

Curso

básico de ingeniería de presas



INTRODUCCIÓN

En un esfuerzo conjunto la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato y la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, organizaron dentro del marco de la 9ª, Expoagua, el curso de Ingeniería de Presas.

El objetivo de este curso fue dar a conocer a los participantes los estudios básicos para la ubicación y construcción de presas.

Estuvo dirigido a profesionistas de la rama de la construcción de presas, universidades y personal del sector público relacionado con la construcción y operación de presas.

Se tuvo una asistencia mayor a la programada con un total de 36 participantes, el curso se desarrollo del lunes 3 de noviembre al jueves 6 de noviembre, esté último día con una visita a la presa de Ortega en el municipio de Irapuato, Gto. y la cual se encuentra actualmente en proceso de construcción con un avance del 35 %.

Las ponencias estuvieron a cargo del Ing. Eugenio Ramírez Rodríguez, con una ponencia de introducción de presas, seguido por el Ing. Humberto Luna Núñez, especialista en hidráulica y con una vasta trayectoria en el diseño de este tipo de obras, así como del Ing. Jorge E. Castilla Camacho, experto en geotécnia de presas y del Ing. Macario Vega Pérez, cerrando el curso con impactos socio económicos el Ing. Adrián Avila Reyes de la CEAG.

PROPÓSITO DE LAS PRESAS

Las presas son obras de ingeniería que contribuyen al logro de mejores niveles de bienestar para las sociedades. Esto se entiende cuando clasificamos a las presas por su función y su uso económico.

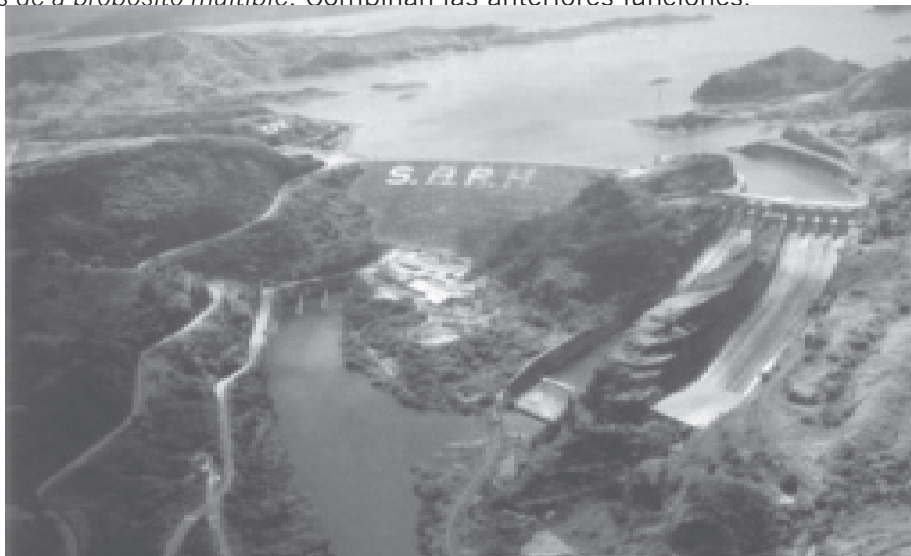
Clasificación de las presas por su función:

- *Presas de almacenamiento.* Almacenan los escurrimientos superficiales de una determinada sub-cuenca hidrográfica para su aprovechamiento económico y recreativo.

- *Presas para regularización de avenidas.* Retienen temporalmente escurrimientos superficiales torrenciales y los descargan hacia aguas abajo de manera controlada. Protegen contra inundaciones a zonas urbanas, industriales y agrícolas. Salvan vidas y evitan grandes pérdidas económicas.

- *Presas derivadoras.* Elevan el tirante normal de una corriente para desviar caudal hacia las márgenes y conducirlo a un aprovechamiento de tipo económico o recreativo.

- *Presas de a propósito múltiple.* Combinan las anteriores funciones.



▲ Presa para uso agrícola y generación de energía

Clasificación de las presas de almacenamiento por su uso:

- *Abastecimiento urbano e industrial (agua potable y usos industriales)*
- *Irrigación (riego agrícola)*
- *Generación hidroeléctrica*
- *Piscicultura y abrevadero*
- *Recreación y deporte*
- *Usos múltiples (combinación de las anteriores)*

HISTORIA

Desde sus comienzos en una era distante, la Ingeniería de presas ha evolucionado desde trabajos burdos hasta sistemas cada vez más complejos. La construcción de presas en la antigüedad fue un arte desarrollado mediante simple experimentación. A lo largo de los siglos, el arte gradualmente se combinó con la ciencia.

Los constructores de las primeras presas empleaban los materiales aluviales disponibles a lo largo de las corrientes. Construían terraplenes muy precarios, fácilmente erosionables por las avenidas o crecientes. Por consecuencia, las presas de tierra inspiraron poca confianza durante miles de años.

En varias partes del mundo se construyeron presas con fragmentos de roca. En Egipto existen restos de la presa Sadd el-Kafara, del 2600 al 2900 antes de Cristo. Era una presa de enrocamiento, de 14 metros de altura, con taludes revestidos de mampostería y con un núcleo de boleos y grava. El tramo central de la cortina fue destruido por desbordamiento de la cortina (capacidad insuficiente del vertedor) y porque los materiales del núcleo no tenían suficiente protección contra erosión. La insuficiente capacidad de los vertedores ha sido a lo largo de la historia la causa de falla de muchas presas.

Con el paso del tiempo, mejoraron las técnicas de construcción. Los Romanos construyeron muchas presas de mampostería con mortero muy durables. Algunas de ellas están aún en servicio, con sus grandes vertedores atestiguando que Los Romanos entendían los fundamentos de la ingeniería de presas. Algunos historiadores afirman que Los Romanos fueron los creadores de la presa de arco. Una estructura de este tipo se construyó en una región cercana a la actual frontera entre Turquía y Siria.

Una presa notable del período Mongol en Persia fue construida en un estrecho cañón del río Kebar, unos 24 km al sur de la ciudad de Qum. Data del año 1300 después de Cristo, aproximadamente, y quizás es la estructura en arco más antigua que existe. Tiene 26 m de altura y 55 m de longitud. La cortina es de mampostería cementada y revestida con bloques de piedra. El arco está empotrado en las paredes del cañón.

La ingeniería de presas de contrafuertes o machones avanzó con la construcción de la presa de Albuera de Feria o Almendralejo, cerca de Badajoz, España, en 1747. Es una estructura de mampostería de 23.5 m de altura y 170 m de longitud con contrafuertes en su cara de aguas abajo. Este concepto de diseño fue llevado a América por los hispanos. Durante la época virreinal fueron construidas en México muchas presas de mampostería con contrafuertes y algunas de ellas todavía existen.

Se considera que la primera presa de arcos múltiples es la estructura de mampostería llamada Meer Allum, construida cerca de Hyderabad, India, cerca del 1800. Tiene aproximadamente 12 m de altura y 762 m de longitud.

No existieron suficientes criterios racionales de diseño de presas sino hasta alrededor del año 1850. La rotura de la presa Puentes sobre el río Guadalquivir en España, ocurrida en 1802, demostró lo inadecuado de algunos métodos empíricos de diseño. Esta presa tipo gravedad de 50 m de altura trató de desplantarse completamente sobre roca; sin embargo, al inicio de la construcción se descubrió bajo el cauce un depósito

aluvial de gran espesor que llevó a tratar de mejorar la cimentación mediante un sistema de pilotes de madera y contravientos. Luego de 11 años en servicio, se perdió la subestructura de cimentación bajo el desplante en la zona del cauce dejando a la cortina con una enorme brecha bajo ella.

La ingeniería europea de presas de gravedad experimentó grandes progresos durante el siglo XIX. En 1853, el ingeniero Francés M. de Sazilly sostenía que las presiones bajo una cortina no debían rebasar ciertos límites y que éstas tenían que dimensionarse para evitar el deslizamiento. Aproximadamente 25 años después, en Inglaterra, W. J. M. Rankine expuso el concepto de mantener la resultante de las fuerzas dentro del tercio medio de cada plano horizontal de la cortina. Ambos conceptos condujeron hacia análisis lógicos de las presas de gravedad.

Mientras que el criterio del tercio medio fue generalizándose para verificar la estabilidad contra volteamiento de las presas de gravedad de altura moderada, los ingenieros comenzaron a reconocer la importancia de la sub-presión hidráulica y el deslizamiento. En la presa Vyrnwy, construida entre 1882 y 1890 en Inglaterra, fue adoptado por primera vez un sistema de drenaje para limitar la sub-presión hidráulica bajo el desplante de la cortina.

A partir de 1900, comenzaron a verse avances importantes en la tecnología del concreto, como el control preciso de las mezclas, vibración, cementos especiales, puzolanas, procesamiento de agregados, aire atrapado, enfriamiento y aditivos. Estos avances se ejemplifican en el diseño y la construcción de estructuras monumentales como las presas Hoover, EUA (1932) y Grand Dixence, Suiza (1962).

El desarrollo de la práctica de construcción de presas de tierra se aceleró en el siglo XIX cuando la maquinaria reemplazó a los animales en el transporte y compactación de materiales. Poco después del 1900 se completó la transición entre el equipo ligero de tracción animal y el equipo pesado como los compactadores pata de cabra y los tractores de oruga. Para el año 1940 se habían desarrollado grandes equipos para el movimiento y compactación de tierra y enrocamiento. En los 50's y 60's se extendió el uso del compactador vibratorio, primero en arenas y gravas y luego en enrocamientos. Esto tuvo una importante influencia en las presas cuando se comenzaron a emplear enrocamientos compactados en vez de enrocamientos a volteo.

El incremento en la capacidad de los equipos de construcción trajo la tendencia a realizar terraplenes cada vez mayores, aunado al reconocimiento de que este tipo de estructuras se adaptan mucho mejor que las cortinas rígidas a un amplio intervalo de condiciones de las boquillas.

La construcción de cortinas de enrocamiento cobró gran ímpetu en Estados Unidos con la presa Springs, California (1931) con una altura record de 100 metros. Consta de una cortina de enrocamiento a volteo con cara de concreto en el talud de aguas arriba, según el diseño usual hasta mediados del siglo XX. Algunos enrocamientos a volteo con losas de concreto aguas arriba sufrieron grandes asentamientos y fugas de agua y su uso disminuyó cuando se optó por los enrocamientos con núcleo de arcilla compactada en los 40's y los enrocamientos compactados con cara de concreto en los 60's. Algunos enrocamientos recientes han batido récords de altura, como la presa Esmeralda (Chivor), Colombia, 1975 (237 m) y Chicoasén, México, 1980 (261 m), ambos con núcleo de arcilla compactada.

El tamaño de las estructuras de tierra de reciente construcción también ha aumentado, como la presa Oroville, EE.UU., 1968 (230 m), Mica, Canadá, 1973 (242 m) y Nurek, Rusia, 1980, (300 m). Las estructuras térreas de estas presas tienen respaldos de grava.

Hasta el siglo XX la mayor parte del conocimiento aplicado al diseño de presas de tierra era empírico. No era sencillo evaluar racionalmente su capacidad para soportar solicitaciones externas; sus límites eran definidos principalmente con base en la expe-

riencia por accidentes y fallas. En contraste, los métodos analíticos empleados en las presas de concreto y mampostería se consideraban muy confiables, no obstante que se derivaban de conceptos simples. Por ejemplo, las presas de gravedad se dimensionaban para resistir ampliamente el deslizamiento y el volteo, por lo que los esfuerzos de tensión calculados en estas estructuras eran por lo general mínimos.

Los análisis numéricos para el diseño de presas de concreto y de tierra han mejorado sustancialmente durante los últimos 60 años. En esto, la ciencia ha desempeñado un papel prominente, haciendo posible que ahora los ingenieros conciban y construyan estructuras cada vez más grandes, económicas y seguras, enfrentados a la realidad de muy pocos sitios ideales. La combinación permanente de los enfoques prácticos y científicos en el diseño y construcción de presas ofrecen una buena plataforma para futuros avances.

ASPECTOS BÁSICOS

Las fronteras de la Ingeniería de presas se han expandido básicamente por la aplicación de lecciones aprendidas de proyectos que han fallado. La mayoría de los problemas se atribuyen a causas simples, que en ocasiones tienen que ver con una mala estimación de la capacidad del terreno de cimentación. Las habilidades de las formaciones geológicas de las boquillas y vasos para impedir o para facilitar el paso del agua varían dentro de amplios intervalos. Cada sitio tiene características únicas que requieren especial consideración por parte del ingeniero.

Además de enfrentar los retos técnicos de sitios cada vez más difíciles para las presas del futuro, el ingeniero tiene que conocer cómo se resolvieron en el pasado los problemas de sitios difíciles. Algunas de las variables críticas y el funcionamiento seguro de las presas se relacionan con el comportamiento estructural e hidráulico de su cimentación. Sin embargo, los estudios geotécnicos realizados para el diseño de las presas no pueden revelar al detalle las condiciones del sitio para definir con anticipación las zonas más vulnerables. La magnitud y localización de las zonas críticas de las presas se conocen hasta que el embalse lleva varios años de operación.

175

La ingeniería de presas requiere que sea reconocido el potencial destructivo de un embalse sin control. Para asegurar que las fuerzas involucradas estén bajo control, éstas deben neutralizarse o deben canalizarse de una forma segura. Una presa altera necesariamente el equilibrio natural que existía en el sitio de construcción. Conforme el agua es almacenada, se desarrolla un nuevo régimen de flujo interno a través de las barreras que forman el embalse. Las características de los materiales de la presa y de su cimentación comenzarán a sufrir cambios y comenzará una transición gradual de sus propiedades. La resistencia de las formaciones naturales a la aplicación de esfuerzos dependerá en gran medida de los efectos del flujo subterráneo del agua, llámese erosión interna, disolución de minerales o presiones intersticiales.

La evaluación del comportamiento de presas requiere del manejo de tecnologías y prácticas utilizadas por diferentes ingenieros a través de muchos años. Por razones de continuidad, los diseñadores de presas deberán involucrarse en la construcción y en la operación para compartir su conocimiento de cómo se espera funcione el proyecto y para ayudar a comparar las condiciones reales de la obra contra las suposiciones del diseño. Los ingenieros responsables del diseño y construcción desarrollan un conocimiento íntimo de los materiales y de la cimentación que les permite pronosticar en qué partes de la boquilla y de la estructura puede haber problemas potenciales. Para facilitar futuros análisis, deberán registrarse todas las opiniones técnicas e informes producidos por ellos. Los responsables de la operación de la presa que no conozcan esa información estarán en desventaja conforme envejece la estructura. Por todo lo anterior, es posible que una presa que sobrevive a sus constructores pueda convertirse en un enigma con el paso del tiempo.

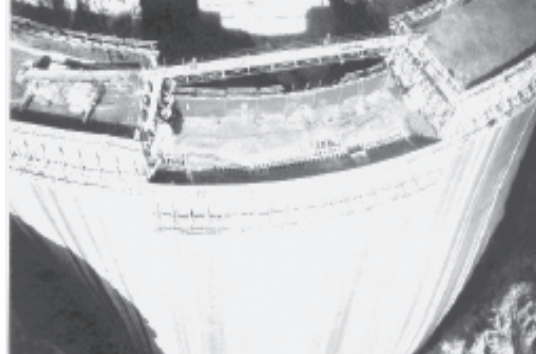
TIPOS DE CORTINA

Las cortinas de las presas se clasifican según sus materiales y la forma de la cortina.

En México son más comunes las de tipo homogéneo y las de materiales graduados (zonificadas). Otros tipos son las de enrocamiento con núcleo impermeable o con cara de concreto y las presas de concreto o mampostería cuya estabilidad depende de su peso (gravedad) o de su forma (arco) y las de contrafuertes o machones (variante de las presas de gravedad). Las estructuras de contrafuertes pueden ser del tipo Ambursen (losa plana), arco múltiple y de cabeza masiva. Algunas presas combinan varios materiales: terracerías, enrocamiento, mampostería y concreto. Unas pocas tienen membranas impermeables de materiales sintéticos, de mezclas asfálticas o de madera.



▲ Materiales graduados



▲ Concreto tipo arco o bóveda



▲ Tipo enrocamiento

La topografía de la boquilla y la geología son los principales factores a considerar al elegir el mejor tipo de cortina. La combinación de las características del sitio mencionadas influye en la distribución de cargas sobre la cimentación y en los patrones de flujo interno desde las márgenes del vaso. Cuando existen diferencias bruscas en la deformabilidad y en la forma de la boquilla se generan fuertes concentraciones de esfuerzos en la cortina.

Las cortinas de tierra en particular pueden resultar dañadas por distorsiones en puntos críticos debido a asentamientos diferenciales por la forma de la boquilla. Las deformaciones pueden abrir vías de agua que resultan muy peligrosas. Es muy difícil la compactación de las terracerías junto a

los conductos que atraviesan a las cortinas de este tipo. Por esta razón han ocurrido muchas fallas al producirse erosión interna con arrastre de partículas de suelo.

Las presas de tierra bien diseñadas y construidas son capaces de soportar fuertes movimientos sin problemas; sin embargo, tienen poca resistencia contra los efectos del desbordamiento, por lo que el bordo libre y la capacidad del vertedor deben determinarse lo más conservadoramente posible. En contraste, las presas de concreto pueden soportar durante varias horas el desbordamiento sin problemas, siempre y cuando el terreno de cimentación inmediatamente aguas abajo de la cortina no sufra erosión grave por el impacto del agua.

Las cortinas de arco pueden soportar grandes cargas, pero su integridad depende necesariamente de la resistencia de los empotramientos. Las presas de este tipo pueden fallar por el deterioro de la roca de apoyo o por esfuerzos cortantes debido a la presión del

agua. El arco también puede debilitarse a consecuencia de erosión en la cimentación.

Las cortinas de gravedad son notables por su durabilidad. Por su gran masa, soportan más fácilmente el intemperismo y las deficiencias de la boquilla. No obstante, estas presas han fallado cuando los elementos de la cimentación son susceptibles al deslizamiento. Algunas presas de contrafuertes presentan también esta tendencia.

Cada tipo de cortina tiene sus rasgos distintivos, pero pueden darse variantes ingeniosas. Por ejemplo, las cortinas de concreto compactado con rodillo (CCR) combinan las ventajas de las terracerías y del concreto con la rapidez de construcción y economía, más la posibilidad de adoptar formas de arco, por lo que con esta moderna tecnología pueden obtenerse estructuras con alto grado de eficiencia. Cuando se consideran las características específicas de un sitio, un cierto tipo de cortina mostrará ventajas y desventajas. La elección del mejor tipo de cortina dependerá del juicio ingenieril y de la tecnología disponible para obtener una obra segura, económica y estética.

ELEMENTOS DE INGENIERÍA DE PRESAS

La Ingeniería necesita revisar y ajustar periódicamente sus perspectivas. Las prácticas establecidas deben reexaminarse conforme los recursos son más escasos y las demandas se incrementan. Los viejos métodos no deben abandonarse y tampoco lo nuevo tiene que ser automáticamente aplicado. Cada época tiene que probarse conforme a las circunstancias del momento.

No obstante los avances recientes, la Ingeniería de presas adolece de importantes limitaciones. Por ejemplo, la magnitud y el carácter del riesgo no son aún predecibles en cada caso particular. El principal objetivo sigue siendo reducir las incertidumbres a través de la investigación y la adopción de acciones preventivas.

En la concepción de un proyecto se deberá examinar el escenario en su conjunto para prever los problemas. Los ingenieros, aliados con los científicos, geólogos, sismólogos e hidrólogos unirán sus conocimientos e ideas para seleccionar y diseñar el tipo de presa más conveniente a fin de soportar las solicitudes de diseño. Esta colaboración es un proceso continuo y los problemas no resueltos prevalecen aún después de que las obras se ponen en servicio. El riesgo debe reconocerse como una variable dependiente de las condiciones estructurales del sitio. El enfoque racional de la ingeniería de presas requiere anticiparse al arreglo de circunstancias que pueden presentarse a la luz de las experiencias de las presas donde fueron excedidos los límites tolerables. En la consideración de las debilidades potenciales, el ingeniero debe permanecer alerta con respecto a las inexactitudes de las técnicas de muestreo de campo y de laboratorio dado que los resultados varían dentro de un amplio intervalo. Los materiales en la naturaleza pueden tener propiedades que en promedio satisfacen nuestros requerimientos, pero que son inaceptables cuando se juzgan por sus variaciones.

La no uniformidad de los materiales es una fuente de problemas en algunas presas de concreto antiguas y también explica muchas de las deficiencias de las presas de tierra. Los terraplenes nunca resultan completamente homogéneos a pesar de una estricta supervisión durante su construcción. Durante el diseño se supone uniformidad para fines de análisis, sin embargo, los materiales en la presa son variables. Los bancos de préstamo producen materiales diferentes a los que se esperaban. Una capa permeable colocada en una zona diseñada como impermeable constituye un conducto a través de la cortina y una capa impermeable que pretendía ser permeable impedirá el drenaje necesario. La falta de filtros entre una zona de finos y otra de material grueso resultará en migración de partículas de una zona a otra. El contenido de agua, la densidad y la granulometría de los materiales en un terraplén nunca serán uniformes. Además, la consolidación hará que la permeabilidad varíe considerablemente desde el desplante hasta la corona de la cortina. Para enfrentarse con estas condiciones, el diseño racional de presas de tierra requiere de varias líneas de defensa. Filtros y drenaje son líneas de defensa vitales para controlar condiciones de flujo que los cálculos no pueden predecir. El

flujo de agua puede causar gran daño cerca de la superficie de desplante de las cortinas de tierra y una pantalla de inyecciones por sí sola no puede proteger adecuadamente a los materiales porque dichas pantallas son menos efectivas en su parte superior, donde las presiones de inyectado tienden a ser bajas. Por tanto, la cortina de tierra debe quedar protegida en el desplante mediante tapetes de consolidación, relleno de oquedades con mortero fluido y regularización de la superficie de desplante con concreto dental.

La ingeniería a la defensiva requiere incorporar medidas de protección para contrarrestar las condiciones adversas que puedan presentarse. Cada proyecto demanda sus propias acciones para enfrentar los peligros inherentes al sitio de construcción. Aún después de exploraciones, ensayos y análisis exhaustivos, el ingeniero de diseño debe tener en mente las incertidumbres e incorporar suficientes medidas preventivas para compensarlas.

En el diseño y análisis de presas, los criterios derivados de suposiciones razonables pueden ser de mucho más valor que los calculados con base en información incierta. Dado que la construcción de presas requiere del uso de materiales y terrenos de cimentación que son inherentemente no uniformes, el ingeniero debe mantener una perspectiva realista sobre sus capacidades y limitaciones cuando aplica métodos científicos al análisis de presas. El uso de dispositivos y técnicas sofisticadas pueden dar una impresión errónea de precisión. Las teorías parten de premisas válidas dentro de intervalos limitados y casi todas deben comprobarse mediante la experiencia práctica. Los ingenieros deben desarrollar y ejercitar al máximo su propio juicio en el análisis de las presas, con base en la teoría y la práctica.

PROGRESOS RECIENTES

En el pasado, con muchos sitios favorables para presas y amplios recursos, las limitaciones de la ciencia se superaban mediante presupuestos generosos. Enormes presas permanecen como monumentos a esa era y a los grandes ingenieros que las concibieron. Esas obras sobrevivirán seguramente a nuestra civilización; soportarán seguramente las máximas avenidas y sismos y las consecuencias del inevitable abandono porque fueron inversiones públicas muy sólidas.

Por el contrario, ahora es más importante que nunca el uso racional de los recursos. Los criterios de diseño deben racionalizarse para evitar excesos. Se necesita determinar niveles aceptables de riesgo para diferentes escenarios y deberá justificarse toda diferencia de criterios para presas antiguas y nuevas.

Los métodos de la ingeniería de presas han evolucionado con las aportaciones técnicas de un conjunto de distinguidos profesionales. Por otra parte, las revisiones o las excepciones a la práctica ingenieril establecida no debieran plantearse a menos que existan razones de peso. No obstante lo anterior, está claro que se requieren mayores avances de la ingeniería de presas, sobre todo tratándose de evaluación de las estructuras más antiguas. Deben encontrarse métodos prácticos y eficientes para mejorar las condiciones de seguridad de presas con deficiencias estructurales. Un recurso que debe estimularse al máximo es la habilidad de los ingenieros para innovar en forma efectiva.

El acelerado desarrollo tecnológico de los tiempos actuales contrasta vivamente con la gradual evolución de la teoría y práctica de los siglos recientes.

A continuación se describen algunas de las contribuciones recientes para el avance de la ingeniería de presas.

Sismología

Se han realizado importantes avances en el modelado matemático de zonas sísmicas en la cercanía de los epifocos. Se emplean procedimientos mejorados para estimar la atenuación de las aceleraciones y para definir espectros de diseño.

Métodos mejorados para el tratamiento de cimentaciones

Hay un mayor reconocimiento de la importancia de inyectar las discontinuidades de los macizos rocosos con mezclas estables a altas presiones. Existen métodos novedosos para mejorar las mezclas y lograr mayor penetrabilidad dentro de las fisuras, por ejemplo,

el empleo de molinos de cemento mediante discos de muy alta velocidad instalados entre las mezcladoras de la planta de inyectado, para obtener mezclas estables con una mucho mayor capacidad de penetración.

Los suelos permeables de cimentación (acarreos aluviales) pueden inyectarse a profundidad utilizando bombas de alta presión que además pueden registrar y graficar automáticamente las variables del proceso. Para mayor efectividad, son empleadas mezclas cemento-bentonita, bentonita defloculada y mezclas basadas en silicatos.

Cuando no es factible la pantalla de inyecciones o su utilidad está en duda, se puede optar por muros-diafragma verticales (trincheras estabilizadas con mezclas autofraguantes cemento-arcilla, trincheras estabilizadas con lodos luego desplazados con concreto convencional o concreto plástico). Los materiales más deformables son preferibles en cimentaciones sobre acarreos aluviales, especialmente cuando las cargas sísmicas son severas. Se han tenido avances notables en técnicas y equipos para la construcción de estos muros.

Progresos en Mecánica de Suelos

La exploración de sitios de construcción ha mejorado con el avance de los métodos geofísicos y con el uso de aparatos para pruebas in-situ.

Ha mejorado la técnica para el ensaye y el tratamiento de los suelos dispersivos, los cuales son altamente susceptibles a la erosión coloidal. Para la identificación de estos suelos fue desarrollada la prueba del "pinhole". Está confirmado que la principal característica de la mayoría de los suelos dispersivos es un alto contenido de sodio en el agua intersticial. Algunos terraplenes antiguos construidos con suelos dispersivos han sido tratados exitosamente con aditivos (alúmina, yeso o cal hidratada) para mejorar su resistencia a la erosión coloidal.

Se han definido criterios para identificar suelos susceptibles a la licuación y son utilizados nuevos enfoques para el análisis dinámico de terraplenes y cimentaciones que contienen este tipo de suelos.

179

Amplios estudios han permitido comprender mejor los mecanismos del fracturamiento hidráulico, erosión interna, hundimientos por consolidación y colapso de suelos.

La investigación y las observaciones de campo ampliaron el conocimiento sobre las características esfuerzo-deformación de mezclas de roca y suelo y han sido desarrollados métodos efectivos para el manejo y control de la compactación de estos materiales.

Finalmente, son aplicados criterios confiables en el diseño de filtros y drenes para cortinas de tierra y ahora son más predecibles los efectos sísmicos en los materiales del núcleo y filtros.

Análisis del flujo de agua mediante computadora

El diseño de medidas para el control del flujo de agua en terraplenes y su cimentación puede optimizarse mediante procedimientos de análisis basados en programas de cómputo, lo que permite realizar estudios paramétricos variando la permeabilidad de los suelos y la predicción de presiones de poro para su uso en análisis de estabilidad. El flujo de agua puede simularse usando modelos de analogía eléctrica o con técnicas de elemento finito. Pueden introducirse factores de seguridad para tomar en cuenta la variabilidad de los materiales naturales y la eventual disminución de la eficiencia del sistema de control del flujo de agua.

Mejoramiento de los análisis de estabilidad

Complementariamente a los análisis de estabilidad que tradicionalmente son realizados en las presas de tierra, se han utilizado modelos de elemento finito para calcular el estado de esfuerzos y deformaciones de los terraplenes y su cimentación.

La misma herramienta analítica se emplea para estimar la respuesta de las estructuras de tierra ante sollicitaciones dinámicas por sismos.

Membranas sintéticas

Bajo ciertas circunstancias, las geomembranas y geosintéticos ganan cada día más aceptación para su uso como barreras impermeables, filtro, drenaje y refuerzo de suelos.

Tierra reforzada

Técnicas modernas de tierra reforzada con geomallas han sido utilizadas en la construcción y rehabilitación de presas de tierra. También se construyen muros de tierra reforzada para sobrelevar terraplenes desplantados sobre suelos blandos y compresibles que no admiten sobrecargas adicionales excesivas.

Construcción sobre cimentaciones térreas

La compactación dinámica se usa cada vez más para el mejoramiento de cimentaciones en suelos. En la construcción de la cortina de tierra y enrocamiento Jebba Main, Nigeria, la densificación masiva del terreno de cimentación fue realizada mediante explosiones a profundidad y vibrocompactación. En la presa Peñitas, México, se mejoró el terreno de cimentación de la cortina mediante compactación dinámica empleando un martillo de gran peso en caída libre desde una torre. Estos procedimientos fueron efectivos para mejorar arenas aluviales que en su estado natural formaban bolsas de material suelto a diferentes profundidades.

La presa Tarbela, Pakistán, estableció un nuevo récord como la mayor cortina de tierra construida en el mundo. Para enfrentar los enormes retos técnicos que imponían las difíciles condiciones del sitio fueron desarrollados métodos constructivos innovadores. La cortina principal se desplantó sobre material aluvial del río Indus con espesores de hasta 213 metros que incluía algunas bolsas y estratos de boleas y grava de estructura abierta. Los dispositivos para controlar el flujo del agua a través y bajo la cortina incluyeron a un núcleo inclinado, un extenso delantal impermeable aguas arriba de la presa, pantallas de inyección y drenaje, un tapete de drenaje, un colector en galería, pozos de drenaje y algunas inyecciones de las gravas abiertas de la cimentación. El flujo subterráneo y el comportamiento de la cimentación fueron monitoreados y evaluados con la ayuda de equipo electrónico.

Enfoques innovadores en la Ingeniería de los enrocamientos

El rasgo principal del diseño moderno de los enrocamientos es la compactación de los materiales con rodillos vibratorios. Otra significativa mejora es la zonificación de los materiales en la cortina. También ha avanzado el diseño y las técnicas de construcción para las losas de concreto en el talud de aguas arriba de las cortinas de enrocamiento.

Han sido diseñadas y construidas presas de enrocamiento reforzado con mallas de acero y barras de anclaje profundas para cortinas vertedoras en toda su longitud.

En Rusia se han construido cortinas de enrocamiento mediante voladuras directas efectuadas desde cornisas localizadas en las paredes del cañón.

Para la construcción de la presa Aswan, Egipto, fue colocado un gran volumen de enrocamiento bajo agua y a volteo desde barcazas y cable-vías. En el cuerpo de la cortina se colocó arena bombeando una mezcla en suspensión mediante tuberías. La capa arenosa superficial del terreno de cimentación de la cortina se compactó bajo agua mediante unidades vibratorias rodantes operadas a control remoto desde instalaciones flotantes.

Avances en la tecnología del concreto para presas

Existe nueva información sobre la resistencia a tensión del concreto y sobre las relaciones entre las resistencias a tensión estáticas y dinámicas.

La sílica ha mostrado su gran utilidad para mejorar las propiedades del concreto. Por su tamaño dos órdenes de magnitud más finas que las del cemento Pórtland, las partículas de sílica funcionan como "*microfiller*" y tienen un efecto de puzolana, por lo que reducen

la permeabilidad del concreto e incrementan su capacidad de deformación.

Existen métodos simplificados de análisis para determinar la respuesta de presas de gravedad ante sismos, incluyendo los efectos de la interacción de la presa con el embalse y con la cimentación.

La mecánica del fracturamiento elástico lineal se ha utilizado en el análisis de la formación y propagación de grietas en presas de concreto sujetas a cargas dinámicas.

En la presa Tarbela, Pakistán, se emplearon concretos especiales para resolver problemas de cavitación y erosión en estructuras. Fueron colocados grandes volúmenes de concreto compactado con rodillo (CCR) para proteger taludes de roca y cimentaciones; se utilizaron concretos reforzados con fibras para reparar vertedores y tanques amortiguadores.

En la reparación de concretos dañados por cavitación o erosión se han empleado compuestos sintéticos e impregnación de polímeros.

Para la reparación y sellado de grietas en cortinas de concreto se han inyectado a presión resinas sintéticas. Estos materiales de baja viscosidad pueden penetrar grietas muy finas y después de su fraguado son deformables y altamente adhesivas.

Para mejorar la estabilidad de presas de concreto se han usado con éxito anclajes verticales presforzados, con protecciones anticorrosivas y otras técnicas que permiten incrementar la adherencia de las barras de acero.

Para presforzar el arco de concreto de la presa Nambe Falls, Nuevo México, fueron instalados gatos planos inflables hidráulicamente en sus empotramientos. Mediciones subsiguientes confirmaron que el presfuerzo fue efectivo.

Finalmente, la tecnología del concreto compactado con rodillo o CCR avanza rápidamente conforme se construyen presas cada vez más grandes con este material. Se ha progresado en el mejoramiento de la impermeabilidad y la durabilidad de este tipo de presas, mientras se mantienen sus ventajas de economía y rapidez de construcción.

181

Mejores técnicas para el análisis hidráulico e hidrológico

Se han desarrollado modelos matemáticos para pronosticar avenidas y simular la operación de los embalses. Los análisis basados en la estimación del riesgo han ganado aceptación para la selección de la avenida de entrada.

Están en continuo desarrollo nuevos dispositivos para incrementar la capacidad de descarga de las obras de excedencias y cada vez se pone mayor énfasis en la aeración de las rápidas de los vertedores para prevenir la cavitación por el flujo a altas velocidades.

Refinamientos en la instrumentación

La instrumentación y monitoreo de presas ha progresado por el empleo de instrumentos con sensores de cuerda vibrante y equipo electro-óptico para la medición de distancias. Muy recientemente, los desplazamientos de las estructuras son monitoreados mediante el uso de geoposicionadores satelitales o GPS.

También ha mejorado la técnica de medición de esfuerzos totales dentro de las presas de tierra mediante el empleo de inclinómetros de lectura remota adosados a las celdas de presión para registrar cualquier cambio de inclinación después de su instalación.

Las innovaciones técnicas de la Ingeniería de presas se desarrollan en nuevos proyectos y en la rehabilitación de estructuras antiguas. Aunque la mayoría de los conceptos avanzados han sido bien probados en la práctica, algunos deberán soportar la prueba del tiempo. Como en muchas situaciones donde se confrontan problemas complejos, las ideas nuevas en la Ingeniería de presas no siempre ganan aceptación inmediata. Escuelas de pensamiento encontradas persisten aún después de examinarse evidencias experimentales. Deberá reconocerse que algunos problemas pueden tener varias soluciones.

En cualquier caso, el pensamiento creativo que propicia el intercambio profesional de ideas siempre traerá beneficios para el avance de la Ingeniería de presas



▲ Inauguración del curso de presas.



▲ Explicación sobre la construcción de la presa en campo (Presa de Ortega).



▲ Ponencia del Ing. Adrian Avila Reyes.



▲ Panorámica de la cortina de la obra en construcción (Presa de Ortega).



▲ Evento de clausura del curso.