

CUESTIONES DEL CONGRESO

Q-73

PROBLEMAS ESPECIALES RELATIVOS A LAS PRESAS DE TIERRA

Jesús Yagüe Córdoba.

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Secretario General del Comité Nacional Español de Grandes Presas.

RESUMEN

Se recoge en el presente artículo una síntesis del Informe del Ponente General de la "Cuestión 73. Problemas especiales relativos a las presas de tierra", así como un resumen de la participación española y del desarrollo de las sesiones referidas a la Cuestión antes mencionada en el Congreso de Grandes Presas de Florencia (Italia) en mayo de 1997.

ABSTRACT

The article presents a synthesis of the Chairman's Report on "Question 73. Special problems of earth and rock dams", and also a summary of the Spanish contribution and of the sessions devoted to Question 73 in the course of the Congress on Large Dams held in Florence in May, 1997.

1. TEMAS TRATADOS EN LA CUESTIÓN 73

Para la Cuestión 73 "Problemas especiales relativos a las presas de tierra" se propusieron los siguientes apartados:

- a) Características mecánicas de los rellenos de tierras, relaciones tensión-deformación, potencial de licuefacción.
- b) Deformaciones estáticas y dinámicas aceptables para las presas de tierra.
- c) Filtración: efectos de la saturación, presiones intersticiales, erosión interna, fracturación hidráulica, influencia del agrietamiento longitudinal y transversal.
- d) Conductos enterrados en las presas de tierra.
- e) Influencia de las condiciones climáticas.

2. INFORME DEL PONENTE GENERAL

Se incluye a continuación un resumen del informe del Ponente General, J. A. Charles del Reino Unido, con la misma estructura en que aquél fue presentado.

2.1. INTRODUCCIÓN

En el pasado, por insuficiencia de conocimientos técnicos, se han construido numerosas presas de tierra que no cumplían totalmente las exigencias de seguridad, economía y durabilidad y algunas de ellas tuvieron un final catastrófico. En 1953, Middlebrooks aseguraba que con el desarrollo de la mecánica de suelos ya se podían construir presas de materiales sueltos seguras y económicas casi en cualquier cimiento y casi con cualquier tipo de ma-

Se admiten
comentarios a este
artículo, que deberán
ser remitidos a la
Redacción de la ROP
antes del 30 de
marzo de 1998.

Tabla 1. Cuestiones similares tratadas en Congresos anteriores

| Cuestión | Congreso | Año | Título de la cuestión |
|----------|----------|------|---|
| Q-44 | 12 | 1976 | Problemas ocasionados por las presas de materiales sueltos de tipos especiales |
| Q-49 | 13 | 1979 | Deterioro o rotura de presas |
| Q-52 | 14 | 1982 | Seguridad de presas en explotación |
| Q-59 | 15 | 1985 | Medidas para mejorar la seguridad de las presas |
| Q-61 | 16 | 1988 | Presas de materiales sueltos: elementos impermeables distintos de los núcleos de tierra |
| Q-65 | 17 | 1991 | Envejecimiento de presas y métodos de reparación |
| Q-68 | 18 | 1994 | Evaluación y refuerzo de la seguridad de presas en servicio |

terial. En su ponencia general, Q-52, en el Congreso de Río de Janeiro, Marinar afirmó que se estaban haciendo presas cada vez más grandes, más baratas y más seguras. A pesar de todo este progreso, la reciente historia de la construcción de presas de tierra y de la explotación de los embalses creados por estas presas no cesa de proporcionar evidencias de que todavía pueden ocurrir problemas graves que pueden dar lugar a pérdidas económicas importantes y, en determinados casos, amenazar a la seguridad pública.

Los problemas específicos de las presas de tierra están relacionados con los siguientes factores:

- defectos en el proyecto o en la construcción;
- algún proceso de envejecimiento;
- incapacidad para soportar condiciones de explotación más adversas que las supuestas en el proyecto o un evento natural extremo como una avenida o sismo no considerado en el proyecto.

Teniendo en cuenta la importancia del tema de esta cuestión, no puede sorprender que se hayan tratado temas similares en cuestiones previas, como se indica en la Tabla 1.

El informe del ponente general se estructura en seis partes: problemas que ocurren en las distintas fases de la vida de una presa de tierras, propiedades de los rellenos de tierra, deformaciones de las presas de tierra, filtraciones (incluyendo erosión interna), conductos que atraviesan las presas de tierra e influencia de las condiciones climáticas.

2.2. FASES DE LA VIDA DE UNA PRESA DE TIERRAS

El informe analiza los diferentes problemas que pueden producirse durante la vida de la presa que se sintetizan a continuación:

▼ **Construcción de la presa.** Para reducir el coste se utilizan materiales locales para la mayor parte del cuerpo de presa. La construcción del relleno contempla la colocación y compactación de materiales no saturados y es primordial la selección de un contenido de humedad apropiado. Debe especificarse el máximo espesor de la tongada admisible, que en el caso de núcleos de arcilla debe ser pequeño. El método de control de compactación es importante, tanto desde un punto de vista económico como técnico. Pueden producirse problemas durante la construcción de una presa, como el desarrollo de elevadas presiones de poros, que pueden comprometer su estabilidad.

▼ **Primer llenado del embalse.** Esta fase es crítica para la seguridad de la presa y la supervisión y auscultación son esenciales. El llenado modifica las presiones intersticiales y el coeficiente de seguridad contra la inestabilidad del talud puede disminuir al comienzo de la puesta en carga. Durante el primer llenado puede producirse colapso del espaldón de aguas arriba si el material de aquél se ha colocado seco o no se ha compactado bien.

▼ **Explotación normal del embalse.** La rotura de una presa en servicio cuando está llena puede tener graves consecuencias. La mayoría de las roturas en este caso son debidas a rebosamiento durante avenidas o a erosión interna. La evaluación de la seguridad de una presa en condiciones normales de explotación debe tener en cuenta las observaciones de campo, aunque éstas no garanticen la seguridad de la presa. Estas observaciones deben hacerse en el marco de una estrategia de gestión de riesgos.

▼ **Descenso rápido del nivel de embalse.** Esta situación puede producir inestabilidad en el espaldón de aguas arriba de material arcilloso si permanecen en aquél fuertes

presiones intersticiales después del descenso rápido de nivel.

Como conclusiones de este apartado se incluyen las siguientes:

▼ Los problemas que afectan a las presas de tierra son diferentes en cada fase de su vida. Los problemas de inestabilidad de taludes son más frecuentes durante la construcción. En explotación normal, la erosión interna es, a veces, un riesgo importante.

▼ La rotura de una presa en construcción puede entrañar sólo pérdidas económicas, mientras que cuando se ha almacenado un gran volumen de agua puede estar amenazada la seguridad pública.

▼ Es esencial imponer especificaciones adecuadas a la colocación y compactación de los rellenos.

▼ Las presiones intersticiales elevadas en el núcleo, durante la construcción, deben considerarse beneficiosas. Sin embargo, conviene tener en cuenta en el proyecto los efectos adversos de tales presiones intersticiales en la estabilidad del talud.

▼ El primer llenado del embalse es una etapa crítica para la seguridad de la presa y son esenciales la vigilancia y auscultación profundas. Pueden aparecer problemas de inestabilidad de talud o de erosión interna. Una velocidad de llenado relativamente lenta debe reducir el riesgo de fractura hidráulica.

▼ Es necesario un método observacional para evaluar la seguridad de la presa durante la explotación normal. Las inspecciones y mediciones de la auscultación deben integrarse en un procedimiento de evaluación de la seguridad.

▼ El descenso rápido del nivel de embalse puede ser una condición crítica para la estabilidad del talud de aguas arriba.

2.3. PROPIEDADES DE LOS RELLENOS DE TIERRA

Las presas de materiales sueltos pueden construirse con materiales de un amplio rango de tamaños con características diferentes.

▼ **Deformación y resistencia.** Las relaciones tensión-deformación del relleno y de la cimentación controlan las deformaciones del cuerpo de presa y las características generales de tales relaciones son bien conocidas, por lo que aquí sólo se consideran tres aspectos:

a) *Reblandecimiento.* Algunos suelos muestran una reducción de resistencia hasta un valor residual una vez que su deformación ha excedido el valor correspondiente a su resistencia máxima y éste se considera que ha sido

un factor importante en muchos casos de inestabilidad del talud, incluyendo la rotura de la presa de Carsington.

▼ *Colapso por saturación.* Los suelos con poca agua y pobremente compactados experimentan una reducción de volumen cuando aumenta su contenido de humedad, lo que se conoce como "asiento de colapso". Este mecanismo puede tener un efecto adverso en el comportamiento de presas de materiales sueltos y es la causa de agrietamientos longitudinales, asientos localizados o erosión.

▼ *Licuefacción.* Las cargas cíclicas en los suelos granulares gruesos saturados, poco compactos y no drenados, producen una marcada reducción de resistencia asociada a un incremento de las presiones intersticiales. Si las tensiones efectivas se anulan se dice que el suelo ha sufrido licuefacción y esta pérdida de resistencia ha originado grandes daños durante los sismos. Los suelos arenosos son los más susceptibles a este efecto.

▼ **Flujo y erosión.** La permeabilidad del relleno y del cimiento determina el caudal de filtración. Éste controlará las presiones intersticiales que influyen en la deformación y resistencia mecánica de los materiales. El peligro principal es la erosión interna.

▼ **Durabilidad y degradación.** Las rocas blandas pueden ser susceptibles de degradarse y deben tomarse medidas para minimizar este efecto.

Como conclusiones de este apartado se mencionan:

▼ En el proyecto se verificará que las propiedades de resistencia y deformación del relleno y cimentación sean suficientes para asegurar la estabilidad de la presa.

▼ La presa y su cimiento deben disponer de elementos de estanqueidad que eviten pérdidas de agua por encima de un límite aceptable.

▼ Las presas de materiales sueltos y su cimentación deben contener filtros y drenes que aseguren que las fugas no produzcan pérdidas de material inaceptables y que eviten que se trasladen las presiones intersticiales hacia aguas abajo.

▼ Debe evaluarse el potencial de licuefacción del relleno y del cimiento. Una compactación enérgica del relleno reduce dicho potencial. Puede necesitarse algún tratamiento del cimiento para contrarrestar este efecto.

▼ La durabilidad de los materiales es muy importante para cumplir el objetivo de que la presa tenga una larga vida.

2.4. DEFORMACIONES DE LAS PRESAS DE TIERRA

Las deformaciones de una gran presa de materiales sueltos se controlarán durante su construcción y explotación. La pre-

dicción y la medición de deformaciones son sólo valiosas si se han establecido unos criterios que definan si son aceptables.

▼ **Deformaciones durante la construcción.** Los movimientos medidos se comparan con los calculados para confirmar que la presa se comporta de acuerdo con lo previsto. Penman ha señalado que no es fácil prever el riesgo de inestabilidad del talud a partir de la medida de desplazamientos porque estos dependen del modo de rotura y de la rigidez y fragilidad del relleno y de su cimientado.

▼ **Deformaciones durante el primer llenado.** Los cambios en las tensiones a causa del llenado producen deformaciones. La medida de éstas permite detectar una posible inestabilidad incipiente del talud. La erosión interna es también, a veces, la causa de movimientos del terreno. En presas con elemento de estanqueidad central, el llenado del embalse puede producir colapso de compresión por saturación del espaldón de aguas arriba con riesgo de agrietamiento longitudinal en el contacto entre dicho espaldón y el núcleo.

▼ **Deformaciones durante la explotación.** La seguridad continua de una presa de tierras puede quedar, en gran parte, asegurada por las mediciones de auscultación y la observación de deformaciones. Por ello, es esencial disponer de criterios con los que comparar las deformaciones medidas.

▼ **Deformaciones durante sismos.** Las cargas pueden cambiar de forma rápida durante un sismo, pudiendo inducir fuerzas de inercia en el suelo que son importantes en relación con las fuerzas estáticas. La relación tensión-deformación de un suelo sometido a cargas dinámicas cíclicas difieren de las relativas a cargas estáticas y puede expresarse por medio del módulo dinámico y del amortiguamiento.

Las conclusiones de este apartado son las siguientes:

▼ Pueden producirse movimientos importantes durante la construcción del cuerpo de presa si el núcleo interno o la cimentación están constituidos por arcilla blanda.

▼ La auscultación del talud durante la construcción puede proporcionar una indicación de inestabilidad incipiente del talud.

▼ Puede producirse colapso en el espaldón de aguas arriba de una presa de núcleo central durante el primer llenado.

▼ Si el colapso se produce localmente, se redistribuirán las tensiones con riesgo de creación de zonas más permeables.

▼ Durante la explotación normal pueden ocurrir movimientos del cuerpo de presa por diversas causas, algunas de las cuales pueden comprometer la seguridad y otras no.

▼ f) En presas con elemento impermeable central se pueden esperar movimientos importantes continuos a causa de grandes variaciones en el nivel de embalse. Estos movimientos se producen por cambios en las tensiones efectivas y pueden no indicar una situación adversa.

▼ g) Las deformaciones pequeñas a moderadas, resultantes de un sismo, son aceptables si no producen agrietamiento longitudinal o transversal importante, rotura del núcleo o del dispositivo de control de filtraciones o pérdida de resguardo. La licuefacción es un riesgo importante.

2.5. FILTRACIONES, FUGAS Y EROSIÓN INTERNA

El flujo de agua del embalse, a través de una presa de tierra, produce efectos que, a veces, pueden tener consecuencias para la seguridad (colapso, inestabilidad, erosión interna).

▼ **Control de presiones intersticiales.** Este control, durante la construcción y explotación de una presa de tierras, es una práctica corriente.

▼ **Evolución del régimen de percolación.** Se pueden producir presiones intersticiales excesivas en el cuerpo de presa y su cimientado durante la construcción. Después de la construcción, estas presiones de poros se disiparán y, a medida que el llenado progrese, se establecerá el régimen de filtración. Es conocido que se han observado frecuentemente presiones intersticiales mayores de lo esperado en la zona de aguas abajo de núcleos de arcilla. Se puede cuestionar si tales presiones de poros son alarmantes puesto que pueden atribuirse a fractura hidráulica en el núcleo. También pueden explicarse las presiones intersticiales elevadas por otros mecanismos, relacionados con la permeabilidad del relleno. Los cambios en el régimen de percolación pueden indicar el desarrollo de una situación adversa.

▼ **Filtros.** La erosión de los suelos puede controlarse con filtros bien proyectados y construidos, pero si estos garantizan la seguridad de las presas nuevas, no debe olvidarse que muchas presas de tierra antiguas no tienen filtros que cumplan los criterios actuales, lo que compromete su seguridad. En las presas de tierra se han utilizado, generalmente, filtros granulares, aunque también se han empleado geotextiles como filtro.

▼ **Medición de caudales de filtración y de fugas.** La medición y análisis de los caudales es un método de auscultación esencial. Si se observa un flujo de agua en el talud de aguas abajo de una presa de materiales sueltos, la primera prioridad es establecer si el agua procede del embalse y atraviesa el cuerpo de presa, de la cimentación, de los estrí-

bos o de otro origen. Si el agua es turbia puede ser una señal de erosión interna y los sedimentos arrastrados deben atraparse y analizarse.

▼ **Detección de fugas.** La investigación del origen de las fugas tiene por objeto conocer y atenuar los posibles daños causados por el flujo de agua. La aparición de zonas de humedad puede detectarse mediante inspecciones rutinarias, pero hay otros métodos para la investigación de las fugas: a) Con trazadores; b) análisis químico y biológico; c) medición de presiones intersticiales; d) medición de temperaturas; e) técnicas geofísicas.

▼ **Mecanismos de erosión interna.** Este efecto constituye una de las mayores amenazas para las presas de materiales sueltos. Los diferentes mecanismos de la erosión interna pueden asociarse con los defectos de construcción o con las condiciones de tensión y deformación dentro del cuerpo de presa. Las presas son particularmente vulnerables a la erosión interna durante su primer llenado y la mejor protección contra este efecto es un filtro adecuado, aunque muchas presas antiguas no disponen de él. Se pueden distinguir dos procesos de erosión interna: tubificación (piping) y "sufusión". El primero, más peligroso, es un mecanismo que se origina en el punto de salida de la filtración, a partir del cual se crea un pasaje continuo en el suelo por erosión regresiva. La sufusión es la erosión generalizada que ocurre en los suelos internamente inestables. Este mecanismo constituye un riesgo que afecta particularmente a los suelos finos heterogéneos. La fracturación hidráulica del núcleo bajo la acción de la presión del agua del embalse puede ser el origen de la erosión interna. Se ha sugerido que para que se produzca fractura hidráulica son necesarias dos condiciones: la primera está ligada al estado de tensiones y la segunda a la existencia de una zona propensa a este efecto (como una grieta existente o una capa más permeable) comunicada hidráulicamente con el embalse.

▼ **Velocidad de progresión de la erosión interna.** La velocidad a la que se produce la erosión interna, si ésta ocurre, es un factor esencial en la seguridad de la presa. Ciertos hechos indican que la erosión interna no es necesariamente un peligro inmediato para la integridad de la obra. Sin embargo, ha habido casos (presa de Teton) donde la importancia de la velocidad de progresión de la erosión interna ha sido decisiva.

▼ **Actos de guerra.** Determinadas presas han sido sometidas a condiciones muy severas por actos de guerra. Se describen dos de estos casos que han sufrido fugas y erosión interna: la presa de tierras de Sorpe, atacada dos veces por la aviación durante la Segunda Guerra Mundial, y la presa de escollera de Peruca en la que recientemente

(1993) se hicieron explotar una serie de artefactos en la galería de inspección.

Como conclusiones de este apartado se incluyen las siguientes:

- ▼ El flujo de agua a través de una presa de materiales sueltos y su cimentación puede causar erosión interna, pudiendo comprometer la seguridad de la presa.
- ▼ La colocación de filtros adecuados dentro del cuerpo de presa debe impedir la erosión interna.
- ▼ Muchas presas antiguas no tienen filtros que cumplan las normas modernas para aquellos y no resulta fácil evaluar su seguridad.
- ▼ Con bastante frecuencia se han constatado presiones intersticiales muy elevadas en el núcleo, cerca de su paramento aguas abajo. Existen diversas explicaciones para este fenómeno pero parece que, en muchos casos, esta situación no representa un problema.
- ▼ Los materiales sin cohesión, como arenas finas y limos, son muy vulnerables a la erosión interna. Algunas arcillas son dispersivas y muy erosionables.
- ▼ El papel de la fracturación hidráulica como mecanismo iniciador de la erosión interna es todavía tema de debate. Los núcleos anchos están menos expuestos a este fenómeno.
- ▼ La erosión interna es un fenómeno oculto que se localiza en el interior del relleno y sin la aparición de alguna señal externa, como un socavón en superficie, es difícil de identificar y de investigar.
- ▼ Es necesario tener en cuenta la velocidad de desarrollo de la erosión interna cuando se evalúa el riesgo de rotura.

2.6. CONDUCTOS QUE ATRAVIESAN LAS PRESAS DE TIERRA

Cualquier estructura que atravesase una presa de materiales sueltos desde aguas arriba a aguas abajo presenta un riesgo potencial para la seguridad de la presa. Los aspectos a considerar son:

▼ **Tensiones sobre los conductos y galerías.** La presión aplicada sobre el techo de un conducto rígido enterrado será, probablemente, más elevada que la correspondiente a la presión geostática, puesto que el relleno a cada lado del conducto será más compresible que el situado sobre el techo. Para una galería de geometría típica, la tensión media en su techo será de 1,5 a 2 veces más elevada que la presión nominal de las tierras encima de la galería, mientras que las tensiones en las paredes laterales pueden ser muy pequeñas.

▼ **Fugas y erosión interna a lo largo del contacto entre el relleno y el conducto enterrado.** El estado de tensiones

alrededor de la galería enterrada y las dificultades de asegurar una buena compactación en esta zona hacen del contacto galería-relleno un camino potencial de fugas. Sherard recomendó colocar el relleno en esta zona con alto contenido de agua así como instalar un filtro y un dren alrededor del extremo aguas abajo del conducto.

▼ **Muros del aliviadero atravesando el relleno.** Existe el mismo riesgo de fugas en el contacto entre la estructura y el relleno que se ha descrito en el caso anterior.

▼ **Rotura de un conducto de desagüe enterrado.** En este caso, el relleno adyacente al conducto queda expuesto al agua con la presión del embalse. Si esta rotura no se detecta inmediatamente hay riesgo importante de erosión interna.

▼ **Alargamiento de los conductos enterrados.** El desplazamiento lateral de los terraplenes produce deformaciones de tensión en los conductos que los atraviesan. Si además el cimientado del conducto es compresible, el asiento de aquél, durante la construcción del relleno, producirá alargamiento del mismo.

Las conclusiones de este apartado son las siguientes:

▼ Si un conducto en carga se coloca directamente sobre el relleno, su rotura someterá al relleno adyacente a la acción del agua con toda la carga del embalse. Si la rotura se produce aguas abajo del elemento de estanqueidad, la erosión interna será probablemente rápida.

▼ Hay transferencia de tensiones desde el relleno comprensible que rodea a un conducto rígido enterrado a su techo. El conducto debe proyectarse para este aumento de tensiones.

▼ Pueden construirse grandes conductos enterrados pero es necesario que el proyecto y la construcción sean cuidadosos. Si un conducto atraviesa el núcleo, el material de éste debe ser plástico, colocado del lado húmedo y bien compactado. Deben disponerse filtros aguas abajo del núcleo.

▼ El alargamiento longitudinal de los conductos enterrados puede conducir a la apertura de juntas. Los conductos deben construirse por tramos de poca longitud y con dispositivos de estanqueidad en las juntas.

2.7. INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS

Las presas de tierra experimentan problemas distintos, en diferentes partes del mundo, debido a las condiciones climáticas, algunas de las cuales se examinan a continuación:

▼ **Climas húmedos.** Es difícil colocar suelos cohesivos en tiempo lluvioso y la construcción de presas de tierra en re-

giones de alta pluviometría da lugar a problemas especiales que deben ser cuidadosamente considerados.

▼ **Climas secos.** Cuando los rellenos se colocan en climas secos puede ser difícil encontrar suficiente agua para colocarlos con la humedad adecuada. El material colocado muy seco es susceptible de colapsar. El agua que se evapora de la superficie de un relleno de arcilla produce su retracción y posible fisuración superficial. La fisuración por desecación de la parte superior del relleno, cuando baja el nivel de embalse, puede afectar a la parte superior del núcleo interno cuando el embalse está bajo durante un largo período.

▼ **Hielo y deshielo.** La penetración de la helada y los efectos de los ciclos de hielo-deshielo pueden causar problemas en climas fríos y, por ello, el material no debe colocarse en tiempo de heladas. En Suecia, se estima que los ciclos de hielo-deshielo pueden aumentar la permeabilidad de los núcleos de manera importante.

3. INFORMES ESPAÑOLES PRESENTADOS A LA Q-73

La participación española fue destacada tanto por el número de informes presentados como por su calidad. Estos informes se resumen a continuación:

◆ **J. Yagüe y M. Alonso (R-21)** realizan un revisión de la experiencia española en relación con los conductos enterrados en presas de materiales sueltos. Estos se han utilizado frecuentemente en las presas españolas con resultados, generalmente, satisfactorios. La experiencia española está basada, fundamentalmente, en conductos enterrados en presas cimentadas en terrenos poco deformables y en los casos de presas en que no se cumple esto último ha sido necesario estudiar medidas especiales. En algunos casos de pequeñas presas, no proyectadas ni construidas de acuerdo con la buena práctica, se han producido algunos incidentes en este tipo de conductos.

◆ **J. Delgado y F. Girón (R-22)** describen las condiciones geológicas y geotécnicas que dieron lugar a determinados tratamientos del cimientado de la presa Francisco Abellán. Se explican estos tratamientos y se presta especial atención al proyecto y construcción de una pantalla plástica de bentonita-cemento de 40 m de profundidad, definiendo las características de los materiales que la componen, su dosificación y comportamiento, así como el proceso constructivo de la pantalla y los resultados obtenidos.

◆ **C. Olalla y V. Cuellar (R-23)** comentan las técnicas experimentales desarrolladas por el laboratorio de Geotecnia

del Cedex que permiten obtener a los ingenieros un mejor conocimiento de las propiedades de los materiales utilizables en el cuerpo de presas de materiales sueltos. Se trata de equipos para dos ensayos de laboratorio:

▼ ensayo de corte directo de 1 m x 1 m x 1 m para estudiar la resistencia de escolleras y/o materiales granulares de gran tamaño

▼ ensayo de corte dinámico, a volumen constante, con control de deformaciones, para estudiar el comportamiento estático y dinámico de materiales, sin necesidad de saturarlos.

La tercera técnica corresponde a un ensayo de campo:

▼ análisis espectral de ondas de superficie para identificar las propiedades elásticas, en profundidad, para deformaciones muy pequeñas.

◆ **J. A. Rodríguez, L. R. Fernández y J. M. Alonso (R-24)** analizan el potencial de licuefacción del espaldón de aguas arriba de la presa de La Viñuela, con máximo nivel normal de embalse. Se han utilizado en el cálculo el Sismo Máximo Posible y el Sismo con período de recurrencia de 1.000 años. El método utilizado se basa en la obtención de un coeficiente de seguridad a la licuefacción, definido como el cociente entre la tensión tangencial que produce la licuefacción del material y la inducida por el sismo. Para obtener la tensión tangencial que produce la licuefacción del material se han realizado numerosos ensayos geotécnicos dinámicos en el material del cuerpo de presa. La tensión tangencial inducida por el sismo se ha definido a partir de cálculos dinámicos basados en elementos finitos. Como resultado de esta investigación se ha estimado que el filtro de aguas arriba puede alcanzar la licuefacción así como el espaldón de aguas arriba en una franja superficial. En cualquier caso, el comportamiento del cuerpo de presa es satisfactorio a causa de la contribución muy baja, en la resistencia global, del área que podría estar afectada, así como por la disposición de capas de drenaje que no se consideran en el cálculo.

◆ **M. Alonso y J. Yagüe (R-23)** presentan las características y el comportamiento de una serie de materiales singulares utilizados como núcleo de presas de escollera y como cuerpo de presa en las presas de tierra homogéneas. Estas singularidades incluyen el empleo de rocas arcillosas de diferentes tipos, más o menos alteradas y cuyo origen pertenece a diferentes períodos geológicos (principalmente terciario y cuaternario). Sus características geotécnicas son muy variadas y, entre ellas, se encuentran un cierto grado de expansividad, dispersividad y alto contenido de carbonatos. Se pretende proporcionar información sobre el empleo y comportamiento de materiales impermeables, para las presas de tierra, que no son tradiciona-

les y que, en ocasiones, se desconoce su utilización previa en casos similares.

◆ **G. Bravo y J. Pérez (R-23)** analizan el comportamiento del núcleo de una presa de materiales sueltos durante el primer llenado, prestando especial atención a las heterogeneidades del núcleo. Éstas puede ser debidas al proceso de colocación y compactación e influyen fuertemente en el comportamiento del núcleo durante el primer llenado. El informe concluye que los flujos concentrados son debidos al proceso de saturación y no al agrietamiento del núcleo producido por fractura hidráulica. Esto explica, asimismo, la distribución no lineal de las presiones de poros dentro del núcleo y muestra la posible inestabilidad del talud, a lo largo de superficies críticas, durante el llenado.

◆ **E. E. Alonso (R-34)** desarrolla dos temas en el informe: el flujo y las deformaciones asociadas de una presa de tierras y la fracturación hidráulica. El flujo y las deformaciones están muy relacionadas entre si y una buena comprensión del comportamiento exige el conocimiento de los cambios de volumen del suelo, cuando varía el contenido de humedad, y el efecto de la succión en la rigidez y la permeabilidad. Se revisan e interpretan, asimismo, los resultados de numerosos tipos de ensayos de fractura hidráulica y se concluye que la presión de fracturación depende de la tensión principal menor y de un factor proporcional a la cohesión o a la resistencia a tracción del suelo. Las medidas "in situ" y los análisis numéricos sugieren que el riesgo de fractura hidráulica es pequeño para los núcleos relativamente anchos, aunque estas condiciones pueden empeorar en el contacto entre el núcleo y los elementos rígidos.

4. DESARROLLO DE LAS SESIONES

El Presidente de las sesiones dedicadas a la Q-73 fue A. Misiti (Italia), asistido por un Vicepresidente, L. Toropov (Rusia), y un Secretario, G. Mazzá (Italia). El Ponente General fue J. A. Charles (Reino Unido).

El Presidente, en la Introducción de la sesión, hizo referencia a que la normativa italiana de seguridad de presas está siendo sometida a un largo proceso de revisión en el que intervienen varios organismos relacionados con las presas para adecuarla mejor a las necesidades del país. También se refirió a la actividad existente en Italia en obras hidráulicas, mencionando que se están construyendo diversas presas, la mayoría de ellas en el Sur, donde hay escasez de agua. Finalmente, comenta los temas que se tratarán en las sesiones y la organización de las mismas.

El Ponente General hace una síntesis de su informe y plantea los cuatro temas que han sido elegidos para debate:

- A) Deformaciones aceptables durante la construcción de la presa y la explotación del embalse.
- B) Evaluación del potencial de licuefacción y de las deformaciones durante los sismos.
- C) Erosión interna.
- D) Conductos que atraviesan las presas de tierra.

De cada uno de los temas mencionados hizo una breve exposición, en la línea de lo planteado en su informe general, de la que se resaltan las siguientes ideas:

▼ Tema A

La deformación es un indicador del comportamiento de la presa. El concepto de deformaciones aceptables es importante y para definirlos es preciso tener un modelo del comportamiento del suelo y luego medirlas, para comparar, durante la construcción, primer llenado y explotación.

▼ Tema B

Muchas presas se construyeron sin conocimientos de los aspectos sísmicos y actualmente se está evaluando su seguridad. Las cargas dentro de un sismo pueden variar (son cargas cíclicas) y producen deformaciones de cinco categorías: dinámicamente estables, compactación, deformación del talud, licuefacción y deslizamiento progresivo. Las pequeñas deformaciones son aceptables si no producen agrietamiento del núcleo, del filtro o pérdida excesiva de resguardo. La licuefacción puede constituir un grave riesgo para cimientos de suelos granulares sueltos y saturados.

▼ Tema C

La erosión interna constituye una gran amenaza para las presas de materiales sueltos. Los filtros parecen la mejor defensa ante este problema pero no debe ignorarse que hay muchas presas construidas que no los tienen. Algunos efectos asociados a la erosión interna son: tubificación (piping) y sufusión (erosión masiva en materiales internamente inestables). La fractura hidráulica puede ser el inicio de un proceso de erosión interna y, por ello, es importante prestar atención a las fugas y filtraciones a través de la presa que pueden causar erosión interna. La erosión interna es un fenómeno oculto y, por ello, difícil de investigar.

▼ Tema D

Los conductos que atraviesan las presas pueden presentar problemas debidos a deficiencias en el contacto con el relleno que pueden ocasionar fugas, fallo del conducto,

tensiones altas en el conducto por transferencia de tensiones. Es necesario proteger este contacto con el empleo de filtros, pero no son aceptables los collarines.

Como conclusión, señala el Ponente General que ha habido un importante desarrollo de la técnica, en relación con las presas de materiales sueltos, aunque existan todavía algunos problemas.

A continuación se da paso a las intervenciones orales, con importante participación española, que se organizan de acuerdo con los temas de debate planteados, mencionados anteriormente.

▼ En el **Tema A**, deformaciones aceptables, comienza la sesión con la intervención de un español, A. Soriano, sobre las deformaciones aceptables y el riesgo de fractura hidráulica en la presa de Tous. El autor menciona los difíciles contactos existentes entre la nueva presa de Tous y la parte que permanece de la antigua presa. La complejidad de estos contactos ha obligado a analizar las causas que pueden producir erosión interna, tales como la falta de homogeneidad del núcleo y las bajas tensiones en el mismo. Las precauciones que se han tomado en la presa para evitar este efecto son las siguientes: evitar heterogeneidades, cuidar las zanjas de instrumentación, hacer suaves los taludes de muros en contacto con el núcleo, compactar más las zonas bajas de la presa y disponer buenos filtros.

Las tensiones aceptables en la presa de Tous son aquéllas por debajo de las cuales se podría producir erosión interna. En la presa se han medido deformaciones y se han calculado las tensiones que aquéllas originan, comparándolas con las tensiones que no podrían producir erosión interna.

Interviene a continuación otro español, F. Girón, describiendo el asiento de colapso en la presa de Canales. En el llenado parcial de esta presa se produjeron importantes asientos y una grieta longitudinal en coronación. Con el fin de analizar la evolución de estos asientos con la cota de embalse y su velocidad, se dispusieron distintos puntos de medición en coronación. Durante la primera etapa de llenado, en 1989, el nivel de embalse subió 120 m y se empezó a observar un asiento diferencial que produjo un escalón longitudinal en coronación de 40,5 cm, atribuido a asiento de colapso. En sucesivos años hubo oscilaciones en el embalse pero no se superó la cota anterior por lo que no se produjo colapso. En una nueva etapa de llenado el nivel de embalse subió 28 m hasta alcanzar el nivel máximo y se produjo un nuevo asiento de colapso de 35 cm y de gran velocidad. Posteriormente, los asientos continuaron pero en menor magnitud y con velocidades gradualmente más reducidas. La máxima velocidad de asientos tuvo un valor medio de 4 mm/día durante un día.

G. Prasad (India), en su exposición sobre deformaciones en presas de materiales sueltos, manifiesta que no es posible dar una solución general para la deformación aceptable en

las presas de materiales sueltos por ser cada caso único. Posteriormente, analiza los estudios de deformación y agrietamiento en presas altas realizados por diferentes investigadores en el pasado.

En la actualidad, el método de elementos finitos permite determinar deformaciones y las tensiones asociadas durante la construcción y explotación, así como anticipar el agrietamiento potencial. La evaluación por este método se hace a partir de una serie de supuestos y los resultados del cálculo deben compararse con las mediciones reales. Analiza diversos casos del comportamiento de algunas presas importantes a nivel mundial como el Infiernillo (Méjico), Oroville (USA) y Duncan (Canadá), mostrando apreciables discrepancias entre el comportamiento real y el calculado por elementos finitos. No obstante, concluye que, aunque cada presa se comporta de manera única, con el método de elementos finitos se pueden hacer predicciones razonables de las deformaciones durante la construcción y la explotación de la presa.

En el **debate sobre este Tema A** abierto a los asistentes, J. Fry (Francia) solicitó detalles adicionales sobre los criterios numéricos para anticipar la posible aparición de grietas en los estribos, cuestión que no pudo ser respondida con concreción por Prasad, manifestando que en su exposición ha utilizado resultados del análisis realizados por otros para proporcionar determinada información. Chraibi (Marruecos) pregunta las causas del importante asiento producido en la presa de Canales y Girón responde que probablemente sea debido a la baja calidad de la escollera y a su compactación en capas de bastante espesor (2 m). Interviene Marulanda (Colombia) para señalar que deformaciones importantes en presas de materiales sueltos no implican un mal comportamiento, especialmente si el núcleo es bastante plástico. Fernández Cuevas (España) pregunta si el método de elementos finitos es sólo una herramienta de cálculo o puede servir realmente para prever el comportamiento de una presa. La respuesta la da el Ponente General que hace un resumen final del tema y se pregunta si tenemos modelos del suelo que reflejen su comportamiento y podamos introducirlos en técnicas numéricas como el método de elementos finitos. Comenta que estas técnicas hay que emplearlas con cuidado, sobre todo en zonas especiales, donde haya contactos. Añade que al tema del colapso no se le ha prestado mucha atención en el pasado, quizás porque no encaja en la teoría de tensiones efectivas al tratarse de suelos semisaturados difíciles de modelar. El colapso por compresión en el núcleo puede ser un problema a menos que aquél esté saturado y bien compactado.

▼ El **Tema B** se inició con la intervención del español J. A. Rodríguez que expuso el análisis del potencial de licuefacción en la presa de La Viñuela. Se han realizado estudios dinámicos de la presa con dos terremotos: el máximo creíble

y el de 1.000 años de período de recurrencia. Para obtener el potencial de licuefacción de algunas zonas de la presa se siguió el método de Seed basado, en líneas generales, en la obtención de un coeficiente de seguridad definido como la relación entre la tensión producida por la licuefacción de los materiales y la tensión inducida en el material por el sismo. Se hicieron ensayos triaxiales dinámicos en laboratorio para estudiar la licuefacción del material del espaldón de aguas arriba y se calcularon las tensiones de corte máximas producidas por el sismo en la presa. Los resultados obtenidos son:

- Se produce licuefacción en el filtro de aguas arriba con los dos terremotos pero la pequeña contribución del filtro a la resistencia no produciría daños en la presa en caso de sismo.
- El comportamiento del espaldón de esquistos sería satisfactorio.
- En la parte superior del espaldón de aguas arriba hay zonas de bajo coeficiente de seguridad pero no habrá problemas en el comportamiento de la presa por la existencia de factores favorables como drenes horizontales y el confinamiento de estas zonas.

Kramer (USA) se refirió a la ecuación desarrollada por Jansen que se incluye en el R-11 de la Q-73 y que proporciona las deformaciones en función de la magnitud del sismo, coeficientes de aceleración, etc. La fórmula mencionada es una modificación de otra desarrollada en 1988 que ha sido reformada a partir de nuevos datos medidos que han estado disponibles en los últimos años.

Zhang Jinsheng (China) analiza la estabilidad del depósito de arena bajo la ataguía de la presa de Las Tres Gargantas. Se está construyendo la ataguía, rellenando con escollera, que permitirá el desvío del río en Noviembre de este año. El depósito de aluvión de arena fina tiene una densidad baja y pequeño espesor (5-10 m). Se está ejecutando una pantalla plástica que atraviesa toda la ataguía y el depósito de arena y estará terminada cuando se cierre el río. Se han realizado numerosos estudios con arenas similares para estudiar su deformación.

A continuación se inicia el **debate sobre el Tema B** interviniendo Jappelli (Italia) que expone que lo importante contra la licuefacción es tener un material bien graduado, bien compactado y muy drenante. De Fries (Venezuela) manifiesta que se invierte mucho dinero en extrapolar datos de laboratorio a modelos numéricos y sería aconsejable obtener datos, en tiempo real, de las tensiones de la presa durante un terremoto para alimentar los modelos existentes. J. Fry (Francia) dice que la ecuación de Jansen no incluye las frecuencias y pregunta a Kramer (USA) si con dos sismos de la misma magnitud se tendría el mismo desplazamiento, apli-

cando la ecuación de Jansen. Kramer responde que dicha ecuación es empírica y está basada en asientos medidos en presas, por lo que sólo debe usarse como una referencia. Cifres (España) comenta que entre las precauciones a adoptar contra la licuefacción debe incluirse el disponer en la presa un máximo posible de materiales sin saturar.

Viotti (Brasil) presenta información de deformaciones en una presa de núcleo inclinado de 150 m de altura sometida a un sismo. Se produjeron en ella grandes deformaciones superficiales y una gran grieta (70 m de longitud y 25 cm de ancho). A pesar de las grandes deformaciones experimentadas y del mal aspecto externo de la presa, se ha comportado bien, por lo que aquéllas se consideran aceptables.

El Ponente General resume el Tema B concluyendo que los fenómenos dinámicos producidos por la actividad sísmica son difíciles de analizar. Los métodos probabilístico y determinístico pueden dar pequeñas diferencias si la sismicidad es baja, aunque esto no es así en caso contrario. Manifiesta también la necesidad de auscultar para tener información de lo que ocurre realmente en las presas durante un sismo.

▼ El **Tema C** se inicia con la intervención de LL. Courage (Canadá) relativa a la erosión interna en la presa de tierras de Whiteman y otros ejemplos. La principal causa de la erosión interna en la presa de Whiteman fue la incompatibilidad de los materiales en ausencia de filtros, así como la baja calidad de la construcción. Otros ejemplos citados son la presa de Bennet, la presa de Baie D'Espoir y la de Tetón. En la primera se produjo asiento de colapso en zonas localizadas mal compactadas y se sospecha que hubo migración de material del núcleo a los filtros. En la presa de Baie D'Espoir se produjo colapso de la coronación atribuido a erosión interna del núcleo de morrena glaciario arrastrado hacia las grietas abiertas del cimientado. Los tres casos citados son típicos de un colapso, localizado en coronación, que se produce inesperada y rápidamente, 44, 29 y 19 años, respectivamente, después de terminada la construcción. La rotura de la presa de Tetón, bien conocida, se debió a erosión interna muy intensa, durante el primer llenado, en el contacto núcleo-roca. Este caso fue el principal impulsor de nuevas normas de seguridad de presas en Estados Unidos.

J. Fry (Francia) expuso el tema de la erosión interna mencionando que, de acuerdo con el Ponente General, se pueden considerar dos aspectos básicos: 1) analizar si la erosión interna puede conducir a la rotura y 2) si ésta se produce, anticipar en cuánto tiempo.

Siempre que se han producido fallos por erosión interna no había filtros adecuados. Hay dos mecanismos de erosión interna, la tubificación y la "sufusión". El primero de ellos es más difícil de detectar, sobre todo se hace por inspección visual, y suele ser un fenómeno muy rápido. Los fenómenos de sufusión son lentos y se detectan con vigilancia continua, pudiéndose controlar con mantenimiento preventivo.

G. Bravo (España) intervino con una contribución sobre las fugas concentradas y las vías preferenciales. La erosión interna es frecuentemente debida a fugas concentradas cuyo origen se ha atribuido a la fracturación hidráulica. Generalmente, esta situación se produce con tensiones totales bajas, pero los modelos existentes no demuestran claramente que estas condiciones produzcan fractura hidráulica. Por ello, se plantea un nuevo mecanismo, para explicar el fenómeno, basado en la heterogeneidad de los núcleos que produce caminos preferenciales para la filtración. Se han tomado datos de las presas de Colomera y Canales para verificar el modelo que muestra que la posibilidad de fractura del núcleo, por aumento de presiones de poros, es muy improbable porque también aumentan las presiones totales. Pero el fenómeno es complejo y esta situación no se produce con claridad en todos los puntos de medida, lo que explicaría la existencia de vías preferenciales que facilitan el paso del agua.

M. D. Gillón (Nueva Zelanda) explicó su ponencia sobre dos incidentes de erosión interna del núcleo en la presa de Matahina que obligaron a bajar el embalse para efectuar las correspondientes reparaciones. El primero se produjo en el estribo derecho al final del primer llenado y el segundo en el estribo izquierdo, como consecuencia de un fuerte sismo.

En el primer incidente el núcleo se había agrietado cerca del estribo a unos 12 m por debajo de la coronación y se encontró, en la zona dañada del núcleo, material autosellante de la zona de transición de aguas arriba del núcleo. Se reparó el núcleo con lechada de bentonita-cemento protegida con filtro granular contra la parte de aguas abajo de la zona dañada del núcleo.

El segundo incidente se produjo como consecuencia de un sismo de 0,33 g de aceleración que ocasionó una cavidad en la coronación de la presa, encima de la zona de transición aguas abajo del núcleo. Las excavaciones para la reparación mostraron la existencia de una gran cavidad no detectada en el núcleo.

Los dos incidentes de erosión fueron muy distintos: el primero produjo una fuga importante y de rápido desarrollo a través del núcleo que se autoselló con el material de transición de aguas arriba del núcleo. El segundo fue un proceso de erosión lenta formando una gran cavidad en el núcleo, afortunadamente por encima del nivel de embalse y con fugas de pequeña magnitud.

Johansson (Suecia) planteó dos métodos para detectar el cambio del caudal de filtración: el método de resistividad y el de medición de temperaturas. La resistividad en una presa depende de la temperatura y de la concentración de sólidos disueltos y se ha medido en dos presas suecas con un sistema que proporcionó elevada precisión. Las temperaturas en la presa dependen de la temperatura del embalse y la medición de aquéllas constituye un método de detección de fugas. Con este método se ha encontrado un aumento

de filtración en una presa sueca que tuvo problemas de erosión interna. En síntesis, la medición de temperaturas en piezómetros es un método fácil para detectar zonas de fuga, mientras que la medición de resistividades es más complicada y esta técnica aún se está investigando.

M. Arjouan (Marruecos) expuso su ponencia sobre el aumento de presiones en los aluviones de cimentación de la presa Oued El Makhazine. Las presiones intersticiales en el aluvial, aguas arriba y aguas abajo de la pantalla, se miden con piezómetros que han mostrado una tendencia a aumentar con los años en cada llenado del embalse. La situación se considera preocupante y los desagües de fondo se han mantenido abiertos para controlar el nivel de agua, además de reforzar el drenaje poco profundo en el pie de aguas abajo y de ejecutar pozos de drenaje y una zanja drenante en la misma zona que han resultado muy eficaces en el control de las presiones de agua.

T. Thongsiri (Tailandia) describió los trabajos de reparación en los diques de collado de la presa de Sirikit. Cuando se llenó la presa, en 1994, los diques de collado homogéneos con filtro vertical no pudieron desaguar la filtración a través de los filtros, por estar estos colmatados a causa de su mala calidad, y aquella se concentró en las cimentaciones y pie de taludes, dando lugar a zonas saturadas en el pie aguas abajo de los diques, produciendo en algunos de ellos grietas y deslizamientos en el talud de aguas abajo.

La reparación consistió en disponer bermas estabilizantes de escollera sobre un tapiz de filtro y geotextil en los taludes de aguas abajo.

A. Pujol (Argentina) presenta una ponencia sobre el control de la erosión del núcleo impermeable en la roca de contacto de la presa de El Chocón. Esta presa tiene un núcleo de arcilla y espaldones de grava y se comportó bien hasta que, 10 años después del llenado, aumentaron las presiones intersticiales en el cimientado y estribos. Se realizó un análisis químico del agua de filtración que tenía un elevado contenido de sulfatos por disolución del yeso que rellenaba las diaclasas del estribo. La reparación consistió en hacer una galería de inyección, inyectar las grietas del contacto núcleo-roca, inyectar una nueva pantalla y aumentar el drenaje. Con estos tratamientos se consiguió una gran disminución de las presiones intersticiales en el cimientado y se selló el contacto de éste con el núcleo para evitar una posible erosión interna.

Se inicia el **debate sobre el Tema C** con la intervención de Brauns (Alemania) que comenta que la sufusión todavía no se conoce bien a efectos de proyecto para poder anticipar si un material es susceptible de sufrir este fenómeno, aunque se ha desarrollado un método con división del material de filtro en diversas partes para ver los efectos de esta división granulométrica.

Kramer (USA) resalta la importancia que tiene prestar atención a los aumentos de presión intersticial que producen reducción de la estabilidad de la presa.

El Ponente General resume el Tema C distinguiendo entre las presas nuevas, con filtros bien proyectados y construidos, aunque todavía no se conozca lo suficiente sobre este tema, y las antiguas que se construyeron con menos cuidado y que al evaluar su seguridad se tropieza con dificultades.

Los cambios bruscos en presiones intersticiales y totales requieren una rápida evaluación de la situación. También es importante considerar la rapidez con que se produce la erosión interna que es un fenómeno oculto y, por tanto, difícil de anticipar y de investigar.

▼ Se inicia el **Tema D** con la intervención de J. L. Utrillas (España) sobre las torres de acceso a la presa de Tous. El principal acceso al desagüe intermedio se realiza desde la coronación de la presa mediante una torre de acceso, constituida por 18 módulos prefabricados. El criterio de proyecto de la torre se basó en considerar un conjunto de anillos independientes rodeados por la escollera de la presa que podrían moverse y deformarse conjuntamente con aquella. Era, por tanto, necesario conocer con suficiente precisión las tensiones y deformaciones que podrían producirse en la presa en el entorno de la torre y se realizó el cálculo de las tensiones por el método de elementos finitos. A partir de las tensiones obtenidas se calcularon los módulos y las deformaciones, lo que permitió definir la separación entre los anillos para compensar los futuros movimientos de la presa. El proceso constructivo es de gran interés y consistió en colocar cada módulo, desde el nivel alcanzado por el relleno, sobre el inferior, apoyado en soportes temporales y después en gatos hidráulicos. Con estos se ajustaba la separación en función del asiento esperado del cuerpo de presa. La abertura entre módulos se sellaba con PVC y se continuaba el relleno de la presa hasta la parte superior del módulo, retirándose entonces los gatos y dejando el anillo sujeto por la presión de la escollera adyacente. Entonces se repetía la operación. La auscultación, durante la construcción y después de ella, ha puesto de manifiesto el cierre de tres juntas en gran parte de su perímetro, movimientos que luego se han estabilizado. Se han producido desplazamientos y giros hacia aguas arriba que se espera que inviertan la tendencia durante el llenado del embalse. Como conclusión se señala que, de acuerdo con el comportamiento observado, las torres de acceso enterradas en el cuerpo de presas de escollera constituyen un buen sistema para resolver el problema de acceso desde la coronación en este tipo de presas.

A. F. Chraibi (Marruecos) expone los criterios de proyecto y el comportamiento del conducto enterrado de la presa de Al Wahda. Esta presa de núcleo arcilloso y espaldones de gra-

vas, aguas arriba, y de escollera, aguas abajo, y cimiento de marga arcillosa con estratos intercalados de arenisca, está atravesada por un conducto, cimentado en las margas, que engloba los desagües de fondo y la tubería para la central. La estructura del conducto tiene una altura total de 31 m, de los cuales los 14 m superiores sobresalen del cimiento y dispone de juntas entre bloques separadas 15 m que están preparadas para evitar un riesgo de abertura excesivo o de erosión del núcleo a través de ellas bajo la carga del embalse. Para conocer el comportamiento de este conducto, se ha instrumentado exhaustivamente con células de presión total y de presión intersticial, medidores de juntas, extensómetros y referencias topográficas. Los resultados obtenidos 18 meses después de la construcción y 6 meses después del llenado, son: asiento máximo estabilizado de 3 cm (diez veces menor que el obtenido por el cálculo), reducción importante de cargas sobre la estructura por la zonificación de la compactación que ha sido más intensa en el relleno situado a los lados de la estructura que sobre el techo de la misma y, finalmente, módulo de cimentación subestimado por los ensayos presiométricos.

Se abre el **debate sobre el Tema D** con la intervención de Kramer (USA) que expone que, lo más importante a tener en cuenta con las estructuras que cruzan las presas de materiales sueltos es cuidar los detalles constructivos para evitar la erosión interna. Las superficies de hormigón no deben tener esquinas marcadas y deben tener forma adecuada para facilitar la compactación del relleno que debe ser de material plástico. La presa marroquí suscita numerosas preguntas del auditorio que, son respondidas por el autor de la ponencia que manifiesta lo siguiente: se han adoptado medidas especiales a causa de las grandes dimensiones de la estructura, como ampliación del sistema de filtro y drenaje, aguas abajo, e inyección de las juntas de la estructura una vez producido el asiento; la presión vertical de las tierras sobre la galería se estimó simulando el efecto de la mayor compactación en las zonas laterales y esa presión se ajustó bastante bien a las presiones reales medidas; no se adoptaron medidas preventivas especiales en el núcleo para evitar su agrietamiento porque éste, en las presas de materiales sueltos, se produce frecuentemente y se combate con filtros adecuados como los existentes en ésta presa. Charles (Reino Unido) pregunta al auditorio si se deben seguir usando collarines en los conductos enterrados y le responde

Kramer (USA) diciendo que un motivo para evitarlos es la dificultad de compactar bien en su entorno, lo que ralentiza la obra y lo rechazan los contratistas, aunque puede acelerarse la compactación usando superficies inclinadas. Dolcetta (Italia) comenta que la normativa de seguridad de presas italiana no permite colocar conductos transversales dentro del cuerpo de presa.

El Ponente General resume el Tema D diciendo que los conductos enterrados constituyen un riesgo potencial cuando atraviesan el cuerpo de la presa, aunque, a veces, pueden estar justificados por motivos económicos. En todo caso, su empleo requiere la adopción de cuidados especiales.

A continuación el Ponente General expone las **conclusiones generales** de las sesiones correspondientes a la **Cuestión 73** que son las siguientes:

- ▼ Se ha tratado fundamentalmente en la Cuestión 73 de los problemas asociados con los materiales de las presas de materiales sueltos. El debate sobre esta cuestión debe contemplarse en el contexto de los avances que se han realizado en la mecánica de suelos a partir de los cuales estas presas pueden considerarse seguras.
- ▼ Se ha avanzado mucho en los cálculos numéricos que tienen la ventaja de permitir realizar estudios paramétricos de los distintos factores que intervienen y así determinar los aspectos críticos del comportamiento de las presas. Los métodos numéricos de cálculo no se adaptan bien a todos los fenómenos que ocurren en los materiales (como el colapso).
- ▼ La erosión interna es un fenómeno crítico, especialmente en presas ya construidas, que al estar oculto es difícil de evaluar, incluso con frecuentes inspecciones visuales que resulta ser el método de auscultación más eficaz. Para las antiguas presas la observación es esencial porque el cálculo no es posible al no conocerse bien las características de los materiales de la presa. Debe avanzarse más en el estudio de la erosión interna.
- ▼ No está claro si las altas presiones intersticiales que aparecen en ocasiones cerca del paramento de aguas abajo del núcleo, representan un problema de seguridad o no.
- ▼ El análisis de riesgo es una herramienta interesante para avanzar en el análisis de seguridad pero debe simplificarse. ●