

# 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

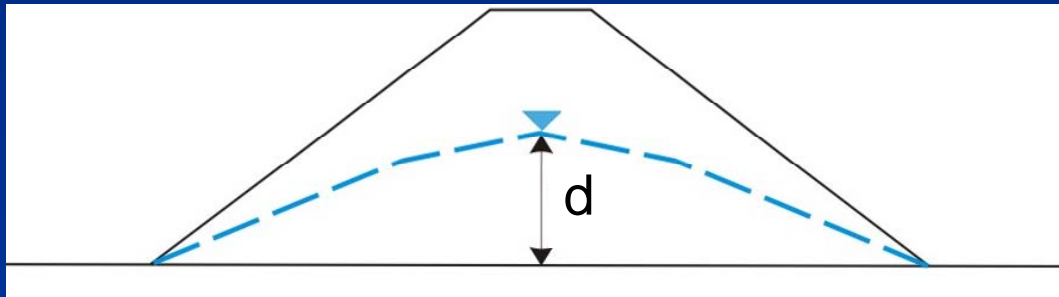
- **B. Estabilidad dinámica**

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)

$$d = H/2$$

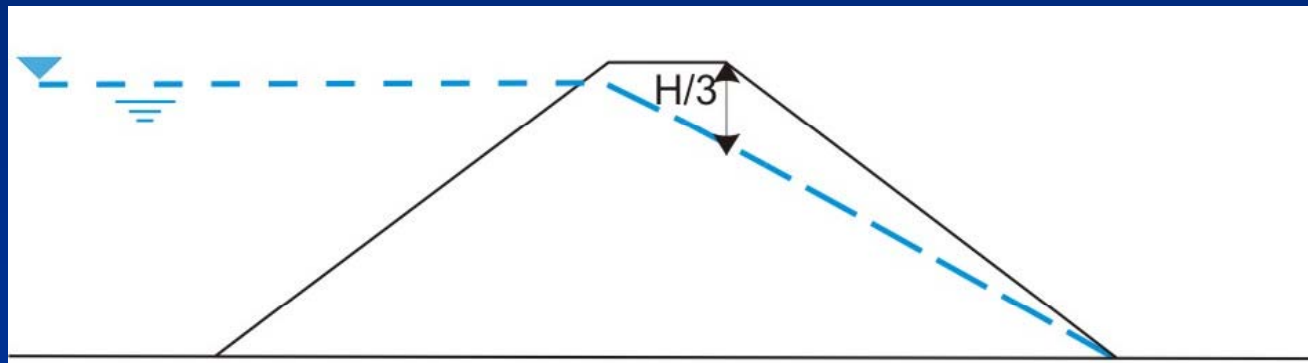
Si  $LL > 50$  (terreno CH-MH)

$$d = 2H/3$$

### 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”...

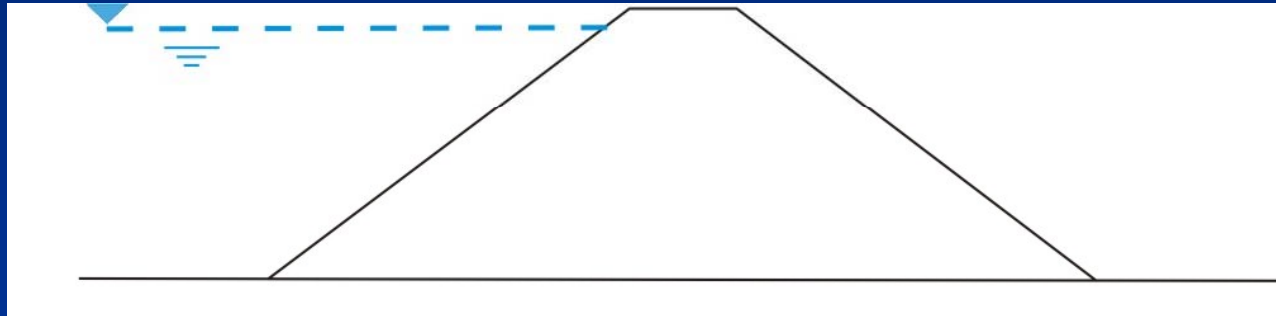




### 3. CRITERIOS GENERALES PARA ESTUDIAR LA ESTABILIDAD GLOBAL DE LOS TALUDES

- **A. Estabilidad estática**

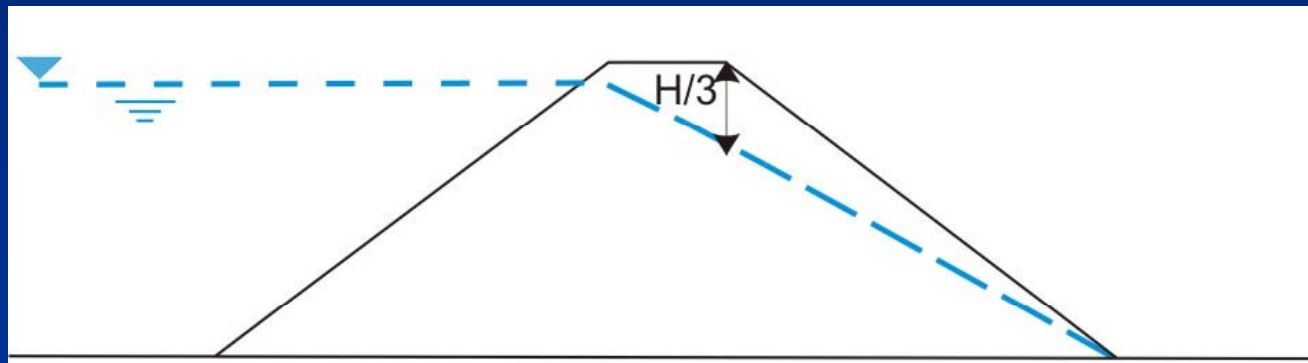
**2. Embalse lleno:** ...“Para el caso de balsas *con elemento de impermeabilización externa* se supondrá que en el dique de cierre *no hay línea piezométrica*, como se indica en la figura”.



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

- **A. Estabilidad estática**

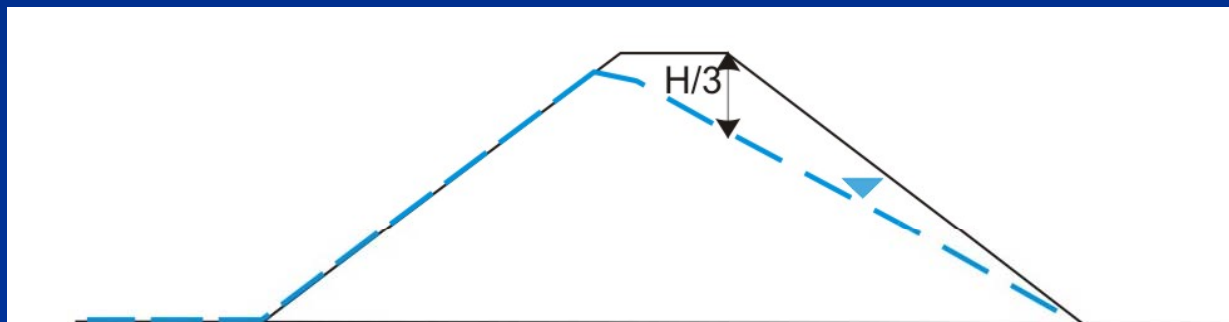
**3. Rotura del elemento de impermeabilización externo:** “Esta hipótesis supone que la carga de agua se corresponde con la cota de *máximo embalse posible* y aparece una *línea de saturación* en el cuerpo del dique, como se indica en la figura”.



### 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.

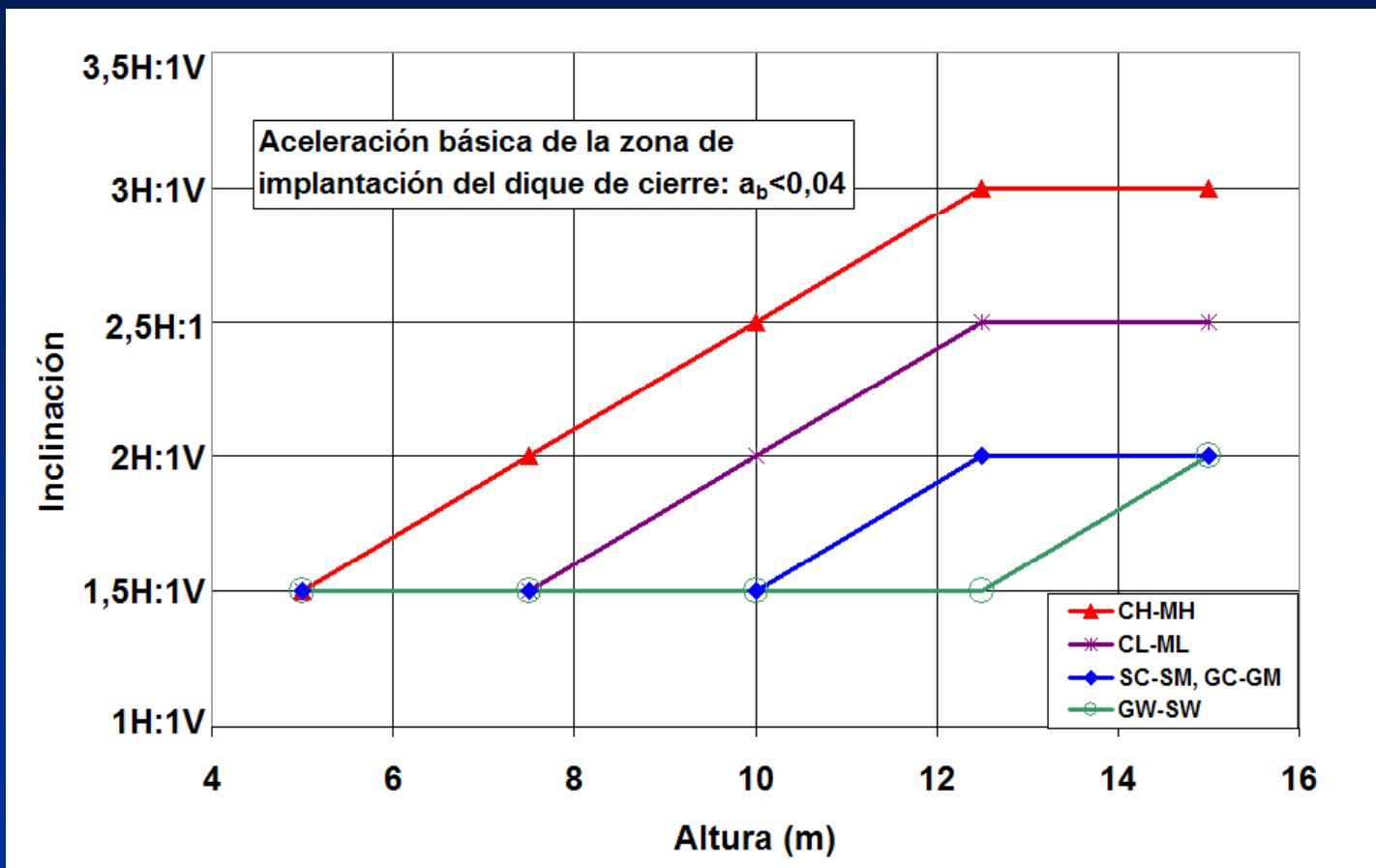
## 4. COEFICIENTES DE SEGURIDAD (F. S.)

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

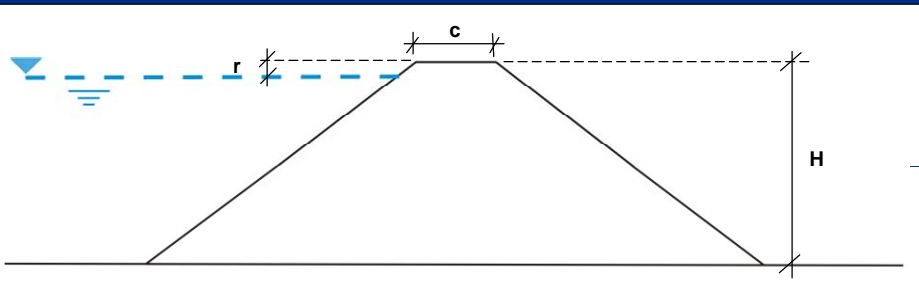
### PARÁMETROS GEOTÉCNICOS (basados en la NAVFAC, 1971)

Material	No saturado		Saturado	
	c (kPa)	$\phi$ (°)	c (kPa)	$\phi$ (°)
<b>CH-MH</b>	50	25	15	25
<b>CL-ML</b>	75	30	15	30
<b>SC-SM Y GC-GM</b>	50	32,5	15	32,5
<b>SW-GW</b>	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:



<b>Altura, H (m)</b>	5	7,5	10	12,5	15
<b>Coronación, c (m)</b>	4	4,5	5	5,5	6
<b>Resguardo, r (m)</b>	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

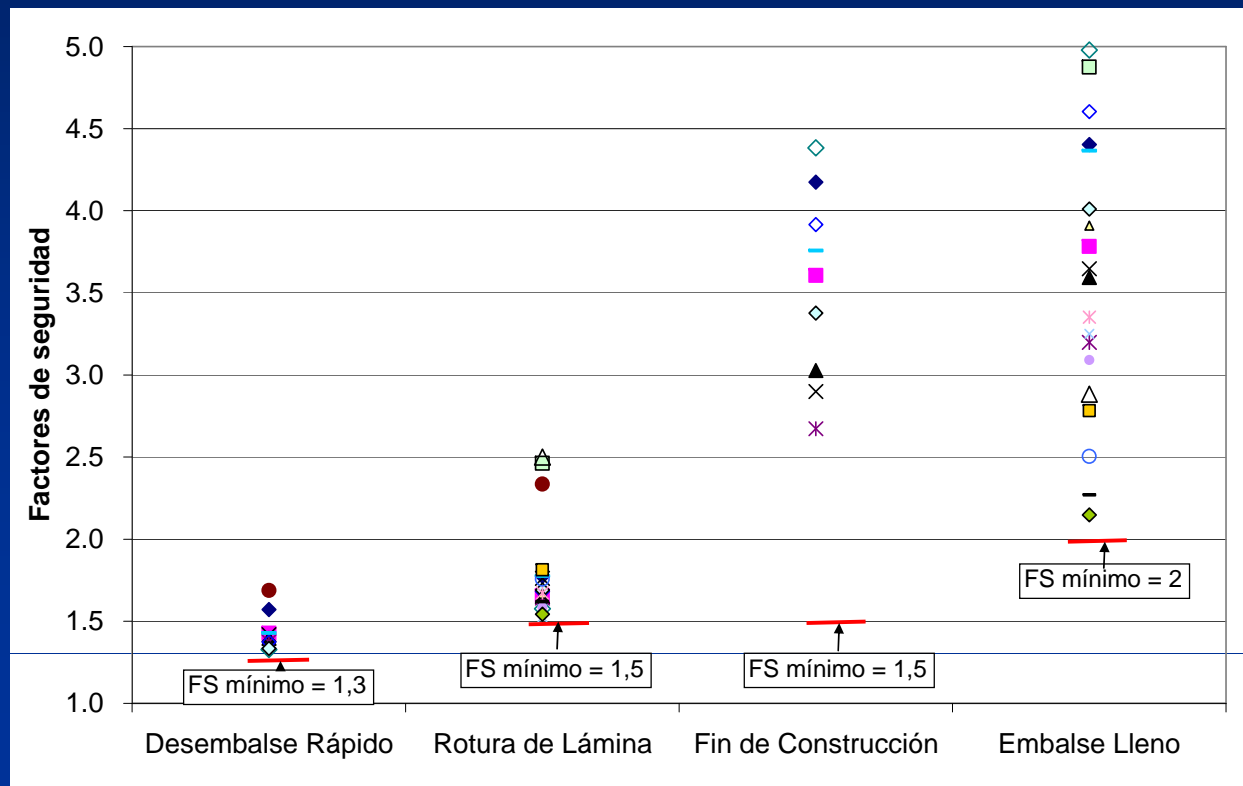
Situación de diseño	F.S. Manual	F. S. Real
Final de construcción	1,3	1,5
Embalse lleno	1,5	2,0
Rotura de lámina	1,3	1,5
Sismo a embalse lleno	1,3	1,3
Desembalse rápido	1,1	1,3

## 5. ÁBACOS DE DIMENSIONAMIENTO

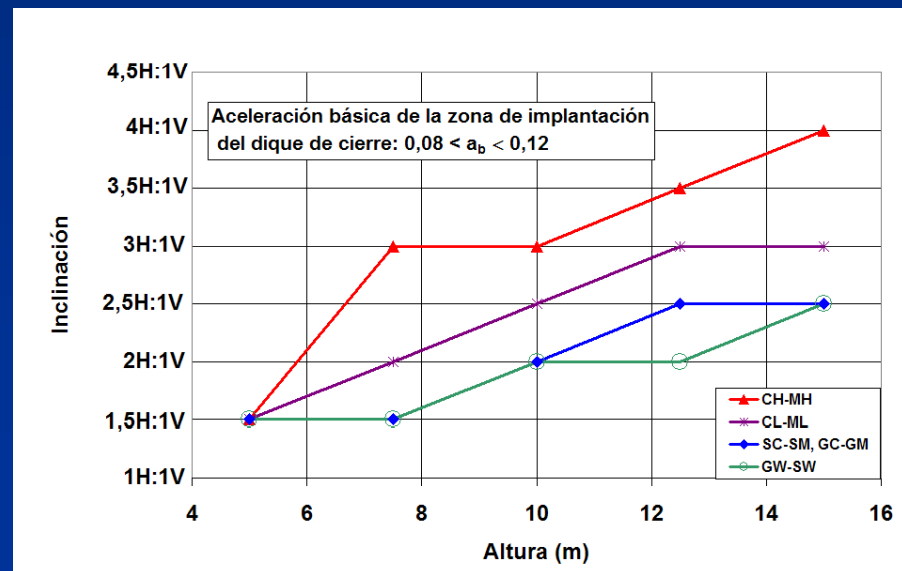
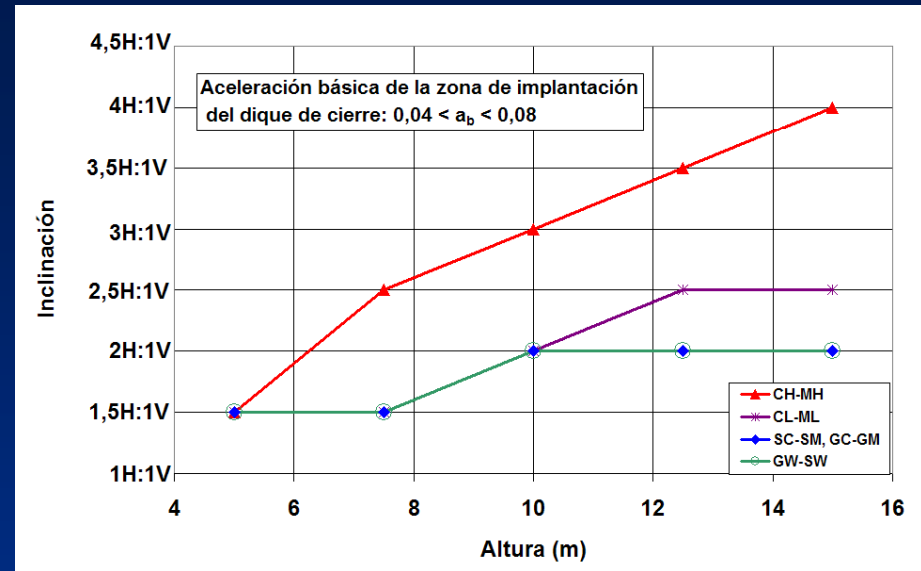
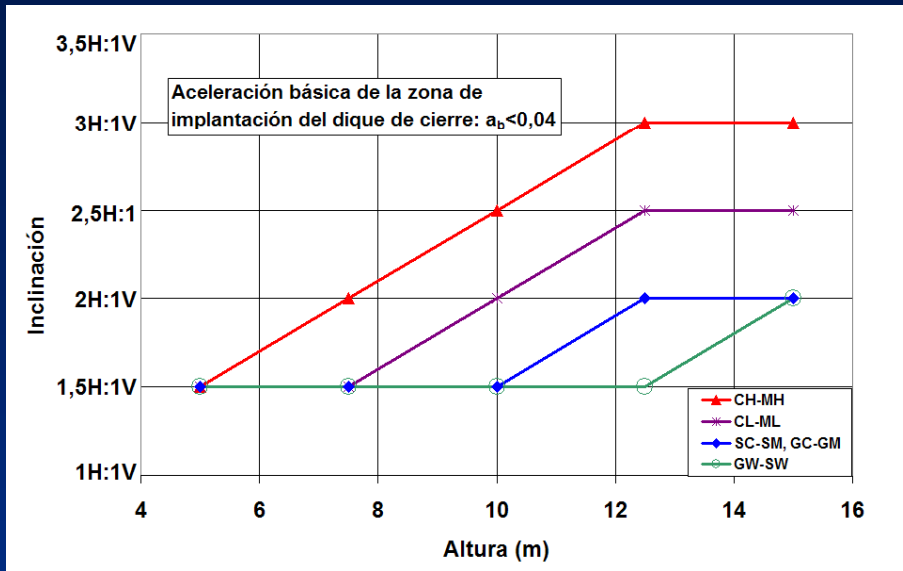
### Factores de seguridad reales

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)	$\phi$ (°)	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