

# Forma y función en presas y embalses

Luis Berga Casafont

**DESCRIPTORES**  
PRESAS  
EMBALSSES  
LAGOS  
ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS

## Introducción

La Tierra es el planeta azul. El 71% de su superficie es agua, en su mayor parte en los océanos. El agua es un elemento esencial para la vida en la Tierra, y podríamos decir que la hidrosfera es la parte más característica y diferenciadora de nuestro planeta. En la Tierra hay mucha agua, unos 1.365 millones de kilómetros cúbicos, pero la mayor parte de esta agua es agua salada (el 97,5%), no apta para la mayoría de los ecosistemas terrestres, ni tampoco para el uso generalizado del hombre.

La mayor parte del agua dulce, en estado líquido, renovable en la Tierra se encuentra en los lagos naturales, que forman grandes e impresionantes embalses. Existen unos 15 millones de lagos, que ocupan una superficie de alrededor del 1,5% de la superficie terrestre. Su origen es natural, ya sea de tipo tectónico, glaciar (como las presas formadas por las morrenas glaciares), o eólico. El volumen de sus embalses es de unos 176.400 km<sup>3</sup>, aunque los embalses de los lagos naturales de agua dulce tienen un volumen de unos 91.000 km<sup>3</sup>, lo que supone unas trece veces el volumen de todos los embalses construidos por el hombre. Es, pues, la naturaleza la que ha creado los grandes embalses del mundo, y la que aporta la mayoría de los volúmenes potencialmente disponibles. En la tabla 1 se muestran los lagos naturales de agua dulce con mayor volumen de embalse, entre los que destaca el lago Baikal, en Rusia, con un volumen de 23.600 km<sup>3</sup> (Fig. 1).

El lago Baikal, en la Siberia rusa, es el de mayor volumen del mundo, además de ser el más profundo, con profundidad máxima de 1.637 metros, y el de génesis más antigua. Almacena alrededor de un quinto del volumen de agua dulce en la Tierra, y el 90% del agua en Rusia.<sup>1</sup> La superficie de su cuenca es de unos 560.000 km<sup>2</sup>, y al él afluyen más de 300 ríos. Su única salida la constituye el río Angara, perfectamente regulado, y que tiene un caudal medio de 1.900 m<sup>3</sup>/s. Por ello, en el Angara, con importantes caudales y también

Lago	Área (km <sup>2</sup> )	Volumen (km <sup>3</sup> )	País
Baikal	31.500	23.600	Rusia
Tanganika	32.000	17.800	Tanzania, Zaire, Zambia
Superior	84.500	11.600	Canadá, USA
Nyasa	30.900	7.725	Malawi, Mozambique, Tanzania
Michigan	58.000	4.680	USA
Huron	63.500	3.580	Canadá, USA
Victoria	68.800	2.750	Tanzania, Kenia, Uganda

significativos desniveles, se han construido importantes embalses hidroeléctricos que sirven para el abastecimiento eléctrico de gran parte de la industria siberiana, como son las presas de Irkutsk, Bratsk (Fig. 2), Ust-Ilim y la presa de Boguchany, actualmente en construcción.<sup>2</sup>

Los ríos almacenan poca agua, unos 2.120 km<sup>3</sup>, y ocupan una parte muy pequeña de la superficie terrestre, pero son las arterias de la vida, y constituyen un elemento esencial para la biodiversidad del planeta. Por ellos fluyen las aguas provenientes del ciclo hidrológico, que es la fuente de agua renovable y más sostenible, la mayor desaladora ecológica, que proporciona unos 40.000 km<sup>3</sup> de agua dulce al año.

Pero el agua de los lagos y ríos en numerosas ocasiones no es accesible a las necesidades humanas, debido a su lejanía geográfica, como el caso del río Amazonas, que transporta el 15% del flujo anual, o a su gran irregularidad temporal, como es el caso de numerosos países de Asia, donde más del 80% de las precipitaciones ocurren durante los tres o cuatro meses



Fig. 1. Lago Baikal.



Fig. 2. Presa de Bratsk. Río Angara. Siberia.

de los monzones. Por ello, el hombre, desde hace más de 5.000 años, ha tenido la necesidad de construir presas para almacenar el agua en los embalses artificiales que ha creado. Además, también ha aprendido a utilizar la energía que el agua tiene en su discurrir por los cauces, y ha aprovechado la construcción de presas para la producción de energía hidroeléctrica.

En la actualidad hay unas 50.000 grandes presas, según la definición de ICOLD (presas de altura igual o superior a 15 m, desde el punto más bajo del cimientado, o presas entre 5 m y 15 m con volumen de embalse superior a 3 millones de m<sup>3</sup>).<sup>3</sup> Además, se evalúa que existen más de un millón de pequeñas presas, con lo que el volumen total de embalse creado por las presas es de unos 7.000 km<sup>3</sup>.

En la tabla 2 se muestra la capacidad de los 26 mayores embalses (embalses con capacidad superior a 35 km<sup>3</sup>). Los 44 mayores embalses del mundo, que tienen una capacidad superior a 25 km<sup>3</sup>, concentran el 37% de la capacidad de embalse total. Destacan las presas de Kariba (Fig. 3), Bratsk y Asuan.

TABLA 2

Mayores embalses del mundo. Capacidad superior a 35 km <sup>3</sup>				
Nº	Presa	Volumen (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	Objetivos	País
1	Kariba	180.600.000	H	Zimbabwe/Zambia
2	Bratsk	169.000.000	HNS	Russia
3	High Aswan Dam	162.000.000	IHC	Egypt
4	Akosombo	150.000.000	H	Ghana
5	Daniel Johnson (Manic 5)	141.851.350	H	Canada
6	Guri	135.000.000	H	Venezuela
7	Bennett W.A.C.	74.300.000	H	Canada
8	Krasnoyarsk	73.300.000	HNS	Russia
9	Zeya	68.400.000	HNC	Russia
10	LG Deux Principal CD-00	61.715.000	H	Canada
11	LG Trois Nord: Sud Barrage	60.020.000	H	Canada
12	UST-Ilim	59.300.000	HN	Russia
13	Boguchany	58.200.000	HS	Russia
14	Kuibyshev	58.000.000	HNIS	Russia
15	Serra da Mesa	54.400.000	H	Brazil
16	Caniapiscou Barrage KA-3	53.790.000	H	Canada
17	Cahora Bassa	52.000.000	IHC	Mocambique
18	Bukhtarma	49.800.000	H,N	Kazakhstan
19	Ataturk	48.700.000	IH	Turkey
20	Irkutsk	46.000.000	H	Russia
21	Tucurui	45.536.000	HN	Brazil
22	Sanxia (Three Gorges)	39.300.000	CHNI	China
23	Hoover	37.296.795	SHI	United States
24	Vilyui	35.900.000	H	Russia
25	Glen Canyon	35.550.185	HIRX	United States
26	Sanmenxia	35.400.000	CHI	China





Fig. 3. La presa de Kariba, para producción hidroeléctrica.

Las presas se construyen con la finalidad de la regulación de los recursos hídricos, y así poder cubrir parte de las demandas de agua. El objetivo de los embalses, a nivel mundial, es el siguiente:

— Regadío:	38 %
— Producción hidroeléctrica:	18 %
— Abastecimiento de agua:	14 %
— Control de avenidas:	14 %
— Actividades recreativas:	8 %
— Navegación y pesquerías:	3 %
— Otros:	5 %

### Las presas como estructura hidráulica. Forma y función

En la naturaleza las diversas formas están ligadas a la función, adaptándose y cambiando la forma en función de las necesidades de los seres vivos, aunque algunas de las formas nos puedan parecer caprichosas. En el hombre también ocurre así, y las formas del cuerpo humano, y de los diversos sistemas orgánicos, están todas formateadas para cumplir los objetivos finales de vivir y reproducirse. Así, por ejemplo, los glóbulos rojos de la sangre tienen una forma inusual de discocito bicóncavo (Fig. 4), con una superficie de unos  $140 \mu\text{m}^2$  y un volumen de unos  $90 \mu\text{m}^3$ , lo que da una relación superficie/volumen alta, de 1,56. Y esto, ¿para qué? Simplemente para cumplir su función, ya que esta forma peculiar con una gran superficie facilita el intercambio del interior del hematíe con su medio exterior y, fundamentalmente, le permite liberar el oxígeno, que es su función esencial. También en sentido mecánico este exceso de superficie, este exceso de membrana con respecto al volumen que contiene hace que tenga una gran deformabilidad y, por lo tanto, pueda circular por los capilares sanguíneos de mucho menor diámetro. En cambio las formas esféricas, que son las que tienen la mínima superficie para un volumen dado, son muy poco deformables, y no serían adecuadas para cumplir la función de transporte de oxígeno en el torrente circulatorio.<sup>4</sup>

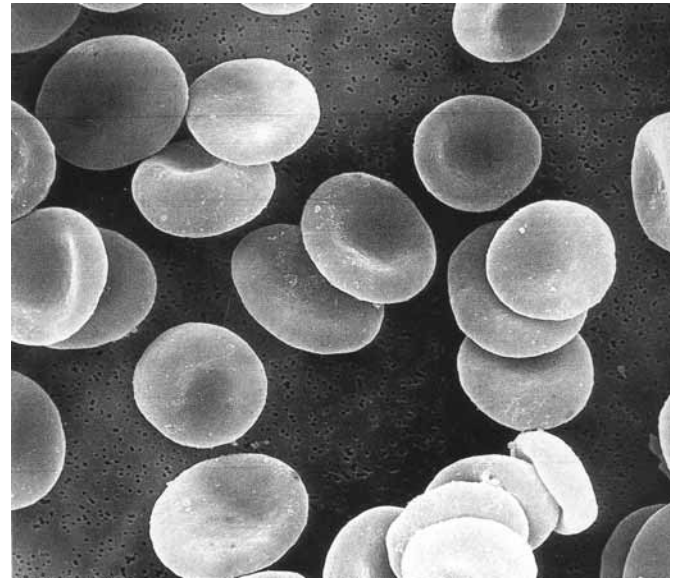


Fig. 4. Glóbulos rojos de la sangre. Discocitos bicóncavos.

Igual que en los glóbulos rojos, son innumerables en la biología celular los casos de formas adaptadas a la función, y representan un buen ejemplo de que siempre antes de realizar los diseños es necesario plantearse el binomio forma-función. Sin embargo, en ingeniería no existen correlaciones tan claras, y para cumplir unos objetivos y unas funciones, el ingeniero normalmente tiene un abanico mucho más amplio de formas para elegir, en función de otros muchos condicionantes: tecnológicos, económicos, sociales, medioambientales y estéticos, y también en algunos casos políticos.

En ingeniería de presas hay que tener siempre muy claro, desde el inicio del proyecto, los objetivos a cumplir, que son generalmente los de crear un embalse para la regulación de los recursos de agua, para crear cota energética o para laminar las avenidas. El ingeniero de presas, orgulloso de crear una gran obra de ingeniería, olvida en algunas ocasiones estos objetivos y la existencia del embalse, y se dedica fundamentalmente a la propia presa, lo que puede dar lugar al final a una obra que no satisfaga totalmente los objetivos previstos. Para cumplir los objetivos esenciales de los embalses, la presa debe atender a las funciones de resistencia (de la estructura y del cimientto), e impermeabilidad, y todo ello con la mayor seguridad posible. Para ello se dispone de diversas tipologías, que no es el caso detallar en este artículo más general, que sirven para cerrar los ríos y embalsar sus aguas. Unas consisten en crear montañas artificiales, a semejanza de algunos lagos y embalses naturales, mediante tierra o escollera, con las que se obtienen las condiciones adecuadas de resistencia e impermeabilidad, que en algunos casos se separan en diferentes zonas específicas: son las presas de tierra (TE) y escollera (ER), de las que existen diversas variantes según sea la naturaleza y colocación del elemento impermeable, presas con núcleo impermeable, presas con pantalla de hormigón aguas arriba, presas con núcleo asfáltico, etc. En otros casos, se emplean materiales artificiales construidos por el hombre, como era antiguamente la mampostería y es en la actualidad el hormigón, que po-

seen a la vez las adecuadas condiciones de resistencia e impermeabilidad, y por lo tanto requieren menos volúmenes de material. Entre ellas existen también numerosas variantes según las características del material, su puesta en obra y la colaboración resistente e impermeable del cemento y estribos de la cerrada. Son las presas de gravedad (PG), de contrafuertes (CB), arco gravedad (A-PG), Arco (A) y bóveda de doble curvatura (AV).

La ingeniería de presas siempre ha prestado una atención muy especial a los temas relativos a la seguridad de las presas, a la economía y a las metodologías de construcción. Por ello, las tipologías de presas han ido evolucionando según han cambiado los aspectos tecnológicos, con mejores materiales y procedimientos constructivos, y las circunstancias económicas. Así, las presas de hormigón han evolucionado progresivamente hacia formas que aprovechan mejor las propiedades resistentes del hormigón, como son las presas arco-gravedad, arco y bóveda, con las que se han reducido los volúmenes de hormigón, especialmente en presas de altura media y grande, y se ha logrado una mejor economía de las obras. Igualmente, con la idea de reducir volúmenes de material, hacia mitad del siglo pasado, surgieron las presas de contrafuertes, que sin embargo requerían gran cantidad de encofrado y mano de obra, y eran en aquellas épocas más económicas, debido a la ventaja en la relación coste de la mano de obra-material. Posteriormente, al cambiar las circunstancias del mercado laboral, y mejorar los condicionantes económicos para el hormigón, esta tipología, en general, ha pasado a la historia, principalmente en los países desarrollados. En las presas de materiales sueltos, que son la tipología predominante en el mundo, se han mejorado enormemente los medios de puesta en obra de las tierras y escolleras, por lo que son una alternativa a considerar en muchos casos.

La tecnología de construcción de presas es muy antigua y está muy consolidada, por lo que en general su evolución se refiere a mejoras en los procedimientos de cálculo, materiales y métodos de construcción. Ello no es óbice para que, como en cualquier otra rama de la ingeniería, se implanten nuevas tipologías, más adaptadas a los conocimientos y métodos actuales. Así, en cuanto a tipología, han aparecido hace unos treinta años las presas de hormigón compactado con rodillo (HCR)<sup>5,6</sup>

En la década de los 1970, empezaron las primeras experiencias de presas de hormigón compactado con rodillo. El HCR combina las propiedades de resistencia y durabilidad del hormigón, con procedimientos de puesta en obra semejantes al empleado en las presas de materiales sueltos. Las presas de HCR presentan las ventajas de tener una mayor seguridad hidrológica frente a las avenidas extremas, y si están bien diseñadas y adecuadamente programada su construcción, son más económicas, y se construyen en menos tiempo, con lo que los beneficios se obtienen antes. Este aspecto de los tiempos de construcción es importante, pues normalmente el tiempo de gestación de una presa es largo –en la actualidad se están construyendo presas que fueron planificadas hace más de 70 años– y la inversión es importante, por lo que se requiere una

buena financiación. Por ello, una vez decidida la construcción es esencial construir la presa en el menor tiempo posible, y así lograr cuanto antes los beneficios. Este aspecto es prioritario para las empresas privadas, que en muchos casos son empresas hidroeléctricas y de servicios.

La construcción de presas de HCR ha experimentado un crecimiento importante en el mundo durante las últimas décadas. A final del año 2006 había 313 grandes presas en explotación, en 44 países, lo que ya suponía alrededor del 4,5% de las presas de hormigón en explotación. Por otro lado, actualmente hay 61 presas de HCR en construcción, lo que representa alrededor del 6% de las presas en construcción en el mundo. Al final del año 2006, los países con mayor número de presas de HCR (en explotación y en construcción) eran: China, 126 grandes presas; Japón, con 46; USA, con 37; Brasil, con 37, y España, con 26 presas de HCR. Estos cinco países, líderes en presas de HCR, representan más del 70% de las presas de HCR del mundo. Todos estos datos confirman la importante implementación de las presas de hormigón compactado con rodillo, y muestran alguna de las tendencias en el futuro de la tecnología de construcción de presas. También las presas de HCR continuamente aumentan en altura; se van a superar pronto los 200 metros. Aumentan de tamaño, de volúmenes de HCR, y experimentan nuevas formas, como son presas arco y presas bóveda de HCR, todo lo cual confirma la aceptación general de esta tecnología.

Las grandes presas son los mayores artificios y estructuras construidas por el hombre en sus intentos de imitar y transformar la naturaleza, pero también son muy costosas, y pueden suponer importantes afecciones socio-económicas y medioambientales.

Uno de los parámetros que la ingeniería usa para evaluar la monumentalidad y grandeza de una presa es su gran tamaño, su altura, el volumen de los materiales empleado, y, cómo no, el volumen del embalse creado. En general, las grandes presas, según la definición de ICOLD, tienen una altura media moderada, de unos 25 metros, por lo que es necesario no confundir la definición de gran presa con la percepción de que todas son estructuras grandiosas. El 61% de las presas tiene una altura inferior a 30 metros, el 91% inferior a 60 metros, y solo el 2% de las presas tienen una altura superior a 100 metros. Únicamente existen 154 grandes presas (el 0,47%) superiores a 150 metros (Fig. 5).

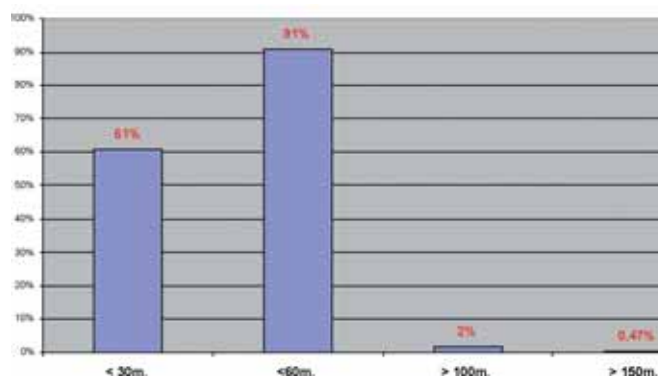


Fig. 5. Clasificación de las grandes presas según su altura.



TABLA 3

## Grandes presas con altura igual o superior a 200 metros

Nº	Presa	Altura	Tipo	Objetivo
1	Nurek	300,00	TE	IH
2	Xiaowan (Yunnan)	292,00	VA	HCIN
3	Grande Dixence	285,00	PG	H
4	Inguri	272,00	VA	HI
5	Vajont	262,00	VA	H
6	Manuel M. Torres	261,00	TE	H
7	Tehri	261,00	TE	IS
8	Álvaro Abregón	260,00	PG	IS
9	Mauvoisin	250,00	VA	H
10	Alberto Lleras C.	243,00	ER	H
11	Mica	243,00	TE	H
12	Sayano-Shushenskaya	242,00	VA-PG	NH
13	Ertan	240,00	VA	HCI
14	La Esmeralda (Chivor)	237,00	ER	H
15	Kishau	236,00	PG	IH
16	Oroville	235,00	TE-ER	CISHR
17	El Cajón	234,00	VA	HICR
18	Chirkey	233,00	VA	HIS
19	Shuibuya	233,00	ER	HCN
20	Bhakra Dam	226,00	TE	IH
21	Luzzone	225,00	VA	H
22	Hoover	223,00	VA-PG	SHI
23	Karoun-4 (Monj)	222,00	PG-A	H
24	Contra	220,00	VA	H
25	Mratinje	220,00	VA	H
26	Dworshak Dam and Res	219,00	PG	CHRSF
27	Glen Canyon	216,00	VA	HIRX
28	Toktogul	215,00	PG	HI
28	Daniel Johnson (Manic 5)	214,00	MV	H
30	Keban	210,00	ER	H
31	Zimapán	207,00	VA	H
32	Bakun Dam	205,00	ER	
33	Irapé	205,00	ER	H
34	Karoun-3	205,00	VA	IH
35	Lakhwar	204,00	TE	IH
36	Dez	203,00	VA	IH
37	Almendra	202,00	VA	H
38	Berke	201,00	VA	H
39	Khutoni	201,00	VA	H
40	Koelnbrein	200,00	VA	H
41	Shahid Abbas-Pour	200,00	VA	IH

TE-Tierra. ER-Escollera. PG-Gravedad. Av-Bóveda. MV-Bóveda de arcos múltiples. A-Arco.



Fig. 6. Presa de Nurek. La presa más alta del mundo, con 300 metros.



Fig. 7. Presa de la Almendra. La presa más alta de España, con 202 metros. Bóveda.

La tabla 3 muestra las 41 presas con altura igual o superior a 200 metros. La de mayor altura es la presa de Nurek, de tierra, en Tajikistan (Fig. 6), aunque la mayor parte de ellas, 22 (el 54 %), son presas bóvedas. En España la presa de mayor altura es la de la Almendra, con 202 metros, de tipo bóveda, y con el objetivo de producción hidroeléctrica (Fig. 7).

Las grandes presas están sometidas a grandes cargas, debido al peso de la propia estructura y, lo que es más importante, a los empujes hidrostáticos y a los efectos sísmicos. Una presa bóveda de más de 200 metros tiene unas cargas hidrostáticas que pueden variar entre 50 y 100 GN (5 y 10 millones de toneladas). Por ejemplo, en la presa de Kölnbrein, bóveda de 200 metros en Austria, la carga hidrostática es de unos 54 GN, uno de los mayores empujes hidrostáticos de una bóveda en el mundo. Estas magnitudes son las mayores de ninguna obra construida por el hombre, y por lo tanto dan una idea de la importancia de atender todos los aspectos estructurales de la obra y de la cimentación en las grandes presas. En las últimas décadas los análisis estructurales de presas han experimentado avances importantes<sup>7</sup>, y hoy en día la ingeniería del cálculo de presas dispone de potentes herramientas de cálculo para analizar los numerosos aspectos estructurales. Sin embargo, aparte de realizar y analizar bien los cálculos estructurales, en las grandes presas siempre es muy importante la experiencia de los ingenieros presistas, y conocer y seguir los criterios genera-

les que se han desarrollado en este tipo de estructuras. Es decir, estar al día del estado del arte en el proyecto y construcción de presas. Por ejemplo, en las presas bóveda, a partir de los años 1960, se fue a una reducción importante de los volúmenes de hormigón, con la construcción de presas cada vez más delgadas, que suponían ventajas económicas. Estas presas eran minuciosamente diseñadas y calculadas desde el punto de vista estructural, y ensayadas con modelos reducidos que mostraban unos coeficientes de seguridad muy elevados frente a la rotura, con valores, en la mayoría de los casos superiores a 10. Sin embargo, la experiencia ha mostrado que durante su explotación alguna de ellas, las más esbeltas, han tenido problemas importantes de fisuración, por lo que además de un buen cálculo estructural, se ha visto que es necesario observar ciertas reglas generales que limitan la esbeltez de las estructuras. Para las presas de gravedad la altura es un parámetro muy importante, pues, en general, su talud aguas abajo está bien definido. En cambio en las presas bóveda es necesario, además de la altura, tener en cuenta su esbeltez, definiéndose un parámetro de esbeltez,  $C$ , que tiene en cuenta el área de la sección de la presa desarrollada a lo largo de la cerrada, el volumen de hormigón y la altura de la presa.<sup>8,9</sup> En la figura 8 se muestra esta relación entre el Coeficiente de Esbeltez ( $C$ ) y la altura de la presa bóveda ( $H$ ), y la recomendación de no sobrepasar la curva  $H \times C = 3.000$ . También actualmente se evalúa que el límite de viabilidad de las presas bóvedas está en unos 300 metros. Criterios del mismo estilo existen para las presas de escollera con pantalla de hormigón. Todo ello nos muestra que, además de las excelentes herramientas de cálculo estructural de las presas y de sus cimientos, es necesario aplicar criterios de buen diseño, para el proyecto y construcción de grandes presas.

Las presas, al ser unas estructuras que crean riesgos importantes para los asentamientos aguas abajo, deben tener unas condiciones muy severas de seguridad. La experiencia nos ha demostrado que las presas pueden romperse, y los análisis detallados de los casos de rotura son una gran fuente de experiencia y de enseñanza en la ingeniería de presas. Además, hay roturas históricas significativas que han servido para avanzar y profundizar en la ingeniería de presas y en otras especialidades de la ingeniería civil, tales como Puentes con el sifonamiento de los cimientos, Bouzei con la subpresión, Malpasset con la creación de la mecánica de rocas, Te-

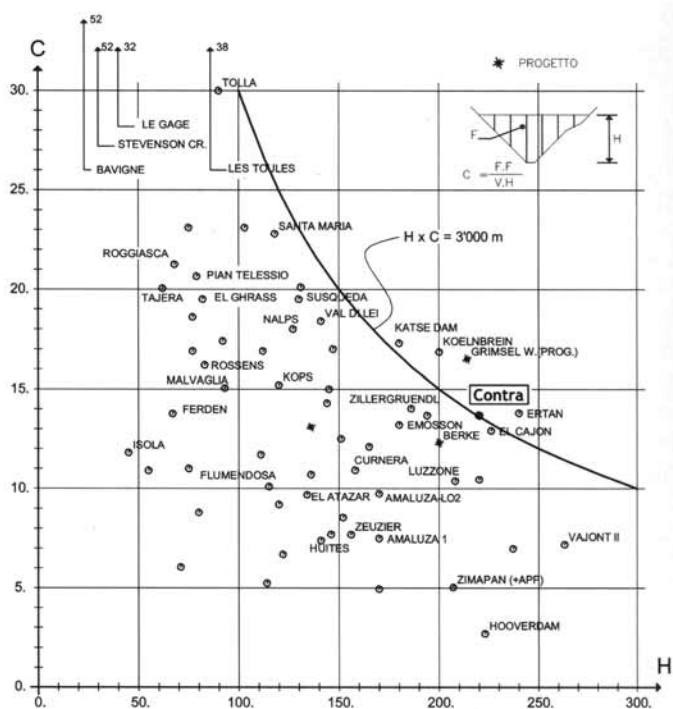


Fig. 8. Coeficiente de esbeltez para las presas bóveda.<sup>9</sup>

ton con la erosión interna, y muchas otras roturas que nos enseñan la importancia de la seguridad hidrológica de las presas.<sup>10,11</sup> Por otro lado, en las presas es esencial hacer una auscultación continua de la obra, y seguir con detalle su operación y funcionamiento. Es como una medicina preventiva, a la que en los casos con patologías hay que saber hacer un buen diagnóstico clínico, y conocer bien las patologías, para evitar la muerte (cese de la explotación de la obra) o derrumbe de la presa, en cuyo caso la experiencia nos demuestra que es muy importante hacer una excelente ingeniería forense, para aprender las lecciones y enseñanzas que cada caso nos presenta, y que así estas experiencias nos vayan sirviendo para avanzar en el estado del arte del proyecto, construcción y explotación de grandes presas. □

Luis Berga Casafont  
 Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
 Presidente de la Comisión Internacional de Grandes Presas. ICOLD  
 Presidente del Comité Nacional Español de Grandes Presas. SPANCOLD

#### Referencias

1. Lake Baikal. Past, present, future, Atlas, ATAAC, 2004.
2. Russian National Committee on Large Dams (RUSCOLD), Large dams of Russia, 2007.
3. ICOLD, World Register of Dams, 2003.
4. Berga, L., Vives Corrons, J.L., Feliu, E., Woessner, S., Rozman, C., Hemorreología. Bases teóricas y aplicaciones clínicas, Salvat, 1983.
5. Berga, L., Buil, J.M., Jofre, C., Chonggand, S. (Ed), Roller Compacted Concrete Dams, A.A. Balkema, Lisse, 2003.
6. Cea, J.C. de, Berga, L., Yagüe, J., Soriano, A., Alonso Franco, M., "RCC dams in Spain", 5th International Symposium on RCC dams, Guiyang, China, 2007.
7. Fernández Casado, C., La arquitectura del ingeniero, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Colección Ciencias, Humanidades e Ingeniería, Vol 72, 2005.
8. Lombardi, G. "Kölnbrein dam: an unusual solution for an unusual problem", International Water Power and Dam Construction, 43, 6, 31-34, 1991.
9. Lombardi, G., Ingegnere. Studi e opere 1950-2005, Skira, 2005.
10. ICOLD, "Dams failures. Statistical análisis", Bull. 99, 1995.
11. Berga, L., "Incidents and failures of dams", 19th International Congress on Large Dams, Florence, Q 75, Vol. V, 525-533, 1997.