

# Incidentes en presas: La “velocidad de deformación anelástica” como criterio de seguridad

Dam Incident: the anelastic deformation (anelastic strain rate) as an original dam safety criterion

**Francisco Javier Sánchez Caro.** Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
*Geotecnia de Proyectos y Obras (GEOprob). fsc@geoprob.com*

**Resumen:** En el presente artículo se trata de resumir el trabajo de investigación realizado (“Aproximación Histórica y Estadística a los incidentes en presas”, Accésit del Premio “José Torán” 2006), en el que se intenta revisar la forma en que se han producido históricamente estos incidentes graves en las presas, como un referente necesario para tratar de aprovechar esta experiencia previa en el control del comportamiento de nuestras presas.

La conclusión fundamental del trabajo realizado es que, dejando a un lado los casos con un origen hidrológico o sísmico del incidente, la mayor parte de las patologías de origen geotécnico (a excepción, quizá, de algunos casos concretos de erosión interna “súbita” en presas de materiales sueltos) tienen un reflejo evidente (durante un período de tiempo significativo y suficiente) en las filtraciones y/o las deformaciones de la presa. Otra cosa diferente es que el ingeniero sea capaz de detectarlo e interpretarlo correctamente...

Analizada esta información señalada, se pensó de interés realizar una Tesis Doctoral orientada a uno de estos dos aspectos comentados: las deformaciones en las presas (“Seguridad de Presas: Aportación al análisis y control de deformaciones como elemento de prevención de patologías de origen geotécnico”). Este artículo describe algunas ideas desarrolladas en la Tesis sobre la velocidad de deformación anelástica como criterio de seguridad.

**Palabras Clave:** Presas, Incidentes, Histórico, Estadístico, Seguridad

**Abstract:** This paper tries to summarize the investigation work carried out by the author (“Historic and statistical approach to the analysis of dam incidents”, Accesit “José Torán” Award 2006), trying to review the way in which serious events (dam incidents) have taken place historically, as a necessary experience as a basis for present-day monitoring of dam behaviour.

Leaving aside incidents of hydrologic or seismic origin, the fundamental conclusion of this review of the history and statistics of dam failures is that most problems of a geotechnical nature (except perhaps certain cases of “sudden” internal erosion of embankment dams) are reflected in seepage and/or deformation. Furthermore the warning signs of this are evident during a significant period of time. Of course, whether or not the engineer is capable of detecting and correctly interpreting these signs is another matter.

After examining the above, the author suggested the preparation of a Doctoral Thesis focusing on one of the two aspects mentioned above: deformations in dams (“Dam Safety: a contribution to the analysis and control of deformations in dams as a way of anticipating problems of geotechnical origin”). This paper describes some ideas (developed in this thesis) about the velocity of the anelastic deformation (anelastic strain rate) as an original dam safety criterion.

**Keywords:** Dam Incident, Historical, Statistical, Dam Safety

## 1. Introducción

El trabajo “*Aproximación histórica y estadística a los incidentes en presas*”, que fue premiado con el “Accésit” de la Sexta Convocatoria Extraordinaria del

Premio José Torán, forma parte de un todo mucho más amplio. Se trata, en realidad, de la reproducción de los Apéndices A (“Incidentes en presas: Breve reseña sobre algunos casos históricos”) y B (“Apunte estadístico sobre incidentes en presas”), de la Tesis



Fotografía Nº 1 (a y b).- William Mulholland (izda) y André Coyne (dcha), involucrados en la rotura de las presas de St. Francis y Malpasset, respectivamente.

Doctoral **“Seguridad de presas: Aportación al análisis y control de deformaciones, como elemento de prevención de patologías de origen geotécnico”** que, quien suscribe, está a punto de presentar en la Escuela de Caminos de Madrid.

No resulta fácil resumir en unas breves páginas el contenido de un trabajo como éste, que trata de recopilar y actualizar toda la información existente (al menos, la que se ha podido obtener) sobre incidentes en presas. Básicamente ahí radica su interés.

Ingenieros ilustres como John Towlerton Leather, William Mulholland, André Coyne, Carlo Semenza,... se vieron involucrados en accidentes catastróficos. La pregunta clave que orienta y estructura este trabajo (y, en sentido global, toda la Tesis Doctoral) es la siguiente: **“¿Seríamos capaces, en la actualidad,**

**de diagnosticar correctamente casos similares y evitar las catástrofes asociadas?”**. Queda esa pregunta en el aire.

Muy pocas veces se produce un incidente debido a que se haya realizado un cálculo “poco sofisticado” relativo a un determinado “modo de fallo” (además, hoy las herramientas disponibles son extraordinariamente potentes). Desgraciadamente, los incidentes en las presas tienen lugar bien porque no se diagnostica adecuadamente cuál es el “modo de fallo” pésimo o bien porque no se evalúan correctamente cuáles son las acciones y resistencias asociadas.

El conocimiento de los “errores” cometidos en el pasado debe (debería) ser una parte esencial en la formación del ingeniero especialista en presas. De hecho, los “errores” cometidos por el ser humano siempre han sido un referente que ha hecho que el desarrollo técnico avance. En el propio mundo de las presas, las roturas han venido condicionando incluso la propia normativa técnica (en nuestro país, esto ha sido evidente).

El fracaso sistemático hace que el hombre intente comprender cuáles son las causas de su error y, consecuentemente, tratar de adoptar soluciones a ese problema (en la actualidad, los mayores esfuerzos de investigación se centran en aspectos especialmente complejos: presas de tierra que lleguen a ser resistentes a procesos de sobrevvertido, caracterización y tratamiento de cimientos solubles,...). Podría decirse que la propia experiencia personal del ingeniero, no es más que una especie de “análisis



Fotografía Nº 2.- Ilustración de la época, sobre la catástrofe de Bradfield en 1864.



Fotografía Nº 3.- Rotura de la presa de South Fork (31-Mayo-1889). Efectos en la zona de la estación de Johnstown.



Fotografía Nº 4.- Vista de la presa de Bouzey, poco después de su rotura (1895).



Fotografía Nº 5.- Vista actual de la presa italiana de Gleno (su rotura se produjo el 1-Diciembre-1923).

estadístico" de los problemas técnicos vividos y de las experiencias relatadas por otros.

Por ello, dentro del contexto del trabajo reseñado, se consideró que podría tener cierto interés conocer, de primera mano, cómo fallan las presas (y, para ello, realizar una breve referencia a algunos casos históricos de incidentes y un cierto resumen estadístico de los mismos). Aunque la idea inicial era realizar un esfuerzo limitado en el desarrollo de esta parte de la Tesis Doctoral, se sintió la necesidad personal (a medida que se fue avanzando en su desarrollo) de ir ampliando algo más su original alcance. Así, en buena medida, este trabajo podría definirse casi como un "capricho intelectual" de su autor... (que se pone a disposición de cualquier profesional interesado, facilitándole el trabajo completo en formato digital).

## 2. Reseña histórica realizada

Desgraciadamente, no resulta posible dentro del contexto de un trabajo como éste, hacer una reseña histórica (siquiera breve) de un número elevado de incidentes. Por esta razón, se escogieron 19 presas (Puentes, Dale Dyke-Bradfield, South Fork-Johnstown, Bouzey, Gleno, St. Francis, Vega de Tera, Malpasset, Orós, Vajont, Frías, Logan-Butte, Canyon Lake, Banqiao-Shimantan, Teton, Machhu II, Tous, Aznalcóllar y Zeyzoun), tratando de abarcar un rango razonable de casos históricos:

- Se ha intentado abarcar un amplio período temporal (dos siglos), incluyendo las roturas de la presa de Puentes (1802) y la presa de Zeyzoun (2002), como primera y última rotura de la que se tenía suficiente constancia documental.
- Se ha pretendido, en lo posible, tener una amplia representación territorial, con 9 presas europeas, 5 norteamericanas, 2 sudamericanas y 3 asiáticas.
- Parece que esta lista no hubiera estado completa, si además de las roturas relacionadas con la propia infraestructura hidráulica no se hubiera incluido algún caso histórico (como Vajont) de deslizamiento masivo de las laderas del vaso.
- Otro aspecto que se trataba de cubrir era que se contemplaran diferentes modos de fallo, desde el sobrevertido (normalmente asociado a causas hidrológicas y de déficit de capacidad de evacuación) o la erosión interna (incluyendo el sifonamiento) hasta los fallos debidos fundamentalmente al cimiento (por su deformabilidad o escasa resistencia al corte),...
- También se ha considerado de interés, tener una amplia variedad de tipología de presas, incluyendo casos de balsas de residuos mineros, presas homogéneas de tierras, presas zonadas de materiales sueltos, gravedad, bóvedas, etc.
- Se han tratado casos bien diferentes desde el punto de vista de la documentación actualmente existente: desde la opacidad informativa de las roturas de las presas de India y China, a la abundante información de las presas norteamericanas y algunas europeas.



Fotografía Nº 6.- Vista de la presa de St Francis, tras la catástrofe del 12-Marzo-1929.



Fotografía Nº 7.- Restos de la bóveda de Malpasset, tras su rotura el 2-Diciembre-1959.

- Se ha querido incluir en esta selección de 19 presas, una amplia gama de catástrofes asociadas. Desde presas cuya rotura originó daños medioambientales severos sin pérdida de vidas humanas (caso de Aznalcóllar) hasta roturas que ocasionaron centenares de miles de víctimas (caso de Banqiao-Shimantan).
- Aunque la mayor parte de las catástrofes están asociadas exclusivamente a las originadas por la rotura de una presa, también se ha querido incluir el caso de una riada catastrófica en el que la rotura de la presa sólo fue responsable de una parte (probablemente pequeña y difícilmente cuantificable) del conjunto de los daños (Canyon Lake, por ejemplo).

A cada una de estas presas indicadas, se dedica un apartado específico en la primera parte del tra-

bajo, donde se comentan los principales aspectos de su rotura (o accidente catastrófico asociado), incluyendo, en ocasiones, las observaciones personales y subjetivas del autor de este trabajo. Dentro de la heterogeneidad existente, en cuanto a la información disponible en cada caso, se ha tratado de documentar cada uno de ellos lo mejor que se ha sido capaz, incluyendo distintas figuras, gráficos, fotografías, etc, haciendo referencia a las fuentes de información consultadas (junto con aquellas otras que pueden ser también de utilidad para el lector interesado).

Podría ser discutible si hubiera convenido más incluir una u otra presa, en lugar de algunas de las que finalmente se han escogido. Aún así, se cree que la selección realizada es suficientemente variada y contempla los casos españoles que están en la mente de todos: Puentes, Vega de Tera, Tous y Aznalcóllar.



Fotografía Nº 8.- Rotura de la presa de Teton, al mediodía del 5-Junio-1976.



Fotografía Nº 9.- Vista general de la presa de Tous, tras su rotura el 20-October-1982.

### 3. Análisis estadístico

En un sentido amplio, se podría definir que un análisis estadístico no es otra cosa que un intento de cuantificar la historia "con trazos gruesos" (y con mayor o menor éxito).

En esta parte del trabajo (Apéndice B de la Tesis Doctoral), se pretendía dar un cierto enfoque estadístico para tratar de conocer algo mejor cómo se producen las roturas y accidentes en las presas, en el sentido de determinar cuáles son las causas que las motivan. El análisis estadístico realizado, se desarrolla basándose en algunas de las más notables recopilaciones existentes. Entre otras, cabe destacar las siguientes:

- Trabajo del U.S. Bureau of Reclamation de Baab, A.O y Mermel, T.W. del año 1968 ("Catalogues of Dam Disasters, Failures and Accidents" del U.S. Department of the Interior). Quizá constituye el primer intento serio de listar los incidentes de presas (por orden alfabético, dentro de cada país). Proporciona un pequeño resumen de cada incidente incluyendo información sobre las características de la presa (altura, tipo de presa, etc) y una descripción muy escueta del incidente con referencias de cada uno de ellos. No se realiza ningún tipo de análisis de la información.
- "Bibliography of the History of Dam Failures" del Risk Assessment International (RAI-Austria), promovido por A.Vogel (que lleva dedicada gran parte de su vida profesional a estos temas). Lo que, en principio, era solamente un listado de roturas de presas en todo el mundo (por orden cronológico), se ha convertido realmente en una recopilación de referencias de bastante utilidad. Además, su "Data Station for Dam Failures" (DSDF-VIENNA) proporciona datos geométricos de las presas afectadas y de las posibles causas de las diferentes roturas, citándose un total de 323 roturas de grandes presas, 445 roturas de presas pequeñas y 133 roturas adicionales correspondientes a balsas de residuos mineros.
- Estudios de ICOLD de los años 1974, 1983 y 1995. ICOLD llevó a cabo un amplio estudio sobre incidentes en presas en esas tres ocasiones diferenciadas: "Lessons from Dam Incidents" (1974), "Deterioration of Dam and Reservoirs" (1983) y "Dam Failures Statistical Analysis" (1995, Bulletin 99). Todos es-



Fotografía Nº 10.- La balsa de "Los Frailes" (o presa de Aznaicóllar), tras su rotura el 24-Abril-1998.

tos trabajos están basados en los cuestionarios que se enviaron a los distintos países miembros de ICOLD sobre roturas y accidentes en presas. Estos estudios de ICOLD proporcionan las características de las presas usando el mismo sistema de clasificación del "Registro Mundial de Presas" ("World Register of Dams"), como son su altura, año de construcción, tipo de presa, ..., incluyéndose en los trabajos de 1974 y 1983, además, una breve descripción del incidente que tuvo lugar.

- Dentro de los trabajos desarrollados para diferenciar los comportamientos adecuados de los inadecuados en presas de fábrica, hay que hacer referencia obligada al concepto de "esbeltez" desarrollado por G. Lombardi (o al de "esbeltez geotécnica" que sugiriera M. Zeballos). Estos trabajos constituyen verdaderos criterios (basados en análisis estadísticos) para realizar una primera estimación de la bondad previsible en el comportamiento de una presa en una determinada cerrada (representada usualmente por la geometría de ésta y por el módulo de deformación del macizo). No se conocen, sin embargo, trabajos estadísticos que involucren parámetros tales como la resistencia al corte según discontinuidades, ... para el que el concepto de "esbeltez geotécnica" (más cercano al de la inclinación de la resultante y, por ello, a la propia demanda de resistencia al corte) parecería más adecuado. Dentro del análisis estadístico de incidentes en presas de fábrica, hay que hacer una referencia obligada al trabajo desarro-

Fotografía N° 11.- Presa vertedero de Shi-Kang (Taiwan) tras el terremoto de Chi-Chi (21-Septiembre-1999). Se localizaba en una falla activa que experimentó un "salto vertical" de hasta 7.7 m.



llado por K. J. Douglas (Universidad de Nueva Gales del Sur, Sidney).

- Dentro del contexto de las presas de materiales sueltos, hay un conjunto de trabajos excelentes, desarrollados también por la Universidad de Nueva Gales del Sur (Australia), bajo la dirección de R. Fell. Entre ellos, destaca notablemente el trabajo denominado "Analysis of Embankment Dam Incidents" (Abril, 1998), cuya autoría corresponde a Mark Foster, Matt Spannagle y el citado Robin Fell. Su objetivo fundamental era ampliar las recopilaciones de incidentes de presas de materiales sueltos incluyendo más detalles como la tipología de presas (homogénea, zonada, escollera con pantalla,...), la presencia o no de materiales tipo filtro, el tipo de cimentación y las características geotécnicas del cuerpo de presa (y de su compactación). Esto se realiza de cara a estimar las probabilidades de fallo frente a un determinado modo de fallo (para cada tipología de presa) e identificar qué factores resultan esenciales (geología del cimentado, características del cuerpo de presa,...), de tal forma que influyen en la rotura de una presa, según los modos de fallo de erosión interna e inestabilidad de taludes.

Para la realización de un enfoque estadístico con cierto rigor, el primer dato que debiera acotarse es el número de unidades que constituye el "universo" a

analizar: esto es, el número de presas que conformar el patrimonio presístico mundial. Sin embargo, no hay un consenso claro sobre la población mundial de Grandes Presas. De hecho existe una cierta discrepancia entre las dos fuentes de mayor credibilidad:

- "Registro Mundial de Presas" de ICOLD ("World Register of Dams"), en su actualización de 1998.
- "Comisión Mundial de Presas" de la ONU ("World Commission on Dams"), en su informe de Noviembre de 2000.

Las discrepancias resultan ser muy notables, al menos, en algunos países (China, Japón, India,...), tal como puede observarse en la Figura N° 2 adjunta.

En cualquier caso, los "Modos de Fallo" a los que se hace referencia en el trabajo realizado, son los consensuados por ICOLD, que se corresponden con los que se señalan a continuación:

- 1.- **Sobrevellido** (Insuficiencia ante la solicitud hidrológica).
- 2.- Inestabilidad de laderas en embalse (Insuficiencia de Resistencia al Corte).
- 3.- Inestabilidad Dinámica (Insuficiencia ante la solicitud sísmica).
- 4.- Inestabilidad Elástica (Insuficiencia Estructural) o Erosión interna del Cuerpo de Presa (Insuficiencia de Estabilidad Interna en Cuerpo de Presa).

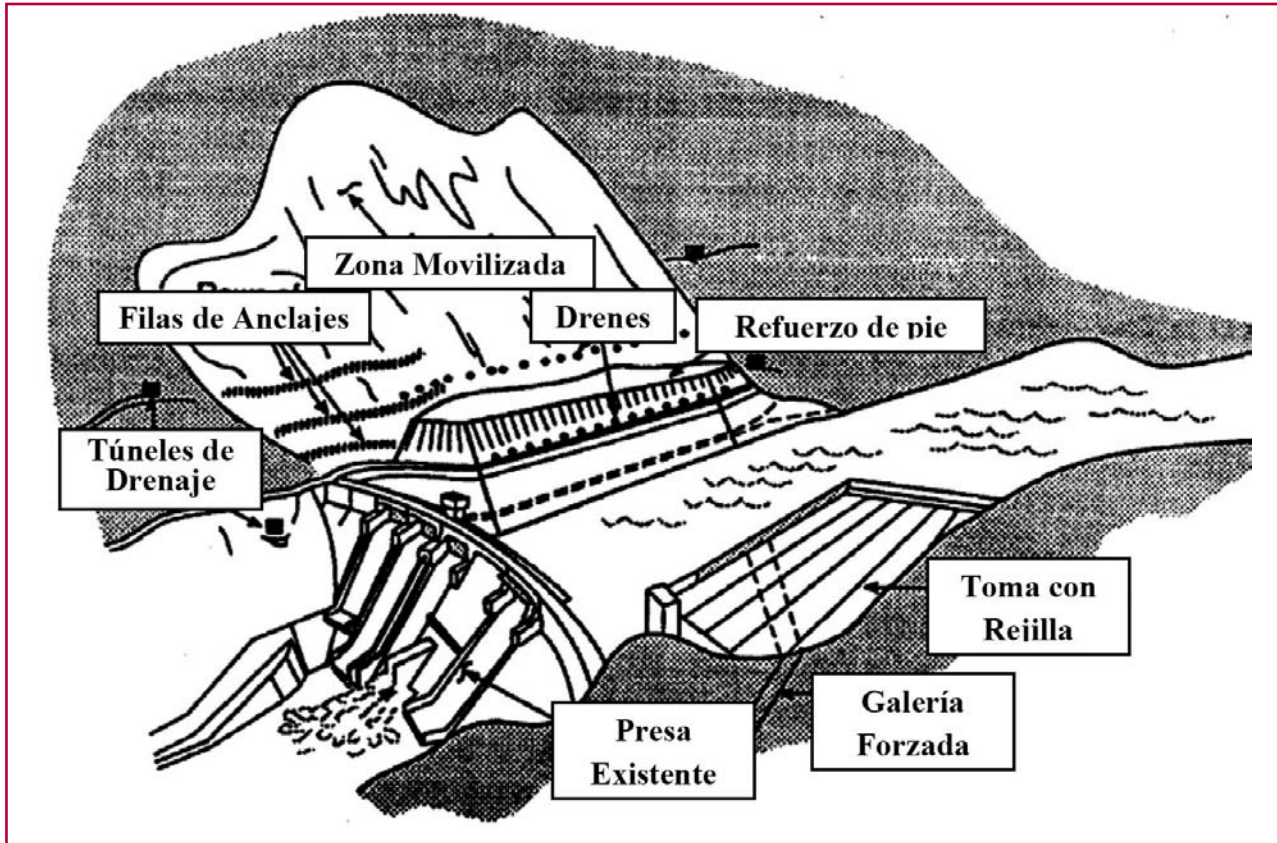


Fig. Nº 1. Estabilización de laderas en el embalse de la presa de Tablachaca, Perú. (Boletín 124 ICOLD).

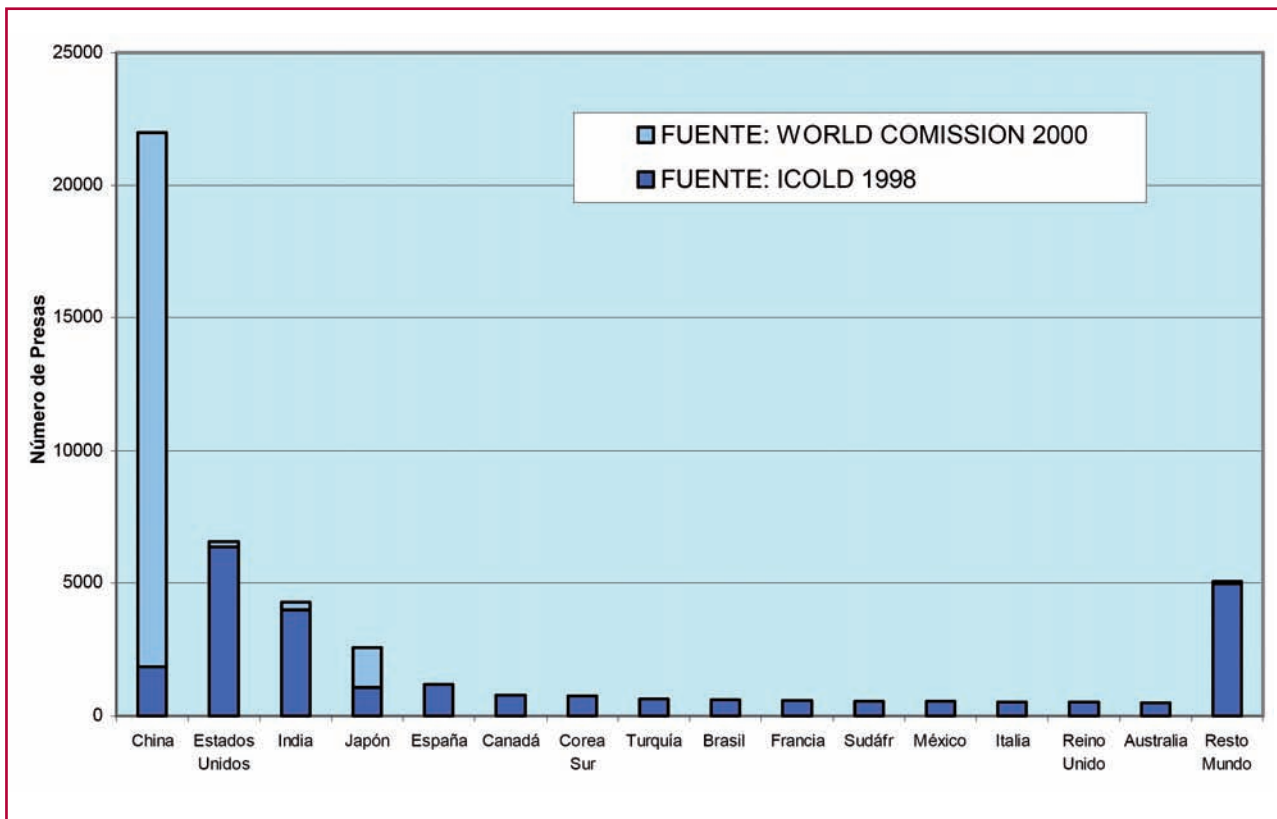


Fig. Nº 2. Discrepancias en la población mundial de grandes presas.

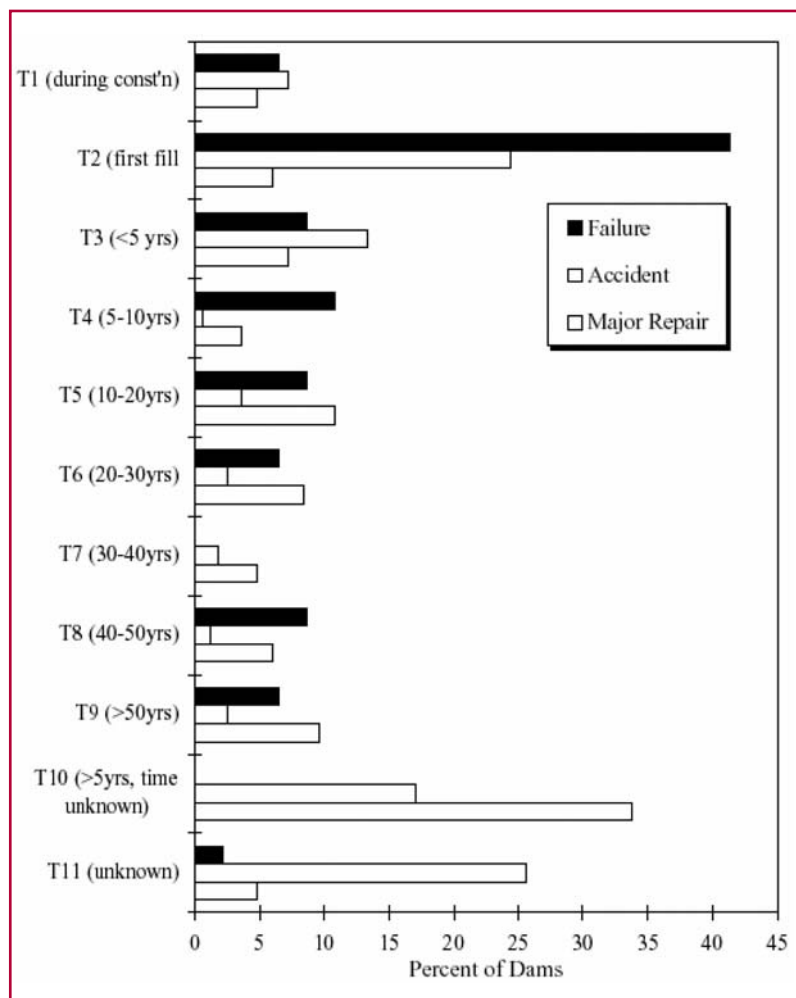
5.- Inestabilidad Estática-Deslizamiento o Inestabilidad de Taludes de presa (Insuficiencia de Resistencia al Corte), pudiendo afectar o no al cimiento, en este último caso

6.- Erosión interna del Cimiento (Insuficiencia de Estabilidad Interna en general, incluyendo problemas asociados a Solubilidad, Sifonamiento, Filtraciones, etc).

Nota: Cuando se indican dos "Modos de Fallo" de manera conjunta, el primero se considera de aplicación para las presas de fábrica, mientras que el segundo sería el "equivalente" para presas de tierras.

En esta parte del trabajo, se desarrollan separadamente los modos de fallo propios de presas de fábrica de aquellos específicos de las presas de materiales sueltos, tras hacer referencia a aquellos aspectos que les son, en cierto modo, comunes (conside-

Fig. Nº 3. Ejemplo de gráfico asociado a la estadística de incidentes en presas de fábrica: Edad de la presa al producirse el incidente (Douglas, 2002).



raciones sobre avenidas, sismos e inestabilidad de laderas del vaso).

Finalmente, se dedica un apartado específico al estudio estadístico de balsas y presas de residuos mineros ("Tailing dams").

#### 4. Conclusión fundamental del trabajo realizado

Ya se ha dicho que no se puede (ni se pretende) resumir un trabajo como el realizado en estas breves líneas. Quizá la conclusión fundamental de este trabajo de revisión histórica y estadística de incidentes en presas sea la constatación de que, dejando a un lado los casos con un origen hidrológico o sísmico del incidente, la mayor parte de las patologías de origen geotécnico tienen un claro reflejo en las filtraciones y/o las deformaciones de las presas, que suele ponerse de manifiesto durante un período de tiempo significativo y suficiente (a excepción, quizá, de algunos casos concretos de erosión interna "súbita" en presas de materiales sueltos). Otra cosa diferente es que el ingeniero sea capaz de detectarlo e interpretarlo correctamente...

#### 5. El trabajo realizado como punto de partida

De acuerdo con lo anterior, este trabajo descrito permitió orientar el objeto fundamental de la Tesis Doctoral, en cuanto a aportar criterios que sean capaces de detectar situaciones patológicas (fundamentalmente en fase de explotación), reduciendo exclusivamente su ámbito al tema de las deformaciones (entendiendo que las filtraciones pueden ser objeto de futuras investigaciones a realizar por terceros).

En ingeniería, resulta muy habitual el estudio de comportamientos acrónicos, en los que sus características mecánicas no se modifican con el tiempo. Esto significa que, una vez que se aplican las cargas, salvo que éstas varíen en el tiempo, los efectos, desplazamientos y fuerzas reactivas, no se modifican.

En general y, en mayor o menor medida, todos los materiales presentan características que se modifican en el tiempo, principalmente su estructura interna (como puede ser debido a que los cristales de los metales se reorientan con los esfuerzos, a que



los poros en los materiales geotécnicos expulsan el agua y se reducen, los hormigones envejecen, etc).

Muy pronto, el ingeniero comprendió que las estructuras "reaccionan" a las solicitaciones deformándose, de tal forma que una parte de esta deformación es de tipo elástico (recuperable al eliminar la sollicitación) y otra parte es claramente anelástica (siendo esta última deformación más preocupante, puesto que se va acumulando en el tiempo).

Estas características "temporales" de los materiales, obviamente, se manifiestan en los efectos que las cargas originan en las estructuras. Así, si se ensaya una probeta sometida a un esfuerzo simple de compresión o tracción con incrementos progresivos de carga se alcanzará una "tensión de rotura"; ahora bien, si se somete a la misma probeta a una determinada tensión que permanece constante (inferior lógicamente a la de rotura) y se miden las deformaciones, éstas aumentan. Después de un periodo, que depende del material y de la magnitud de la tensión, se produce la rotura.

Este fenómeno bien conocido, suele denominarse fluencia lenta bajo carga constante, comúnmente denominado como "creep" (los fenómenos asociados a la aplicación de una carga cíclica, denominados fatiga, son asimilables a procesos de fluencia producidos por una tensión efectiva equivalente). Los periodos que caracterizan este fenómeno son:

- Periodo primario: las deformaciones se producen a velocidad decreciente.
- Periodo secundario: las deformaciones se producen a una velocidad que puede llegar a ser prácticamente constante ("velocidad de fluencia").
- Periodo terciario: las deformaciones tienen lugar con velocidad creciente hasta que se produce la rotura. Suele decirse que, a escala temporal humana, este último periodo no siempre se manifiesta.

El valor de la "velocidad de fluencia" tiene muchas expresiones diferentes, más o menos basadas en la termofluencia que establece la ley de Arrhenius (formulación de Arrhenius - Byerlee, de Peierls, de Nabarro-Herring, de Coble,...).

Más que el valor mínimo de la velocidad de deformación de fluencia, interesa conocer cómo evoluciona en el tiempo (modelo de Singh - Mitchell, por ejemplo).

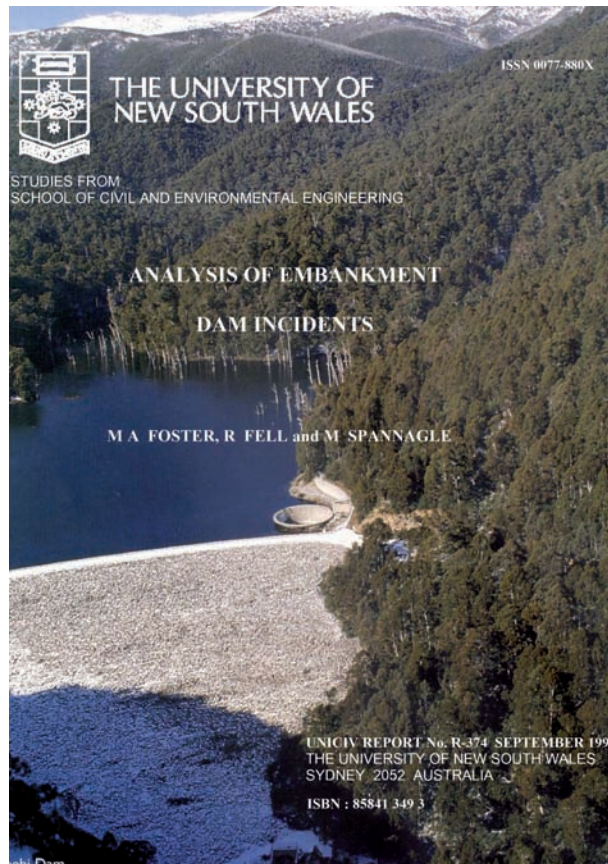


Fig. Nº 4. Portada del trabajo "Analysis of embankment dam incidents" (Sep - 1998), desarrollado por Mark A. Foster, Robin Fell y Matt Spannagle.

Teniendo todo esto en cuenta, quien suscribe propone en su Tesis Doctoral, la siguiente ley simplificada de fluencia global (fluencia y/o fatiga), que conjuga los aspectos de Singh-Mitchell y Arrhenius:

$$\dot{\epsilon} = \frac{A}{t^m} \left( \frac{t_R}{t_R - t} \right)^m e^{\alpha D} e^{-\left(\frac{Q}{RT}\right)} \quad (\text{Sánchez Caro, 2006})$$

donde pueden separarse los efectos tensionales y térmicos, pudiendo escribirse de la forma:

Para procesos de fluencia global típicos en ingeniería civil, puede suponerse que la tensión aplicada y la temperatura son constantes a efectos prácticos. La ley anterior se simplifica hasta:

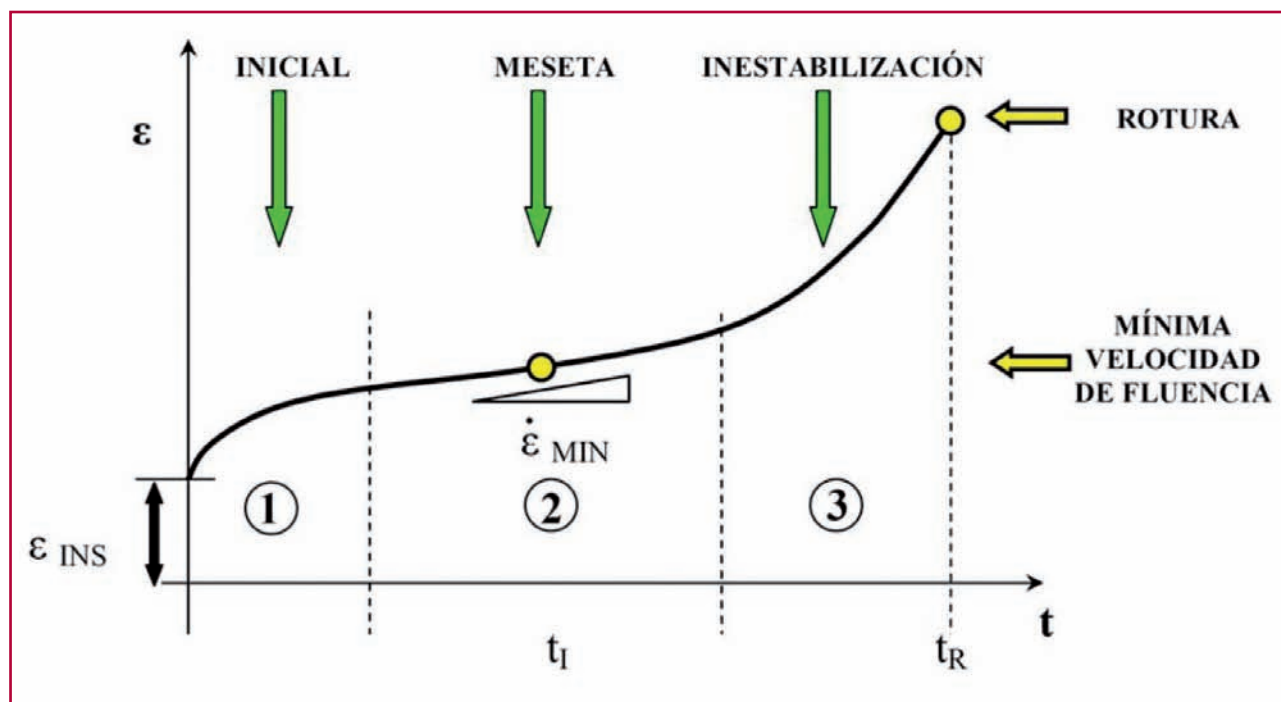
$$\dot{\epsilon} = \frac{A}{t^m} \left( \frac{t_R}{t_R - t} \right)^m F(\sigma, T)$$

donde:

K = Factor cinético del proceso de fluencia

m = Exponente de fragilización hidrógena.

Fig. Nº 5.  
Evolución  
típica de las  
deformaciones  
de fluencia.



Para la mayor parte de los materiales "m" es un valor muy próximo a la unidad. En aquellos procesos y materiales en los que no existe hidrógeno libre, el exponente de fragilización hidrógena es próximo a cero ( $m = 0$ ). Puede verificarse que para  $m = 0$ , se cumple que la velocidad de fluencia es constante. Esto sería representativo, por ejemplo, de los procesos de fluencia en minas de halita (Cloruro Sódico, sal común).

Cuando  $m = 1$ , la expresión anterior se reduce a

$$\dot{\epsilon} = \frac{K}{t^m} \left( \frac{t_R}{t_R - t} \right)^m$$

cuyo análisis tiene cierto interés:

- Se trata de una función simétrica (con simetría axial cuando se representan velocidades de deformación y con simetría polar si se representan deformaciones) con respecto al punto de inflexión ( $t_I$ ), de tal forma que  $t_R = 2 t_I$ .
- Para procesos muy estables (en los que  $t_R$  es un valor muy elevado con respecto a  $t$ ), se cumple que el producto de la velocidad de deformación por el tiempo es una constante (evolución logarítmica de deformaciones).

- También para los primeros instantes de procesos relativamente estables (en los que  $t$  es muy pequeño con respecto a  $t_R$ ), la evolución inicial de la deformación es tal que se cumple que el producto de la velocidad de deformación por el tiempo es una constante (evolución inicial logarítmica de deformaciones).

## 6. La velocidad de deformación anelástica como criterio de seguridad

La pregunta que el lector puede plantearse parece evidente: ¿Qué se pretende con un planteamiento de este tipo? La respuesta es bastante ambiciosa y, por ello, se cree que todos los esfuerzos que se den en este sentido son de interés (en la Tesis que se va a presentar sólo se esbozan algunas ideas): intentar conocer con antelación cuál es el momento en que debe finalizar la vida útil de una presa (atendiendo a "modos de fallo geotécnicos").

La velocidad de deformación anelástica suele ser un parámetro fácilmente medible (la velocidad de asiento de la coronación de una presa de materiales sueltos, por ejemplo, o el ritmo de deriva temporal de los movimientos anelásticos que experimenta una pre-

sa de fábrica en el contacto con su cimiento). Gracias a la auscultación (y al proceso de la información que ésta aporta), hoy existen procedimientos que permiten estimar esta velocidad con una precisión excelente.

Parece lógico pensar, por ejemplo, que la vida útil de una presa no debiera ir más allá del punto de inflexión  $t_i$  de la Figura N° 5. En otras palabras, podría definirse un coeficiente de seguridad dependiente del tiempo, que fuera definido como:

$$F = F_0 \left( 1,5 - \frac{t}{t_R} \right)$$

siendo  $F_0$  el valor del coeficiente de seguridad mínimo admisible al final de la vida útil de la infraestructura (si esta vida útil es igual a  $t_i$ , entonces  $F = F_0$ ). Al sobrepasar el punto de inflexión de la curva de evolución de deformaciones de fluencia ( $t > t_i$ ), el coeficiente de seguridad decrece por debajo de los valores razonables.

Ello sería equivalente a admitir que una presa presenta una explotación segura en tanto en cuanto la velocidad de deformación anelástica sea decreciente con el tiempo. En la Tesis Doctoral que se está a punto de presentar, se ha hecho una aplicación práctica, de esta ley de fluencia propuesta, a algunas presas españolas. ♦

**Referencias:**

-ALONSO FRANCO, M. (1994): "Incidentes y accidentes en presas". Symposium on Safety of Dams. pp1-16. Spanish National Committee on Large Dams. SPANCOLD.Madrid.  
 -BABB, A. O., y MERMEL, T.W. (1968): "Catalogue of dam disasters, failures and accidents". PB179243, U.S. Bureau of Reclamation, Springfield, 1968.  
 -BERGA, L. (1997): "Failures and hydrological incidents of dams in Spain", FLORENCE, congress 19, 1997, report 31, volume IV.  
 -BUDWEG F. M. G. (1997): "Incidents and failures of dams", FLORENCE, congress 19, 1997, report G.R., volume IV.  
 -CHARLES, J.A. y BODEN, J.B. (1985): "The failure of embankment dams in the United Kingdom". In Proceedings of the Symposium on Failures in Earthworks, London, Thomas Telford. pp. 181-202.  
 -DOUGLAS, K., SPANNAGLE, M. y FELL, R. (1998): "Report on Analysis of Concrete and Masonry Dam Incidents". UNICIV, The School of Civil and Environmental Engineering, The University of New South Wales.  
 -FOSTER, M., SPANNAGLE, M. y FELL, R. (1998): "Report on the Analysis of Embankment Dam Incidents". UNICIV Report, School of Civil and Environmental Engineering, The University of New South Wales.  
 -GÓMEZ LAÁ, G., ALONSO FRANCO, M. y ROMERO HERNÁNDEZ, J.L. (1979): "Reflections on some incidents in Spanish dams". Thirteenth International Congress on Large Dams, New Dehli, ICOLD. Vol. Q49 pp. 721-740.  
 -GRUNER, E. (1963): "Dam disasters". Proceedings of the Institute of Civil Engineering (London), 24 pp. 47-60.  
 -ICOLD (1974): "Lessons from Dam Incidents". Paris.  
 -ICOLD (1983): "Deterioration of Dams and Reservoirs".  
 -ICOLD (1995): "Dam Failures Statistical Analysis". Bulletin 99.  
 -ICOLD (2001): "Tailings dams risk of dangerous occurrence. Lessons Learnt from Practical Experiences". Bulletin 121.

-ICOLD (2002): "Reservoir Landslides: Investigation and Management". Bulletin 124.  
 -ICOLD (2003): "Dams and floods: Guidelines and cases histories". Bulletin 125.  
 -INGLES, O.G. (1984): "A short study of dam failures in Australia". 1857-1983. Civil Engineering Systems, 1 (June), pp. 190-194.  
 -JANSEN R.B. (1983): "Significant Accidents and Failures", in Dams and Public Safety, U.S. Government Printing Office, Denver.  
 -JORGENSEN, L. (1920): "Record of 100 dam failures". Journal of Electricity (San Francisco) (Apr.), pp. 320-321.  
 -LEMPÉRIERE, F., FRY, J.J., REVERCHON, B. y ROYET, P. (1997): "Analysis of failures of dams less than 30m high practical lessons". Dix-neuvieme Congres des Grands Barrages, Florence, ICOLD. Vol. Q75 pp. 673-710.  
 -MARTINSEN, J.G. (1995): "Dam failure warning systems". Norwegian Water Resources and Energy Administration. International Journal on Hydropower and Dams, v 2, n 3, May, 1995, p 38-3  
 -MARY, M. (1968): "Arch Dams - Historic Accidents and Occurrences". In Construction and Surveillance of Dams Dunod, Paris, pp. 159.  
 -McCULLY, P. (1996): "Silenced Rivers: the ecology and politics of large dams", p.141 Zed Books, London.  
 -RILEY, P.B. (1997): "Dam incidents in New Zealand", FLORENCE, congress 19, 1997, report 4, volume I.  
 -SCHNITTER, N.J. (1993): "Dam failures due to overtopping". In International Workshop on Dam Safety Evaluation, (Kreuzer & Taylor ed.) Grindelwald, Switzerland, Dam Engineering. Vol. 1 pp. 13-19.  
 -SERAFIM, J.L. (1981): "Elements for a thorough statistical analysis of dam failures". Revista da Universidade de Coimbra.  
 -SHUI-TUANG, CHENG (1993): "Statistics of Dam Failures". pp. 97-105  
 -SILVEIRA, A.F. (1984): "Statistical analysis of deteriorations and failures of dams". In Safety of Dams, (Serafim ed.) Coimbra, A.A. Balkema, pp. 55-60.

-SÁNCHEZ CARO, F. J. (2005): "Aproximación Histórica y Estadística a los incidentes en presas". E.T.S. Caminos U.P. Madrid. Trabajo Suficiencia Investigadora.  
 -SÁNCHEZ CARO, F. J. (2007): "Seguridad de Presas: Aportación al análisis y control de deformaciones como elemento de prevención de patologías de origen geotécnico". E.T.S. Caminos U.P. Madrid. Tesis Doctoral (en edición).  
 -SORIANO, A. y SÁNCHEZ CARO, F. J. (1997): "Sobre la evaluación de la seguridad de las Presas de Materiales sueltos". Revista de Obras Públicas N° 3371. pp 97-133. 1997.  
 -TAVARES, L.V. y SERAFIM, J.L. (1983): "Probabilistic study on failure of large dams". A.S.C.E., Journal of the Geotechnical Engineering Division, 109 (11), pp. 1483-1486.  
 -THE ENGINEER. (1942): "Historic accidents and disasters". The Engineer (Dec. 4), pp. 452-455. Thiers,  
 -USCOLD (1975): "Lessons From Dam Incidents". USA. ASCE, New York.  
 -USCOLD (1988): "Lessons From Dam Incidents". USA-II. ASCE, New York.  
 -VARSHNEY, R.S. y RAHEEM, M.A. (1971): "Concrete dam disasters and remedies". Indian Journal of Power & River Valley Development, (July), pp. 248-256.  
 -VEESAERT, C. (1983): "Lessons from dam incidents".  
 -VOGEL, A. (1984): "Failures of masonry and concrete dams in Europe". In International Conference on the Safety of Dams, (J. L. Serafim ed.) Coimbra, pp. 45-54.  
 -VOGEL, A. (1994): "Bibliography of the History of Dam Failures". Data Station for Dam Failures, Vienna.  
 -VOGEL, A. (2001): "The bibliography of de history of dam failures an event based accident data collection". Proceedings of the European Safety and Reliability Conference ESREL 2001. Vol. 2, pp. 1361-1366. Torino, Italy, September 2001.  
 -YAGÜE, J. y BERGA, L. (1997): "Dam failures and incidents in Spain. Lessons learned". 19th Icold International Congress. Q75-4. 556-559. Florence.