

**LAS PRESAS EN MATERIAL SUELTO**  
**Consideraciones sobre Derrumbes Ocurridos y sus Causas**

---

**Dr. Ing. Ambrogio Spada\***

**Resumen:**

En muchas partes las presas de hormigón están dando paso a las presas en material suelto. En el presente trabajo se estudian las características de estas últimas y los pasos a dar para encontrar la solución adecuada. Se analizan las presas a sección homogénea, las presas zonificadas con núcleo ancho, con núcleo delgado, con núcleo inclinado, presas con manto impermeable y las de rellenos hidráulicos. Como contraejemplo se estudia el derrumbe de la presa de Teton en Idaho y las experiencias adquiridas. Por fin se analizan las tendencias actuales en cuanto a los estudios preliminares, diseño, seguridad, construcción y evaluación final.

**Palabras Claves:**

Presas, derrumbes, material suelto, seguridad.

---

\* Profesor visitante Area de Ingeniería Civil, INTEC.

Las primeras tentativas de represar un río para aprovechar el agua que se acumula en el embalse se efectuaron en tiempos prehistóricos, originalmente para consumo humano y del ganado y posteriormente, junto al desarrollo de la agricultura, para riego. Y sin duda, los primeros diques fueron construídos en material suelto disponible en el lugar.

En épocas más recientes, aumentando la necesidad de construir presas siempre más altas para poder acumular una mayor cantidad del líquido, se han utilizado otros materiales como ladrillos, piedras con mortero y, en este siglo, el hormigón.

Presas de gravedad, presas de gravedad aligerada, presas de arco, presas de bóveda, en arco-gravedad han sido construídas en varias partes del mundo utilizando el hormigón que a veces puede ser también armado.

Sin embargo una estructura rígida, como las formadas por hormigón, requiere de apoyos rígidos y resistentes, sea en la fundación o en las hombreras, especialmente para las presas de bóvedas que transmiten el empuje hidrostático al macizo rocoso.

Además, la sección del valle debe ser bastante estrecha para permitir instalar, económicamente, una presa en hormigón.

Las primeras grandes presas han sido construidas en los valles de los Alpes (Italia, Francia, Austria, Suiza) que presentan las características más favorables.

Agotadas estas posibilidades, los intereses de los proyectistas y constructores se han vuelto a otros tipos de presas que no requieren características tan rígidas. Además, en los países que no tienen altas cordilleras y por lo tanto valles angostos, o en zonas de formaciones geológicas producidas por sedimentación, se han desarrollado las presas en material suelto, que se puede decir, representan el futuro de este tipo de obras.

Otro factor que hay que tomar en cuenta es el aspecto de las presas

en material suelto más parecido a un elemento natural y que por lo tanto se inserta en el paisaje circundante mejor que una superficie uniforme de hormigón. Esto tiene un peso considerable en la selección del tipo de presa, especialmente en los países en donde se da importancia al impacto ambiental producido por nuevas obras.

La adopción de presas en material suelto ha permitido el cerrar secciones de valles que en otro tipo de presa hubiera sido imposible.

La evolución de la técnica de construcción ha permitido aprovechar, en medida siempre mayor, materiales que, solamente hace pocos años, cuando fueron realizadas las primeras presas en tierra de gran altura, hubieran sido descartados como no utilizables.

Esto se debe, sea al mayor conocimiento de los materiales y de sus propiedades, sea al desarrollo de las maquinarias para tratamiento y movimiento de tierra.

Paralelamente a la técnica de construcción ha sido necesario el desarrollo del diseño de la estructura para adaptarlo a los materiales disponibles.

El volumen de material necesario para la construcción de una presa, aún de pequeñas dimensiones, es siempre notable y por lo tanto hay que aprovechar en máximo grado los materiales locales, o sea que se encuentran a distancia económica del sitio de la presa.

Los nuevos conceptos de diseño, desarrollados en las últimas décadas, han permitido reducir los costos y el tiempo necesario para la construcción, factor este último muy importante, especialmente cuando se trata de grandes obras.

De otro lado, la evolución de los equipos para efectuar las pruebas sobre los materiales ha proporcionado datos siempre más numerosos y más atendibles sobre las características mecánicas y sobre el comportamiento en el tiempo, de los materiales. Esto ha permitido reducir los coeficientes de seguridad adoptados, lo que se refleja como ventaja de

la economía. Reducir el coeficiente de seguridad no significa reducir la seguridad de la obra, sino compensar la reducción de las dimensiones de la estructura con un mayor aprovechamiento de los materiales que la componen.

Sin embargo esto requiere una mayor intervención del proyectista cuya función no se limita al diseño de la estructura sino debe tomar una nueva dimensión, no puede terminar al comienzo de la construcción, más bien debe prolongarse hasta la evaluación del comportamiento de la obra y la determinación, en base a los datos proporcionados por la instrumentación, de las características reales globales de la presa en la forma en la cual fue construida.

### **CARACTERÍSTICAS DE LAS PRESAS EN MATERIAL SUELTO.**

Las características principales de las presas en tierra y en enrocado son la integración en el terreno y los grandes volúmenes de material empleado, que por lo tanto deben ser fácilmente encontrados. Una presa en material suelto es una solución natural porque es formada por materiales locales y no puede ser pensada independientemente del terreno. Esto es demostrado por la gran diferencia de características de las obras realizadas. Condición indispensable para el diseño es que el proyectista conozca exactamente el ambiente natural en el cual será construída la obra.

El estudio teórico de cada aspecto del problema es limitado por la gran variabilidad de las características de los materiales y por la escasa posibilidad de realizar investigaciones y controles sobre las grandes cantidades que deben ser empleadas.

Una parte del problema queda no previsible y puede ser cubierto solamente por los coeficiente de seguridad. Por consecuencia cada proyecto debe incluir una reserva en caso que las hipótesis resulten inadecuadas. Preferiblemente la reserva más que cuantitativa debe ser cualitativa en el sentido de disponer de aparatos de emergencia. En este

sentido he afirmado que un mejor conocimiento de los materiales permite una reducción de los coeficientes de seguridad.

Antes de iniciar cualquier construcción es necesario examinar en forma exhaustiva todos los aspectos del diseño y los problemas humanos, ambientales, ecológicos y examinar toda la documentación y experiencia precedente. Esta necesidad se hace absoluta en el caso de una presa que es una obra de gran poder destructivo y todos los problemas conectados con su construcción son siempre importantes.

### **ELECCIÓN DE LA SOLUCIÓN ADECUADA.**

El primer paso para encontrar la solución más favorable técnica y económicamente es la investigación de todas las alternativas posibles, sean globales o parciales, que deberán ser extendidas al área de la obra y a una vasta zona limítrofe.

La ejecución e interpretación de una campaña de investigaciones representa una carga notable y es aconsejable concentrar la disponibilidades sobre los parámetros y los aspectos prácticos verdaderamente interesantes, entre los cuales puedo citar, por ejemplo:

- estatigrafía y perfiles geológicos.
- elementos a la estructura general: fallas, zonas de alteración, zonas fracturadas, cavidades, planos de deslizamiento, vetas arcillosas,
- características técnicas de las rocas: grado de fisuración, dirección, continuidad y frecuencia de las fracturas, resistencia, permeabilidad, durabilidad en el tiempo cuando expuestas a los agentes atmosféricos.
- una característica que evidentemente no se considera en zonas de clima cálido, es la resistencia al hielo: en zonas con excursión térmica notables del día, de la noche, el agua que se infiltra en las pequeñas grietas aumenta su volumen y en la noche, ensancha un poco la grieta de forma que durante el día penetra más en el material. Este proceso en el giro de unos años puede llevar a la completa desagregación del material.

- características técnicas de las tierras: plasticidad, expansividad, comprimibilidad, permeabilidad.
- características morfológicas locales y regionales: derrumbes antiguos, taludes naturales, localización de manantiales, comportamiento de los varios materiales sometidos a acciones mecánicas y atmosféricas en los cauces.

De otro lado hay que saber dejar de lado las informaciones no esenciales: tipos de rocas diferentes pero con características técnicas análogas, datos que no se podrán relacionar con las definiciones de diseño.

Se puede decir que cada presa tiene su propia personalidad que requiere consideraciones de diseño y modalidades constructivas particulares. De la solución de estas características deriva la mayor parte del continuo progreso en el diseño y en la tecnología de construcción de la presa.

## **TIPOS DE PRESAS**

Las presas en material suelto han tenido una rápida evolución de secciones relativamente simples a secciones más elaboradas y compuestas. Actualmente el empleo contemporáneo de tierra y roca es casi generalizado. Los materiales utilizados para construir una presa en tierra y enrocado son materiales naturales empleados en forma diferenciada. Naturales en el sentido que no son trabajados y por lo tanto son de calidad conocida pero ampliamente y variablemente desuniforme.

Las presas en material suelto pueden ser clasificadas de acuerdo a varios tipos fundamentales que de todas maneras no son definidos exactamente existiendo siempre una variación gradual para pasar de un tipo al otro.

A continuación se presenta una sumaria descripción de los principales tipos ilustrados en la figura 1.

## **PRESAS A SECCION HOMOGENEA**

Las presas a sección homogéneas son constituidas por un único material que sirve como soporte e impermeabilización. En general se emplea arcilla compactada por capas y con el grado de humedad óptimo.

Sobre el parámetro de aguas arriba se coloca una protección en enrocado cuyas dimensiones dependen de la forma y tamaño del reservoir y de la fuerza y dirección de los vientos, o sea de la posibilidad de formarse olas.

En ese mismo orden sobre el parámetro de aguas abajo generalmente se planta grama de una especie con raíces largas. Este manto protege la arcilla contra la acción erosiva de la lluvia siendo al mismo tiempo permeable.

El uso de estas presas es típico de zonas geológicamente uniformes y donde es posible encontrar arcilla en cantidades suficientes y a distancias económicas. Otra limitación a la construcción de este tipo de presa es el clima de la zona: prolongadas estaciones de lluvia no permiten asegurar la humedad óptima del material durante el trabajo y por lo tanto no se puede garantizar una buena compactación.

Este tipo de presas tiene la ventaja de la máxima simplicidad y economía. De otro lado tiene la desventaja de ser muy débil estructuralmente porque gran parte del material es embebido por las filtraciones y ofrece una permeabilidad demasiado baja en la zona del Draw-Down. Otro factor que disminuye la resistencia es el método de construcción por capas que deja una serie de juntas horizontales, de forma que el coeficiente de permeabilidad horizontal resulta mucho mayor que el coeficiente de permeabilidad vertical.

Las presas de tierra a sección homogénea se han evaluado con la sucesiva introducción de drenajes al pie de aguas abajo tanto horizontales como verticales tal y como se ilustra en la figura 2. Los drenajes en la práctica son filtros constituídos por arena gruesa o grava que debe ser aislada de la tierra por medio de transiciones formadas por capas de

materiales gradualmente más finos para evitar la contaminación del filtro por parte de la arcilla.

Con la introducción de los drenajes se ha resuelto en forma satisfactoria los problemas de parámetro de aguas abajo.

En la figura 2 se ha trazado, indicativamente, el andamio de la línea piezométrica de las filtraciones en el cuerpo de la presa demostrando la eficiencia del drenaje vertical que limita la parte embebida de agua a la zona de aguas arriba.

### **PRESAS ZONIFICADAS CON NUCLEO ANCHO**

La sección de una presa zonificada con núcleo ancho representa una notable evolución para el empleo de materiales diferenciados. En ambos parámetros se coloca una capa de materiales permeables (Grava o Roca) que aguas abajo protegen el núcleo como un filtro, bajando rápidamente la línea piezométrica de las filtraciones y aguas arriba forman un contrapeso y una zona de drenaje que reduce la presión intersticial en caso de Draw-Down o sea de un rápido descenso del nivel de agua en el reservorio.

La pendiente típica de los parámetros es de 3:1 o sea, que este tipo de presa requiere menor volumen de material y permite el empleo de una gama más grande de materiales locales. Otra ventaja es la gran superficie de contacto entre el núcleo y las hombreras y el núcleo y la cimentación.

En clima lluvioso o con temporada de lluvia muy extensa, la presa a núcleo ancho presenta la desventaja que la construcción del núcleo es aguantada o paralizada durante los períodos de lluvia mientras que las partes en enrocado pueden ser continuadas desfasando los programas constructivos. La presencia de zonas de trabajo diferenciadas es una desventaja para las pequeñas presas mientras que es ventajosa para las obras de gran envergadura.



## **PRESAS ZONIFICADAS CON NUCLEO DELGADO**

Desarrollando la técnica de la compactación de la arcilla y paralelamente las maquinas operadoras, se han obtenido mayores grados de impermeabilidad y se ha visto la posibilidad de reducir el espesor del núcleo. Este tipo de presa resulta más económico. La formación de capas de arcilla compactada es casi siempre más costosa que vaciar piedras.

Es la sección actualmente más utilizada por las grandes ventajas que presenta:

- volumen de materiales reducido. Se nota en la figura que el paramento de aguas abajo es reducido de 2.5/1.
- fuerte resistencia mecánica que permita grandes alturas.
- posibilidad de construcción casi independiente de las condiciones climáticas.
- ausencia de problemas de presión intersticial y de Draw-Down.

La pequeña área de contacto entre núcleo y hombreras y entre núcleo y cimentación, bien como los fuertes gradientes de presión en el núcleo son las desventajas de este tipo de presa, que de todos modos pueden ser eliminadas con cuidadosos estudios y buena ejecución de los filtros.

Un punto de especial importancia es el espesor mínimo del núcleo que debe ser proporcionado a la altura. Generalmente se adopta el espesor de 0.3H a 0.5H y solamente en casos especiales de utilizar buenos materiales puede ser reducido a 0.2H.

Otro aspecto delicado de este tipo de presa, especialmente en zonas sísmicas, son los asentamientos diferenciales entre núcleo y filtro, debido a la diferente deformabilidad de los materiales, con peligro de fisuraciones en el núcleo.

## **PRESAS ZONIFICADAS CON NUCLEO INCLINADO**

Una modificación de las presas con núcleo central delgado, desarro-

llado recientemente especialmente en los Estados Unidos es la sección con núcleo inclinado que puede ser empleado donde no se encuentran grandes cantidades de arcilla, pero se dispone de roca de buena calidad.

El núcleo impermeable inclinado descarga mejor el empuje hidrostático sobre la cimentación reduciendo la función de soporte del espolón de aguas abajo que puede tener un volumen mínimo. También aguas arriba del núcleo se coloca el mínimo volumen de enrocado, necesario para su protección. Como se observa en la figura la pendiente de los parámetros de aguas abajo y de aguas arriba son reducidas con respecto a los parámetros de otras secciones con la misma altura resultando también una reducción del volumen de material.

Las desventajas principales son la mayor longitud de la línea de contacto núcleo–cimentación y de la cortina de inyecciones que puede ser determinante en zona de rocas no buena. También la construcción del núcleo inclinado es mas dificultosa.

Por lo que se refiere al diseño y a la ejecución de los filtros deben ser cuidadosamente ejecutados, siendo la parte más delicada de la estructura.

### **PRESAS CON MANTO IMPERMEABLE**

Examinando la evolución de las presas zonificadas se observa que la tendencia es de reducir, en lo posible, la cantidad de material impermeable, siempre difícil de encontrar y poner en obra. Con el manto impermeable se ha eliminado el núcleo de arcilla aprovechando al máximo las ventajas de la sección con núcleo impermeable inclinado. Los materiales empleados para obtener el manto apoyado al paramento de aguas arriba son varios, tales como hormigón armado, concreto asfáltico, planchas metálicas, láminas plásticas, madera etc.. La elección depende evidentemente del tamaño de la obra, de la disponibilidad del material, del costo y de la durabilidad, en función de las condiciones ambientales.

El empleo típico de estas soluciones es en la zona donde faltan

materiales finos para realizar el núcleo impermeable, como por ejemplo, la presa de Aguada Blanca, en el sur del Perú, en cuyos alrededores los únicos materiales finos son cenizas volcánicas y arena finísima de erosión eólica.

- Los mantos en hormigón armado tienen espesor de 20 a 40 centímetros con juntas generalmente cada 5 metros.
- Los mantos en concreto asfáltico, con espesor de 15 a 20 centímetros son colocados en 3 o 4 capas sin juntas.
- Los mantos metálicos son realizados con planchas juntas cada 10 metros y con espesor de 3 a 8 milímetros.
- Los mantos apoyan sobre una capa de material drenado para evitar la formación de bolsones de agua en presión que pueden reventar el manto hacia el exterior en caso de vaciamiento rápido del reservorio.

La ventaja de estas presas es que son estructurales y económicas como las presas con núcleos inclinados: se llega al mínimo volumen de enrocado y a la eliminación total de las presiones intersticiales en el cuerpo de la presa.

Además de las desventajas presentadas por las presas con núcleo inclinado se necesita realizar una estructura adecuada, generalmente en hormigón para anclar el manto a la cimentación y se necesita vaciar completamente el reservorio para inspeccionar y hacer mantenimiento al manto.

Del comportamiento de presas de este tipo se ha visto que lo más aconsejable son los mantos más flexibles; o sea, en concreto asfáltico o metálico. La solución en hormigón es siempre demasiado rígida respecto al cuerpo en enrocado y las placas se deforman, se fisuran y se dislocan con mucha facilidad.

### **RELLENOS HIDRAULICOS.**

Una categoría especial de presas son los rellenos hidráulicos, obtenidos por sedimentación diferenciada de materiales transportados hi-

dráulicamente. La parte más gruesa es depositada en correspondencia de los parámetros de la presa mientras que la parte más fina se sedimenta al centro.

Es evidente que este tipo de presa no es aplicado con frecuencia dado que se necesitan condiciones particulares. De todos modos, cuando son disponibles depósitos relativamente uniformes de grava con arena y limo y cuando el volumen de la presa es tan grande que justifica la instalación para el transporte de los materiales, el uso de este tipo de presa puede resultar muy económico.

Las desventajas principales son condiciones de estabilidad precaria durante la construcción y notables problemas en caso de encontrar materiales no uniformes en la zona de préstamo.

Otro método, aplicado en unos casos por los rusos, es de obtener el cierre del río haciendo derrumbar en forma controlada los flancos del valle. Se obtiene un lago natural como existen varios provocados por derrumbes prehistóricos. Es evidente que este método puede ser utilizado solamente en condiciones muy singulares.

### **EL DERRUMBE DE LA PRESA DE TETON (IDAHO)**

Los desastres que afectaron presas y reservorios artificiales han sido en las últimas décadas en números particularmente elevados.

Solamente en los Estados Unidos se pueden citar los derrumbes de la presa de Baldwin Hills en 1964, la presa de Teton en 1976, la presa de Toccoa en 1977, todas construidas en material suelto. En cada derrumbe hubo muertos, enormes daños materiales, temores en la opinión pública, paralización de las actividades de proyectos y construcción de obras similares.

Entre los citados, el desastre de la presa de Teton, en Idaho, ha sido seguramente el más grave y dramático. Es también el derrumbe que ha sido mejor documentado y analizado más a fondo. Parece por lo tanto el más adecuado a ser ilustrado como ejemplo.

## DESCRIPCION DE LA PRESA

La construcción de la presa de Teton había sido autorizada en septiembre/1964. Las investigaciones de sitios adecuados para la implantación de una presa en el valle del río Teton se iniciaron de inmediato y continuaron hasta su licitación en 1971. Los trabajos terminaron en noviembre/1975. El llenado del embalse empezó el 3 de diciembre de 1975 y continúa hasta el día del desastre el 5 de junio del 1976. La presa de Teton se esquematiza en la figura 3.

Es una típica presa en materiales granulares a sección zonificada con núcleo ancho, altura 93 metros sobre el cauce del río y 124 metros en punto inferior de las cimentaciones. El coronamiento tiene 900 metros de longitud y el volumen total de la presa es de 3 millones de metros cúbicos.

El costo ha sido de 86 millones de dolares en 1976. Presa y reservoir eran los elementos principales del Teton Basin Project, proyecto para control de las crecidas, producción de energía eléctrica e irrigación.

La cimentación es en roca de origen volcánico muy fracturada, especialmente en la parte superior.

En la figura se pueden apreciar la sección longitudinal de la presa con el tratamiento de la cimentación, que ha sido el más extendido diseñado por el Bureau of Reclamations, proyectista de la obra. El tratamiento incluyó:

- La excavación de un cut-off, dentellon, en el cauce para eliminar los materiales granulares y alcanzar las rocas.
- La excavación de 2 trincheras en las hombreras sobre la cota 5200 pies, para eliminar la roca superficial.
- La limpieza de la superficie de la roca con chorro de agua y aire a presión.
- Una pantalla de inyecciones sobre todo el contacto núcleo-roca. Algunas perforaciones llegaron a 79 m de longitud. El volumen total de lechada inyectada fue de 16000 m<sup>3</sup>, el doble del previsto en fase de

diseño. Las fisuras muy abiertas fueron tratadas con inyecciones y llenadas por gravedad.

- Ningún llenado fue previsto para las fisuras más estrechas de 6 mm.

Los expertos que estudiaron el derrumbe, notaron que los constructores se preocuparon más de obtener una buena compactación del núcleo que de evitar la circulación del agua en la fisura inmediatamente abajo.

A pesar del intenso tratamiento, esta fue una de las causas que llevaron al desastre.

### **CRONOLOGIA DEL DERRUMBE**

La presa de Tetón derrumbó el 5 de junio 1976 cuando el embalse se encontraba a la cota 5323 pies, aproximadamente 1 m por debajo de la cresta del vertedero.

A pesar que la alarma hubiera sido dada inmediatamente, el derrumbe causó la muerte de 14 personas y daños estimados en más de 1000 millones de dolares.

Creo interesante resumir la cronología del derrumbe como está ilustrado en la figura 4.

Antes del 3 de junio, aguas abajo de la presa de Tetón, no fueron observadas infiltraciones u otros síntomas de pérdidas. El 3 de junio a una distancia de 400 o 500 m aguas abajo de la presa aproximadamente en la posición A indicada en la figura, aparecieron manantiales de aguas limpias a través de fracturas de las rocas.

Durante la noche del 4 de junio el agua escurrió a lo largo del contacto presa-hombrera derecha aproximadamente a la cota 5200 pies y en la madrugada del 5 de junio fue notada una percolación. A las 7:00 A.M. del mismo día un caudal evaluado entre 600 y 800 l/segs. de agua mezclada con barro salía de la roca en la margen derecha en la posición indicada con B y otra salida de agua apareció en la posición C: a cota

5200 pies. Durante las 3 horas siguientes el caudal aumentó notablemente.

A la 10:30 A.M. siempre a cota 5200 pies, en el paramento de la presa en la posición D apareció otra pérdida que aumentó rápidamente formando una especie de túnel en el cuerpo de la presa de aproximadamente 2 m de diámetro.

A las 11:00 A.M. en la superficie del embalse se formó un vórtice indicado con E.

A las 11:30 otra cavidad, en forma de embudo en la posición F y poco después a las 11:55 A.M. el coronamiento de la presa empezó a derrumbarse según la línea indicada con G.

Poco después, como muestra la foto, el agua ya había aportado el 40% del volumen de presa.

### **INVESTIGACIONES SOBRE EL DERRUMBE**

Inmediatamente después del derrumbe, el ministerio del interior de Estados Unidos y el gobernador del estado de Idaho ordenaron una investigación de la cual fue encargada una comisión independiente de expertos que en diciembre de 1976 entregó un informe sobre el desastre.

Todas las declaraciones de testigos fueron escuchadas, todas las fotos del derrumbe fueron ordenadas y examinadas, cualquier documentación disponible fue recogida y estudiada para tener el mayor número de informaciones útiles.

Fueron efectuadas pruebas de laboratorio sobre muestra de material del núcleo, pruebas de fractura hidráulica en sondeos ejecutados sobre el núcleo en la hombrera izquierda, pruebas de aguas en varios puntos de la pantalla de inyecciones en la hombrera derecha.

Pruebas de estanqueidad fueron ejecutadas sobre el cut-off en

proximidad de las fracturas mayores. Estudios analíticos fueron realizados para determinar las condiciones de sollicitación en varias secciones de la presa y del cut-off en la zona del derrumbe.

**La comisión independiente llegó a las siguientes conclusiones:**

1. Los documentos demuestran que la elección del sitio fue cuidadosa y que los estudios geológicos fueron adecuados y amplios. El programa de inyecciones de prueba ejecutado en 1969 había previsto las dificultades encontradas durante la ejecución de la pantalla de inyecciones.

2. El diseño fue realizado conforme a las normas del Bureau of Reclamation establecidas por la experiencia adquirida en otros proyectos, pero no fueron tomadas en suficiente consideración la variabilidad y las dificultades geológicas del sitio de Teton.

3. La roca volcánica del sitio de la presa de Teton es muy permeable y variablemente fisurada dejando circular el agua con la misma facilidad en todas las direcciones. Durante el llenado del embalse el agua llegó rápidamente a las cimentaciones a través de las fisuras abiertas.

4. Los limos arcillosos de depósito eólico con baja plasticidad utilizados para el núcleo y para rellenar el cut-off, son fuertemente erosionales. La comisión opinó que el uso de este material contra la roca fracturada de la hombrera fue uno de los factores principales del derrumbe.

5. La construcción de la presa y de las demás obras fue realizada por firmas especializadas sin controversias entre la constructora y el Bureau of Reclamation que pueden haber tenido influencias negativas sobre la calidad del trabajo. La construcción fue conforme al diseño bajo todos los puntos de vista con excepción de los tiempos de ejecución.

6. El atraso en la terminación de las obras de descarga, limitó la posibilidad de controlar la velocidad de llenado del embalse. Sin embargo la opinión de la comisión fue que la velocidad de llenado,



mayor del previsto en fase de diseño, no tuvo influencia sobre la formación de las pérdidas de agua y consecuente desastre. Un llenado más lento hubiera solamente atrasado el derrumbe.

7. La documentación existente indica que fue tomado un cuidado especial para obtener una pantalla de inyecciones de alta calidad y la comisión consideró que el resultado obtenido es aceptable.

8. La geometría del cut-off con taludes muy empinados, ha contribuido a producir efectos de arco que redujeron las solicitaciones verticales del núcleo y favorecieron la formación de fisuras que se ampliaron rápidamente a través del material erosionable del núcleo.

9. Cálculos ejecutados con el método de los elementos finitos confirman que por el efecto de arco de la presión del agua habría podido superar la suma de las presiones laterales y de la resistencia a tracción del material del núcleo.

10. La hipótesis de que dislocamientos diferenciales de la cimentación hayan contribuido al derrumbe fue descartada. Mediciones geodéticas de control muestran solamente pequeños movimientos del embalse. También en el túnel de descarga excavado en la hombrera derecha no fueron observados daños.

11. No se han encontrado indicios que movimientos sísmicos hayan contribuido al derrumbe.

12. La instrumentación de la presa y de sus cimentaciones ha sido juzgada insuficiente para permitir al personal responsable de tener suficientes informaciones sobre la variación de las condiciones de la presa y de las hombreras.

13. La conclusión de la comisión ha sido que el derrumbe fue causado por erosión regresiva del núcleo.

Sobre la forma en la cual se inicio el fenómeno, la comisión ha considerado dos posibilidades, ambas válidas, y que pueden haber

ocurrido en conjunto o separadamente: la primera podría ser el escurrimiento del agua en las fracturas no selladas de roca de cimentación, la segunda es el asentamiento debido a deformaciones diferenciales o a la fractura hidráulica del material del cut-off. Ambas causas han producido la formación de túneles de erosión a través del núcleo y su rápida erosión interior, siendo el material fuertemente erodible.

La causa fundamental del derrumbe podría ser considerada un conjunto de factores geológicos y de decisiones de diseño.

Entre los factores geológicos se puede citar:

- a. Las fracturas existentes en la roca de las hombreras.
- b. La escasez de materiales para la construcción del núcleo más adecuados que la arena de depósito eólico.

Las decisiones del proyecto incluyeron:

- a. El control de las filtraciones confiado solamente a cut-off relleno de material eólico y a una pantalla de inyecciones.
- b. La falta de dispositivos adecuados para recoger y descargar el agua de filtración y de las inevitables pérdidas de la roca de fundación y del cut-off.
- c. La geometría del cut-off que favorecía el efecto del arco con las consecuencias ya mencionadas.
- d. La compactación como única protección contra la erosión regresiva. Solamente algunas fracturas más importantes fueron selladas con hormigón.
- e. La responsabilidad de desarrollar las finalidades y los detalles del tratamiento superficial de la roca bajo el núcleo fue dejada al personal de campo que actuó sin instrucciones exactas de los proyectistas.

## **LOS ESTUDIOS PRELIMINARES**

El diseño de una presa en tierra y en encofrado debe ser precedido de una serie de estudios confiados a especialistas a los cuales

el proyectista proporciona las líneas directrices, la coordinación y un control en forma continua.

En seguida se indican los estudios preliminares y los resultados esperados:

- Topografía: Fotomosaico de la zona de la presa y del reservorio.
- Geología: estructura regional y microestructura.
- Nivel de actividad e importancias de las fallas.
- Litología y mineralogía.
- Hidrogeología y permeabilidad de las rocas.
- Geofísica: variaciones de las características de las rocas y de los suelos.
- Geomecánica: características de las rocas de cimentación.
- Geotécnica: individualización y características de los materiales para la construcción.

En apoyo a los estudios se consideran indispensables, ya en la fase preliminar de diseño, pruebas en sitio en larga escala, que deben por tanto ser confiadas a empresas especializadas:

- Prueba de permeabilidad en los materiales de las hombreras y de la cimentación, a presión variable y ciclos repetidos, a veces completadas por pruebas de bombeo.
- Pruebas mecánicas sobre los materiales de las hombreras y de la cimentación, realizadas con gatas planas, prensas radiales y aparatos de corte de grandes dimensiones.
- Pruebas de disparo en las zonas de préstamo, con modalidades similares a las de las futuras excavaciones.

Hay que resaltar la importancia de la instrumentación instalada antes de la construcción que permite adquirir informaciones que pueden ser de grande utilidad para modificar el proyecto, intervenir durante los trabajos y entender el comportamiento de la obra, una vez puesta en operación.

## **EL DISEÑO**

Solamente a este punto es posible iniciar el diseño verdadero que consiste en la optimización de una expresión muy compleja en la cual entran e interfieren factores físicos y términos de tipo creativo.

Los factores físicos son perfectamente fijos, o sea pueden ser modificados solamente en el sentido de una mejor definición. Se puede citar: cimentaciones, materiales, sismicidad, hidrología, factores climáticos, vinculaciones de operación.

Los términos creativos tienen una flexibilidad total en cuanto dependen de elección entre alternativas que pueden ser radicalmente diferentes. Estos términos son: el empleo de los materiales, el tratamiento de la cimentación, los tiempos de ejecución y la eficiencia de la obra.

Diseñar una presa es por lo tanto una operación extremadamente compleja y es mucho más que un simple análisis de estabilidad. Es una operación que incluye verificaciones y cálculos numéricos, pero sobre todo requiere una serie de consideraciones, raciocinios y controles que son la verdadera esencia del trabajo del proyectista.

## **LA SEGURIDAD**

La seguridad de la presa es sin duda el requerimiento más importante del proyecto y tiene que ser controlada con todos los medios disponibles.

La catástrofe de Teton ha resaltado la importancia de las verificaciones de permeación que deben ser efectuadas tanto sobre la presa como sobre las hombreras y fundación.

De fundamental importancia es la verificación de la sismicidad. Naturalmente el sismo del proyecto es un dato que no puede ser controlado y es establecido en base a criterios probabilísticos, como para las grandes crecidas en los ríos. En otras palabras: siempre puede ocurrir un terremoto de intensidad tal que haga derrumbar cualquier presa, aun con probabilidad muy escasa.

Las verificaciones que deben ser ejecutadas durante el diseño de una presa en material suelto, son:

- desbordamiento, del cual depende el borde libre y el dimensionamiento de las obras de descarga.
- permeación, que influencia los dispositivos de estanqueidad, la pantalla de inyecciones, los filtros y el sistemas de drenaje de las hombreras,
- deformabilidad, que define la geometría de la sección y las condiciones de puesta en obra,
- durabilidad, que condiciona la protección de los parámetros y de las orillas del embalse.

## **LA CONSTRUCCION**

Parece natural pensar y es también opinión bastante común, que la función del proyectista termina una vez iniciada la construcción. En realidad una presa en tierra o en enrocado es una estructura delicada y compleja y muchos de los elementos utilizados en su diseño son indeterminados y variables. Por esta razón la presencia y la acción del proyectista debe continuar también durante la construcción para escoger las tecnologías a ser utilizadas, clasificar los materiales empleados o introducir nuevos materiales.

## **LA EVALUACIÓN FINAL**

Muy raramente se pide al proyectista controlar y evaluar la calidad de la obra diseñada. Sin embargo la fase conclusiva del trabajo del proyectista es indispensable para asegurar el valor real de la inversión y su nivel de seguridad, bien como para desarrollar las técnicas y la metodología de diseño.

En la mayoría de los casos la evaluación final es realizada por personas ajenas a la obra según procedimientos superficiales o de toda manera poco adecuados para verificar los verdaderos problemas.

Para modificar esta situación es necesario el apoyo legislativo y una reglamentación específica. En particular, aquí, en la República Dominicana donde recién se ha empezado el empleo de presas de material suelto de cierta envergadura, que de toda manera podrá tener un gran desarrollo en un futuro próximo, sería deseable que la ley se preocupe de proporcionar la preparación de técnicos en un campo tan complejo, imponiendo la enseñanza de asuntos prácticamente desconocidos en los centros universitarios y de formación.

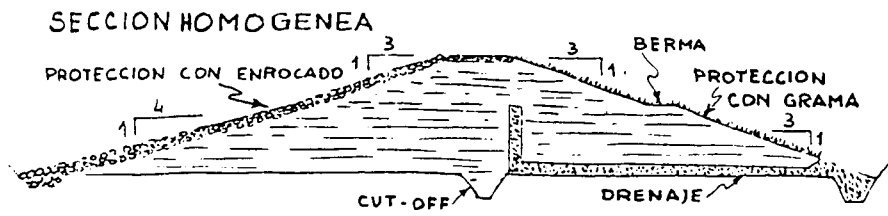
En un artículo de 1974 sobre la legislación de la seguridad de las presas, Sower escribía:

“Hay coeficientes humanos inherentes a cada actividad. El proyecto puede contener errores, la construcción puede ser ejecutada en modo incorrecto, el mantenimiento puede ser ineficaz. La gente puede excitarse hasta creer que promulgando leyes y preparando reglamentaciones se puede asegurar el éxito. La experiencia ha demostrado lo contrario. A pesar de que muchas leyes y reglamentos están en vigor desde hace casi un siglo, no hay datos que demuestren que la calidad de las presas ha mejorado o que la frecuencia de los desastres se ha reducido por efecto de las leyes. La eficacia de una ley depende exclusivamente de sus operadores.....”

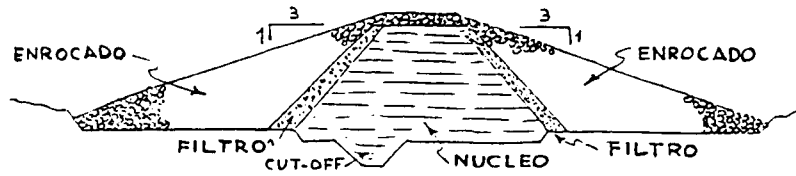
Especialmente en el campo de la hidráulica y de las construcciones hidráulicas es indispensable basarse sobre conceptos prácticos más que en fórmulas teóricas.

Hace 500 años el grande maestro Leonardo da Vinci afirmaba un principio todavía válido y siempre actual: “Se t’addiviene di trattar dell’acque, ascolta prima l’esperienza, poi la ragione” (Si necesitas manejar las aguas, escucha primero la experiencia y después la razón).

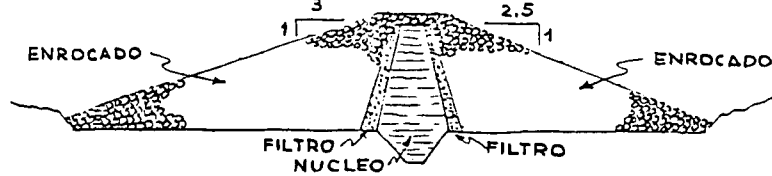
FIG. 1 SECCIONES TIPICAS



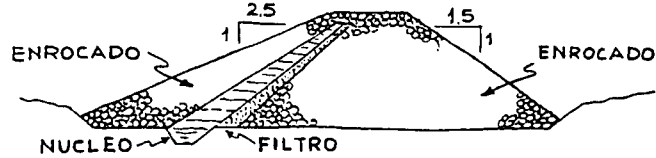
SECCION ZONIFICADA CON NUCLEO ANCHO



SECCION ZONIFICADA CON NUCLEO DELGADO



SECCION ZONIFICADA CON NUCLEO INCLINADO



SECCION CON MANTO IMPERMEABLE

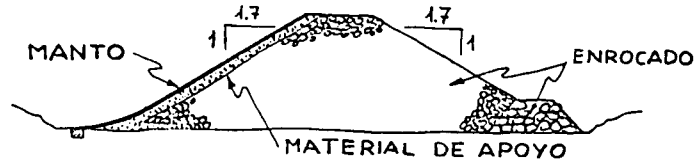


FIG. 2 EVOLUCION DE LA SECCION HOMOGENEA

SECCION SIMPLE



CON DRENAJE AL PIE



CON DRENAJE HORIZONTAL



CON DRENAJE VERTICAL

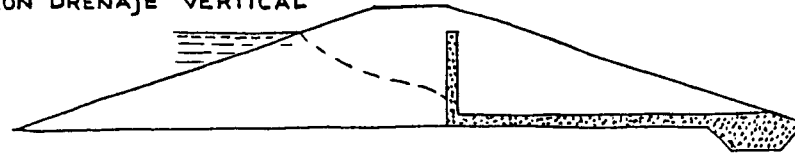
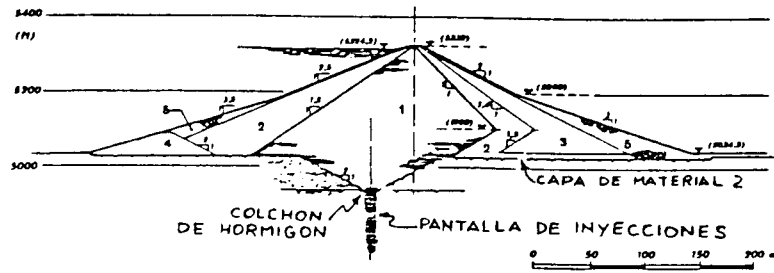
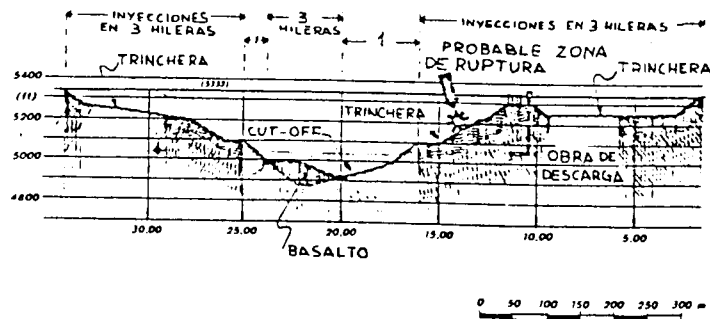




FIG. 3 LA PRESA DE TETON

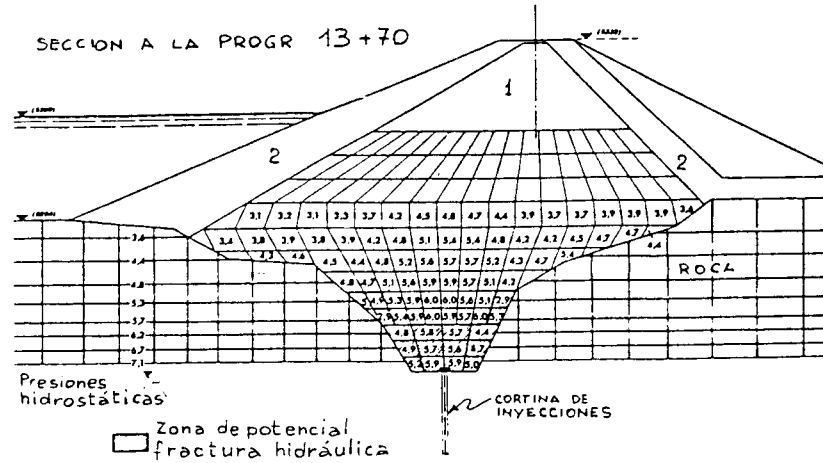


- 1 arcilla, limo, arena y piedras compactados en capas de 15 cm.
- 2 arena, grava y piedras compactados con tractor en capas de 30 cm.
- 3 materiales varios compactados con rodillo en capas de 30 cm.
- 4 arena grava y piedras compactados con rodillo en capas de 30 cm.
- 5 piedras vaciadas en capas de 1 m.

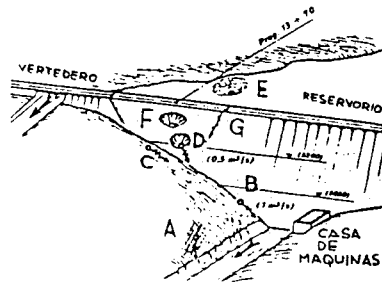


Sección longitudinal vista desde aguas arriba y tratamiento de la cimentación

FIG. 4 LA PRESA DE TETON



VALORES DE LAS TENSIONES PRINCIPALES MENORES



- A 03 JUNIO 1976
- B 05 JUNIO 7,00 h.
- C 05 JUNIO MAÑANA
- D 05 JUNIO 10,30 h.
- E 05 JUNIO 11,00 h.
- F 05 JUNIO 11,30 h.
- G 05 JUNIO 11,55 h.

FENOMENOS OBSERVADOS DURANTE EL DERRUMBE