PRESAS DE NUCLEO CENTRAL

CRITERIOS GENERALES DE DISEÑO Y SEGURIDAD

Juan Carlos de Cea Azañedo

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente

Comité Nacional Español de Grandes Presas (SPANCOLD)

Universidad Politécnica de Madrid

INTRODUCCION

LAS PRESAS DE MATERIALES SUELTOS EN ESPAÑA

- **España cuenta con unas ≈ 1.250 presas de todas las tipologías.**
- **990 son grandes presas, según los criterios establecidos por ICOLD**
- **Todas han sido diseñadas y construidas por empresas españolas**

Materiales sueltos	*Número*	*(%)*	*(%) s/ total*
Homogéneas	*259*	*58,7*	*22,0*
Núcleo de arcilla	*102*	*23,1*	*8,7*
Pantalla Asfáltica	*20*	*4,5*	*1,7*
Pantalla de Hormigón	*20*	*4,5*	*1,7*
Geomembrana	*20*	*4,5*	*1,7*
Homogénea-Mampostería (Mixta)	*4*	*0,9*	*0,3*
Materiales Sueltos-Gravedad (Mixta)	*16*	*3,6*	*1,5*
TOTAL	***441***	***100,0***	***37,6***

LA SEGURIDAD DE LAS PRESAS DE MATERIALES SUELTOS

ICOLD (1973): LESSONS FROM DAM INCIDENTS

	Todo Tipo de Presas		
Altura (m)	Roturas	Accidentes	Total
5 – 15	64	29	93
15 – 30	97	121	**218**
30 – 50	35	75	110
50 – 100	5	32	37
> 100	-	3	3
Total	201	260	**461**

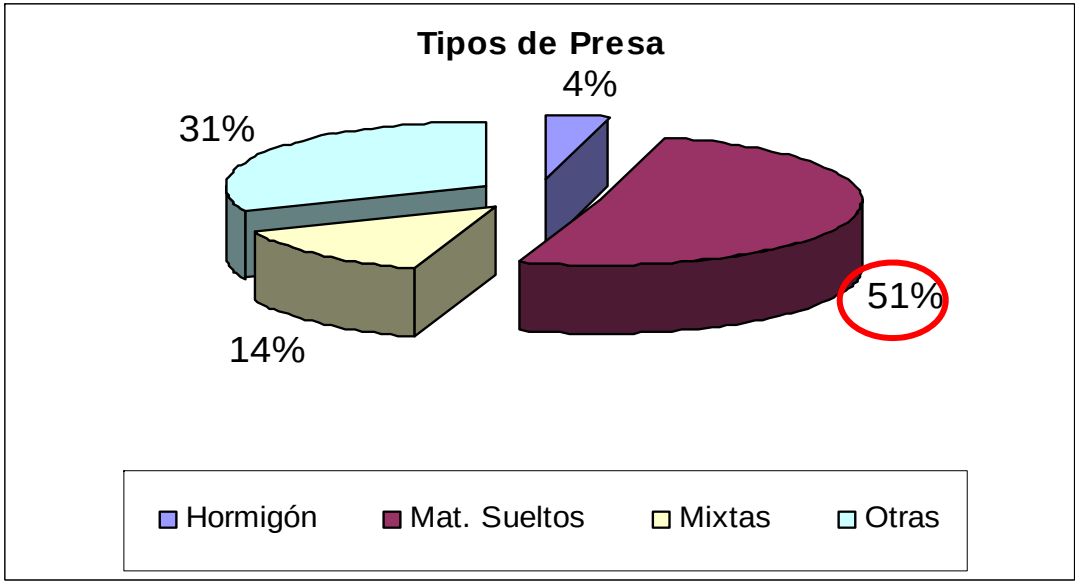
LA SEGURIDAD DE LAS PRESAS DE MATERIALES SUELTOS

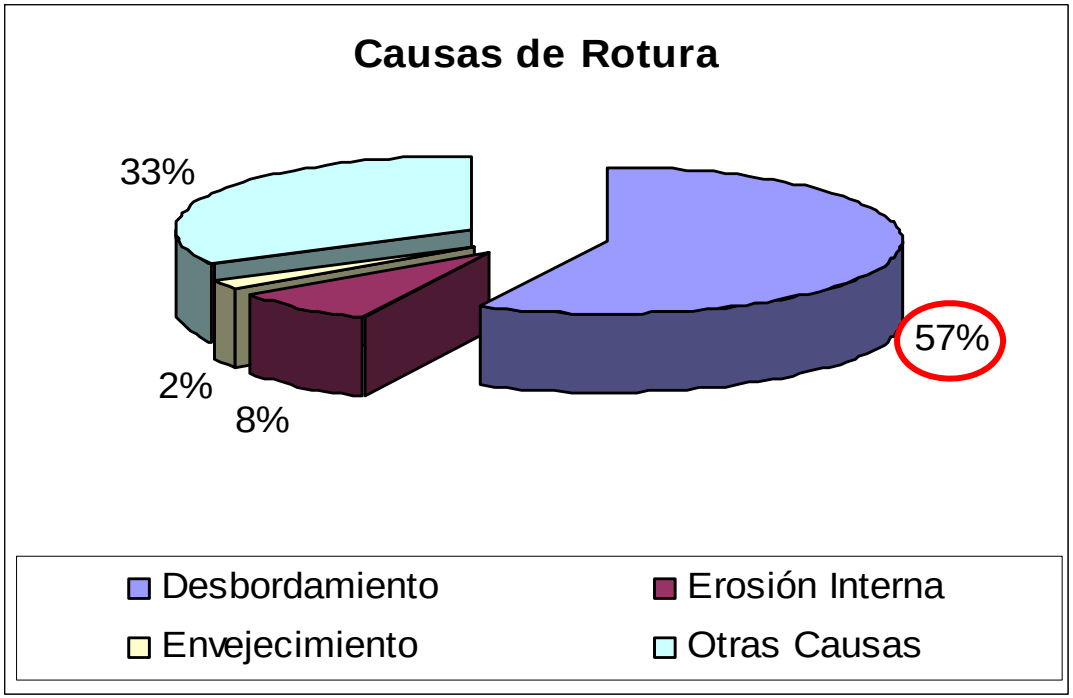
ICOLD (1973): LESSONS FROM DAM INCIDENTS

	Todo Tipo de Presas			Presas de Tierra	
Altura (m)	Roturas	Accidentes	Total	**Roturas y Accidentes**	
5 – 15	64	29	93	**59**	**63%**
15 – 30	97	121	**218**	**168**	**77%**
30 – 50	35	75	110	**73**	**66%**
50 – 100	5	32	37	**17**	**45%**
> 100	-	3	3	**-**	
Total	201	260	**461**	**317**	**69%**

EE.UU – Roturas de Presas Pequeñas entre los años 1.999 y 2.000

Altura (m)	Número
1 – 3	6
3 – 6	30 (42%)
6 – 9	11 (16%)
9 – 12	4
18 - 21	1
Desconocida	18
Total	70





PRINCIPALES CAUSAS DE ACCIDENTES Y ROTURAS DE PRESAS DE MATERIALES SUELTOS

Causa	Rotura	Accidente
Desbordamiento	**18**	7
Erosión	**14**	17
Protección de Taludes		13
Erosión Interna por el cuerpo de presa	**23**	14
Erosión Interna por la cimentación	11	**43**
Deslizamiento	5	**28**
Deformación excesiva	3	**29**
Deterioro	2	3
Sismo	-	3
Construcción de poca calidad		3
Rotura de compuertas	1	3
TOTAL	**77**	**163**

From Lessons from Dam Incidents. USCOLD, 1975

En fase de actualización (2011)

CAUSAS DE FALLO & SINTOMATOLOGIA

CAUSA	POSIBLES SINTOMAS
Inestabilidad del talud o del cimiento	• Presiones intersticiales elevadas • Deterioro de la eficacia del sistema de drenaje • Descenso rápido del embalse • Sismos
Asientos excesivos (generación de grietas)	• Asientos diferenciales (cimiento irregular) • Consolidación del relleno y/o cimentación
Erosión del talud	• Protección inadecuada
Filtración incontrolada y erosión interna (presas o cimiento)	• Gradientes altos en presas o cimientos • Protección o control inadecuado de la filtración • Disolución de materiales • Presencia de raíces o excavación por animales • Grietas en presa o cimiento • Presencia de arcillas dispersivas • Mal contacto presa-estructuras

Se incluyen datos tanto de presas homogéneas como de núcleo central

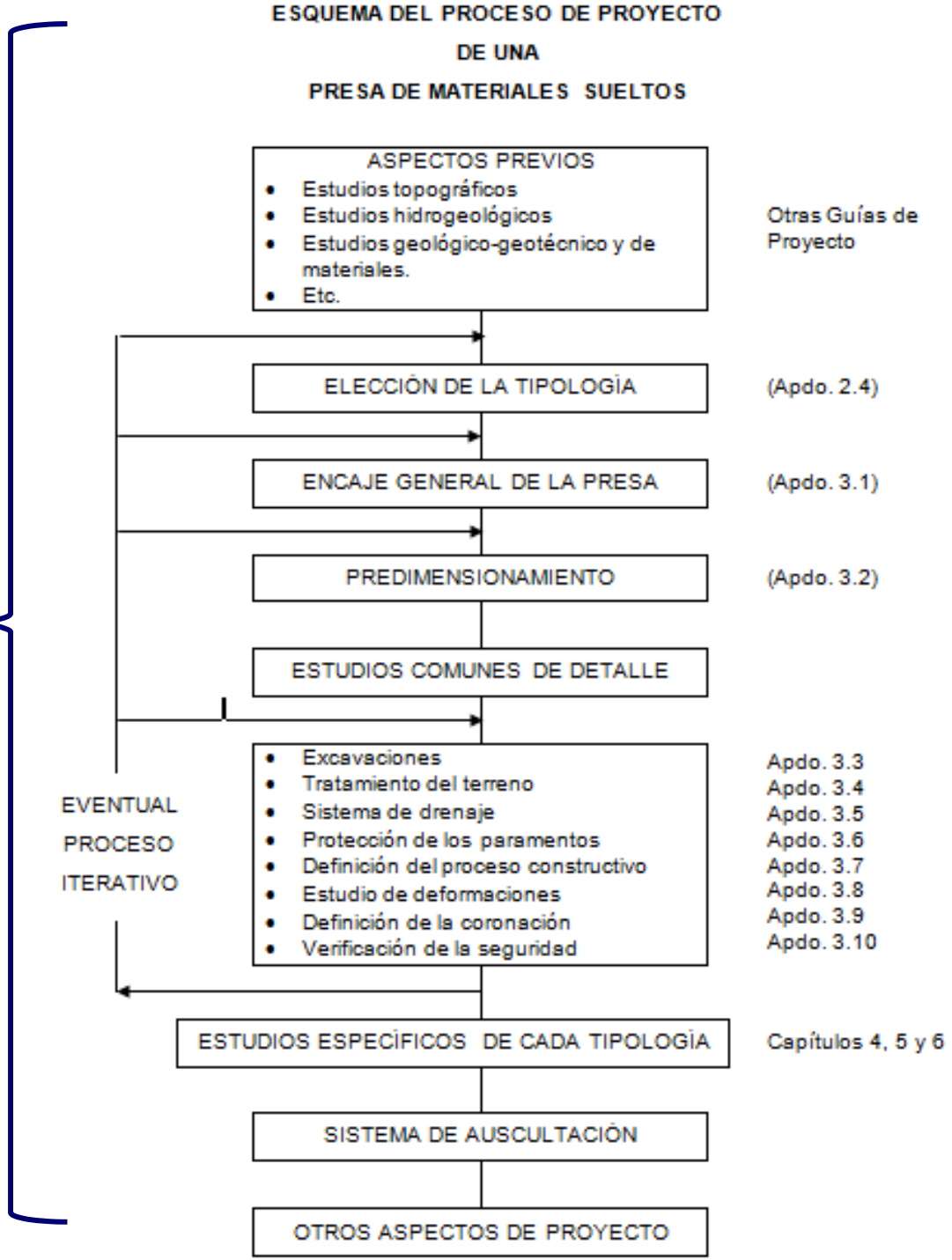
ROTURAS DE PRESAS EN ESPAÑA

Causa más frecuente de Rotura (30%)

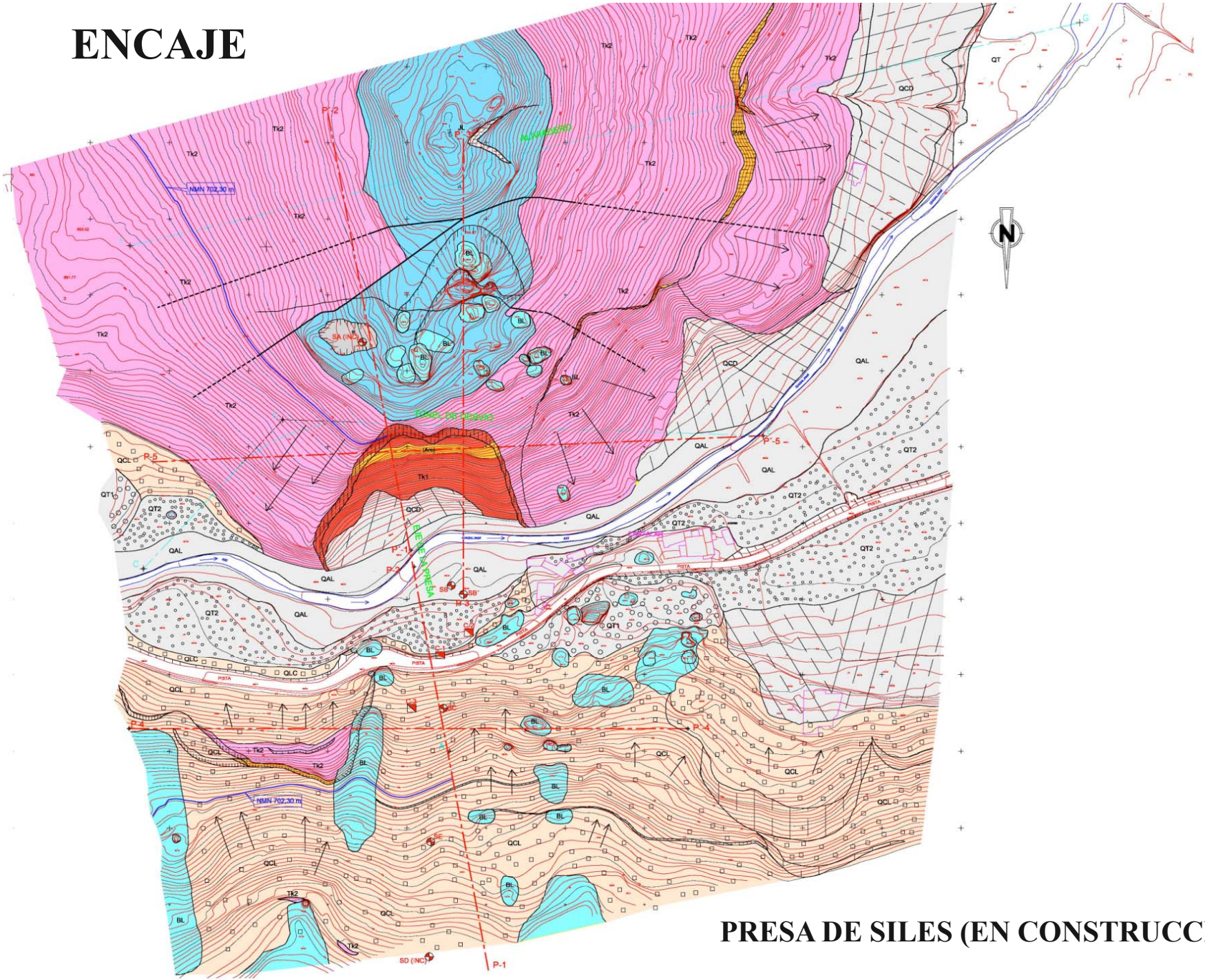
Name	River	Type	H (m)	V (hm^3)	Constr. (year)	Failure (year)	Cause of Failure
1. El Gasco	Guadarrama	PG (M)	54	4.6	–	1799	Failure of downstream slope
2. Puentes	Guadalentin	PG (M)	50	52	1791	1802	Piping of the foundation
3. Granadillar	Granadillar	PG (M)	20	0.1	1933	1933	Instability of the slopes
4. Xuriguera	Xuriguera	PG	42	1.1	1902	1944	Sliding of right bank of dam
5. Vega de Tera	Tera	CB	34	7.3	1956	1959	Collapse of the buttresses
6. Odiel-Rio Tinto	Odiel	ER	35	3.3	1970	1968	Overtopping
7. Jerte (Cofferdam)	Jerte	ER	16	–	–	1977	Overtopping
8. Tous	Júcar	ER-PG	71	51	–	1982	Overtopping
9. Fuensagrada	Leguaseca	MV	20	0.06	1958	1987	Deterioration of concrete and expansive phenomena
10. Orjales	Orjales	MV	13	0.02	1958	1994	Collapse of the buttresses

DISEÑO DE PRESAS DE MATERIALES SUELTOS Y NUCLEO CENTRAL

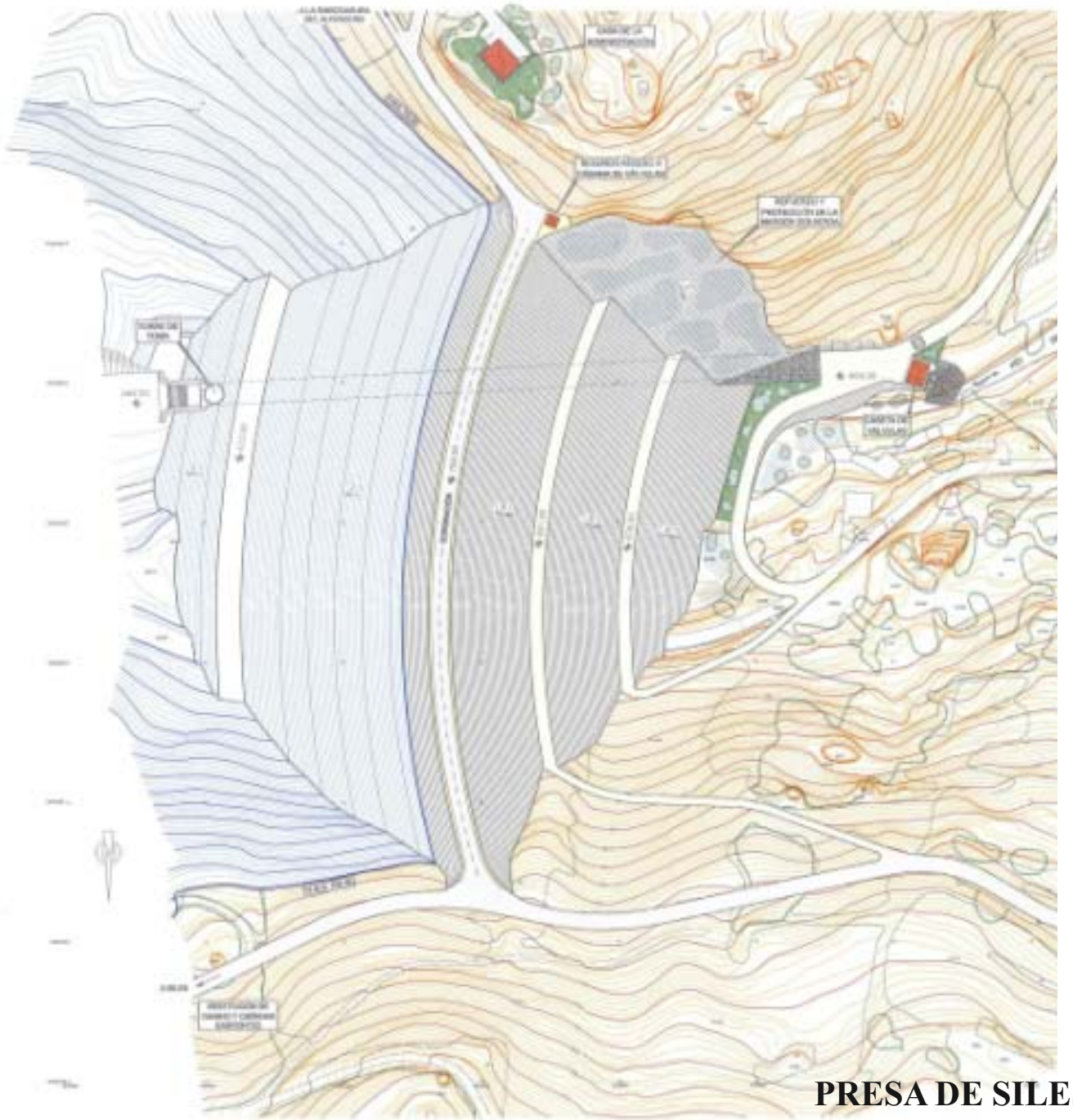
EL DISEÑO DE LAS PRESAS DE MATERIALES SUELTOS SEGÚN LA GUIA TECNICA Nº 2 DE SPANCOLD



ENCAJE

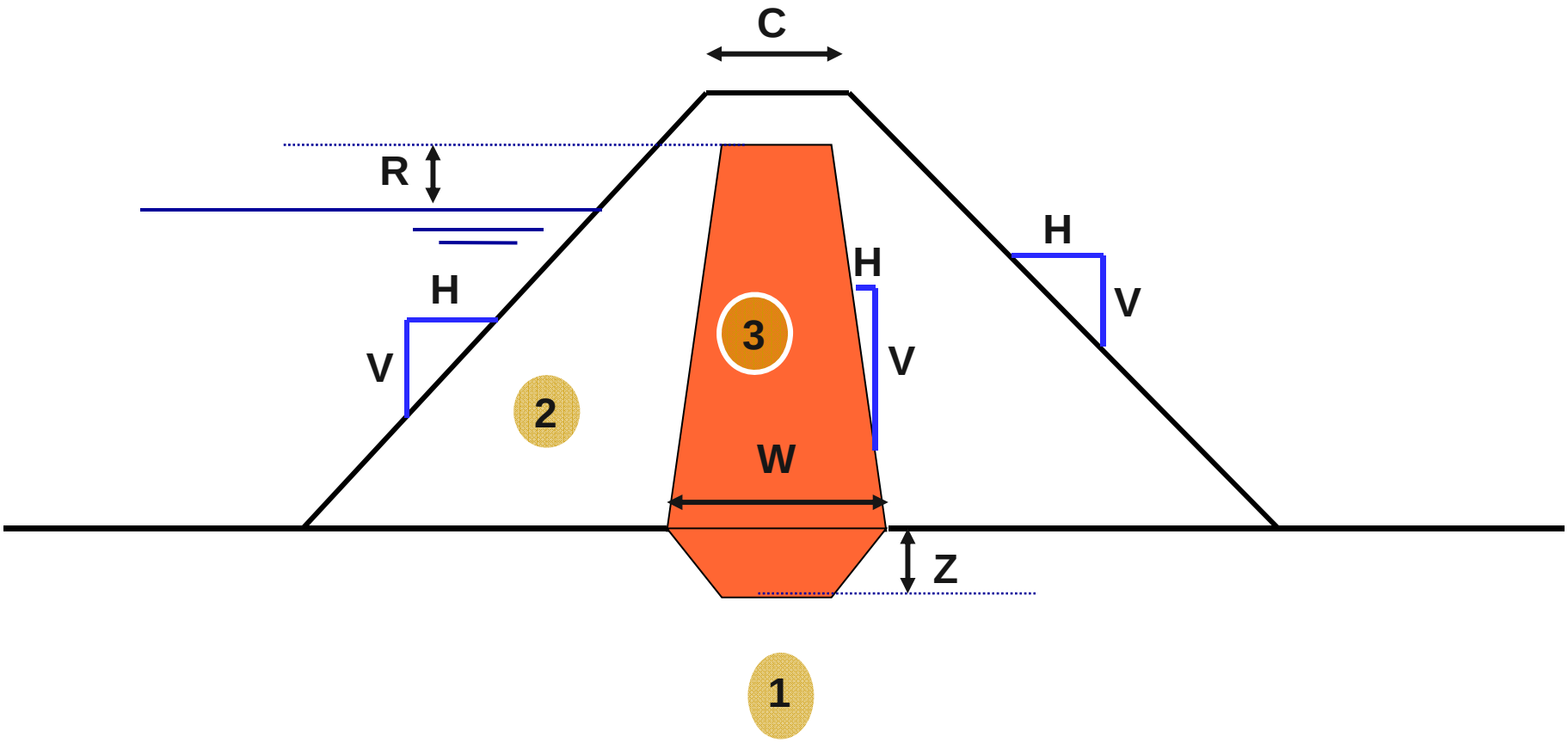


PRESA DE SILES (EN CONSTRUCCION)



PRESA DE SILES (EN CONSTRUCCION)

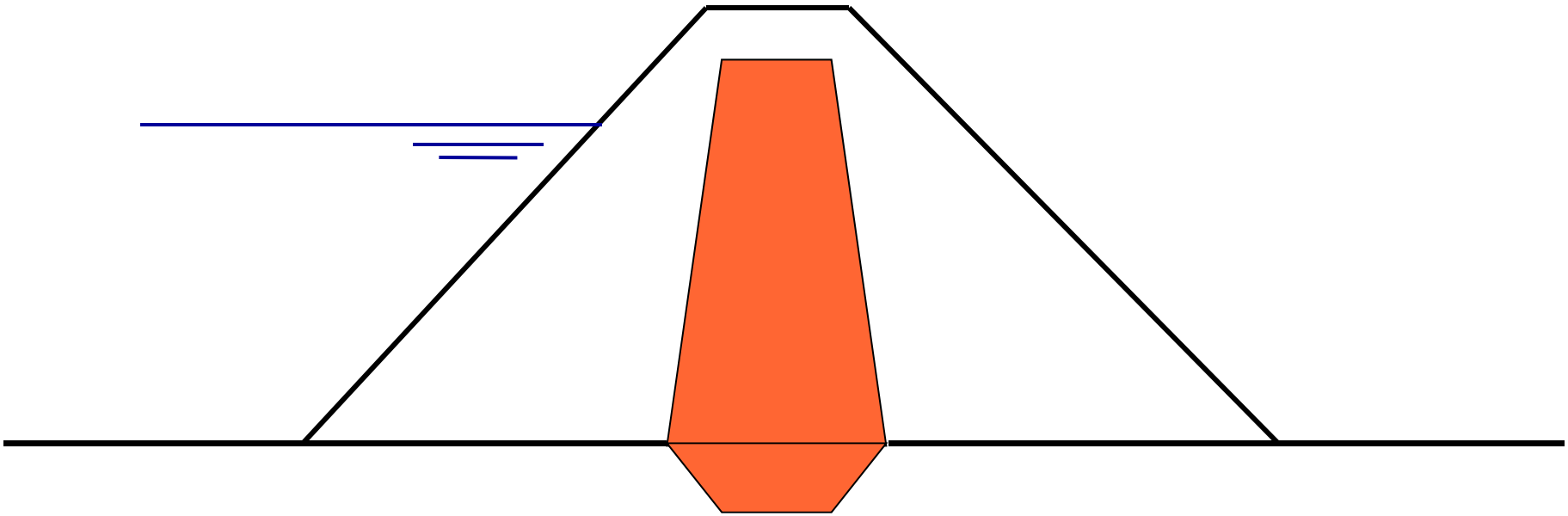
ASPECTOS GENERALES DEL DISEÑO



CORONACION

$$C = 3 + 1{,}5\sqrt[3]{H - 15}$$

$$C > 3\ m$$



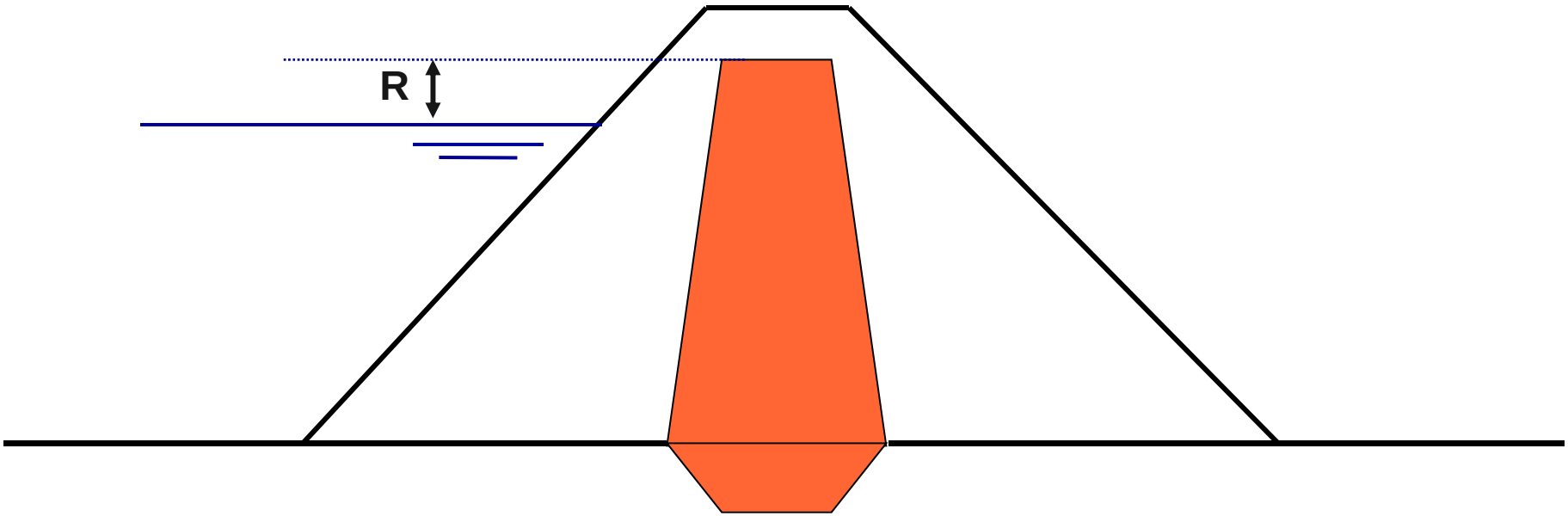
Zonas de Sismicidad Media: C'= 1,25*C - Sismicidad Alta C'=1,50*C

RESGUARDO (SEGURIDAD HIDROLOGICA)

Guía Técnica nº 2: Criterios para proyectos de presas y obras anejas

1ª Parte: Consideración de la seguridad de la presa en el proyecto.

Aptdo. 2.2. Resguardos.

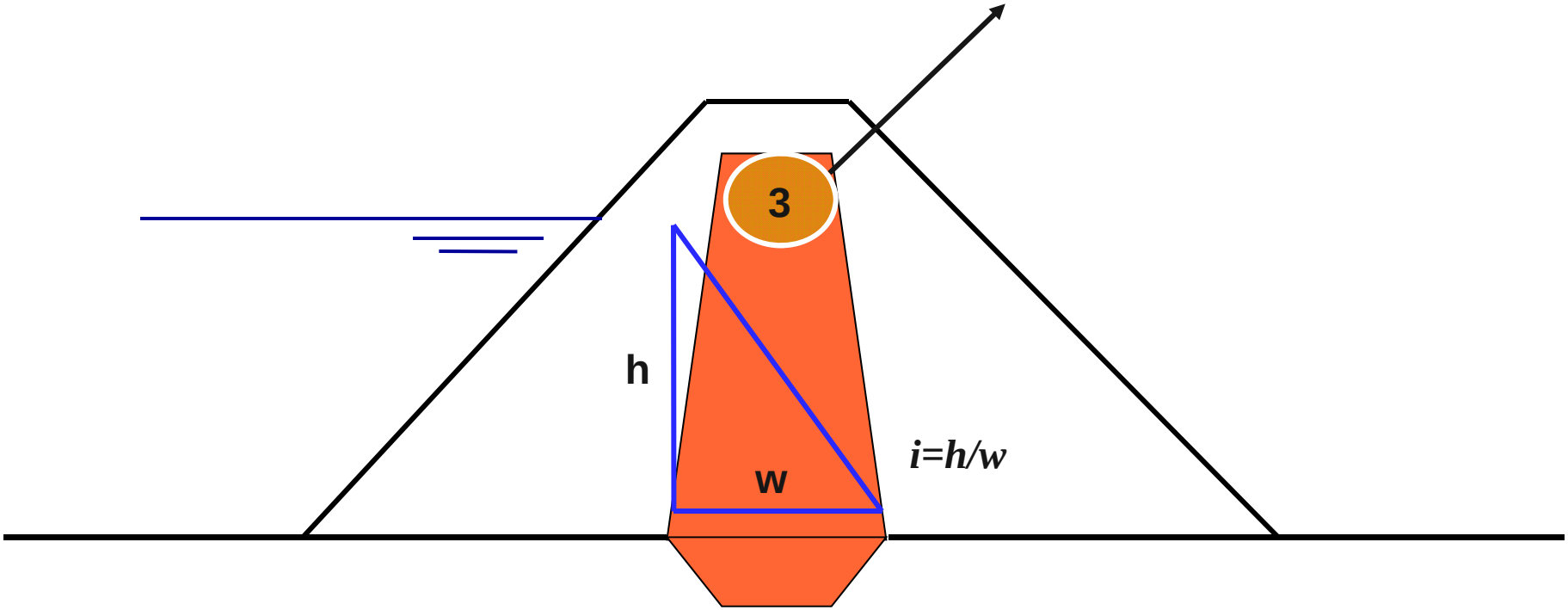


- **Normal** → Estacional. Hace frente a las avenidas
- **Mínimo** → Nivel de Avenida de proyecto + Oleaje

  Puede agotarse evacuando la avenida extrema

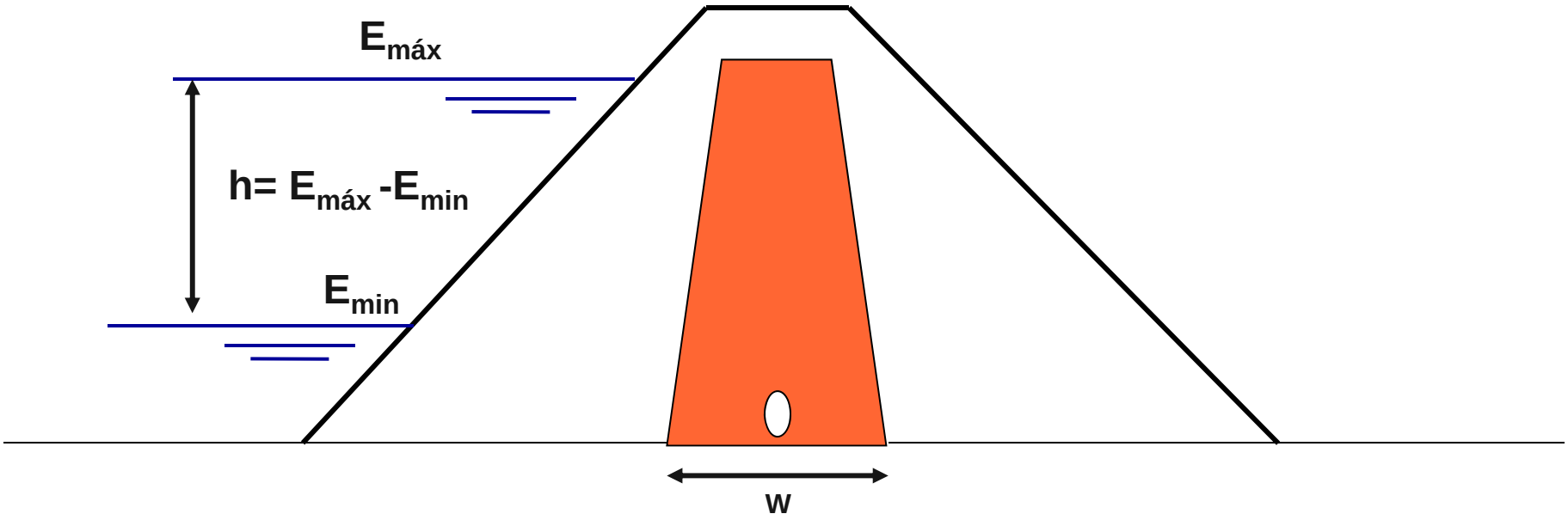
DISEÑO DEL NUCLEO

K << 10^{-5} cm/sg. Lo deseable 10^{-6} - 10^{-7} cm/sg



- **i > 3** → Núcleo delgado (i> 5 ó 6, Desaconsejados)
- **3 > i > 1** → Núcleo semigrueso (Los más recomendados)
- **i < 1** → Núcleo grueso

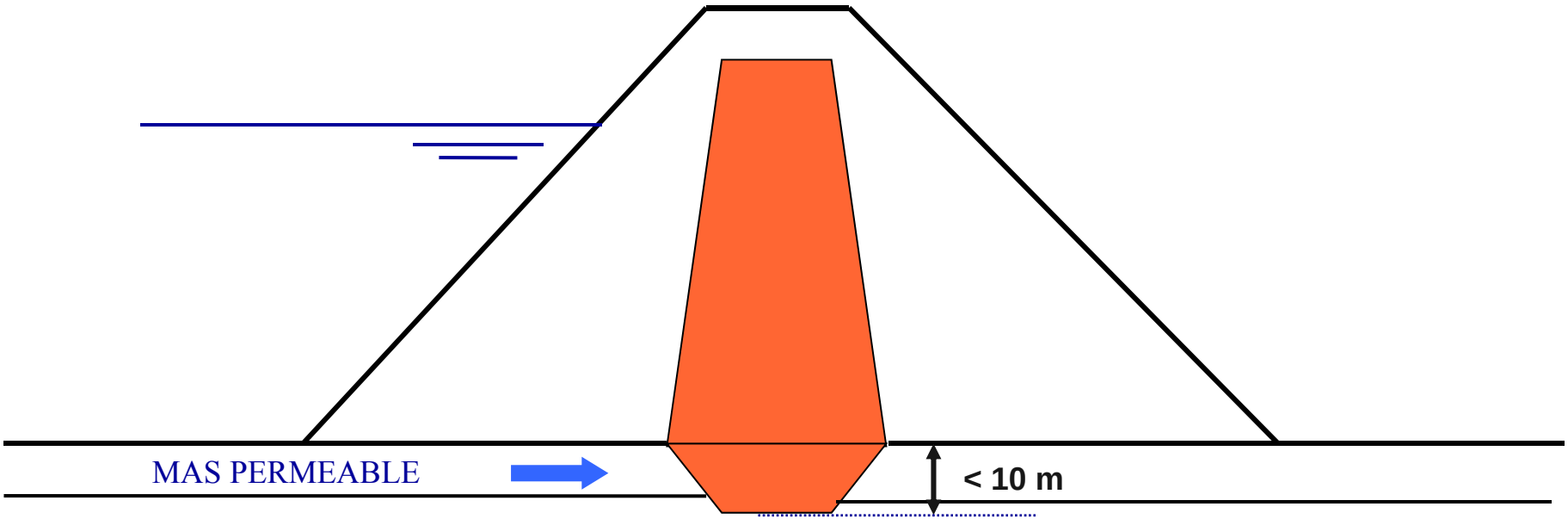
ANCHO DE BASE DEL NUCLEO



En función de la calidad de la roca:

- Rocas no erosionables de baja permeabilidad: **<0,10 h**
- Cimentaciones permeables: **> 0,5 h**
- Suelos: **> h**

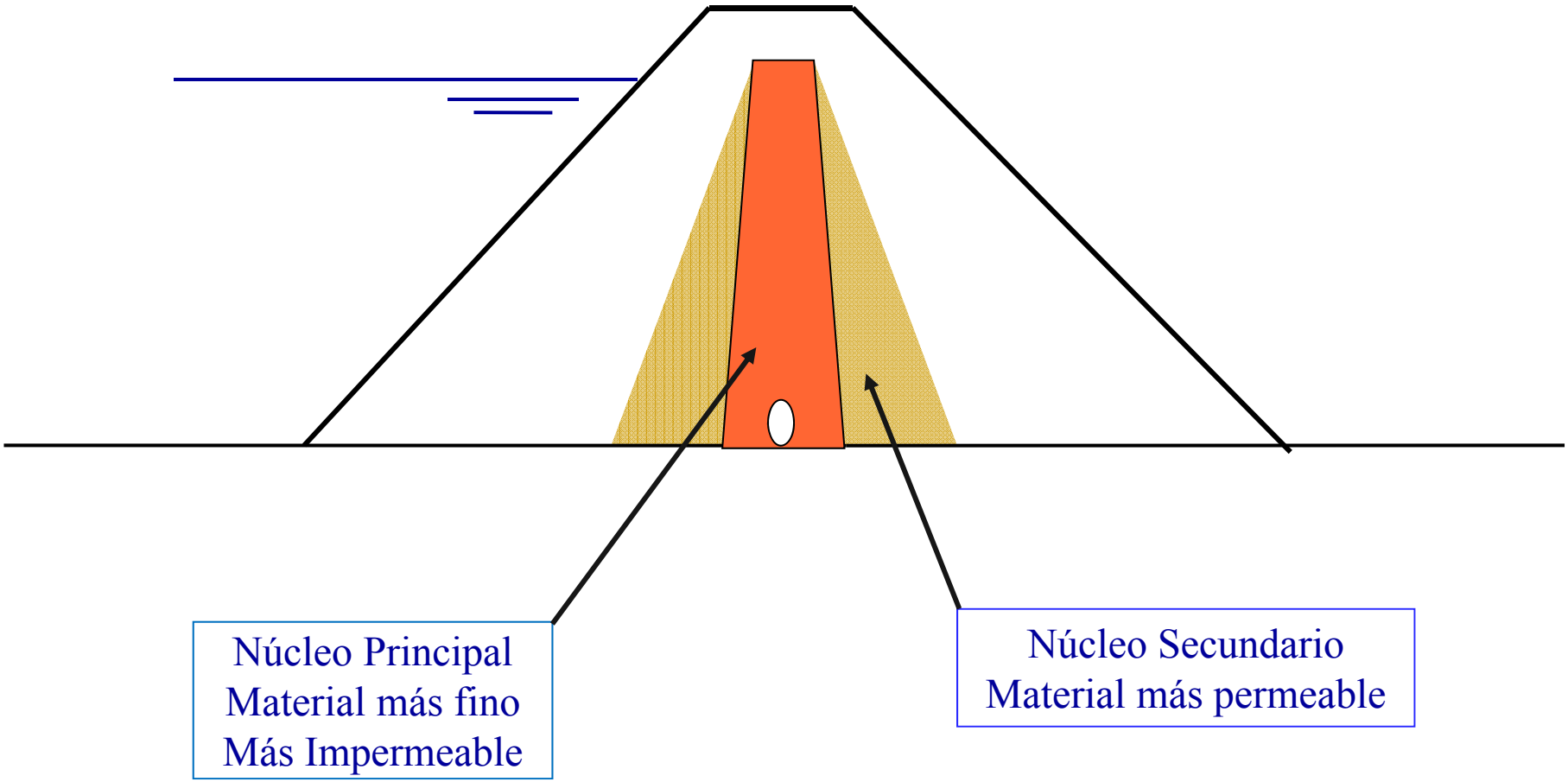
RASTRILLO



IMPERMEABLE

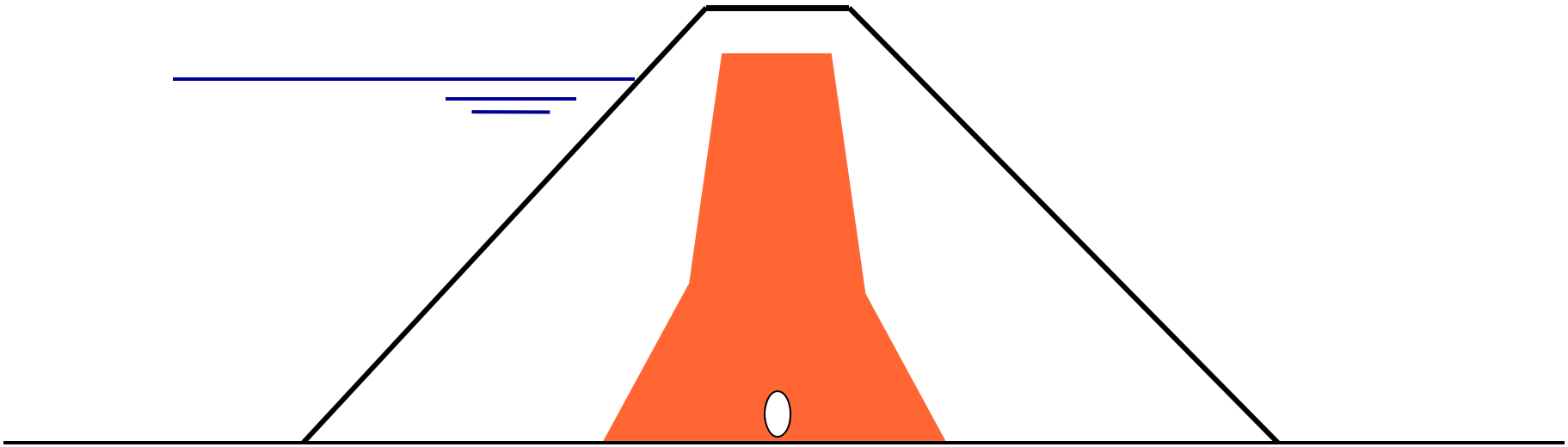
PARA CORTAR EL FLUJO SUBSUPERFICIAL A TRAVES DE CAPA ALTERADA

AUSENCIA DE MATERIALES IMPERMEABLES EN CUANTIA SUFICIENTE PARA CONSTRUIR EL NUCLEO



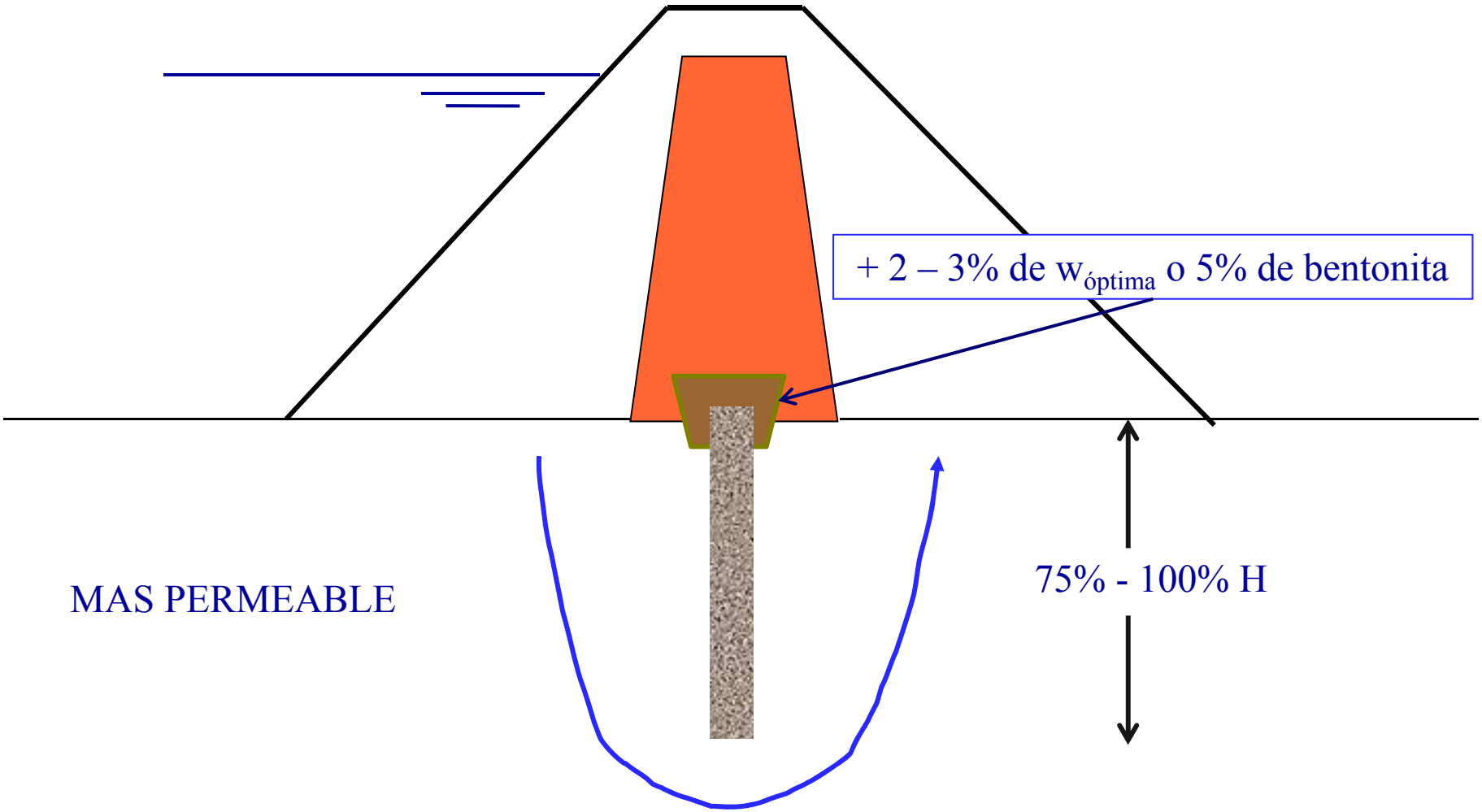
PRESA EL ARENOSO

ENSANCHAMIENTO DEL NUCLEO EN LA BASE

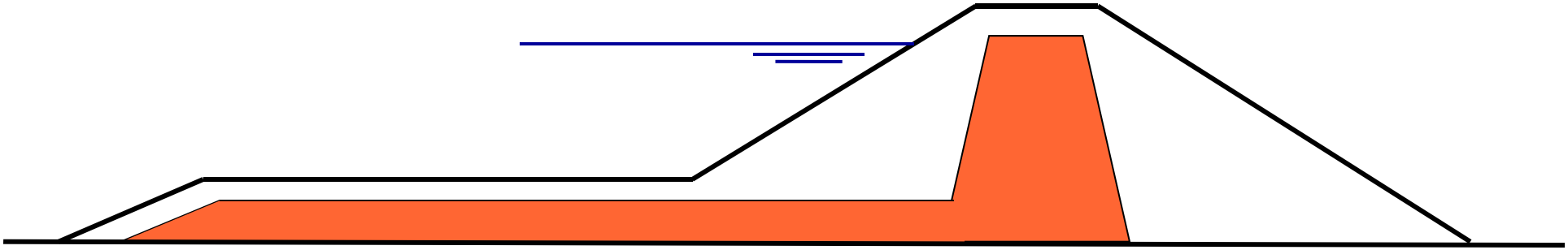


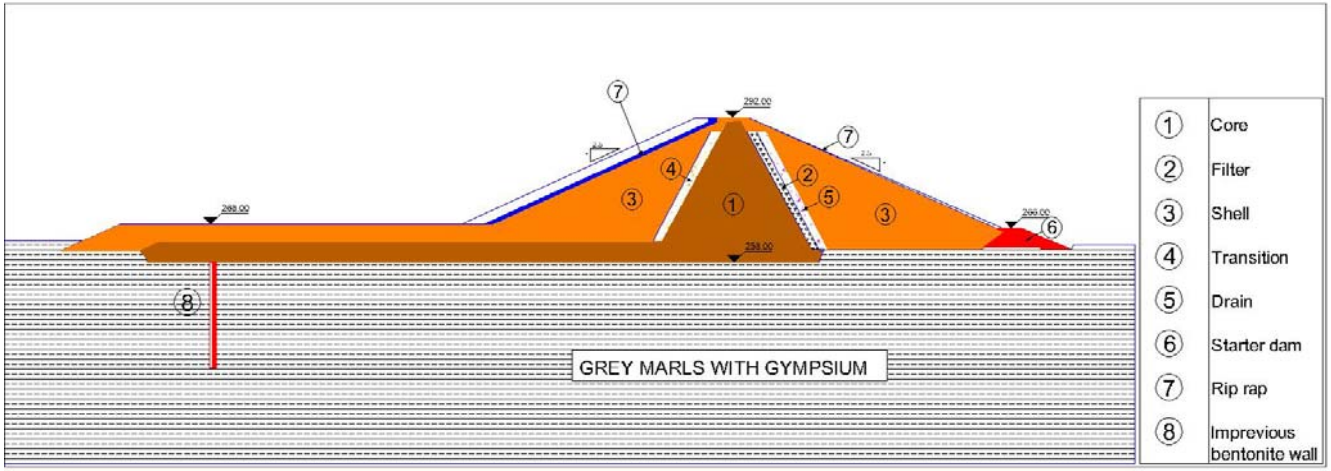
PARA ALARGAR EL RECORRIDO DE LAS LINEAS DE FILTRACION

A VECES LA SOLUCION ES:



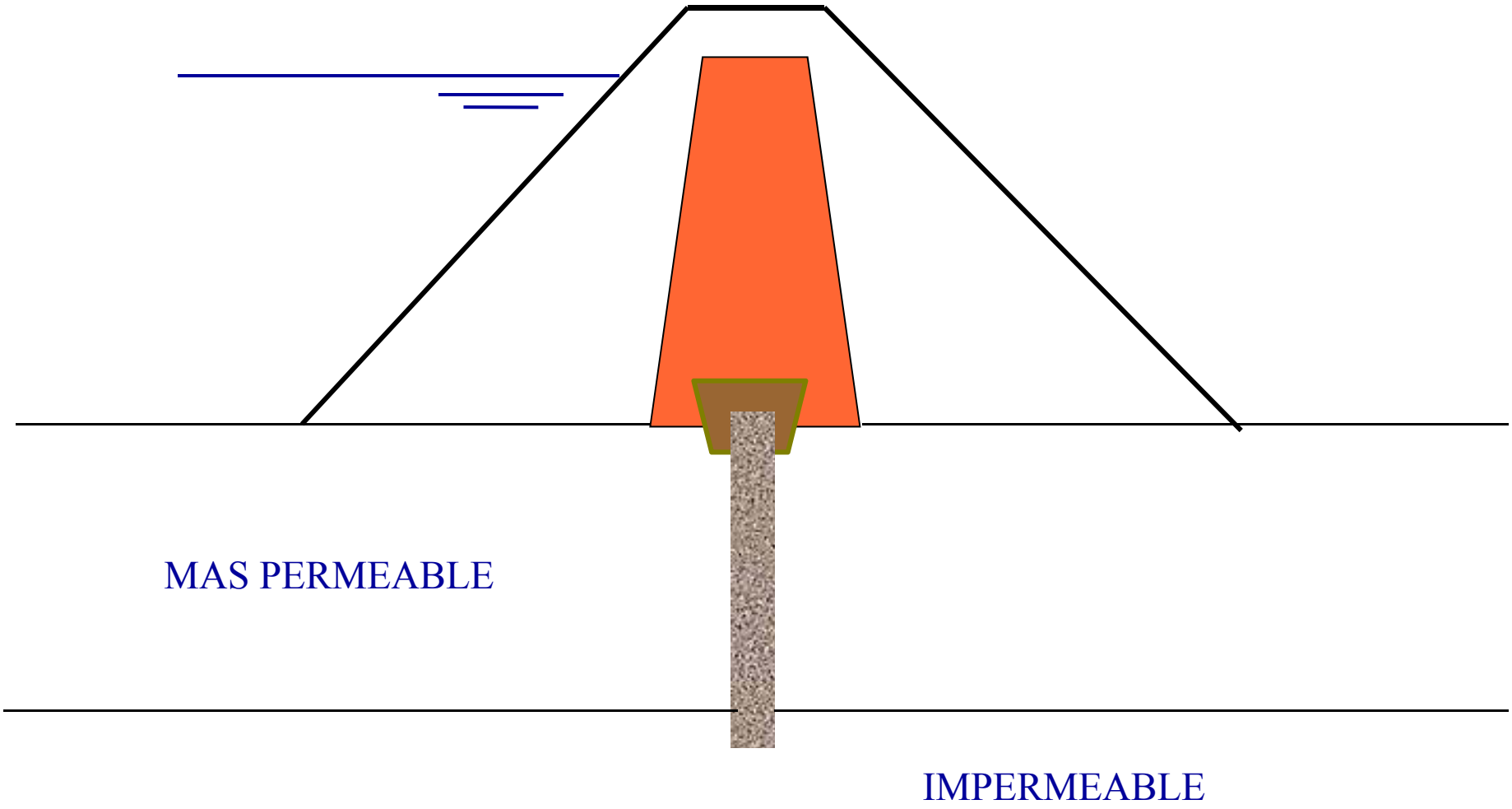
……. O HACIA AGUAS ARRIBA



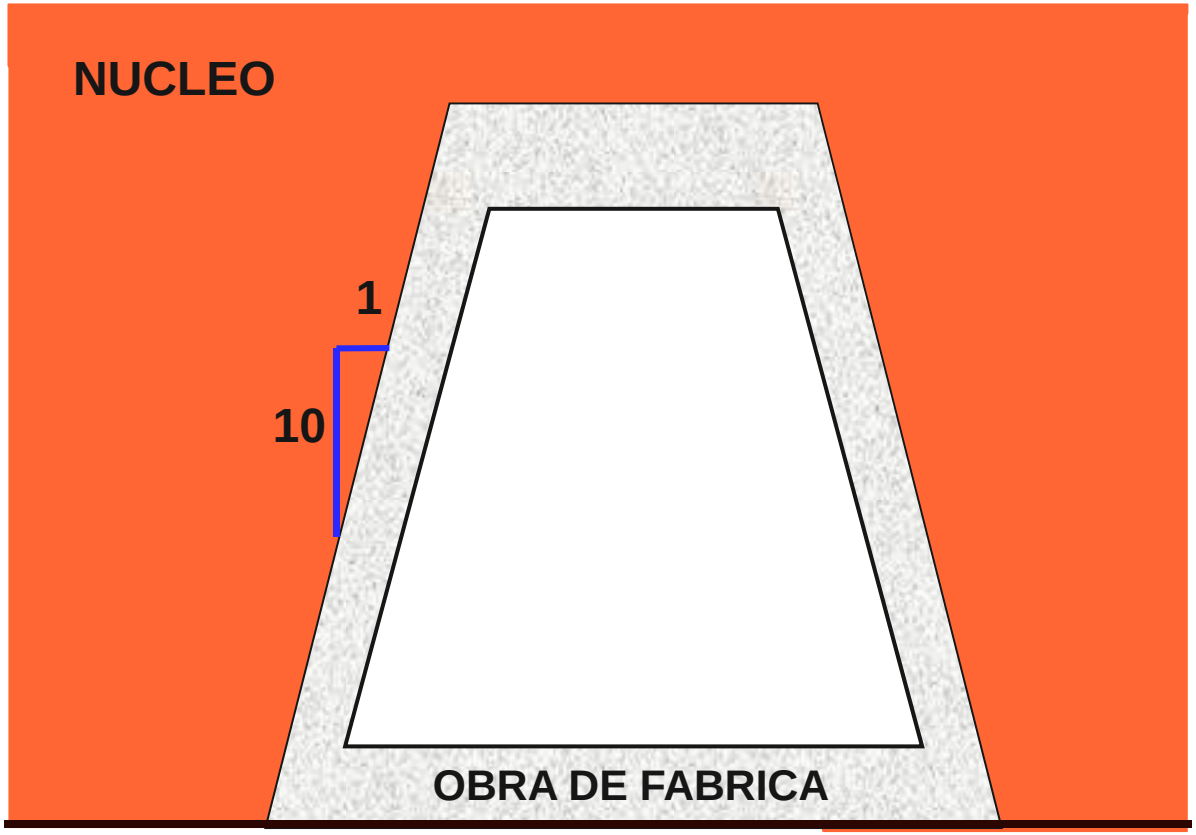


PRESA DE LA LOTETA

LA MEJOR SOLUCION

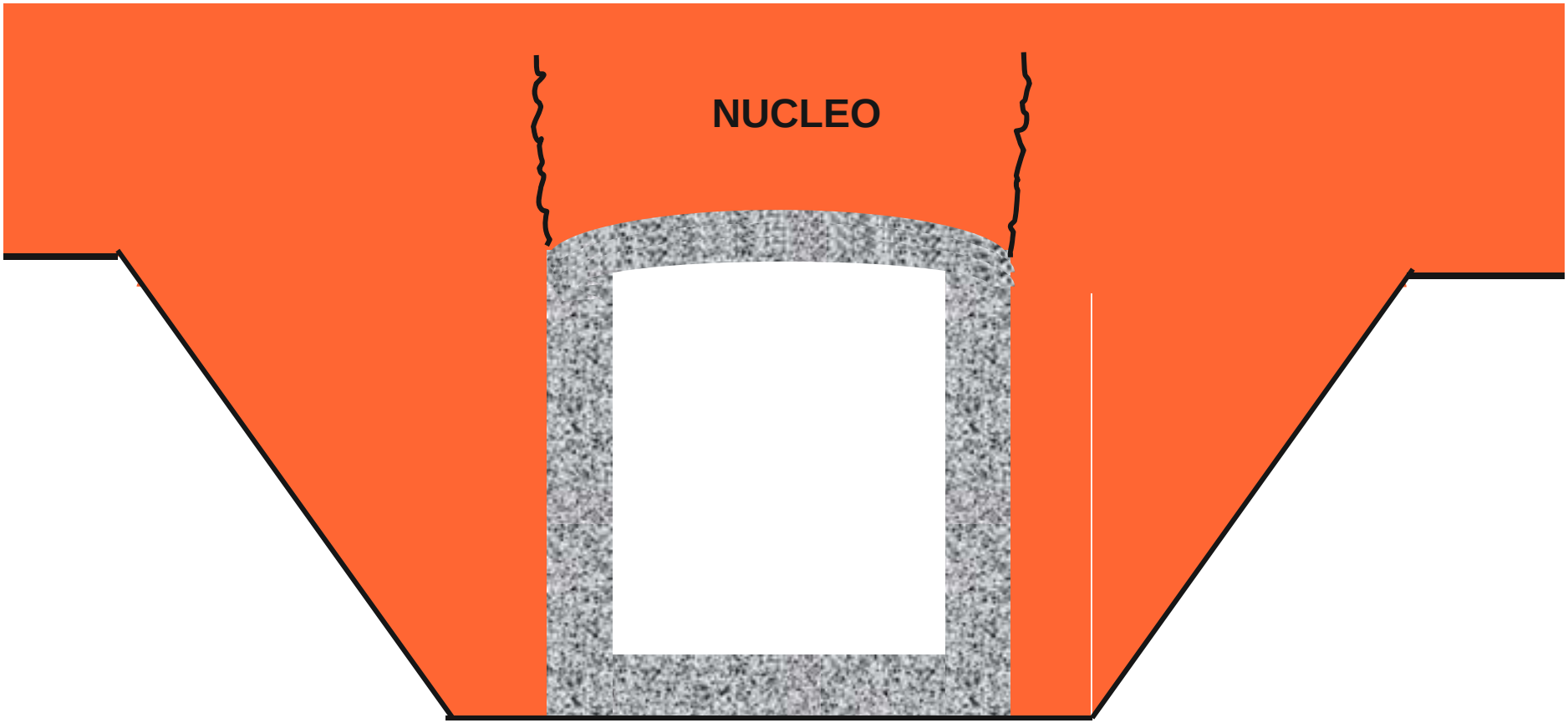


ALGUNOS DETALLES CONSTRUCTIVOS

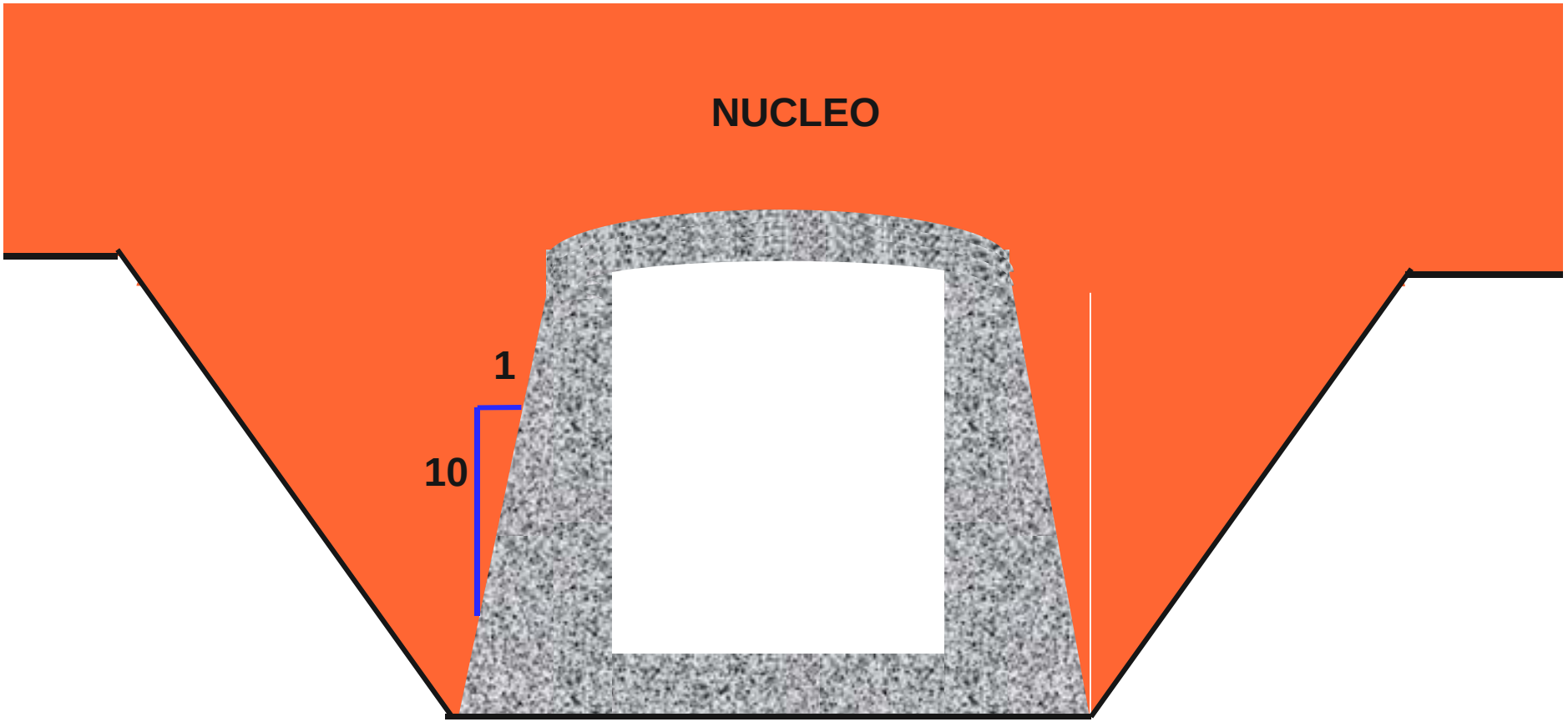


QUE EL TERRENO SITUADO POR ENCIMA DEL CONTACTO SIEMPRE “PESE”

ALGUNOS DETALLES CONSTRUCTIVOS (II)

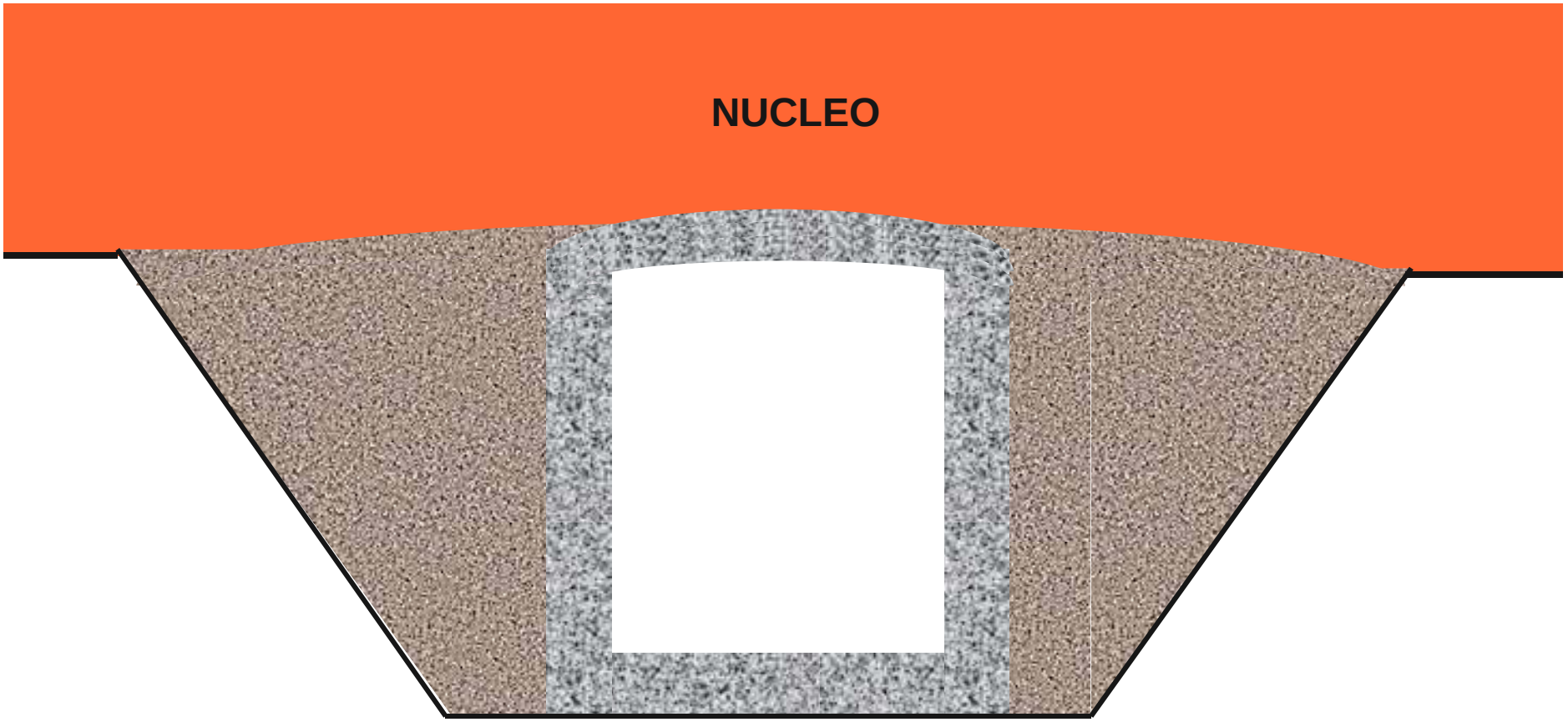


ALGUNOS DETALLES CONSTRUCTIVOS (II)



QUE EL TERRENO SITUADO POR ENCIMA SIEMPRE “PESE”

ALGUNOS DETALLES CONSTRUCTIVOS (III)

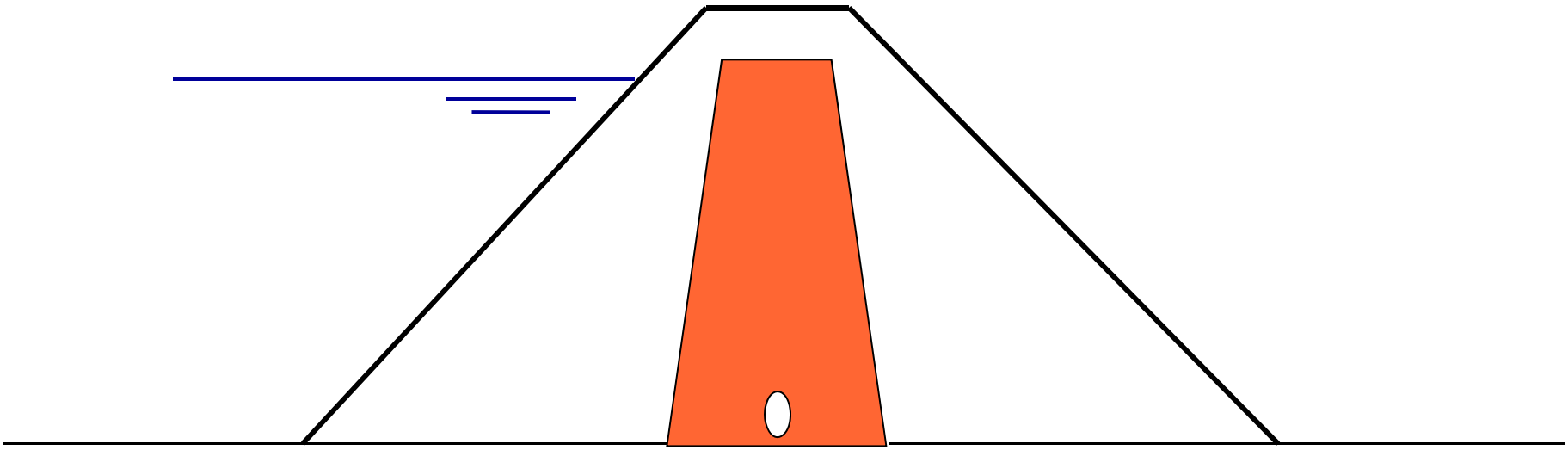


CONTORNO MUY SUAVE

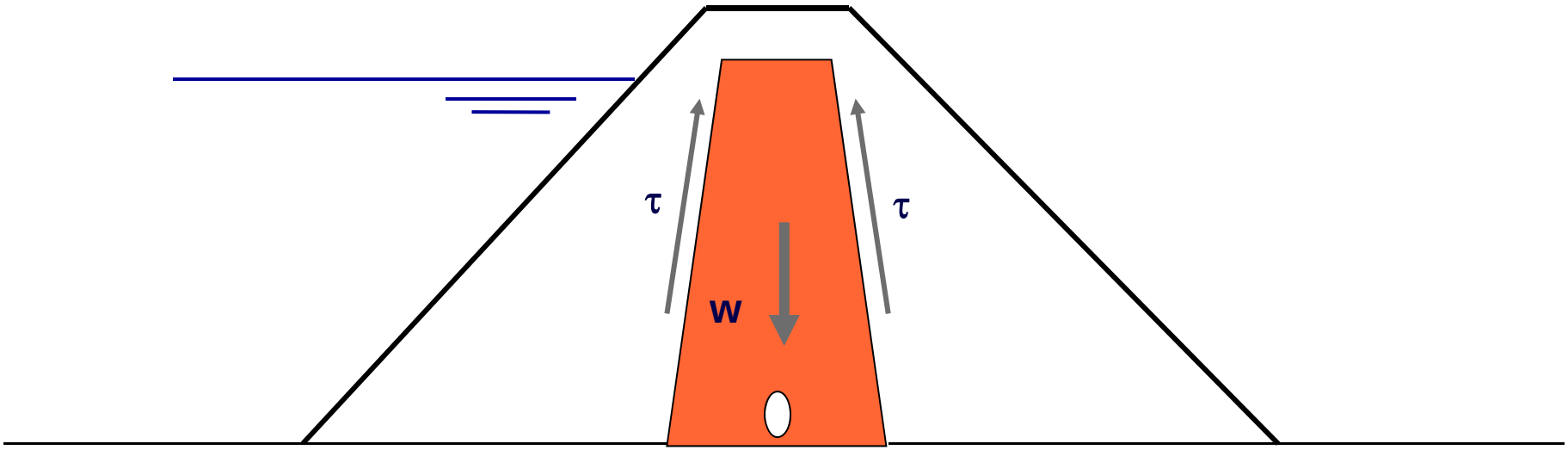
PRIMER PROBLEMA A RESOLVER:

EROSION INTERNA Y FILTRACION INCONTROLADA

LA FRACTURACION HIDRAULICA

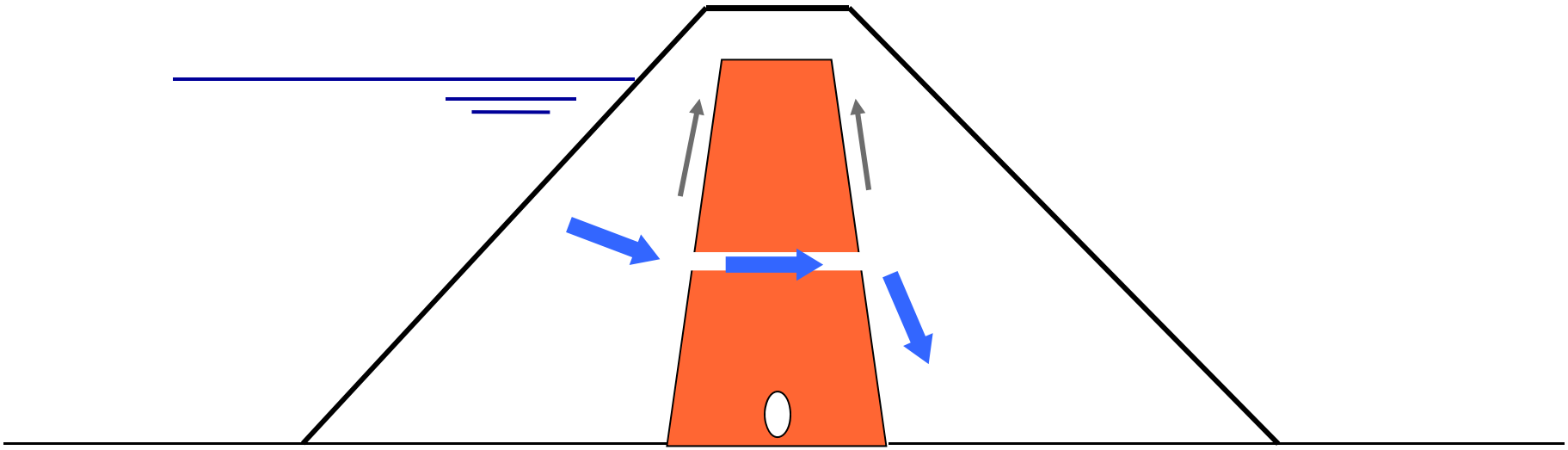


LA FRACTURACION HIDRAULICA



EL NUCLEO “SE CUELGA” DE LOS ESPALDONES

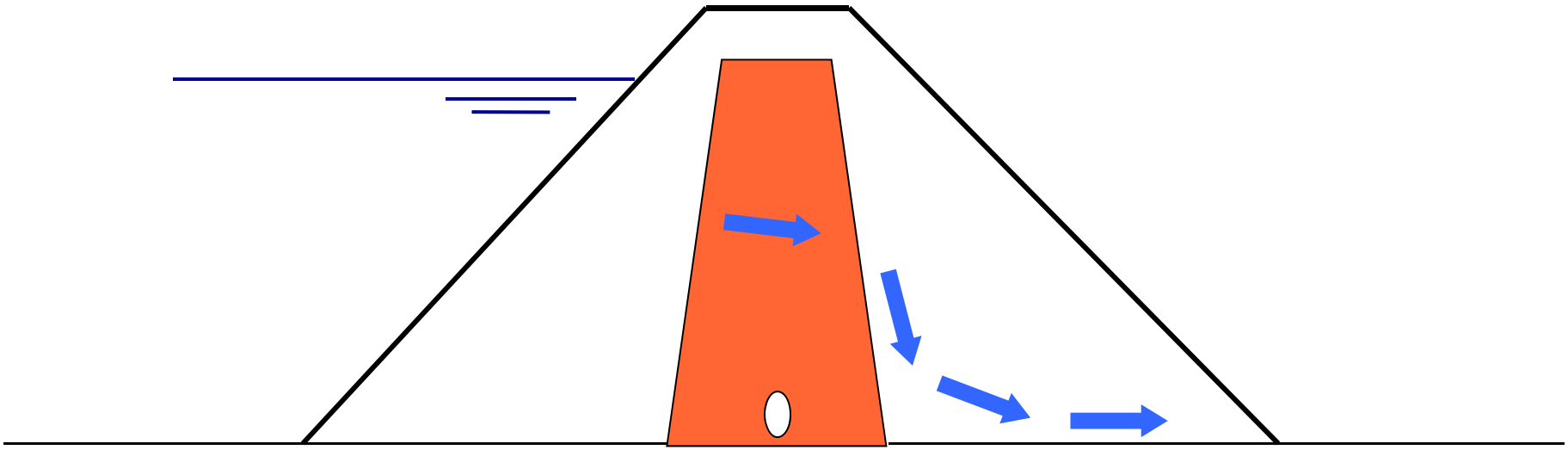
LA FRACTURACION HIDRAULICA



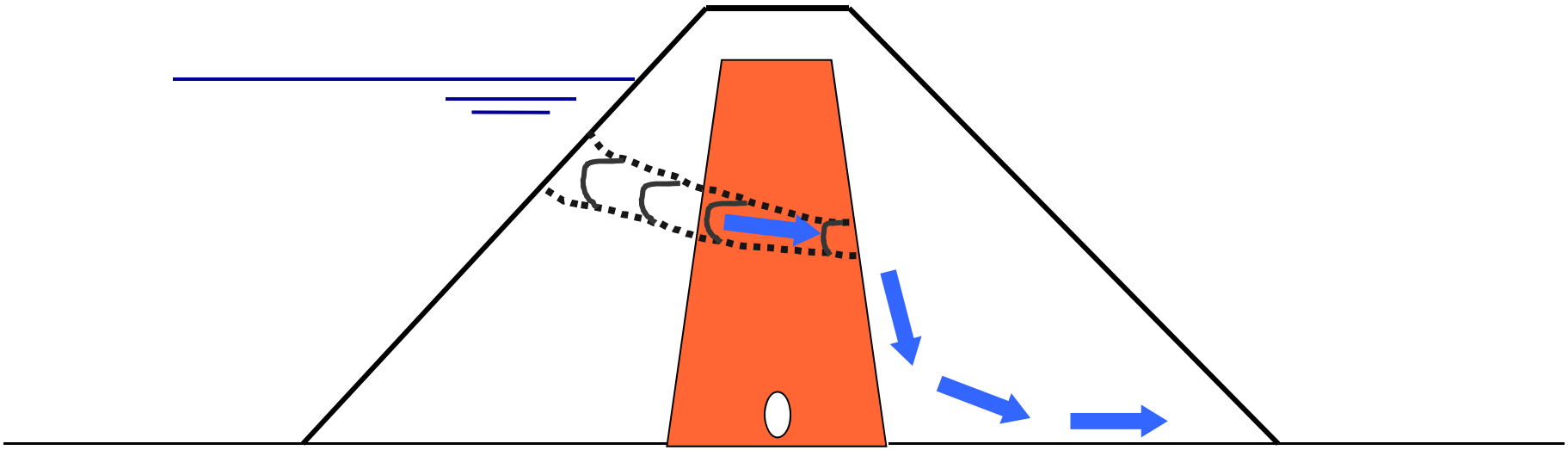
SOLUCION:

- QUE EL TERRENO SITUADO POR ENCIMA SIEMPRE “PESE”
- INCLINACION MAXIMA 0,25 – 0,30 (H):1(V)

EROSION INTERNA (I)

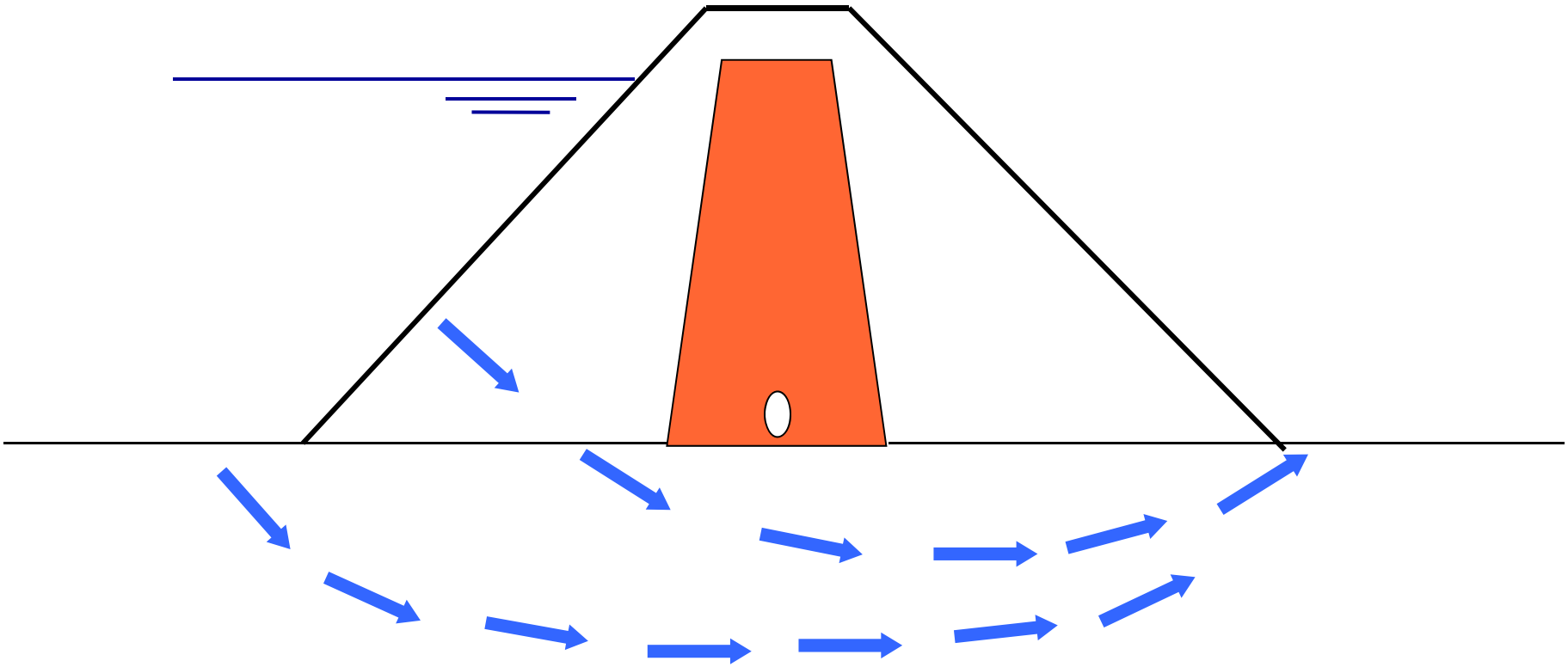


EROSION INTERNA (I)

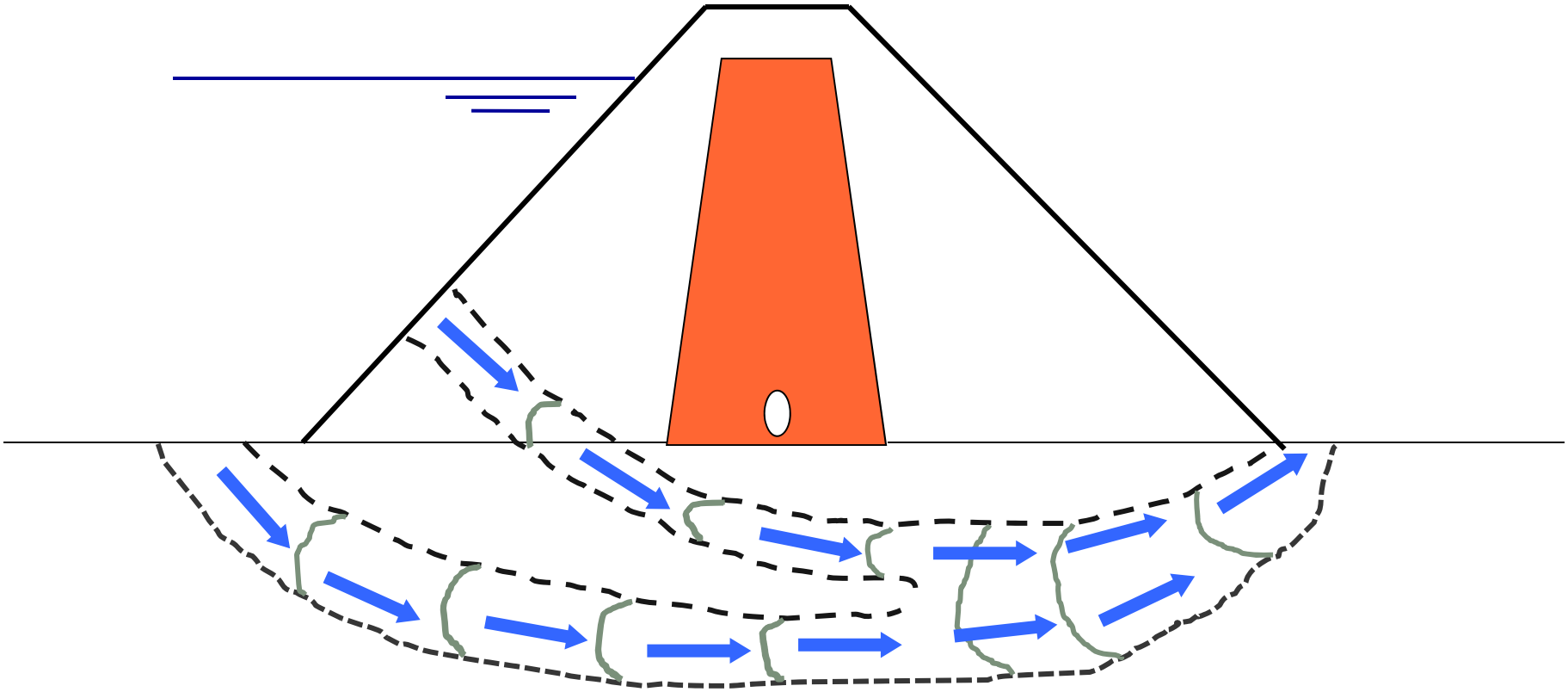


- ARRASTRE. MIGRACION DE FINOS. TUBIFICACION (PIPING)
- GRADIENTE CUALQUIERA EN CUALQUIER DIRECCION

EROSION INTERNA (II)

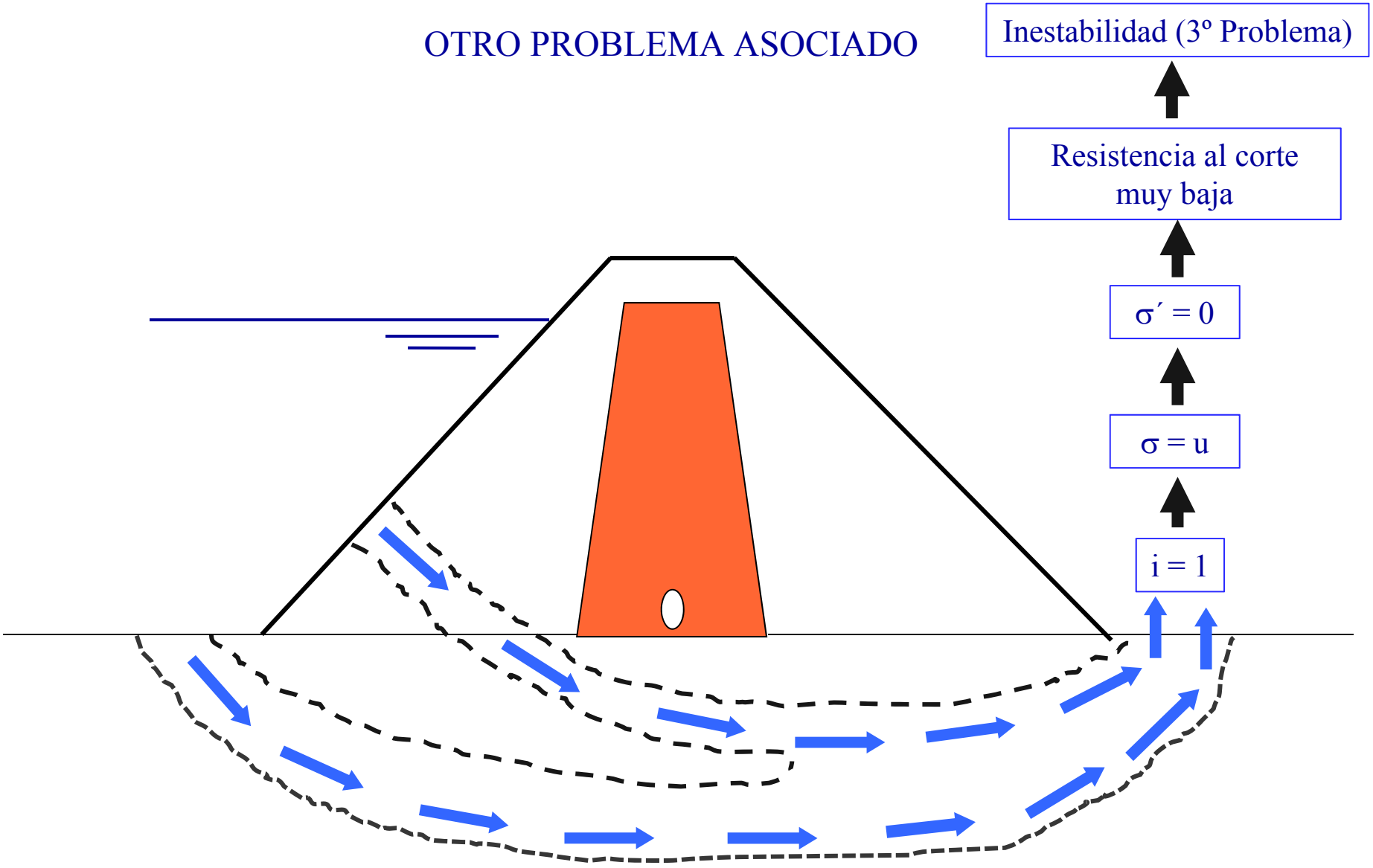


EROSION INTERNA (II)



- SUFUSION

OTRO PROBLEMA ASOCIADO

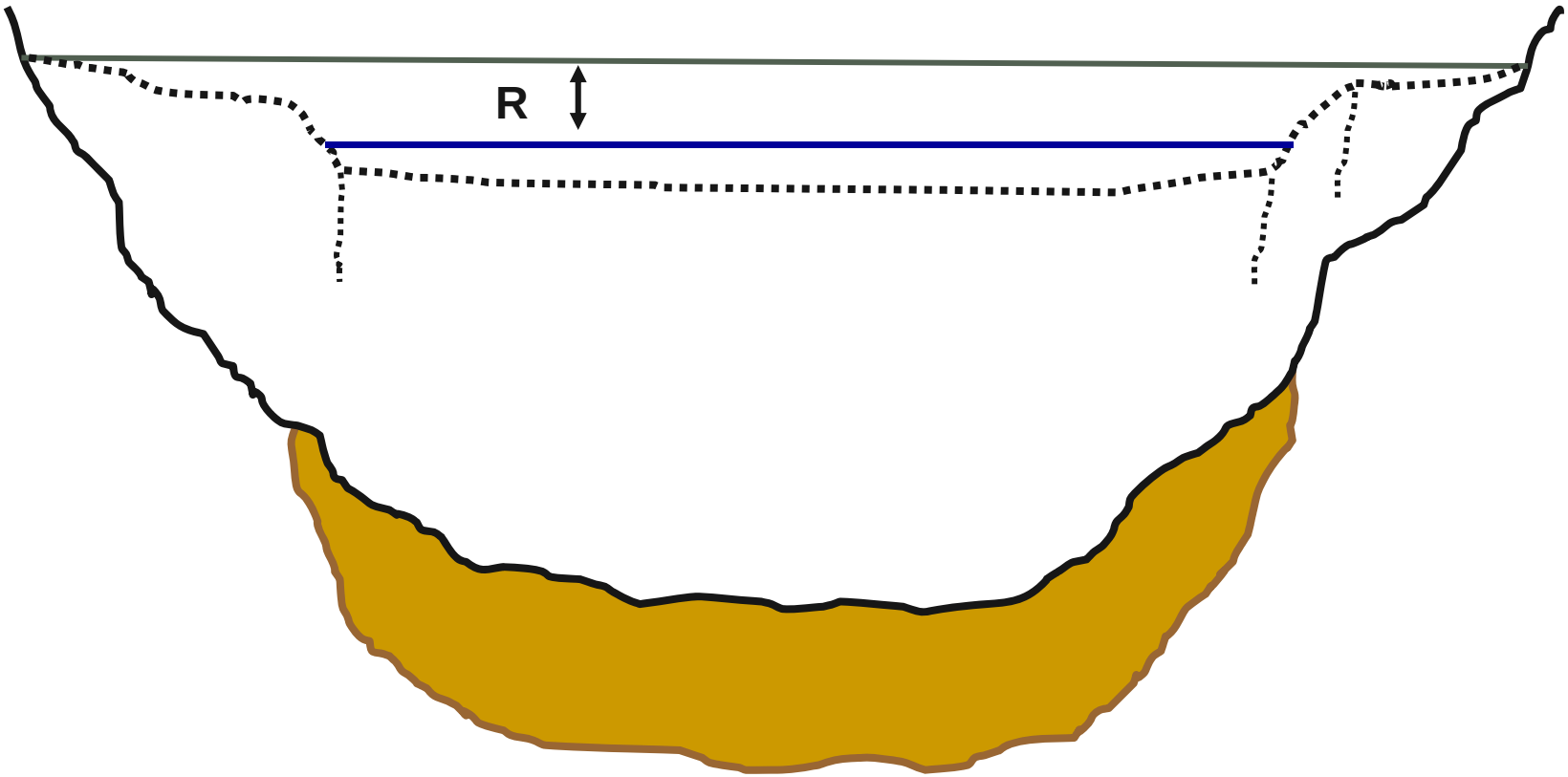


- LEVANTAMIENTO DE FONDO

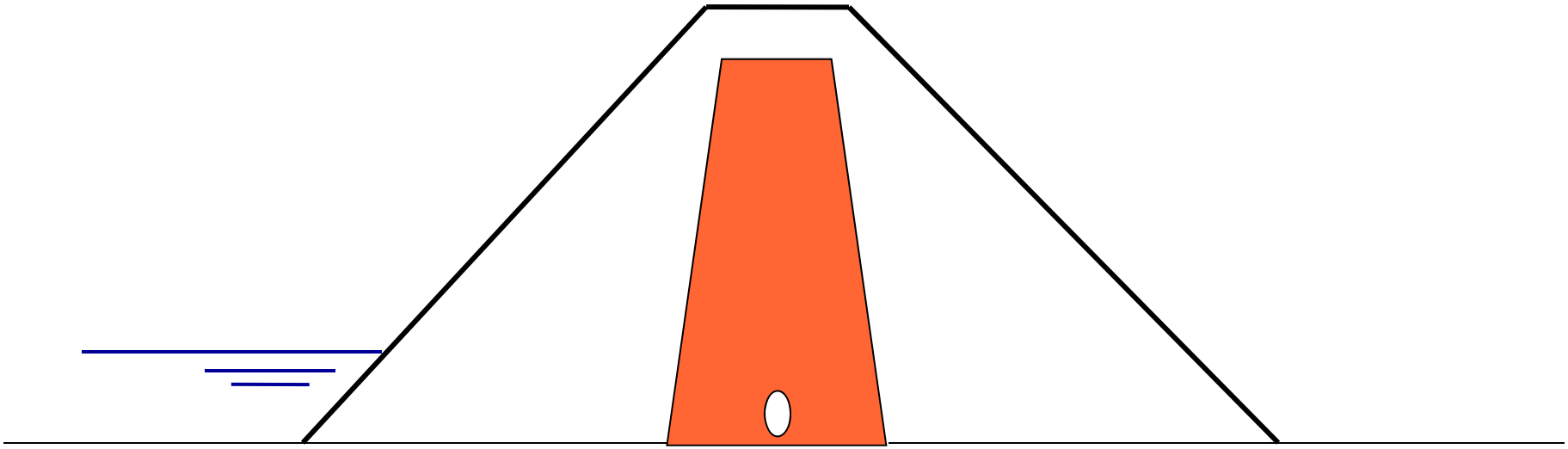
SEGUNDO PROBLEMA A RESOLVER:

ASIENTOS EXCESIVOS. GENERACION DE GRIETAS

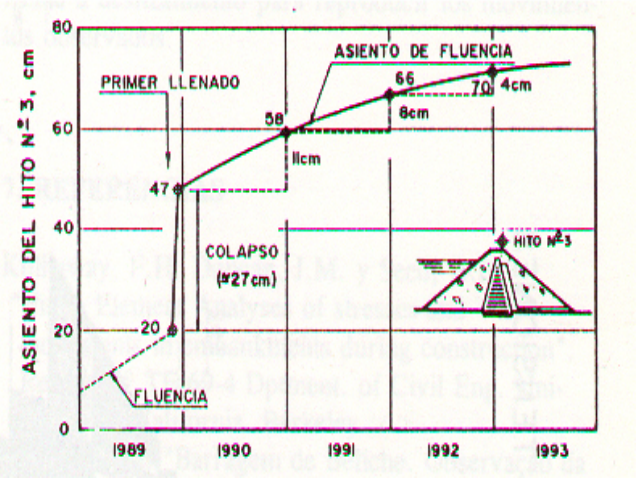
EL PROBLEMA DE LA FISURACION TRANSVERSAL

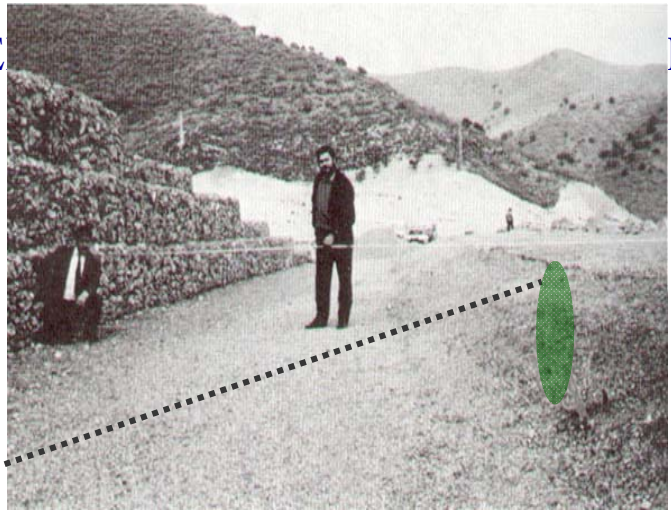


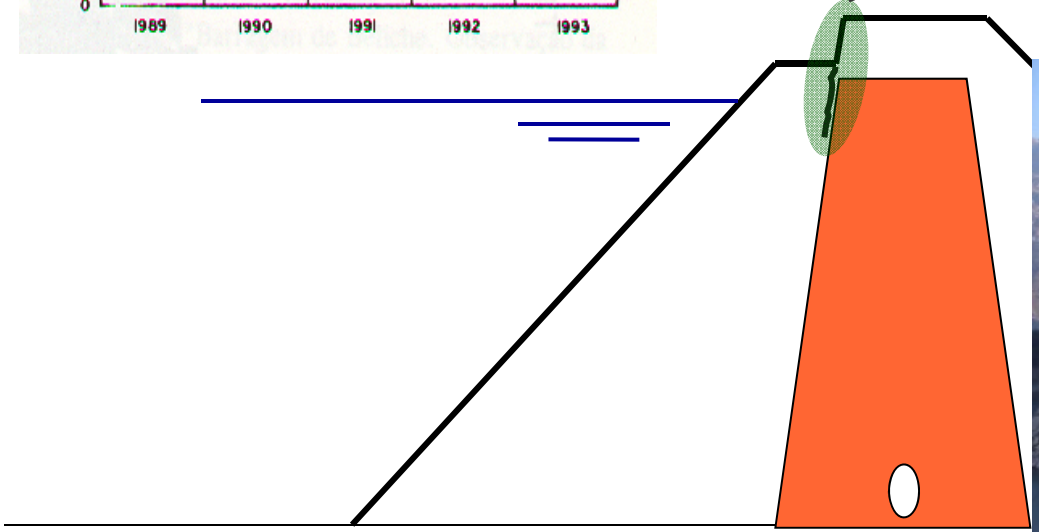
FISURACION LONGITUDINAL POR COLAPSO DEL ESPALDON DE AGUAS ARRIBA



FISURACION LONGITUDINAL POR COLAPSO DE BA

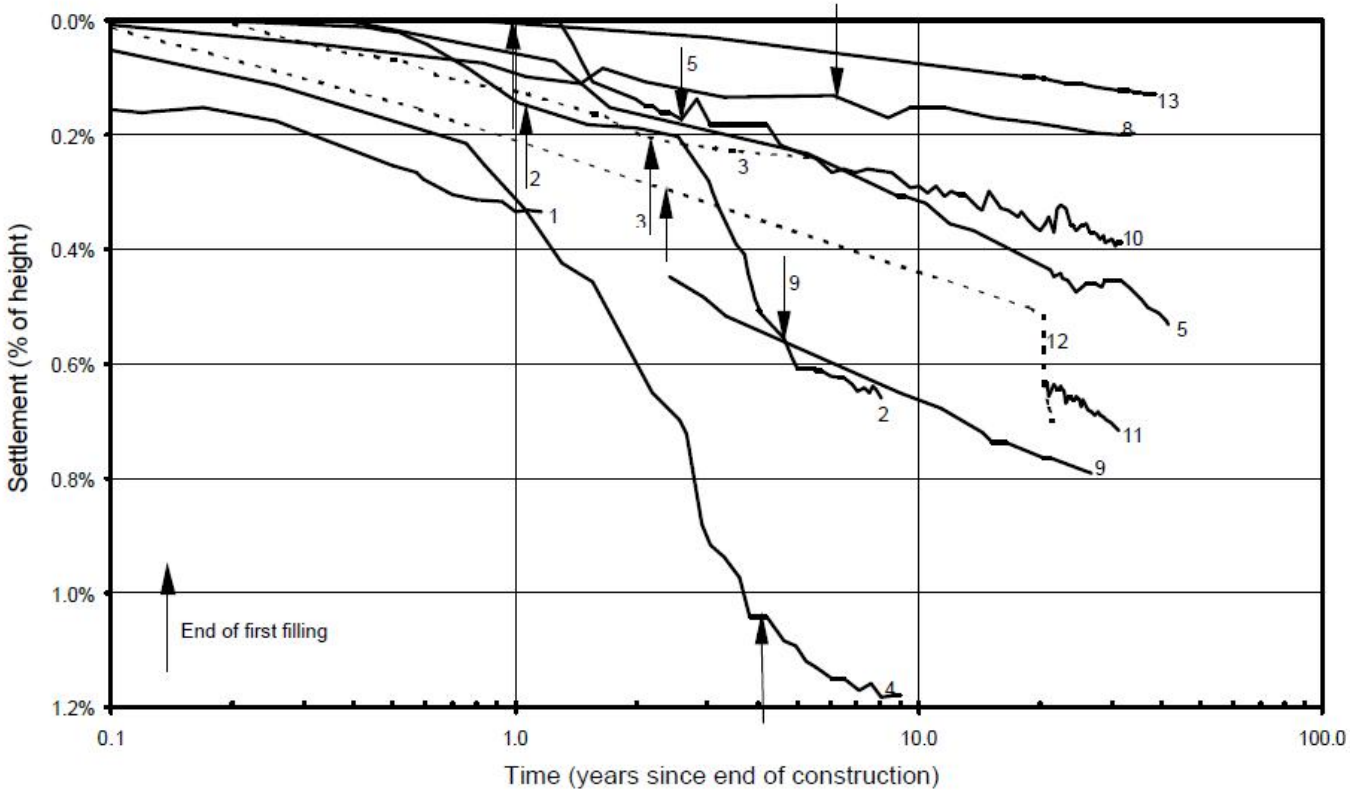






¡¡ MENOS PELIGROSA QUE LA ANTERIOR !!

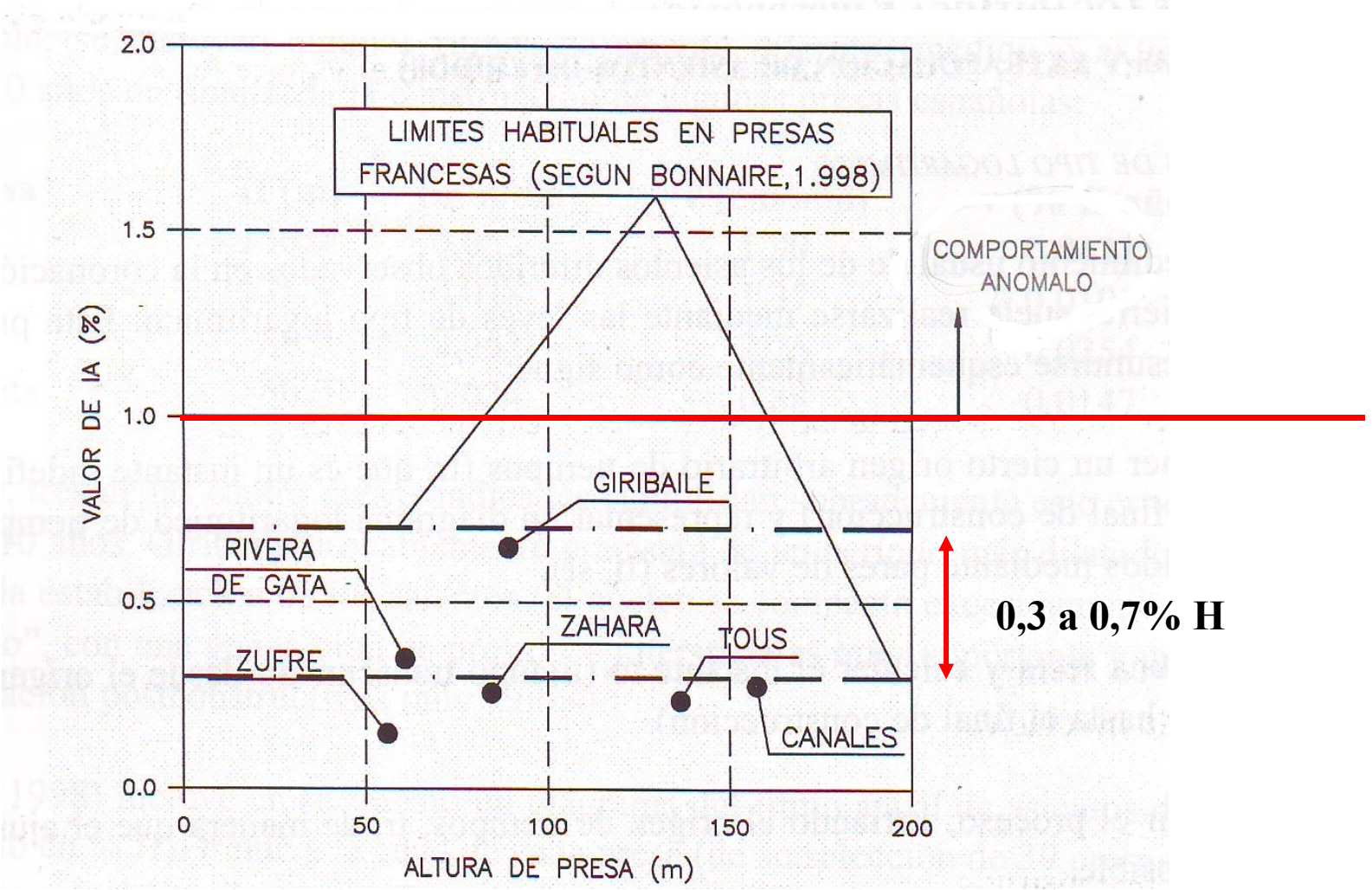
LOS ASIENTOS DIFERIDOS



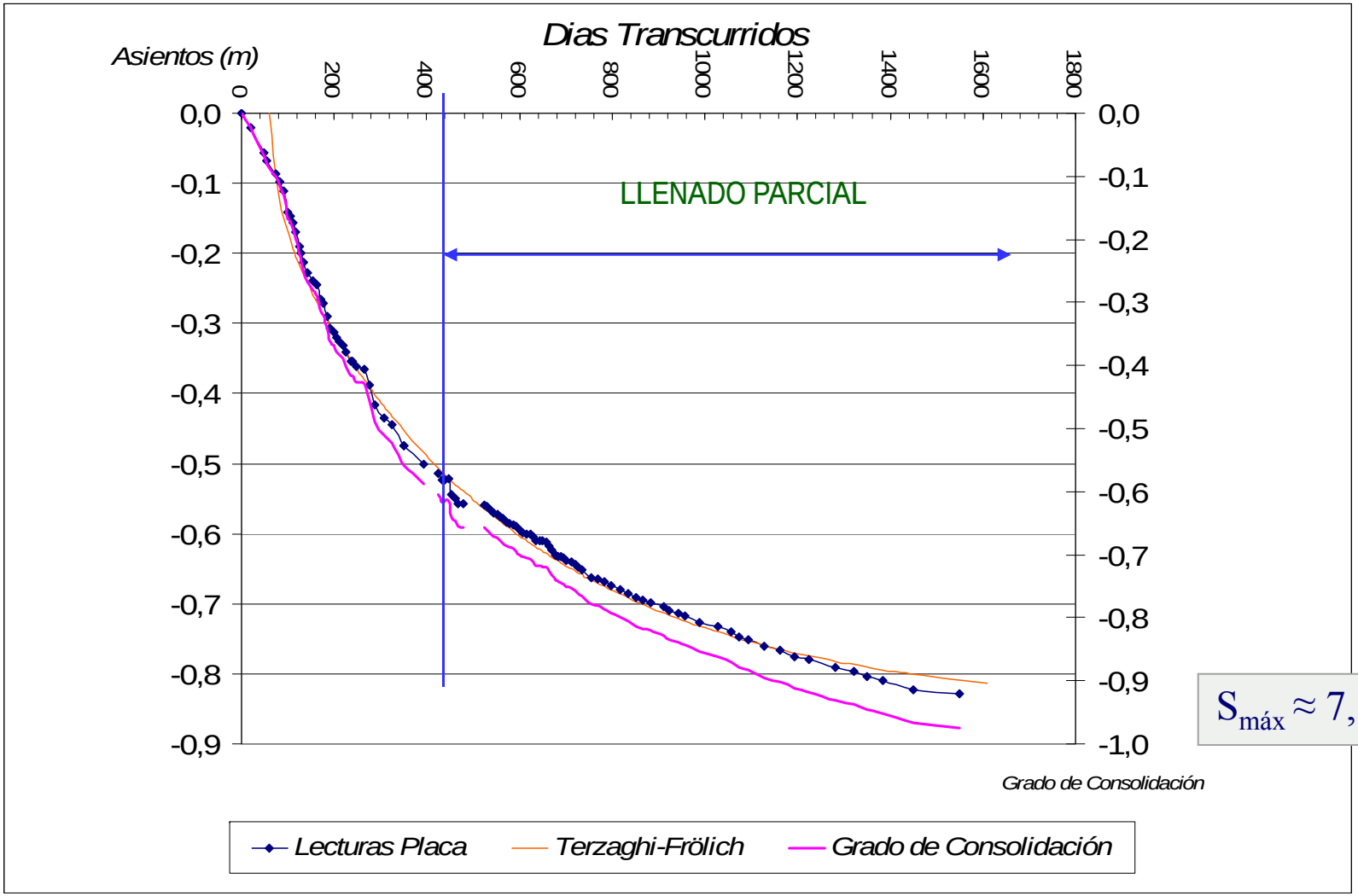
Siguen leyes del tipo: $s = a\,H^{b}$ o $s = \alpha \lg \frac{t_2}{t_1}$

Se suele considerar que un asiento anual inferior a 0,02%H es un movimiento estabilizado

CUANTIA GLOBAL DE LOS ASIENTOS



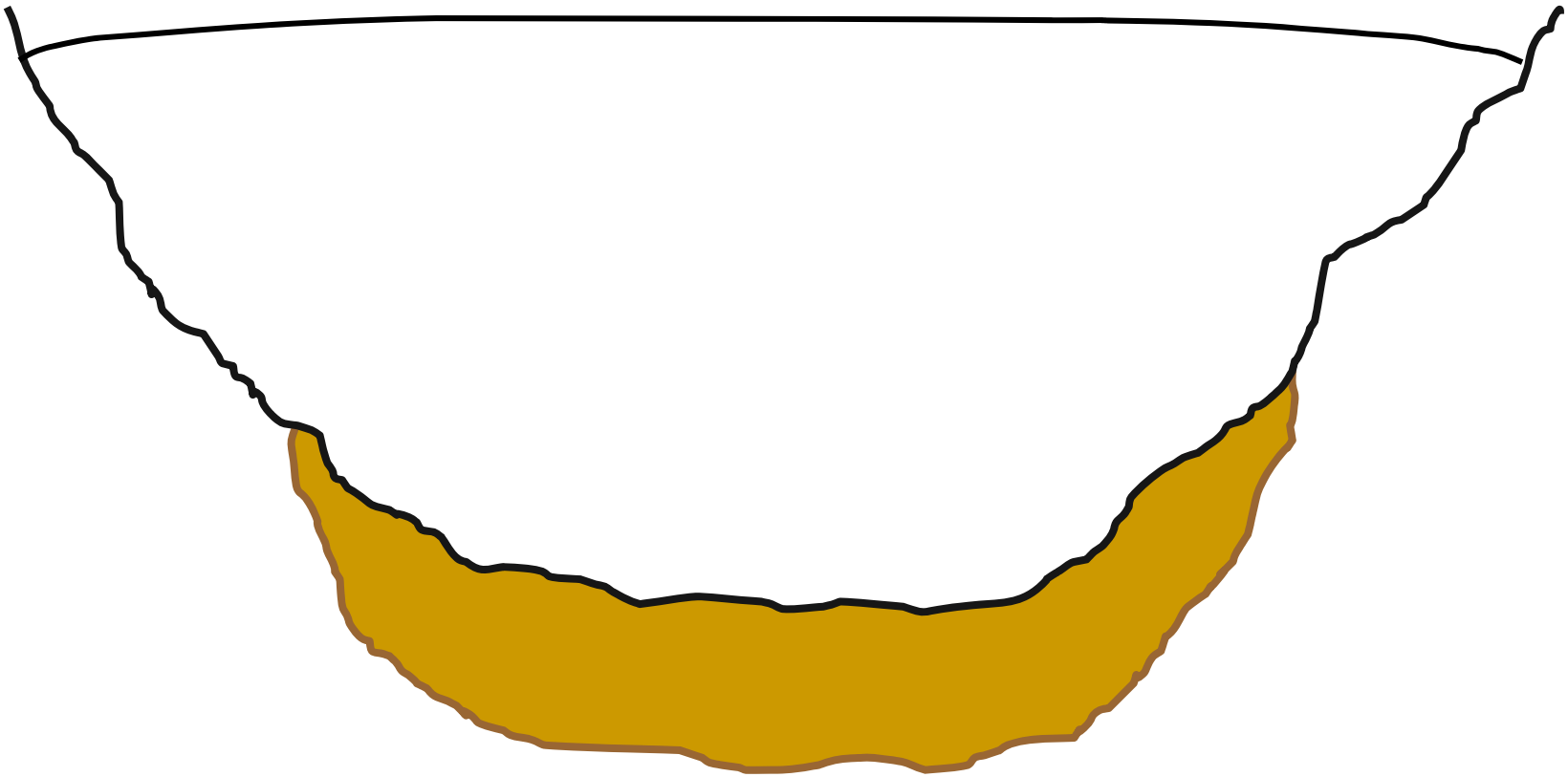
PERO UN ASIENTO > DEL 1% NO SIEMPRE IMPLICA UN COMPORTAMIENTO ANOMALO



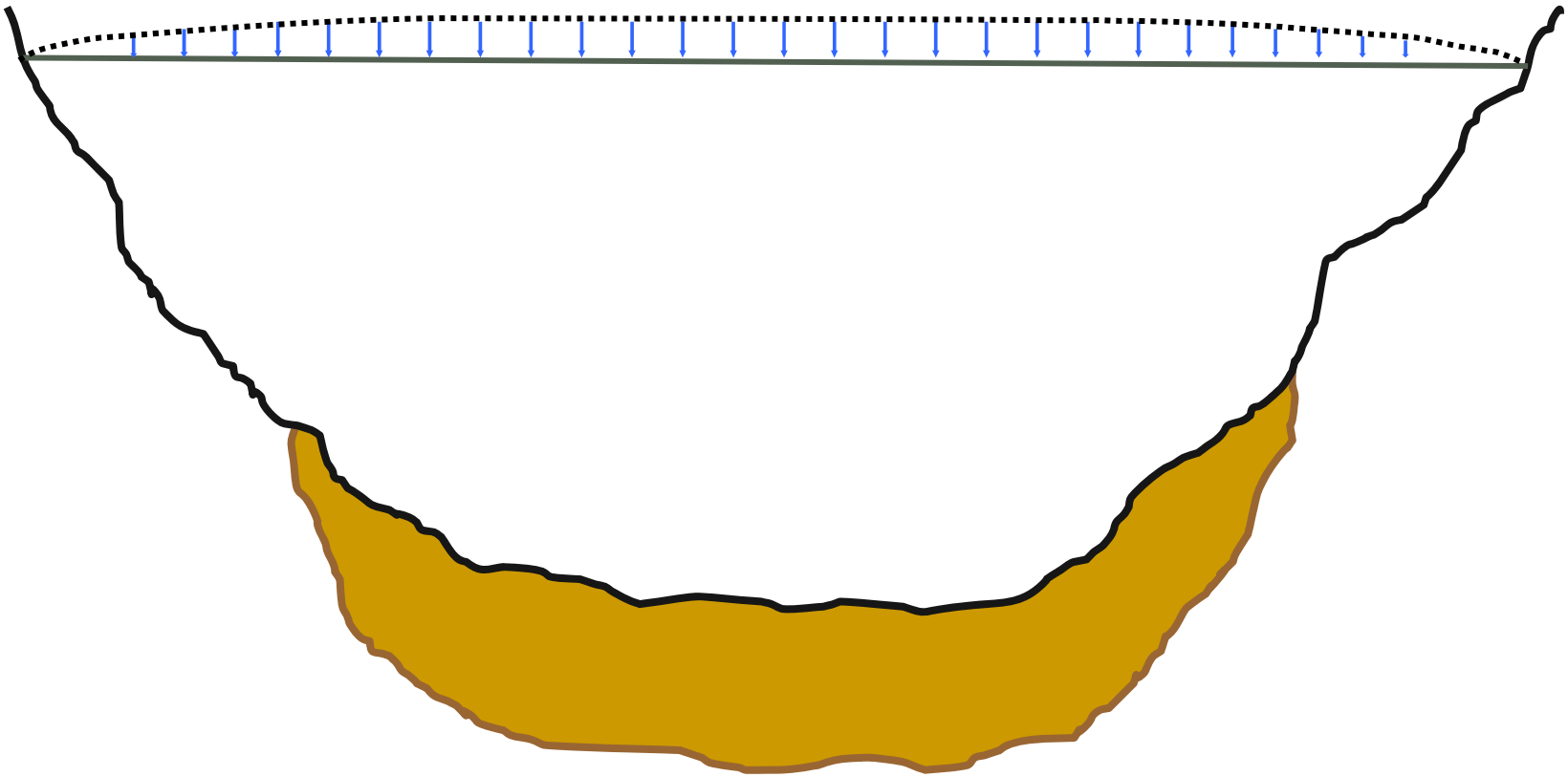
$S_{máx} \approx 7{,}5\%\ H$

SOLUCION AL PRIMER Y SEGUNDO PROBLEMA

UNA MUY FRECUENTE: DISPONER UNA CONTRAFLECHA

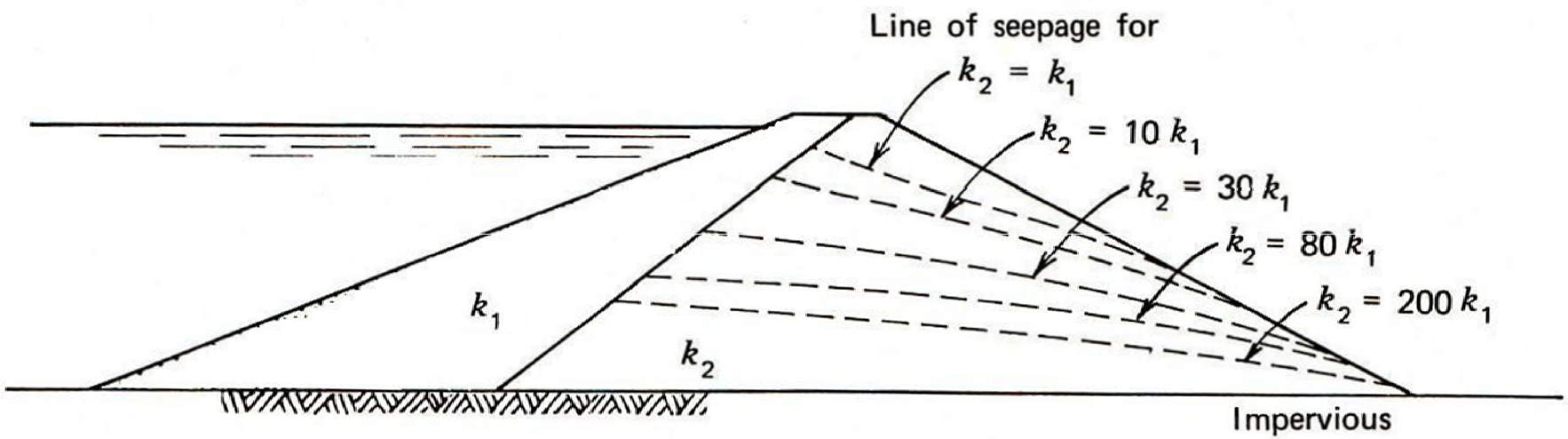


UNA MUY FRECUENTE: DISPONER UNA CONTRAFLECHA

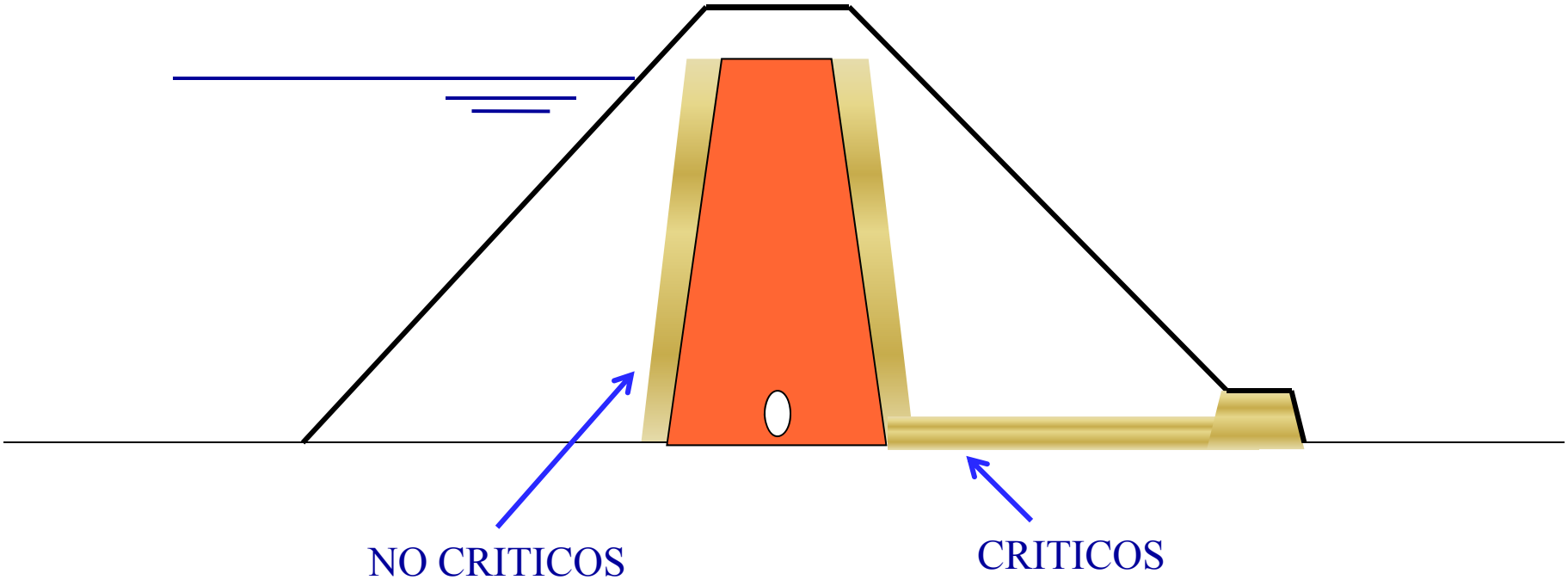


OTRA: DISPONER EN LA SECCION TIPO

- FILTROS GENEROSOS EN LOS SITIOS MAS ADECUADOS…….
- Y DRENES



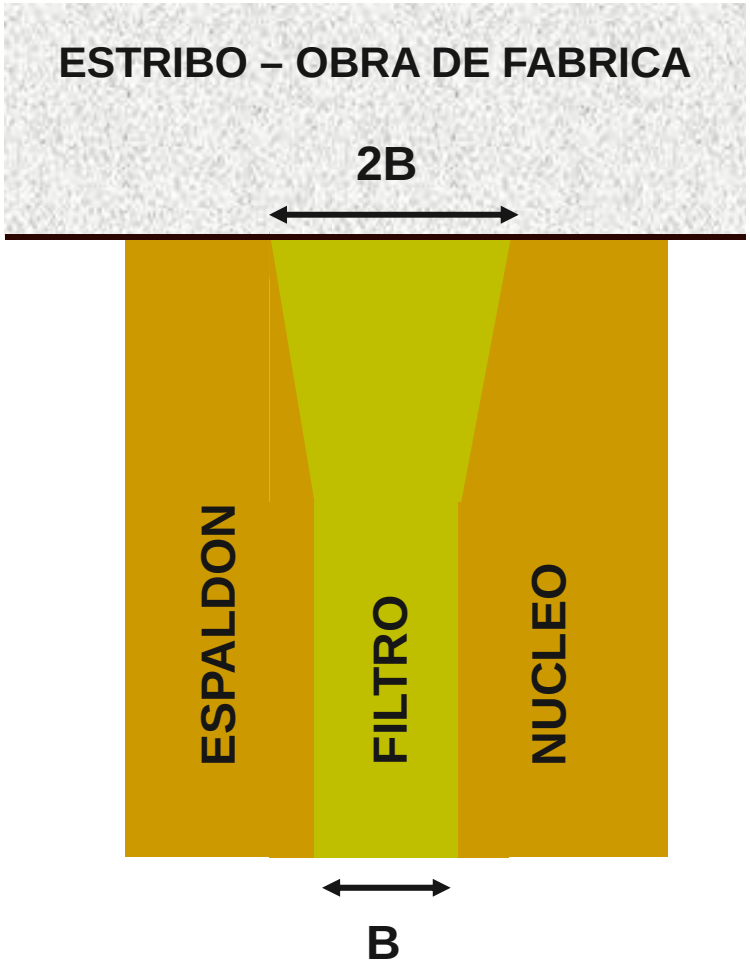
- FILTROS GENEROSOS EN LOS SITIOS MAS ADECUADOS …….



Ancho mínimo, medido horizontalmente, de 3,5 a 4,0 m. Mínimo 2,5 m

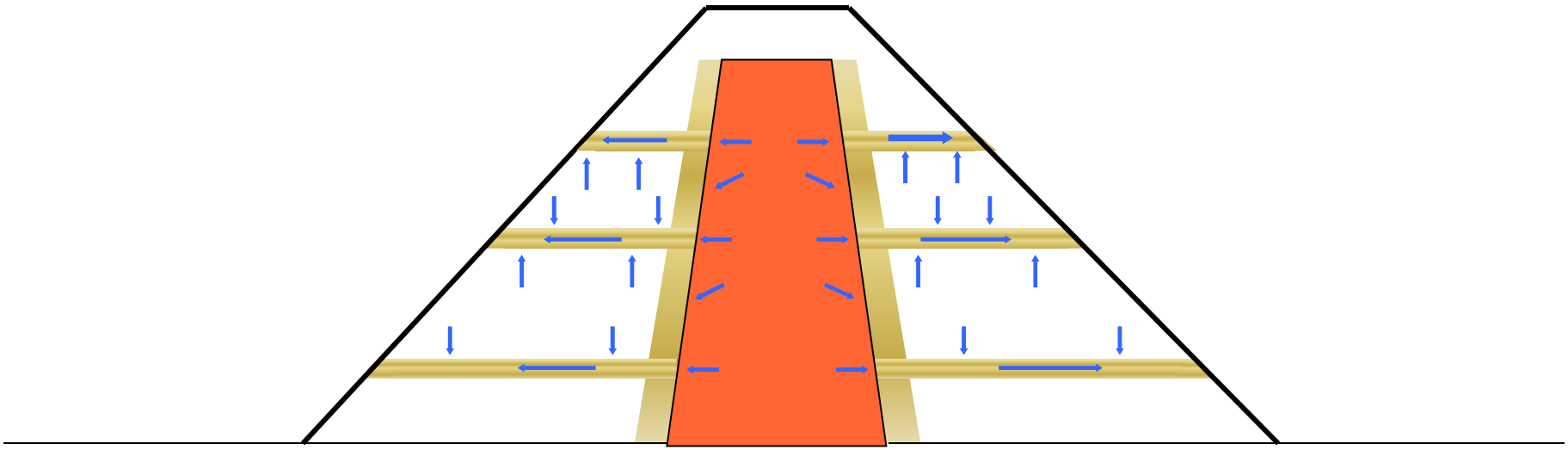
Horizontales: Espesor mínimo 1 m

UNA IMPORTANTE PRECAUCION A ADOPTAR

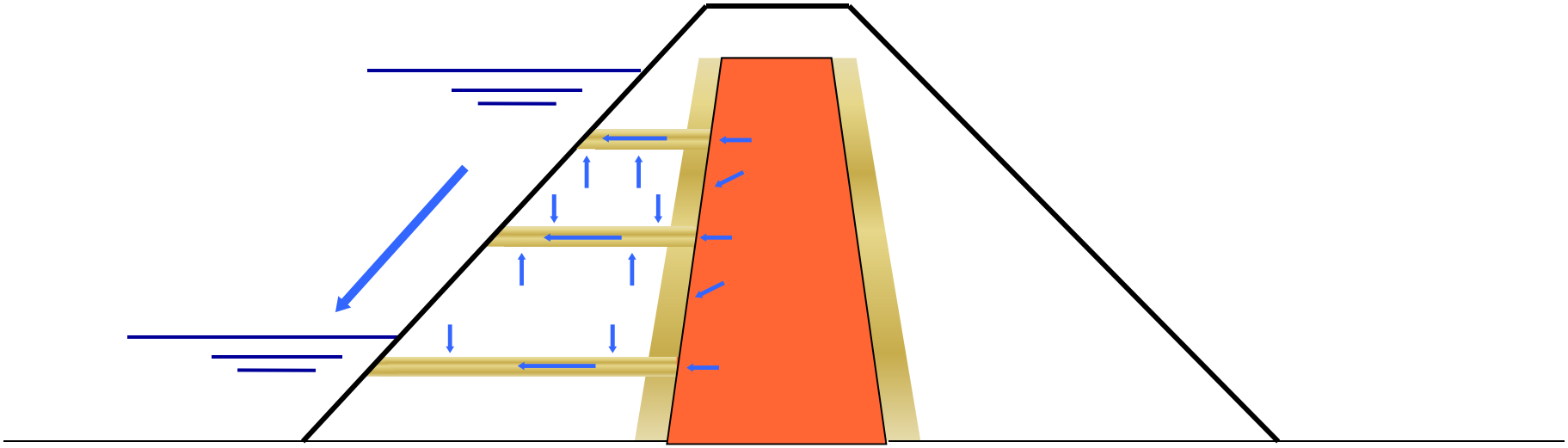


OTRAS RAZONES COMPLEMENTARIAS PARA DISPONER FILTROS Y DRENES

SI LA EJECUCION GENERA SOBREPRESIONES INTERSTICIALES DIFICILES DE DISIPAR EN EL NUCLEO O EN LOS ESPALDONES ……..



O CUANDO SE QUIEREN LIBERAR LAS PRESIONES INTERSTICIALES
RAPIDAMENTE TRAS UN DESEMBALSE



Espesor mínimo: 20 cm (Arena) - 40 cm (Grava) → Una tongada

En la práctica se colocan espesores mayores → 50 cm a 1 m (Dos tongadas)

FILTROS CRITICOS

CRITERIOS DE DISEÑO DE FILTROS SEGÚN LA GUIA TECNICA Nº 2 (TOMO 2)

Si la granulometría del Material Base (a proteger) tiene tamaños superiores a 5 mm, lo primero que hay que hacer es corregirla: $$P(D)^{*} = \frac{P(D)}{P(5\ mm)} \times 100$$

Tamaños máximos del D_{15} del filtro

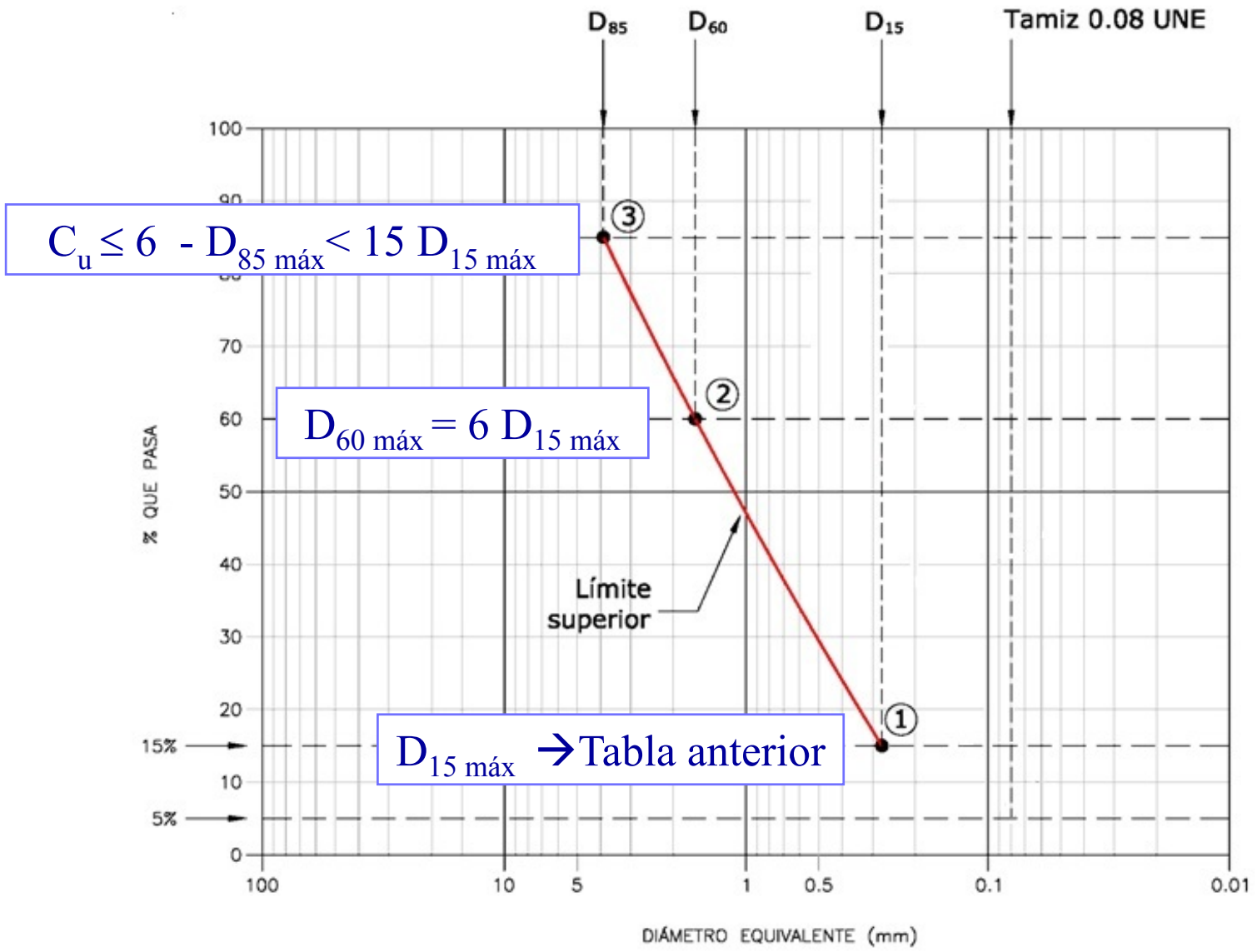
Grupo	Tipo de suelo	% Finos (*) (#0,08 UNE)	Máximo valor de D_{15}
1	Limos finos y arcillas	> 85	9 d85 (>0,2 mm)
2	Arenas, limos, arcillas y arenas limo-arcillosas	40 - 85	0,5 mm
3	Arenas y gravas arcillosas y limosas	15 - 39	Variable de 0,5 mm a 4 d85 (2)
4	Arenas y gravas	< 15	4 d85

(*) De la granulometría corregida. No de la original.

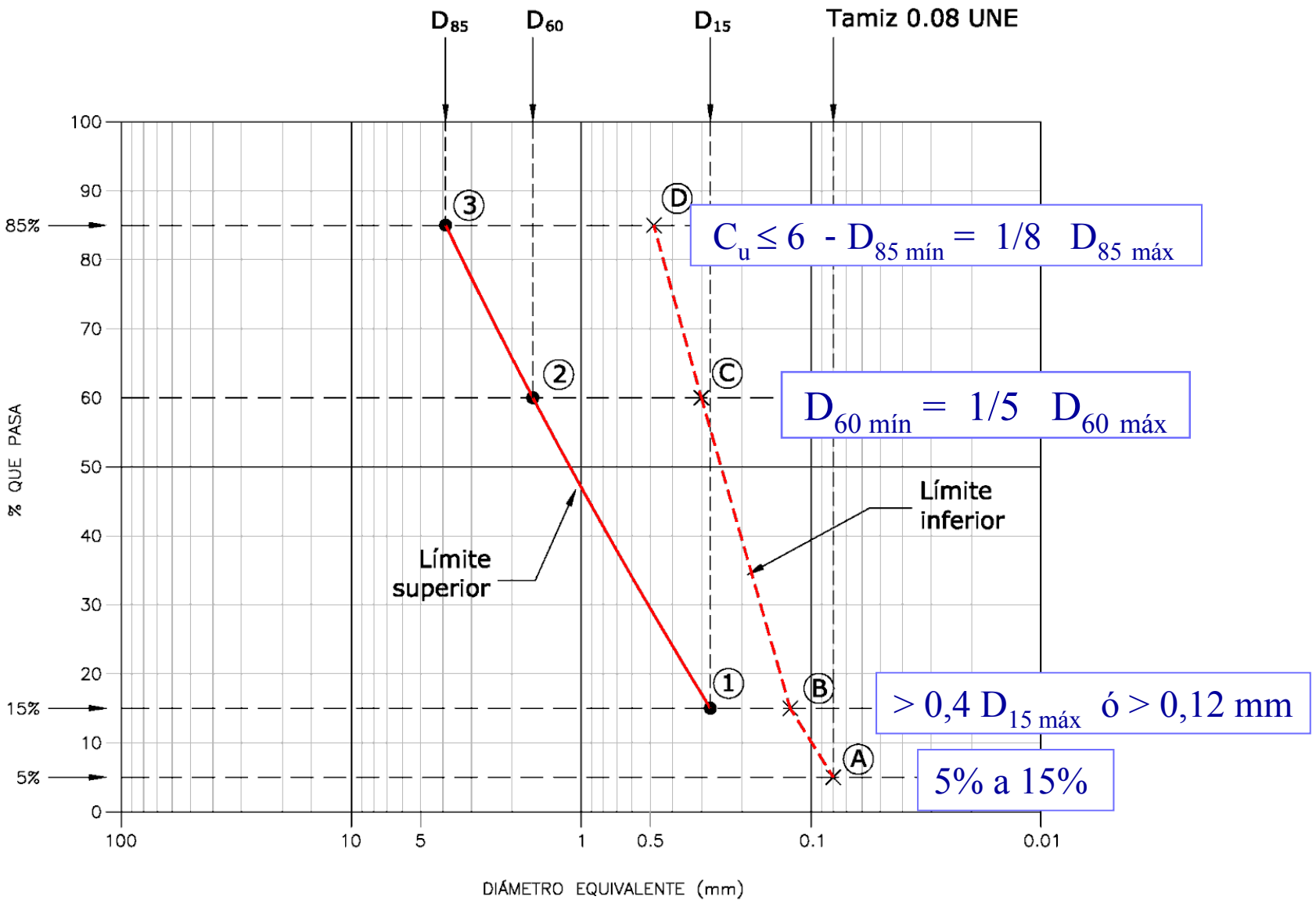
(1) Esta Tabla es una transcripción adaptada de la indicada por el manual de USDA (1994).

(2) Para suelos base del grupo 3 el máximo valor de D_{15} se interpola linealmente entre los valores indicados en función del % de finos.

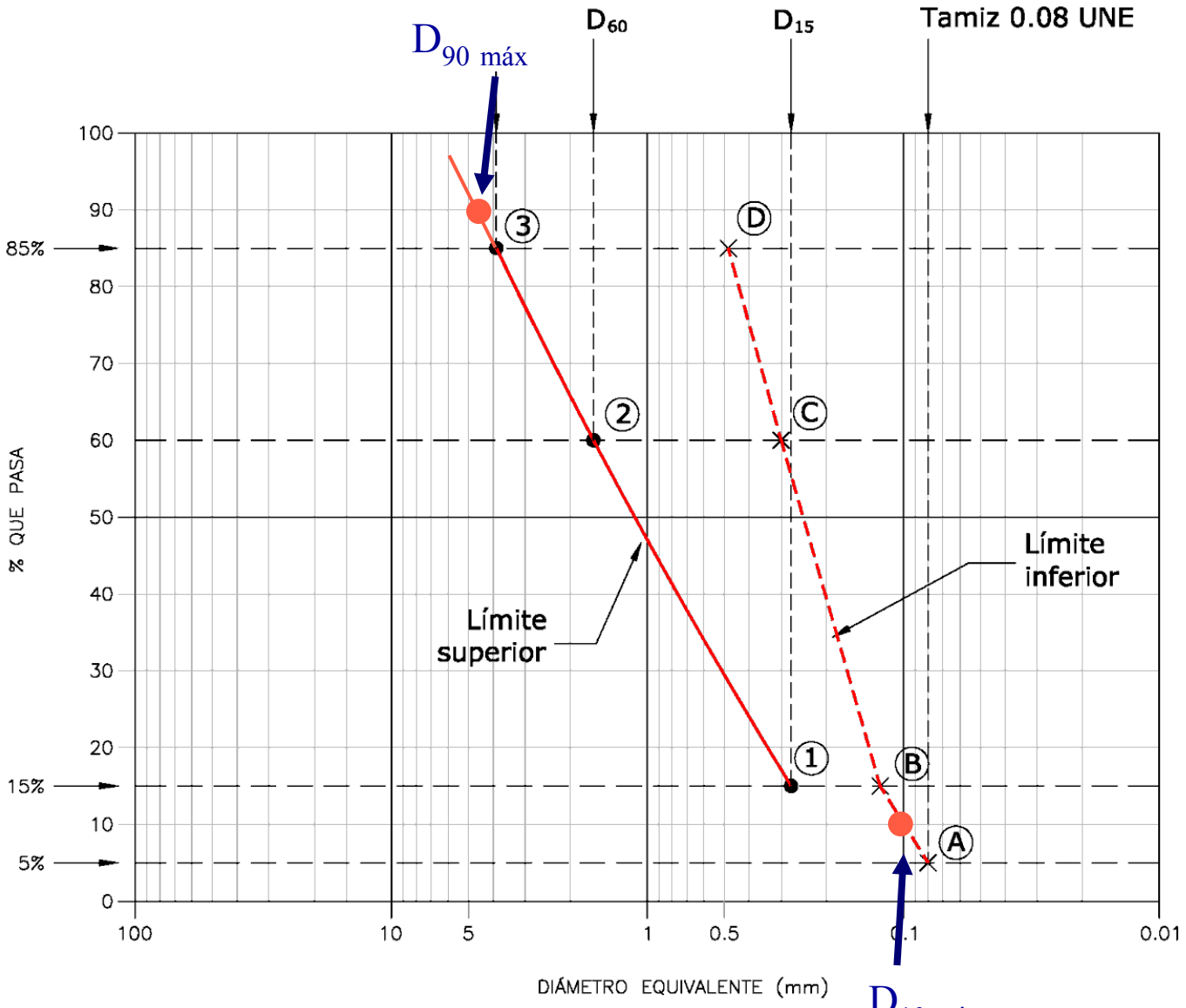
CRITERIOS DE DISEÑO DE FILTROS SEGÚN LA GUIA TECNICA Nº 2 (TOMO 2)



CRITERIOS DE DISEÑO DE FILTROS SEGÚN LA GUIA TECNICA Nº 2 (TOMO 2)

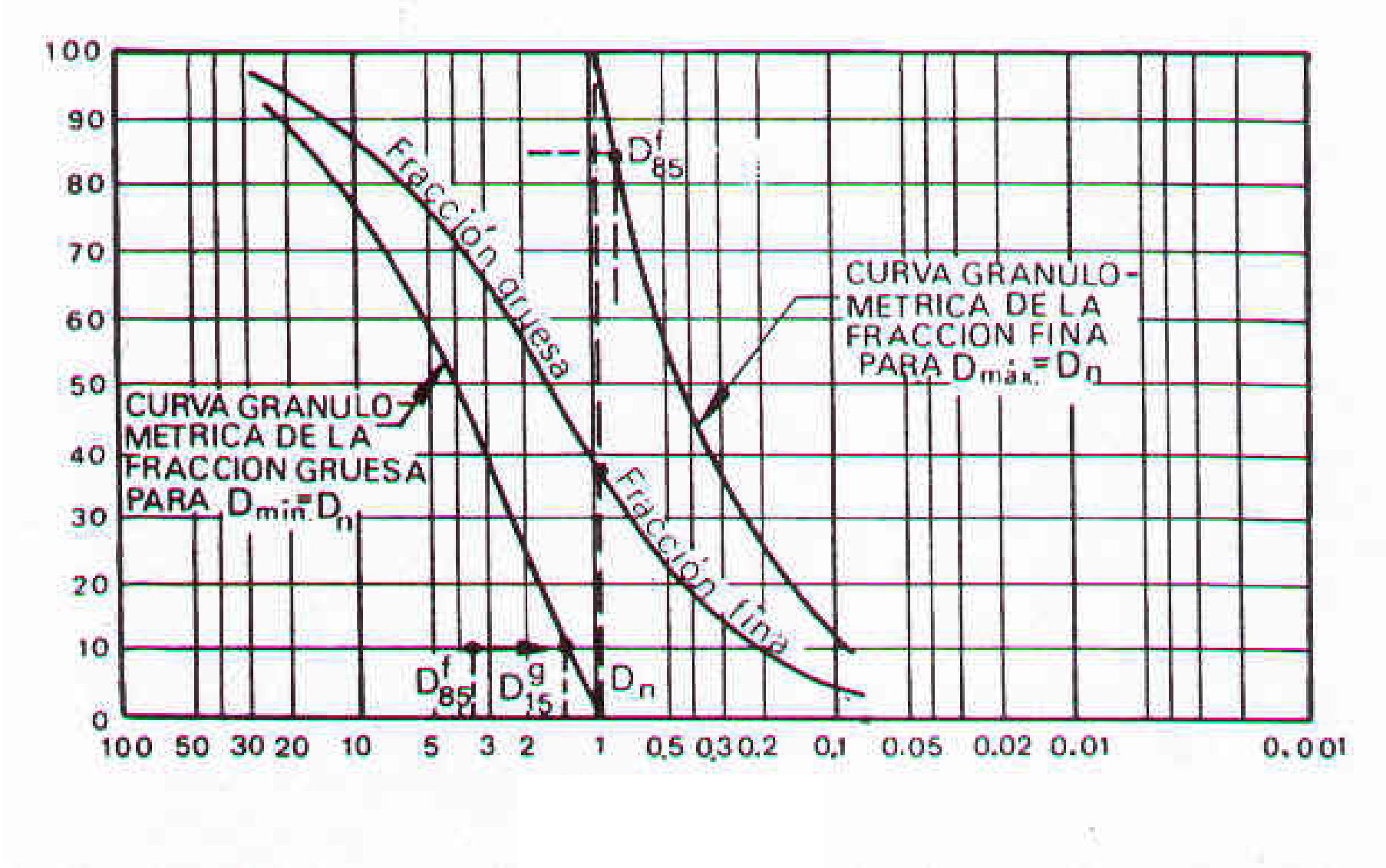


CRITERIOS DE DISEÑO DE FILTROS SEGÚN LA GUIA TECNICA Nº 2 (TOMO 2)

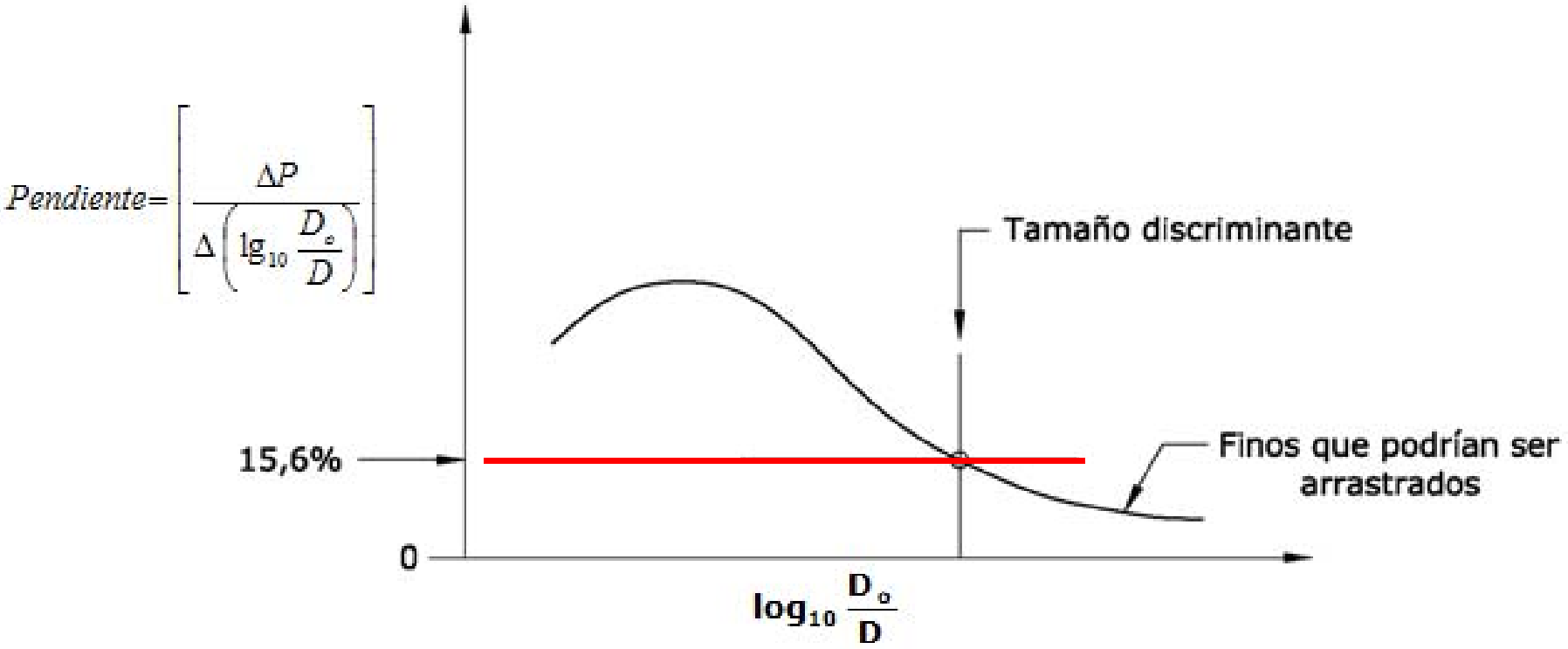


$D_{90\ máx}/D_{10\ máx}$ → Evitar segregación

CRITERIOS DE DISEÑO DE FILTROS SEGÚN LA GUIA TECNICA Nº 2 (TOMO 2)



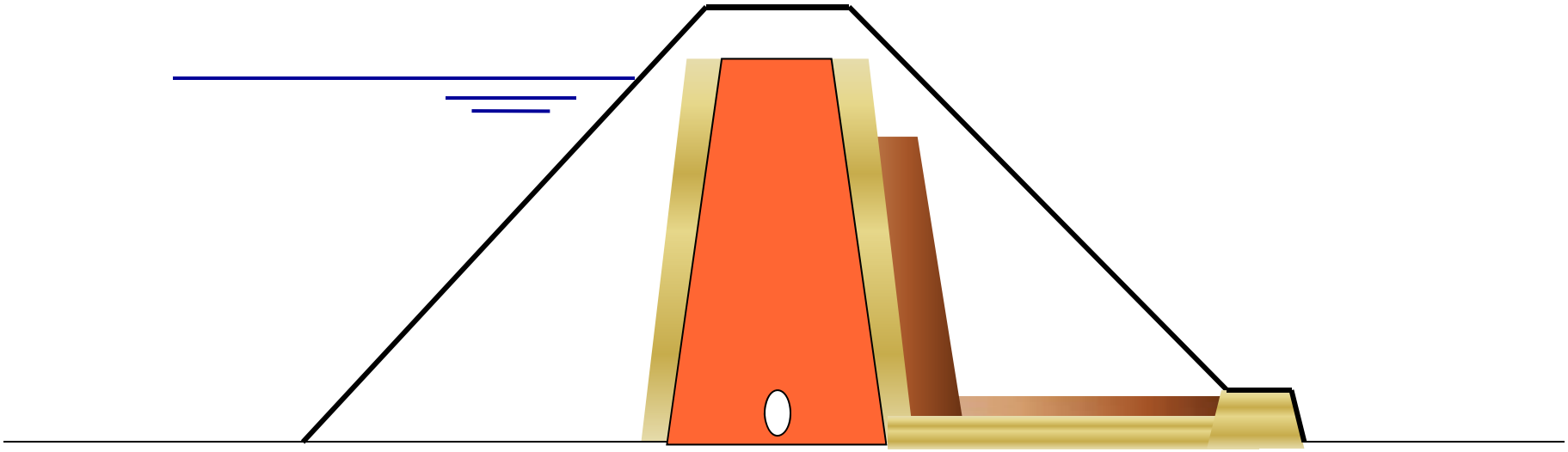
CRITERIOS DE DISEÑO DE FILTROS SEGÚN LA GUIA TECNICA Nº 2 (TOMO 2)



Siempre que $P_D - P_{D/10} > 15,7\%$ → Condición de autoestabilidad para la granulometría del filtro

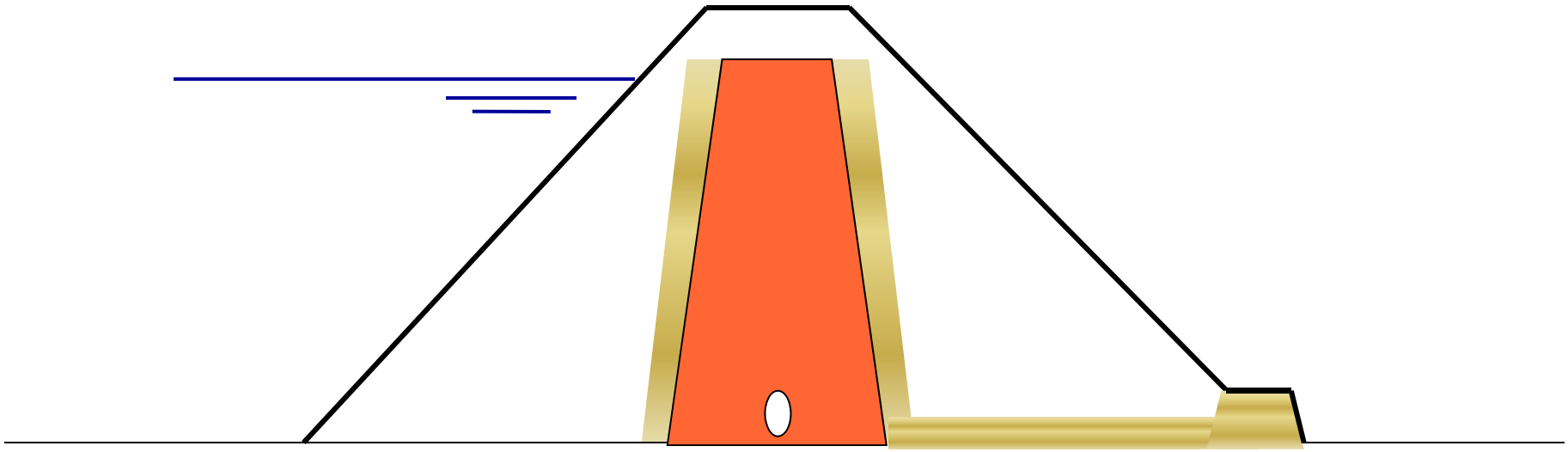
Pero además de ser filtro y autoestable, la granulometría debe tener una permeabilidad mayor que la del suelo al cual protege, para que pueda ser un dren efectivo.

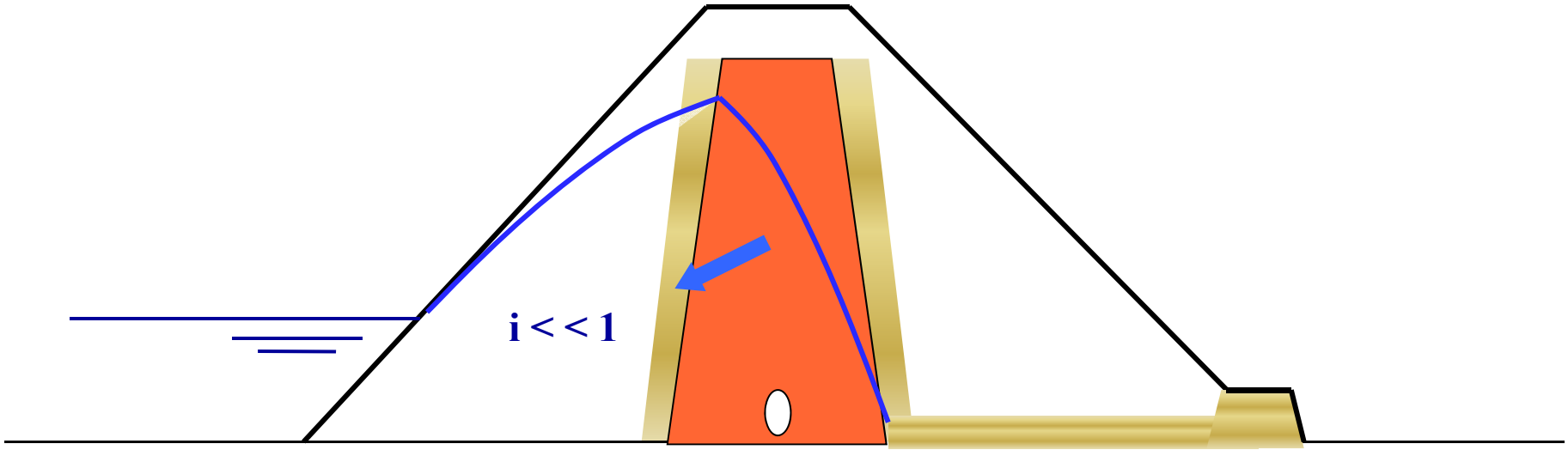
Si su granulometría es demasiado fina no drenará.



LA SOLUCION ES DISPONER UN FILTRO DEL FILTRO CON MISION DRENANTE

FILTROS NO CRITICOS





Recomendación de Sherard: Gravas relativamente gruesas o un todo de uno de cantera, con un $D_{máx}$ de 150 a 200 mm, no necesita ser comprobado con los criterios clásicos, siendo esta una práctica razonable y segura.

Materiales para Filtros y Drenes

- Evitar granulometrías muy extendidas: Cola Inestable
- Granulometrías 50 a 100 veces más permeables que la del suelo base
- Para evitar Segregación:
  - $D_{máx}$= 50-75 mm
  - Contenido de Arena: > 40%
- No Cohesivos: Autosellado de fisuras abiertas (Ensayo de Vaughan)

TERCER PROBLEMA: INESTABILIDAD DEL TALUD O EL CIMIENTO

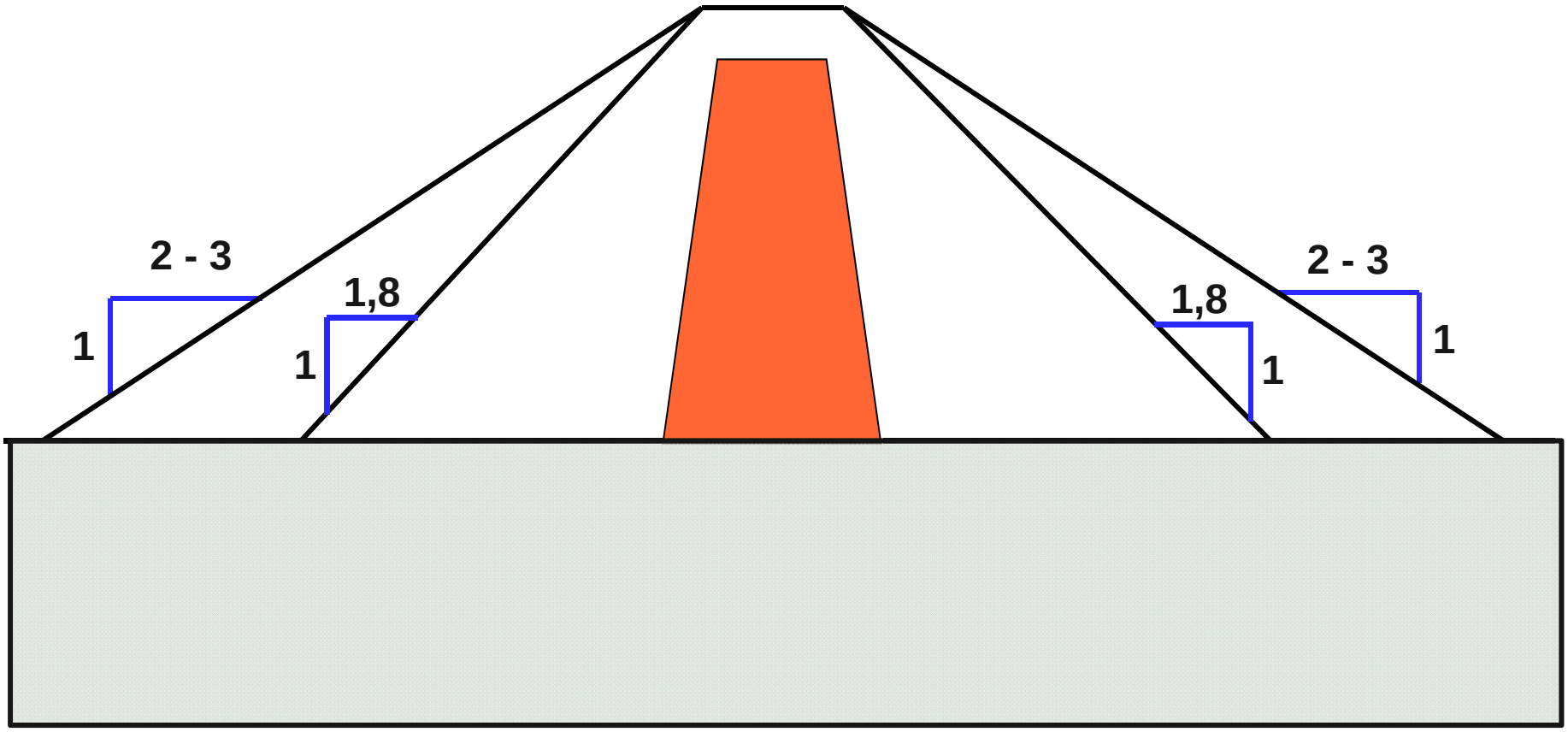
CRITERIOS GENERALES DE DISEÑO DE TALUDES

- No hay ninguna regla fija para seleccionar los taludes exteriores de una presa
- Se seleccionan basándose en presas similares y deben comprobarse con cálculos de estabilidad
- Dependen de la zonificación interna y de la resistencia de los materiales y de la cimentación
- La inclinación de los taludes depende de la contribución del núcleo a la estabilidad integral
- Se pueden adoptar taludes más verticales porque los materiales más resistentes están colocados donde son más efectivos para contrarrestar las fuerzas cortantes actuantes y porque los filtros y drenes controlan y reducen las eventuales presiones intersticiales

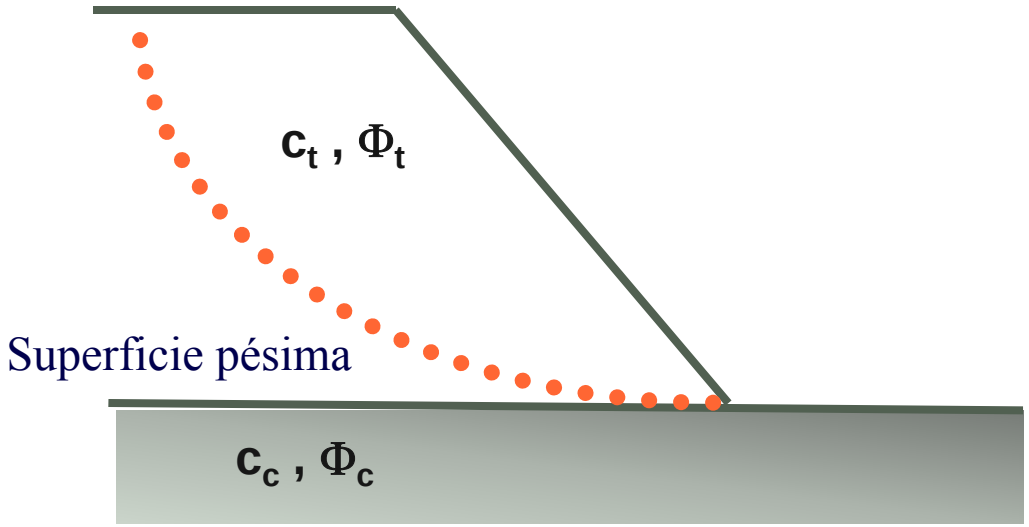
TALUDES EXTERIORES

Cimentación de buena calidad
Espaldones térreos

Cimentación de buena calidad
Espaldones granulares gruesos

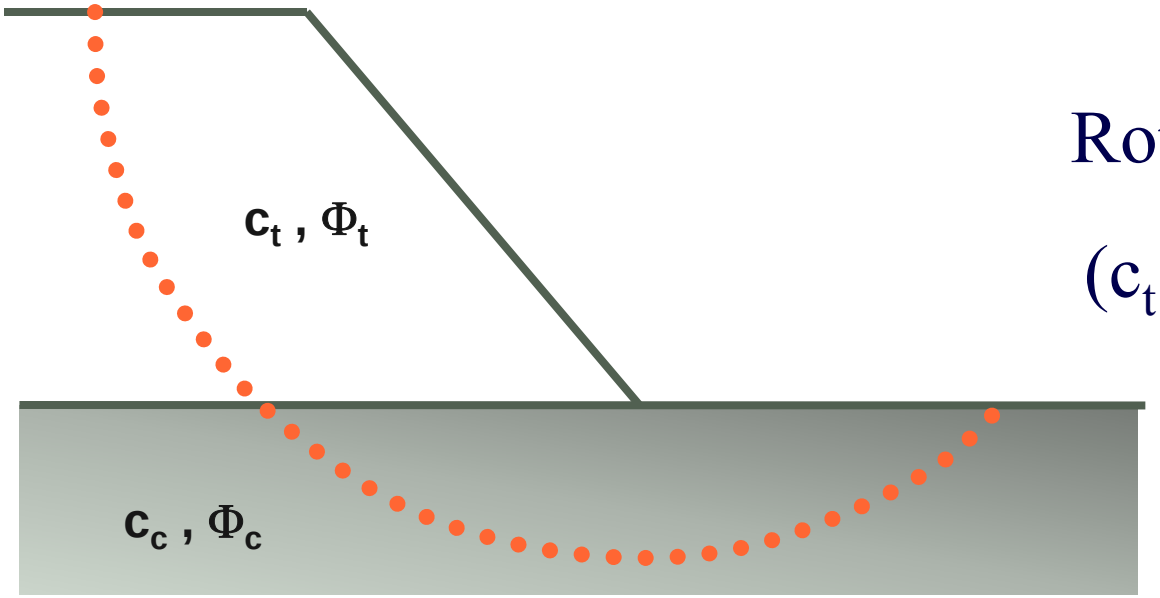


Sección Tipo: Cálculo de Estabilidad



Rotura de Pie

$(c_c , \Phi_c) > (c_t , \Phi_t)$



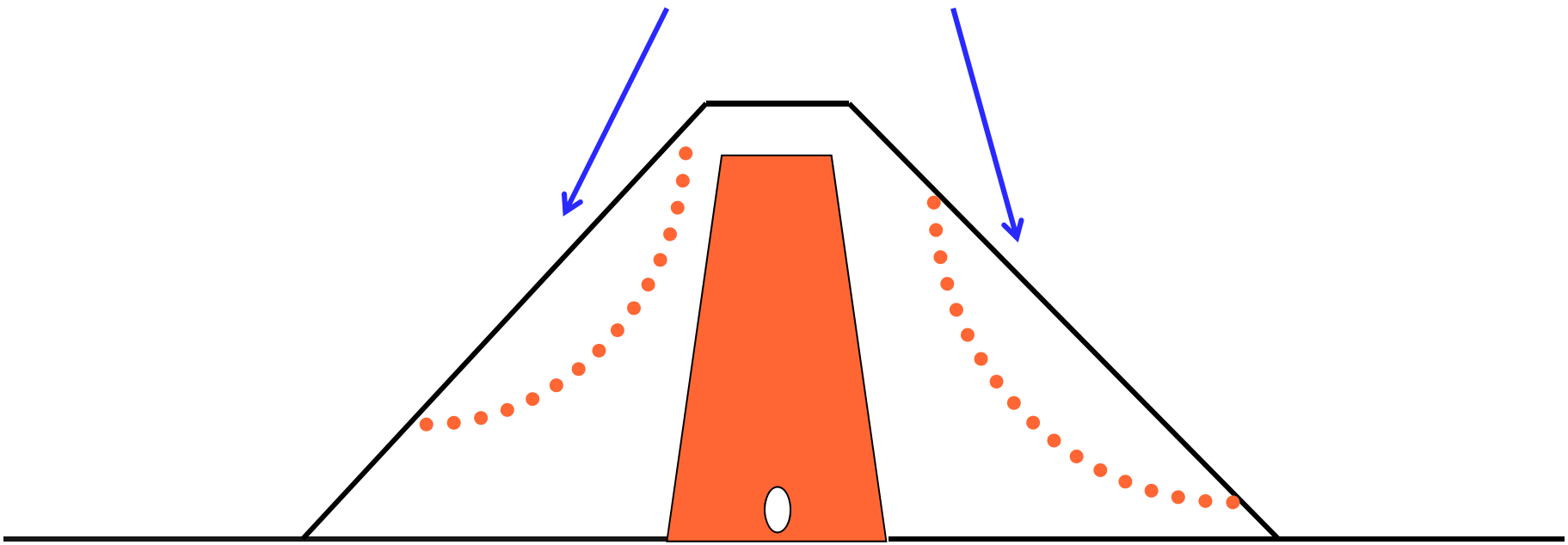
Rotura de Cimiento

$(c_t , \Phi_t) > (c_c , \Phi_c)$

Cálculo de Estabilidad: Fin de Construcción

En términos totales

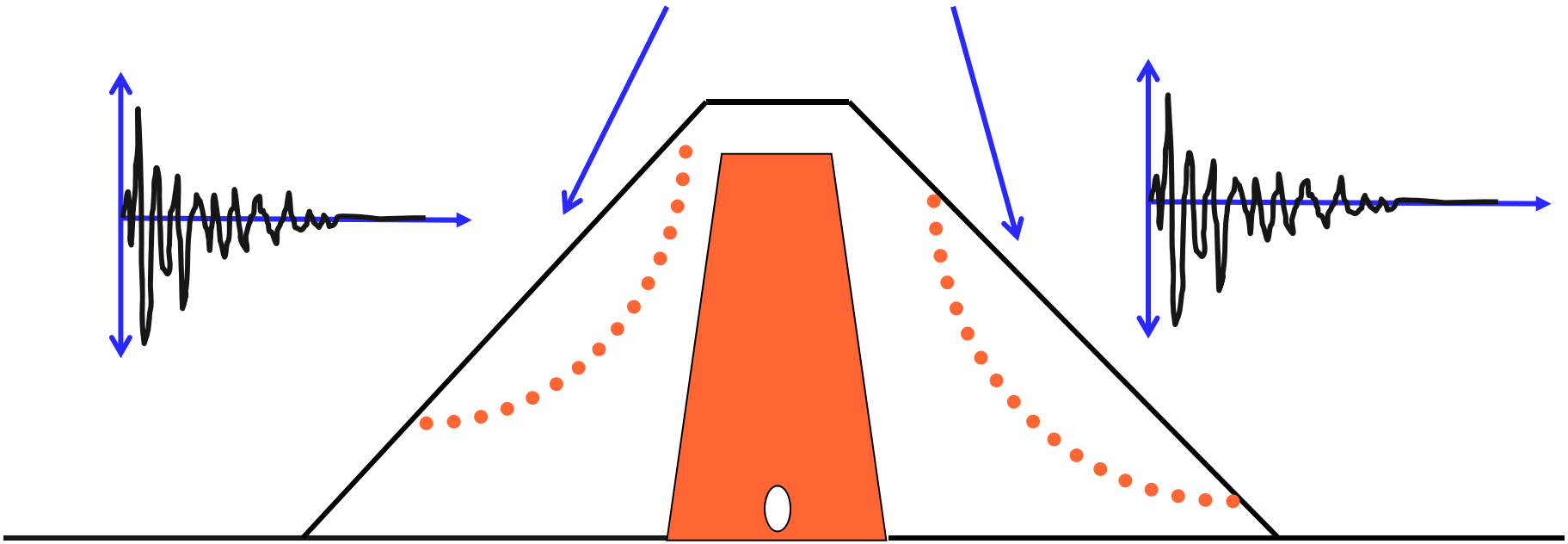
Ambos taludes



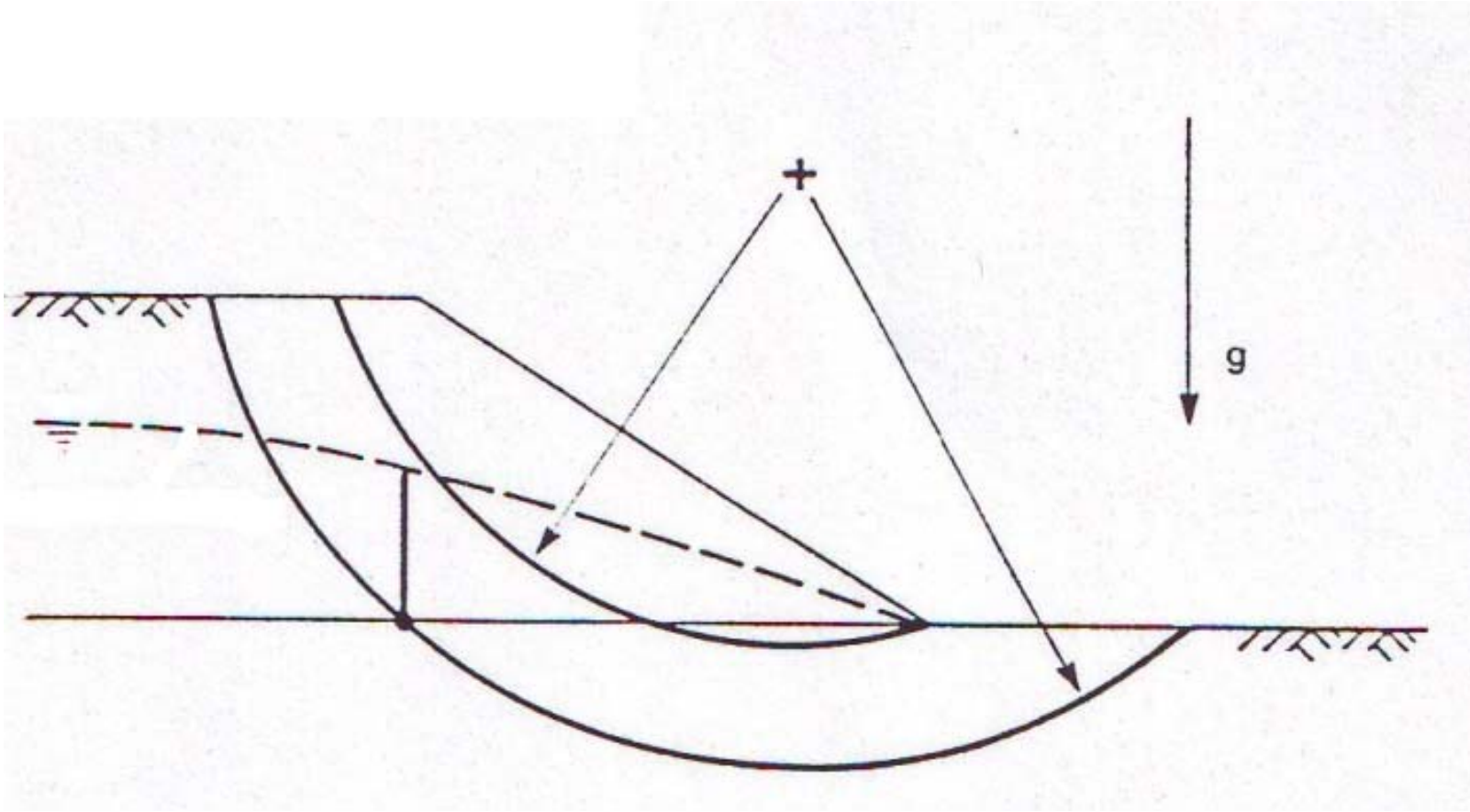
Cálculo de Estabilidad: Fin de Construcción + Sismo

En términos totales

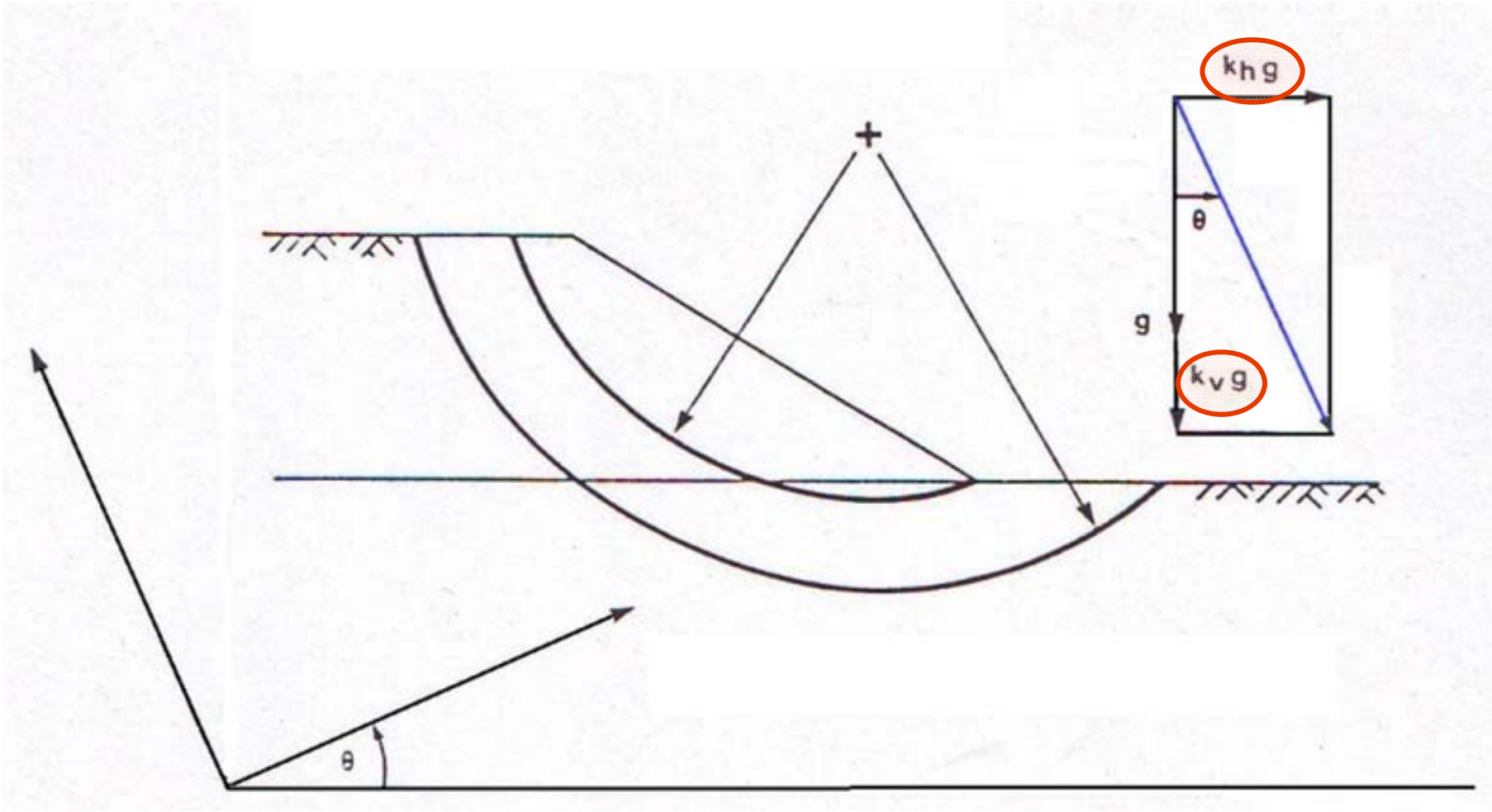
Ambos taludes



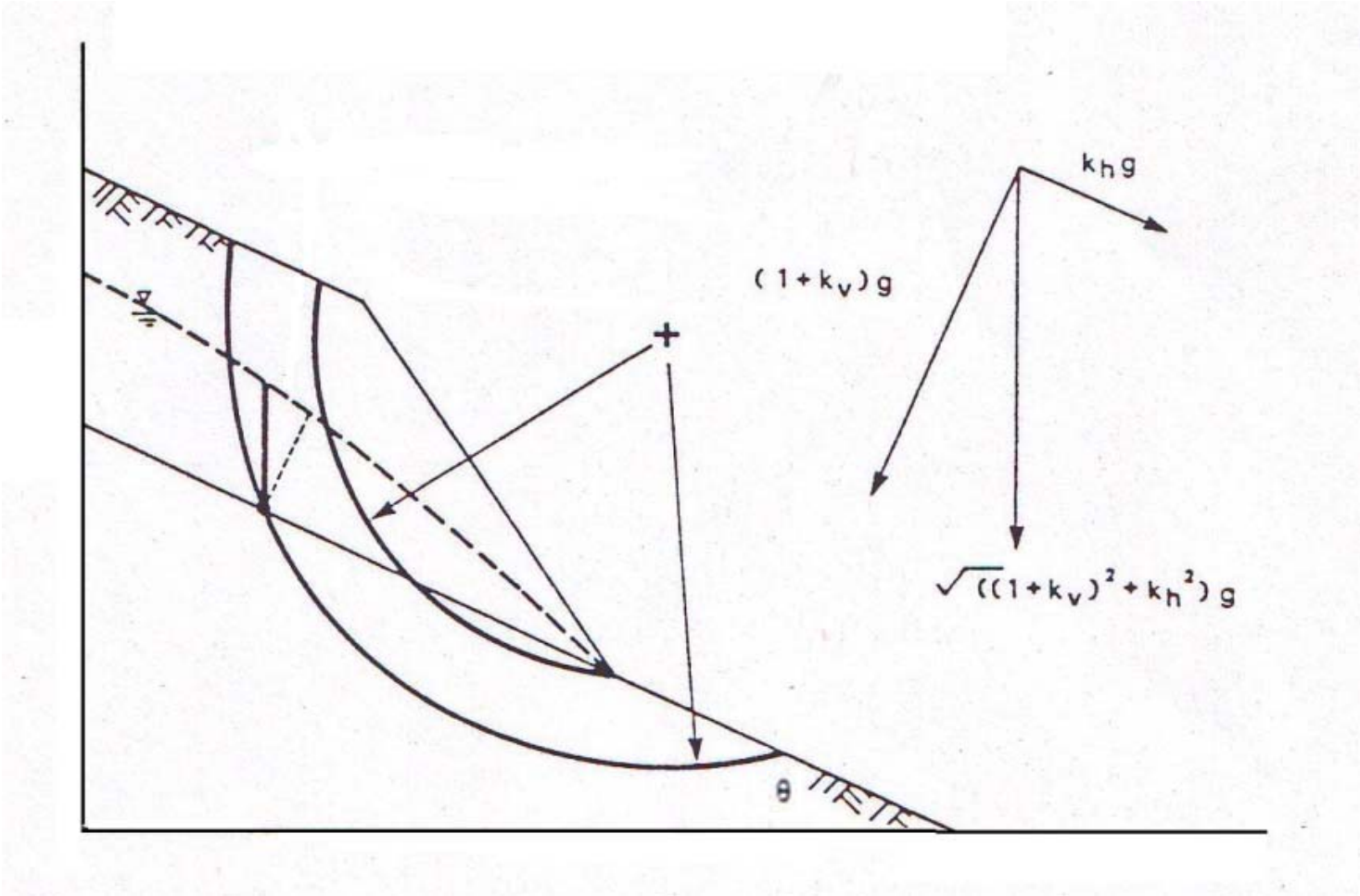
Un método muy simple para considerar el sismo en los cálculos de estabilidad



Un método muy simple para considerar el sismo en los cálculos de estabilidad

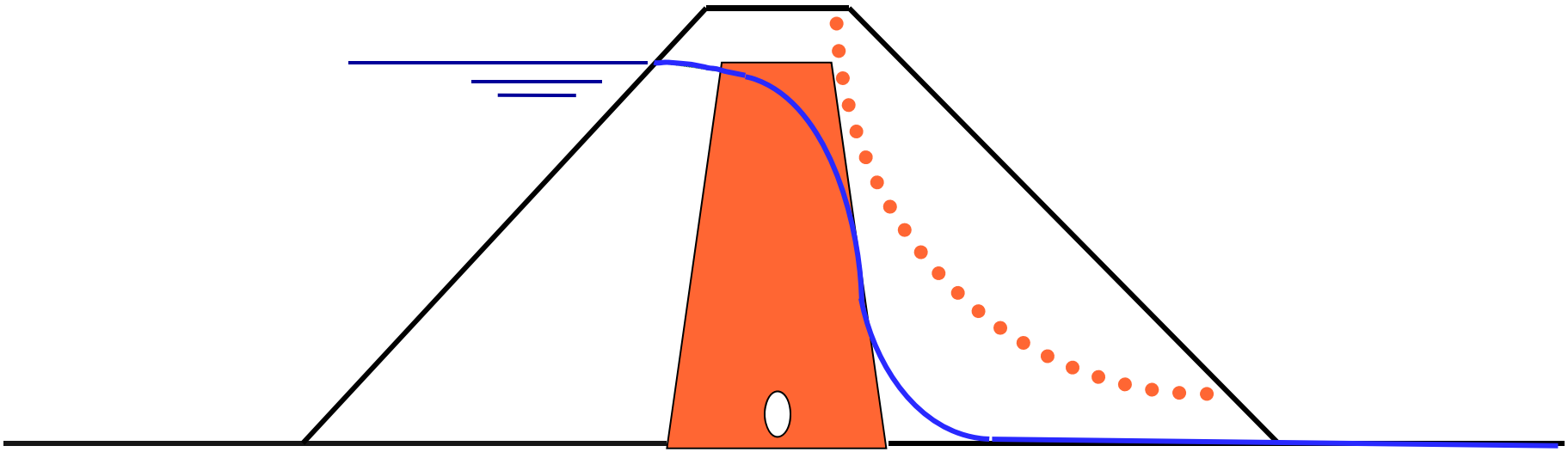


Un método muy simple para considerar el sismo en los cálculos de estabilidad



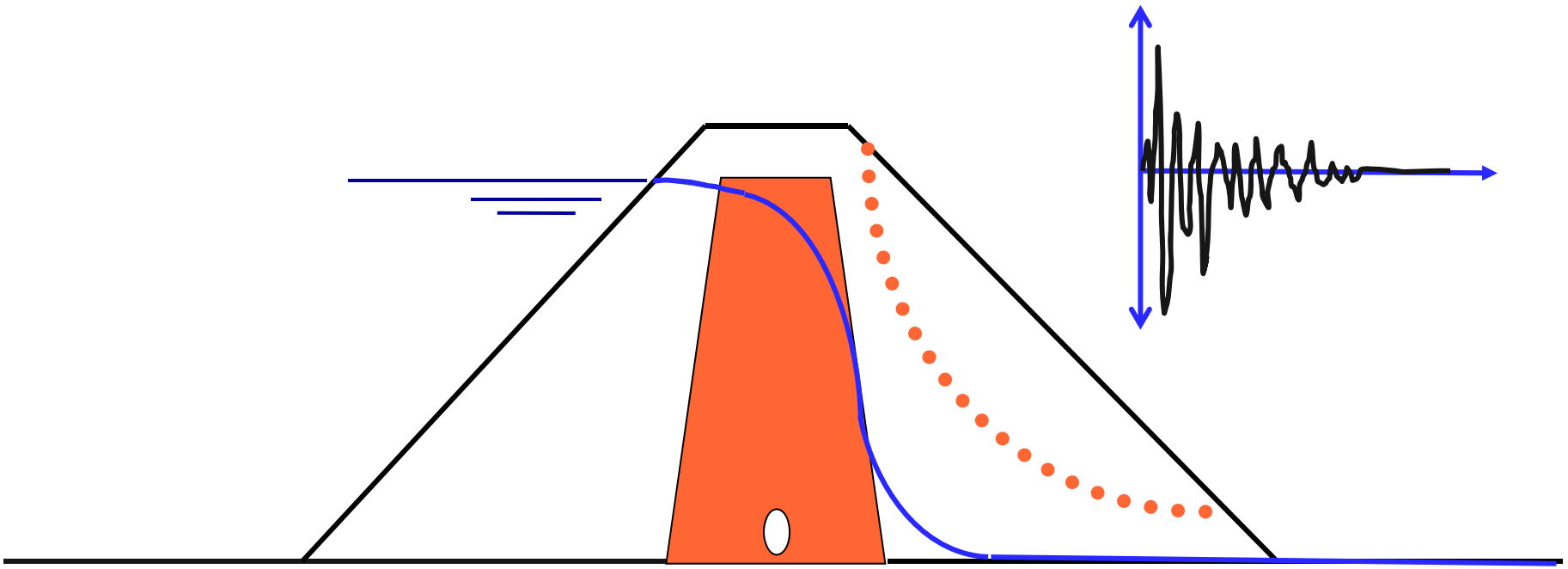
Cálculo de Estabilidad: Embalse lleno

En términos efectivos → Red de Filtración



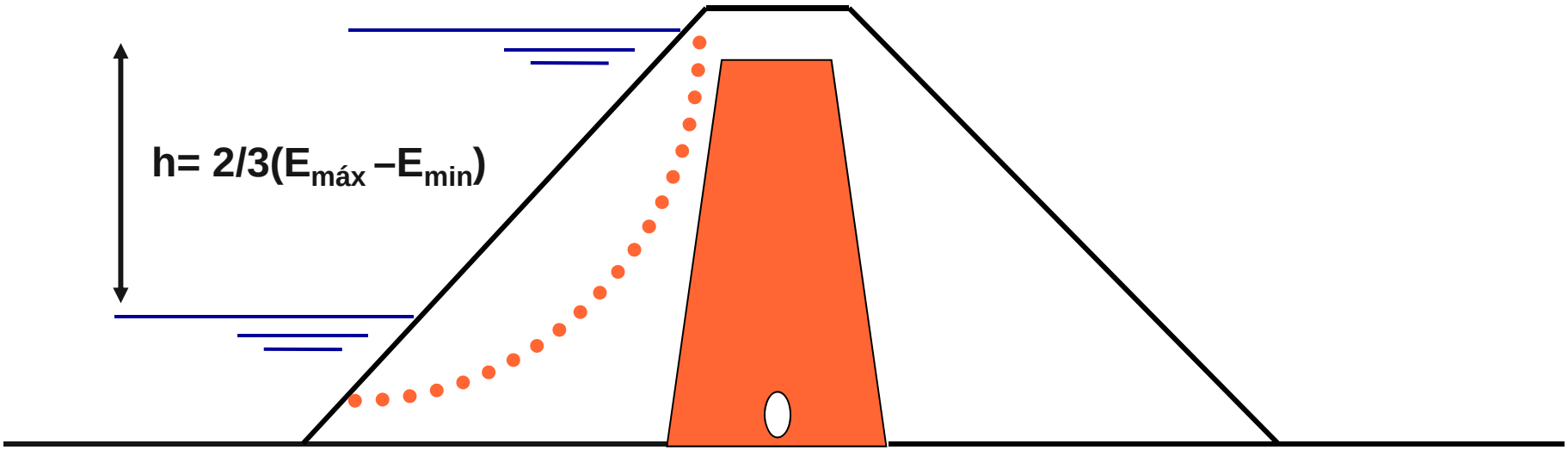
Cálculo de Estabilidad: Embalse lleno + Sismo

En términos efectivos → Red de Filtración

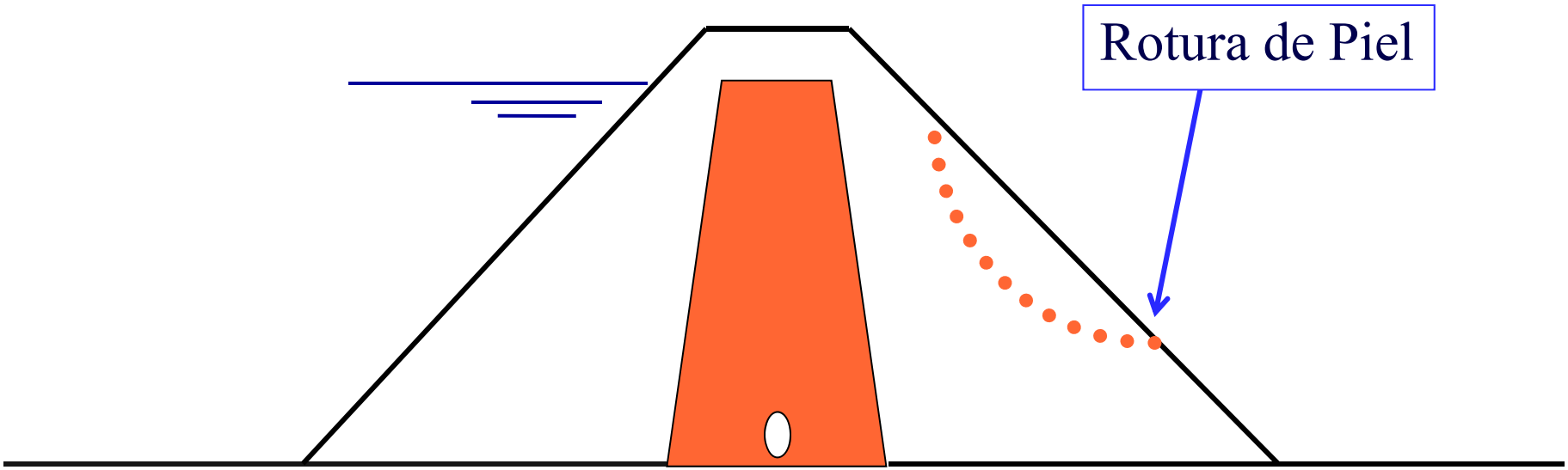


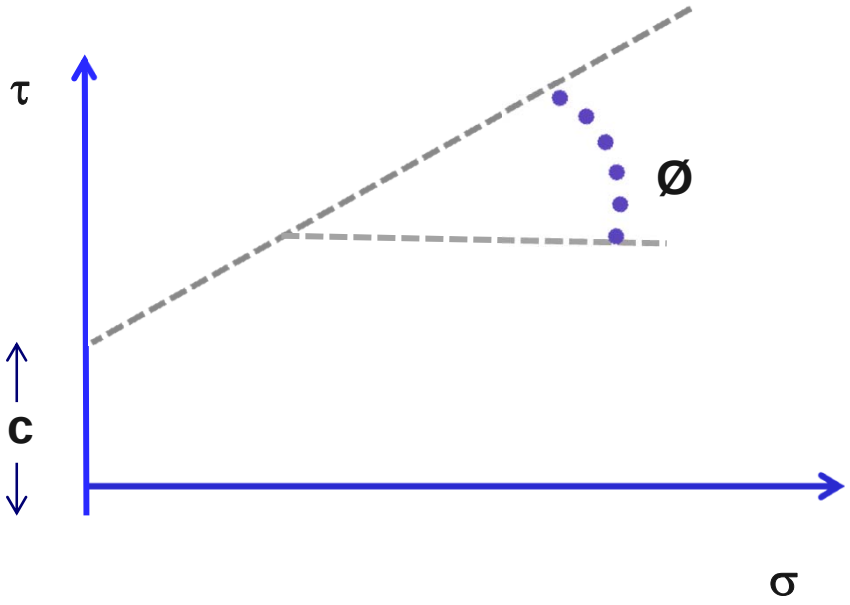
Cálculo de Estabilidad: Desembalse rápido

En términos totales



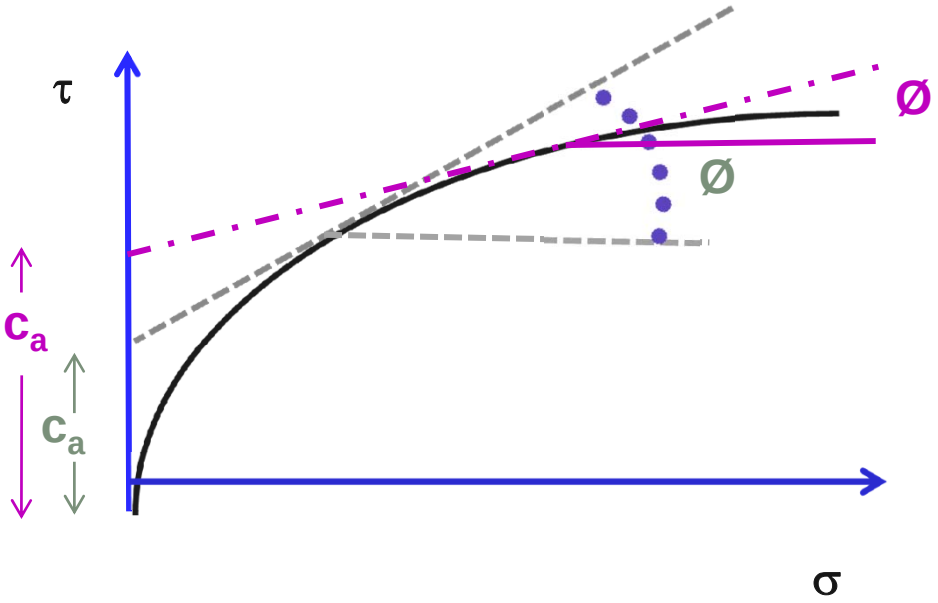
SI CIMENTACION BUENA Y ESPALDONES CONSTITUIDOS POR MATERIALES GRUESOS (GRAVAS O ENROCADOS)





Criterio de Rotura Mohr – Coulomb:

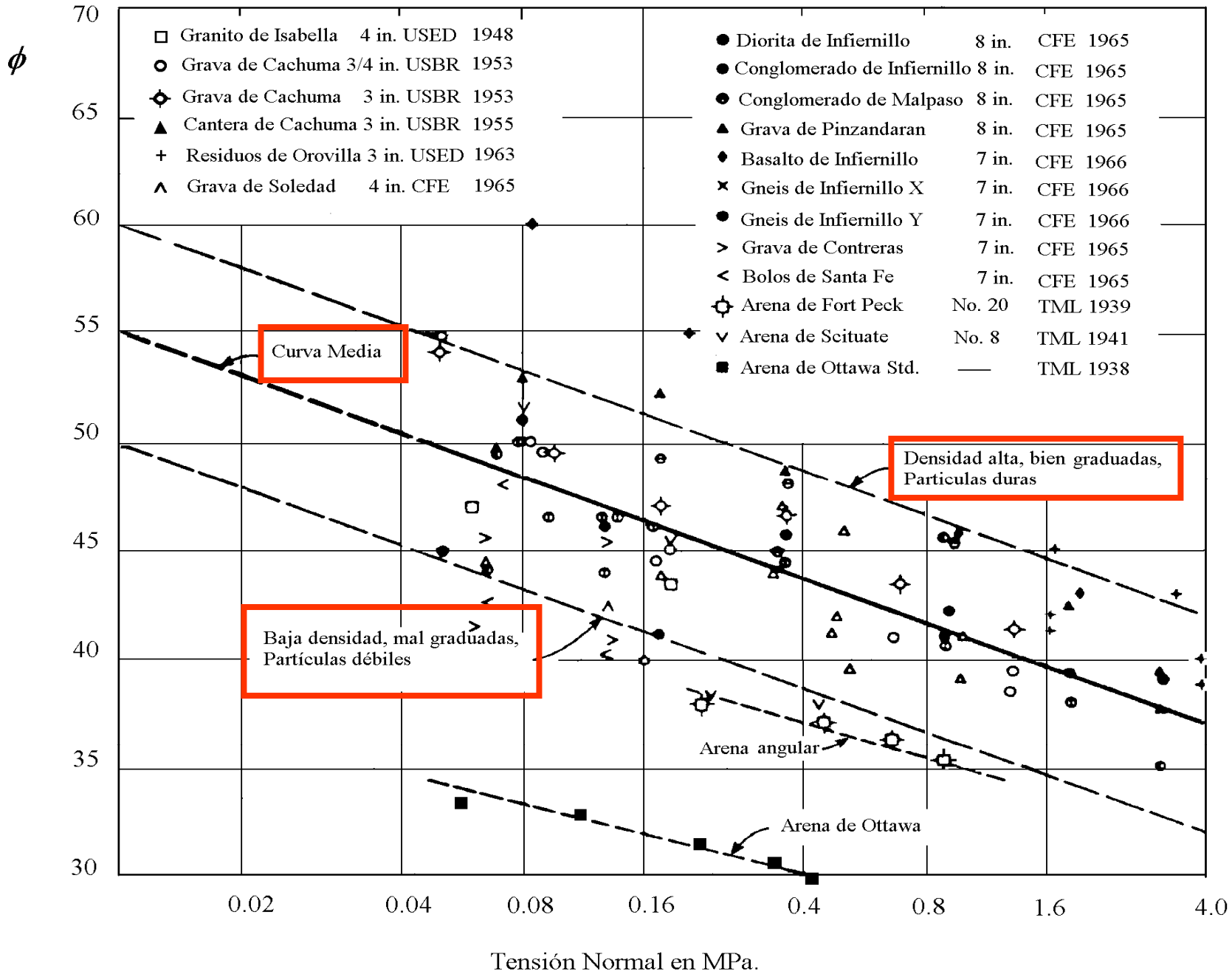
$\tau = c + \sigma \, tg(\Phi)$



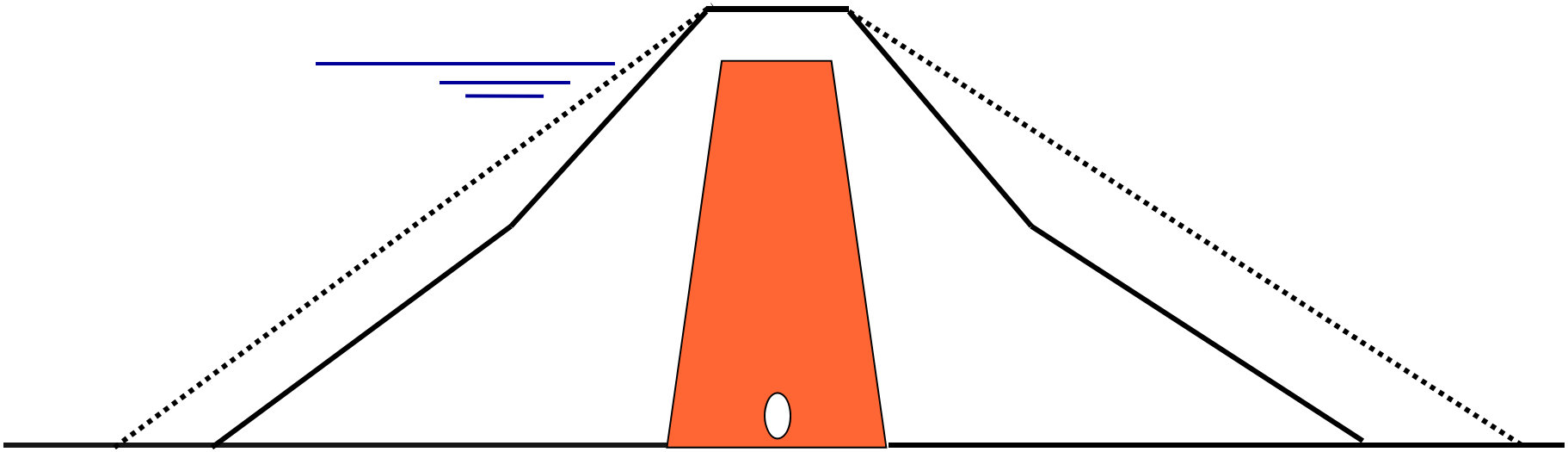
$\tau = A\sigma^{b}$

$\Phi = f(\sigma) \rightarrow \Delta\sigma \rightarrow \nabla\Phi$

$c_a = f(\sigma) \rightarrow \Delta\sigma \rightarrow \Delta c_a$

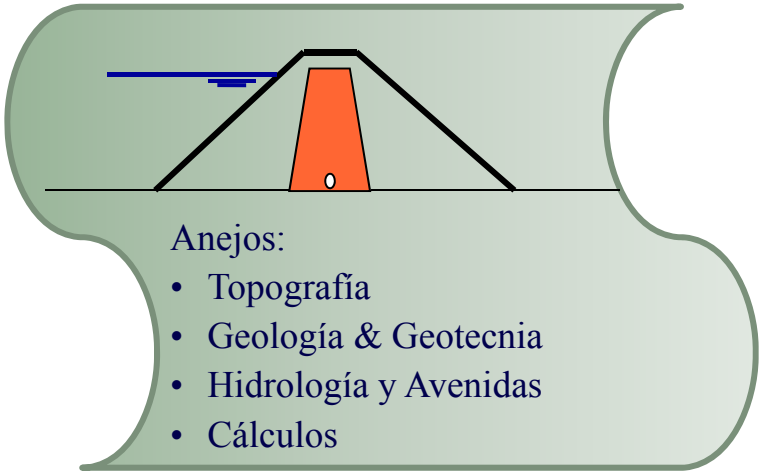

ϕ
70
65
60
55
50
45
40
35
30
Granito de Isabella 4 in. USED 1948
Grava de Cachuma 3/4 in. USBR 1953
Grava de Cachuma 3 in. USBR 1953
Cantera de Cachuma 3 in. USBR 1955
Residuos de Orovilla 3 in. USED 1963
Grava de Soledad 4 in. CFE 1965
Diorita de Infiernillo 8 in. CFE 1965
Conglomerado de Infiernillo 8 in. CFE 1965
Conglomerado de Malpaso 8 in. CFE 1965
Grava de Pinzandaran 8 in. CFE 1965
Basalto de Infiernillo 7 in. CFE 1966
Gneis de Infiernillo X 7 in. CFE 1966
Gneis de Infiernillo Y 7 in. CFE 1966
Grava de Contreras 7 in. CFE 1965
Bolos de Santa Fe 7 in. CFE 1965
Arena de Fort Peck No. 20 TML 1939
Arena de Scituate No. 8 TML 1941
Arena de Ottawa Std. —— TML 1938
Curva Media
Densidad alta, bien graduadas, Particulas duras
Baja densidad, mal graduadas, Partículas débiles
Arena angular
Arena de Ottawa
0.02
0.04
0.08
0.16
0.4
0.8
1.6
4.0
Tensión Normal en MPa.

Optimización de taludes & Economía

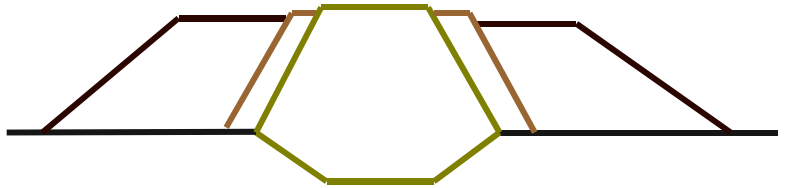


PUNTOS FUNDAMENTALES PARA LA REDUCCIÓN DE ACCIDENTES Y ROTURAS DE PRESAS DE MATERIALES SUELTOS

Fase de Proyecto



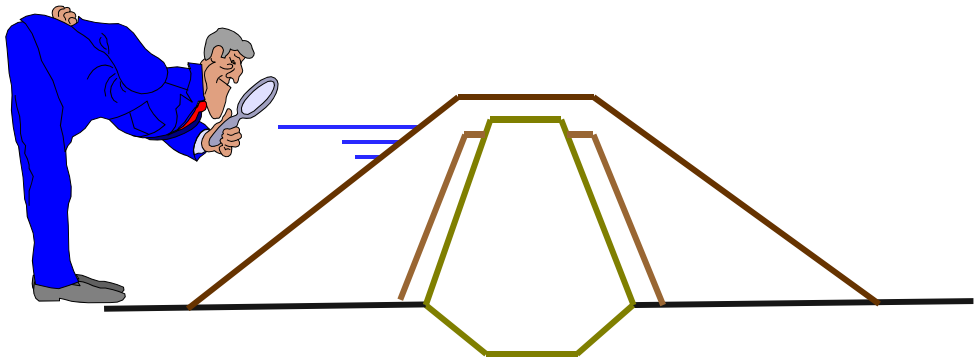
Fase de Construcción



- Legislación y Guías Técnicas
- Aplicación del Estado del Arte
- Seguridad Hidrológica (OV - R)
- Erosión interna (Filtros)
- Atención a presas de H<30 m

- Control de Calidad
- Cimentación

Primer Llenado



- Programa de puesta en carga
- Seguimiento continuo del comportamiento de la presa

Explotación

- Normas de Explotación
- Actualización a criterios de Seguridad más estrictos
  - Sistemas de alerta en avenidas