

COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS

Análisis y Aplicación del Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses

ELECCIÓN DE LA TIPOLOGÍA Y ALTURA DE PRESA EN FUNCIÓN DEL RIESGO POTENCIAL

Luis G. Castillo E.¹, Florentino Santos G.², Juan Ojeda C.³
Pedro Calderón L.⁴, José María Medina H.⁵

Resumen:

El barranco de Las Angustias constituye el drenaje natural de la Caldera de Taburiente y se encuentra situado en la Isla de La Palma (Isla Canarias). El aprovechamiento de dichos caudales se ha visto obstaculizado por la concentración de los mismos en un número escaso de días al año, con elevados caudales y velocidades y gran proporción de transporte de sedimentos.

Esta problemática condiciona el tipo de aprovechamiento, eliminando la posibilidad de utilizar los sistemas habituales “presa-embalse”, ya que implicaría inevitablemente problemas de aterramiento.

Una vez asumida la idoneidad geomorfológica y ambiental del emplazamiento de la cerrada en la zona de La Viña, se ha establecido la captación por medio de un tomadero, ubicándose el embalse fuera del cauce, con el objeto de permitir el paso directo de los sedimentos.

En esta comunicación se establece la selección de la tipología y altura máxima de presa, en función de las condiciones de seguridad a lo largo del barranco y sobre todo, en la desembocadura donde se asienta la Playa y el Puerto de Tzacorte.

La seguridad se analiza, tanto desde un punto de vista estructural de las posibles alternativas de presas, como por el riesgo potencial de inundación aguas abajo, provocado por el hipotético caso de rotura de presa y de fenómenos naturales de deslizamiento de tierras, aguas arriba del embalse.

¹ Profesor Titular de Obras Hidráulicas y Aprovechamientos Hidráulicos. Universidad Politécnica de Cartagena.
E-mail: lcastilloe@nexo.es

² Asesor de TYPESA. Catedrático de Obras Hidráulicas. Universidad Politécnica de Madrid

³ Departamento de Hidráulica de TYPESA

⁴ Jefe de Área del Servicio Hidráulico. Santa Cruz de Tenerife

1. Antecedentes

La cuenca hidrográfica formada por la Caldera de Taburiente y el Barranco de Las Angustias se extiende en una superficie de unos 56 km², posee la mayor aportación anual de aguas de todo el Archipiélago, la cual se cifra en más de 25 hm³/año (recursos superficiales y subterráneos). La espectacularidad y grandiosidad de la morfología de la Caldera, causada por un proceso erosivo magnífico, le ha conferido la declaración de Parque Nacional, incluyendo en sus límites a la mitad superior del cauce del barranco, quedando el resto incluido en Zona de Protección y Paisaje Protegido.

En la siguiente fotografía se puede observar la cuenca hidrográfica del barranco de Las Angustias, su desembocadura en donde se encuentra la Playa y Puerto de Tazacorte y a la derecha, el Valle de Aridane.



Fotografía 1. Barranco de Las Angustias, Puerto de Tazacorte y Valle de Aridane

El régimen de precipitaciones, la extensión y calidad agrícola de los terrenos y el trabajo de los habitantes del Valle de Aridane, han propiciado la existencia de la más rica superficie cultivada de Canarias, (con más de 2.000 ha dedicadas sobre todo al plátano), siendo un factor de importancia radical en la economía insular y del archipiélago. Con esta zona de cultivo la demanda total de agua, incluyendo los usos urbanos y turísticos, asciende a unos 33 hm³.

El ingenio, la tenacidad y el esfuerzo de los palmeros ha permitido captar, conducir y distribuir las aguas tan necesarias para la demanda de la zona, obtenidas de nacientes, galerías, pozos y tomaderos. Sin embargo, la insuficiencia de los recursos y la escasa capacidad de regulación, están

⁵ Jefe de Servicio del Servicio Hidráulico. Santa Cruz de Tenerife

provocando la sobre explotación de los pozos costeros, de los que se extraen unos 16 hm³ anuales, generando problemas de salinidad y contaminación. Frente a ello existen unos recursos superficiales, que en forma de avenidas torrenciales puntuales, discurren por el Barranco de Las Angustias y que no se ha conseguido captar más que en una pequeña parte, a pesar de tener constancia de intentos desde hace más de un siglo.

El aprovechamiento de los caudales que anualmente discurren por el barranco y que se pierden en el mar, se ha visto obstaculizada por la singularidad de su problemática:

- Morfología muy abrupta, con longitud del cauce muy corta y elevadas pendientes tanto del cauce como de las márgenes.
- Régimen de precipitaciones muy irregular, concentrados en muy pocos días al año.
- Diferente permeabilidad de los materiales.

Estas características se traducen en la concentración de los recursos en un número escaso de avenidas con elevados caudales y velocidades y gran proporción de transporte de sedimentos*. Esta problemática condiciona el tipo de aprovechamiento, eliminando la posibilidad de utilizar los sistemas habituales de captación "presa-embalse", ya que implicarían inevitablemente problemas de aterramiento.

Adicionalmente, se ha llegado a identificar un problema geológico-geotécnico en el entorno de La Viña y que condiciona el tipo de proyecto a diseñar.

En estas circunstancias, El Servicio Hidráulico de Santa Cruz de Tenerife, por medio de la empresa pública Viviendas Sociales e Infraestructura de Canarias VISOCAN, convocó un Concurso Público para profundizar en los estudios y definir finalmente a nivel constructivo, las obras necesarias a ejecutar; del cual la Unión Temporal de Empresas TYPASA-3G (2000), resultó adjudicataria.

2. Análisis y diagnóstico

El análisis de los antecedentes y los estudios iniciales, con la perspectiva de atacar nuevamente el proyecto, ha permitido reconsiderar la dimensión del estudio y plantear la problemática global de la solución:

- Se pretende aumentar el aprovechamiento de los recursos superficiales del Barranco de Las Angustias sabiendo que estos se producen de manera torrencial.
- La solución debe permitir un embalse suficiente que permita aumentar la regulación deficiente del sistema.
- Existe un problema geológico-geotécnico importante en el emplazamiento de La Viña, provocado por un deslizamiento de grandes dimensiones en la ladera izquierda (origen del ensanche del cauce) y que necesita ser estudiado en mayor profundidad.

* Concretamente, la tasa de transporte de sedimentos anual hasta la zona de La Viña (A=49 km²), es de unos 867 m³/km², valor un 14% superior a lo registrado a nivel mundial en cuencas entre 26 y 260 km². Ver Castillo et. al (2000).

- Las dimensiones del aprovechamiento planteado (1,5 hm³) imponen que deba cumplir la Normativa de Seguridad vigente para este tipo de embalses, debiéndose tener en cuenta la más amplia casuística de accidentes: avenidas máximas y extremas, deslizamientos, sismos, roturas, etc., y debiéndose garantizar la seguridad de los asentamientos y aprovechamientos en las condiciones marcadas por dichas Normas.
- Las actuaciones se enmarcan en Zonas de Protección Ambiental y Paisajística.

Asumida la idoneidad geomorfológica y ambiental del emplazamiento de La Viña, se llegó al consenso en la solución, captar parte de las aguas de las avenidas mediante el siguiente sistema: **tomadero tipo Tiroles – desarenador tipo Dufour/Bieri – balsa de almacenamiento**, ubicada lateralmente en la zona de mayor ensanche, dejando de esta forma libre el cauce para el paso del agua sobrante (Ver gráfico 4).

A continuación se analiza los dos problemas principales que condicionan esta solución técnica:

- El gran deslizamiento de la ladera izquierda
- La capacidad de embalse que garantice las condiciones de seguridad a lo largo del barranco, y sobre todo en su desembocadura, donde se asienta la Playa y el Puerto de Tzacorte.

En cuanto al primer punto y tras realizar prospecciones de campo, análisis de círculos de deslizamiento y estabilidad, se ha llegado a la conclusión de la imposibilidad técnica de garantizar completamente, y en cualquier situación, la estabilidad de la ladera deslizada. Aunque se ampliara en gran medida la campaña geotécnica, no se dispondría del conocimiento suficiente de este deslizamiento de más de 300 m de altura y volumen entre 7 y 10 millones de m³. Este grado de incertidumbre, incluso diseñando estructuras muy complejas y costosas, aconseja evitar construir en dicha zona, cerrando por tanto el embalse aguas arriba del citado deslizamiento, aunque se pierda capacidad de almacenamiento.

La solución del segundo punto se reduce a seleccionar el tipo de presa, altura máxima y la evaluación de eventuales deslizamientos, procedimientos que se describen en la presente comunicación.

3. Elección de la tipología y altura máxima de presa en función del riesgo potencial

El estudio de seguridad se ha realizado, tanto desde un punto de vista de seguridad global de la cimentación de las estructuras, como desde el punto de vista de seguridad por riesgo potencial en el caso de una hipotética rotura de la estructura.

En cuanto a la seguridad de la propia estructura, existe la inercia a pensar que una estructura de hormigón es más segura que una de materiales sueltos. Sin embargo, la correcta ejecución y el hecho de que la balsa no se encuentra directamente sobre el cauce, junto con los elementos de drenaje y desagüe incorporados, reducen el riesgo de vertido por coronación, pudiendo por tanto considerarse ambas soluciones, con igual nivel de seguridad estructural.

Sin embargo, debido a que las presas de hormigón producen en su fallo un mayor caudal de desembalse que las de materiales sueltos (por producirse en aquellas la rotura de forma repentina, frente al carácter progresivo que adquiere en éstas), se puede concluir que los efectos en la población de aguas abajo, ante una posible rotura de la estructura, serán sensiblemente más dramáticos en el caso de disponer muros de hormigón que de materiales sueltos.

Los cálculos realizados mediante simulación de la onda de rotura en régimen variable, arrojan conclusiones que confirman lo anteriormente dicho.

De acuerdo al Estudio de SURGE (1994), un caudal punta de 1.000 m³/s generado en la zona de La Viña y transitado por el barranco de Las Angustias, no desbordaría dicho cauce, puesto que el nivel de agua quedaría al menos dos metros por debajo de la cota de la carretera de Tzacorte.

Así, debemos establecer una tipología (hormigón o materiales sueltos) y altura de presa, de tal forma que la hipotética rotura de la presa, produzca un caudal punta inferior a los citados 1.000 m³/s.

Las principales formulaciones y recomendaciones que se han utilizado para el cálculo del caudal máximo de rotura se basan en la Guía Técnica del Ministerio de Medio Ambiente (1996).

En el caso de presas de gravedad y contrafuertes, la forma de la brecha se considera rectangular y hasta el fondo del cauce, con un ancho del que resulte mayor entre el tercio (1/3) de la longitud de coronación o de tres (3) bloques de construcción de la presa. El tiempo de rotura se asume entre 10 y 15 minutos.

En las presas de materiales sueltos, la Guía Técnica propone el tiempo de rotura T y el ancho medio de la brecha b (ancho a una altura $h/2$) a partir de unas ecuaciones empíricas obtenidas por el ajuste de datos de fallos de presas a nivel mundial y, que está en función del volumen V del embalse y de la altura de presa h ; así:

$$T = 4,8 \frac{V^{0,50}}{h} \quad (1)$$

$$b = 20.(V.h)^{0,25} \quad (2)$$

En donde T está en horas, V en hm³, b y h en metros. La profundidad de la brecha se considera hasta el contacto con el cauce y la forma se asume trapecial con taludes 1:1.

Sin embargo, la aplicación de estas relaciones a nuestro caso particular de volumen y altura de presa, producen valores de tiempo de rotura sensiblemente bajos, incluso inferiores al tiempo de rotura que se produciría en una presa análoga de hormigón con idénticos parámetros de cálculo. En el gráfico 1 se presenta la solución de la expresión (1) en el entorno de nuestro caso particular: alturas de presa entre 5 y 30 m y volúmenes de almacenamiento hasta 3 hm³.

Se ha incluido en el gráfico el tiempo máximo de rotura de una presa de hormigón (15 min = 900 s) y que consideramos como el tiempo mínimo de rotura de una presa de materiales sueltos.

Se puede observar en el gráfico 1, que para el caso de una presa de 5m de altura, la expresión (1) siempre produce valores superiores a 900 s, con lo cual su aplicación no tiene restricciones.

Sin embargo, en el caso de una presa de 10 m de altura, la expresión (1) debería aplicarse a partir de un volumen superior a 0,30 hm³.

- Para una presa de 15 m, a partir de 0,65 hm³
- Para una presa de 20 m, a partir de 1,10 hm³
- Para una presa de 30 m, a partir de 2,45 hm³

Para valores superiores de altura presa, los volúmenes embalsados generalmente serán muy superiores a los volúmenes que produzcan el tiempo mínimo de rotura de 900 s, con lo cual la expresión (1) no tendrá restricciones de aplicación.

En todo caso, en cualquier aplicación particular, se recomienda establecer la altura y volumen de embalse y analizar la aplicación de la expresión (1), como se ha realizado en los párrafos precedentes.

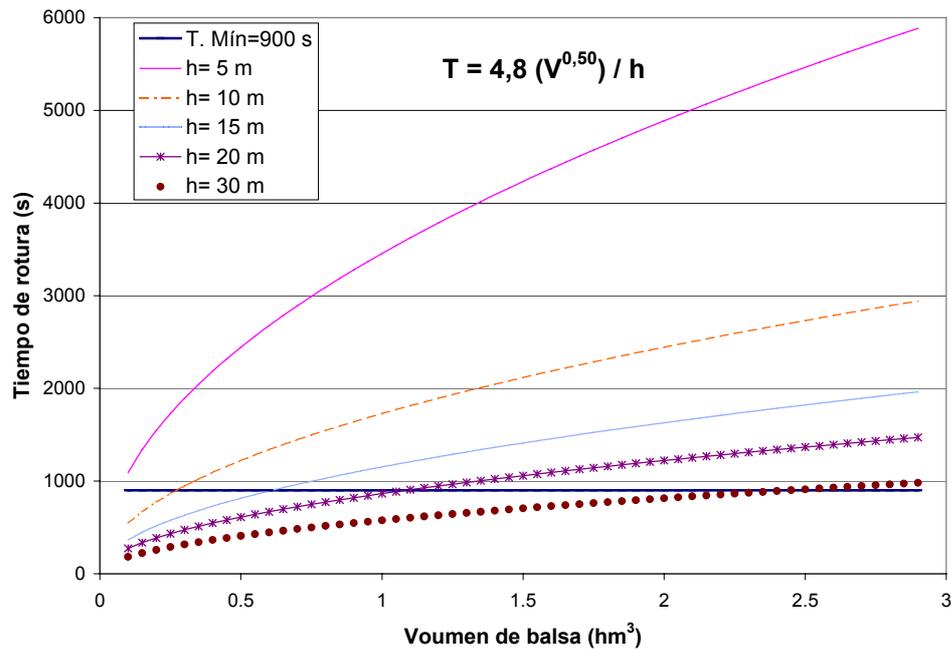


Gráfico 1. Tiempo de rotura de una presa de materiales sueltos, en función de la altura y volumen almacenado.

El caudal máximo de rotura de acuerdo al National Weather Service de los Estados Unidos [Wetmore y Fread (1981), Fread (1988)] es:

$$Q_{\text{máx}} = 1,7b \left[\frac{F}{\tau + \frac{F}{\sqrt{h}}} \right]^3 \quad (3)$$

siendo:

$$F = 1,176 \frac{\Gamma A_s}{b} \quad (4)$$

En donde $\Gamma = 3$ es un coeficiente empírico adimensional, define la altura equivalente sobre la brecha que produce el máximo caudal, A_s es la superficie del embalse en m^2 .

Castillo et. al (1998) demostraron que el valor de Γ propuesto, no siempre está del lado de la seguridad para ciertas relaciones de altura de presa y volumen de embalse y, propusieron la corrección del método a partir de un tiempo equivalente de rotura t_e el mismo que depende de la

altura de presa, superficie de embalse y su forma de variación (constante o triangular. Gráficos 2 y 3); de tal forma que los resultados se encuentren siempre del lado de la seguridad, con respecto a los valores de caudal de rotura q , que se obtendrían de una simulación con un modelo completo en régimen no permanente tipo DAMBRK o MIKE 11. Así, el tiempo equivalente de rotura se expresaría con la siguiente relación ($c \approx 1,70$ - coeficiente de desagüe en pared gruesa):

$$te = \frac{\left\{ \left(\frac{c \cdot b \cdot h^{3/2}}{q} \right)^{1/3} - 1 \right\} \cdot F}{\sqrt{h}} \quad (5)$$

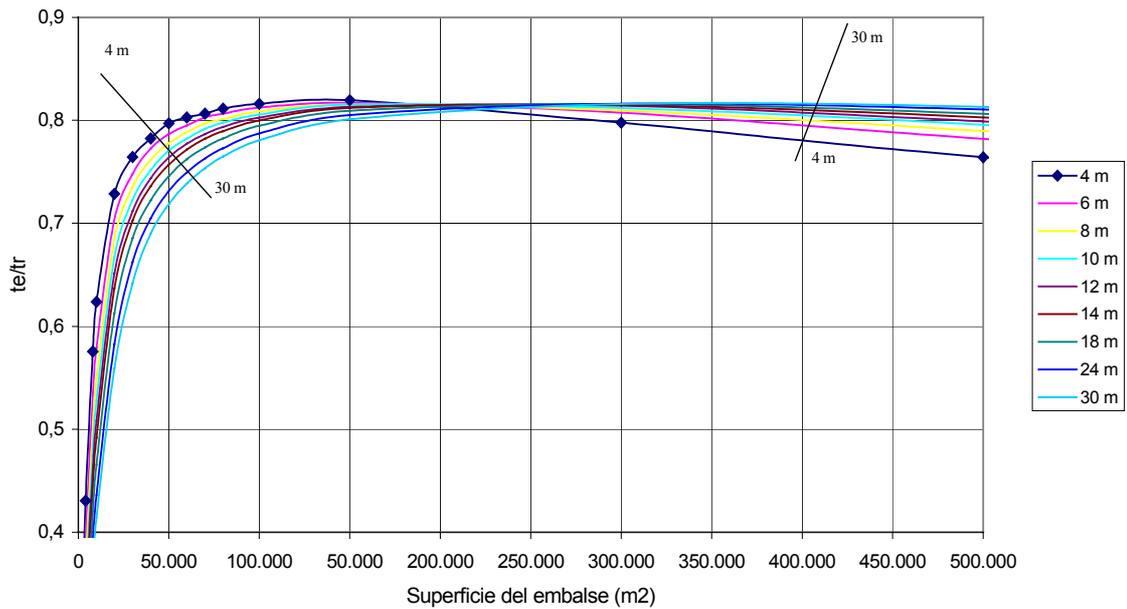


Gráfico 2. Relación tiempo equivalente / tiempo de rotura para embalse constante

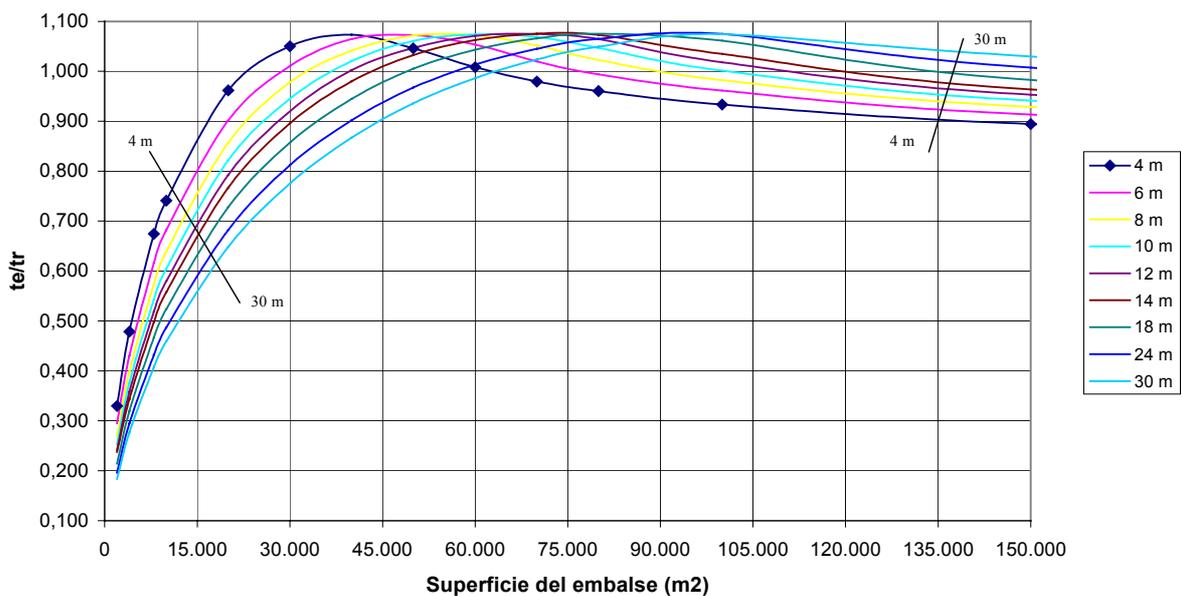


Gráfico 3. Relación tiempo equivalente / tiempo de rotura para embalse triangular

En el cuadro 1 se recogen los resultados de los cálculos del caudal pico de rotura, efectuados para la balsa de La Viña. Se indica la altura de presa más desfavorable h , la superficie de embalse As y volumen correspondiente V , el tiempo de rotura T , el ancho de la brecha de rotura b , el caudal de rotura obtenido aplicando directamente la Guía Técnica Q_{GUIA} , la relación promedio entre el tiempo equivalente de rotura y el tiempo de la Guía Técnica te/tr (obtenido de los gráficos 2 y 3), el tiempo equivalente de rotura te y el caudal máximo de rotura Q_{CORR} . El procedimiento de cálculo y su justificación se ha realizado siguiendo las principales conclusiones de la publicación de Castillo et. al (1998).

PRESA	h	As	V	T	b	Q_{GUIA}	te/tr	te	Q_{CORR}
MATERIAL	(m)	(m²)	(hm³)	(s)	(m)	(m³/s)	(s)	(s)	(m³/s)
Hormigón	30	132.000	1,50	600	57	5.777	0,91	546	6.248
	18	47.735	0,68	600	57	1.148	0,84	501	1.456
	26	51.800	0,68	600	45	1.883	0,86	513	2.283
Materiales									
Sueltos	30	132.000	1,50	705,45	51,80	4.952	0,91	642	5.377
	30	132.000	1,50	900	51,80	3.900	0,91	819	4.298
	18	47.735	0,68	900	37,41	770	0,84	752	975

Cuadro 1. Cálculo del caudal pico de rotura de acuerdo con la Guía Técnica Q_{GUIA} y corregido Q_{CORR} .

En el caso de una presa de hormigón de 30 m de altura útil, si se aplica directamente la Guía Técnica, el caudal máximo de rotura sería de 5.777 m³/s, valor inferior en 456 m³/s, si se compara con el valor de 6.233 m³/s, obtenido con un análisis completo en régimen no permanente con el programa MIKE 11 [SURGE (1994)].

Sin embargo, el caudal de rotura obtenido con la corrección propuesta (variación constante --> $te/tr = 0,82$, triangular --> $te/tr = 1$ y promedio --> $te/tr = 0,91$), es de 6.248 m³/s, superior en solo 15 m³/s y del lado de la seguridad, con respecto al valor de referencia, lo que confirma la bondad del método.

En el caso de una presa de materiales sueltos de 30 m de altura, el caudal máximo de rotura sería de unos 4.298 m³/s, siendo este valor superior a cuatro veces al caudal máximo permitido de 1.000 m³/s, para no inundar Tazacorte.

Para una balsa con muros de hormigón y altura de 18 m, el caudal punta de rotura ya sería de unos 1.456 m³/s, valor todavía bastante superior al caudal máximo permitido.

En nuestro caso particular, si se dispusiera una balsa con muros de hormigón, la sección más desfavorable correspondería a una altura de presa de 26 m, que estaría situada en la alineación del encauzamiento, aunque la altura interior (útil) de la balsa sería únicamente de 18 m. En esta situación, el caudal punta de rotura sería de unos 2.283 m³/s.

En cambio, para el caso de una balsa de materiales sueltos, la sección más desfavorable sería de 18 m de altura (igual a la altura útil), coincidiendo con la alineación frontal hacia aguas abajo de la balsa. El caudal punta de rotura sería de unos 975 m³/s.

Resumiendo, puesto que el caudal máximo estimado para que no se produzca inundación en la zona de Tzacorte es de 1.000 m³/s, la hipotética rotura de la solución con muros de hormigón inundaría completamente la zona, en tanto que la solución con materiales sueltos no produciría inundación.

4. Seguridad ante eventuales deslizamientos de tierras aguas arriba de la balsa

Se ha considerado la seguridad del sistema frente a la rotura de presas naturales formadas por eventuales deslizamientos de tierras en el interior del barranco.

SURGE (1994) aplica un modelo de rotura de deslizamiento natural [Fread (1987)], en función de las características del valle y de un hidrograma de avenida de período de retorno de quinientos años ($Q_{500}=472$ m³/s).

Las dimensiones de la brecha dependen del ángulo de fricción interna y cohesión del material de la presa conformada por el deslizamiento. La posible erosión inducida por el caudal que circula por la brecha, se calcula con una adaptación de la conocida fórmula de transporte de sedimentos de Meyer-Peter y Müller.

De los análisis de sensibilidad realizados se establece que la hipótesis más desfavorable corresponde a la formación, debido a estos deslizamientos, de un embalse relativamente pequeño, al cual entraría el grueso del hidrograma. Se concluye que el flujo no tiene energía suficiente para arrastrar por completo los materiales deslizados, siendo el caudal punta saliente de únicamente unos 550 m³/s, ligeramente superior al caudal de avenida de período de retorno de quinientos años ($Q_{500}=472$ m³/s).

5. Conclusiones

En el caso de la presa de La Viña, la existencia de una gran cantidad de transporte de sedimentos, condiciona el tipo de aprovechamiento, eliminando la posibilidad de utilizar los sistemas habituales de captación "presa-embalse", ya que implicarían inevitablemente problemas de aterramiento.

La solución propuesta consiste en captar parte de las aguas de las avenidas mediante un sistema: **tomadero tipo Tírolés – desarenador tipo Dufour/Bieri – balsa de almacenamiento** (ubicada lateralmente en la zona de mayor ensanche), dejando de esta forma libre el cauce, para el paso del agua sobrante.

Desde el punto de vista de la seguridad aguas abajo, se recomienda construir una estructura de materiales sueltos, con una altura máxima de 18 m y un volumen de almacenamiento de 0,68 hm³.

Los fenómenos de deslizamiento natural de laderas aguas arriba de La Viña y su posterior rotura, no llegan a producir caudales importantes que pongan en peligro la integridad de la obra, ni tampoco la posterior inundación de Tzacorte, aunque se recomienda realizar un estudio más detallado del fenómeno.

Se ha analizado y propuesto un límite inferior de aplicación en la expresión del tiempo de rotura en presas de materiales sueltos y, se ha insistido en la corrección que es necesario realizar a los métodos de cálculo recomendados por la Guía Técnica, para ciertas relaciones de altura de presa y volumen de embalse, en función de un tiempo equivalente de rotura t_e , para garantizar que el caudal resultante, sea semejante al que se obtendría al aplicar el modelo completo.

La casuística de las presas que requerirían esta corrección es muy amplia, como son el caso de las balsas de regulación para regadíos, abastecimientos, balsas mineras, etc.

REFERENCIAS

CASTILLO, L.G.; SANTOS, F.; OJEDA, J.; CALDERÓN, P.; y MEDINA, J.M. (2000). "Estimación de los coeficientes de resistencia, transporte de sedimentos y caudal dominante, en el diseño de un encauzamiento con flujo hiperconcentrado". V Jornadas sobre Encauzamientos Fluviales. Ministerio de Medio Ambiente. CEDEX. Madrid.

CASTILLO, L.G.; DE COS, O.; DURÁN, T. AND GONZÁLES, J. (1998). "Dam break equivalent time for the peak flow calculation with classification objective". Dam Safety. (Ed. L. Berga). Proceedings of the International Symposium on New Trends and Guidelines on Dam Safety. Barcelona, Spain. June 1998. A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield/1998.

FREAD, D.L. (1988). "The NWS DAMBRK Model: Theoretical Background/UserDocumentation". U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE. National Oceanic and Atmospheric Administration. National Weather Service. Silver Spring. USA. October.

FREAD, D.L. (1987). "NWS Dam Breach Models for Microcomputers". ASCE. Annual Conference of Irrigation and Drainage Division. Portland. Oregon, July. pp.28-31.

GUÍA TÉCNICA (1996). "Clasificación de presas en función del riesgo potencial". Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas. Madrid.

SURGE, S.L. (1994). "Estudio de las posibilidades de inundación en Tzacorte (Isla de La Palma): Influencia de la construcción de la Presa de La Viña en el Barranco de Las Angustias". Servicio Hidráulico de Tenerife. Marzo.

TIPSA-3G (2000). "Proyecto de la presa de La Viña. Isla de La Palma". Servicio de Obras Hidráulicas de Santa Cruz de Tenerife.

WETMORE, J.N. AND FREAD, D.L. (1981). "The NWS Simplified Dam Break Flood Forecasting Model". Proceedings of the Fifth Canadian Hydrotechnical Conference, Fredericton; New Brunswick, Canada, May.

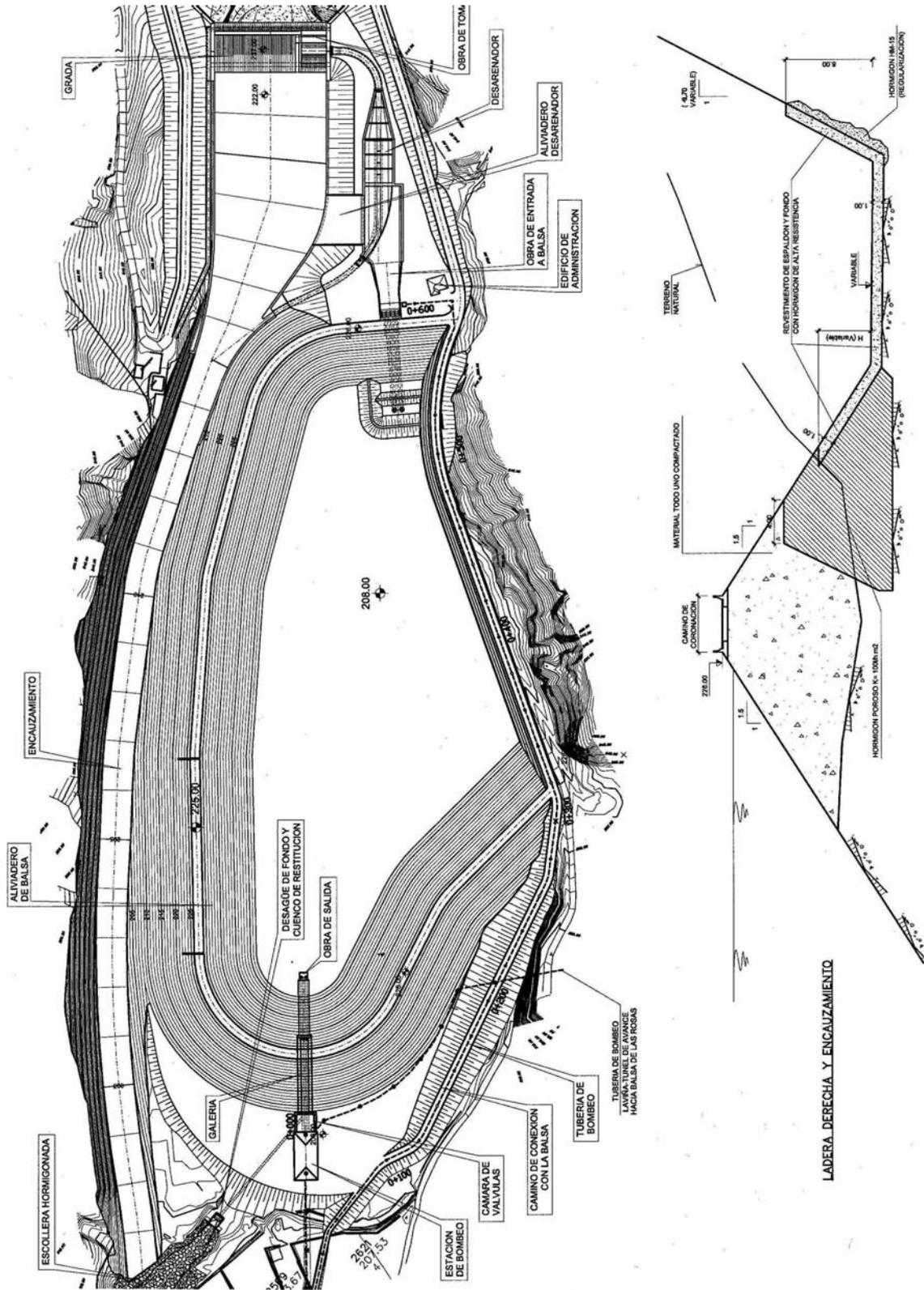


Gráfico 4. Planta: Obra de toma, desarenador, balsa y encauzamiento. Sección tansversal de la balsa y encauzamiento.