

COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS

ÁBACOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LOS TALUDES DE LAS SECCIONES TIPO DEFINIDAS EN EL “MANUAL DE DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, EXPLOTACIÓN Y MANTENIMIENTO DE BALSAS”

José Estaire¹, María Santana¹, Áurea Perucho¹ y José M. Martínez¹

RESUMEN: El Laboratorio de Geotecnia del CEDEX, en colaboración con el Comité Técnico de Balsas (CNEGP), está redactando los capítulos con contenido geotécnico del “Manual de diseño, construcción, explotación y mantenimiento de balsas” para la Dirección General del Agua del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. En dicho manual se proponen una serie de secciones tipo de balsas. En este trabajo se presentan unos ábacos para el dimensionamiento de las inclinaciones de los taludes de dichas secciones tipo. Los ábacos son el resultado de los cálculos de estabilidad realizados para cinco alturas diferentes, cuatro tipos de materiales y distintos coeficientes sísmicos característicos de distintas zonas de España. Se han analizado cinco situaciones de cálculo: fin de construcción, embalse lleno, rotura de lámina, presencia de sismo y desembalse rápido. Además se indican los valores de los factores de seguridad que se han tenido en cuenta en la elección de los taludes de las secciones tipo y los parámetros geotécnicos de los materiales que se han considerado en los cálculos.

¹ Laboratorio de Geotecnia, CEDEX, Mº de Fomento.Madrid

1. INTRODUCCIÓN - OBJETIVOS

El Laboratorio de Geotecnia del CEDEX, en colaboración con el Comité Técnico de Balsas (CNEGP), está redactando los capítulos con contenido geotécnico del “Manual de diseño, construcción, explotación y mantenimiento de balsas” para la Dirección General del Agua del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

De acuerdo con el borrador de dicho Manual *“se entiende por balsa toda estructura artificial destinada al almacenamiento de agua, situada fuera de un cauce y del dominio público hidráulico y delimitada total o parcialmente por un dique de cierre”*. Estas balsas se diferencian de las presas *“principalmente en que no están proyectadas para regular aguas de escorrentía y, por lo tanto, no cierran propiamente una cuenca de aportación. Suelen llenarse lateralmente desde un canal o desde un cauce público o privado o mediante bombeo”*. El Manual, una vez que entre en vigor, será de aplicación a las balsas que cumplan, entre otros requisitos, *“que el dique de cierre tenga una altura inferior a 10 m, o que teniendo una altura de entre 10 y 15 m, tenga una capacidad de almacenamiento inferior a 1 Hm³”*.

El método de trabajo preconizado por el Manual comienza con la ejecución de los reconocimientos geotécnicos que se considera necesario abordar en la etapa de proyecto. Posteriormente, la interpretación de los resultados de la campaña geotécnica permite caracterizar geotécnicamente los materiales existentes en el entorno de la balsa, con los que generalmente se ejecuta el dique de cierre. Por último, la geometría del dique de cierre se determina a partir de una serie de secciones tipo recogidas en el manual, con la ayuda de los resultados procedentes de cálculos de estabilidad basados en los métodos de equilibrio límite.

Sin embargo, con objeto de simplificar el diseño del dique de cierre, se han elaborado una serie de ábacos, recogidos en este texto, que permiten dimensionar los taludes del mismo en función de su altura, del tipo de material empleado en su ejecución y de las condiciones sísmicas del emplazamiento. Estos ábacos permiten dimensionar los taludes del dique de la balsa sin que sea necesaria la realización de ningún cálculo adicional justificativo, ni la ejecución de más ensayos que los precisos para la identificación del tipo de suelo.

Para la elaboración de los ábacos se han realizado los cálculos de estabilidad necesarios, con los diferentes parámetros geotécnicos y las distintas situaciones de cálculo que se indican más adelante, así como los correspondientes factores de seguridad al deslizamiento que se deben exigir para cada situación de cálculo.

2. PARÁMETROS GEOTÉCNICOS

Los diferentes materiales que se han analizado en este estudio se han agrupado de acuerdo a la Clasificación Unificada de Suelos (USCS), que está basada únicamente en los datos de granulometría y plasticidad de dichos materiales. Los parámetros geotécnicos asignados a cada una de las clases de materiales analizados, recogidos en la Tabla I, se han basado fundamentalmente en los valores recomendados en el manual NAVFAC 07 (1971).

Tabla I: Valores de los parámetros geotécnicos de cálculo

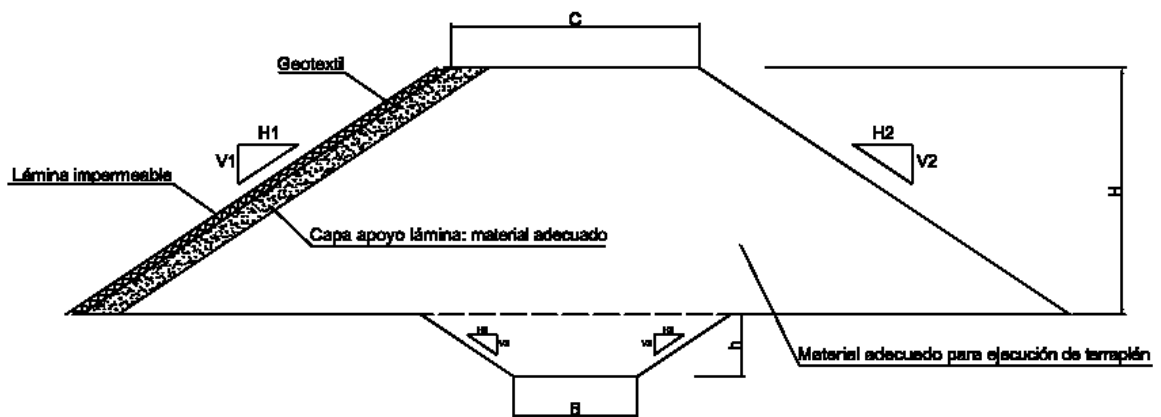
Material	No saturado		Saturado	
	C (kPa)	ϕ (°)	C (kPa)	ϕ (°)
CH-MH	50	25	15	25
CL-ML	75	30	15	30
SC-SM y GC-GM	50	32,5	15	32,5
SW - GW	15	40	10	40

Nota: Materiales clasificados de acuerdo a la USCS

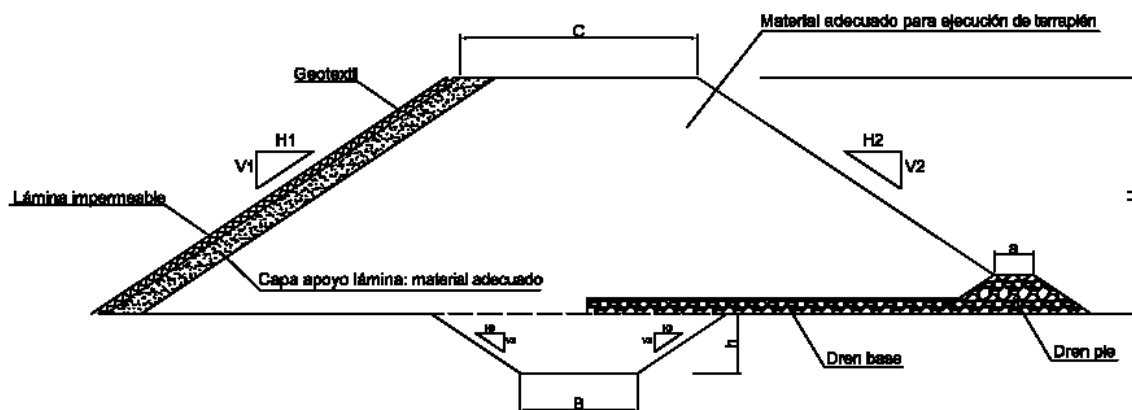
En el caso del material denominado SW y GW (correspondiente a arenas o gravas bien graduadas o a mezclas de grava y arena, con porcentaje de finos inferior al 5%) se ha considerado conveniente asignar un valor de cohesión aparente para tener en cuenta el carácter no lineal de su comportamiento resistente que hace que tenga valores diferentes del ángulo de rozamiento en función de la presión vertical actuante.

3. GEOMETRÍAS ANALIZADAS

En el Manual se han recogido una serie de secciones tipo correspondientes a diques con y sin elemento de impermeabilización exterior. En la Figura 1 se muestran las secciones tipo de los diques con elemento de impermeabilización exterior.



a.- Sección tipo de dique de cierre homogéneo con elemento de impermeabilización exterior



b.- Sección tipo de dique de cierre homogéneo con elemento de impermeabilización exterior y con drenes de base y de pie

Figura 1: Algunas de las secciones tipo recogidas en el Manual

Estas secciones tipo corresponden a un dique de cierre constituido mayoritariamente por un único material. El terreno de cimentación del dique se ha considerado constituido por el mismo material que el utilizado para ejecutar el dique. Las alturas consideradas en los cálculos se han recogido en la tabla siguiente, junto con las correspondientes dimensiones de la anchura de coronación y el resguardo mínimo de la lámina de agua en la situación de embalse a su máxima cota.

Tabla II: Dimensiones de la sección tipo consideradas en los cálculos

Altura (m)	5	7,5	10	12,5	15
Coronación (m)	4	4,5	5	5,5	6
Resguardo (m)	0,5	0,75	1,0	1,0	1,0

La anchura de coronación se ha determinado, para cada altura (h) mediante la siguiente expresión: $h/5+3$ (m).

Las inclinaciones de los taludes interior y exterior que se han analizado han sido las siguientes: 1,5H:1V; 2H:1V; 2,5H:1V; 3H:1V; 3,5H:1V; 4H:1V. En todos los casos se ha supuesto que la inclinación de los taludes interior y exterior del dique de cierre es la misma.

4. SITUACIONES DE CÁLCULO

Para cada una de las geometrías indicadas anteriormente se han considerado las siguientes cinco situaciones de cálculo, tal como se muestran en los esquemas de la Figura 2.

a.- Final de construcción

Esta situación se analizará en los casos en los que el dique de cierre esté constituido mayoritariamente por materiales arcillosos de los tipos CH-

MH y CL-ML, definidos anteriormente, en los que se puede suponer que no se ha producido disipación de la presión intersticial durante el proceso de construcción. Para la consideración de la presión intersticial se va a suponer la existencia de una línea piezométrica en forma parabólica que pase por los pies de ambos taludes y que, en el eje vertical del dique, llegue hasta media altura del mismo.

b.- Situación normal de embalse lleno

Esta hipótesis supone que el agua de la balsa está a su cota máxima, correspondiente con la altura del resguardo. En el dique de cierre no existe línea piezométrica puesto que se considera que el elemento de impermeabilización impide la saturación del material del dique.

c.- Rotura del elemento de impermeabilización exterior

Esta situación supone considerar que el agua de la balsa está a su cota máxima, correspondiente con la altura del resguardo, y que la rotura del elemento de impermeabilización exterior produce la saturación del dique de cierre. Esta saturación se ha modelizado mediante una línea piezométrica que arranca en el talud interior a la altura del resguardo, pasa a 2/3 de altura en la vertical del extremo exterior de la coronación y finaliza en el pie exterior del dique.

d.- Sismo en situación de embalse lleno

En aquellas zonas cuya aceleración básica (a_b) sea igual o superior a 0,04 g, siendo g la aceleración de la gravedad, se debe tener en cuenta el efecto del terremoto en la estabilidad del dique de cierre. La aceleración básica de todos los municipios de España se recoge en el Anejo 1 de la Norma de Construcción Sismorresistente (NCSE-02). La incorporación del efecto del terremoto en los cálculos se ha realizado mediante el método seudoestático, es decir, incorporando una fuerza horizontal igual al peso de la masa deslizante multiplicado por un coeficiente sísmico (α) que se obtiene como indica la NCSE-02. A grandes rasgos se puede justificar que este valor se corresponde con los efectos de un terremoto extremo.

En esta hipótesis se ha considerado que el agua de la balsa está a su cota máxima y no existe línea piezométrica en el dique de cierre. Los valores de los coeficientes sísmicos horizontales que se han utilizado han sido: 0,04g; 0,08g y 0,12g. No se ha considerado aceleración vertical concomitante.

e.- Desembalse rápido

Esta hipótesis se corresponde con la situación en la que se produce un vaciado de la balsa, debido a la rotura de la lámina, a una velocidad mayor que la necesaria para que se produzca el drenaje del cuerpo del dique, lo que implica la presencia de presiones intersticiales en el interior del cuerpo del dique. A efectos del cálculo, y del lado de la seguridad, se ha considerado que la línea piezométrica resultante se encuentra situada en la superficie del talud interior de la balsa, tal como se preconiza en Morgenstern (1963).

En las figuras siguientes se muestran esquemáticamente las situaciones de cálculo consideradas.

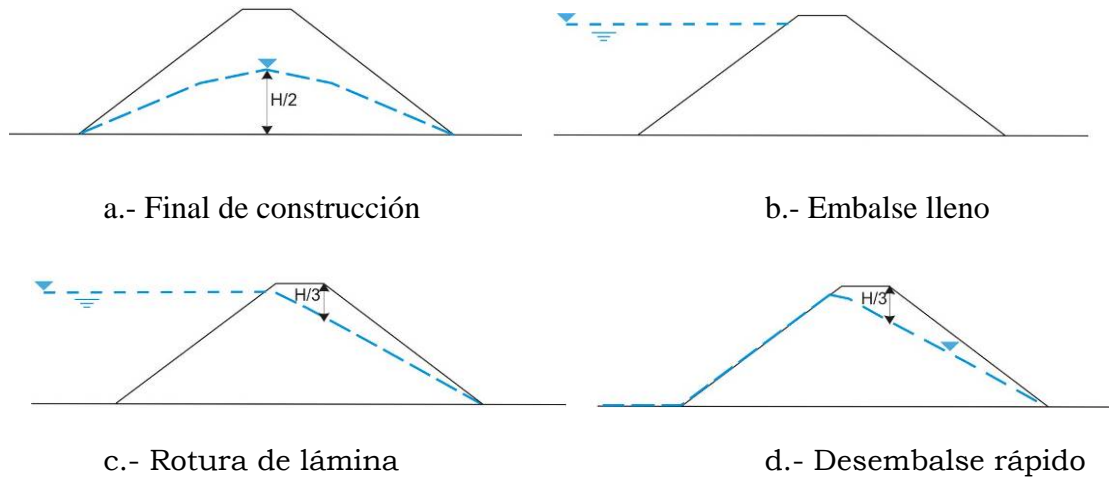


Figura 2: Esquema de las situaciones de cálculo

Teniendo en cuenta la reducida probabilidad de ocurrencia de sismo en las situaciones de final de construcción y desembalse rápido, tan sólo se ha considerado, para no penalizar el diseño, la situación de sismo con embalse lleno.

5. FACTORES DE SEGURIDAD

En la tabla siguiente se han recogido los factores de seguridad al deslizamiento correspondientes a las diferentes situaciones de cálculo descritas anteriormente que se han considerado en el borrador de Manual como exigibles en los cálculos de estabilidad.

Tabla III: Valores de los factores de seguridad al deslizamiento

Situación de cálculo	Factores de seguridad
Fin de construcción	1,2 (1,5)
Embalse lleno	1,5 (2,0)
Rotura de lámina	1,3 (1,5)
Sismo a embalse lleno	1,1 (1,3)
Desembalse rápido	1,1 (1,3)

Nota: los valores indicados entre paréntesis son los utilizados en los cálculos realizados en este trabajo, tal como se indica en el Apartado 5 de este texto.

A pesar de los valores de los factores de seguridad recogidos en la tabla anterior, las inclinaciones de los taludes de las secciones tipo, indicadas en los ábacos de dimensionamiento preconizados en este trabajo cumplen unos factores de seguridad más estrictos, los indicados entre paréntesis en la Tabla III,

con objeto de tener en cuenta las incertidumbres asociadas a la relativa falta de información geotécnica de los materiales con los que se pretende ejecutar el dique de cierre y a la puesta en obra de los mismos.

6. RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados obtenidos de los cálculos se han recogido en forma de ábacos, en las Figuras 3, 4 y 5, de los que se obtiene directamente la inclinación de los taludes del dique en función de:

- la potencial actividad sísmica de la zona de implantación de la balsa, medido en términos del coeficiente sísmico,
- la altura del dique de cierre,
- el tipo de material con el que se ejecutará el dique de cierre.

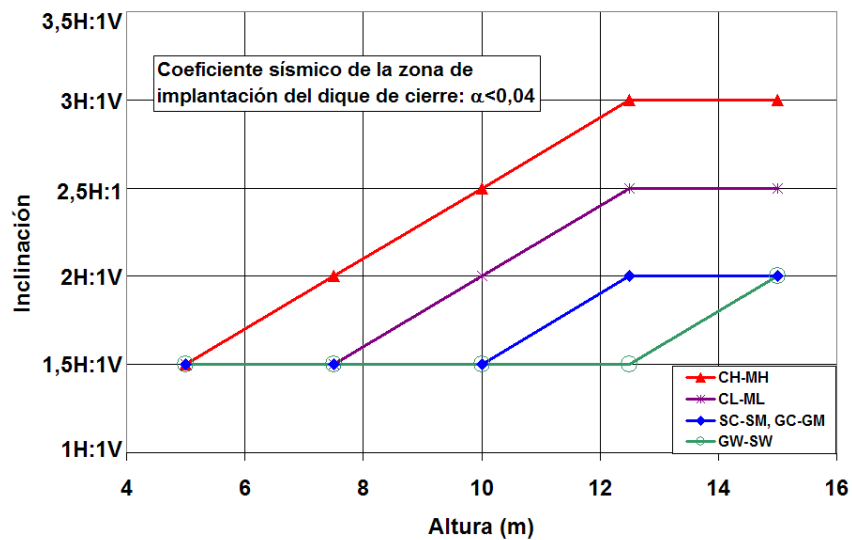


Figura 3: Inclinación de taludes interior y exterior para zonas con coeficiente sísmico $\alpha \leq 0,04$

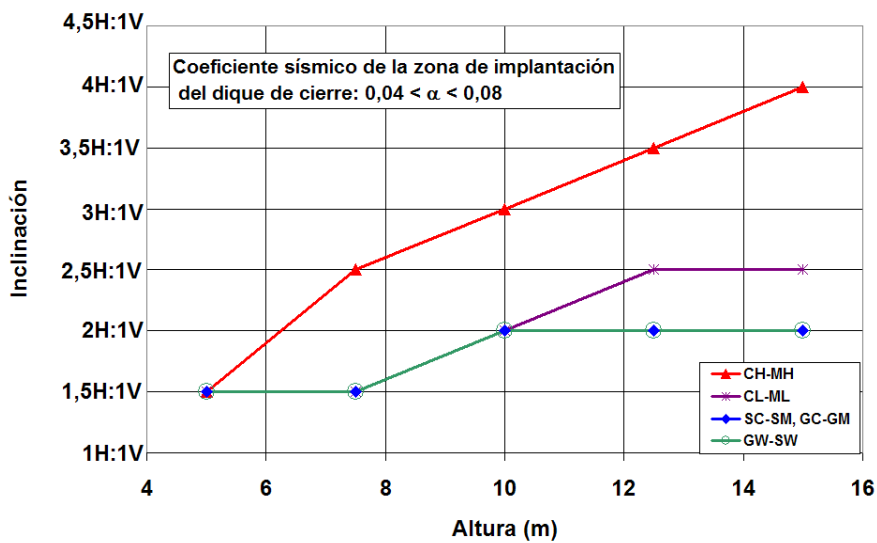


Figura 4: Inclinación de taludes interior y exterior para zonas con coeficiente sísmico α comprendido entre 0,04 y 0,08

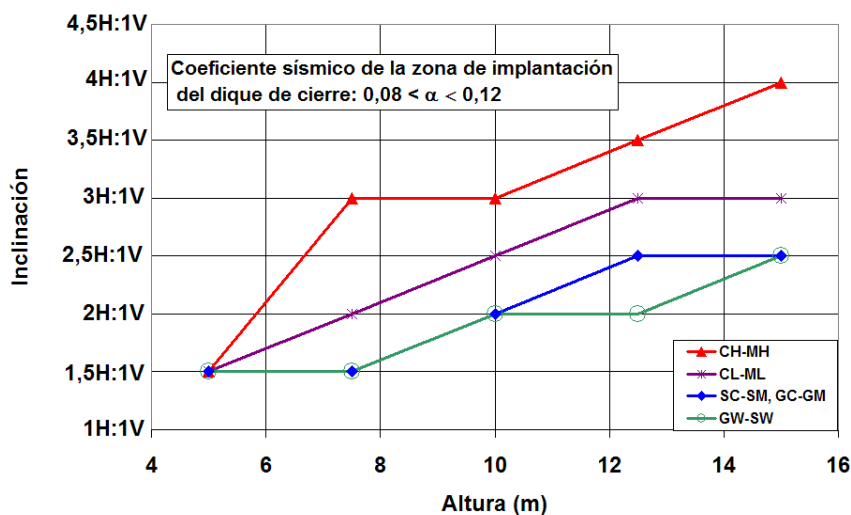


Figura 5: Inclinación de los taludes interior y exterior para zonas con coeficiente sísmico α comprendido entre 0,08 y 0,12

La utilización de estos ábacos permite diseñar los taludes del dique de la balsa sin la realización de ningún cálculo adicional justificativo, previa identificación del terreno en uno de los tipos indicados.

El análisis de los resultados particulares de cada caso indica que, en general, la situación de cálculo más determinante para el dimensionamiento ha sido la correspondiente a la rotura de la lámina en la situación de embalse lleno y el desembalse rápido. Este hecho puede verse en la Figura 6 en la que se recogen los factores de seguridad obtenidos en las distintas situaciones de cálculo para diferentes alturas de dique y tipo de material de ejecución, en los casos en los que no hay presencia de sismo.

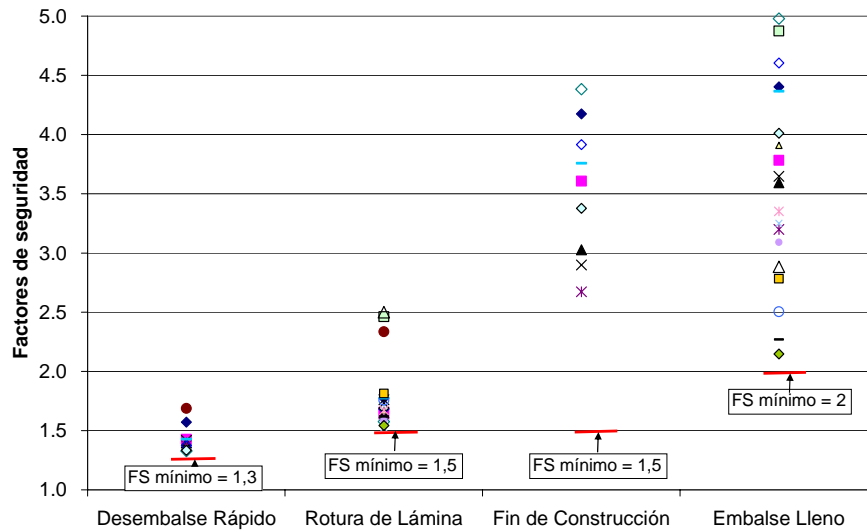


Figura 6: Factores de seguridad para distintas situaciones de cálculo en los casos recogidos en los ábacos

Por último, los resultados recogidos en los ábacos se han comparado con los valores indicados en otros textos relacionados con este mismo tema como son, por ejemplo, el libro “Pequeños embalses de uso agrícola” (2003) y el manual “Farm Dams for the Sugar Industry” (2001). En las tablas siguientes se recogen los valores de inclinación indicados en dichos textos.

Tabla IV: Inclinación de taludes recogidos en “Pequeños embalses de uso agrícola” (2003)

Tipo de suelo	c (kPa)	ϕ (°)	Talud aguas arriba	Talud aguas abajo
Muy Bueno	>50	>30	3H:1V	2H:1V
Bueno	>10	>25	3H:1V	2,5H:1V
	>50	<25		
Regular	<10	>25	3,5H:1V	3H:1V
	10 - 50	<25		
Malo	≤10	<25	-	-

Tabla V: Inclinación de taludes recogidos en “Farm Dams for the Sugar Industry” (2001)

Con desembalse rápido	Tipo de suelo	Talud interior	Talud exterior
NO	CL-ML	3H:1V	2,5H:1V
	CH-MH	3,5H:1V	2,5H:1V
	GC-GM-SC-SM	2,5H:1V	2H:1V
	GW-GP-SW-SP	2H:1V	2H:1V
SI	CL-ML	3,5H:1V	2,5H:1V
	CH-MH	4H:1V	2,5H:1V
	GC-GM-SC-SM	3H:1V	2H:1V
	GW-GP-SW-SP	2,5H:1V	2,5H:1V

Como puede comprobarse los taludes preconizados en ambos textos son algo más tendidos que los recogidos en los ábacos.

7. RESUMEN Y CONCLUSIONES

En este texto se presentan los resultados de los cálculos de estabilidad realizados para dimensionar las secciones tipo recogidas en el borrador del “Manual de diseño, construcción, explotación y mantenimiento de balsas”, actualmente en proceso de elaboración. Para ello se indican las características geométricas de las secciones tipo consideradas, los parámetros geotécnicos de los materiales de ejecución, las situaciones de cálculo supuestas y los factores de seguridad correspondientes a dichas situaciones de cálculo.

Los resultados se presentan en forma de ábacos de los que se obtiene directamente la inclinación de los taludes del dique de cierre en función de la potencial actividad sísmica de la zona de implantación de la balsa, medida en términos del coeficiente sísmico, la altura del dique y el tipo de material con el que se ejecutará dicho dique, que se supone igual al del cimiento. Estos gráficos permitirán diseñar los taludes del dique de la balsa sin la realización de ningún cálculo adicional justificativo, previa identificación del terreno en uno de los tipos indicados.

REFERENCIAS

Farm Dams for the Sugar Industry (2001). FSA Irrigation.

Morgenstern, N. (1963). Stability charts for Herat slopes during rapid drawdown. *Geotechnique* 1963, 13: pp 121-131.

Pequeños embalses de uso agrícola (2003). Rafael Dal-Ré Tenreiro. Ediciones Mundi-Prensa.