

MANUAL DE BALSAS

CAPÍTULO 7: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD



Áurea Perucho Martínez
José Manuel Martínez Santamaría
José Estaire Gepp
Laboratorio de Geotecnia del (CEDEX)

INDICE DEL MANUAL

1. OBJETIVOS Y ALCANCE
2. NORMATIVA DE REFERENCIA
3. ESTUDIOS PREVIOS DEL TERRENO Y DE LOS MATERIALES
4. ESTUDIOS PREVIOS DE CARÁCTER HIDRÁULICO
5. CRITERIOS GENERALES DE DISEÑO
6. TIPOLOGÍA DEL DIQUE DE CIERRE
7. **ANÁLISIS DE ESTABILIDAD**
8. SISTEMAS DE IMPERMEABILIZACIÓN
9. RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS GENERALES
10. SISTEMAS DE IMPERMEABILIZACIÓN
11. CONTROL DE LA SEGURIDAD DURANTE LA EXPLOTACIÓN
12. CRITERIOS GENERALES DE MANTENIMIENTO. PATOLOGÍAS
13. BIBLIOGRAFÍA

INDICE DEL CAPÍTULO

7.1. Introducción

7.2. Métodos de cálculo: métodos de equilibrio límite

7.3. Criterios generales para estudiar la estabilidad global de los taludes

7.3.1. Estabilidad estática

7.3.2. Estabilidad dinámica

7.4. Coeficientes de seguridad

7.5. Ábacos de dimensionamiento

1. INTRODUCCIÓN

- La estabilidad de los taludes del dique de cierre debe quedar asegurada, con un coeficiente de seguridad mínimo:
 - En todas las situaciones posibles
 - Durante toda la vida útil

2. MÉTODOS DE CÁLCULO: MÉTODOS DE EQUILIBRIO LÍMITE

“El **análisis de la estabilidad global** del dique debe hacerse empleando los métodos habituales de cálculo de estabilidad de taludes en suelos, basados en la **teoría de equilibrio límite**”...
“Entre ellos se puede citar los métodos de Morgenstern y Price, Spencer y Bishop”.

“Existen actualmente una gran variedad de **programas de ordenador** que se pueden emplear para realizar los cálculos de estabilidad de taludes, que aplican estos métodos y obtienen de forma rápida la resolución de las ecuaciones”.

“La descripción de estos métodos queda **fuera del alcance de este Manual**”

3. CRITERIOS GENERALES PARA ESTUDIAR LA ESTABILIDAD GLOBAL DE LOS TALUDES

Se deben contemplar las siguientes situaciones:

- **A. Estabilidad estática**

1. Final de construcción
2. Embalse lleno
3. Rotura del elemento de impermeabilización externo
4. Desembalse rápido

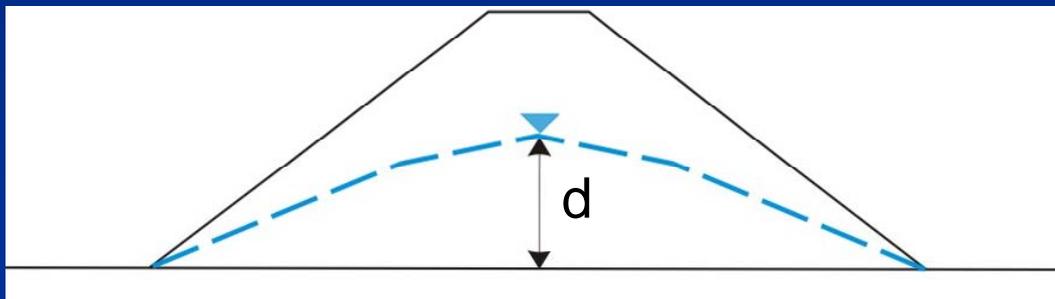
- **B. Estabilidad dinámica**

5. Sismo en situación de embalse lleno

3. CRITERIOS GENERALES PARA ESTUDIAR LA ESTABILIDAD GLOBAL DE LOS TALUDES

• A. Estabilidad estática

1. Final de construcción: “Esta situación se analizará en los casos en los que el dique de cierre esté constituido *mayoritariamente por materiales arcillosos* en los que se puede suponer que *no se ha producido disipación de la presión intersticial* durante el proceso de construcción. A efectos de cálculo, la presión intersticial se puede modelizar tal y como se indica en la figura”



Si $LL < 50$ (terreno CL-ML)

$$d = H/2$$

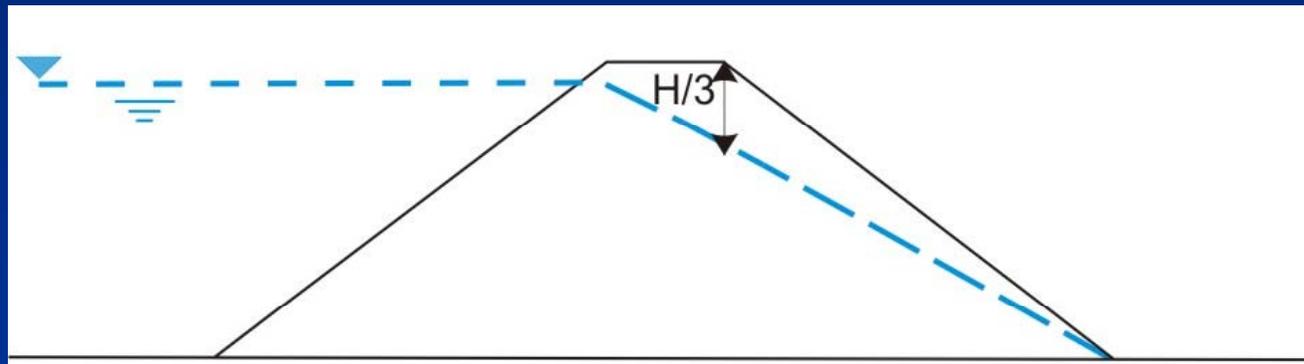
Si $LL > 50$ (terreno CH-MH)

$$d = 2H/3$$

3. CRITERIOS GENERALES PARA ESTUDIAR LA ESTABILIDAD GLOBAL DE LOS TALUDES

- **A. Estabilidad estática**

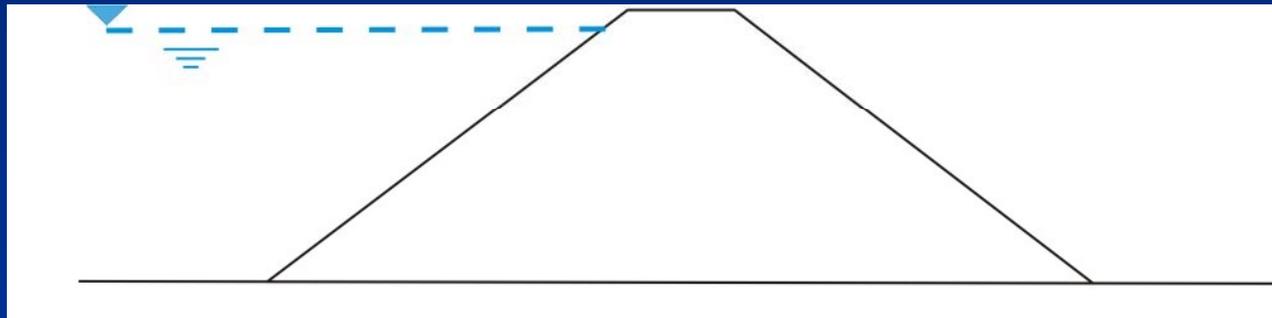
2. Embalse lleno: “Esta hipótesis supone que la carga de agua se corresponde con la *cota de máximo embalse posible*. Para el caso de balsas *sin elemento de impermeabilización externo*, se tendrá en cuenta la correspondiente *línea de saturación*, como se indica en la figura”...



3. CRITERIOS GENERALES PARA ESTUDIAR LA ESTABILIDAD GLOBAL DE LOS TALUDES

- **A. Estabilidad estática**

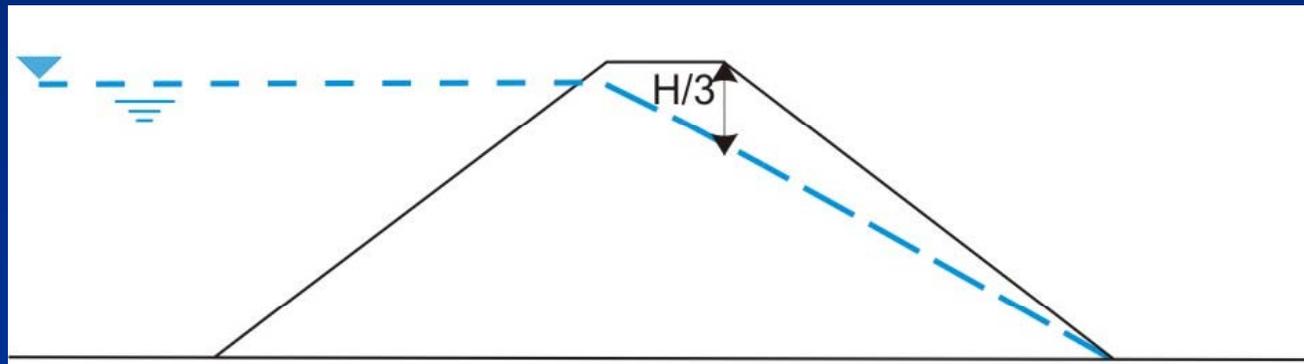
2. Embalse lleno: ...“Para el caso de balsas *con elemento de impermeabilización externa* se supondrá que en el dique de cierre *no hay línea piezométrica*, como se indica en la figura”.



3. CRITERIOS GENERALES PARA ESTUDIAR LA ESTABILIDAD GLOBAL DE LOS TALUDES

- **A. Estabilidad estática**

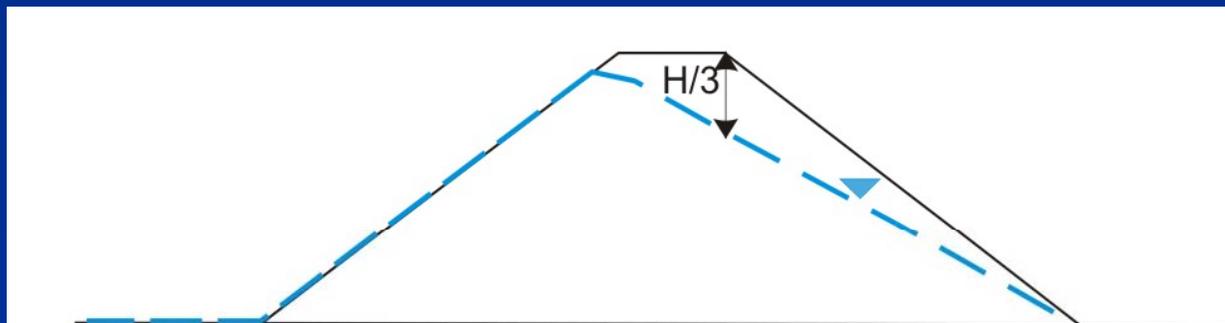
3. Rotura del elemento de impermeabilización externo: “Esta hipótesis supone que la carga de agua se corresponde con la cota de *máximo embalse posible* y aparece una *línea de saturación* en el cuerpo del dique, como se indica en la figura”.



3. CRITERIOS GENERALES PARA ESTUDIAR LA ESTABILIDAD GLOBAL DE LOS TALUDES

• A. Estabilidad estática

4. Desembalse rápido: “Esta hipótesis se corresponde con la situación en la que se produce un *vaciado de la balsa a una velocidad mayor que la necesaria para que se produzca el drenaje del cuerpo del dique*, lo que implica la presencia de *sobrepresiones intersticiales* en el interior del cuerpo del dique. A efectos del cálculo, y del lado de la seguridad, aún admitiendo el descenso de la línea de saturación, se puede considerar que ésta no se modifica y, por lo tanto, que la *línea piezométrica* coincide con la correspondiente a la *situación de embalse lleno* en el interior del dique y discurre por el exterior del talud interno del dique, como se indica en la figura”.



3. CRITERIOS GENERALES PARA ESTUDIAR LA ESTABILIDAD GLOBAL DE LOS TALUDES

- **B. Estabilidad dinámica**

“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 incorporación del efecto del terremoto en los cálculos se podrá hacer por el *método pseudoestático*”...

...“La única limitación a la utilización del método pseudoestático es que no haya en el cimiento ni se coloquen en el cuerpo del dique *materiales licuefactibles*, como es el caso de arenas limpias, flojas y saturadas”...

La probabilidad de ocurrencia de sismo en las situaciones de final de construcción y desembalse rápido es reducida, por ello no se consideran.

3. CRITERIOS GENERALES PARA ESTUDIAR LA ESTABILIDAD GLOBAL DE LOS TALUDES

- **B. Estabilidad dinámica**

5. 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, mediante el **método pseudoestático**”.

Otras indicaciones del Manual:

Se deben **eliminar** los **materiales arenosos** del **cimiento**, susceptibles de **saturarse** en algún momento de la vida de la obra.

Otra opción es su **densificación** mediante técnicas de **vibración**, lo que requiere un **estudio específico**.

En el caso de que se vayan a utilizar **materiales arenosos** en el **cuerpo del dique**, deberán ser **compactados** a densidades próximas a la máxima.

Si el material no está saturado no es susceptible de licuación.

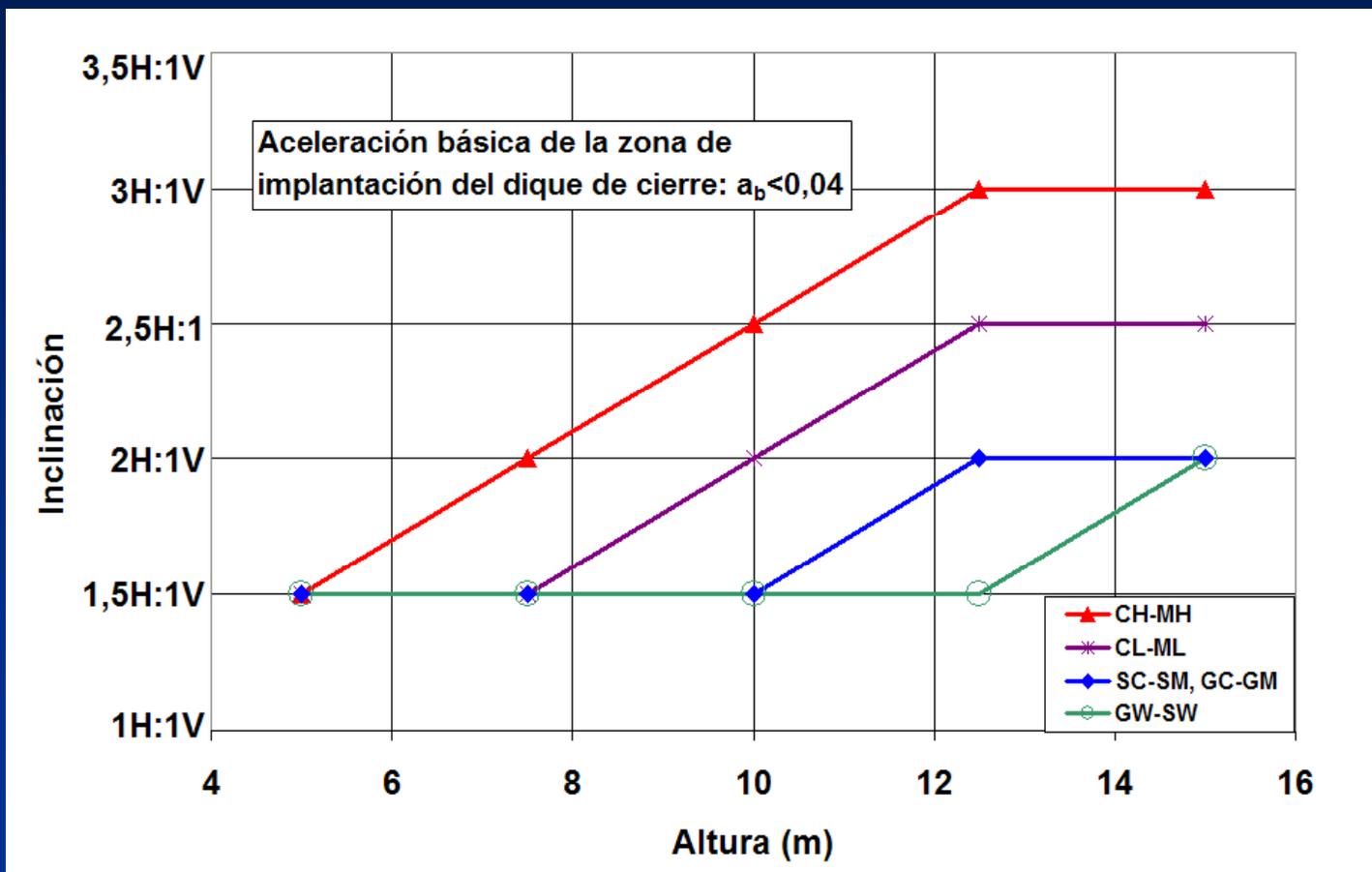
4. COEFICIENTES DE SEGURIDAD (F. S.)

Valores mínimos a adoptar

Situación de diseño	F. S.
Final de construcción	1,3
Embalse lleno	1,5
Rotura de lámina	1,3
Sismo a embalse lleno	1,3
Desembalse rápido	1,1

5. ÁBACOS DE DIMENSIONAMIENTO

Válidos para secciones de dique homogéneas



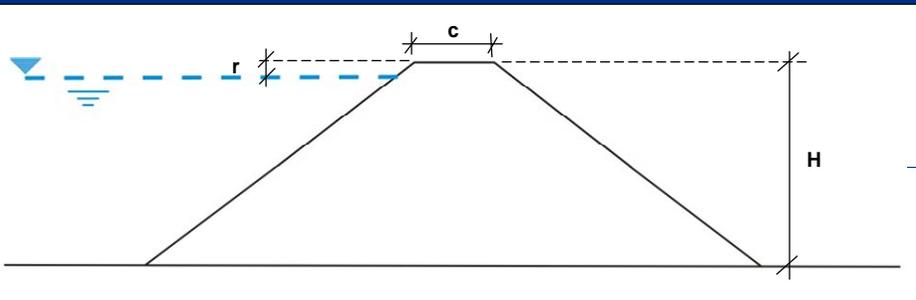
5. ÁBACOS DE DIMENSIONAMIENTO

PARÁMETROS GEOTÉCNICOS (basados en la NAVFAC, 1971)

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

5. ÁBACOS DE DIMENSIONAMIENTO

- Los **ábacos** se han definido realizando **cálculos de estabilidad por equilibrio límite**, con una sección de cálculo que cumple las siguientes condiciones:
 - es homogénea
 - los taludes exterior e interior son iguales
 - el cimiento se supone del mismo material que el dique
 - las dimensiones de la sección considerada en los cálculos son las que se recogen en la tabla:



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

5. ÁBACOS DE DIMENSIONAMIENTO

Factores de seguridad reales

- Las inclinaciones de los taludes de los ábacos cumplen unos coeficientes de seguridad mayores a los estrictamente recomendados en el Manual

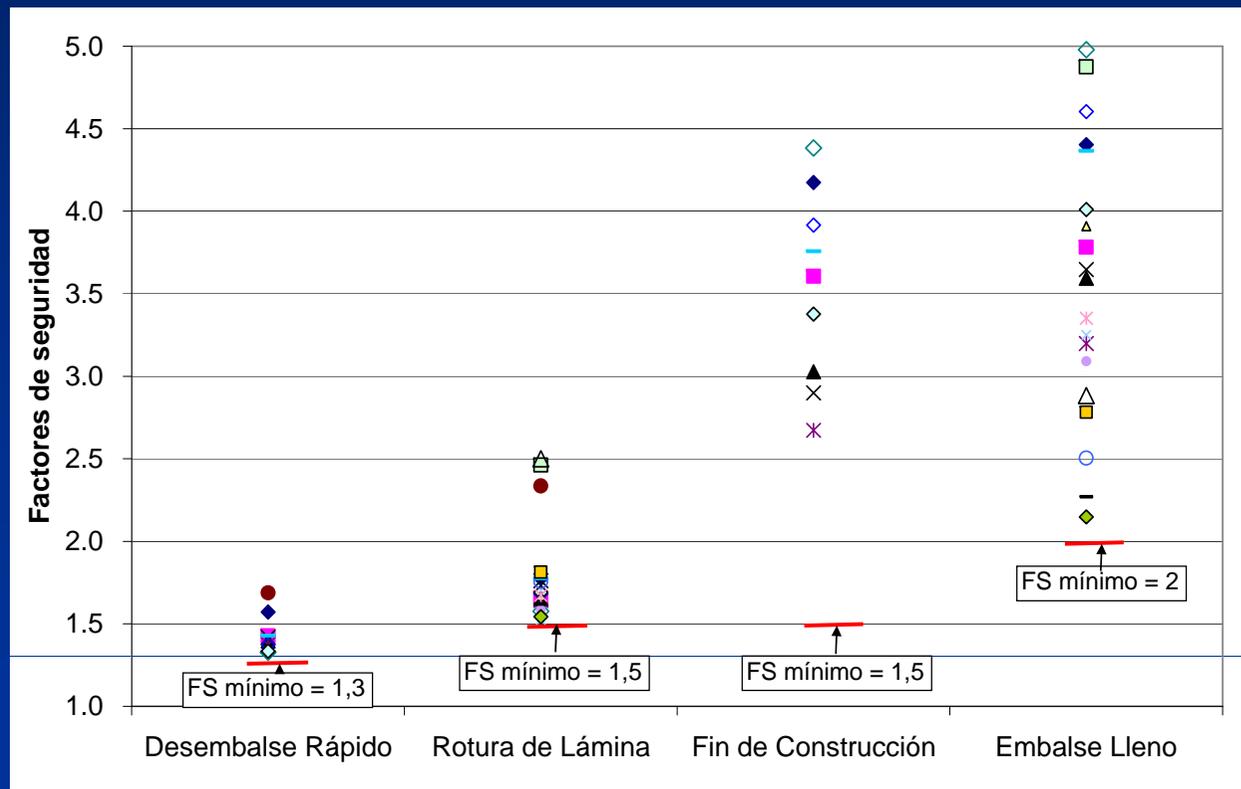
Situación de diseño	F.S. Manual	F. S. Real
Final de construcción	1,3	1,5
Embalse lleno	1,5	2,0
Rotura de lámina	1,3	1,5
Sismo a embalse lleno	1,3	1,3
Desembalse rápido	1,1	1,3

5. ÁBACOS DE DIMENSIONAMIENTO

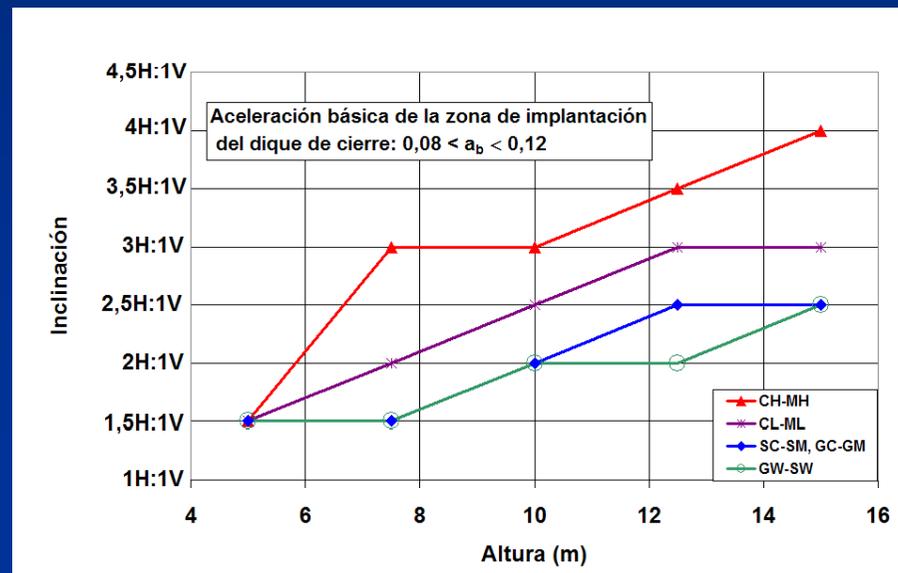
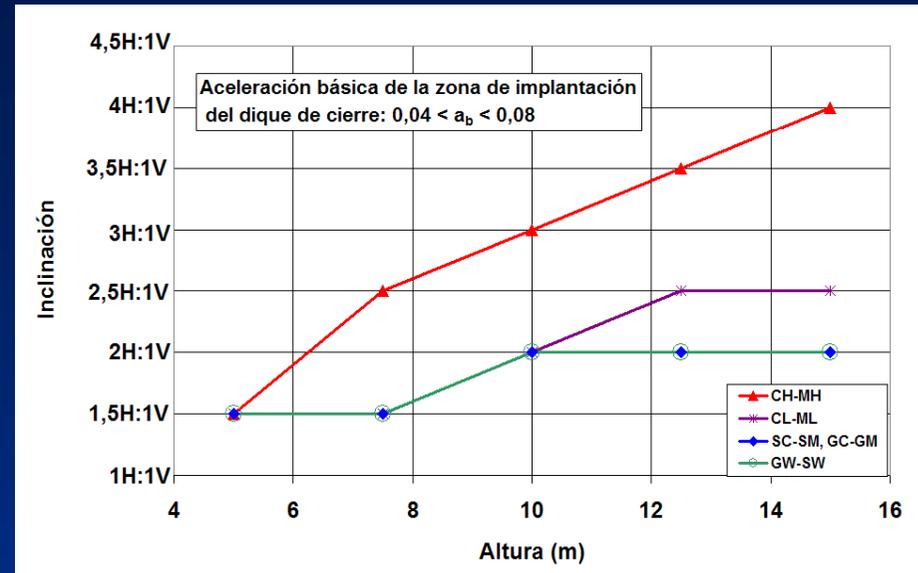
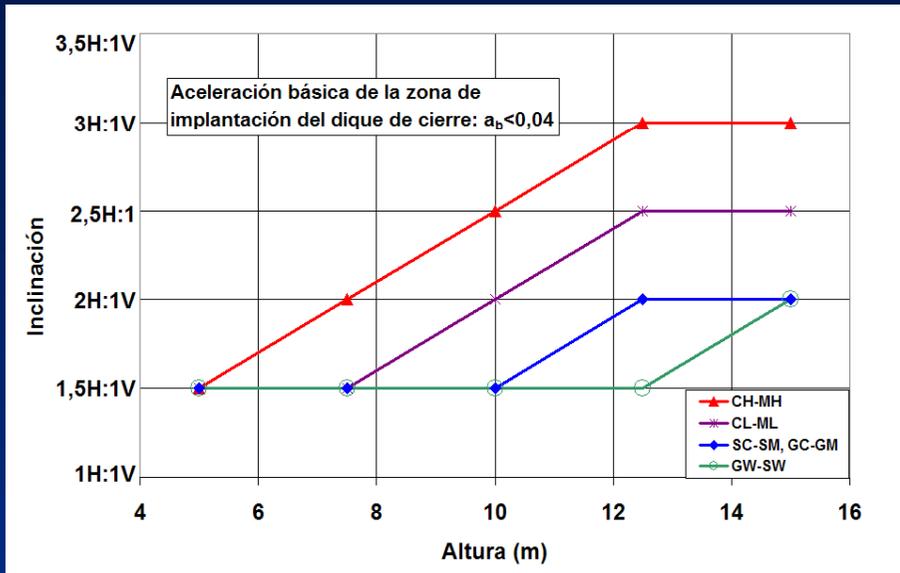
Factores de seguridad reales

Las situaciones de cálculo más determinantes para el dimensionamiento han sido las correspondientes a:

- la rotura de lámina en la situación de embalse lleno y
- el desembalse rápido



5. ÁBACOS DE DIMENSIONAMIENTO



5. ÁBACOS DE DIMENSIONAMIENTO

Comparación

Valores recogidos en otros textos:

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	-	-

Inclinación de taludes recogidos en **“Pequeños embalses de uso agrícola” (2003)**

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

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

Los taludes preconizados en ambos textos son algo más tendidos que los recogidos en los ábacos del Manual

RESUMEN del contenido del Capítulo 7

- Se dan unas **recomendaciones generales** de cálculo de estabilidad global.
- Se definen los **casos a contemplar**.
- Se definen unos **coeficientes de seguridad mínimos**.
- Se ofrecen unos **ábacos de dimensionamiento** útiles en gran número de casos que permiten dimensionar los taludes del dique sin realizar cálculos justificativos, de acuerdo con:
 - tipo de terreno
 - altura de dique
 - sismicidad de la zona