

COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS

CRITERIOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD NECESARIA DE LOS DESAGÜES PROFUNDOS

F. Delgado Ramos¹; J. Chiachío Ruano²; M. Chiachío Ruano³

RESUMEN: Los desagües profundos cumplen variadas funciones muy importantes para la operatividad y seguridad de una presa, estando casi todas ellas relacionadas directa o indirectamente con el control del nivel del embalse: por ejemplo durante las operaciones de cierre del desvío del río, para el control de la puesta en carga, para el vaciado del embalse en reparaciones, para la consecución de resguardos preventivos en épocas de avenidas, para controlar su oscilación durante una avenida en auxilio de los aliviaderos, etc.

Gracias al desarrollo de la tecnología de construcción de elementos metálicos, los desagües de las presas modernas gozan de una alta fiabilidad, pero no siempre ocurre lo mismo con presas ya existentes, construidas en muy diversas épocas.

Puesto que no hay en España un procedimiento claro para fijar la capacidad necesaria de los desagües profundos, la presente comunicación pretende ofrecer una serie de criterios y recomendaciones para esta tarea, sea en el caso del dimensionamiento de los desagües para una nueva presa, sea para la evaluación de presas existentes.

¹ Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Profesor del Departamento de Mecánica de Estructuras e Ingeniería Hidráulica. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Granada.

² Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Ingeniero de Proyectos en SENER INGENIERÍA Y SISTEMAS.

³ Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Ingeniero de Proyectos en SENER INGENIERÍA Y SISTEMAS

1. INTRODUCCIÓN

Hasta alrededor de la mitad de siglo pasado lo habitual era disponer de un solo desagüe de fondo y alguna vez otro intermedio, aparte de las tomas de explotación. Este desagüe muy raras veces colaboraba en la evacuación de avenidas, y su capacidad era relativamente modesta. Además, existía una fuerte limitación tecnológica en cuanto al tamaño de las válvulas, lo que impedía adoptar tamaños elevados para los desagües profundos.

Posteriormente, a raíz de la entrada en vigor de la Instrucción del 67 [1], se comienza a disponer como mínimo de 2 desagües profundos en las presas, pero aún seguían presentando importantes limitaciones en cuanto a capacidad y a seguridad en el funcionamiento de las válvulas.

Pero el avance tecnológico y las exigencias de las grandes obras hicieron evolucionar la seguridad, las dimensiones y las funciones de los desagües profundos, tomando un importante papel en la seguridad global de la obra. Sin embargo, no existen actualmente recomendaciones ni criterios claros para la evaluación y el dimensionamiento de su capacidad [2].

En el presente trabajo se pretende remarcar este importante papel de los desagües profundos como elementos de seguridad, y establecer una metodología y algunos criterios, para el dimensionamiento racional y sistemático de tales elementos.

2. BASES DE PARTIDA: NORMATIVAS Y RECOMENDACIONES

A nivel normativo, en la Instrucción de 1967 [1], en el Reglamento de 1996 [3] así como en las Guías Técnicas [4], no existen criterios unificados para el dimensionamiento de la capacidad de los desagües profundos, dándose solamente algunos criterios generales que han ido variando sustancialmente desde la Instrucción del 67.

Así, en la Instrucción para el Proyecto, Construcción y Explotación de Grandes Presas, en su Artículo 20º “Desagües Profundos”, se da como criterio que *“con el nivel de embalse a la mitad de altura de la presa, la capacidad total de los desagües profundos será al menos tres veces el caudal medio del río”*.

En el Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses, en su Artículo 14º (Sección 2ª) “Capacidad de los órganos de desagüe”, se dice textualmente *“los desagües profundos de las presas, incluyendo los desagües de fondo, estarán dimensionados para facilitar conjuntamente con las tomas de agua, el control del nivel de embalse, en particular durante su primer llenado”*.

En cuanto a las Guías Técnicas de Seguridad de Presas, la Guía nº 5 recomienda tener en cuenta estos criterios:

-Que con el conjunto de los desagües pueda lograrse, en el curso de una semana, reducir a la mitad la carga sobre la presa, supuestos nulos los caudales de entrada al embalse.

-Que con el conjunto de los desagües y con un caudal entrante igual al medio, se consiga rebajar un 15% la carga en el curso de unos días.

-Que durante el trimestre más seco del año el desagüe de fondo permita bajar el embalse hasta el nivel mínimo de explotación en un tiempo razonable.

-Que durante ese trimestre, y partiendo del nivel mínimo de explotación, el desagüe de fondo pueda vaciar totalmente el embalse y mantenerlo así.

Queda por tanto justificado que el dimensionamiento de la capacidad de los desagües profundos es una cuestión abierta a efectos de normativa y recomendaciones, y que la falta de criterios de dimensionamiento homogéneos y unificados es evidente.

3. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

La propuesta que se realiza en este trabajo es proporcionar criterios para la evaluación y el dimensionamiento de la capacidad de los desagües profundos. Estos criterios estarán enmarcados en una metodología, que consistirá en la identificación de las funciones que deben cumplir los desagües profundos como elementos de seguridad, y en el dimensionamiento para el cumplimiento de cada función según las prescripciones del criterio asignado a la misma.

La identificación de estas funciones implica la revisión de las situaciones de proyecto por las que deben pasar los desagües profundos durante su vida útil, por lo que los criterios propuestos se establecerán en el marco de cada situación de proyecto. El dimensionamiento resultante de la aplicación secuencial de los distintos criterios deberá ser comprobado para que el caudal provocado sea inferior al impuesto por las condiciones de protección del cauce aguas abajo.

La protección aguas abajo es una importante imposición de seguridad global, máxime teniendo en cuenta la ocupación de los cauces por actividades humanas situadas en niveles propios de avenidas de muy corto periodo de retorno. [5]

Es necesario incidir en que la metodología que se propone en este trabajo es abierta, en el sentido en que los criterios que se aquí se exponen deberán ser contrastados y validados para cada caso en concreto. En la presente comunicación se han omitido las fórmulas de cálculo correspondientes a cada criterio por falta de espacio, aunque su deducción no es compleja.

Para cada fase, utilizaremos el término “avenida de proyecto de la fase X”.

De acuerdo con la Guía nº 4, para el desvío del río en presas de hormigón de Categoría A se RECOMIENDA que la posibilidad de superación de los caudales durante el período efectivo de las construcción sea inferior al 20%, y las de las Categorías B y C entre el 20% y el 25%. En las presas de materiales sueltos de la Categoría A esta probabilidad será inferior al 5%, y las categorías B y C entre el 5% y el 10%.

A la avenida así calculada, teniendo en cuenta la duración de la fase de construcción de la presa la denominaremos como “Avenida de Proyecto durante la fase de construcción” y si nos referimos al corto periodo de tiempo que dura la operación de cierre del desvío del río, hablaremos de “Avenida de Proyecto durante el cierre del desvío”

Con el mismo criterio pero referido al periodo de puesta en carga, hablaremos de “Avenida de Proyecto para la fase de puesta en carga”.

Para la fase de explotación utilizaremos el término “Avenida de Proyecto para la fase de explotación” o simplemente “Avenida de Proyecto” ya que es el término habitualmente utilizado.

4. CRITERIOS DE EVALUACIÓN

4.1. FASE DE CONSTRUCCIÓN

4.1.1. Situación Normal

4.1.1.1. Colaboración en el cierre del Desvío del Río

Antes de proceder a cerrar el desvío del río, es necesario tener previsto por dónde evacuar los caudales naturales de dicho río, tanto para evitar daños medioambientales en el cauce de aguas abajo, como para impedir una subida excesiva del nivel de embalse.

Para esta función los desagües deben tener una capacidad superior a la “Avenida de Proyecto durante la fase de cierre del desvío del río”. Como esta operación puede hacerse con bastante celeridad, el periodo de retorno de la avenida a considerar puede ser bastante bajo, pero el problema es que necesariamente el nivel de embalse es muy reducido y por tanto también es muy baja la carga hidráulica disponible. Es por ello que recomendamos disponer de conductos de desagüe provisionales que serán inutilizados acabada su función.

4.2. FASE DE PUESTA EN CARGA

4.2.1. Situación normal

4.2.1.1. Control del nivel de embalse según el Plan de Puesta en Carga

El control del nivel de embalse según el Plan de Puesta en Carga es una de las funciones fundamentales de los desagües profundos. Efectivamente, para cumplir dicho Plan será necesario ir llenando el embalse sin superar determinados escalones de carga y para ello la única posibilidad es evacuar los caudales naturales del río a través de los desagües profundos.

La Guía Técnica nº 6 describe sucintamente esta fase indicando que se puede permitir alcanzar una carga de agua del orden del 50% de la altura máxima en un periodo relativamente corto, siendo preciso extremar las precauciones a partir del 60% o 70% de la altura máxima. Superado este nivel, es recomendable que los desagües profundos sean capaces de mantener el nivel

de embalse e incluso bajarlo si se observa alguna anomalía, considerando que entran en el embalse los caudales normales, en ausencia de avenidas, (situación que se describe en el siguiente epígrafe).

La capacidad necesaria para cumplir esta función podría ser la recomendada por la Guía nº5:

“que con el conjunto de los desagües y con un caudal entrante igual al medio, se consiga rebajar un 15% la carga en el curso de unos días”

El problema de esta recomendación es que en caso de que nos encontremos en la época del año de mayores caudales medios, podríamos ser incapaces de bajar o ni siquiera mantener el nivel de embalse.

Es por ello que proponemos que para cumplir la función de control del nivel de embalse durante la fase de puesta en carga en ausencia de avenidas, la capacidad de los desagües profundos sea aproximadamente el doble del mayor de los caudales medios mensuales.

4.2.2. Situación accidental

4.2.2.1. Evacuación de avenidas

Si durante la fase de puesta en carga se presenta una avenida considerable, se podría producir el llenado del embalse de forma excesivamente rápida con el peligro que esto conlleva. Teniendo en cuenta la duración prevista de la fase de puesta en carga, calcularíamos la “avenida de proyecto” correspondiente a esta fase y ésta sería la que utilizaríamos para fijar la capacidad necesaria de los desagües profundos.

En este caso no es necesario que los desagües tengan una capacidad superior a la “avenida de proyecto de la fase de puesta en carga”, ya que al tratarse de una situación accidental de menor probabilidad y duración, se pueden tolerar aumentos del nivel de embalse durante la avenida, siempre y cuando no superen unos ciertos niveles y no permanezcan demasiado tiempo.

A modo de ejemplo, suponiendo que estamos ya en la fase más importante de la puesta en carga, (una vez superado el 60% de la altura de embalse total) y se presenta una avenida, la capacidad de los desagües profundos debería ser suficiente para evacuar el volumen de la “avenida de proyecto para la fase de puesta en carga”, en menos de 15 días y con un incremento de la carga hidráulica inferior al 15%, (adoptando la más restrictiva de las dos condiciones).

4.3. FASE DE EXPLOTACIÓN

4.3.1. Situación normal

4.3.1.1. Creación de resguardos estacionales

Los resguardos estacionales previstos en las Normas de Explotación de la presa pueden crearse con el aliviadero si es de compuertas, sobre todo si las compuertas son elevadas. Pero en caso de aliviadero sin compuertas o en caso de que no baste sólo con el aliviadero, es necesario complementar esta función con los desagües profundos, por lo que estos adquieren un papel decisivo en estos otros casos. Para este segundo caso se propone el siguiente criterio de diseño:

Los desagües de fondo deben ser capaces de reducir el volumen embalsado hasta conseguir el máximo resguardo estacional en el curso de 7 días, suponiendo un caudal de entrada igual al mayor de los caudales medios mensuales y partiendo del N.M.N.

4.3.1.2. Limpieza de sedimentos

Esta función está también considerada como una de las principales funciones de los desagües profundos por su implicación en la operatividad y, por tanto, en la seguridad de la presa y el embalse en su conjunto, (Guía nº 5).

La función limpiadora de los desagües profundos será tanto más importante cuanto más material sólido arrastre un río por lo que en aquellos ríos que transporten mucho material en suspensión ésta función puede convertirse en la principal durante la fase de explotación.

La velocidad del agua en el desagüe es proporcional a la raíz cuadrada de la altura de agua sobre el mismo por lo que la única forma de ampliar la zona de arrastre es aumentar el número y la sección del desagüe, aumentando así el caudal de agua que sale por el desagüe y por tanto la zona de arrastre. Por lo general se procura ejecutar esta función con la máxima apertura de todos los elementos y con el nivel de embalse alto, dado que es así como se consigue la mayor eficacia. Esta función se ha visto limitada en muchos casos debido a la escasez de excedentes en los embalses lo que ha llevado a espaciar demasiado en el tiempo la ejecución de esta función dando lugar al soterramiento de los desagües y a la consolidación del sedimento de pie de presa, lo que deja fuera de servicio a los mismos.

Para el correcto cumplimiento de esta función diversos autores proponen disponer al menos de dos conductos de desagüe de diámetro mínimo $\phi=1.8\text{m}$ ("Dam Hydraulics", D.L.Vischer et al) para el cumplimiento de esta función, aunque otros títulos recomiendan $\phi=2\text{ m}$ ("Tratado básico de Presas", E.Vallarino). No obstante el dimensionamiento final adoptado dependerá de la cantidad de material que arrastre el río, de su cohesión, de su densidad y fundamentalmente de su consolidación a pie de presa.

Para el proyecto de nuevas presas recomendamos disponer la denominada “toma ecológica” por debajo de la cota del desagüe de fondo, ya que al permanecer abierta de forma ininterrumpida, protege al desagüe de fondo del atarramiento y permite unas operaciones de limpieza más espaciadas.

4.3.2. Situación accidental

4.3.2.1. Bajada total o parcial del nivel de embalse

El vaciado total o parcial del embalse es la función de los desagües de fondo por excelencia, dado que estos son los únicos elementos que pueden realizarla. Las necesidades que pueden llevar al vaciado total del embalse son diversas y de diversa índole: severas operaciones de mantenimiento correctivo que impliquen trabajar en seco, problemas de filtraciones profundas que reviertan gravedad, problemas estructurales severos que requieran descargar la estructura, vaciado del embalse en sequías extremas para dotar al río de caudales mínimos con fines higiénicos o ecológicos, etc.

El tiempo máximo de vaciado de un embalse dependerá del volumen del mismo, por lo que embalses de gran capacidad necesitarán mayores tiempos de vaciado que los de menor capacidad, pero parece razonable pensar que este valor del tiempo de vaciado debería estar acotado superiormente a partir de un cierto volumen de embalse.

Para la función de vaciado total o parcial del embalse son adecuadas las recomendaciones de la Guía nº 5:

-Que con el conjunto de los desagües pueda lograrse, en el curso de una semana, reducir a la mitad la carga sobre la presa, supuestos nulos los caudales de entrada al embalse.

-Que con el conjunto de los desagües y con un caudal entrante igual al medio, se consiga rebajar un 15% la carga en el curso de unos días.

-Que durante el trimestre más seco del año el desagüe de fondo permita bajar el embalse hasta el nivel mínimo de explotación en un tiempo razonable.

-Que durante ese trimestre, y partiendo del nivel mínimo de explotación, el desagüe de fondo pueda vaciar totalmente el embalse y mantenerlo así.

4.3.2.2. Colaboración en laminación de avenidas

La importancia de colaboración de los desagües profundos en la laminación de avenidas es tanto mayor cuanto más alta sea nuestra capacidad de anticipación al suceso en cuestión. Efectivamente, si gracias a la información del SAIH estimamos que en un cierto periodo de tiempo se va a presentar una avenida de consideración, lo ideal es iniciar el vaciado del embalse para obtener un resguardo superior al estacional¹.

¹ Esto parece entrar en contradicción con el artículo 15.1 del Reglamento Técnico de 1.996, pero la Guía nº 5 matiza la interpretación del mismo y de hecho pensamos que con la próxima aprobación de las Normas Técnicas de Seguridad, este error debe ser corregido.

Este resguardo previo a la avenida, puede crearse la mayoría de las veces con el aliviadero, si éste es de compuertas. Pero en caso de aliviadero sin compuertas o en caso de que no baste sólo con el aliviadero, es necesario complementar esta función con los desagües profundos, por lo que estos adquieren un papel decisivo en estos otros casos.

Una vez que ya se está presentando la avenida de proyecto, debe ser el aliviadero el encargado de evacuarla en condiciones de seguridad, y el papel de los desagües profundos es en general más secundario, pero puede ser conveniente disponer de ellos como margen de seguridad.

Así pues, para la creación de resguardos anticipándose a una avenida inminente recomendamos que los desagües profundos sean capaces de evacuar del embalse un volumen igual a un quinto del volumen de la Avenida de Proyecto en un tiempo máximo de 12 horas, suponiendo el nivel de embalse a su N.M.N. y un caudal de entrada igual a 3 veces el caudal medio del río.

Para la colaboración con el aliviadero durante la avenida de proyecto, recomendamos que sea el aliviadero el encargado de evacuarla adecuadamente en su totalidad, pero que los desagües ofrezcan una capacidad del 10% del caudal de avenida de proyecto, (teniendo en cuenta la laminación del embalse), a modo de margen de seguridad

4.3.2.3. Suelta de caudales de emergencia

Es habitual que las presas dispongan de una o varias tomas para la suelta de caudales destinados a un uso concreto, (central hidroeléctrica, riego, abastecimiento, etc.). En las presas más modernas se dispone también de “tomas ecológicas” que permiten la suelta de caudales ecológicos.

Sin embargo, en determinadas situaciones puede ser necesario utilizar para estos fines los desagües de fondo, por ejemplo cuando en sequías prolongadas el nivel de embalse se sitúa por debajo de las tomas, o cuando por algún tipo de contaminación en el río, (por ejemplo provocado por vertidos de alpechín), es preciso soltar caudales considerables que permitan la limpieza y restauración de sus condiciones ecológicas.

En general esta función de los desagües no condiciona la capacidad de los mismos, ya que será muy inferior a la resultante de otros condicionantes, pero sí que consideramos recomendable insistir en la necesidad de que los desagües de fondo tengan su embocadura en la cota más baja posible sin que corra peligro de aterramiento por sedimentos, y que la toma ecológica se sitúe por debajo del desagüe de fondo teniendo unos diámetros adecuados para la magnitud del caudal a soltar y permitiendo su funcionamiento con las válvulas casi completamente abiertas por lo que también son muy útiles para la limpieza de sedimentos en un entorno cercano a la toma..

4.4. FASE DE ABANDONO O DEMOLICIÓN

4.4.1. *Situación normal*

4.4.1.1. *Vaciado total del embalse*

Si finalizada la vida útil de una presa se estima conveniente su abandono o demolición, será preciso proceder al vaciado del embalse para lo cual serán necesarios los desagües de fondo.

Para esta función nos es preciso añadir ningún condicionante ya que será similar a la de vaciado del embalse en la fase de explotación pero ahora es probable que se disponga de mayor plazo de tiempo para finalizar dicho vaciado.

4.4.2. *Situación accidental*

4.4.2.1. *Evacuación de avenidas*

Finalizado el vaciado del embalse de una presa que vaya a ser abandonada, si no se demuele toda la obra habrá que dejar previsto por dónde evacuar las avenidas que se puedan presentar sin que se vuelva a embalsar. Para esta función lo mejor es que al menos se destruya una parte de presa lo suficientemente grande para dar paso libre a los caudales de avenida, por lo que tampoco esta fase supone un condicionante especial para los desagües profundos.

4.5. COMPROBACIÓN DEL CAUDAL PROVOCADO AGUAS ABAJO

Cada uno de los condicionantes descritos hasta ahora dará como resultado un determinado requerimiento de capacidad de los desagües profundos. Si no hubiera ninguna limitación, la capacidad a adoptar sería la mayor de todas ellas. Sin embargo, una capacidad excesiva de los desagües profundos puede provocar, en caso de apertura accidental o sabotaje, una avenida aguas abajo de la presa que puede provocar daños importantes, tanto por los efectos del caudal desaguado, como sobretodo por lo inesperado de este caudal.

Es por tanto necesario limitar lo que se denomina como “caudal provocado” ya que como indica el Artº. 15.1 del Reglamento [3]: “*La maniobra de los órganos de desagüe no deberá dar lugar a caudales desaguados que originen daños aguas abajo superiores a los que se podrían producir naturalmente sin la existencia del embalse*”.

Normalmente se entiende por *caudal provocado* aquel que se liberaría si con el N.M.N. de embalse se abren todas las compuertas del aliviadero y demás desagües. En la Guía Técnica N° 5 [4] se apunta que el caudal provocado debe ser menor que la máxima avenida normal, que podemos estimar aproximadamente como la de los 50 años de periodo de retorno sin tener en cuenta la laminación del embalse, aunque podría subirse a 100 años de periodo de

retorno si a poca distancia aguas abajo existe otro embalse y entre medias no hay zonas habilitadas.

La aplicación directa de esta prescripción daría lugar sin duda a una excesiva limitación tanto del tamaño de las compuertas del aliviadero como de los conductos de los desagües profundos, perjudicando seriamente su funcionalidad.

Es por ello que recomendamos que se adopten las medidas de seguridad pertinentes para que el riesgo de sabotaje o de apertura simultánea se reduzca al mínimo, como por ejemplo la instalación de señales de alarma para cualquier apertura, la limitación de la velocidad de apertura, la ubicación física en distintas salas que separe la cámara de válvulas de los desagües de la cámara de compuertas del aliviadero, etc.

En tal caso se propone el siguiente criterio para la comprobación del caudal provocado:

El caudal desaguado con el embalse a su N.M.N. por la suma de los aliviaderos y desagües cuya apertura simultánea sea posible, será inferior a la máxima avenida normal, que se estimar en la de los 50 de periodo de retorno sin laminar.

5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA CAPACIDAD DE DESAGÜE DE PRESAS EXISTENTES

Una vez establecidos unos criterios para la evaluación y el dimensionamiento de la capacidad de los desagües profundos en presas, se propone ahora en este punto proporcionar herramientas para calibrar estos criterios mediante el análisis de la dependencia estadística existente entre la capacidad de desagüe y otras variables, realizado sobre 281 presas españolas, agrupadas en cinco grupos en función del año de terminación de las obras, según datos del Inventario de Presas Españolas [6].

Cada grupo estudiado se ha denominado según el intervalo de años en que terminaron las obras y cada uno de estos grupos contiene un número suficiente pero desigual de presas, con objeto de conocer la sensibilidad del análisis al número de datos disponibles.

El objetivo de estudiar las 281 presas agrupadas en distintos grupos por fecha de terminación de sus obras es por una parte, detectar posibles tendencias temporales en cuanto a la capacidad de los desagües profundos, y por otra observar cómo varían con el tiempo los grados de ajuste de las distintas regresiones analizadas.

Tabla 1 Distribución de las presas estudiadas en los distintos grupos temporales

GRUPO	1995-2005	1985-1995	1975-1985	1950-1975	1925-1950
Nº PRESAS	50	55	31	114	26

5.1. RELACIONES ANALIZADAS

En primer lugar se ha analizado la dependencia entre la capacidad de desagüe con la altura de la presa, el volumen del embalse y el caudal punta de la avenida de proyecto, como variables independientes; y posteriormente la dependencia conjunta entre la capacidad de desagüe y todas las variables anteriores.

En la tabla 2, se observan gráficamente todas las relaciones de interdependencia estadística entre variables estudiadas. Estas gráficas están ordenadas por filas según el grupo analizado, y por columnas según la variable independiente considerada.

Para cada caso se proporciona una curva de ajuste entre las variables estudiadas. Las unidades de las variables relaciones serán las especificadas en el apartado 6 “Notación”.

Se destacan las siguientes conclusiones, (TABLA 2):

El grado de ajuste disminuye en términos generales a medida que el grupo de presas estudiado es más antiguo. Además, los grupos 1975-1985 y 1925-1950 presentan los R^2 más bajos, siendo éstos los grupos que menos presas poseen.

Se observa que la capacidad de desagüe y la altura de la presa están relacionadas estadísticamente según un ley potencial del tipo: $Q = a \cdot H^b$. En este caso, el exponente b suele tomar valores comprendidos entre 1.5 para las presas terminadas entre 1925-1985 y 2.5 en las presas concluidas entre 1985 hasta la actualidad. En principio puede causar extrañeza que este exponente no sea 0.5, pero lo que ocurre es que implícitamente se está teniendo en cuenta que a mayor altura, mucho mayor volumen de embalse y por tanto mayor capacidad necesaria de los desagües.

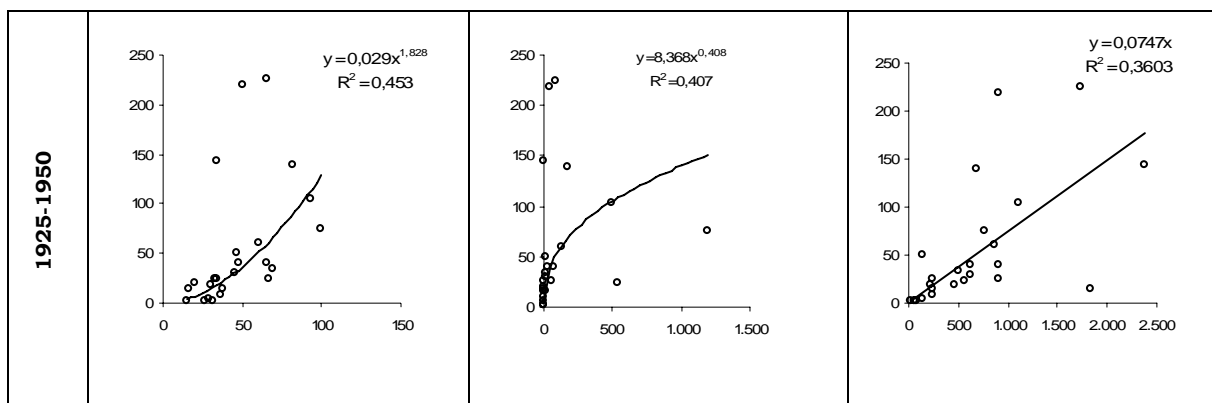
La relación entre la capacidad de desagüe y el volumen del embalse presenta una tendencia potencial de exponente menor que la unidad, en torno a 0.5. El grado de ajuste es más elevado para los grupos de presas más modernas, independientemente del número de presas de cada grupo. En general, se observa que la dispersión de los datos aumenta a medida que la variable *volumen* aumenta, por lo que las tendencias ajustadas serán tanto más aproximadas cuanto menor sea el embalse (hasta 200-300 Hm³).

La relación entre la capacidad de desagüe y el caudal punta de la avenida de proyecto presenta en todos los casos una relación lineal o potencial de exponente cercano a uno. El mejor ajuste ha resultado en los grupos 1985-1995 y 1950-1975. En términos generales se puede observar en todas las relaciones obtenidas entre estas dos variables que la capacidad de desagüe resulta ser aproximadamente un 5.5 % del caudal punta de avenida de proyecto. Esta relación lineal y el hecho de que el grado de ajuste sea mayor para los grupos donde se integran las presas construidas más recientemente indica la tendencia cada vez mayor de los desagües profundos de colaborar con el aliviadero en la evacuación de avenidas.

Tabla 2

Relación estadística entre variables

	CAPACIDAD-ALTURA	CAPACIDAD-VOLUMEN EMBALSE	CAPACIDAD-Q _{AP}
1995-2005	$y = 0,002x^{2,475}$ $R^2 = 0,706$	$y = 7,238x^{0,5437}$ $R^2 = 0,6613$	$y = 0,282x^{0,773}$ $R^2 = 0,572$
1985-1995	$y = 0,0015x^{2,4122}$ $R^2 = 0,6212$	$y = 2,662x^{0,6717}$ $R^2 = 0,6501$	$y = 0,026x^{1,087}$ $R^2 = 0,645$
1975-1985	$y = 0,024x^{1,753}$ $R^2 = 0,580$	$y = 6,136x^{0,449}$ $R^2 = 0,459$	$y = 0,048x + 9,255$ $R^2 = 0,735$
1950-1975	$y = 0,141x^{1,423}$ $R^2 = 0,475$	$y = 10,625x^{0,387}$ $R^2 = 0,428$	$y = 0,563x^{0,655}$ $R^2 = 0,546$



Otras relaciones analizadas han sido por una parte la dependencia entre la capacidad de desagüe y la superficie de la cuenca, resultando una tendencia lineal en algunos casos y potencial de exponente comprendido entre 0.5 y 1 en otros, con grados de ajuste bastante distintos según el caso estudiado (entre 0.72 y 0.3342). Por otra parte se ha analizado asimismo la relación entre la capacidad de desagüe y la aportación media anual resultando diversas tendencias potenciales de exponente menor que uno con grados de ajuste considerablemente bajos.

5.2. ANÁLISIS DE LA INTERDEPENDENCIA CONJUNTA ENTRE VARIABLES

Además de las anteriores relaciones estadísticas en las que se relaciona el caudal de desagüe con las variables independientes por separado, se propone a continuación un análisis conjunto entre las citadas variables independientes y la capacidad del desagüe de fondo, ajustando estas variables a un modelo tipo:

$$Q = a \cdot V^b + c \cdot H^d + e \cdot (C.P.A.P.)^f + g \cdot (Ap)^h + i$$

donde a, c, e, g, i son parámetros de ajuste.

A continuación se muestran los resultados obtenidos:

	CURVA DE AJUSTE
1995-2005	$Q = 9.551 \cdot V^{0.328} + 1.657 \cdot (C.P.A.P.)^{0.568} + 1.494 \cdot (Ap)^{0.336} - 27.602$ $R^2 = 0.704$
1985-1995	$Q = -368.014 \cdot H^{-0.018} + 3.282 \cdot (C.P.A.P.)^{0.504} - 0.082 \cdot (Ap)^{0.851} - 322.242$ $R^2 = 0.356$
1975-1985	$Q = -612.653 \cdot H^{-0.020} + 0.008 \cdot (C.P.A.P.)^{1.227} - 0.115 \cdot (Ap)^{0.907} - 580.048$ $R^2 = 0.824$
1950-1975	$Q = -6628.929 \cdot H^{-0.012} - 9.04 \cdot 10^{-5} \cdot (Ap)^{2.097} + 6380.173$ $R^2 = 0.743$
1925-1950	$Q = 12.745 \cdot H^{0.583} + 2.591 \cdot (C.P.A.P.)^{0.380} - 3.58 \cdot 10^{-6} \cdot (Ap)^{2.519} - 99.38$ $R^2 = 0.743$

6. CONCLUSIONES

De manera sinóptica pueden enunciarse las siguientes conclusiones:

Los desagües profundos son elementos de seguridad en una presa cuyo fin es evacuar caudales al río.

Las funciones principales de los desagües profundos son el control del nivel de embalse y la limpieza de sedimentos, ambas funciones encuadradas dentro de la seguridad estructural e hidrológica de la presa y embalse.

Dentro de la función principal de control de nivel de embalsen se engloban otras funciones como el control de la estabilidad, control de filtraciones y control de avenidas. Éstas constituyen las *funciones de diseño* de los desagües profundos

La capacidad de los desagües profundos debe ser la necesaria para el correcto cumplimiento de cada función de diseño, por lo que éste debe hacerse en función de criterios asociados a cada función.

El dimensionamiento o comprobación de la capacidad de los desagües profundos debe hacerse teniendo en cuenta la limitación de caudal provocado en el cauce de aguas abajo, constituyendo este criterio la cota superior del dimensionamiento.

Es recomendable referenciar el dimensionamiento o comprobación realizada mediante la comparación con presas similares. Para ello pueden ser útiles las relaciones propuestas en este estudio.

7. NOTACIÓN Y UNIDADES

A_p = Aportación anual, Hm^3

$C.P.A.P.$ = Caudal punta A.P., m^3/s

H = Altura de presa, m

Q_e = Caudal de entrada al embalse, m^3/s

Q_m = Caudal medio del río, m^3/s

Q_s = Caudal de desagüe, m^3/s

S = Superficie de la cuenca, Km^2

T = Tiempo, $Ms (\times 10^6 s)$

V = Volumen, Hm^3

V_e = Volumen de entrada, Hm^3

V_s = Volumen de salida, Hm^3

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS (1967) *Instrucción para el Proyecto, Construcción y Explotación de Grandes Presas*. Marzo 1967.

[2] FERNANDO DELGADO RAMOS Seguridad de Presas y Embalses. Normativa y Recomendaciones. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

[3] MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS, TRANSPORTE Y MEDIO AMBIENTE (1996) *Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses*. Marzo 1996.

[4] COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS *Guías Técnicas de Seguridad de Presas*

[5] CABRERA, C (1999) *La ocupación de riberas y márgenes aguas abajo de presas*. Jornadas SEPTEM, Explotación y Emergencia en Presas. Sociedad Española de Presas y Embalses. Senda Editorial. Enero 1999. D.L.M-22224-1999

[6] MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE. (2006) *Inventario Informático de Presas Españolas*.