C. E. Trans., vol. 43, pp. 468-542; discusion, pp. 543-565, 1900. Contiene una elaborada descripción de las perforaciones de estudios y de las condiciones encontradas en la excavación de la

cimentación formada principalmente por caliza; contiene una carta de J. F. Kemp, pp. 498-499, acerca de cavernas en caliza. Describe los trabajos desarrollados para inyectar con arcilla.

Taylor, T. U. The Austin Dam (Tex.); U. S. Geol. Survey Water Supply Paper 40, 52 pp., 16 láminas, 12 figs., 1900. Describe minuciosamente la construcción de la cortina, el azolvamiento del vaso y el fracaso de la cortina. Es valioso debido a que señala la influencia de las condiciones geológicas en la construcción y en el fracaso.

Newell, F. H. Report of progress of stream measurements for the calendar year 1899: U. S. Geol. Survey. Twenty-first Ann. Rept., 4, pp. 265-269, 1901. Breve descripción de la geología en el sitio de la cortina White Rock Canyon, sobre el Río Grande. Los empotramientos de la cortina consisten en grava gruesa no consolidada cubierta de basalto. Esta condición geológica desfavorable y la pequeña capacidad de almacenamiento han impedido cualquier intento de construir en este sitio (Ver Lee, 1907).

Grosby, W. O. A study of hard-packed sand and gravel: Thec. Quart., vol. 15, pp. 260-264, 1902. Atribuye la causa de fuerte cohesión de la grava y arena encontradas en perforaciones de exploración a ciertas condiciones de humedad, ni mojadas ni secas.

Grosby, W. O. A study of the geology of the Charles River estuary and the formation of Boston Harbor, Mass.; Report of the committee on Charles River Dam., appendix 7, pp. 345-369, 2 maps. 1 fig. Boston, 1903. Analiza la historia fisiográfica de la región y llega a la conclusión de que el canal de Charles River y su extensión en el puerto de Boston no se mantienen abiertos por el arrastre de las mareas, y, por lo tanto, la reducción propuesta en el volumen del prisma de marea no dañará la navegación. Contiene una detallada información con respecto a las estructuras geológicas y planos geológicos con líneas de configuración del fondo rocalloso.

Crosby, W. O. A study of the geology of the Charles River estuary and Boston Harbor (Mass.): Tech. Quart., vol. 16 pp. 64-92, 1903. Omite mucha de la geología aplicada a la ingeniería y contiene ligeramente más material fisiográfico que el reporte original.

Grosby, W. O. Geology of the Weston Aqueduct of the Metropolitan waterworks in Southboro, Framingham, Wayland, and Weston, Mass. Tech. Quart., Vol. 17, pp. 101-116, 1904. Describe las cimentaciones de la presa Sudbury y la geología de

cinco túneles. Da algunos datos de relación entre las condiciones geológicas y las dificultades de construcción.

Hamlin, Homer. Water resources of the Salinas Valley, Calif., U. S. Geol. Survey Water-Supply Paper 89, 91 pp. 12 pls. 30 figs., 1904. Describe muchas presas y cortinas con mucha información geológica y muestra habilidad en la aplicación de la geología a la ingeniería.

Hobbs, W. H. The configuration of the rock floor of Greater New York: U. S. Geol. Survey Bull. 270, 96 pp., 5 pls. (Maps and sections) 6 figs., 1905. Compilación de datos de la profundidad de la roca y de los materiales útiles para la construcción situados sobre ella.

Lee, W. T. Geology and water resources of Owens Valley, Calif.: U. S. Geol. Survey Water-Supply Paper 1-81, pp. 15-17, 1906; abstract, U. S. Reclamation Service Third Ann. Rept., 2nd ed., p. 202, 1905. Discute la posibilidad de filtración, de perturbaciones sísmicas y el carácter de los materiales locales de construcción en la presa de Long Valley.

Lee, W. T. Gypsum beds and water storage in the Pecos Valley of New Mexico (Abstract): Science, new ser., Vol. 23, p. 306, 1906. Discute las condiciones cavernosas de las rocas cercanas a Carlsbad, debido a su contenido en yeso y sal y en relación con las filtraciones en el vaso Mc. Millan.

Fisher, C. A. Preliminary report on the geology and underground waters of the Roswell artesian area, N. Mex.: U. S. Geol. Survey Water Supply Paper 158, p. 27, 1906. Describe el embalse Hondo como una gran depresión natural en el parte-aguas entre el arroyo Blackwater y el río Hondo. Caliza azul compacta que aflora en la superficie descansando sobre capas alternadas de yeso y arcilla roja y amarilla. "La sedimentación era originalmente uniforme, pero las aguas superficiales han disuelto el yeso, lo cual ha causado un asentamiento de los lechos en el fondo del vaso y una considerable distorsión en la orilla". Dice que se hicieron varias perforaciones con perforadoras de diamante y da el registro de una que se profundizó 28 m., mostrando cavidades, roca suelta y yeso.

Lee, W. T. Water resources of the Río Grande Valley and their development: U. S. Geol. Survey Water Supply Paper 188, pp. 25-30, 1907. Describe sitios propuestos para presas. International Reservoir, Engle Reservoir (ahora conocida como Elephant Butte). San Acacia Reservoir, San Felipe Reservoir, Española Reservoir (Cañón White Rock,

véase Newell, 1901), todos en el Río Grande en Nuevo México.

Lee, W. T., Geological reconnaissance of a part of western Arizona U. S. Geol. Survey Bull. 352, pp. 37-49, 1908. Discute vasos y sitios para cortinas en el Río Colorado, usando mapas preparados por el U. S. Reclamation Service y los datos obtenidos por perforaciones en las boquillas.

Smith, L. S., The water powers of Wisconsin: Wisconsin Geol. and Nat. Hist. Survey Bull. 20, pp. 354, 1908. Contiene un esquema de la geografía física del Estado, por Samuel Weidman, pp. 6-20, y una corta descripción general de la geología y topografía de cada sistema de drenaje, también notas sueltas acerca de la naturaleza de la roca en sitios de presa.

Berkey C. P., Geology of the New York City (Catskill) Aqueduct: New York State Nus. Bull, 146-283 pp., 38 pls. including maps. 39 figs., 1911. Da detalles de los estudios geológicos de cimentaciones para la Presa Ashokan, localización del acueducto, numerosos túneles y del cruzamiento del río Hudson. Una de las más completas presentaciones de trabajo geológico, con muchas láminas a colores. Uno de los últimos escritos valiosos en datos para la construcción y actitud del ingeniero para el trabajo.

Berkey, C. P., Geological features of the city tunnel of the Cat-skill Aqueduct: New York City Board of Water Supply Rept. On the City Tunnel, pp. 115-186, map. 1912; Columbia Univ. Geol. Dept. Contr., Vol. 23 N° 11. Un reporte original con recomendaciones detalladas relativas a cuestiones específicas de problemas de Ingeniería, geología de la presa Silver Lake (pp. 178-183), y plano geológico, a colores, de la ciudad de Nueva York.

Berkey, C. P., and Healy, J. R. The geology of the New York City and its relation to engineering problems (con discusión): Municipal Eng. City of New York Proc. for 1911. pp. 5-39, 1912. Amplia descripción de las rocas locales con respecto a los problemas de ingeniería. (Véase Hobbs, 1905).

Kemp, J. F., Geological problems presented by the Catskill Aqueduct of the City of New York: Canadian Min. Inst. Quart Bull. 16, pp. 3-9, 1911; Canadian Min. Inst. Jour., Vol. 14, pp. 472-478, 1912. Una relación general del trabajo geológico en el acueducto Catskill.

Kemp, J. F., The Storm King Crossing of the Hudson River by the new Catskill Aqueduct of

New York City: Am. Jour. Sc., 4th ser., vol. 34, pp. 1-11, 1912. Proporciona datos geológicos obtenidos por perforaciones en esta localidad.

Martel, E. A., Sur le déplacement de sources thermales a la Roosevelt Dam, Ariz.: Compt. Rend., vol. 155 pp. 1568-1570, 1912. Describe los manantiales termales que han brotado abajo de la Presa Roosevelt desde su construcción y la rápida erosión de la roca en los vertederos.

Purdue, A. H., Geology and engineering: Resources of Tennessee, vol. 3, pp. 105-109, 1913. Describe el fracaso de dos almacenamientos de concreto: City of Nashville, Tenn., que fracasó el 5 de nov. de 1912, después de 23 años de vida; Johnson City, Tenn., que fracasó el 10 de enero de 1913, cuando se llenó por primera vez.

Fuller, M. L., Dam and embankment failures in 1912, discussion of the types of structures and causes of destruction: E. N. R., vol. 67. pp. 426-428, 1913. Atribuye 61% de las fallas de aquel año a la falta de atención del factor geológico.

Anónimo, accident at Dam 26 on Ohio River: E. N. R., vol. 67 pp. 426-428, 1913. Cita una carta del U. S. Geol. Survey que da los resultados de un examen petrográfico de un fragmento de pizarra obtenido después del fracaso de la cimentación de la presa.

Grosby, W. O., Buried gorge of the Hudson River and geologic relations of Hundson syphon of the Catskill Aqueduct (resumen): Geol. Soc. America Bull, vol. 25, pp. 89-90, 1914. Trata con problemas geológicos con la luz de los datos obtenidos por perforaciones.

Harza, L. F., Columbia River power project near The Dalles, Oreg.: U. S. Bur. Reclamation And State of Oregon Coop. Rept., San Francisco 1914. Descripción de la geología del sitio pp. 8, 21-25.

Fowler, C. E., Leakage from Cedar Lake Reservoir, Seattle, (Wash.) Water Supply: E. N. R., vol. 73, pp. 112-115, 1915. Descripción del fracaso por filtraciones, con mapa, basada en el conocimiento personal y en los de reportes de geólogos.

Rands, H. A. Grouted cut-off for the Estacada Dam (Oreg.): A. S. C. E. Trans., vol. 78, pp. 447-482; discussion pp. 483-546, 1915. Recalca las dificultades para inyectar una breccia volcánica. Se cita un reporte geológico de S. S. Diller en pp. 449, 484-485.

Collier, A. J., Geology of Dayville reservoir and dam site, in Whistler, J. T., and Lewis, J. H. John Day proyect, irrigation and drainage, pp. 90-93,

U. S. Reclamation Service and State of Oregon, 1916. Reporte detallado, basado en trabajo de campo e inspección de muestras.

Williams, I. S., Geology of Clarno dam site: Idem, pp. 82-88, Reporte detallado, basado en el trabajo de campo de un geólogo familiarizado con las rocas locales.

Mead, D. W., Report on the dam and water-power development at Austin, Tex., 205 pp. Publicación personal, 1917. Para la historia completa de las cortinas vieja y nueva, condiciones geológicas del sitio, resultados y bibliografía de 55 referencias, veáanse apéndices 1-5 pp. 40-143.

Scheidenhelm, F. W., The reconstruction of the Stony River Dam (W. Va.) A. S. C. E. Trans., vol. 81, pp. 907-1023; discusión pp. 1024-1100, 5 pls., 2 photos, 1917. Describe minuciosamente las condiciones geológicas en el sitio de la presa y hace ver su efecto en el fracaso de la cortina y en los métodos de reconstrucción.

Atwood, W. W., Relation of landslides and glacial deposite to reservoir sites in the San Juan Mountains, Colo.: U. S. Geol. Survey Bull. 685, 38 pp. 8 pls., 17 figs. 1918. Amplia descripción del origen de los vasos de almacenamiento; contienen discusiones detalladas con mapas de almacenamientos y cortinas, y datos de fugas a través de grietas en rocas y a través de masas de derrumbes.

Davis, A. P., Why some irrigation canals and reservoirs leak: E. N. R., vol. 8 pp. 663-665, 1918. Discute los proyectos de canales en Flathead, Mont. Grand Valley, Colo., y Spanisch Fork, Utah, los embalses de Jerome y Deer Flat en Idaho y las presas de Mc Millan y Hondo en Nuevo México.

Hamlin, Homer, Report on geological examination of Iron Canyon dam and reservoir site, Calif., in Gault, H. J. and Mc Clure, W. F., Iron Canyon project, Calif., appendix 4, pp. 45-59, 9 pls., U. S. Bur. Reclamation 1921. Estudio preciso y de gran valor, de posibles sitios para cortinas, pero en íntima asociación con un ingeniero, suplementado con perforaciones y tendiendo a elegir un sitio de presa que no se había considerado antes.

Lawson, A. C., Report on geology of Iron Canyon (Calif.) Idem appendix 3, pp. 73-76, Reporte preliminar del mismo proyecto discutido por Hamlin.

George R. D., Notes on geology of the line of the proposed Moffat Tunnel, Colorado Geol. Survey, July, 1922. Estudio preliminar de un túnel. Valor de las predicciones geológicas aún no registradas.

Willis, Baiky, Geology of the Colorado River Basin, with reference to engineering problems: Science, new ser., vol. 56, pp. 177-182, 1922. Alarmante información de peligro por movimientos terrestres en viejas líneas de falla. La publicación de este artículo condujo a un intenso trabajo de geología y a elaborar un reporte manuscrito por F. L. Ransome. Parte de la evidencia recogida por Ransome ha sido publicada. (Véase Ransome, 1923.)

Berkey, C. P., and Sanborn, J. F., Engineering Geology of the Catskill aqueduct: A. S. C. E. Trans., vol. 86, pp. 1-67, 3 pls., 17 figs.; discusión pp. 68-91, 1923. Una completa revisión del trabajo geológico hecho y de los métodos y principios usados al aplicar la geología a la localización y construcción de grandes empresas de ingeniería. Discusión, que arroja mucha luz, por muchos ingenieros civiles.

Bryan, Kirk, Discussion (on geologic setting of rockfill dam at Lees Ferry, Ariz.): A. S. C. E. Trans., vol. 86, pp. 228-240, 1923. Describe la estructura geológica, litología y el fracturamiento de las rocas en Lees Ferry con respecto a la construcción de una cortina alta a través del río Colorado y a la perforación de varios túneles. Describe los materiales para construcción obtenibles.

Leighton, M. M., Geology at the Decatur dam and reservoir project: E. N. R., vol. 91, pp. 264-266, 1923. La presencia de formaciones glaciales explica por qué no se pudieron hincar tablestacados hasta la pretendida profundidad para asegurar la impermeabilidad. Describe las formaciones glaciales en el sitio y las dificultades geológicas encontradas en la construcción.

Leighton, M. M., The glacial history of the Sangaman River Valley at Decatur (Ill.) and its hearing on the reservoir project: Illinois State Acad. Sci. Trans., vol. 14, pp. 213-218, 1 pl., 1922.

Ransome, F. L., Ancient high level potholes near the Colorado River (abstract): Science, new ser., vol. 57, p. 593, 1923. El Black Canyon del río Colorado fué abierto en tiempos geológicos relativamente recientes; a 285 m. arriba del río unas marmitas de gigante (potholes) marcan un antiguo cauce. Estas marmitas están cortadas en fallas y el relleno de fallas por lo que deduce que no hubo movimiento en las fallas durante el período necesario para profundizar el cañón 285 m.

Patton, L. T., Geology and the location of dams in west Texas: Econ. Geology, vol. 19, pp. 756-761, 1924. Discute la relación de sitios adecuados para

cortinas a la distribución de ciertas formaciones de roca. No se describen sitios específicos de presas ni de cortinas.

Lee, W. T., Erosion by solution and fill; U. S. Geol. Survey Bull. 760, pp. 115-116, 1925. Menciona brevemente el embalse Mc Millan, el embalse propuesto N° 3, y el embalse Hondo, en Nuevo México, en relación con las cavidades abiertas y con las fugas debidas a la disolución del yeso, sal, etc.

Deeds, J. F., and White, W. N., Water power and irrigation in the Madison River Basin, Mont.: U. S. Geol. Survey Water-Supply Paper 560, pp. 6-8, 1925. Breve discusión de la geología de un sitio de presa en el río Madison: contiene también geología del área con respecto a la construcción de presas por G. R. Mansfield.

Moore, R. C., Geologic report on the inner gorge of the Grand Canyon of Colorado River: U. S. Survey Water-Supply Paper 556, pp. 125-171, 1925. Describe la geología con respecto a muchos sitios de presas; hay muchos de los asuntos geológicos tratados por E. C. La Rue en el reporte.

Parsons, H. de B., Sherman Island dam and power house: A. S. C. E. Trans., vol. 88, pp. 1257-1292; discusión, pp. 1293-1328, 1925. Es ésta una presa de arcos múltiples cimentada en arena y con empotramientos laterales en roca. La geología del sitio de la cortina, en las pp. 1261-1263 fué copiada del reporte de C. P. Berkey.

Stearns, H. T., Porosity of reservoir prevents water storage (Malad Reservoir Idaho): E. N. R., vol. 96, p. 561. April 8, 1926. Resume el reporte manuscrito de Stearns. Describe las fugas en la presa a través de obras en la caliza que aflora en una pequeña área del fondo, obras que se localizaron por un plano de contorno del nivel de agua freática, proponiendo inyecciones a presión para llenar las cavidades.

Meinzer O. E. Renick, B. C., and Bryan, Kirk, Geology of N° 3 reservoir site, Carlsbad irrigation project, N. Mex., with respect to water-tightness: U. S. Geol. Survey Water-Supply Paper 580, pp. 1-39, 1926. Describe en detalle la estructura geológica y las condiciones hidrológicas en rocas cavernosas consistentes en calizas, yeso y pizarra. Los pozos de agua muestran que el nivel de agua freática está bastante abajo del vaso en su parte más baja en donde el yeso aflora, y se expresa la opinión de que sobrevendrán excesivas fugas si se construye una cortina para almacenar agua. Contie-

ne datos de las presas cercanas Mc Millan y Avalon. (Véase Lee, 1906, 1925 y Davis 1918.)

Lawson, A. C., Geology of Lancha Plana dam site (Calif.): East Bay Municipal Utility District Ann. Rept. for 1925, pp. 15-16, Oakland, 1926. Describe la geología de tres sitios alternativos en el río Mokelumne.

Dreyer, W., Volcanic formations govern design in Pit River N° 3 hydroelectric development (Calif.): E. N. R., vol. 96, pp. 144-148, 1926. Las mesetas volcánicas absorben la precipitación que emerge dentro de cañones para formar ríos de corriente uniforme alimentados por manantiales. Se muestran el corte geológico, determinado por perforaciones, en el sitio de la cortina y su efecto en la construcción. Se proporcionan datos sobre inyectado, con cemento.

Hanna, F. W., Designing a high storage dam for the Mokelumne project: E. N. R., col. 100, pp. 444-446, 1928. Describe los resultados de la exploración del sitio reportado por Lawson en 1926, y el cambio de planos como consecuencia de haber encontrado roca defectuosa que no fué descubierta en el examen geológico.

Leighton, M. M., Modern geology and its contribution to engineering: Western Soc., Eng. Sour, vol. 28, pp. 491-506, 5 figs. 1923.

Carman, J. E., discussion of paper by Gregory, Hoover, and Cornell on "The O'Shaughnessy Dam and Reservoir (Ohio)": A. S. C. E. Proc., vol. 54, pp. 1325-1327, 1928. Da secciones detalladas de rocas expuestas por la excavación para la cortina.

Wentworth, C. K., Examination of dam sites in the Tennessee River Basin (resumen): Geol. Soc. America Bull., vol. 39, pp. 204-205, 1928.

Smith, W. D., Geological suite from eastern Oregon, pt. 2, The Owyhee project (resumen): Geol. Soc. America Bull., vol. 39, p. 169, 1928.

Poco después que este trabajo fué preparado (1927), ocurrió el desastroso fracaso de la presa San Francisquito, en California. Se pueden obtener noticias del fracaso y descripciones del sitio y de diversas investigaciones en E. N. R., vol. 100, pp. 456, 466-472, 517-518, 526, 605, 639 y 675. En seguida se citan informes más bien geológicos.

Forbes, Hyde, Geological foundations at the St. Francis dam site: E. N. R., vol. 100, pp. 596-597, 1928.

Longwell, C. R. Lessons from the St. Francis Dam: Science, new ser., vol. 68, pp. 36-37, 1928.

Ransome, F. L., Geology of the St. Francis Dam site Econ. Geology, 23, pp. 553-563, 1928.