

## **CAPÍTULO 3.**

# **PRESAS Y SUS OBRAS HIDRÁULICAS.**

### **Efecto Regulador de un Embalse**

En la gran mayoría de los casos se dispone del agua en períodos que no necesariamente se la necesita, en cambio se la requiere en períodos en que es deficitaria.

- ⇒ Surgimiento de la necesidad de regulación
- ⇒ Necesidad de construir embalses

La regulación puede ser a nivel diaria (estanque de agua potable) o a nivel estacional (embalse de gran magnitud).

A nivel preliminar, para estimar el volumen de regulación que debe tener un embalse para satisfacer una cierta demanda se puede utilizar el método de Rippl o bien efectuar una simulación detallada del sistema en estudio.

MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS  
DIRECCION GENERAL DE AGUAS

**ESTADO DE EMBALSES**

Al 31 de Octubre de 2011  
(Volúmenes en mill-m<sup>3</sup>)

| EMBALSE        | REGION | CUENCA    | CAPACIDAD | PROMEDIO<br>HISTORICO | Octubre |      | Uso Principal      |
|----------------|--------|-----------|-----------|-----------------------|---------|------|--------------------|
|                |        |           |           | MENSUAL               | 2011    | 2010 |                    |
| Conchi         | II     | Loa       | 22        | 19                    | 21      | 17   | Riego              |
| Lautaro        | III    | Copiapó   | 35        | 11                    | 1.0     | 2.5  | Riego              |
| Santa Juana    | III    | Huasco    | 166       | 132                   | 87      | 114  | Riego              |
| La Laguna      | IV     | Elqui     | 40        | 24                    | 30      | 30   | Riego              |
| Puclaro        | IV     | Elqui     | 200       | 144                   | 77      | 127  | Riego              |
| Recoleta       | IV     | Limarí    | 100       | 69                    | 46      | 71   | Riego              |
| La Paloma      | IV     | Limarí    | 748       | 437                   | 215     | 256  | Riego              |
| Cogotí         | IV     | Limarí    | 150       | 84                    | 42      | 26   | Riego              |
| Culimo         | IV     | Quilimarí | 10        | 4.6                   | 0.2     | 2.2  | Riego              |
| Corrales       | IV     | Illapel   | 50        | 44                    | 37      | 40   | Riego              |
| Peñuelas       | V      | Peñuelas  | 95        | 31                    | 3       | 6    | Agua Potable       |
| El Yeso        | RM     | Maipo     | 256       | 154                   | 51      | 145  | Agua Potable       |
| Rungue         | RM     | Maipo     | 2.2       | 1.5                   |         | 0.9  | Riego              |
| Convento Viejo | VI     | Rapel     | 237       | 181                   | 237     | 165  | Riego              |
| Rapel          | VI     | Rapel     | 695       | 494                   | 570     | 415  | Generación         |
| Colbún         | VII    | Maule     | 1544      | 1273                  | 1364    | 1277 | Generación y Riego |
| Lag. Maule     | VII    | Maule     | 1420      | 980                   | 372     | 707  | Generación y Riego |
| Bullileo       | VII    | Maule     | 60        | 57                    | 60      | 60   | Riego              |
| Digua          | VII    | Maule     | 220       | 216                   | 220     | 220  | Riego              |
| Tutuvén        | VII    | Maule     | 22        | 11.9                  | 22      | 15   | Riego              |
| Coihueco       | VIII   | Itata     | 29        | 29                    | 29      | 29   | Riego              |
| Lago Laja      | VIII   | Bio-Bio   | 5582      | 3394                  | 1156    | 1382 | Generación y Riego |
| Ralco          | VIII   | Bio-Bio   | 1174      | 790                   | 1034    | 657  | Generación         |
| Pangué         | VIII   | Bio-Bio   | 83        | 76                    | 75      | 74   | Generación         |

**Nota: No incluye tranques de relave**

# **Tipos de Presa**

Según su propósito principal:

- Riego (embalse Cogotí, Paloma, Santa Juana, etc.)
- Suministro de agua (embalse El Yeso)
- Generación Hidroeléctrica (Embalse Rapel, Colbún, Ralco, etc.)
- Control de Inundaciones (embalses Lluta y Azapa)

## Tipos de Presa

Según su material de construcción principal, en términos muy generales, es posible realizar una clasificación inicial en dos grupos:

- Presas de Relleno (Embankment dams): Son aquellas que se construyen con terraplenes de suelos o enrocados. La pendiente de los paramentos aguas arriba y aguas abajo son muy similares y con un ángulo moderado, lo que produce una sección ancha y volumen de construcción importante c/r a su altura (Ej: La Laguna, Cogotí, Colbún).
- Presas de Concreto (Concrete Dams): Son aquellas que se construyen con concreto macizo. Los taludes de los paramentos son muy diferentes, en general muy fuertes aguas abajo y casi verticales aguas arriba. Presentan perfiles relativamente esbeltos dependiendo de su tipo (Rapel, Pangue, Ralco).  
(este grupo incluye a las presas más antiguas construidas en manpostería).

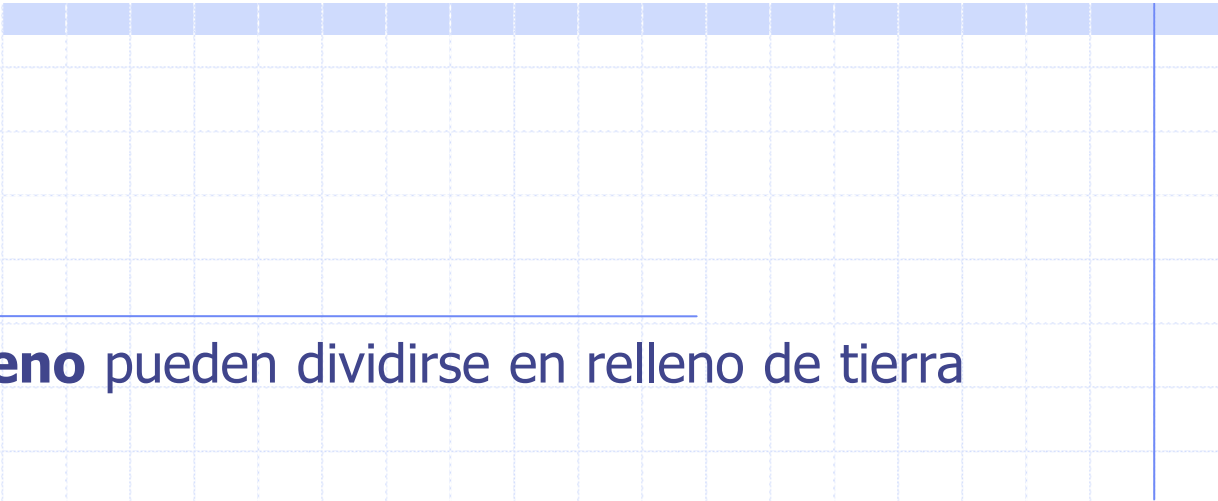
**Table 1.1 Large dams: World Register statistics (ICOLD, 1988a)**

| <i>Group</i>                                 | <i>Type</i>   | <i>ICOLD code</i> | <i>%</i> |
|----------------------------------------------|---------------|-------------------|----------|
| Embankment dams                              | Earthfill     | TE                | 82.9     |
|                                              | Rockfill      | ER                |          |
| Concrete dams<br>(including masonry<br>dams) | Gravity       | PG                | 11.3     |
|                                              | Arch          | VA                | 4.4      |
|                                              | Buttress      | CB                | 1.0      |
|                                              | Multiple arch | MV                | 0.4      |
| Total large dams<br>(ICOLD, 1988a)           |               | 36 235            |          |

Hydraulic Structures (Novak, Moffat, Nalluri y Narayanam, 2004)

Las **presas de relleno** son más numerosas debido a razones técnicas y económicas y representan cerca del 90% de las presas construidas, ya que utilizan materiales disponibles localmente y sin tratamientos y se adaptan adecuadamente a una gran variedad de sitios y circunstancias.

Por otra parte, las **presas de concreto** y sus predecesoras (manpostería) son más exigentes en cuanto a las condiciones de cimentación (fundación). La práctica ha demostrado que requieren técnicas constructivas más especializadas y costosas.



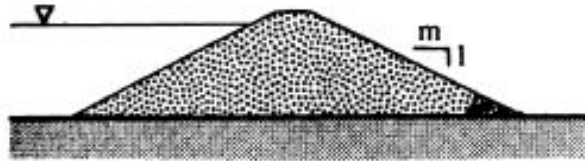
Las **presas de relleno** pueden dividirse en relleno de tierra o enrocado:

### **Presas de relleno de tierra:**

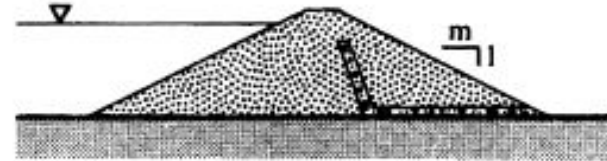
Una presa puede denominarse de relleno de tierra si los suelos compactados representan más del 50% del volumen colocado.

Este tipo de presa utiliza suelos seleccionados cuidadosamente, de compactación uniforme e intensiva en capas más o menos delgadas y con un contenido de humedad controlada.

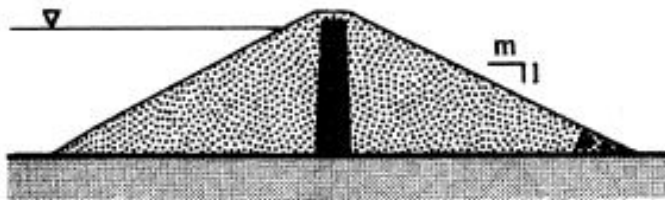




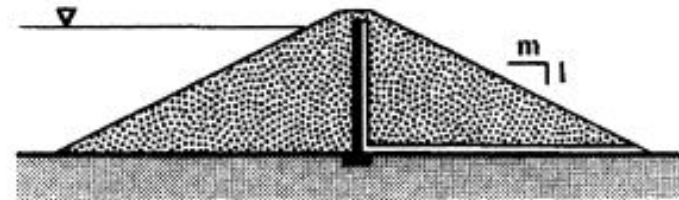
(a) Homogenous with toedrain:  
small secondary dams  
 $m = 2.0-2.5$



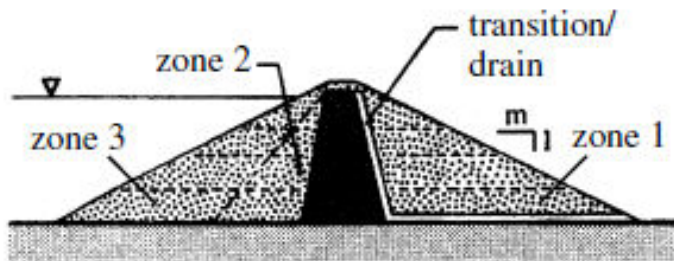
(b) Modern homogeneous with internal chimney drain  
 $m = 2.5-3.5$



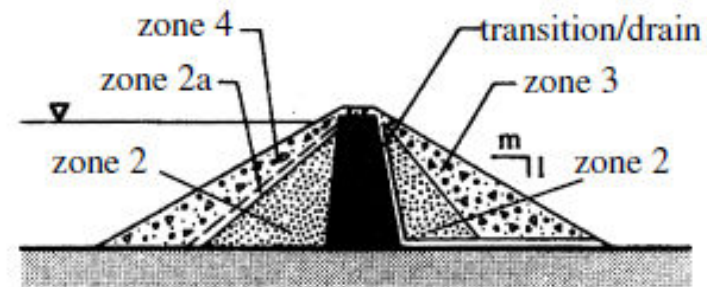
(c) Slender central clay core:  
19th-century 'Pennines' type –  
obsolete post 1950  
 $m = 2.5-3.5$



(d) Central concrete core:  
smaller dams – obsolescent  
 $m = 2.5-3.5$



(e) Wide rolled clay core: zoned with  
transitions and drains: note base drain  
 $m = 2.5-3.5$



(f) Earthfill/rockfill with central rolled  
clay core: zoned with transitions and  
drains  
 $m = 1.6-2.0$

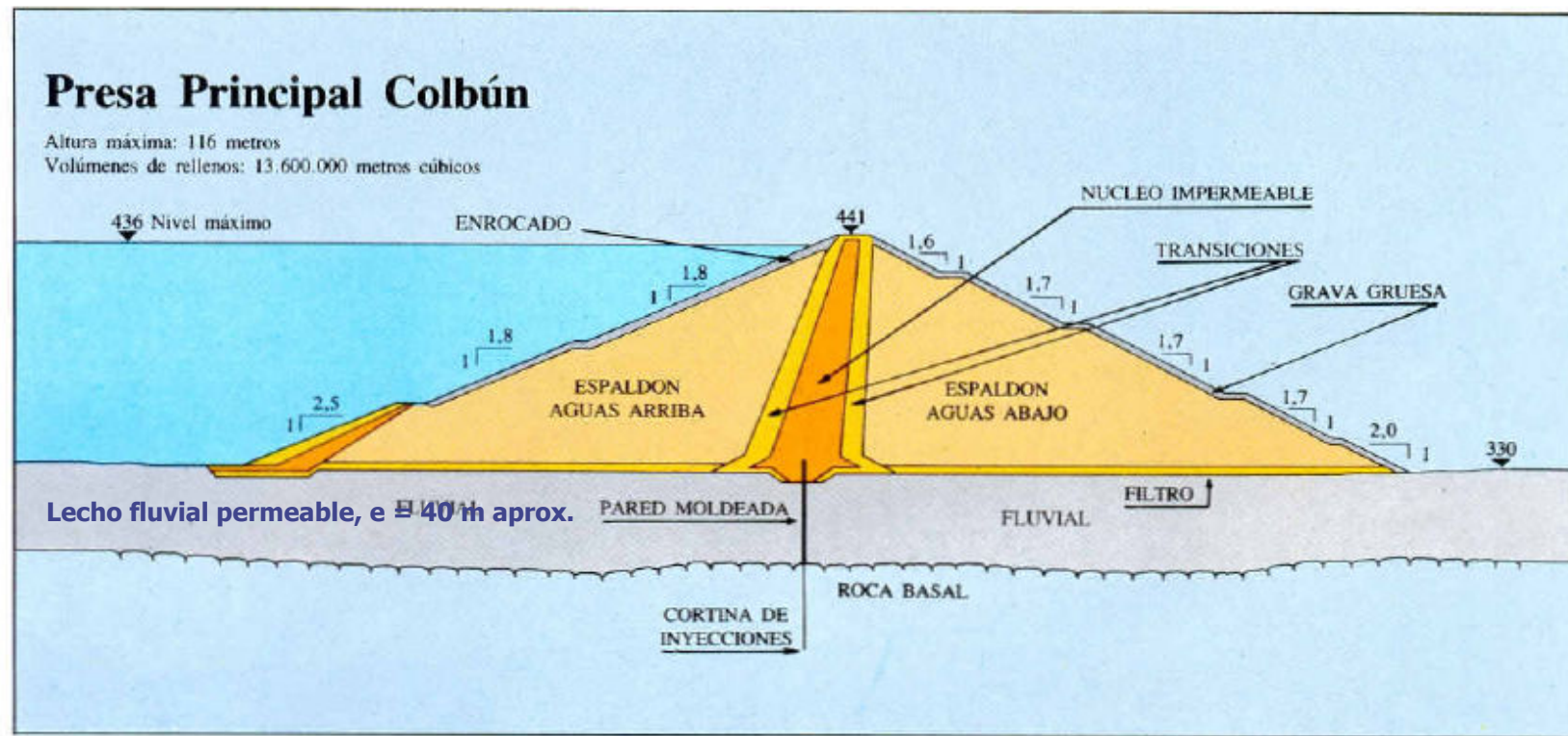
## Presas Zonificadas, de Tierra.



Presas de Asuán



Presas de  
Colbún:

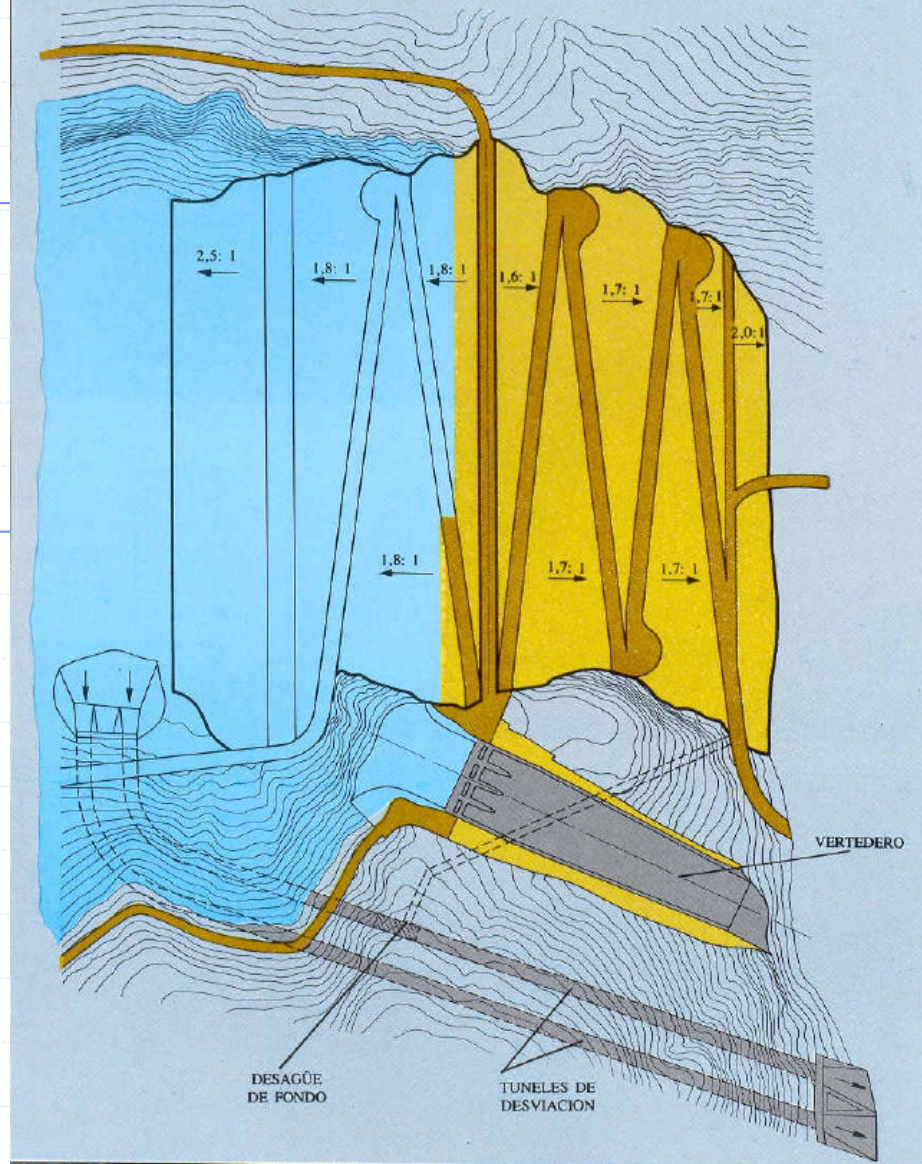


### Presa Principal Colbún

|                          |            |                |
|--------------------------|------------|----------------|
| Altura máxima            | 116        | m              |
| Longitud de coronamiento | 550        | m              |
| Volumen de rellenos      | 13.600.000 | m <sup>3</sup> |

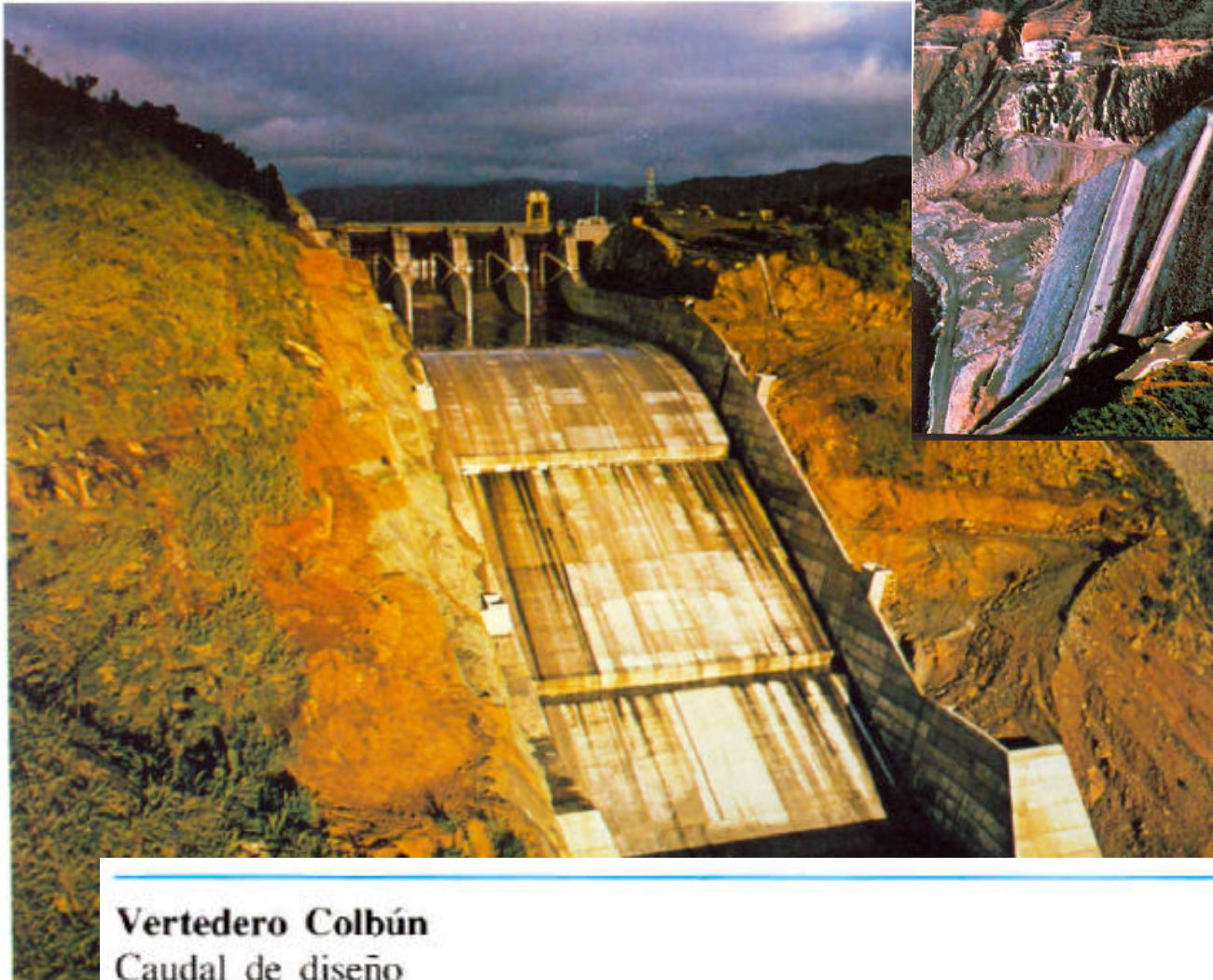
Presa zonificada de tierra, núcleo central impermeable, ds zonas de transición y dos espaldones de grava que los confinan aguas arriba y aguas abajo + pared moldeada (impermeabilización)

### Presa Principal de Colbún y obras anexas



**Tipo de Presa => Configuración de las Obras Anexas**

# Evacuador de Crecidas



## **Vertedero Colbún**

Caudal de diseño

7.500 m<sup>3</sup>/s

Número de compuertas de segmento

4

Ancho de cada compuerta

14,4 m

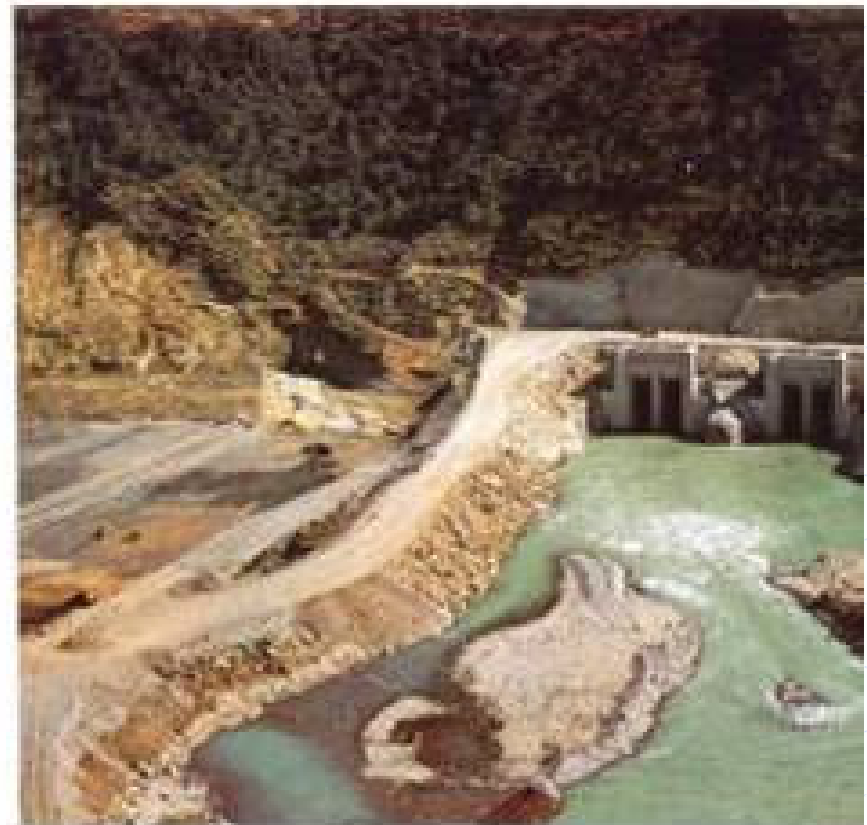
Altura de cada compuerta

16,0 m

# Túneles de Desviación



*Túnel de desviación en construcción. Boca de entrada.*



*Túneles de desviación. Bocas de entrada.*

23

## **Túneles de Desviación**

(revestidos con hormigón)

Número de túneles

2

Sección ovalada: ancho

13,2

m

altura

16,1

m

Longitud de túneles

875 y 800

m

## Desagüe de Fondo

Caudal máximo

740 m<sup>3</sup>/s

Número de compuertas planas

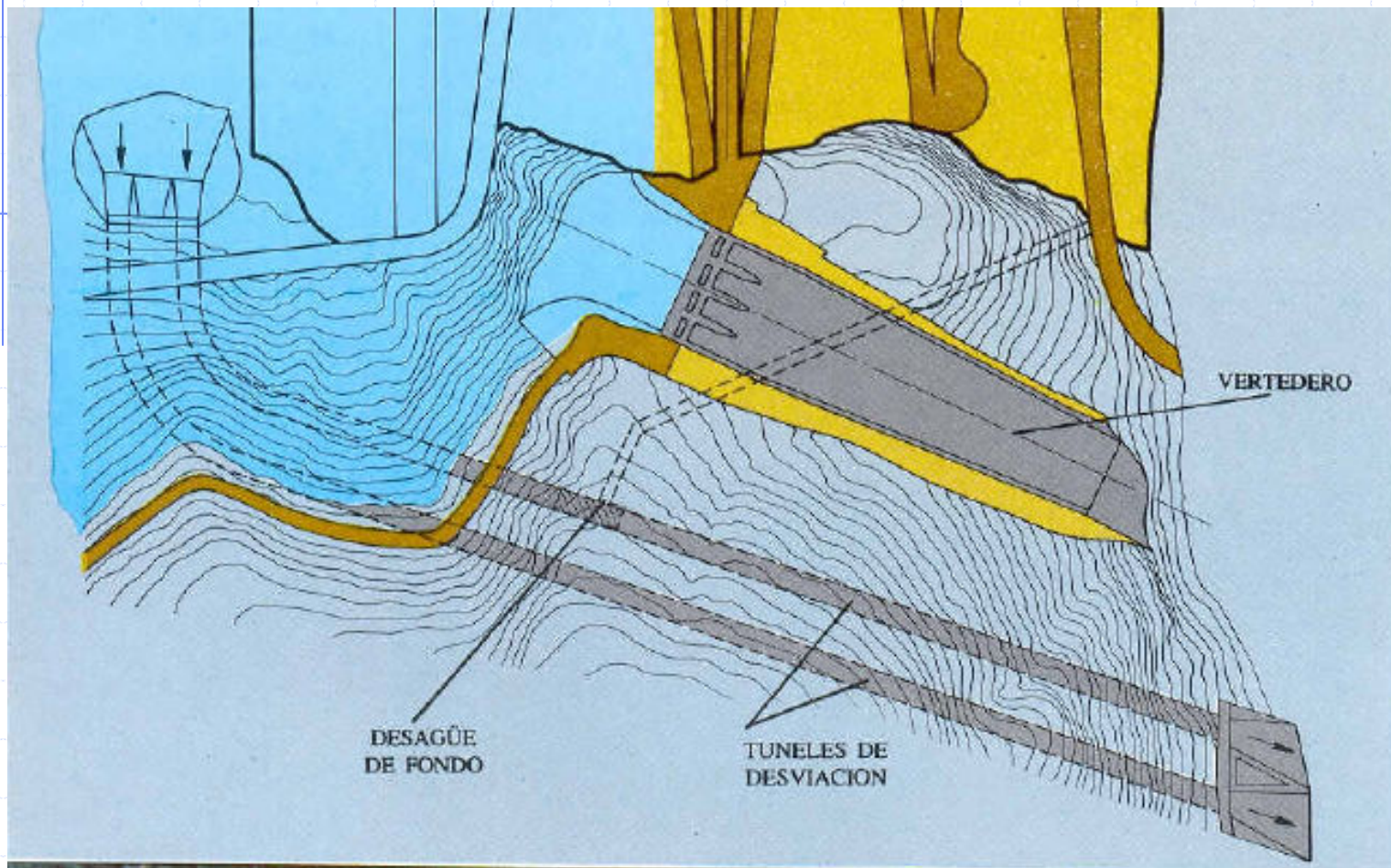
2

Ancho de cada compuerta

2,50 m

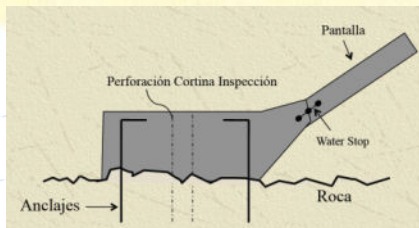
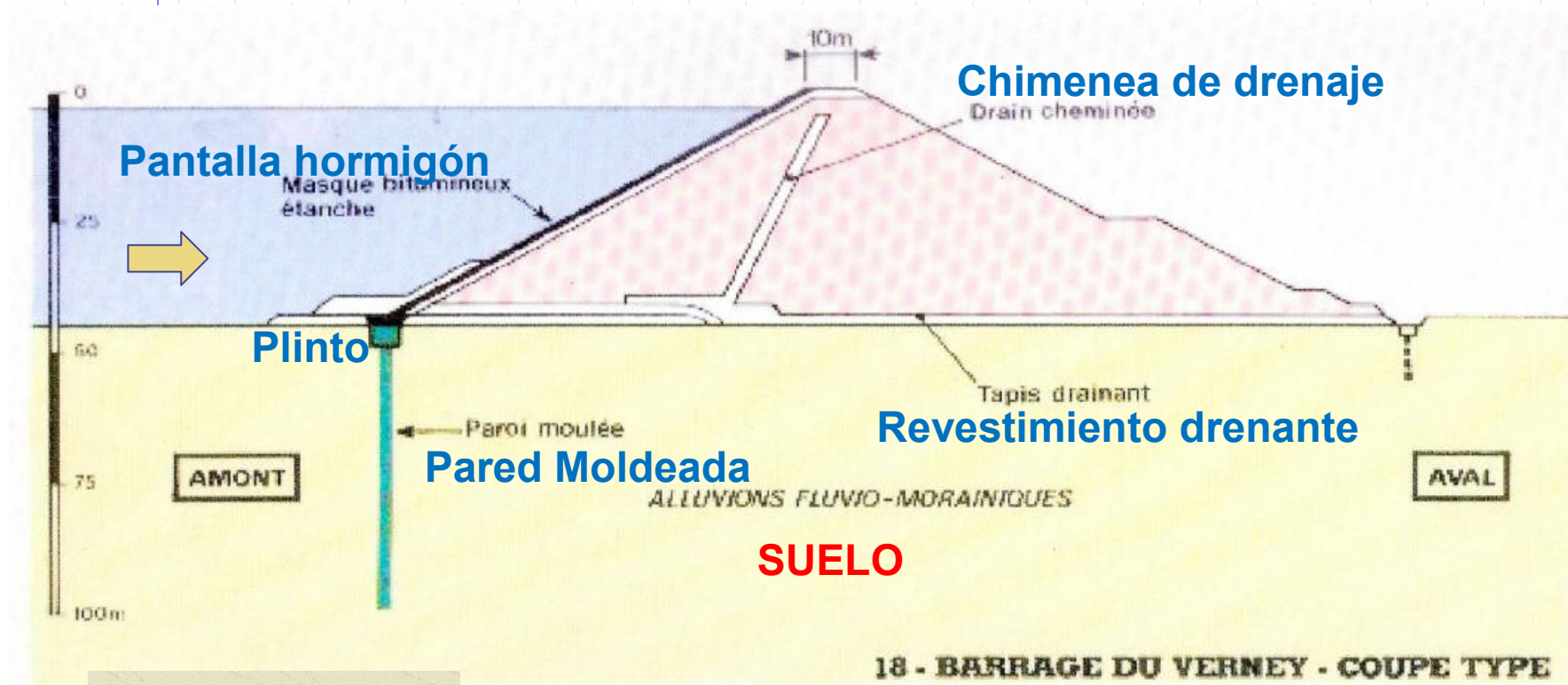
Altura de cada compuerta

3,65 m



# Presas de relleno

## Presas CRFD (concrete face Rockfill dam)



Plinto

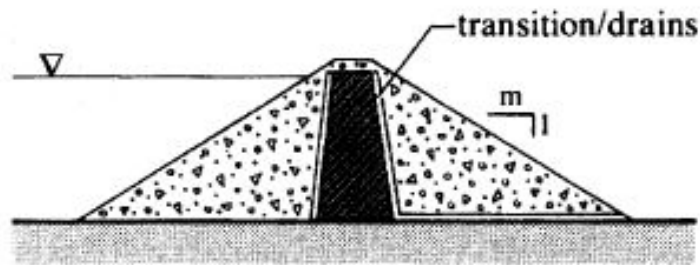
## **Presas de enrocado:**

La sección de las presas de enrocado incluye un elemento impermeable discreto de relleno de tierra compactada, concreto esbelto o una membrana bituminosa

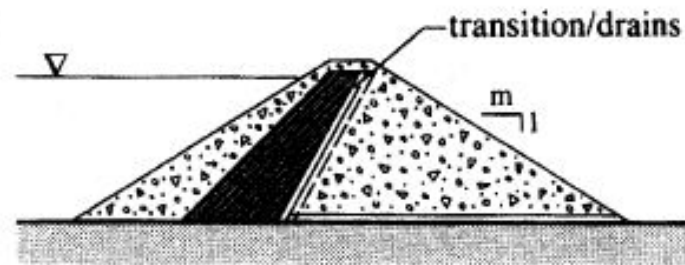
La designación de "presa de enrocado" es apropiada cuando más del 50% del material de relleno es puede clasificar como roca (material de granulometría gruesa)

La practica moderna es especificar un enrocado bien graduado, de alta compactación en capas más bien delgadas mediante un equipo pesado.

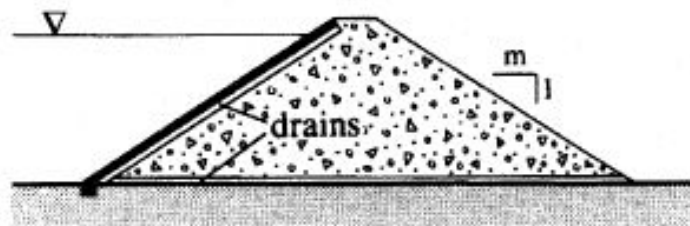
El método constructivo es, en esencia, similar al de una presa de relleno de tierra.



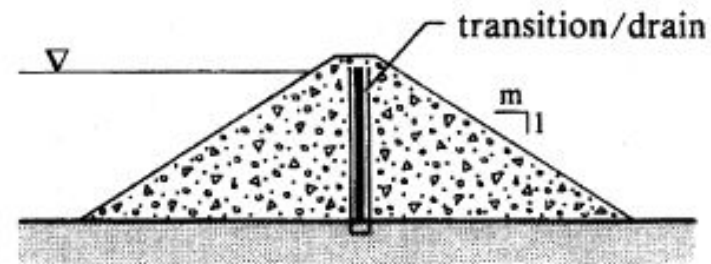
**(a) Central rolled clay core**  
 $m = 1.6 - 2.0$



**(b) Inclined rolled clay core**  
 $m = 1.6 - 2.0$

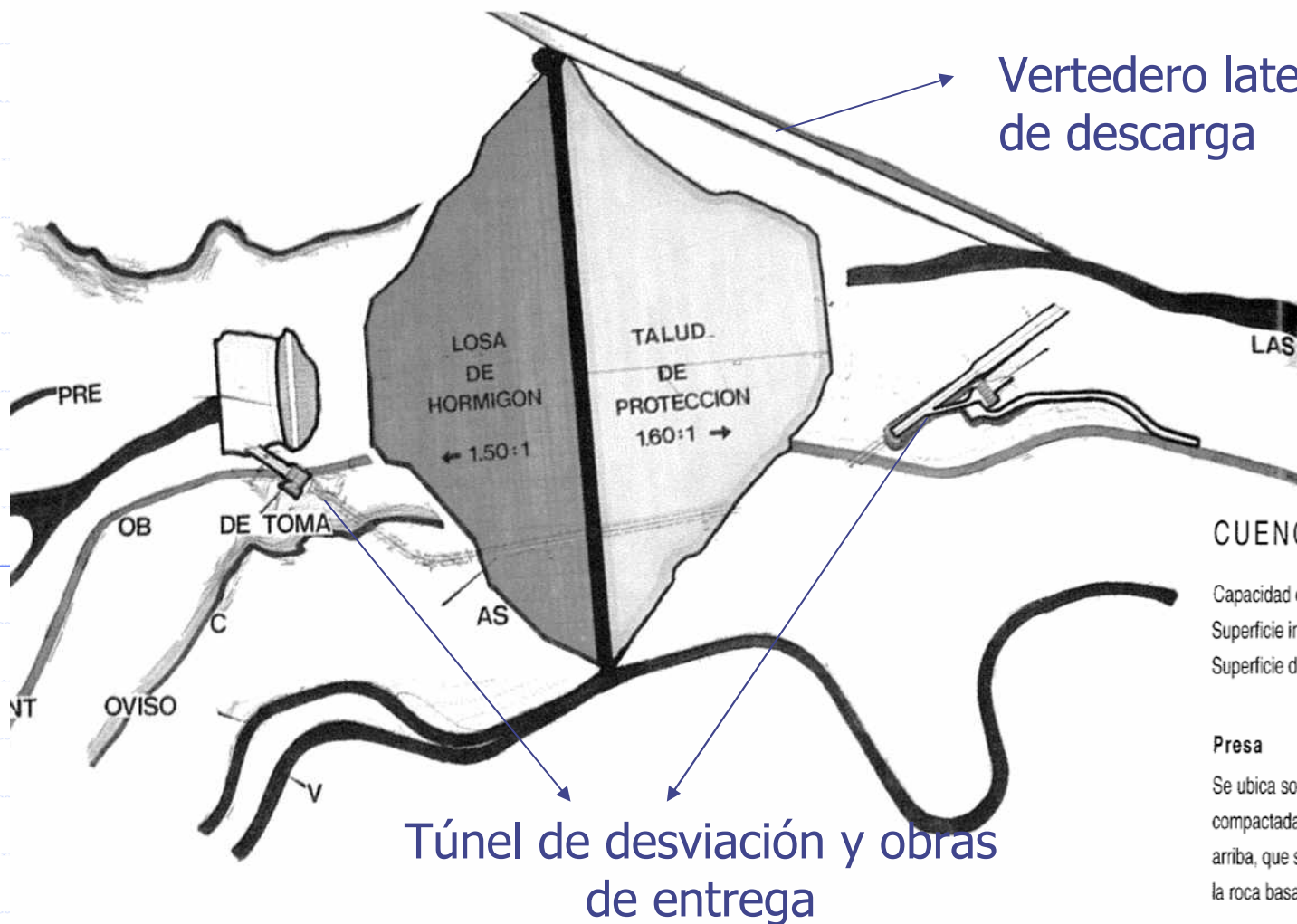


**(c) Decked: upstream asphaltic or concrete membrane**  
 $m = 1.6 - 2.0$



**(d) Central asphaltic membrane**  
 $m = 1.6 - 2.0$

Hydraulic Structures (Novak, Moffat, Nalluri y Narayanam, 2004)



#### CUENCA Y EMBALSE

|                         |                             |
|-------------------------|-----------------------------|
| Capacidad del embalse   | 160 millones m <sup>3</sup> |
| Superficie inundada     | 410 há.                     |
| Superficie de la cuenca | 7.635 km <sup>2</sup>       |

#### Presa

Se ubica sobre el lecho actual del río Huasco, formado por gravas compactadas con una pantalla de hormigón en el talud de aguas arriba, que se conecta con una pared moldeada desarrollada hasta la roca basal del Valle, como elemento impermeabilizante.

|                         |                                                        |
|-------------------------|--------------------------------------------------------|
| - Tipo                  | Gravas compactadas con pantalla de hormigón (C.F.G.D.) |
| - Altura muro           | 114,30 m                                               |
| - Ancho coronación      | 6,00 m                                                 |
| - Longitud coronamiento | 390 m                                                  |
| - Nivel aguas máximas   | 646,54 m.s.n.m.                                        |
| - Cota coronación       | 653,40 m.s.n.m.                                        |
| - Talud aguas arriba    | 1,5 / 1                                                |
| - Talud aguas abajo     | 1,6 / 1                                                |

## Presa CFGD (concrete face gravel dam) Santa Juana (río Huasco, III región)

**Tipo de Presa => Configuración de las Obras Anexas**

## ALIVIADERO DE CRECIDAS

Está constituido por un vertedero lateral que descarga a un canal colector de ancho variable de 8 a 15 m, desde el que nace un rápido que se desarrolla hasta alcanzar la cota del río Huasco, aguas abajo de la presa.

Dicho rápido se proyectó revestido en sus primeros 62 m, para continuar excavado en roca hasta su término.

### Vertedero

|                          |                                         |
|--------------------------|-----------------------------------------|
| - Ubicación              | Margen izquierda                        |
| - Tipo                   | Lateral                                 |
| - Longitud               | 55 m                                    |
| - Cota umbral vertedero  | 646,54 m.s.n.m.                         |
| - Caudal de diseño       | 1.075 m <sup>3</sup> /s (1:1.000 años)  |
| - Caudal máximo descarga | 1.530 m <sup>3</sup> /s (1:10.000 años) |

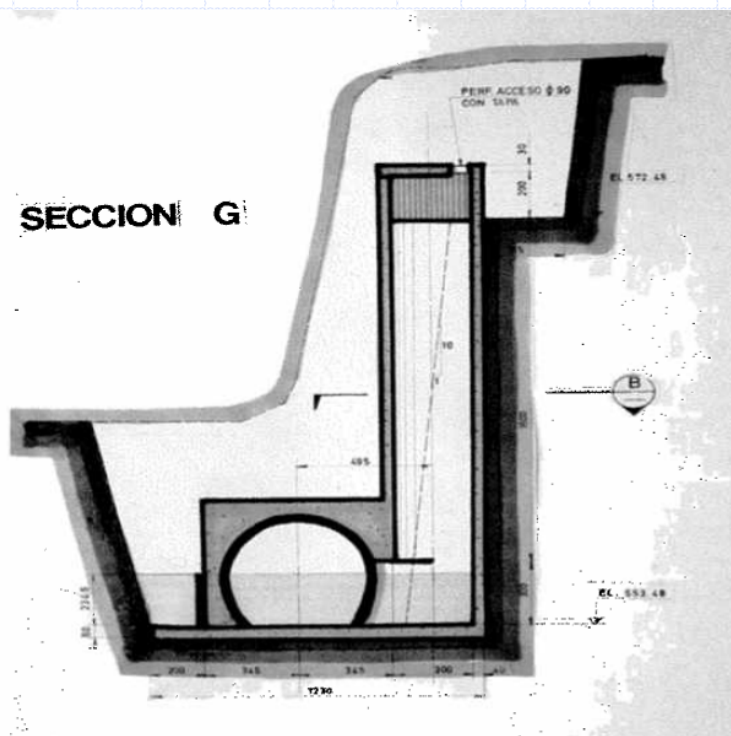
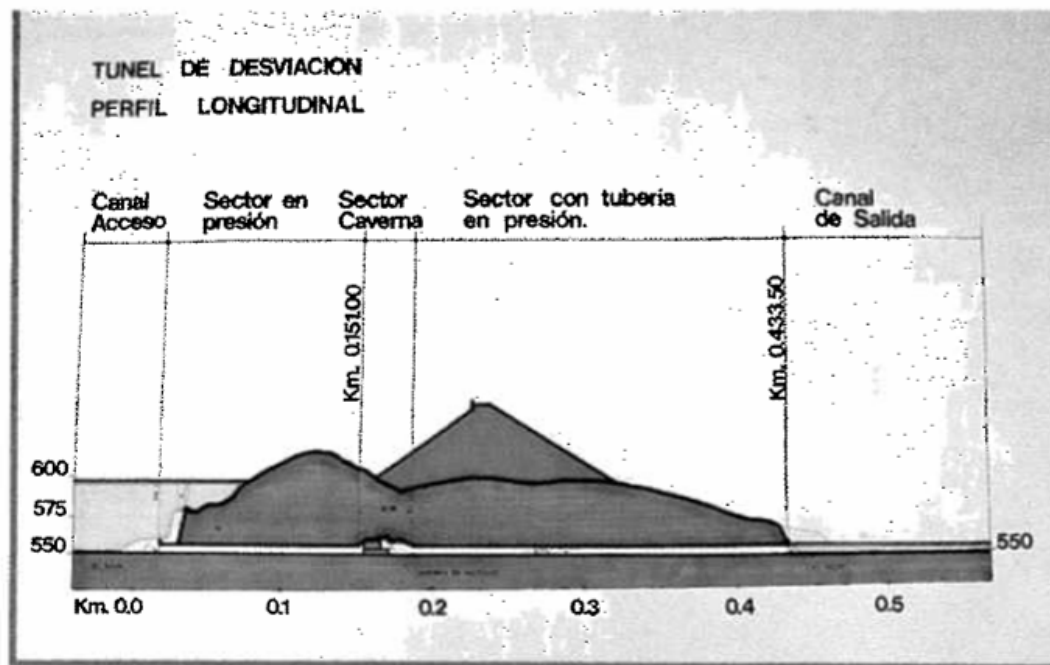
### Rápido de descarga

|             |             |
|-------------|-------------|
| - Tipo      | Rectangular |
| - Longitud  | 307 m       |
| - Sección   | 15 m        |
| - Pendiente | 47%         |



Vertedero y comienzo del rápido de descarga.

Spillway and beginning of discharge chute.



### Obras de Desviación

Comprenden, fundamentalmente, un túnel por el costado derecho de 416,50 m de longitud en el cual se ubica la caverna de válvulas.

|                 |                                   |
|-----------------|-----------------------------------|
| - Ubicación     | Margen derecha                    |
| - Sección       | 25 m <sup>2</sup>                 |
| - Caudal diseño | 127 m <sup>3</sup> /s (1:50 años) |
| - Pendiente     | 0,007                             |

### Obras de Entrega

Consiste en una torre de 21 m de altura que entrega al túnel de desviación y que formará parte del sistema de entrega.

Desde la caverna, en la cual se construirá un tapón de hormigón, nace una tubería de 1.600 mm de diámetro que se desarrolla hasta el exterior del túnel donde se ubica la casa de válvulas que regulará la salida, mediante dos juegos de válvulas de 1.200 mm de diámetro.

|                                   |                        |
|-----------------------------------|------------------------|
| - Caudal para riego               | 7,00 m <sup>3</sup> /s |
| - Dos válvulas Howell Bunguer     | D = 1.200 mm c/u       |
| - Dos válvulas de Guarda Mariposa | D = 1.200 mm c/u       |
| - Una válvula de Guardia          | D = 1.600 mm           |

# Presas de Concreto

**Presas de gravedad (Gravity Dam):** Depende por completo de su propio peso para su estabilidad.

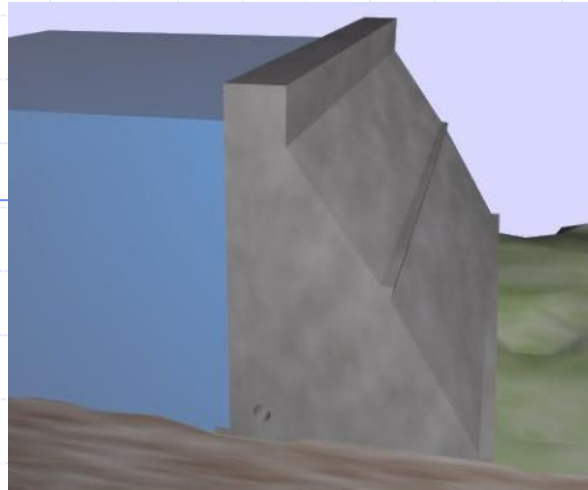
**Presas de contrafuerte (buttress):** El concepto estructural de las presas de contrafuerte consiste en un paramento continuo aguas arriba soportado a intervalos regulares por un contrafuerte aguas abajo (versión aligerada de la presa de gravedad)

**Presa de Arco (Arc Dam):** Tienen una considerable curvatura aguas arriba. Estructuralmente trabajan como un arco horizontal, transmitiendo la mayor parte de la carga de agua a los estribos o laderas del valle y no al lecho de este último. Estructuralmente es más eficiente que las anteriores ya que reduce considerablemente el volumen **de concreto**

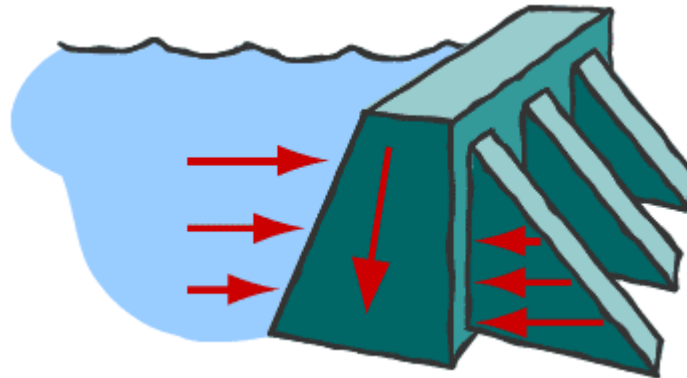
Una derivación particular de la presa de arco simple es la **presa de bóveda o arco de doble curvatura** (en la horizontal y en vertical). Reduce notablemente la cantidad de concreto a utilizar. La estabilidad de los estribos es importante para su integridad estructural y la seguridad.

# PRESAS

Presas de  
hormigón,  
gravitacional

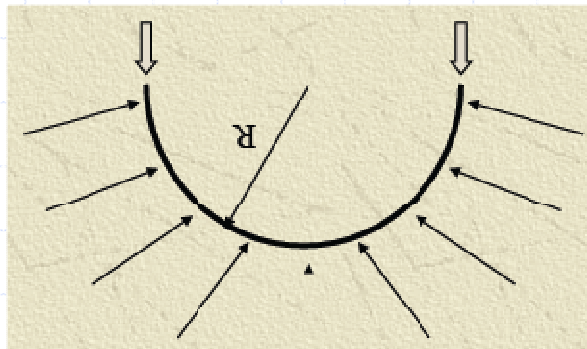
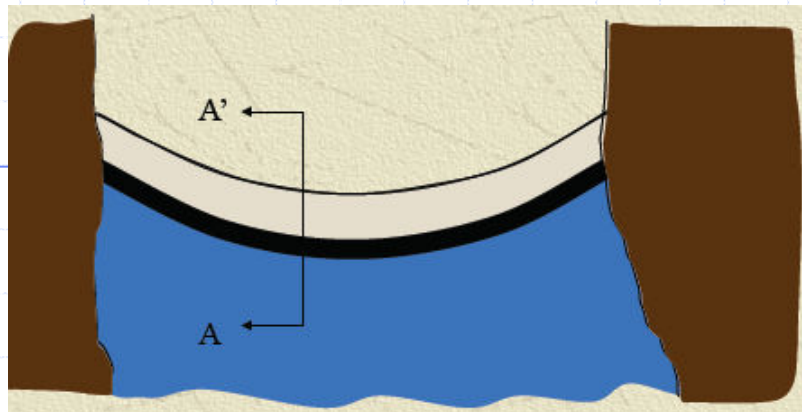


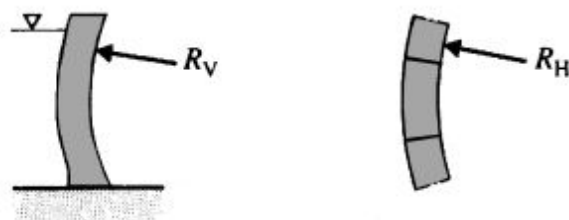
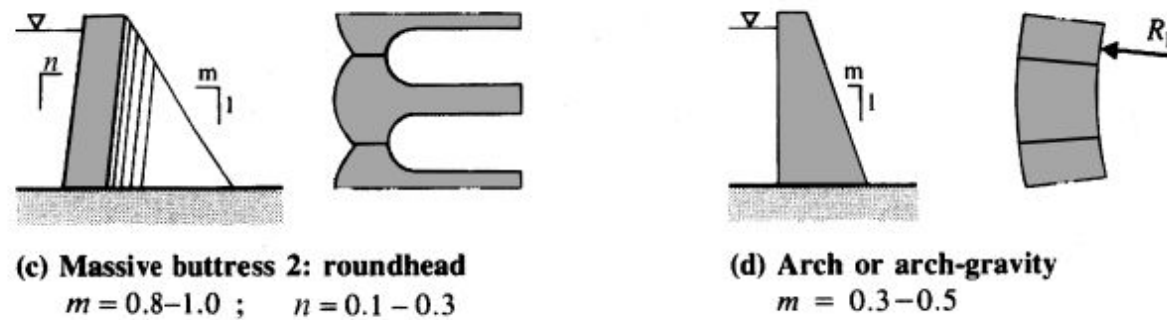
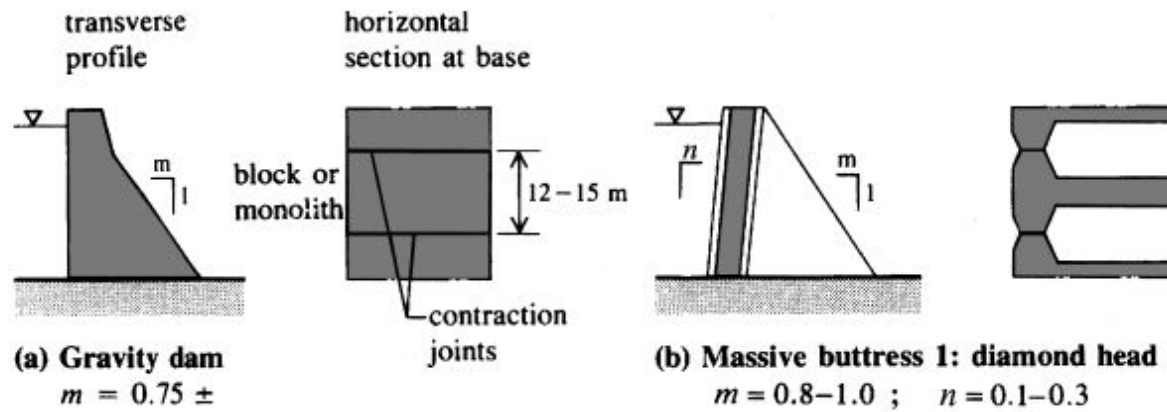
Presas de  
Contrafuerte



## Presas de arco

**REQUIEREN ROCA DE BUENA CALIDAD**





(e) Cupola or double-curvature arch

## Presas de hormigón compactado por rodillo (HCR)



**Presa Ralco.**



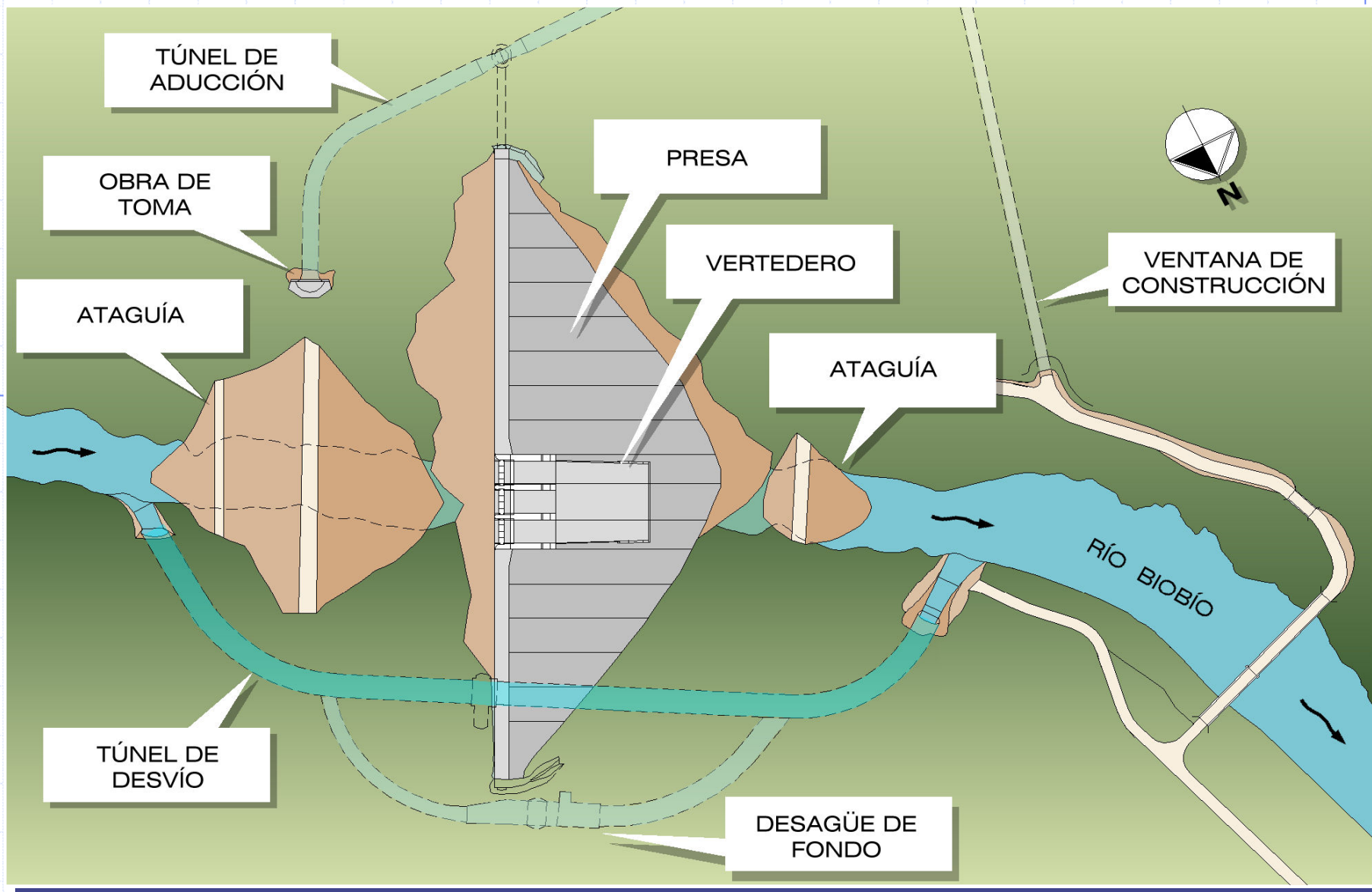
## Proceso constructivo

Colocación de capas:

**REQUIEREN ROCA**



Usan galerías drenantes.



**Tipo de Presa => Configuración de las Obras Anexas**

Tabla 1: Principales características de la presa Ralco.

|                                                    |                         |
|----------------------------------------------------|-------------------------|
| Tipo de presa                                      | Gravitacional de HCR    |
| Altura máxima (m)                                  | 155                     |
| Longitud coronamiento (m)                          | 360                     |
| Ancho coronamiento (m)                             | 8,5                     |
| Cota de coronamiento (m.s.n.m)                     | 727,30                  |
| Volumen total de HCR (m <sup>3</sup> )             | 1,5 x 10 <sup>6</sup>   |
| Nivel máximo del embalse (m.s.n.m)                 | 725,00                  |
| Superficie máxima inundada (ha)                    | 3.467                   |
| Volumen total embalsado (m <sup>3</sup> )          | 1.222 x 10 <sup>6</sup> |
| Volumen máximo de regulación (m <sup>3</sup> )     | 800 x 10 <sup>6</sup>   |
| Caudal de diseño del vertedero (m <sup>3</sup> /s) | 6.550                   |

### Obras de Desviación

Nº túneles : 1

Tipo Sección: herradura de fondo plano

D = 13, 5 m

Q<sub>diseño</sub> = 2.100 m<sup>3</sup>/s.

### Evacuador de Crecidas

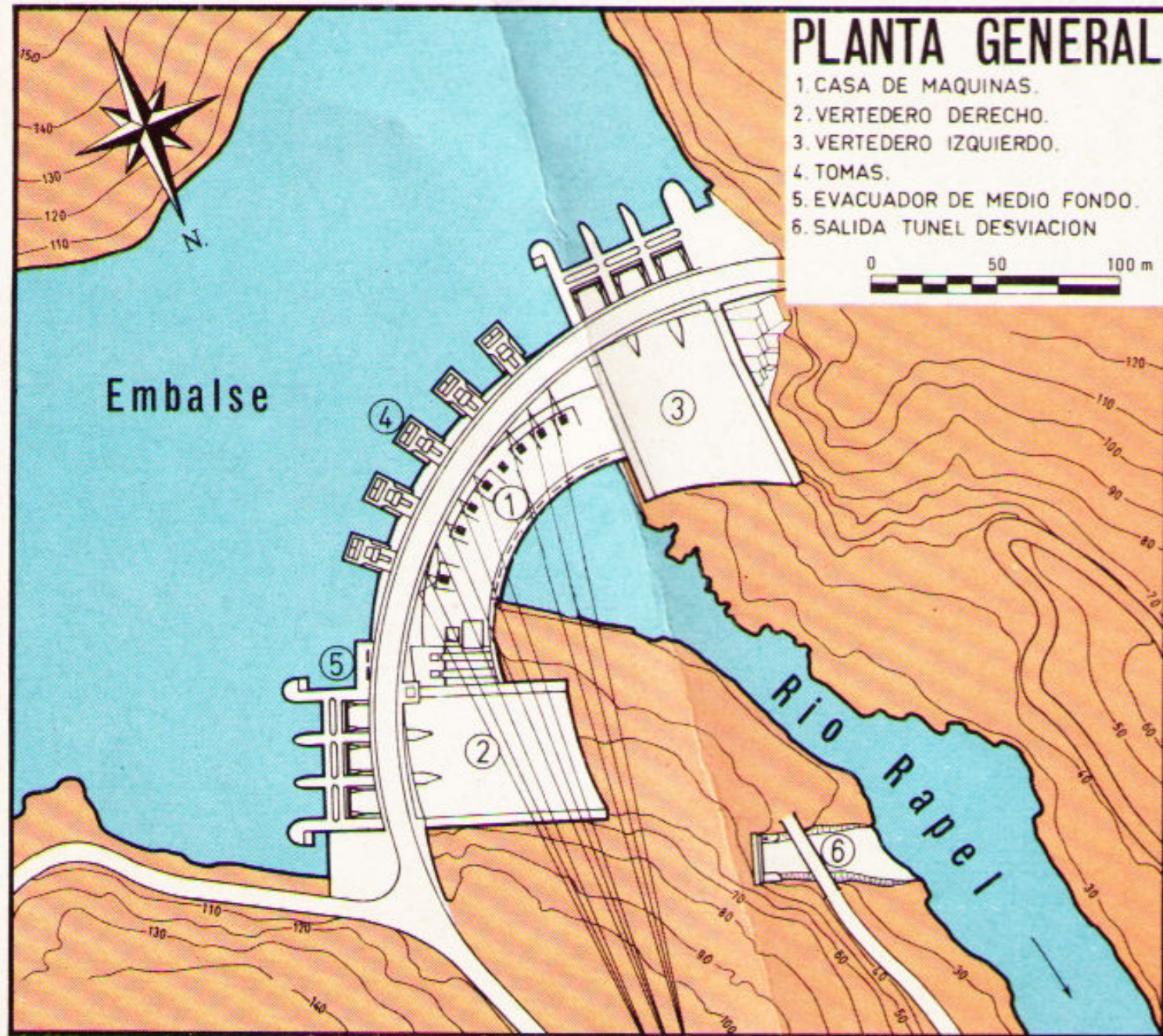
Nº vanos : 3

Ancho vanos = 13,2 m

Ancho machones = 3,8 m

## **Presa Doble Arco. Embalse Rapel.**





## DESCRIPCION

### EMBALSE

El agua embalsada por el muro forma un lago artificial de 8.000 hectáreas de superficie —equivalente a la de los grandes lagos de Chile— que se extiende hasta más arriba de la confluencia de los ríos Cachapoal y Tinguiririca, que forman el Rapel. Con sus 40 kms. de longitud cubre zonas de las provincias de Santiago, Colchagua y O'Higgins.

### MURO DE PRESA

Es una bóveda de hormigón que tiene un radio de curvatura de 174 m. en el coronamiento, una altura máxima de 112 m. desde su fundación, un espesor máximo de 18,6 m. en la clave y de 5,5 m. en su parte superior, y una longitud de 350 m. en su coronamiento. Este último constituye un camino público que contribuye a facilitar las comunicaciones entre las provincias de Santiago y Colchagua.

## Vertederos

Los dos Vertederos son del tipo "salto de esquí", y pueden evacuar  $9\,300\text{ m}^3/\text{seg.}$

Cada Vertedero tiene 47 m. de ancho y su umbral o coronamiento alcanza la cota 90 m. Dispone de 3 pasadas reguladas por compuertas de segmento, cada una de 13,2 m. de ancho y 15,5 m. de alto.

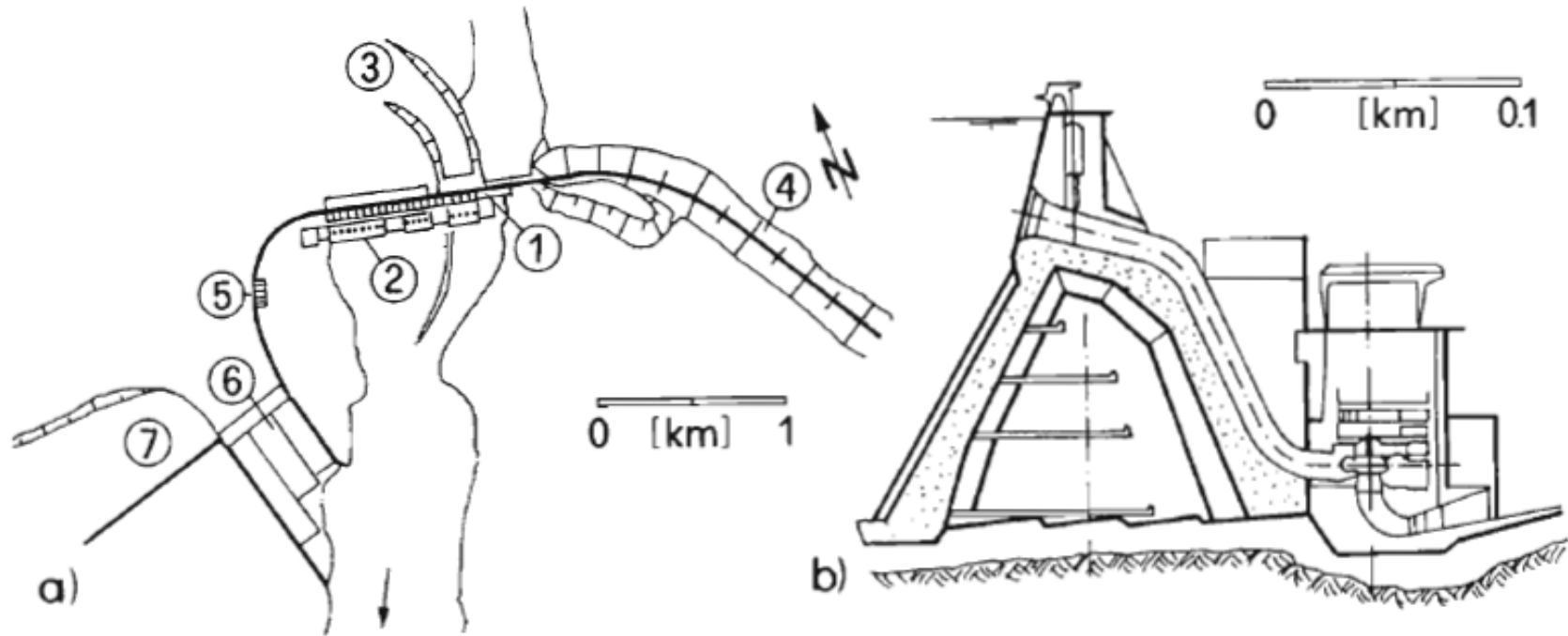
## Evacuadores de Medio Fondo

$$q = 117,4\text{ m}^3/\text{s}/\text{m} \text{ (Zona compuertas)}$$

Están ubicados sobre el techo de la Casa de Máquinas, a la cota 55 m. Son dos pasadas que terminan en orificios de 2,75 m. de ancho y 4,40 m. de alto, controlados por dos compuertas de segmento de  $2,75 \times 4,40$  m. y pueden evacuar hasta  $700\text{ m}^3/\text{seg.}$

$$\text{Vel. Zona Compuertas} = 28,9\text{ m/s}$$

## Itaipu (Concrete Dam)



**Figure 1.3** Itaipu dam (Brazil-Paraguay) (a) plan, (b) principal section with ① main dam, ② powerhouse, ③ diversion channel, ④ left earthfill/rockfill dam, ⑤ lateral intake, ⑥ spillway, ⑦ right earthfill dam

### Vertedero.

$Q = 62.000 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $T = 10.000$  años)

Nº Compuertas : 14 Compuertas de 20 m X 20 m

Carga Máx de Diseño : 23 m ( $H_{d \text{ máx}}$ )

### Rápido de descarga.

Ancho : 350 m

$q$ : 180  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$

Vel. Salida : 40 m/s

## Condiciones para construir un embalse

- Existencia de una cubeta de capacidad apropiada.
- Estanqueidad de la cubeta
  - Es un requisito primordial y exige un reconocimiento detallado de ingenieros y geólogos.
  - Es crucial definir el tipo de suelo en que fundará la presa y la ubicación de la roca basal.
- Llenado de la cubeta asegurado anualmente (disponibilidad de recursos hídricos)
- Existencia de una garganta o estrechamiento que permita construir una presa económica
- Suelo de fundación apropiado para la presa
- Favorable ubicación de la obra para cumplir sus objetivos (riego, generación hidroeléctrica)

# Estudios Básicos de terreno

## TOPOGRAFÍA

Deben obtenerse planos que cubren el área del embalse, el sitio de la presa y también las áreas potenciales de los empreritos (yacimientos) La ubicación de los pozos de exploración, zanjas y calicatas y otros puntos significativos como afloramientos de roca, deslizamientos, caminos y senderos deben ubicarse en el plano

Debe hacerse topografía de detalle en el embalse, en la zona de presa y de los portezuelos ubicados en el perímetro del embalse.

La topografía de la zona de presa permite determinar la disposición de la presa y de las excavaciones necesarias, con lo cual se obtiene la ubicación de los materiales necesarios para la construcción, además se pueden estudiar obras hidráulicas, caminos de acceso, etc.

Las fotografías aéreas (**aerofotogrametría**) son un apoyo importante a la caracterización del terreno, ya que permiten el reconocimiento superficial junto a la topografía, como cubierta vegetal, zonas de drenaje, deslizamientos de terreno, zonas de falla, etc.

## HIDROLOGÍA

- Estudio de Disponibilidad de Recursos Hídricos (caudales medios mensuales, medios diarios si se requiere)
- Estudio de Crecidas ( $Q_{mi}$  v/s Período de retorno)

## GEOLOGÍA

Deben prepararse mapas geológicos para el área del proyecto y área el sitio de presa. Mapas de geología superficial que muestran zonas de roca, rellenos según sus orígenes, tales como corrientes aluviales, glaciares, depósitos eólicos, etc.

Mapas de geología estructural o tectónica con las fallas geológicas, características de las rocas como su grado de fracturamiento o si son rocas descompuestas, zanjas lineales o hundimientos en el valle, descenso del fondo del río, etc.

## GEOTECNÍA

Mecánica de Rocas: Analizar la estabilidad de laderas en vaso y la garganta, generalmente formadas por macizos rocosos, es materia de Mecánica de Rocas. Diseñar los tratamientos de inyección para impermeabilizar la presa, localizar y explotar eficientemente bancos de roca (emprestitos o yacimientos) para construcción de presas o para producir agregados de concreto, así como la técnica adecuada para excavar túneles y galerías dentro de un macizo rocoso. Implica la ejecución de calicatas y sondajes y otros ensayos de terreno.

*Mecánica de Suelos:* Permite investigar las propiedades, índices y mecánicas de materiales térreos (limosos, arcillosos o mezclados con granulares), aptos para el núcleo impermeable, transiciones y respaldos en el diseño de secciones de cortinas de las presas de "materiales graduados", así como agregados para concretos. (Yacimientos o empréstitos).

*Geofísica:* Permite conocer la potencialidad de bancos de préstamo de arcilla y grava-arena, lo mismo para determinar espesores de acarreos en los cauces de los ríos o para determinar espesores del terreno para la ubicación de estructuras.

## SISMICIDAD

Es de interés realizar un estudio de caracterización de la sismicidad de la zona (regionalización sísmica).

ESTUDIOS DE INGENIERÍA (profundidad según la etapa del proyecto).

- Ingeniería Hidráulica
- Ingeniería Estructural
- Ingeniería Geotécnica
- Geología

# PROYECTO DE UNA PRESA Y SUS OBRAS HIDRÁULICAS

Como se ha mencionado, el proyecto de una presa y sus obras hidráulicas es atingente a varias especialidades de la ingeniería (Proyecto multidisciplinario)

En este contexto, desde el punto de vista hidráulico, las obras más importantes que se pueden mencionar las siguientes:

- Participación en la definición del tipo de **muro de la presa** (configuración de las obras, cota de coronamiento del muro).
- **Obras de desviación** del río para la construcción de la presa (elemento de conducción + ataguías)
- **Evacuador de Crecidas** (umbral + rápido de descarga + disipador de energía).
- **Desagüe de fondo** o de medio fondo.
- **Bocatoma y aducción** para la generación de energía o para el abastecimiento de agua. Obra de entrega para riego.

## **ANCHO DE CORONAMIENTO**

$$W = H/5 + 10 \text{ (USBR)}$$

$$W = 3,6 * H^{1/2} - 3 \text{ (Código Japonés)}$$

H: Altura máxima (pies)

W: ancho coronamiento (pies)

$$b = (-36 * H^{-0,2}) + 25 \text{ (Gálvez, Vidal, DOH, MOP)}$$

$$W = (1+F) * b \text{ (F: factor de sismicidad, 25%: alto)}$$

Como criterio general, se puede aceptar que el ancho de coronamiento varía entre un 8% y un 12% de la altura total del muro.

## Cálculo de la revancha de una presa

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$$

$R$  = revancha total

$R_1$  = efecto del viento sobre el embalse

$R_2$  = efecto debido al oleaje (Run-up)

$R_3$  = asentamiento posterior a la construcción

$R_4$  = efecto sísmico

La revancha total indicada debe dejarse sobre el nivel de aguas máxima (nivel fijado por el evacuador para la crecida de diseño, normalmente  $T = 1.000$  años)

En las presas se acostumbra a utilizar los siguientes términos:

**NAMN o NAMO** : Nivel de aguas máximas normales o de operación.

**NAME**: Nivel de aguas máxima eventual de un embalse. Es el nivel de aguas en el embalse cuando se encuentra operando el vertedero de seguridad con su caudal de diseño.

Determinación del NAME: Es función de la curva embalse y de la curva de descarga del vertedero o bien es un dato impuesto al proyecto en cuyo caso pasa a ser un criterio de diseño del vertedero y de la presa.

Luego la **cota de coronamiento** será:

**NAMO + Carga vertedero + S (viento) + R (run up) + Otros términos**

**NAME + S + R + Otros términos**

Condición de diseño usual para la altura de presas:

**“La cota de coronamiento de la presa deberá ser mayor que la carga eventual del vertedero (NAME) operando con su caudal de diseño, más la sobre - elevación producida en el embalse por el viento y oleaje de diseño adoptado para el tipo de presa considerado”.**



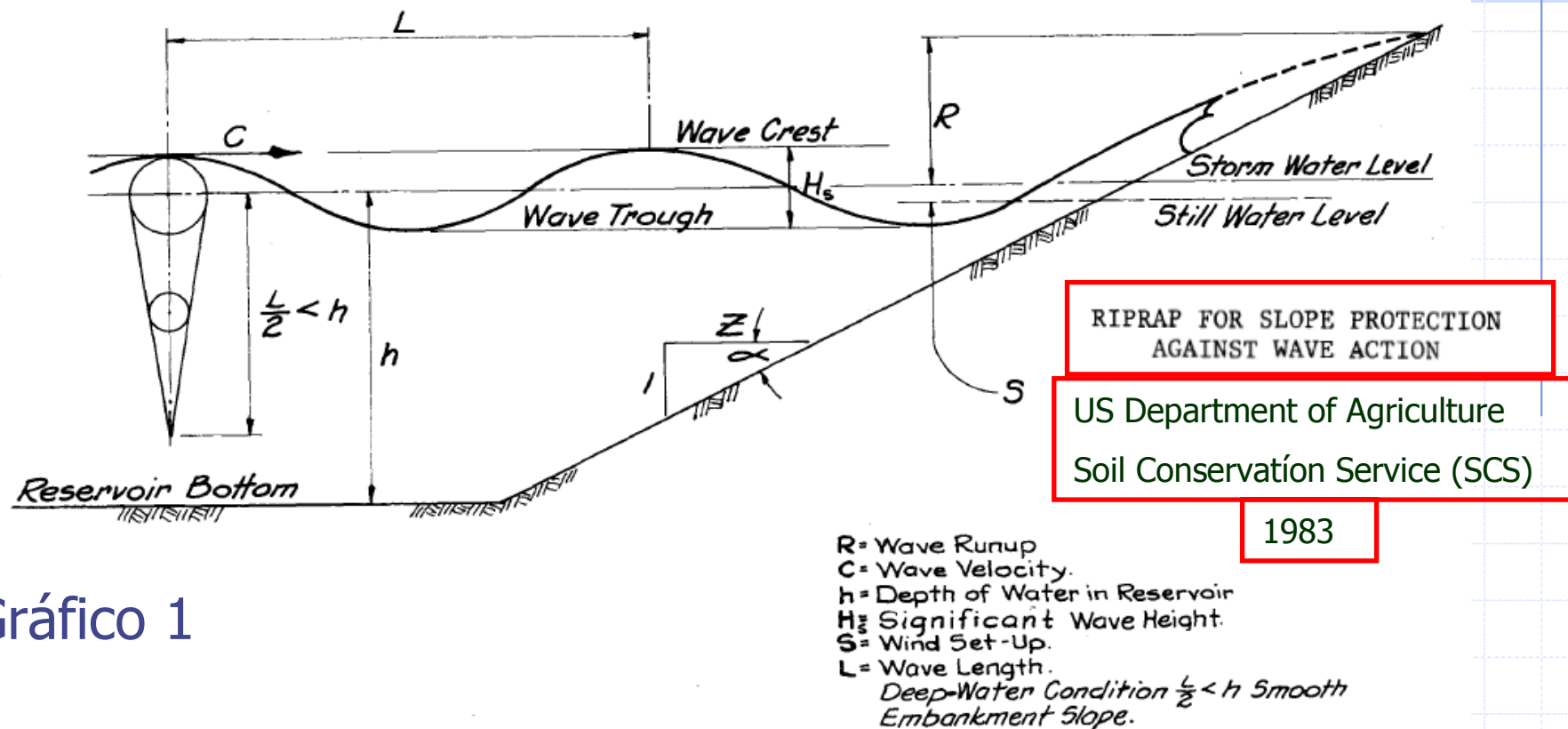


Gráfico 1

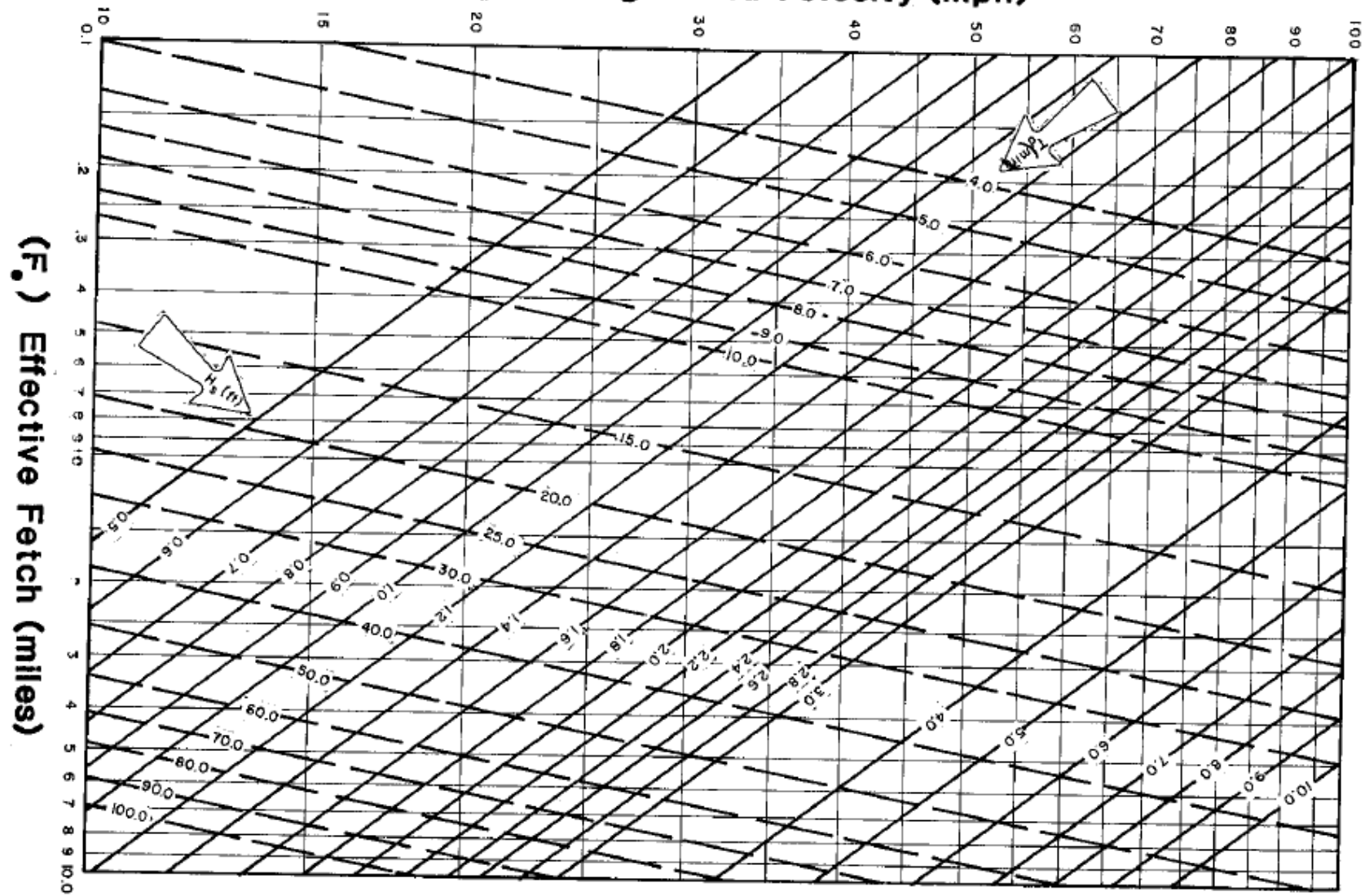
Para evaluar  $H_s$  (altura de ola significativa) debe considerarse:

- A. Dirección del viento de diseño
- B. Fetch efectivo
- C. Velocidad y duración del viento.

Las estimaciones que se presentan son válidas para el caso de "aguas profundas" ( $L/2 < h$ ). En el caso de aguas someras, la teoría del aguas profundas entrega una estimación conservadora (segura)

## Gráfico 2

$(U_L)$  Overland Wind Velocity (mph) or  
 $(U_d)$  Design Wind Velocity (mph)

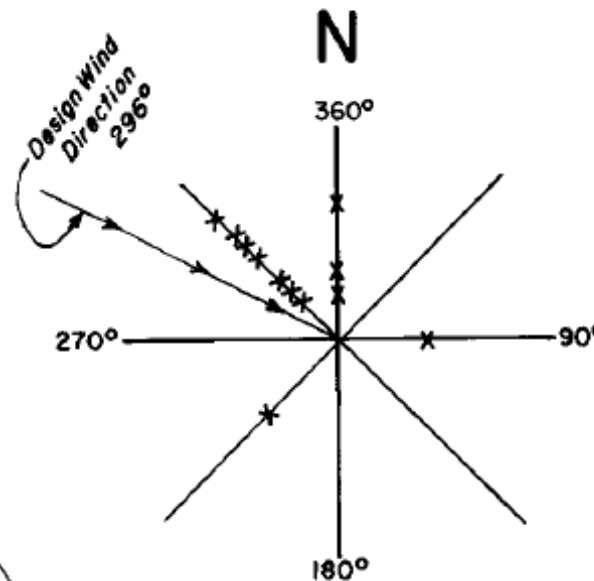


## A. Dirección del viento de diseño

### Método 1: Uso de datos climatológicos

| WIND DIRECTION |                     |                    |        |
|----------------|---------------------|--------------------|--------|
| 1              | 2                   | 3                  | 4      |
| MON.           | Wind Velocity (MPH) | Asimuth $^{\circ}$ | (2x3)  |
| JAN            | 24                  | 360                | 8640   |
| FEB            | 40                  | 360                | 14400  |
| MAR            | 25                  | 315                | 7875   |
| APR            | 36                  | 315                | 11340  |
| MAY            | 59                  | 315                | 18585  |
| JUN            | 72                  | 315                | 22680  |
| JUL            | 50                  | 90                 | 4500   |
| AUG            | 63                  | 360                | 22680  |
| SEP            | 30                  | 315                | 9450   |
| OCT            | 51                  | 315                | 16065  |
| NOV            | 60                  | 315                | 18900  |
| DEC            | 62                  | 225                | 13950  |
| $\Sigma$       | 572                 |                    | 169065 |

|                                                                                                 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>DESIGN WIND DIRECTION</p> $\frac{\Sigma (4)}{\Sigma (2)} = \frac{169065}{572} = 296^{\circ}$ |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|



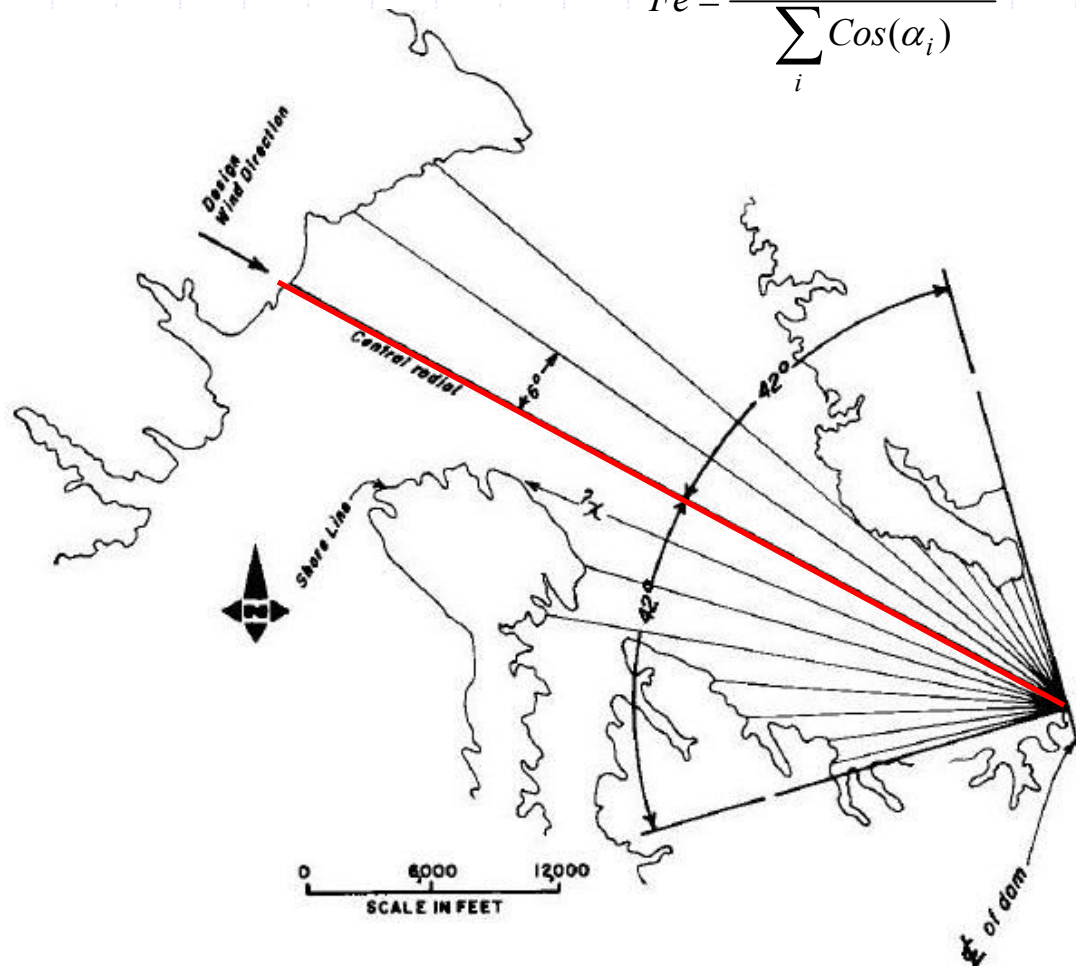
### Método 2: Uso de datos recopilados en terreno

## B. Fetch efectivo

| EFFECTIVE FETCH |               |                 |                            |                     |
|-----------------|---------------|-----------------|----------------------------|---------------------|
| 6               | 7             | 8               | 9                          | 10                  |
| $\alpha^\circ$  | $\cos \alpha$ | $\cos^2 \alpha$ | From Design Wind Direction |                     |
|                 |               |                 | $x_i$                      | $x_i \cos^2 \alpha$ |
| 42              | 0.743         | 0.552           | 2.23                       | 1.23                |
| 36              | 0.809         | 0.654           | 2.21                       | 1.45                |
| 30              | 0.866         | 0.750           | 2.92                       | 2.19                |
| 24              | 0.914         | 0.835           | 3.23                       | 2.70                |
| 18              | 0.951         | 0.904           | 4.85                       | 4.38                |
| 12              | 0.978         | 0.956           | 4.58                       | 4.38                |
| 6               | 0.995         | 0.990           | 5.45                       | 5.40                |
| 0               | 1.000         | 1.000           | 8.02                       | 8.02                |
| 6               | 0.995         | 0.990           | 7.86                       | 7.78                |
| 12              | 0.978         | 0.956           | 7.54                       | 7.21                |
| 18              | 0.951         | 0.904           | 2.12                       | 1.92                |
| 24              | 0.914         | 0.835           | 1.71                       | 1.43                |
| 30              | 0.866         | 0.750           | 1.24                       | 0.93                |
| 36              | 0.809         | 0.654           | 1.24                       | 0.81                |
| 42              | 0.743         | 0.552           | 1.22                       | 0.67                |
| $\Sigma$        | 13.512        |                 | 50.50                      |                     |

| EFFECTIVE FETCH                                     |  |
|-----------------------------------------------------|--|
| $F_e = \frac{\Sigma(10)}{13.512} = 3.7 \text{ mi.}$ |  |

$$F_e = \frac{\sum_i \cos^2(\alpha_i) \cdot X_i}{\sum_i \cos(\alpha_i)}$$



Método 2: Similar pero considerando la máxima distancia entre el eje de la presa y la ribera más lejana

## C. Velocidad y duración del viento de diseño

### C.1. Velocidad del viento sobre el terreno (UL)

Método 1: Uso de datos climatológicos

Por ej: promedio de los máximos mensuales

Método 2: Uso de datos regionalizados (no aplicable al caso Chileno)

Método 3: Uso del valor máximo del registro disponible corregido por efecto de la duración y fetch efectivo

- Determinación del valor máximo del registro disponible.
- Dibujar en un gráfico  $U_L$  v/s duración del viento ( $T_d$ ), según lo indicado en el Gráfico 3 y considerando la velocidad máxima
- Para el fetch efectivo, determinar los pares  $U_L$  v/s duración del viento ( $T_d$ ) según el Gráfico 2.
- Dibujando  $U_L$  v/s ( $T_d$ ), se obtienen dos curvas, cuya intersección determina la velocidad y la duración del viento de diseño (ver Gráfico 4)

Gráfico 3

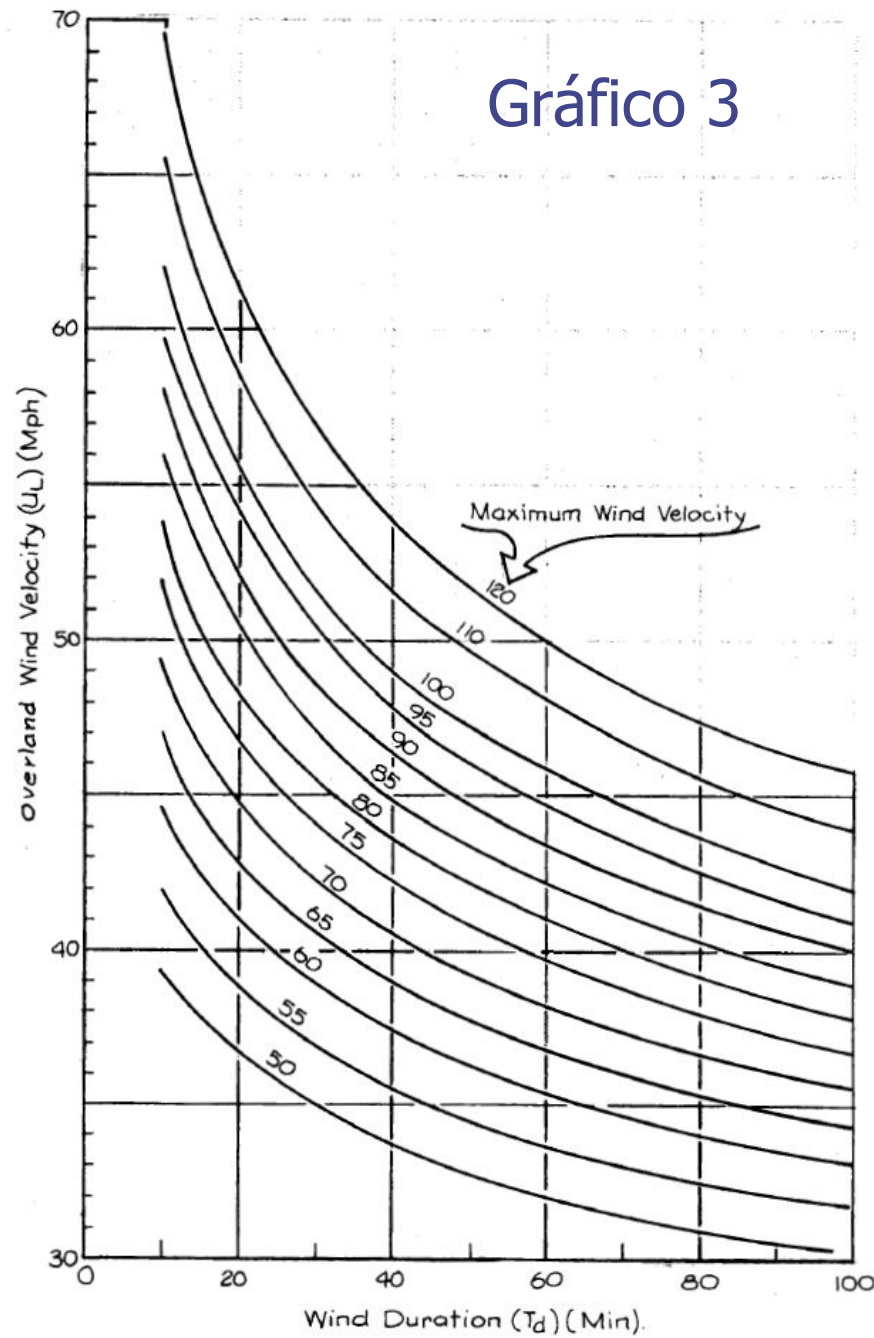
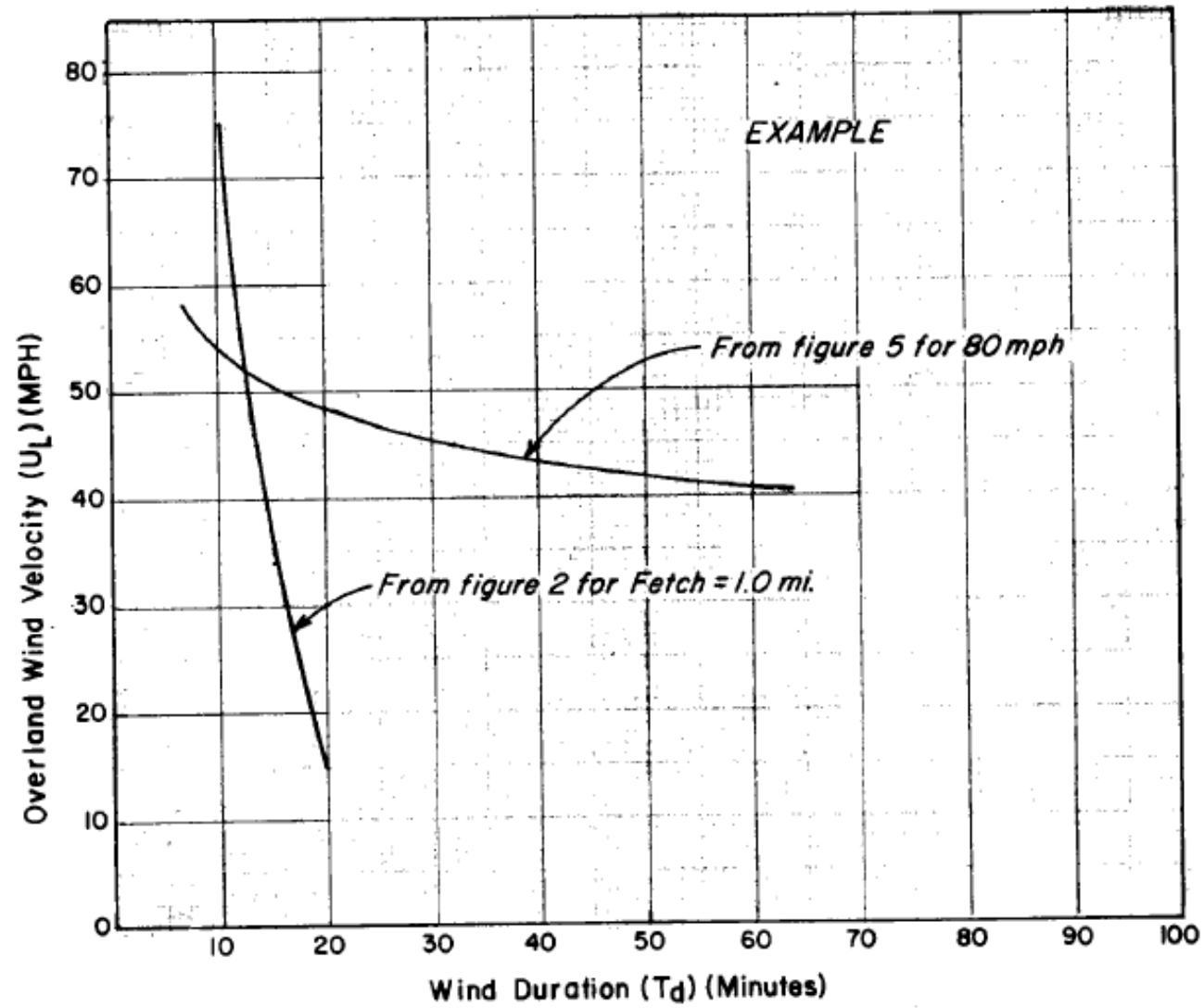


Gráfico para la  
determinación de  
 $U_L$  v/s  $T_d$

## Gráfico 4



## C. Velocidad y duración del viento de diseño

### C.2. Velocidad del viento sobre el agua ( $U_w$ )

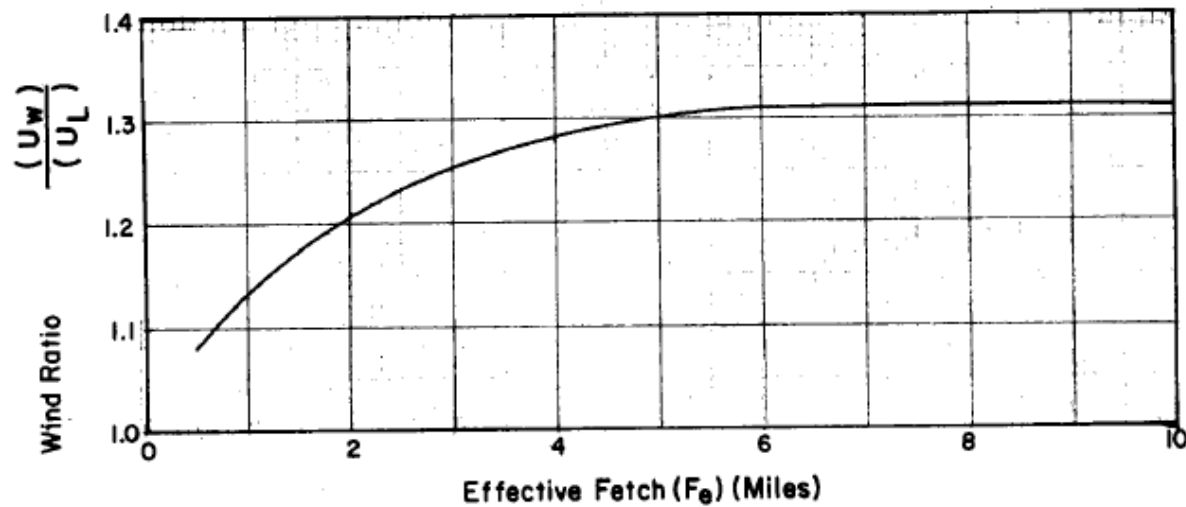


Gráfico 5

$U_w$  es la velocidad de diseño ( $U_d$ )

## Determinación de la altura de ola significativa ( $H_s$ )

Método 1: Usando el Gráfico 2 y considerando la velocidad de diseño ( $U_d$ ) y el fetch efectivo ( $Fe$ )

Método 2: En caso de que los datos disponibles sean limitados, se recomienda adoptar ( $U_d = 50$  mph) y el fetch máximo ( $Fp$ )

Método 3: Uso de formulas empíricas

$$H_s = 0.0026 \cdot \frac{V_w^2}{g} \cdot \left( \frac{g \cdot Fe}{V_w^2} \right)^{0.47}$$

$$H_s = 0.34 \cdot Fe^{1/2} + 0.76 - 0.26 \cdot Fe^{1/4} \text{ (Davis y Sorensen)}$$

$H_s$ : Altura significativa de la ola (m)

$Fe$ : Fetch Efectivo (m)

$V_w$ : Velocidad máxima sobre la superficie del embalse (m/s)

## Determinación del Run-Up (R)

- Determinar la longitud de onda (L) en función del Fetch efectivo y la velocidad del viento de diseño

$$\frac{g\sqrt{L}}{U} = 1.041 \left( \frac{g F_e}{U^2} \right)^{0.28}$$

- En función del talud de aguas arriba del embalse y la razón  $H_s/L$ , se determina la razón  $R/H_s$  utilizando el Gráfico 7

**$R_2$  = efecto debido al oleaje (R)**

Gráfico 6

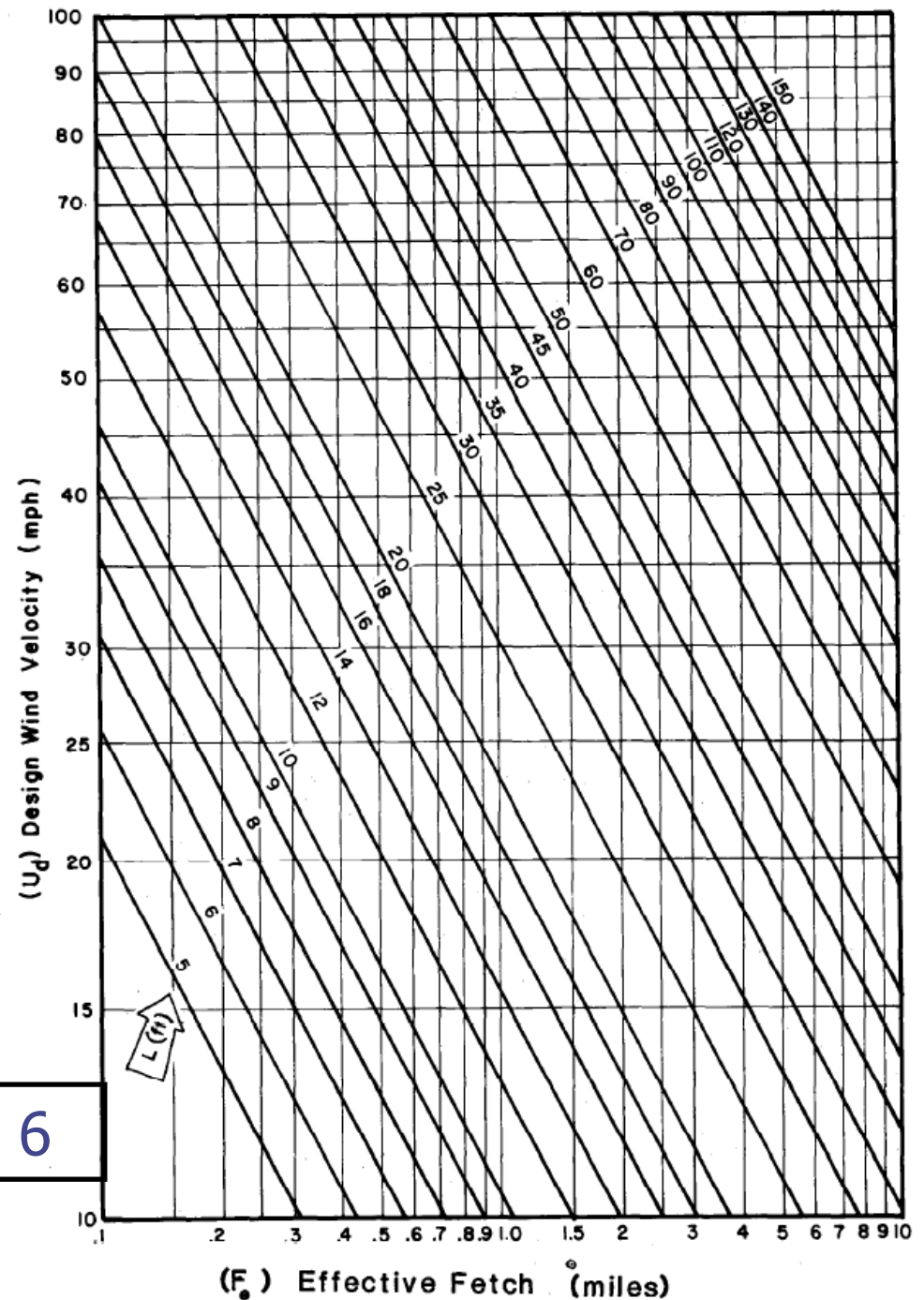
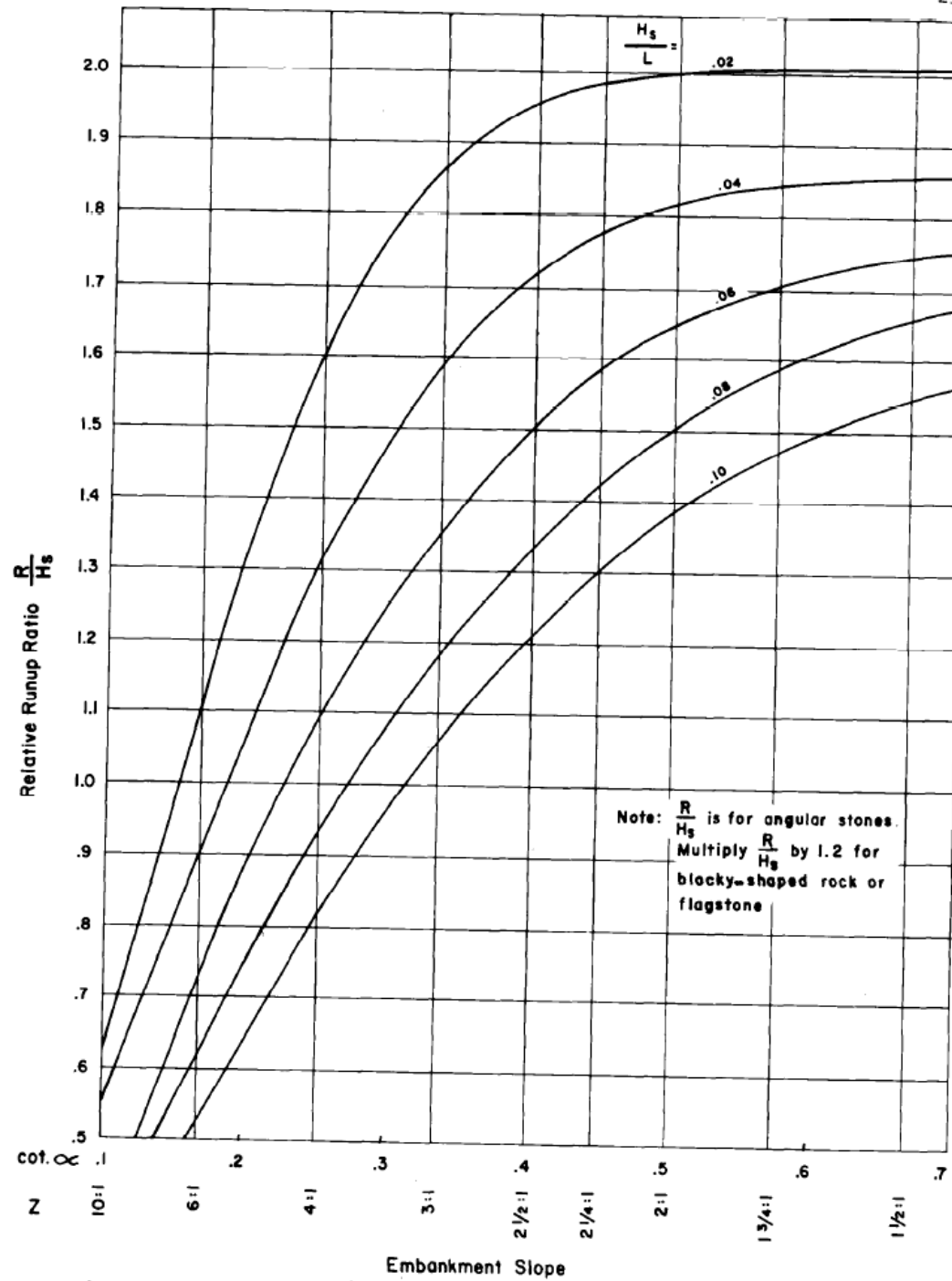


Gráfico 7



## Determinación del efecto del viento ( $S = R_1$ )

S puede ser estimado simplifícadamente como:

- el 10% de  $H_s$  con un máximo de 0,5 pies.
- Según el Gráfico 8 en función de la altura media del embalse, la velocidad del viento y el fetch efectivo.

$$S = \frac{V^2 F}{1400 h}$$

F: Fetch efectivo (millas)

V: velocidad del viento (mph)

h: altura media del embalse (feet)

Gráfico 8

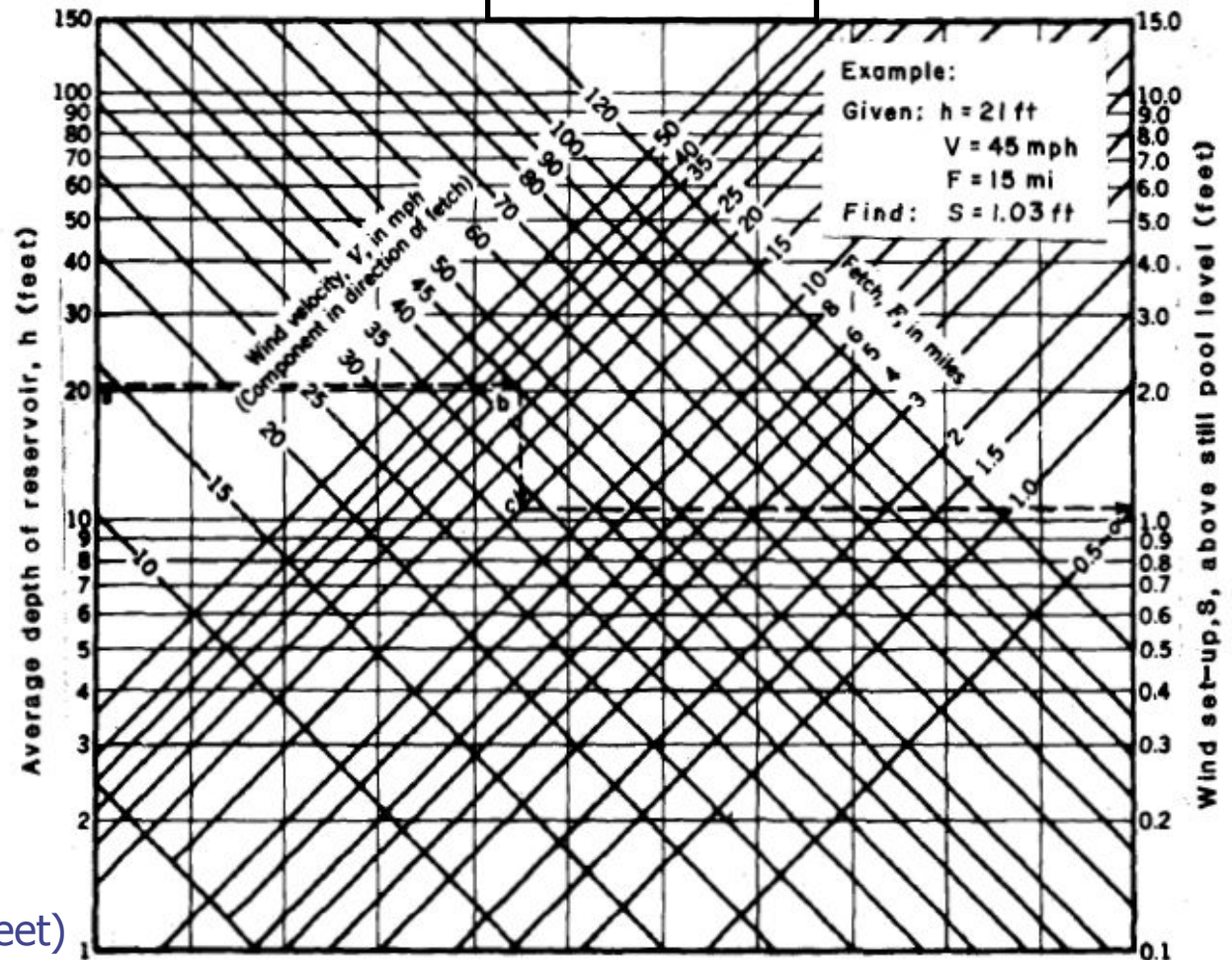


DIAGRAM FOR COMPUTATIONS OF WIND SET-UP IN RESERVOIRS

En unidades métricas, se tiene:

$$R_1 = \frac{V^2 * F * \cos(\delta)}{K * D}$$

$$R_1 \equiv S$$

V = Velocidad del viento en Km/hr.

F = Fetch en Km

D= Profundidad media en m ( $H_{\text{presa}}/2$ ).

$\delta$ = Angulo del viento con respecto al fetch (se considera 0°)

K = Cte = 62.000

## Periodo de la ola significativa ( $T_s$ )

El periodo de la ola significativa ( $T_s$ ) se calcula como:

$$T_s = \frac{0.3 \cdot V_w^{0.4} \cdot F_e^{0.3}}{g^{0.7}}$$

Donde:

$T_s$ : Periodo de la ola significativa (s)

$F_e$ : Fetch Efectivo (m)

$V_w$ : Velocidad máxima sobre la superficie del embalse (m/s)

Conocido  $H_s$  puedo estimar  $R$   
(remonte de la ola sobre el talud de la presa).

Si la ola revienta en un talud de pendiente suave ( $\alpha$ ) e impermeable, se puede utilizar la relación de Hunt (1959)

$$\text{Si } \operatorname{tg} \alpha < \frac{8}{T} \cdot \sqrt{H_s / 2g} \quad T = 11 \cdot \sqrt{\frac{H_s}{g}} \text{ (embalses poco profundos)}$$

$$\frac{R}{H_s} = 0,41 \cdot T \cdot \sqrt{\frac{g}{H_s}} \cdot \operatorname{tg} \alpha \Rightarrow \frac{R}{H_s} = 2,3$$

$$\text{Si } \operatorname{tg} \alpha > \frac{8}{T} \cdot \sqrt{H_s / 2g}$$

La ola se refleja y el run-up es menor que la onda rompiente límite ( $R/H = 2,3$ ).

$$\frac{R}{H_s} = \sqrt{\frac{90}{\alpha}}$$

### **R<sub>3</sub>: asentamiento posterior a la construcción**

Las presas de gravas se espera que sufran asentamientos muy reducidos post-construcción.

Las presas de hormigón no están afectas a este tipo de asentamiento.

Siguiendo los criterios que fija J. Sherard y B. Cooke en la publicación "The Concrete Face Rockfill Dam", el asentamiento post-construcción que se tendría lo siguiente:

- Primeros años (5 años) < 13,3 mm,
- Entre los 5 y 10 años: 4,6 mm/año
- Entre los 10 y 30 años: 2,0 mm/año
- Más de 30 años : 0,8 mm/año.

## **R<sub>4</sub> : asentamiento por sismo**

Las presas de hormigón, por su tipo de fundación, no están afectas a este tipo de asentamiento.

El asentamiento por sismo depende de la magnitud del sismo y la aceleración máxima que éste produce en el lugar de la obra.

$$ESI = PVGA * (Ms - 4,5)^3$$

Ms = Magnitud Richter

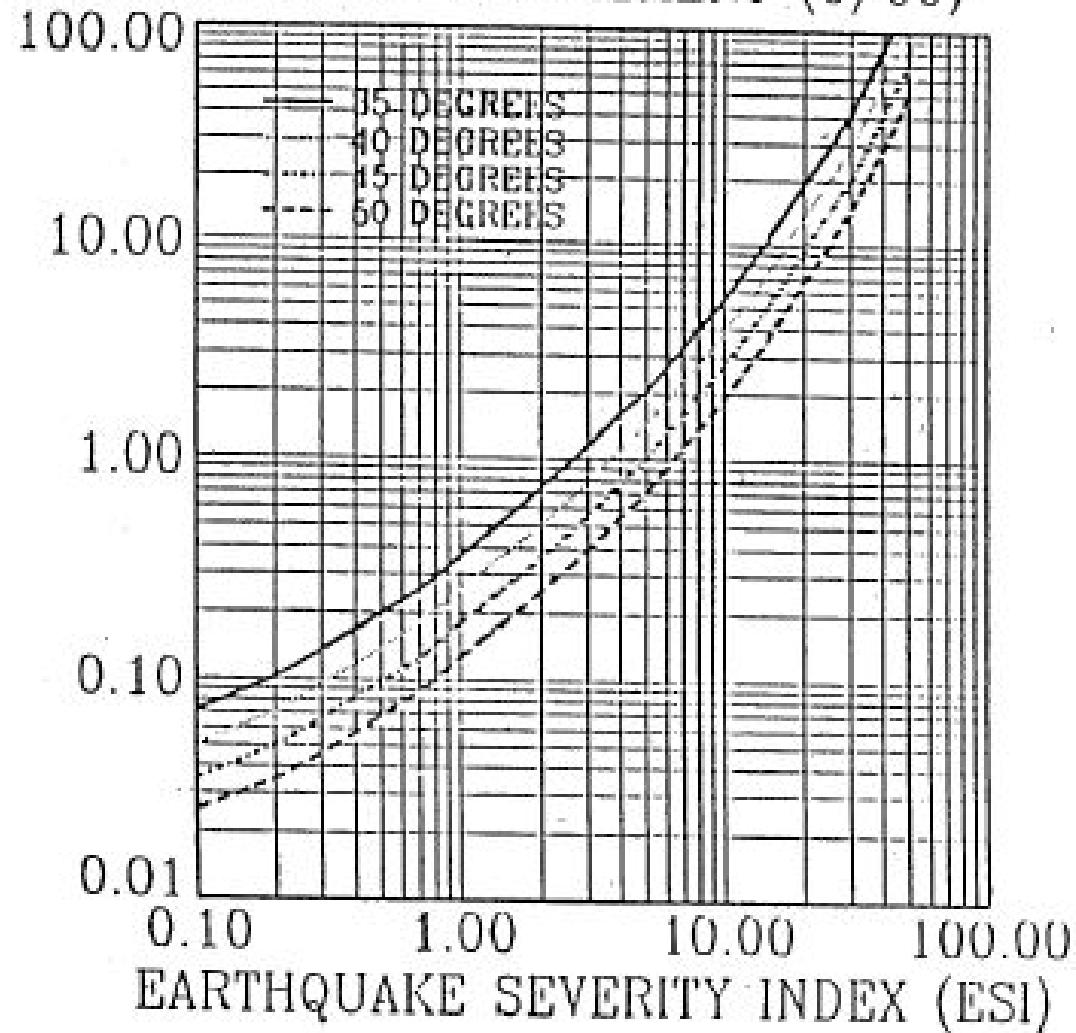
a<sub>máx</sub> = aceleración máxima en la base de la presa = PVGA

ESI (Earthquake Severity Index), ver trabajo de G. Noguera. presentado en el decimosexto congreso de la ICOLD, págs. 152 a 162, volumen V, San Francisco, 1988).

# ROCKFILL DAMS

## EARTHQUAKE SETTLEMENTS

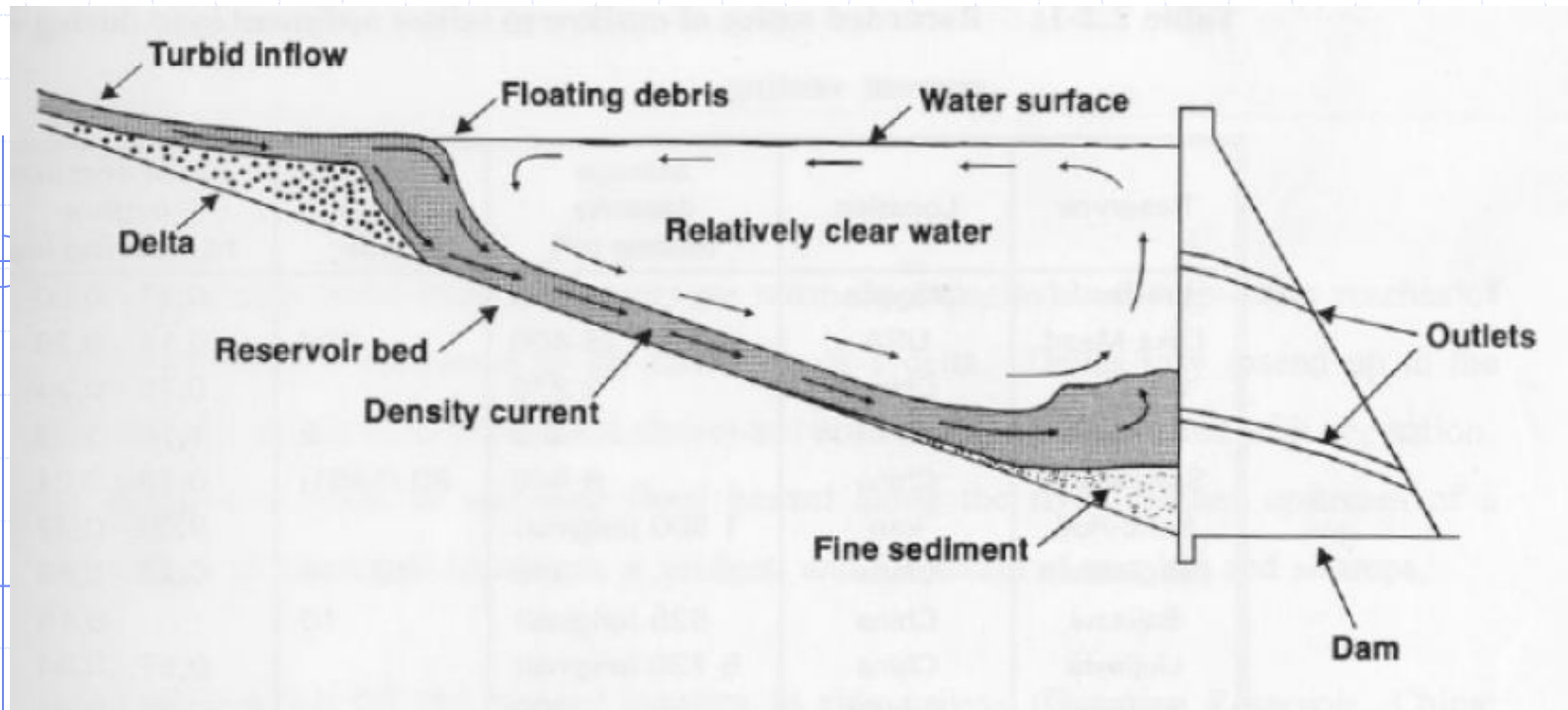
RELATIVE CREST SETTLEMENT (0/00)



## Vida Útil de un embalse

Uno de los principales problemas que a menudo afectan a los embalses es su pérdida de capacidad debido al depósito de sedimento en su interior. Cuando la corriente del río llega al lago o embalse, el sedimento transportado se comportará de acuerdo al siguiente mecanismo (ICOLD, 2007; Manual USBR, 2006):

- Al entrar la corriente al embalse, el material grueso (típicamente arena o grava, **relacionada con el gasto sólido de fondo**) se depositará por efecto de la disminución de la velocidad del flujo debido al aumento de la Sección de escurrimiento, formando una acumulación de sedimento denominado **"delta"** que avanza hacia el interior del embalse.
- El sedimento más fino (típicamente formado por limo o arcilla, **relacionado con el gasto sólido suspendido**) continuará hacia adentro de la cubeta como una **corriente de turbidez**, para posteriormente detenerse y depositarse en el fondo.
- Existen embalses en los que tal corriente no llega a formarse y se produce una turbidez generalizada dentro de la cubeta, que evolucionará de acuerdo a la dinámica particular del embalse. En este caso, los sedimentos también son depositados a lo largo del embalse.



La determinación de la vida útil de un embalse es de vital importancia para la evaluación económica de un proyecto. Se entiende por vida útil, el tiempo que tarda en llenarse con sedimentos, hasta el punto que ya no puede cumplir con los objetivos para los que fue construido. El volumen destinado a recibir sedimentos se denomina "volumen muerto", en proyectos importantes dicho volumen debe tener al menos una capacidad de acumulación cercana a los 100 años (vida útil mínima).

El umbral de la obra de descarga más abajo debe ubicarse sobre el nivel máximo ocupado por los sedimentos

## **Metodología de estimación de la vida útil. Generalidades.**

El período de colmatación de un embalse, producto de la depositación de sedimentos, se puede estimar mediante métodos analíticos (modelaciones numéricas de flujo y transporte de sedimentos, ver por ej: Modelo MOSSEM, memoria González, 2006), métodos empíricos (apoyados en datos de terreno, años 1940-1970), modelos físicos, entre otros.

En Chile es normalmente utilizado el método empírico Lara. Mayores detalles consultar:

- Estimación de la distribución de los depósitos de sedimento en un embalse : aplicación al embalse C. Colbún / Andrés Benítez; Empresa Nacional de Electricidad División Estudios Hidrológicos. Disponible en CIRH – DGA.
- Sedimentación en embalses. Capítulo 18: Manual de Ingeniería de Ríos. UNAM. 1997. Gracia Sánchez, 1997.

Lara estableció un procedimiento basado en la clasificación de los embalses en cuatro tipos diferentes según su forma. Para cada forma existe una relación razonable entre la altura porcentual del embalse respecto a la altura total y el volumen de sedimento depositado.