

ÁREA III: DISEÑO DE LA Balsa

ANÁLISIS SÍSMICO

Joaquín Martí Rodríguez

ETS de Ingenieros de Minas de Madrid

GESTIÓN DE RESIDUOS MINEROS BALSAS ESTÉRILES

Sevilla 10 a 14 de mayo de 1999

ÍNDICE

| | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1 Preámbulo | 1 |
| 1.2 Presas de estériles..... | 1 |
| 1.3 Terremotos | 2 |
| 1.4 Peligrosidad, vulnerabilidad, consecuencias y riesgos | 2 |
| 1.5 Análisis coste-beneficio | 4 |
| | |
| 2. PROBLEMAS CAUSADOS POR LOS TERREMOTOS | 5 |
| | |
| 3. ACCIONES DE DISEÑO | 7 |
| | |
| 4. COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES | 10 |
| 4.1 Respuesta mecánica | 10 |
| 4.2 Cambios de volumen..... | 11 |
| | |
| 5. METODOLOGÍA DE CÁLCULO | 13 |
| 5.1 Método equivalente estático..... | 13 |
| 5.2 Cálculo por elementos finitos..... | 14 |

Apéndice I. Referencias

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Preámbulo

El Comité de Presas de Residuos Industriales y Mineros, que es uno de los establecidos en el seno de la Comisión Internacional de Grandes Presas, publicó en 1995 el Boletín no. 98, titulado “Presas de Estériles y Sismicidad. Examen y Recomendaciones” (ICOLD, 1995). En el prólogo el Presidente del Comité, A.D.M. Penman, afirmaba que, en los últimos 30 años, ninguna presa moderna y bien construida había fallado por efecto de un terremoto; aunque se habían experimentado daños serios en algunas, ninguna había sucumbido ante la acción sísmica.

Por el contrario, muchas presas de estériles habían fallado en el curso de terremotos, liberando lagunas de estériles en licuefacción que fueron responsables de la pérdida de vidas humanas y de cuantiosos daños económicos. La sección estadounidense compiló 185 de estos incidentes en presas de residuos en todo el mundo, involucrando una gran variedad de materiales (USCOLD, 1993). La conclusión obligada era que se percibía la necesidad de preparar recomendaciones para el proyecto y construcción de nuevas presas de residuos, así como para mejorar la seguridad de algunas de las existentes. Esta fue precisamente la motivación que llevó a la edición del Boletín no. 98.

1.2 Presas de estériles

Las presas de estériles son a menudo estructuras de importancia considerable. En la balsa a la que sirven de frontera se contienen cantidades notables de estériles, así como agua que se recircula al sistema. Por otra parte, las características químicas de los materiales embalsados refuerzan la necesidad de asegurar el aislamiento de lo embalsado. En definitiva, tanto por la magnitud como por la composición de los contenidos, el fallo de una presa de estériles tiene a menudo capacidad para convertirse en una catástrofe desde el punto de vista de los daños a personas, a la economía y al medio ambiente.

Se sigue por tanto que su proyecto y construcción deben ser cuidadosos e incluir una cierta dosis de conservadurismo. Este conservadurismo, sin embargo, debe

ser racional; es decir, debe mantener una proporción con los riesgos incurridos y con el coste de disminuirlos. Esta filosofía, conocida como el criterio de coste-beneficio, es esencial en cualquier actividad de diseño y en particular en el diseño sísmico que aquí nos ocupa.

A efectos del presente documento, supondremos que las presas de estériles son esencialmente presas de materiales sueltos.

1.3 Terremotos

Los terremotos son movimientos del terreno con origen más o menos superficial, cuya ocurrencia no sabemos predecir de forma determinista. Las técnicas actuales están muy lejos de permitir predecir cuándo va a ocurrir el próximo terremoto, dónde o de qué tamaño. Tampoco es realmente viable asegurar que en un punto nunca se van a experimentar terremotos por encima de un tamaño determinado.

Lo más que podemos hacer es suponer que el futuro va a ser como el pasado y que se van a mantener en el futuro las frecuencias con que se ha generado en cada zona cada tamaño de terremoto. En la hipótesis de que eso es cierto, miramos hacia el pasado para predecir, al menos estadísticamente, el futuro. Una vez más, usamos la estadística para compensar nuestra ignorancia. La sismología intenta suministrarnos la información que requerimos sobre los terremotos que podemos experimentar.

Los movimientos del terreno asociados al terremoto introducen unas demandas adicionales sobre la presa de estériles, que ésta debe ser capaz de soportar manteniendo al menos su función y, a ser posible, también su total integridad. La ingeniería sísmica es la que nos ayuda a lograr estos objetivos.

1.4 Peligrosidad, vulnerabilidad, consecuencias y riesgos

En el lenguaje común se usan, a menudo con carácter intercambiable, toda una serie de términos que tienen significados técnicos precisos y distintos. Intentaremos aquí aclararlos, ciñéndonos para hacerlo al caso de acciones sísmicas en presas de estériles.

Es evidente que, en cada emplazamiento, hay una cierta posibilidad de que, a lo largo de un período de tiempo, tenga lugar una acción sísmica de un determinado tamaño y características. Este concepto, extrapolable a muchas otras acciones o mecanismos, es lo que conocemos como la *peligrosidad*. Más específicamente, en sísmica solemos asociarlo con la probabilidad anual de que ocurra en el emplazamiento una acción sísmica por encima de un tamaño determinado. El tamaño lo caracterizamos con la aceleración máxima inducida en el terreno o con la intensidad del terremoto (que mide los efectos producidos de una forma menos cuantitativa).

En segundo lugar, para cada tamaño de terremoto, hay una cierta posibilidad de que la presa sufra una determinada intensidad de daños: aparición de grietas, pérdidas de estanqueidad, etc, hasta el colapso total. Este es el concepto de la *vulnerabilidad*. Hablando, por ejemplo, del colapso total, la vulnerabilidad de la presa es la probabilidad de que la presa falle, expresada en función del tamaño del terremoto que la solicita.

De la mano del concepto de vulnerabilidad viene lo que conocemos como el análisis de *consecuencias*. Para cada nivel de daño producido en la presa, habrá unas consecuencias que conviene cuantificar. Los daños menores pueden requerir solamente una inspección y una remediación poco costosa. El colapso total puede causar pérdida de vidas, así como daños cuantiosos a la economía y al medio ambiente en el exterior, así como obligar a la interrupción de las actividades de explotación. La cuantificación de consecuencias puede hacerse en base a un parámetro único (dinero equivalente), aunque las dificultades de asignar equivalentes económicos a las vidas humanas hacen que a menudo se utilice más de un parámetro en la cuantificación de los efectos probables.

El concepto de *riesgo* combina las tres consideraciones anteriores. Sin entrar en las expresiones matemáticas, el cálculo del riesgo implica llevar a cabo una sumación sobre las probabilidades. A cada nivel de probabilidad le corresponderá un tamaño de terremoto; a cada tamaño de terremoto, una probabilidad de que éste conduzca a cada nivel de daños; a cada nivel de daños, una magnitud de pérdidas como consecuencia. La combinación mencionada suministra la probabilidad anual de que cada volumen de pérdidas se vea excedido en el año.

1.5 Análisis coste-beneficio

El diseño racional en general, y el sísmico en particular, se basa explícita o implícitamente en un análisis coste-beneficio. Explícitamente, cuando dicho análisis se hace específicamente para el proyecto en cuestión; esto es frecuente en proyectos que entrañan grandes costes de construcción y/o de posibles consecuencias en caso de fallo, como pueden ser las plataformas offshore. Implícitamente, cuando el análisis ha sido ya llevado a cabo de forma genérica y sus resultados están plasmados en una normativa; o cuando simplemente se utiliza la experiencia para llegar a un diseño racional.

Conocido el riesgo asociado a un diseño (la probabilidad anual de que se produzca cada nivel de daños), podemos también calcular las consecuencias derivadas de cambiar ciertas características del diseño, así como el costo de llevar a cabo dichos cambios. El análisis de riesgos nos dice qué cambios pueden contribuir más al aumento de la seguridad; el de costos nos dice qué inversión de recursos requiere cada uno. Un diseño racional debiera incluir consideraciones de coste-beneficio para optimizar el resultado. Conviene tener presente que el riesgo nulo es una ficción, incluso cuando tratamos con acciones mejor conocidas que los terremotos.

Además de la optimización mencionada, hay que considerar la sensibilidad al riesgo individual y colectivo, así como su traducción a niveles de riesgos que la sociedad está dispuesta a aceptar y cuánto está dispuesta a pagar para disminuirlos. Este es un tema muy complejo, variable con el tiempo, con la geografía y con la naturaleza del riesgo, que excede al alcance de este documento.

No se considera necesario añadir más detalles aquí, ya que el curso incluye una presentación específica sobre el análisis de riesgos a cargo de Robert Pine.

2. PROBLEMAS CAUSADOS POR LOS TERREMOTOS

La ocurrencia de un terremoto puede causar problemas de muy diversa índole a una presa de estériles. Se mencionan aquí algunos de los problemas potenciales de mayor relevancia:

- *Movimiento diferencial del terreno*
Este fenómeno está restringido a aquellos casos en que la falla causante del terremoto atraviesa la cimentación de la presa.
- *Vertidos sobre la coronación*
Estos vertidos son posibles cuando el terremoto desarrolla olas capaces de sobrepasar la altura de resguardo. También pueden ocurrir si el terremoto provoca fallos de taludes cuya caída hacia el interior de la balsa genera olas capaces de pasar sobre la coronación.
- *Fallo del talud de la presa*
Sometido a las cargas adicionales generadas por el terremoto, los taludes de la presa pueden fallar.
- *Fallo de la cimentación*
Este fallo es similar al anterior, excepto que no es el talud sino la cimentación de la presa la que desliza como consecuencia del terremoto.
- *Tubificación (“piping”) por grietas en el núcleo*
La apertura de grietas en el núcleo por la acción del terremoto puede permitir el paso del agua, con el consiguiente arrastre de materiales y efectos erosivos.
- *Licuefacción de los estériles*
Los estériles se encuentran saturados y en una configuración floja. Su licuefacción bajo la acción sísmica disminuye o anula su colaboración resistente, a la par que es capaz de aumentar notablemente el empuje que ejercen sobre la presa.

- *Licuefacción de la presa o de la cimentación*
Si la presa, la cimentación o ambas están constituidas por materiales granulares flojos y saturados, pueden ser susceptibles de licuefacción sísmica, lo que conlleva una fuerte disminución de su resistencia.

- *Subsidencia*
Es normal que un terremoto produzca alguna compactación de los materiales de la presa y la cimentación, lo que daría lugar a una cierta subsidencia de la superficie, incluidos asentamientos diferenciales por falta de homogeneidad en los materiales y en los efectos producidos.

- *Distorsiones, grietas, fallos locales*
Además de los movimientos verticales, el terremoto puede inducir movimientos horizontales, distorsiones del perfil, aparición de grietas y colapsos localizados de importancia variable.

- *Funcionamiento de equipos*
Las vibraciones generadas por el terremoto, tanto en el campo lejano como en la propia presa, pueden hacer que equipos allí ubicados dejen de operar correctamente.

La lista anterior no tiene vocación de ser exhaustiva, pero se considera suficiente para mostrar que un terremoto puede ser causa de incidentes serios en una presa de estériles. Por otra parte, es claro que se trata de una lista restringida a los problemas inmediatos causados por el terremoto. Los problemas últimos, potencialmente derivados de los anteriores, son daños a personas, pérdidas económicas de muy diversas índole y daños al medio ambiente.

3. ACCIONES DE DISEÑO

Se ha comentado ya que el estado del arte en sismología no nos permite predecir la actividad sísmica excepto en términos estadísticos; por otra parte, tampoco resulta factible establecer un máximo absoluto al tamaño creíble de la acción sísmica. En consecuencia, la peligrosidad sísmica de un emplazamiento se caracteriza por medio de una curva que describe la probabilidad anual de que se sobrepase cada nivel de aceleración del terreno. Se sigue que el diseño podría en principio basarse en cualquier nivel de aceleraciones del suelo; lo que variaría de unos a otros es su probabilidad de ocurrencia. Los niveles aceptables de probabilidad pueden venir impuestos por la normativa, la propiedad, los organismos reguladores o un análisis coste-beneficio.

En ingeniería sísmica se han estandarizado sobre los últimos 30 años más o menos dos niveles de terremoto y de sus probabilidades asociadas.

a) *Terremoto de operación*

También se le conoce como el OBE (Operating Basis Earthquake). Cuando ocurre se espera que todas las instalaciones sigan funcionando con normalidad y que los materiales estructurales se mantengan dentro de sus rangos elásticos de funcionamiento. Lo lógico sería derivar su probabilidad de ocurrencia de un análisis coste-beneficio, pero en la práctica se asocia cada vez más al terremoto cuya probabilidad de ocurrencia en 50 años es del 10%. Esto equivale a un período de retorno de 475 años.

b) *Terremoto de seguridad*

También se le conoce como el SSE (Safe Shutdown Earthquake). Si ocurre, es aceptable que se produzcan daños de diversos tipos y que los materiales estructurales se plastifiquen. No es aceptable sin embargo, que se produzca una catástrofe. Generalmente se suele tomar como el terremoto que tiene un periodo de retorno de 10.000 años.

La determinación de las aceleraciones correspondiente a estos terremotos puede hacerse, al menos en primera aproximación, utilizando la norma española

(NCSE-94). Sin embargo, en casos de especial responsabilidad, es frecuente que se requiera un estudio específico para el emplazamiento.

La conducción de este estudio específico entraña los siguientes pesas básicos:

- 1) *Historia sísmica*. Se recaba la información de todos los terremotos ocurridos en un radio de 300 km centrado en el emplazamiento. El Instituto Geográfico Nacional mantiene esta base de datos.
- 2) *Geología*. Se recopila la información geológica relevante en la misma zona.
- 3) *Tectónica*. Se recopila asimismo la información tectónica, con especial atención a fallas activas y accidentes relevantes desde el punto de vista sísmico.
- 4) *Zonificación*. Se asocia la generación de terremotos en el pasado a zonas sismogénicas a la vista de la información recabada en 1), 2) y 3). Se asignan tasas de generación a puntos, líneas y áreas.
- 5) *Propagación*. Desde el epicentro, los terremotos deben viajar al emplazamiento, alterando en el proceso sus características. A la vista del tipo de terremotos y de la geología, se adoptan leyes de atenuación adecuadas para representar la alteración mencionada.
- 6) *Intensidad-aceleración*. Dado que los instrumentos de medida son un invento reciente, los terremotos antiguos tienen sólo datos de intensidad, que habrá que traducir a aceleración en algún momento del proceso.
- 7) *Peligrosidad*. La capacidad de generación de cada zona sismogénica y las leyes de atenuación correspondientes permiten determinar la curva de peligrosidad en el emplazamiento.

En cualquier caso, determinada la aceleración de base del terremoto(s) de diseño, falta por determinar la forma del espectro de respuesta. Esta es función de las características del terremoto en origen, de su propagación y, lo que es especialmente relevante, de las características geotécnicas y a veces topográficas del emplazamiento. La norma española (NCSE-94), el Eurocódigo 8 (ENV 1998-

1-1) y otras normas o guías de ámbito específico suministran la información necesaria para construir espectros de respuesta conservadores sobre la base de la aceleración calculada.

4. COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES

Las acciones dinámicas del terremoto desencadenan una respuesta de los diversos materiales afectados. La cimentación, la presa y los estériles se tratarán aquí de forma similar, ya que los tipos de respuesta que pueden generar son también similares. Se excluyen las cimentaciones de roca sana, que son susceptibles de generar menos problemas.

Desde el punto de vista de la respuesta activada por el terremoto, hay esencialmente dos aspectos que conviene examinar:

- a) Características del comportamiento tenso-deformacional de los materiales involucrados, especialmente al someterse a sollicitaciones desviadoras. Éstas afectan a la respuesta dinámica y gobiernan la estabilidad.
- b) Cambios de volumen potencialmente desencadenados por la acción sísmica en los diversos materiales.

Ambos aspectos se tratarán brevemente en el resto del presente capítulo.

4.1 Respuesta mecánica

Como ya se ha comentado, el comportamiento mecánico del suelo que resulta de mayor interés es su comportamiento en cortante. Incluyendo como suelo la cimentación, la presa y los estériles, ese comportamiento empieza a ser no lineal desde deformaciones muy pequeñas, del orden de 10^{-5} . Cualquier terremoto cuya ocurrencia sea relevante para el diseño producirá deformaciones considerablemente mayores. Esto obliga a conocer el comportamiento de los materiales para niveles de deformación más elevados: por tanto, no basta con determinar los módulos de pequeñas deformaciones a partir de las velocidades de propagación de ondas medidas en una campaña geofísica.

La no linealidad del comportamiento puede obtenerse a partir de:

- ensayos de laboratorio (columna resonante y triaxiales dinámicos o ensayos de cortante cíclico)
- experiencias anteriores, con cierta precaución para asegurar su aplicabilidad a los materiales en cuestión.

La primera consecuencia de la falta de linealidad es que el módulo secante (cociente entre la tensión cortante aplicada y la deformación cortante producida) disminuye al aumentar el nivel de deformación. Además, esta desviación respecto de la linealidad no es elástica: al anular la tensión impuesta, la descarga no sigue el mismo camino de la carga. La desviación es consecuencia de un comportamiento plástico y conlleva la aparición de deformaciones residuales. Esto hace que en cada ciclo de carga y descarga se disipe una cierta cantidad de energía. La cantidad de energía disipada aumenta con el nivel de deformación.

Así pues, al crecer el nivel de deformación al que se ven sometidos los diversos materiales, tiene lugar un deterioro progresivo del módulo secante y un aumento de la energía disipada por histéresis.

Si el conjunto formado por la presa, la cimentación y la balsa se comportara elásticamente, su respuesta al terremoto puede interpretarse como una suma de las respuestas en cada uno de los modos de vibración. Incluso en presencia de una disipación viscosa de energía, la respuesta global sería suma de las respuestas en los diversos modos con los amortiguamientos correspondientes. El problema es que los modos de vibración, sus frecuencias características y la disipación de energía son todos función de los niveles de deformación inducidos. Resulta así difícil soslayar totalmente la no linealidad de la respuesta esperable.

4.2 Cambios de volumen

Si alguno de los materiales se encuentra en una configuración poco densa, la energía aportada por el terremoto puede ser suficiente para que salte la barrera energética que le impide adoptar una configuración más compacta y, en consecuencia, una menor energía potencial.

Si el material no está saturado, la compresibilidad del gas presente permitirá acomodar los cambios de volumen sin una variación sustancial de las presiones intersticiales y, por tanto, de las efectivas. La consecuencia de esa compactación

será la producción de asientos, más o menos uniformes, pero sin alterar las condiciones de estabilidad.

Sin embargo, es de esperar que el material se encuentre saturado por debajo del nivel freático, lo que generalmente incluirá los estériles, gran parte de la cimentación y partes de la presa. La baja compresibilidad del agua no permite disminuir el volumen sin cambiar las presiones intersticiales. En estas circunstancias, la consecuencia del intento de densificación por parte de la estructura sólida del material conlleva una transferencia total o parcial de las presiones efectivas a las intersticiales. El exceso de presiones intersticiales pondrá el agua en movimiento y, pasado un cierto tiempo, los niveles preexistentes se restablecerán. El tiempo requerido para completar el proceso es función del coeficiente de consolidación del material (esencialmente, de la permeabilidad) y de la longitud del camino de drenaje.

Desde que el terremoto induce un exceso de presiones intersticiales hasta que éstas desaparecen, la estabilidad empeora siempre respecto de la situación preexistente. El motivo es que la resistencia al cortante de los materiales es función de la compresión efectiva a la que están sometidos. El aumento de presiones intersticiales tiene lugar a base de una disminución de las presiones efectivas. Mientras esto dura, la capacidad resistente del material disminuye o incluso se anula, en función del grado de transferencia de presiones ocasionado. Este es el fenómeno conocido como la *licuefacción*. Si una parte de la presa o de su cimentación se encuentran en estas circunstancias, su resistencia se verá disminuida o anulada como consecuencia.

El problema desgraciadamente afecta también a los estériles. Éstos, como cualquier material normalmente consolidado, ejercerán sobre la presa los empujes horizontales correspondientes. Los empujes horizontales en esta situación son del orden de la mitad de las compresiones verticales causadas por el peso de los materiales suprayacentes. El que sean sólo del orden de la mitad es consecuencia de que se trata de un material sólido con una cierta resistencia al cortante. Si se produce la licuefacción, el material deja temporalmente de ser sólido al perder la resistencia al cortante, con lo que los empujes horizontales se hacen iguales a las compresiones verticales. Si eso ocurre en toda la columna de estériles, se siguen dos consecuencias igualmente dañinas: los empujes sobre la presa aumentan (aproximadamente se duplican) y los estériles dejan de colaborar en la labor resistente a la que antes contribuían.

5. METODOLOGÍA DE CÁLCULO

Pasamos revista en este capítulo a las metodologías disponibles para evaluar la respuesta y estabilidad de una presa de estériles frente a la acción del terremoto.

5.1 Método equivalente estático

El procedimiento no intenta evaluar la respuesta al terremoto, sólo busca determinar si se conserva la estabilidad. Consiste en hacer un análisis estático en el que la acción del terremoto se sustituye por fuerzas estáticas, generalmente por una fuerza horizontal. Dicha fuerza se evalúa multiplicando las masas por la máxima aceleración horizontal del terremoto.

La aplicación del procedimiento estático generalmente utiliza un método de equilibrio límite. El método consiste en despreciar la deformabilidad de los materiales, postular superficies de posible rotura y comparar a lo largo de las mismas las fuerzas desestabilizadoras con las resistencias movilizables. Si las primeras son menores que las segundas, supuestamente se mantiene la estabilidad.

Aunque en ausencia de ordenadores el cálculo no puede sofisticarse mucho más, este procedimiento es poco satisfactorio ya que no tiene en cuenta ninguna de las características dinámicas de la acción y de la respuesta. Las características dinámicas de la presa y la balsa harán que se amplifiquen o amortigüen determinadas componentes del movimiento en función de las frecuencias de unos y otros. Se percibe ya que el método equivalente estático no puede ser muy realista; de hecho, puede ser demasiado conservador o demasiado poco, lo único que sabemos es que puede incluir errores importantes. El problema se complica aún más al recordar que los módulos secantes, los modos de vibración, el nivel de las tensiones efectivas y los propios empujes estáticos ejercidos por los estériles sobre la presa pueden verse considerablemente alterados por el terremoto.

5.2 Cálculo por elementos finitos

El procedimiento anterior podría ser suficiente si no hay amplificación dinámica, los materiales no se deterioran por la acción cíclica (licuefacción, etc) y los empujes considerados son los que realmente se desarrollan. Como no suele ser fácil garantizar todo lo anterior, conviene recurrir a métodos más precisos, especialmente en casos en que el tamaño de la balsa o el impacto potencial de su fallo sean importantes.

La realización del análisis por elementos finitos entraña los siguientes pasos:

a) *Determinación de la acción de diseño*

Esta se conoce generalmente como un espectro de respuesta en la superficie del terreno en el campo lejano. Hay que generar un acelerograma consistente con ese espectro y llevar a cabo su deconvolución hasta la base del futuro modelo de cálculo. Esto consiste en calcular el acelerograma que, de actuar a dicha profundidad, hubiera producido el acelerograma consistente en la superficie. La profundidad debe ser suficiente para que la presencia de la presa no afecte los movimientos. La deconvolución es simplemente una propagación de ondas unidimensional, en la que se usan módulos consistentes con los niveles de deformación inducidos.

b) *Construcción del modelo*

Se construye una malla de elementos finitos que represente la geometría, normalmente en dos dimensiones en la sección más comprometida. Se dota de propiedades a los materiales. Estas pueden describir el comportamiento no lineal de los materiales o, más frecuentemente, una aproximación lineal; sin embargo, las características de rigidez y disipación de energía asignadas en este último caso deberán ser consistentes con los niveles de deformación inducidos.

c) *Análisis*

A continuación se calcula la respuesta dinámica del conjunto formado por los estériles, la presa y la cimentación. El procedimiento más común consiste en llevar a cabo una integración paso a paso en el tiempo. Los resultados son esencialmente las historias experimentadas por cada variable (desplazamientos, etc) en cada punto a lo largo del terremoto.

d) *Presiones intersticiales*

Provistos con las características de la respuesta cíclica de los diversos materiales y de las historias de tensiones a las que el terremoto los ha sometido, se calcula (si es procedente) la generación de presiones intersticiales inducida por el terremoto. Puesto que estas presiones generadas provienen de las efectivas, hay que comprobar la estabilidad con los nuevos valores de presiones efectivas. Conviene notar que esto afecta tanto a la resistencia de los materiales como al empuje ejercido por los estériles.

e) *Evolución post-terremoto*

Es posible que las presiones intersticiales generadas no conduzcan inmediatamente al fallo de la presa o su cimentación. Sin embargo, la difusión ocasionada por las sobrepresiones creadas puede llevar a una situación inestable en algún momento posterior. Varias presas han fallado por esta causa uno o más minutos después de terminado el terremoto. Cuando esto sea verosímil, la evolución del campo de presiones intersticiales tras el terremoto deberá también ser analizada para ver si conduce a una pérdida potencial de estabilidad.

Este procedimiento es lógicamente más largo y costoso que el anterior pero tiene dos ventajas esenciales. En primer lugar, considera todos los aspectos significativos del problema, aunque lo haga de forma simplificada. Como ya hemos visto, esto no ocurre con el método equivalente estático.

En segundo lugar, es infinitamente más informativo ya que produce información sobre desplazamientos, velocidades, aceleraciones, tensiones, deformaciones y presiones intersticiales. Como subproducto se puede llevar a cabo también el análisis estático con diversas hipótesis de carga y generar información contrastable con las medidas de auscultación y seguimiento que se realicen, tanto en el caso dinámico como en el estático. En contraste, el método equivalente estático sólo nos informa sobre si se espera que la presa falle o no durante el terremoto.

Lista de referencias

ENV 1998-1-1 “Eurocode 8 – Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures”, European Prestandard.

ICOLD – International Committee on Large Dams (1995) “Tailings Dams and Seismicity”, Bulletin 98.

NCSE-94 “Norma de Construcción Sismorresistente: Parte General y Edificación”.

USCOLD – United States Committee on Large Dams (1993) “Tailings Dams Incidents”.