

# Análisis del nivel de riesgo

Por **LUIS MAROTO CERVERA**

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

**PERFECTO SEGURA ANTOLI**

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
Control y Geología, S. A. (CYGSA)

*La palabra **seguridad** desata en nuestra mente un sinfín de ideas. No hay día en que no aparezca en nuestra conversación, en nuestro pensamiento. Evidentemente, es un tema de mucha actualidad.*

*Es tal el caso que no podía faltar entre los temas seleccionados para el Congreso Internacional de Grandes Presas, que se celebrará en el próximo mes de mayo. Concretamente el tema 52, apartado a), tratará sobre la "reconsideración de los datos utilizados en el proyecto (estabilidad, avenidas, etcétera)" en el tema de la seguridad de las presas.*

*En el presente artículo pretendemos precisamente esto: hacer una reconsideración y una crítica de los datos y criterios utilizados comúnmente en el proyecto de grandes presas.*

## NIVEL DE RIESGO

A partir de ahora consideraremos o llamaremos **nivel de riesgo** a la probabilidad de presentación de un suceso determinado durante la vida de una presa, o en general de una obra específica.

Hay algunos casos, como el de la presentación de un terremoto o una avenida, en los que la magnitud del suceso es lo que importa. En otros casos el nivel de riesgo significa la probabilidad de presentación de un suceso de magnitud igual o superior a uno definido. La seguridad de la presa la condicionaremos a esta magnitud.

En otros casos, además de la magnitud puede influir la frecuencia de presentación. Así, por ejemplo, un oleaje de menor intensidad y mayor duración puede llegar a causar mayores daños en un dique que otro de menor duración y mayor intensidad. Esto ocurre en todos aquellos fenómenos en los que la fatiga o la resonancia juega un papel importante.

Algunas veces el mismo terremoto, e incluso la avenida, pueden quedar incluidos en este caso, aunque de una forma indirecta. Así, una avenida de caudal de punta menor puede llegar a tener un volumen total mayor y tener peores consecuencias. Lo mismo puede ocurrir con un terremoto, un sismo de espectro muy amplio y larga duración puede tener peores consecuencias que otro corto, aunque este último tenga una aceleración de pico sensiblemente superior.

La «vida» o duración previsible de una instalación tiene una importancia esencial en el valor del nivel de riesgo. De tal forma que el mismo suceso puede representar un nivel de riesgo sustancialmente distinto para dos obras diferentes. Repasemos la teoría del cálculo de probabilidades.

Consideremos un suceso (un terremoto o una avenida de magnitud  $M$ , por ejemplo) que tiene una recurrencia de  $T$  años. La probabilidad de presentación en un año determinado de un suceso de magnitud igual o superior a  $M$  será:  $p = \frac{1}{T}$

La probabilidad contraria, la de no presentación, será:

$$P = 1 - p$$

y la probabilidad de que no se presente este suceso de magnitud igual o superior a  $M$  en « $n$ » años será:

$$P^n = (1 - p)^n$$

Por tanto, la probabilidad de que se presente una vez, al menos, en los « $n$ » años será:

$$R = 1 - P^n = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n$$

a este valor  $R$  es lo que hemos definido como nivel de riesgo, y mediante esta expresión lo tenemos enlazado con la recurrencia y la vida probable de la obra.

El análisis de esta relación nos permitirá centrar mejor las ideas. Comprobaremos que tiene el mismo

riesgo de presentación un suceso de quinientos años de recurrencia en una obra de veinticinco años de vida útil, que un suceso de mil años de recurrencia en una obra de cincuenta años de vida útil.

También podemos comprobar que una persona con una vida media de setenta y cinco años tiene una probabilidad superior al 7 % de convivir o coincidir en su vida con la presentación de una avenida de mil años de recurrencia (y, naturalmente, con un terremoto).

Considerar o decidir que en el ejemplo anterior el riesgo del 7 % es grande o es soportable resulta una decisión más difícil.

En España no tenemos todavía una normativa que nos dé resuelta, de una forma completa o aproximada, la elección del **nivel de riesgo** que debemos adoptar.

Vamos, entonces, a comparar con otras normas o con otros criterios para ir acotando el problema y llegar a centrar la opinión, pero esta discusión, para comparar cosas homogéneas, deberá hacerse equiparando niveles de riesgo y no solamente la recurrencia de presentación de los distintos sucesos.

Analizaremos, a continuación, los niveles de riesgo que suponen diferentes hipótesis.

### PERIODO DE RETORNO DE AVENIDAS

En la vigente Norma de Grandes Presas (Instrucción para el Proyecto, Construcción y Explotación de Grandes Presas) se establece como avenida «normal» la de cincuenta años de período de retorno, y como avenida «máxima» la de quinientos años de recurrencia (ver artículo 14.7). En el resto del articulado, incluso en los artículos que se refieren a desagües o resguardos precisos, no se obliga en ningún momento a contemplar una avenida de magnitud mayor.

Como ya se indicó antes, se considera esencial conocer la vida útil real o estimada de la obra para poder comparar con otros criterios o normas similares.

La vida de una obra hidráulica, y más concretamente la de una presa, realmente es prácticamente ilimitada. Se ha podido presentar el caso, con relativa frecuencia, incluso, de una obra hidráulica que ha quedado inutilizada parcial o totalmente en un plazo relativamente corto. Pero no conocemos ningún caso de una presa que haya sido demolida o abandonada por haber terminado su vida útil, o bien

que haya quedado tan anticuada que resulte antieconómica su conservación.

Del párrafo anterior se desprende que no hay establecido un período de vida útil «teórico» para las presas en España. De todas formas, hay una cifra que se baraja de alguna manera en la vida «oficial» de una presa. Esta cifra es de setenta y cinco a cien años.

Sin que se haya establecido en ningún caso un criterio unánime, fijo o uniforme, se consideran como lógicas o usuales las siguientes cifras:

- Quince años para la vida de obras viarias, para centrales térmicas convencionales, etcétera. Este período sería asimismo un límite superior para la vida útil de grandes instalaciones industriales, grandes barcos, etcétera.
- Veinticinco años para grandes puentes, centrales nucleares, grandes obras portuarias, etcétera. Veinticinco años es también el período recomendado para el proyecto del abastecimiento a poblaciones.
- Setenta y cinco años (e incluso cien años) para grandes presas.

Las concesiones administrativas que el MOPU otorga a los particulares para la construcción y explotación por éstos de grandes presas se dan por noventa y nueve años, en el caso de que la construcción que se realiza lleve incorporada una misión de regulación de los caudales fluyentes. En caso contrario, la concesión se resuelve por setenta y cinco años, y se entiende que en este período marcado se agota, con suficiente exceso, el valor de la presa o porque en este plazo de tiempo deberá quedar sobradamente amortizada la obra.

No debe confundirnos el hecho de que alguna obra perdure un tiempo superior al de su vida probable o vida de cálculo. Así, por ejemplo, el caso de un puente, que al formar parte de la obra viaria le achacamos una vida probable de quince años, no contradice la existencia de puentes muy antiguos.

Para fijar ideas y poder establecer comparaciones se va a suponer, en adelante, una vida útil «teórica» de cien años para una presa.

Con esta hipótesis el nivel de riesgo adoptado por la instrucción para la máxima avenida en un río significa que en la vida de una presa una avenida igual o superior a la máxima prevista tiene una probabilidad de presentarse del 18,14 %.

### VELES DE SEGURIDAD CENTRALES NUCLEARES

En la Norma Americana para diseño de centrales nucleares, en el campo sismorresistente se distinguen dos niveles diferentes en la definición del período de diseño:

**Nivel I.**—Es el terremoto de mayor magnitud que podría darse en un determinado emplazamiento, aun cuando su probabilidad de presentación durante el período de funcionamiento de las instalaciones sea muy pequeña. Se conoce con las siglas SSE (1).

**Nivel II.**—Es el terremoto de mayor magnitud que, con una probabilidad razonable, cabe esperar que se produzca durante el período de vida de las instalaciones. Se conoce con las siglas OBE (2).

El criterio según el cual estos dos tipos de niveles de excitación inciden en el diseño de las estructuras y de los equipos en ellas instalados es el siguiente: para niveles de excitación igual o inferiores al **nivel II**, las estructuras suelen diseñarse de manera que sus equipos no sufran daños apreciables que puedan seguir funcionando normalmente sin necesidad de detener el proceso de producción para proceder a su reparación. Para excitaciones sísmicas superiores al **nivel II**, los sistemas de seguridad deben permanecer operativos, de manera que se pueda interrumpir el funcionamiento de los equipos en cualquier momento para revisarlos y repararlos en el caso de que, por razones de seguridad, esto último sea necesario.

Siguiendo este criterio, el nivel de excitación incluido en el nivel I constituye un umbral superior de seguridad para el que se ha de diseñar la estructura, de manera que, aunque se produzcan graves daños en los equipos en ella instalados, sea posible siempre parar la producción sin riesgos de colapso de la estructura o de contaminación radiactiva.

El nivel II de excitación constituye así un límite por encima del cual pueden producirse importantes penalizaciones de tipo económico por el solo hecho de tener que parar el funcionamiento de la planta para proceder a la revisión de los equipos.

Visto desde otro ángulo, este nivel II sería el límite de seguridad recomendado por razones exclusivamente económicas, sin tener en cuenta los posibles (y siempre reales) condicionantes sociales y políticos del entorno.

Existen diferentes criterios para fijar este nivel de

- (1) Safe Shutdown Earthquake.
- (2) Operating Basis Earthquake.

excitación. En el caso de centrales nucleares, la Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos recomienda adoptar un nivel mitad del utilizado como referencia para el tipo de excitación I, pero no descartan la posibilidad de proceder a su determinación mediante análisis probabilísticos, exigiendo en este último caso que se dé la probabilidad de que se supere el nivel de excitación durante los cuarenta años que se suponen para el funcionamiento de la central.

El período de retorno elegido y la probabilidad que se considere puede dar lugar a importantes gastos derivados del hecho de tener que garantizar la posibilidad de detener el funcionamiento de la central (o presa) para proceder a una minuciosa revisión de las diferentes instalaciones.

Se puede determinar el nivel II de excitación de manera que tenga un período de retorno de varios centenares de años, con lo que disminuye su probabilidad de presentación durante la vida de la planta de energía, pero al mismo tiempo se aumenta su nivel de excitación, lo que significa un diseño más costoso de la estructura.

La solución del nivel II de excitación debe ir acompañado de un criterio claro de evaluación del coeficiente de seguridad. Mientras que en el nivel I de excitación el coeficiente de seguridad se considere suficiente con que sobrepase la unidad, aunque la diferencia sea mínima, en el nivel II las cosas no están tan claras. No bastará tampoco con fijar el valor mínimo del coeficiente de seguridad, sino que será preciso indicar claramente cómo se ha de valorar dicho coeficiente.

Vemos así que para poder definir razonablemente el nivel de excitación II es necesario llegar a un compromiso de tipo económico, barajando los conceptos anteriormente comentados.

Normalmente será más limitativo el nivel I, aun en la hipótesis de coeficiente de seguridad 1, y es razonable que sea así.

Como ejemplo de aplicación de este tipo de criterio podemos citar el caso de la central nuclear de Phipps Bend, en Estados Unidos, en relación con la cual el Comité de Seguridad asesor de la Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos fijó el nivel II de excitación, de manera que la probabilidad de que fuese superado durante el funcionamiento de la central no fuese superior al 30 %, que corresponde a un terremoto de ciento diez años de recurrencia.

Para concretar de alguna manera lo que desde el

punto de vista de la probabilidad del riesgo significan los niveles I y II, antes definidos, podríamos encuadrar el nivel I en una recurrencia de unos mil años, que para una vida útil de veinticinco años aboca a una probabilidad del 2,47 %; el nivel II lo encuadraríamos en una recurrencia entre cincuenta y cien años, y que para los mismos veinticinco años de vida útil representa una probabilidad o riesgo de presentación de entre el 39,65 y el 22,22 %. No deberá olvidarse que los daños que pudiera producir el terremoto del nivel II deben ser mínimos, y los del nivel I no deben ser fatales ni producir el colapso, aunque pueda producir daños de importancia económica.

### EXTRAPOLACION DE SERIES

Es importante el concepto de distinguir dos niveles de excitación. Es cada vez más frecuente esta distinción de niveles de riesgo. Poco a poco las normas oficiales van recogiendo, de forma directa o indirecta, esta idea de unir el coeficiente de seguridad a la probabilidad de presentación de la excitación. Es muy frecuente que las normas admitan una disminución del coeficiente de seguridad a medida que disminuye la probabilidad de presentación de la sobrecarga.

El valor del coeficiente de seguridad debe estar ligado no sólo al valor del riesgo de presentación, sino también a la magnitud del daño potencial, y no resulta fácil cuantificar ninguno de estos conceptos.

Tanto en el caso de avenidas como en el de riesgo sísmico los períodos de los que se dispone de datos realmente fidedignos son excesivamente cortos. Así, como consecuencia de ello, nos vemos en la obligación de acometer extrapolaciones muy fuertes, tales como pasar de series de unos cincuenta a setenta años a valores de quinientos, mil e incluso diez mil años de recurrencia, lo que es a todas luces excesivo.

Es necesario un gran esfuerzo de imaginación para hablar con propiedad de series de diez mil años o recurrencia de diez mil años. En este lapso de tiempo se podría producir un cambio total en la climatología. Téngase en cuenta que ha habido etapas glaciares o interglaciares, con duración menor de esos diez mil años. También conocemos lugares que hace unos dos mil años estaban habitados y hoy día se encuentran a unos metros bajo el nivel de las aguas del mar. No tenemos más remedio que ser escépticos ante estas fuertes extrapolaciones estadísticas.

En el campo del riesgo sísmico ocurre otro tanto.

Valores de diez mil años de los que estamos hablando empiezan a estar en el mismo orden de magnitud que el período en que consideramos que una falla que fue activa deja de serlo. Es normal que una falla no se considere ya activa si no se puede comprobar algún movimiento en menos de veinticinco mil años. Sería razonable igualmente considerar que pudieran activarse fenómenos de otro tipo que alterarían sustancialmente cualquier estudio.

Antes hablamos también de que el valor del coeficiente de seguridad debe estar ligado a la cuantía del daño potencial. Esta cuantificación del daño deberá hacerse no para el daño total previsible, sino para el incremento de daños producidos por la obra. Así, por ejemplo, en el caso de un terreno de gran magnitud la presa no podría ser nunca responsable de los daños que el propio terremoto produciría en la zona. Es claro que para poder llegar a realizar este tipo de evaluaciones se requiere una fuerte dosis de imaginación y nunca se conseguirá un cierto rigor en los resultados.

Barajando un poco todas estas ideas llegamos a la conclusión de que al hablar de períodos de recurrencia de diez mil años lo que realmente queremos hacer es ponderar la magnitud del fenómeno máximo previsible mediante un cierto coeficiente, que lo valoramos por métodos un tanto sofisticados. Esto confirma más la idea anterior de poder reducir, de alguna manera, el coeficiente de seguridad cuando ya lo hemos incrementado por otra parte.

En el estudio de avenidas normales se define un hidrograma tipo y se escala con el valor de la punta máxima, que es el que define la recurrencia. En definitiva, se define una sola variable y resultará más fácilmente cuantificable el coeficiente que pondera el valor máximo previsible.

En cambio, en el riesgo sísmico intervienen distintas variables al mismo tiempo, y con influencias muy dispares. Así, intervienen mezcladas y a la vez la intensidad, la frecuencia, la duración, etcétera y resulta prácticamente imposible conocer *a priori* la importancia de cada una de ellas.

### RIESGO DE PRESENTACION

En nuestra vida cotidiana estamos acostumbrados a soportar riesgos enormes comparados con los valores aquí expresados, pero ciertamente no tenemos conciencia de ello. No vamos a traer aquí el consabido tema de la circulación viaria, que se sabe de cualquier límite razonable, ni de los riesgos de

enfermedades. Citaremos algunos casos más próximos al caso que nos ocupa:

- En el establecimiento de la resistencia característica de los hormigones, que sirve de base para todos los cálculos estructurales, fijamos ese valor como aquel que tiene un riesgo de un 5 % de no ser superado por el hormigón colocado.
- En el dimensionamiento de una instalación para un servicio de primera necesidad como es el abastecimiento de energía eléctrica, suministro de agua a poblaciones, etcétera, se considera aceptable un riesgo del 5 % de fallos, incluso en elementos de seguridad.  
En algún caso especial se ha llegado, con un doble suministro, o duplicando la parte más sensible de la instalación, a rebajar esa cifra al 3 %, e incluso al 2 %, pero no conocemos ningún caso con un riesgo menor.
- Los métodos de cálculo normalmente empleados para el dimensionamiento de las estructuras, tienen intrínsecamente una probabilidad de fallo mucho mayor del 2 %, e incluso del 5 % antes citado.

### COMPARACION DE NIVELES DE RIESGO

La comparación de los valores antes estimados nos deja un poco tristes y a un tiempo pensativos.

La Instrucción para el Proyecto, Construcción y

Explotación de Grandes Presas actualmente en vigor en España resulta de hecho mucho menos rigurosa que otras normas o disciplinas.

Resulta elevado el valor del 18 % obtenido anteriormente, y no nos consideramos rigurosos al fijar en cien años la vida probable de la presa; si esta vida la aumentamos a doscientos años (hipótesis que podría ser defendible), el valor del riesgo pasa a ser del 33 %. Esto va en desacuerdo, de forma notoria, con las cifras que se manejan en otras disciplinas.

En descarga de los ingenieros dedicados al proyecto de presas y de la propia instrucción debemos admitir que la presentación de una avenida de quinientos años de recurrencia no lleva consigo la ruina de la obra, y que normalmente los elementos de desagüe están dimensionados con suficiente holgura, y el resguardo de las presas cuenta de forma muy importante a favor de esta holgura.

De todas formas, y como conclusión, hemos de reconocer que el nivel de seguridad exigido por la instrucción queda en una cierta nebulosa que deberá ser despejada lo antes posible.

No se quiere decir con esto que, en nuestra opinión, las presas sean inseguras, sino que la instrucción debería garantizar por sí misma una seguridad que no garantiza.

Consideraríamos que el esfuerzo empleado en la redacción y publicación de este artículo ha sido eficaz si da lugar a que el lector piense sobre el tema y se susciten comentarios y otras opiniones.