

ESTIMACIÓN DEL GRADO DE SEGURIDAD EN LAS PRESAS: PRÁCTICA Y CRÍTICA*, **

Michele Fanelli¹

RESUMEN: Los parámetros ingenieriles utilizados para la evaluación de la seguridad de una presa (Coeficiente de seguridad, Probabilidad de rotura) son bastante útiles en la práctica. Sin embargo, un análisis detallado muestra que no se trata de atributos objetivos que sean científicamente definibles. Esto deberá ser tenido en cuenta en toda interpretación «intuitiva» del significado de tales parámetros, para evitar un entendimiento incorrecto o incompleto. En el artículo se analiza el concepto complejo de seguridad y se efectúa un análisis crítico de los contenidos implícitos del índice de «probabilidad de rotura».

CONSIDERACIONES GENERALES

No hay duda de que los progresos del conocimiento, unidos a los tecnológicos, a los normativos y a los de los procedimientos de control, aseguran hoy, en los países más avanzados, un alto *grado de seguridad* para las presas de cualquier tipo.

Esto está demostrado convincentemente por las estadísticas sobre los accidentes en las presas. De hecho, la tasa de roturas parciales o totales se está documentando en torno al 10^{-5} por año-presa (es decir, una rotura al año sobre 100.000 presas en servicio) y la tendencia es todavía menor para las presas que han sido construidas después de 1950, frente a una tasa del orden del 10^{-4} aproximadamente para las presas construidas antes de tal fecha.

Pero, más allá de las estadísticas sobre la experiencia del pasado, significativas sólo en los grandes cifras, está la exigencia por parte de la profesión además de por parte de los administradores y de las Autoridades, de poder cuantificar de algún modo el nivel de seguridad individual de cada obra, tanto si se trata de una presa ya existente como de una en fase de proyecto.

Con tal finalidad se han desarrollado diversos criterios e índices de evaluación, consagrados por decenios de uso generalizado con buenos resultados prácticos. Entre tales índices vemos en primera línea el tradicional concepto de *coeficiente de seguridad* (perfeccionado por la introducción de los coeficientes parciales de seguridad) y, más recientemente, el de *probabilidad de rotura*.

Si por un lado es indudable la utilidad práctica de tales conceptos, por otro es al menos discutible que puedan proponerse como *medida* científicamente rigurosa del grado de *seguridad* de una obra concreta que hay que someter a evaluación.

En la exposición que sigue se toman en consideración sobre tal asunto los siguientes puntos:

- ❑ La *seguridad* no es un atributo físico objetivo de la presa (o, en cualquier caso, de cualquier dispositivo humano) en el sentido bien definido que se puede atribuir a otras propiedades, como por ejemplo, el volumen (o las características geométricas en general) o la distribución espacio-temporal de las temperaturas (o de las presiones intersticiales) internas, etc.;
- ❑ La *seguridad* es, por el contrario, un concepto artificial complejo, influido por expectativas psicológicas y por condicionamientos socioculturales y sujeto a mutaciones en el tiempo;
- ❑ A las *medidas* corrientemente usadas de seguridad les falta el requisito esencial de la objetividad científica: el de la reproducibilidad (con una aproximación en principio mejorable indefinidamente) de las evaluaciones efectuadas —a partir de los mismos datos— por diferentes operadores igualmente cualificados; a pesar de ello, tales medidas están tan arraigadas en el uso hasta el punto que son interpretadas intuitivamente como medidas objetivas.

Todo ello, lo subrayamos con fuerza, no pretende en absoluto desacreditar el valor empírico de los conceptos y métodos usados para evaluar la seguridad de una presa, que en la práctica siguen siendo valiosas orienta-

¹ Dr.Ing. Ex-director del Centro de Investigación Hidráulica y Estructural (CRIS) de ENEL. Milán (Italia).e-mail: michele.fanelli:@icenet.it

* Traducción del original italiano realizada por Juan Carlos de Miguel y Canuto.

** El artículo fue publicado en idioma inglés con el título: *The Scientific Definition and Measure of Dam Safety: Is the Emperor Fully Clothed?* en el N°2, Vol. 4, 1997 de la revista: The International Journal on Hydropower & Dams (número especial para el Congreso Mundial de Grandes Presas de Florencia).

Artículo publicado en *Ingeniería del Agua*. Vol.4 Num.2 (junio 1997), páginas 47-54, aceptado para su publicación el **13 de febrero de 1997**. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo. En el caso de ser aceptadas, las discusiones serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores en el primer número de la revista que aparezca una vez transcurrido el plazo indicado.

ciones para el proceso de toma de decisiones.

Sin embargo, una percepción inexacta de su situación en la jerarquía de los instrumentos de los que disponen los profesionales puede conducir, pensamos, a malentendidos interpretativos o a expectativas no correctas.

Por consiguiente, un breve análisis de su significado efectivo y de las limitaciones inherentes nos parece no sólo útil para encuadrar el tema del presente trabajo sino incluso indispensable.

UN EXAMEN CRÍTICO DE LOS CONCEPTOS Y DE LOS MODELOS

Cuando se discuten las implicaciones de las metodologías corrientemente usadas para la evaluación de la seguridad, es inevitable afrontar un examen crítico de los conceptos y *modelos* (conceptuales, matemáticos, numéricos...) subyacentes a las propias metodologías.

De hecho, pasar de los modelos conceptuales a un pretendido examen "realista" de la seguridad de una presa concreta no es ni inmediato ni trivial.

En primer término intentaremos un análisis somero del contenido semántico-lógico de dos términos (*modelo conceptual*, *seguridad*) que concurren en la formación del juicio sintético cuantitativo sobre el *grado de seguridad*.

En lo que sigue, para concretar, nos referiremos esencialmente a la seguridad estructural de una presa, aunque es necesario no olvidar que la seguridad es un concepto bastante más amplio, que comprende también un amplio espectro de requisitos distintos de la estabilidad estructural.

Antes que nada, téngase presente que cada modelo conceptual sobre el que basar las sucesivas evaluaciones a la vista de la ponderación del *grado de seguridad* es, necesariamente, un modelo parcial.

Con ello se pretende decir que cada uno de los modelos empleados o empleables pretende describir, primero en términos conceptuales, después en forma matemática y por último en términos numéricos, las respuestas del comportamiento del objeto *presa* (idealizado en un estado de referencia) a una acción externa específica (y por lo tanto parcial respecto al espectro posible).

Por ejemplo, uno de los modelos podría proponerse representar la respuesta estructural de la presa objeto de examen (en términos de desplazamientos, esfuerzos, eventuales fisuraciones...) a un terremoto específico; otro modelo podría dirigirse a evaluar la variación de las presiones intersticiales en el cuerpo de la presa causadas por variaciones del nivel de embalse; etc.

En general, en el estado actual de nuestros conocimientos y con algunas importantes excepciones, los diferentes modelos que pueden ser empicados para representar el comportamiento de una cierta presa frente a diferentes acciones físicas del ambiente externo no son instrumentos mutuamente interactivos. Ello significa que tales

instrumentos se usan en manera separada y a menudo independiente para ponderar las diferentes respuestas, con nula o escasa toma en consideración de las posibles interacciones mutuas no lineales (más allá de la simple superposición lineal de los efectos).

Hay que citar que existen modelos avanzados que permiten la toma en consideración de algunas interacciones no lineales. Se dedican —o se deberían dedicar— notables esfuerzos a la *validación-justificación* de tales modelos (véanse, por ejemplo, los resultados y las discusiones de los cuatro Benchmark-Workshops internacionales sobre los problemas numéricos del análisis y proyecto de presas celebrados en años alternos a partir del 1991 bajo los auspicios del International Committee on Large Dams, ICOLD). Sin embargo, dejando aparte las problemáticas específicas, es necesario reconocer la imposibilidad de considerar simultáneamente todas las posibles interacciones; además, por experiencia, es bien conocido que el uso de modelos cada vez más sofisticados choca bastante frecuentemente con dificultades de localización de datos primarios, con la creciente sensibilidad de las previsiones a las incertidumbres en los conocimientos y con la ambigüedad de interpretación de los resultados; ello requiere, al menos, una cada vez mayor suma de experiencias y habilidades por parte del usuario e implica una creciente dificultad en la comunicación, de modo sintético y unívocamente aceptable, los resultados del análisis a quien debe decidir en cada ocasión.

En el campo de la simulación de comportamientos no lineales, además, en paridad con el fenómeno que hay que representar está la regla (más pronto regla que excepción) de que se presenten diversas posibles opciones de elección entre modelos alternativos; y son la experiencia y la sensibilidad individuales de cada técnico, antes que las reglas objetivas o, en cualquier caso, formalizadas las que orientan en la elección entre las varias opciones posibles.

Considérese de manera análoga que cada modelo es simplemente lo que indica el propio término, es decir, una representación de como reaccionaría la presa ante ciertas acciones idealizadas si obedeciese a una cierta ley hipotética de comportamiento. La relevancia del modelo en relación con la realidad física debe ser apreciada sobre la base de conocimientos o criterios *externos al modelo* y provenientes de la experiencia de quien lo usa, del parangón entre efectos previstos y observados (parangón que demuestra la relevancia sólo indirectamente) y de la prueba empírica que la aplicación del modelo ha dado en el pasado, en numerosos casos, resultados aceptables.

Es preciso, además, no olvidar que la relevancia/fiabilidad de los datos de *input* de los modelos respecto a los acontecimientos del mundo físico «real» puede ser a menudo objeto de crítica, sobre todo en el caso de eventos sísmicos e hidrológicos.

Dejando aparte las consideraciones anteriores, el ingeniero de presas está actualmente obligado —tanto por

la práctica profesional como por las normas reglamentarias— a sintetizar los resultados de todos los análisis parciales en una *medida*, si es posible omnicompreensiva, del grado de seguridad.

Eso representa un salto conceptual todavía más arriesgado, que implica la aceptación de varias hipótesis habitualmente no explicitadas; si este sustrato implícito no se saca a la luz y se analiza se corre el riesgo de que las afirmaciones sobre la *seguridad* estén lastradas por la ambigüedad y por peligrosas posibilidades de malentendidos.

Esta obra de análisis se ve dificultada por el hecho de que *seguridad* es un término vago, al cual distintos individuos pueden fácilmente conceder contenidos semánticos diferentes. A ello no escapan ni siquiera las definiciones técnicas usadas hasta ahora.

La dificultad principal en verdad reside en el hecho indiscutible de que el grado de seguridad no es un atributo físico neutral del objeto-presa que existe *allí* fuera por encima e independientemente de cualquier apreciación subjetiva. Si éste fuera el caso, entonces sí que tal grado se podría, en principio, "medir" a condición de poseer los *instrumentos* apropiados. Pero en realidad dicho grado es una compleja construcción cultural humana que deriva de la interacción de circunstancias objetivas con instancias socioeconómicas y depende tanto de nuestras hipótesis (= escenarios del futuro) como de las limitaciones de nuestros conocimientos, aunque indudablemente está condicionado por las propiedades de lo real.

La motivación primaria en la investigación de una evaluación del grado de seguridad es, en su origen, de naturaleza psicológica: el temor al peligro —nacido de amargas experiencias— y la demanda a nivel, primero individual y después colectivo, de saber si podemos sentirnos suficientemente protegidos por el mencionado grado de seguridad o si es necesario tomar medidas cautelares. El concepto mismo de seguridad está así unido, por una parte, a expectativas y aspiraciones de futuro, por otra a la conciencia de las posibilidades de accidente y a las evaluaciones más o menos subjetivas de la correspondiente probabilidad de ocurrencia.

La posibilidad de rotura en obras es un hecho de experiencia, registrado en la crónica de cada generación y transmitido, a través de las estadísticas, a las generaciones siguientes. En el caso de las presas, gracias a la inestimable actividad del ICOLD (vid. el boletín n° 99) podemos disponer de datos estadísticos fiables que cubren numerosos decenios. Como ya se ha dicho en la presentación, tales estadísticas parecen mostrar que la tasa de roturas parciales o totales, evaluables aproximadamente en el 10^4 por año/presa hasta grosso modo 1950, ha disminuido con posterioridad aproximadamente al 10^{-5} por año/presa o quizás menos. Este hecho se percibe como un incremento significativo del grado medio de seguridad para las presas de construcción más reciente en relación a las más antiguas; incremento causado por el progreso técnico y por la adopción de regla-

mentos y procedimientos de control más severos.

Si tales cifras atestiguan *a posteriori*, más allá de cualquier duda razonable, un nivel efectivo de seguridad de las presas con una media bastante satisfactoria (y además su mejora gradual con el avance de las técnicas y de la organización de la sociedad civil) el status científico de las estimaciones técnicas *a priori* del grado de seguridad de una presa concreta no se revela, en un examen serio, exento de críticas sino todo lo contrario.

En el Apéndice se dará traslado de una discusión sucinta de algunos puntos sobresalientes del concepto, hoy muy usado como *medida* del grado de seguridad, de *probabilidad* de rotura; aquí, a continuación, por brevedad resumimos sólo las conclusiones de tal discusión. Dejamos aparte, sin embargo, una discusión igualmente analítica del concepto más tradicional de coeficiente de *seguridad*: baste mencionar que para las presas tal concepto ha sido introducido, por analogía, desde otros campos de la ingeniería estructural en los cuales aquél fue originalmente desarrollado en elementos individuales que tienden a tener un único grado de libertad (presentes en las construcciones en gran número y de forma bastante homogénea) cuyas propiedades y cargas típicas se prestaban bien a una fiable caracterización en términos estadísticos. Es casi innecesario subrayar que para las presas la situación es del todo diferente: cada individuo es un *unicum* heterogéneo respecto a los demás.

La presentación usual de la aproximación de probabilidad, tomada de la teoría de la fiabilidad, presupone implícitamente que tanto la *capacidad de resistencia* como la *solicitud externa* puedan ser adecuadamente representadas por variables de un solo grado de libertad: la magnitud (de la primera y de la segunda). Al contrario, en la realidad aquéllas son funciones complejas de las variables espacio-temporales, con muchos (si no infinitos) grados de libertad. Hay que decir acto seguido que esta dificultad puede ser esquivada haciendo referencia a específicos *escenarios* de eventos, es decir, definiendo *a priori* la forma de las distribuciones espacio-temporales de las referidas variables (y dejando, en consecuencia, como única variable en ambos casos la magnitud); sin embargo, entonces, en principio, para responder al espectro de las posibles realidades se deberían examinar en manera exhaustiva todos los posibles *escenarios* (las diferentes formas de las distribuciones espacio-temporales). Para realizar un objetivo tal se requeriría un esfuerzo de simulación numérica extremadamente gravoso, por añadidura incluyendo para cada escenario la consideración de las interacciones no lineales. Tal empresa, incluso suponiendo en manera optimista que el estado de nuestros conocimientos actuales en principio lo permitieran, sería extremadamente costosa y delicada; en la práctica no se tienen noticias de que alguna vez haya sido tomada en consideración. Se supone implícitamente que el buen sentido y la experiencia de ingeniería permiten seleccionar *a priori* un reducido número de *escenarios significativos* que, por

sí solos, sean sometidos a análisis. Pues tal selección, efectuada con base en criterios al menos en parte no formalizados, ya introduce criterios de subjetividad.

Considérese además que sólo por la magnitud de la solicitud externa (correspondiente al escenario escogido) tiene sentido tratar la distribución de densidad de la probabilidad de ocurrencia (aquí habría que especificar cada vez en referencia a qué período de tiempo, aun-que normalmente se sobreentiende que se refiere al período útil de servicio de la obra, del orden de 100 años) como probabilidad *a priori*. Por contrapartida, cuando se procede a comparar con la distribución anterior la análoga distribución de densidad de la probabilidad de la magnitud *capacidad* de resistencia, lo que realmente se quisiera representar en esta última es, no una probabilidad *a priori* (que no tiene sentido, porque es un atributo objetivo perfectamente determinado en la realidad física, aunque sea accesible a nuestro conocimiento solo prescindiendo de una franja de indeterminación) si no más bien la incertidumbre que se deriva de lo incompleto de nuestras informaciones sobre la presa real; es decir, se trata de una probabilidad *a posteriori* o, como se le llama, Bayesiana. Combinar conjuntamente, con una integral de convolución (vid. Apéndice) que proporciona un sólo número llamado *probabilidad de rotura*, las dos distribuciones de probabilidad como si fueran homogéneas (en la práctica como si se tratase para ambas de probabilidades *a priori*) constituye una operación de dudosa legitimidad conceptual; sobre todo porque después se interpreta (más o menos conscientemente) esta *probabilidad de rotura* como si fuese una probabilidad *objetiva* (homogénea en el límite con una *frecuencia de ocurrencia*) antes que subjetiva. Este último constituye un salto lógico no permitido por las premisas; el significado real del número llamado *probabilidad de rotura* obtenido de esta manera, aunque exista, es bastante más sutil e indirecto (vid. el final del siguiente apartado).

Y aún hay más: el procedimiento (integral de convolución) usado para obtener la mencionada *probabilidad de rotura* requeriría un conocimiento bastante cuidadoso de las *colas* extremas de las dos distribuciones de probabilidad, que sin embargo se conocen con bastante escasa aproximación.

Considérese por último que, como ya se ha mencionado de pasada, siempre se debería especificar claramente a qué período de tiempo se refiere la probabilidad obtenida por este procedimiento; de hecho (vid. Apéndice) es fácil mostrar que tal probabilidad depende fuertemente de la duración del período futuro al cual se refiere; la falta de especificación de tal parámetro, algo totalmente corriente en la práctica, contribuye a favorecer interpretaciones vagas o no correctas.

El requisito esencial de objetividad científica, es decir, la reproducibilidad —bajo condiciones controladas— de los resultados obtenidos por diferentes operadores cualificados por igual (y en posesión de las mismas informaciones) no puede ser satisfecho en el estado ac-

tual de nuestros conocimientos por las *medidas usuales* del *grado de seguridad* de una presa. En verdad, la ponderación del *grado de seguridad* de una misma presa efectuada por por dos operadores distintos sobre la base de los mismos datos y usando instrumentos y capacidades de análisis igualmente avanzados, no será necesariamente la misma sino que se resentirá de preferencias subjetivas (exigidas por la estructura lógica de los pasos de la verificación) cuyo resultado será determinado por la experiencia específica, la sensibilidad y la intuición individuales del evaluador.

¿CÓMO "ADMINISTRAR" EL RIESGO SI NO SE PUEDE "MEDIR" LA SEGURIDAD?»

Las consideraciones anteriores, pese a ser sólo ejemplificadoras y no exhaustivas, muestran que el *grado de seguridad* de una determinada presa no es una cantidad definida de una vez para siempre, es más, no puede ser considerado como un atributo objetivo. Tal *grado de seguridad* de hecho está sujeto a cambios sólo en parte ligados a circunstancias objetivas (envejecimiento, daños, acciones de mantenimiento...) y en gran parte percibidos subjetivamente (por ej. a través de mejoras en los conocimientos o cambios de las normativas); se debe concluir que aquél no es *medible* en un sentido científicamente riguroso a través de procedimientos directos, indirectos o mixtos.

En la *Figura 1* se intenta demostrar como el cuadro general de referencia de las actividades de estimación de la *seguridad* es bastante más vasto que el contexto puramente técnico e incluye tanto la realidad objetiva (el mundo de los acontecimientos físicos) como factores humanos, aspectos legales, etc.

En la misma figura se ilustra también, en términos esquemáticos, como a pesar de las dificultades conceptuales alumbradas más arriba, la seguridad (o mejor, el riesgo) puede ser eficazmente administrado en el tiempo. En efecto, ahora se dispone o están en vías de desarrollo, incluso con la ayuda de técnicas de Inteligencia Artificial, de instrumentos específicos que van desde el *hazard audit* (identificación de peligros todavía en *fase de incubación*) hasta el *hazard management* (corrección en el momento oportuno de las condiciones de peligro potencial una vez identificada), y por último, pero no menos importante, incluso la estricta observación de procedimientos de *control de calidad* en la gestión de la información y de la actividad correctora.

Es justo también poner de relieve que sólo a través de esfuerzos unificadores dirigidos hacia una mejor comunicación entre todas las partes interesadas se podrá lograr que las instancias de seguridad se perciban limpiamente y sin malentendidos. En este aspecto, no han de ser minusvaloradas las dificultades creadas por las barreras del lenguaje especializado, ni tampoco ciertamente deben constituir coartadas para actuar en compartimentos estancos.

Repitamos una vez más que el análisis crítico desarrollado más arriba no debe ser entendido como una nega-

ción de la utilidad práctica de conceptos e instrumentos consagrados por una larga experiencia, como los de *coeficiente de seguridad*, o *probabilidad de rotura*. El análisis efectuado aspira solamente a mostrar que estos conceptos, ciertamente útiles en sentido comparativo (por ej. cuando se evalúen soluciones de proyectos alternativos) y para tomar decisiones operativas, no deberían ser confundidos con medidas *absolutas* u *objetivas* del grado de seguridad.

Especialmente, el concepto de *probabilidad de rotura* no debería ser entendido en el sentido intuitivo más o menos implícitamente aceptado (es decir, *grosso modo*, asimilable a una probabilidad de ocurrencia) sino solamente como un índice convencional que permite una clasificación relativa de situaciones más o menos expuestas a riesgo.

Más en general, sería aconsejable sustituir locuciones tranquilizadoras, como por ejemplo *garantizar la seguridad* por expresiones menos deformantes y sin duda más realistas como por ejemplo *administrar el riesgo*.

POSIBILIDADES FUTURAS DE PROGRESO EN LA DEFINICIÓN DE "SEGURIDAD"

Ya que cada análisis crítico debería, dentro de lo posible, ser también constructivo, parece lícito plantearse por último la cuestión:

"¿Será posible en el futuro obtener una definición más aceptable en términos científicos del *grado de seguridad*? Y si es así, ¿en qué dirección es más probable que se verifique un avance?"

Aceptando que no se puede, obviamente, dar respuestas bien definidas, es posible que para superar la situación actual se deba abandonar el impulso, más que comprensible, a sintetizar el *grado de seguridad* en una variable unidimensional (= el *coeficiente de seguridad* o la *probabilidad de rotura*). Sería más acorde con la complejidad de la construcción (y de las circunstancias reales) intentar definir algo que se asemeje a un *retrato* multidimensional de la probabilidad de que la obra falle. Por ejemplo, sería concebible investigar, sobre la base de las informaciones disponibles, un espectro de *modos propios de rotura* de la presa. Cada *autovalor* del espectro mediría, bajo esta visión, la magnitud del correspondiente *evento crítico*, mientras la forma del modo y de las cargas que conducen al fallo representaría la distribución espacio-temporal del correspondiente *escenario crítico*. El conjunto de los eventos críticos (despejado de los que con seguridad no fuesen realistas) definiría entonces un conjunto crítico para una determinada presa, para compararlo con los posibles distintos *escenarios* (nótese la semejanza con el *limit design*).

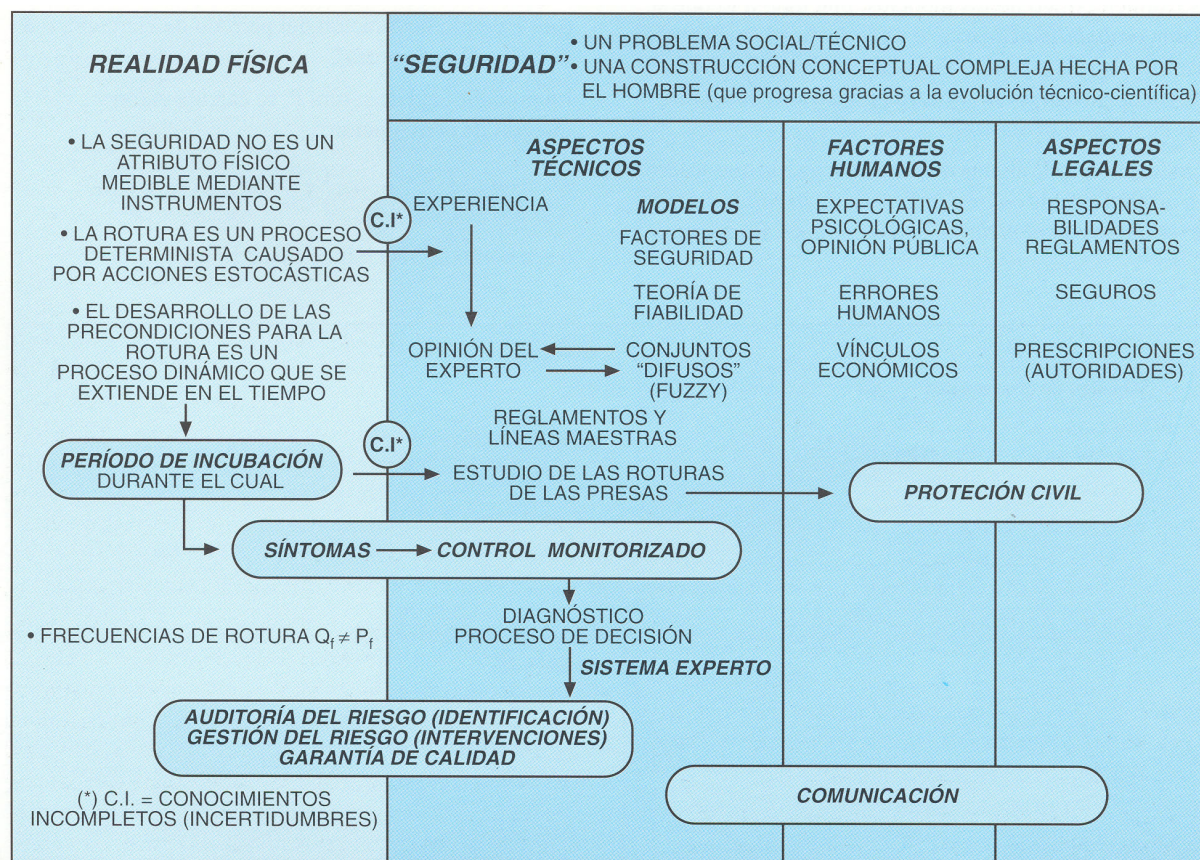


Figura 1: Esquema conceptual de la gestión de la seguridad

Los conceptos matemáticos sobre los cuales estamos tratando deberían obtenerse en una representación de comportamiento no lineal que incluya además la posibilidad de definir una franja de indeterminación (*fuzziness*) ligada a la incertidumbre de los conocimientos y los datos. Estos requisitos peculiares obviamente magnifican las dificultades que obstaculizan una cuantificación efectiva de las variables de interés a partir de los datos disponibles. Es posible que se deban adoptar los métodos y las terminologías de la *dinámica caótica* o de la *teoría de las catástrofes*; se hablaría entonces de atractores críticos y de *cuenca de indeterminación* en espacios abstractos multidimensionales representativos del estado del sistema.

Es posible, por no decir probable, que en tales direcciones se sitúen prometedores campos de investigación de ingeniería para el próximo futuro.

Otra línea de aproximación bastante más modesta, pero también mucho más al alcance de la mano se limitaría a aclarar mejor el significado efectivo de cuanto ahora se suele indicar con el término bastante desviado (vid. más arriba) de *probabilidad de rotura*.

El hecho mismo de que en el pasado se hayan verificado casos de rotura (en presas que presumiblemente habían sido analizadas con todos los conocimientos de la disciplina y, en consecuencia, consideradas seguras) permite sospechar, teniendo en cuenta todo lo dicho en el examen crítico de los modelos, que todo a lo que se llama *probabilidad de rotura* es en realidad mucho más asimilable a una *probabilidad de estar equivocado en juzgar segura la presa sobre la base de los conocimientos de los que se dispone*.

La situación es de alguna manera análoga a lo que acaece en un contexto de *control industrial de la calidad* cuando se adopta un *plan de muestreo limitado*. En ese caso, de hecho, se acostumbra a definir dos tipos de riesgos:

- el *riesgo del comprador*, que coincide con la probabilidad Bayesiana de aceptar un lote de producción sobre la base de un resultado positivo de los tests sobre la muestra limitada extraída del lote, cuando en realidad el lote no responde a los requisitos;
- el *riesgo del productor*, que coincide con la probabilidad Bayesiana de verse rechazado un lote sobre la base de un resultado negativo de los test sobre una muestra limitada proveniente del lote, cuando en realidad éste no satisface los requisitos prescritos.

Se puede sostener, basándose en cuanto se ha dicho, que lo que actualmente se llama *probabilidad de rotura* de una presa es en realidad algo bastante más semejante al *riesgo del comprador*.

APÉNDICE

Ahora quisiéramos examinar con un poco más de detalle el fondo de la presentación usual del procedimiento que hay que seguir idealmente para determinar la *probabilidad de rotura* según los dictados de la teoría de la fiabilidad.

Se supone (*Figura A.1*) la comparación de la función de densidad (f.d.) de la capacidad de resistencia C de la presa con la función de densidad correspondiente a la magnitud de la carga D que puede ser impuesta por el ambiente externo durante un cierto período de tiempo (por ejemplo la duración del período de ejercicio, o de la *vida útil* de la presa).

La probabilidad de rotura P_f se calcula entonces con la integral de convolución:

$$P_f = \int_{c=L_c}^{c=U_D} P_C(C) \int_{D=c}^{D=U_D} P_D(D) \cdot dD \Big\} dC$$

o sea como la fracción de casos en los que $D > C$

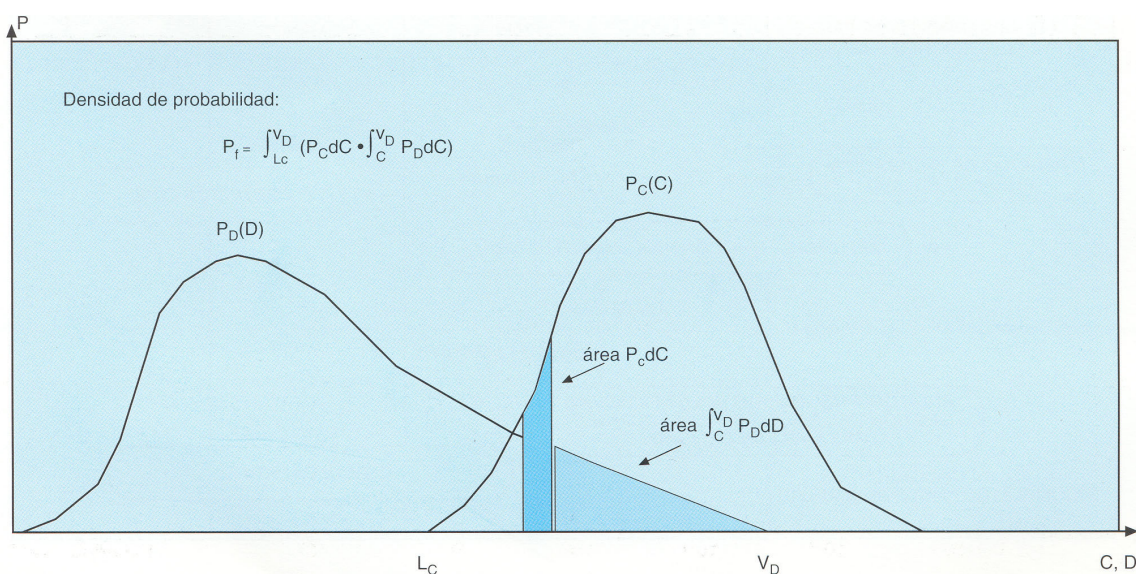


Figura A.1

Esta presentación es aparentemente muy directa y persuasiva. Sin embargo, las hipótesis que están subyacentes no pueden ser admitidas a la ligera; un análisis profundo revela de hecho que el significado y la aplicabilidad de (A.1) deben someterse a notables restricciones.

De hecho:

- a) Con la finalidad de que el *modelo* anterior sea significativo en un contexto *real*, será necesario predefinir una *función de forma* (o, en otras palabras, una cierta distribución espacio-temporal) para la intensidad de la carga $D(x_i, t)$, de modo que después una cierta variable de intensidad (D) baste para definir la historia de la carga impuesta a la presa. (Si no se hiciera esto, sería obligado trabajar con muchos grados de libertad tanto para C como para D , es decir, en términos de variables $C_1, C_2, \dots, C_m; D_1, D_2, \dots, D_n$; si se quisiera, sin embargo, permanecer dentro de límites manejables el número de variables debería, por fuerza, ser limitado y ello iría en detrimento del *realismo* de la representación). Esta reducción implícita del número de variables, sin duda lícita y oportuna en el caso de variables unidimensionales, que son las usuales en el campo de aplicación, constituye en el caso de las presas una drástica esquematización, ya que en la realidad cada presa (y las acciones sobre ella) es una entidad física extendida en modo bastante complejo en el espacio (además de en el tiempo).

En otras palabras, se considera (al menos implícitamente) un *escenario de carga* específico, dejando como variable única sólo la intensidad, D . Nótese sobre este particular que en la realidad física las dos f.d. $P_D(D)$, $P_C(C)$ experimentarán, para cada escenario distinto, variaciones de difícil evaluación.

- b) Con la finalidad de definir —para cada escenario dado— la f.d. de la capacidad de resistencia $P_C(C)$, se deberían efectuar, en principio, dos operaciones distintas, a saber:

- b1) evaluar la magnitud máxima de la carga (en el escenario hipotético) que la presa puede sostener sin colapsarse. Ello conlleva el uso de metodologías (modelos numéricos) aptos para ponderar el comportamiento de la obra más allá del campo lineal, teniendo en cuenta el carácter tridimensional tanto de la presa como de sus cimientos. Tales simulaciones numéricas no sólo serían bastante costosas, sino que a menudo plantearían algunos problemas interpretativos sobre los resultados (más allá de la elección del modelo y de la definición de los datos de input), como se ha constatado no pocas veces en el uso de modelos no lineales de una cierta complejidad.
- b2) evaluar cómo las incertidumbres propias, por ej. en la limitación de nuestros conocimientos (y capacidad de modelación) de las propiedades materiales y de las leyes reológicas, en toda la complejidad de sus posibles distribuciones espacio-temporales compatibles con los datos de que se dispone, influyen sobre la evaluación (b1) de la carga última de colapso. De hecho, la f.d. $P_C(C)$ refleja no tanto (como puede ser el caso de $P_D(D)$) una variabilidad estadística intrínseca, cuanto más bien la indeterminación ligada a la extensión de nuestra ignorancia. Las propiedades del objeto-presa están, en efecto, determinadas en manera determinista, pero no podemos conocerlas por completo.

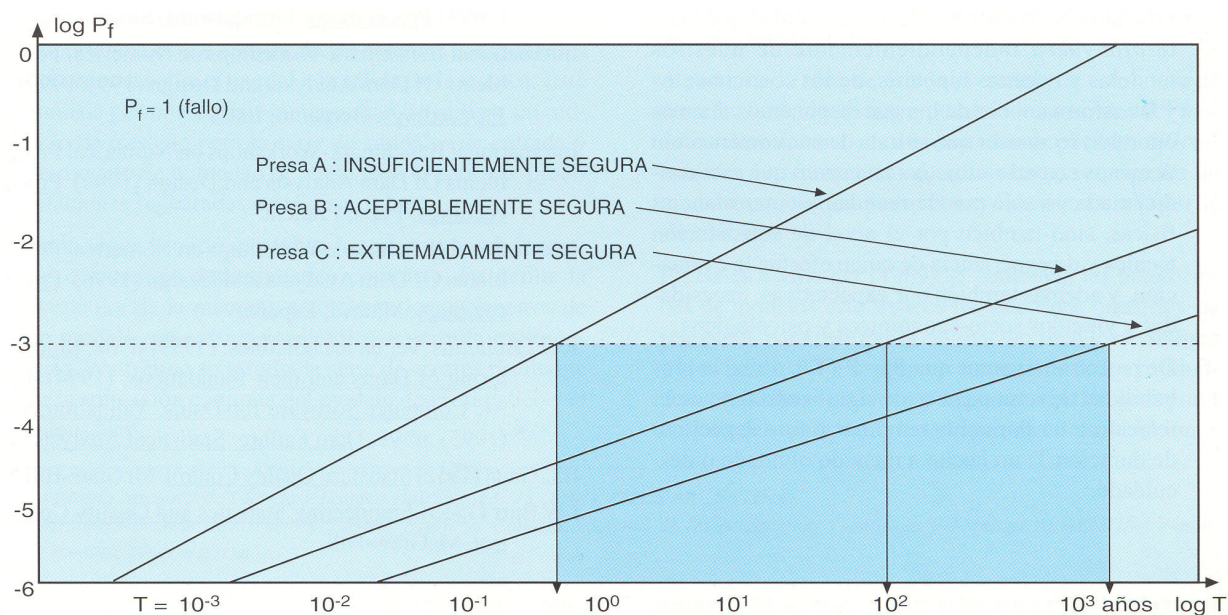


Figura A.2

- c) En conexión con (b2): la f.d. $P_c(C)$ de la capacidad de resistencia C de la presa hay, pues, que entenderla como la función de densidad de probabilidad a *posteriori*, o Bayesiana, es decir, la f.d. del valor efectivo de C dada la limitada información disponible.

Comparar esta f.d. con la f.d. a *priori* $P_D(D)$ es una operación de dudosa legitimidad, al menos hasta que se interprete la probabilidad de colapso P_f en el sentido intuitivo comunmente admitido, es decir, como algo que es homogéneo con una probabilidad de ocurrencia. La correcta interpretación de (A.1) es bastante más abstracta y complicada y podría ser expresada aproximadamente como sigue:

Si se tuviesen N presas (un N bastante grande) geométricamente iguales, construidas con los mismos materiales y métodos de construcción sobre cimientos aparentemente iguales, así consideradas dentro de los límites de nuestras investigaciones, y si se evaluase la adecuación de su capacidad de resistencia en sostener el mismo escenario de carga, se tendrían unos $N \cdot P_f$ casos en los cuales se juzgaría la resistencia como adecuada mientras que en realidad no lo es

- d) Para efectuar efectivamente la integral de convolución (A.1) con fiabilidad «realista», se debería conocer con buena precisión la forma de las *colas* extremas de las dos p.d.f. (la cola inferior de $P_c(C)$ y la cola superior de $P_D(D)$); pero la cantidad de información pedida para definir en detalle estas colas es en la práctica siempre bastante superior al contenido de información de los datos estadísticos disponibles de hecho. Se deben hacer, pues, hipótesis que sean siempre, en alguna medida, arbitrarias (subjetivas).
- e) No se puede, por tanto, aseverar que P_f tenga un significado *objetivo* atribuible a una realidad que existe *allá fuera* independientemente de nuestros modelos y nuestras hipótesis, de los conocimientos y las informaciones de los que disponemos. Es más oportuno reconocer que se trata de una construcción al menos en parte subjetiva en cuanto que está condicionada no sólo por la realidad y circunstancias físicas, sino también por el nivel de sofisticación técnica y de experiencia de quien efectúa la evaluación, y además también por expectativas, necesidades y vínculos socio-económicos y psicológicos.
- f) De paso, subrayamos que $P_f = P_f(T)$, o sea, la probabilidad de rotura carece de significado si no es en relación a un horizonte temporal futuro específico de duración T ; un hecho a menudo olvidado o descuidado.

De hecho, si T —en todo caso— asumiese un valor extremadamente corto, p. ej. medio minuto, es decir cerca de 10^{-6} años, es evidente que la probabilidad de que una presa existente *ahora* se colapse en un tiempo futuro de duración T sería prácticamente nula: $P_f \rightarrow 0$ para $T \rightarrow 0$. Por otra parte, si T asumiese sin embargo un valor bastante elevado, p. ej. 1000 o 10000 años es prácticamente cierto que una presa existente *ahora* está destinada a desaparecer dentro de T años: $P_f \rightarrow 1$ para $T \rightarrow \infty$. En otras palabras, la función $P_f(T)$, definida suponiendo que se dejen evolucionar las condiciones de la presa sin efectuar intervenciones, tiende a crecer con el crecimiento del período de referencia T . (En la realidad, las actividades de vigilancia monitorizada e inspecciones periódicas podrán producir acciones de alivio, que modificarán —a intervalos discretos— el desarrollo de la función en cuestión).

De esta manera nos vemos inducidos a pensar que los parámetros importantes de tal función son (Figura. A.2) la posición y la pendiente del gráfico que la representa antes que el único número indicado habitualmente (la coordenada de la curva para un valor convenido del período T).

BIBLIOGRAFÍA:

- D. Blockley (1992) Engineering Safety, McGraw-Hill.
- A. Goubet (1979) Risques associés aux barrages, La Houille Blanche n°8.
- F.A.Johnson, P.Illes (1976) A classification of Dam Failures, Water Power and Dam Construction, dec.
- XVIII Intl. Congress on Large Dams (1994) General Report e Papers relativos a la Q.68: Safety of existing Dams, Durban (S.A.)
- International Conference on Safety of Dams (1984) Proceedings, Coimbra, Portugal, abril.
- International Workshop on Dam Safety Evaluation (1993) Proceedings, Grindelwald, Suiza, abril.
- International Benchmark-Workshops on Numerical Problems Of Dam Analysis and Design (1991/1992) Proceedings, Bergamo, Italia.
- International Benchmark-Workshops on Numerical Problems Of Dam Analysis and Design (1994) Proceedings, París, Francia.
- International Benchmark-Workshops on Numerical Problems Of Dam Analysis and Design (1996) Proceedings, Madrid, España.
- Icold Bulletins, ver en los boletines: (1989) n° 68, Monitoring of Dams and their foundations; (1994) n° 94, Computer Software for Dams. Validation; y (1995) n° 99, Dam Failure: Statistical Analysis.
- E.L.Grant (1952) Statistical Quality Control, McGraw-Hill.
- I.W.Burr (1953) Engineering Statistics and Quality Control, McGraw-Hill.