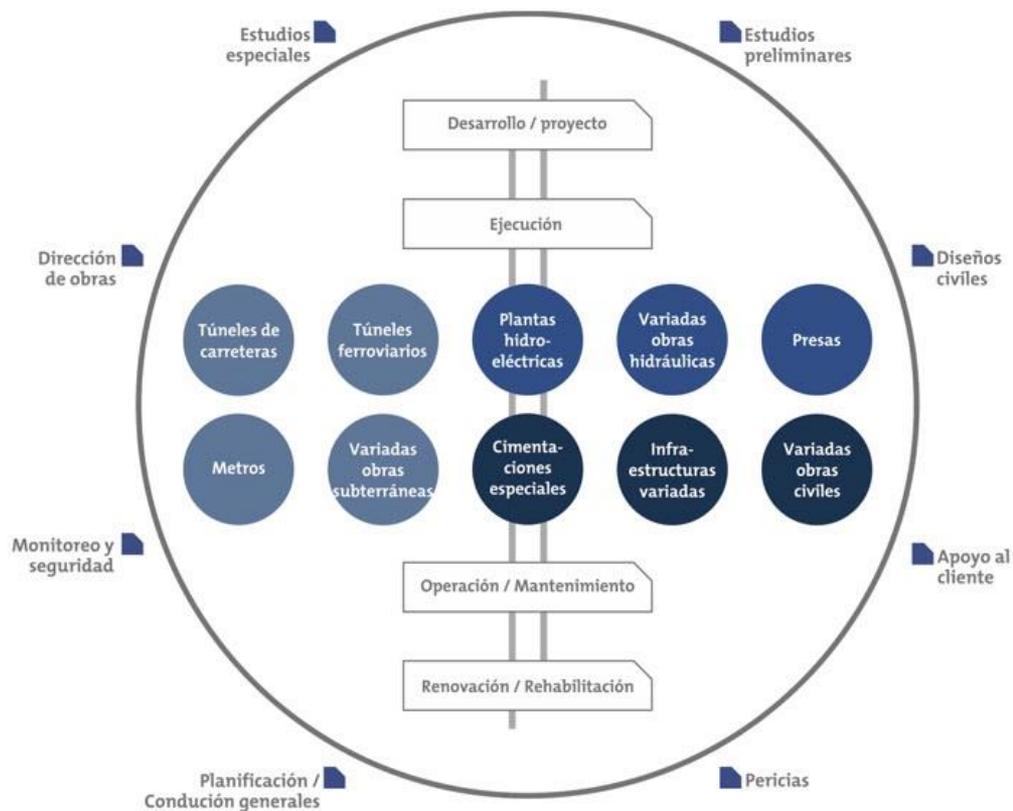




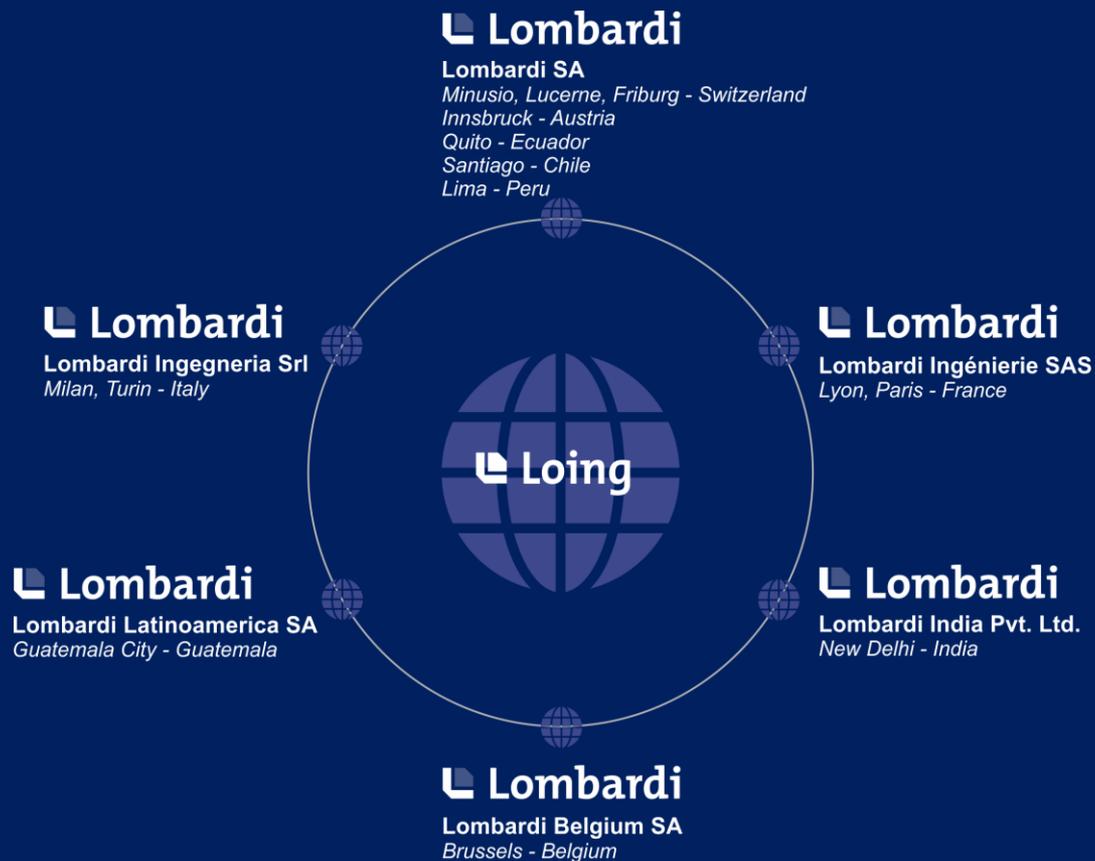
Diseño de CRFD en condiciones sísmicas severas

Ing. Rafael Basso, M.Sc.

COPEGP







1. **Concepto general de presa de enrocado con cara de hormigón (CFRDs – *Concrete Face Rockfill Dams*)**
2. **Proyecto Embalse la Punilla (Chile) – Muro de Presa y Obras Anexas - caso de CFRD en zona de alta sísmica**
3. **CFRD en áreas sísmicas: Análisis Estática y Dinámica de la Presa CFRD de Punilla (H=137 m)**



Concepto general de presa de enrocado con cara de hormigón

CFRDs = Concrete Face Rockfill Dams

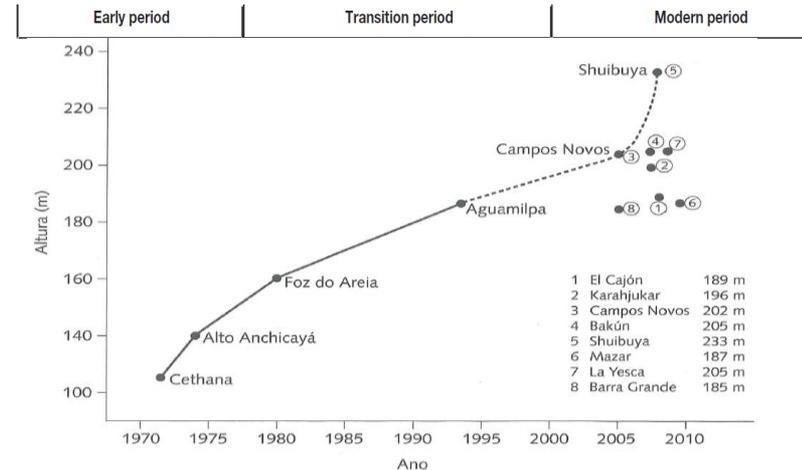
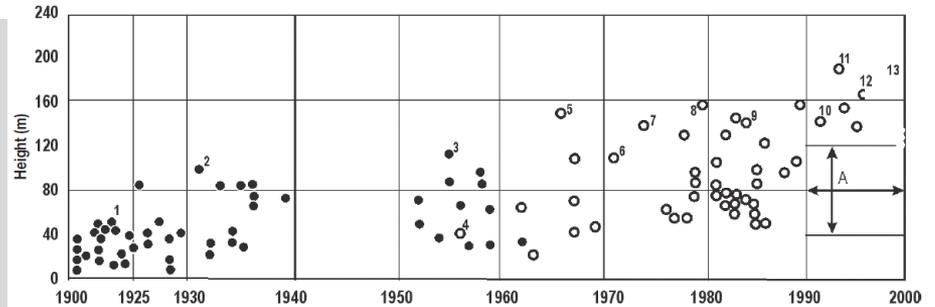


- Bulletin 141 ICOLD – CFRD – Concepts for design and construction, 2010
- Cruz P.T., Materon B., De Freitas, M. - Barragens De Enrocamento Com Face De Concreto, 2010
- Barry Cooke Volume – Concrete Face Rockfill Dams, 2000
- Cooke, J.B. & Sherard, J.L – CFRD: I-Assessment; II-Design. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, v. 113, n.10, 1987
- Pinto, N.L.S. – Very High CFRDs: Behaviour and design features. I, Symposium on CFRD-Dams Honoring J. Barry Cooke, Florianopolis, 2007
- B. Materon - State of Art of Compacted Concrete Face Rockfill Dams (CFRD), 5th International Conference on Dam Engineering, Lisbon, Portugal, February 2007
- Antecedente 1 - EDIC, Diseño embalse y central La Punilla, 2004
- Embalse La Punilla – Ingeniería Básica y de Detalle - Lombardi

- Materón, B. & Fernandez, G. - Considerations on the seismic design of high CFRD - 2nd Intern. Symposium on Rockfill Dams – Rio de Janeiro, Brazil, 2011
- Wieland, M. – CFRD in Highly Seismic Regions - The 1st International Symposium on Rockfill Dams, Chengdou, China, October 2009
- Zhang et al - Tensile Stress Responses of CFRD Face Slabs during Earthquake Excitation and Mitigation Measures, Int. J. Geomech. 17 (12), 2017
- X. Zeping, “Performance of Zipingpu CFRD during the strong earthquake”, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2009
- Catalano et. al. - Analysis of tensile stresses arising in the concrete slab of CFRD in seismic areas - Hydropower and Dams, Gdansk, Poland, 2018
- Basso et. al. - Dynamic analysis study and its consequences for the design of the concrete face slab of CFRD – International Symposium on Seismic Safety of Large Dams and Reservoir – Chincold, Chengdu, China, 2018

Concepto de macizo de enrocado con cara impermeable

- La Granjilla (España - 1660): H = 13m, L= 460m, estructura de enrocado y suelo, impermeabilización con mortero
- English (California – 1856): H = 24m, estructura de enrocado lanzado (no compactado), impermeabilización con madera
- Cogswell (California – 1934): H = 85 m, Enrocado lanzado con cara de hormigón (filtraciones altas 3,60 m³/s)



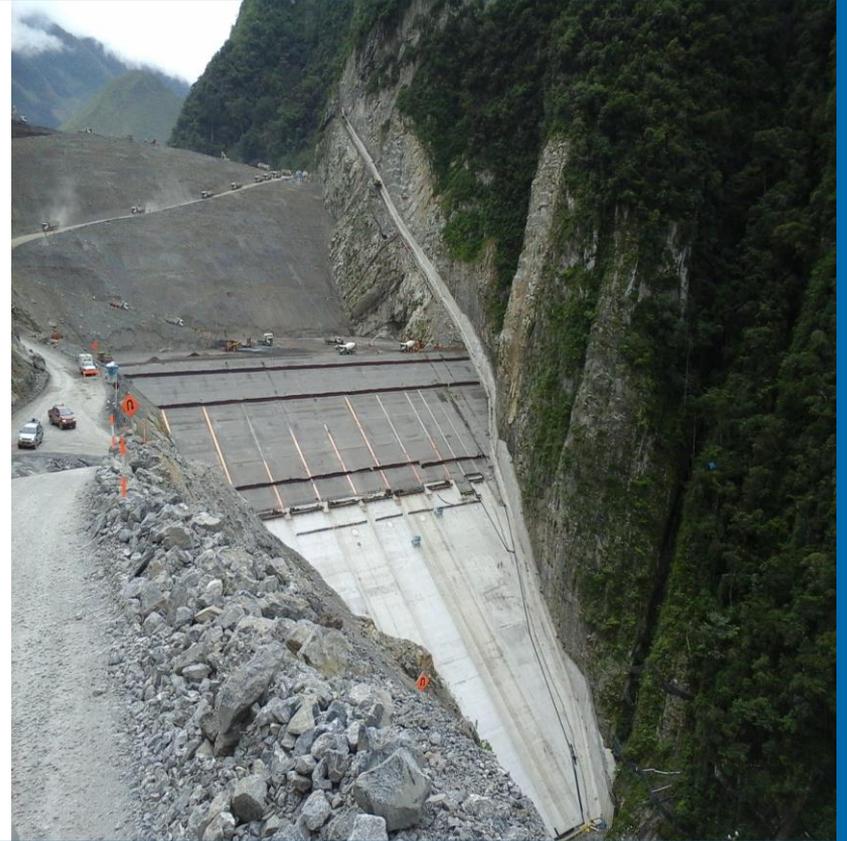
Ejemplos de CFRDs en LATAM

Presa	País	Año	Altura (m)	Área losa (10x3 m ²)	Volumen (Mio m ³)
Alto Anchicayá	Colombia	1974	140	22,3	2,4
Foz do Areia	Brasil	1980	160	139,0	14,0
Santa Juana	Chile	2000	113	39,0	2,7
Campos Novos	Brasil	2006	202	106,0	12,6
Mazar	Ecuador	2008	166	46,9	5,0
La Yesca	México	2010	208	130,4	12,2
Chaglla	Perú	2015	211	70,0	8,4

Definición

El relleno de enrocado compactado en capas constituye en el cuerpo principal de la estructura.

El elemento impermeabilizante se constituye de una losa de concreto externa sobre el talud de aguas arriba.

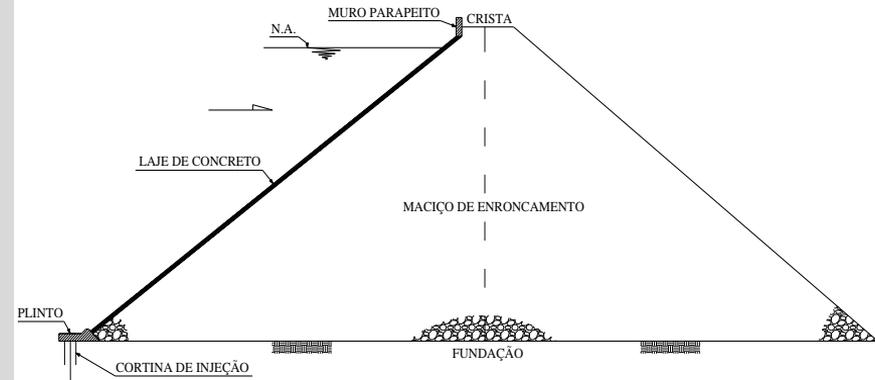


Factores condiciones para el tipo de presa CFRD

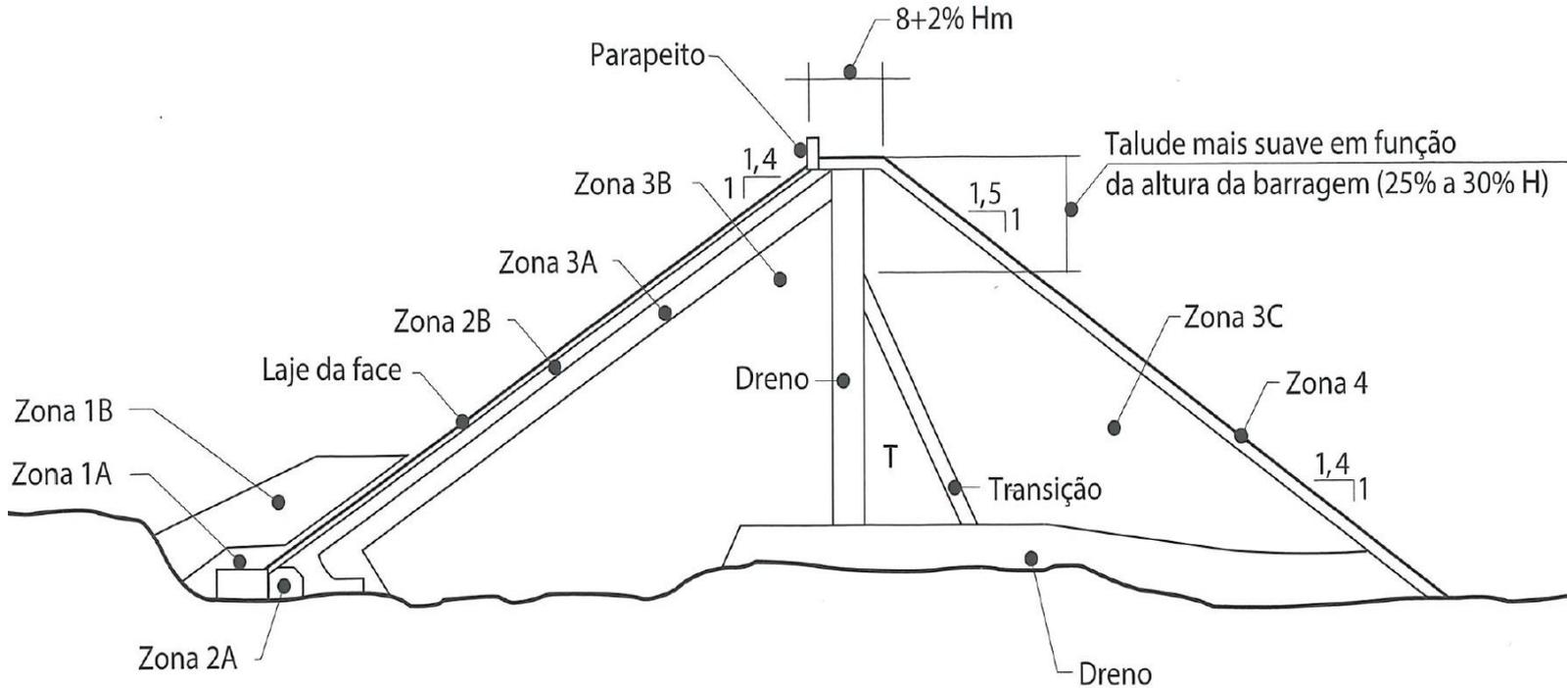
Generalmente se construyen en lugares donde no hay las disponibilidades de suelos para presas de tierra o núcleo o bajo a condiciones climáticas desfavorables (húmedos).

También se torna factible donde es abundante la cantidad de roca proveniente de excavaciones obligatorias.

No necesita una condición fundación con roca de muy buena calidad como en las presas de hormigón. Puede ser apoyadas sobre materiales aluviales, soprolitos, gravosos, suelos firmes (excepto plinto – pared diafragma).



Sección típica de CFRDs en regiones sísmicas



Sección típica de CFRDs en regiones sísmicas

1A

Material fino no cohesivo (arena fina limosa) puesto sobre la cara de aguas arriba con la función de colmatar eventuales apertura de juntas o agrietamientos en la zona inferior

1B

Cualquier material que pueda confinar el 1A (botadero)

2B

Transición de gravillas bien graduadas ($7,6 < \text{Ømax.} < 10\text{cm}$; finos #200 < 8%) procesadas y compactadas en capas de 30 cm de espesor para el apoyo de la losa de hormigón. Tiene función proteger contra eventuales filtraciones de aguas (filtro del 1A)

3A

Enrocado fino ($\text{Ømax.} < 30\text{cm}$; finos #200 < 8%) de transición entre la zona 2 y 3 (eventual) compactado en capas de 30cm.

3B

Enrocado graduado de roca sana ($\text{Ømax.} < 60\text{cm}$; finos #200 < 8%) compactado en capas de 60 cm.

3C

Enrocado grueso graduado ($\text{Ømax.} < 80\text{cm}$; finos #200 < 5%) compactado en capas entre 80 cm.

Zona 4

Bloques de gran dimensiones arreglados con equipos para protección del talud de aguas abajo

Zona T

Material de calidad inferior, obtenido de roca alterada (finos #200 < 15%), compactado en capas inferior al 3B

Dren

Material uniforme de permeabilidad libre constituido de preferencialmente por gravas $\text{Ømax.} < 60\text{cm}$

Estabilidad (Cooke & Sherard – 1987)

Todo el macizo de enrocado se sitúa aguas abajo del plano de actuación del empuje del agua, haciendo que toda la solicitud de llenado sea distribuida por el macizo y consecuentemente por la fundación. El ancho de la base del macizo es mayor que 2,6 veces su altura, siendo que el coeficiente global de deslizamiento (razón entre la resistencia al deslizamiento en la base y las solicitudes horizontales) es cerca de 7,5.

El análisis de estabilidad de los taludes son verificadas través del método convencional del equilibrio limite.

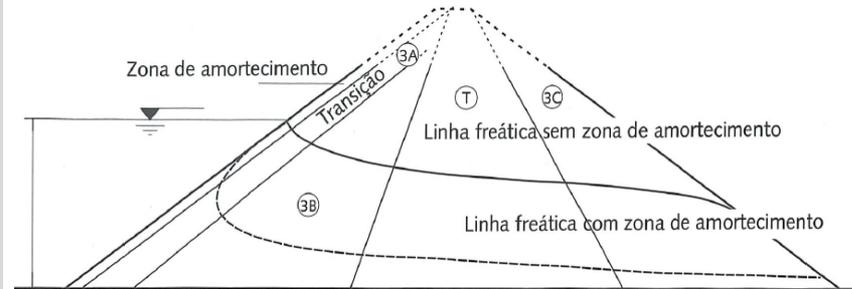
Taludes de 1,3-1,4H:1,0V son generalmente estables. En condiciones sísmicas, taludes de 1,5 a 1,6 H:1,0V (rellenos de gravas).

Condiciones de Flujo

(Cooke & Sherard – 1987):

“El enrocado compactado tiene un esqueleto altamente tensionado. La fricción intergranular mantiene los bloques de roca fijos de manera que la estructura sea estable y no se deforma significativamente cuando sometido a flujos de agua”

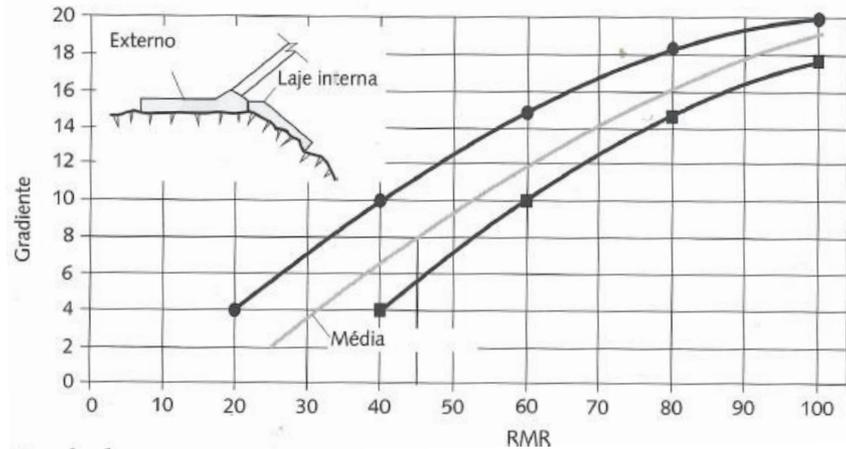
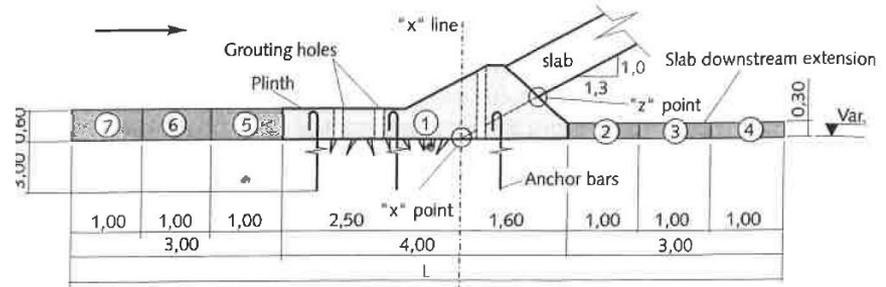
Gradientes de salida deben ser verificados.



Plinto o losa de pié

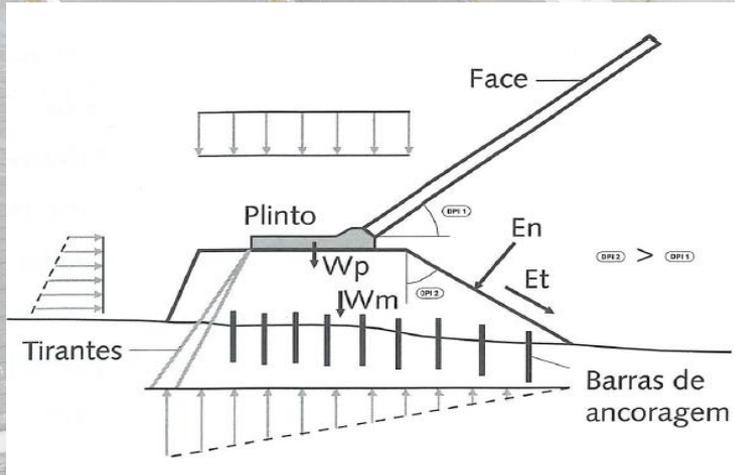
Usualmente cimentado en rocha sana, no-erodible y inyectable.

Control de gradiente (H/L) según calidad de roca (RMR)

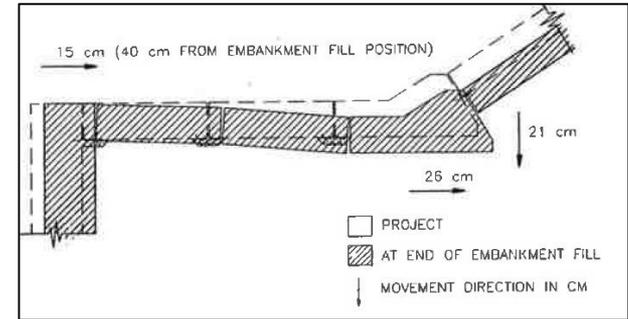
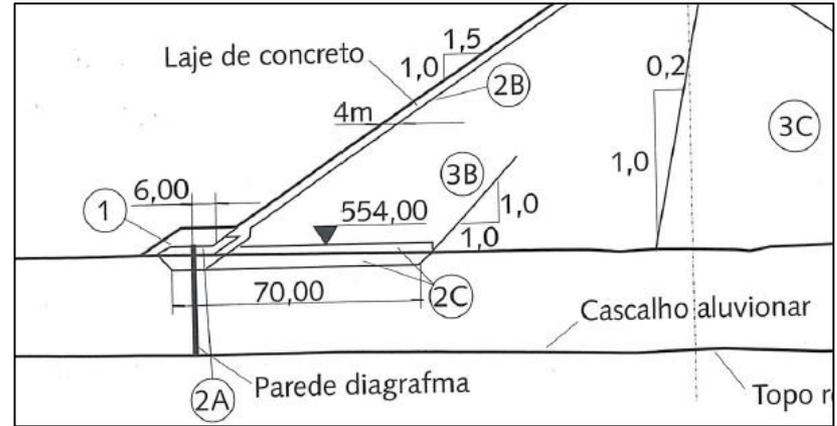


Condiciones Especiales

Bloques de Hormigón



Plinto Flotante



Espesor de la losa variable

- $(e=e_0+k.H)$
- $e_0 = 0,30$ a $0,35\text{cm}$; $k = 0,002$ a $0,0065$
- Para $H > 100\text{m}$, $e = 0,0045$ a $0,005.H$

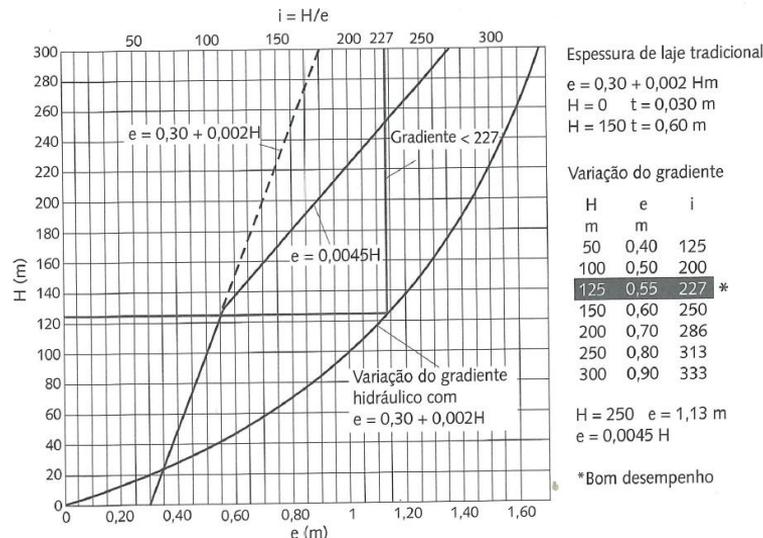
Armadura

Vertical 0,40 a 0,50%; horizontal 0,30 a 0,35%

Zonas perimetrales 15 a 20 m con doble malla 0,5% en ambas direcciones

Resistencia

25 a 30 MPa



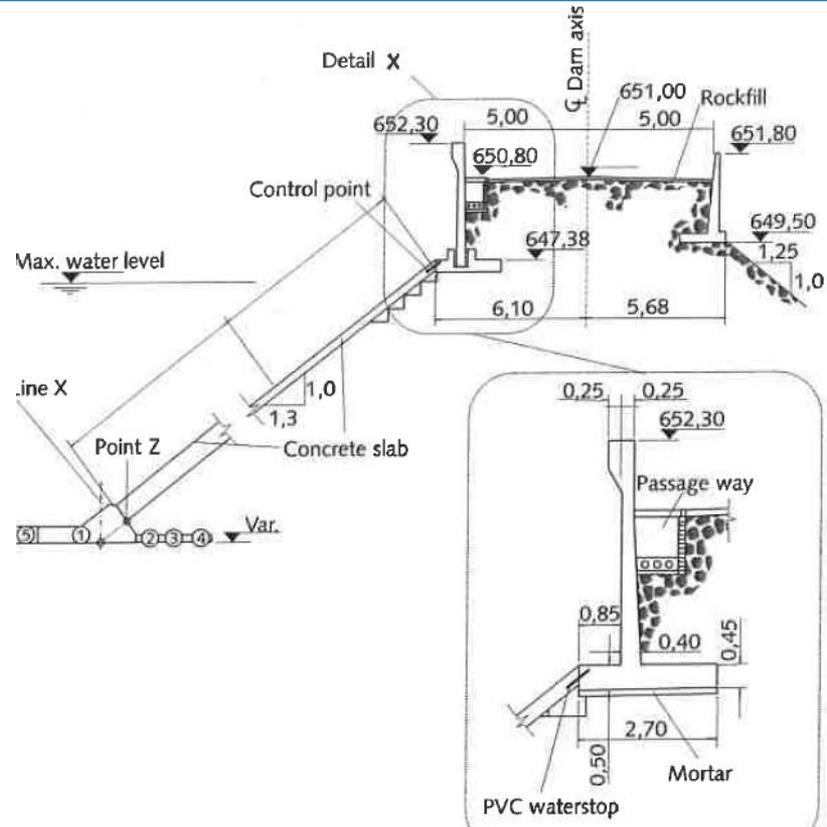


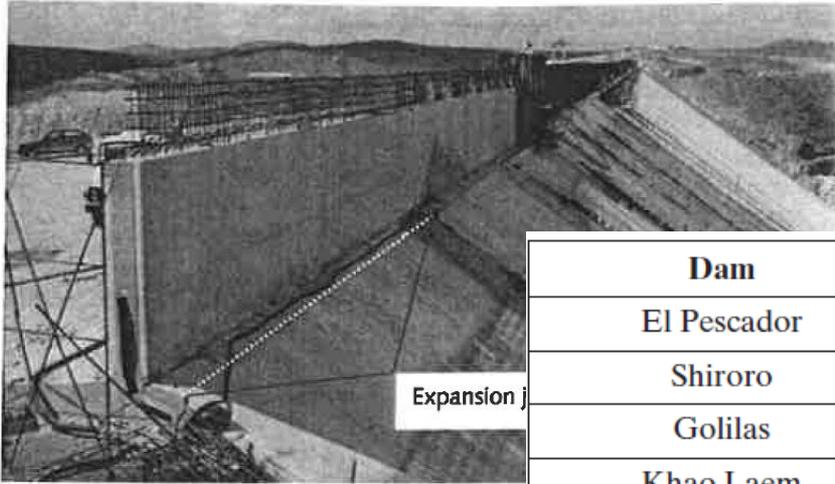
Encofrado deslizantes



Cresta y Muro Parapecto

- ✓ Ancho de cresta superior a 6m.
 $L = 8 + 2\%H$
- ✓ Altura Variable (aspectos constructivos)

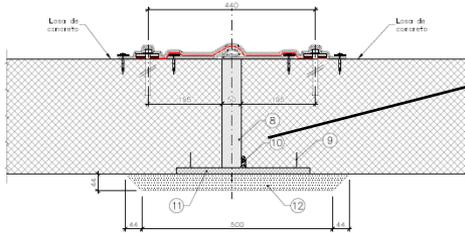




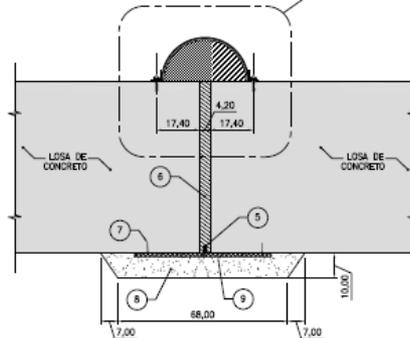
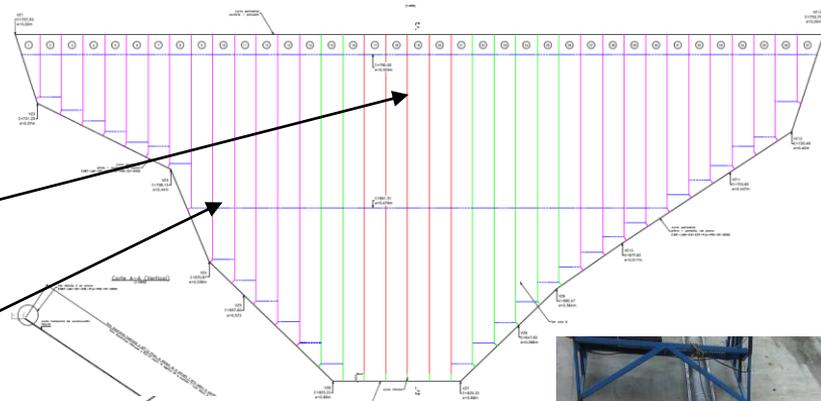
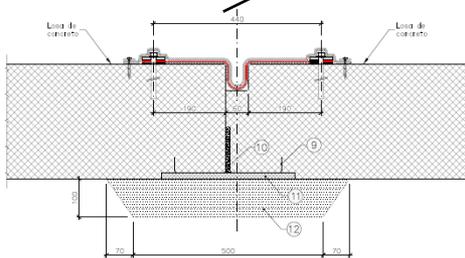
Dam	Dam Height, m	Parapet Wall Height, m
El Pescador	43	5
Shiroro	125	4
Golilas	125	7
Khao Laem	130	5
Mohale	145	7.5
Salvajina	148	8
Areia	160	6
Aguamilpa	185	8
Shuibuya	233	9

**Juntas entre losas
(compresión y tracción)**

Junta de compresión
(1:5)



Junta de tensión
(1:5)



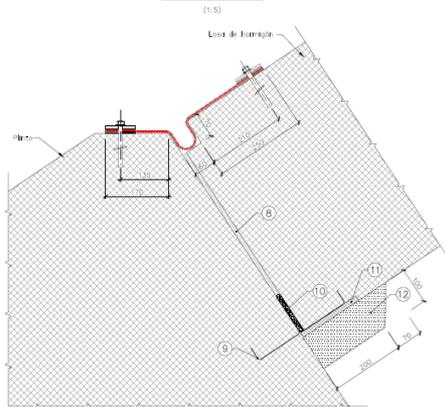
JUNTAS DE COMPRESIÓN ENTRE LOSAS
Escala: 1:10
(DIMENSIONES EN CENTIMETROS)



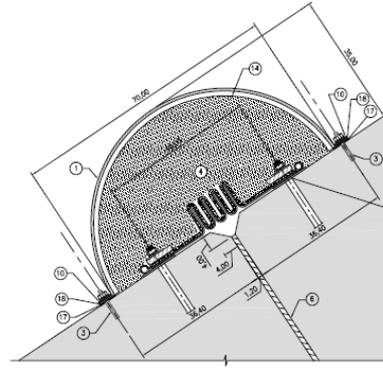
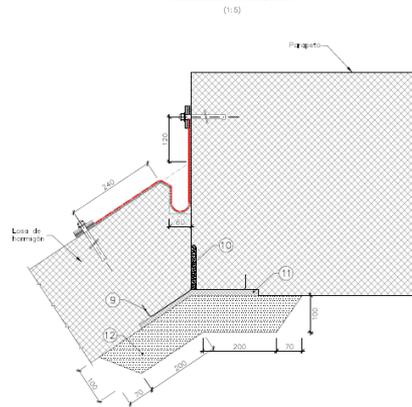
Junta perimetral

- **Losa / plinto**
- **Losa / muro parapeto**

Junta perimetral descubierta
Plinto – Losa



Junta perimetral
Losa – Parapeto



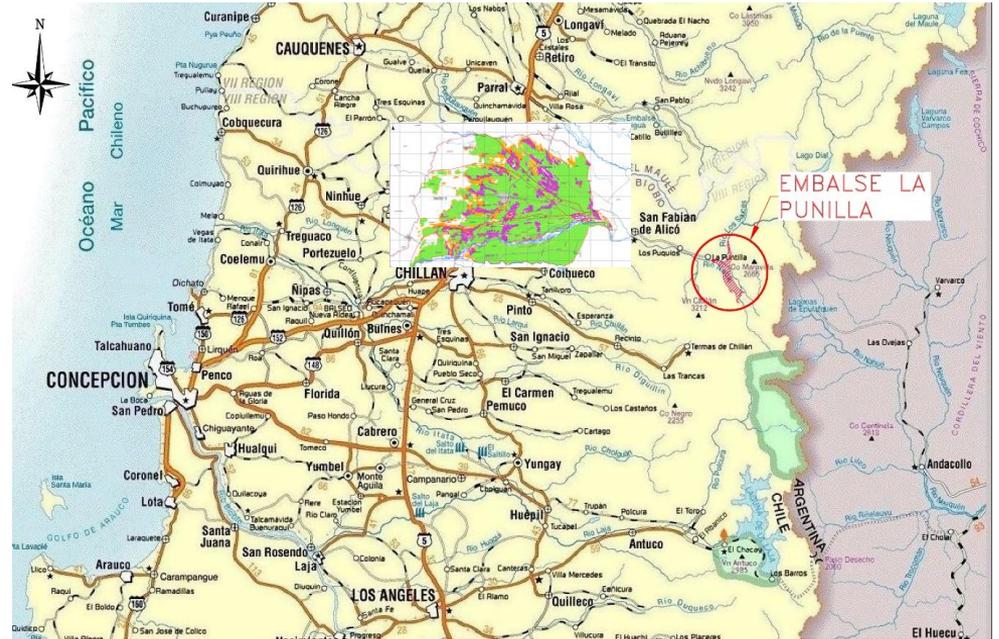
Proyecto Embalse la Punilla (Chile)

Muro de Presa y Obras Anexas

Caso de CFRD en
zona de alta sísmica



Localización



Rio Ñuble - Región de Biobío – Centro sur de Chile, aprox. 350 km de Santiago

**Gobierno de Chile
(Ministerio de Obras
Públicas)**



**Concesión
SCAP (Subsidiaria
ASTALDI)**



**EPC
Astaldi: Construcción
Lombardi: Ingeniería**

Principales propósitos del manejo del agua

Regular los recursos hídricos del río Ñuble (1ª Presa)

Mejorar y ampliar el riego de más de 60'000 ha.

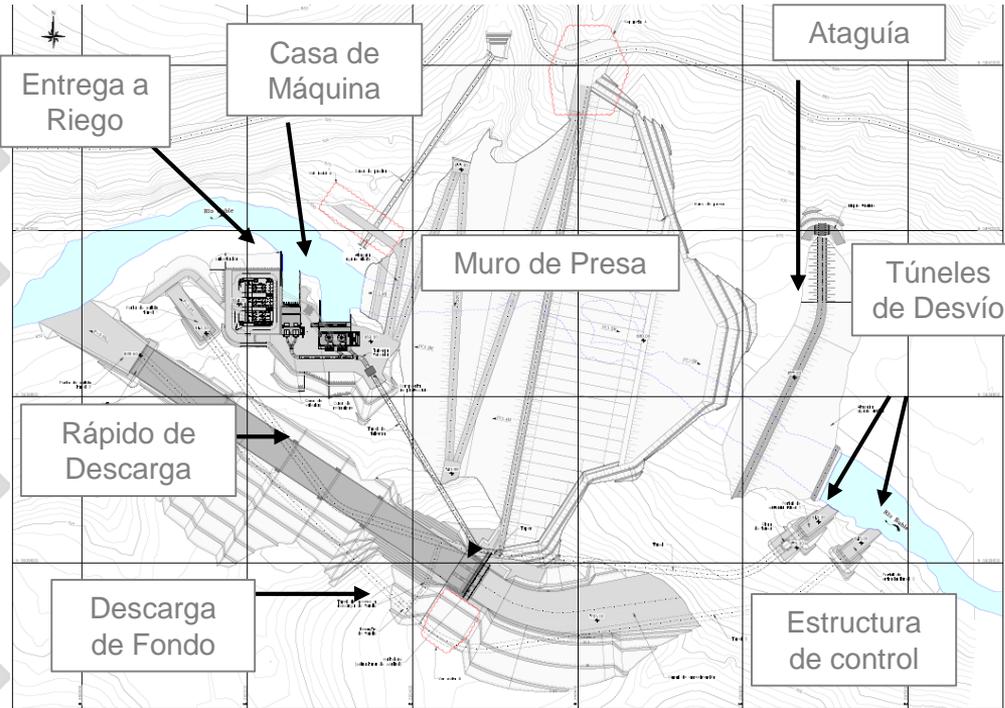
Riego durante la estación seca para explotaciones agrícolas.

Generación de energía (aprox. 100 MW & 520 GWh/año)

Habilitar el uso turístico del lago y sus orillas.

Disposición General de las Obras

- Presa** • CFRD 137 m de altura y volumen de relleno de 6.0 Mm³
- Embalse** • 625 Mm³, volumen útil de 600 Mm³
- Obras de desvío** • 2 túneles de desvío (ø10 m) diseñado para una crecida de TR 30 años (Q=2'212 m3/s)
- Vertedero** • 3 compuertas radiales (aprox. 11 x 18 m), diseñado para una crecida de TR 1'000 años (Q=4'540m3/s) y verificado para TR 10'000 años (Q=5'250 m3/s).
- Casa de Máquina** • 100 MW, 2 turbinas Francis con caudal de diseño de 104 m³/s



Presas CFRD: Principales Características

Volumen
(aprox)

• 6,0 Mm³ (Antec. Ref. 6,3 Mm³)

Altura Máx.

• H = 138 m (aprox.)

Longitud de coronación

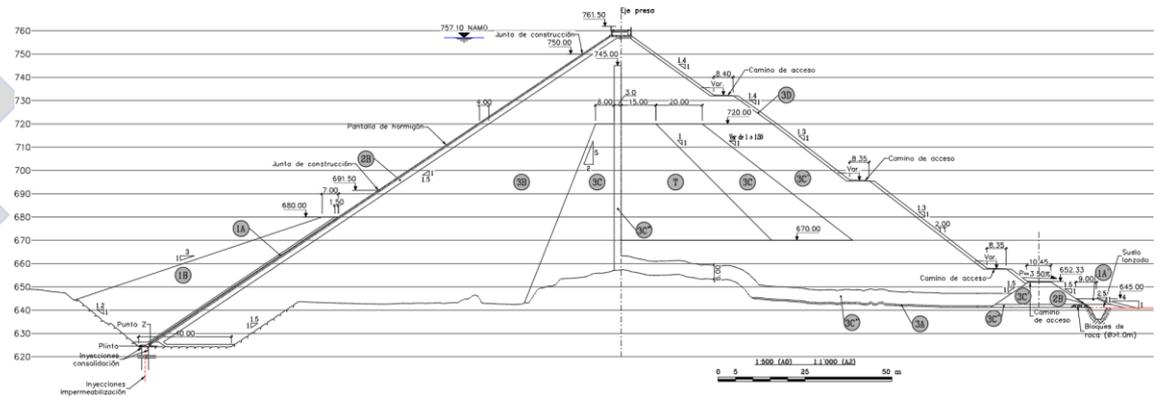
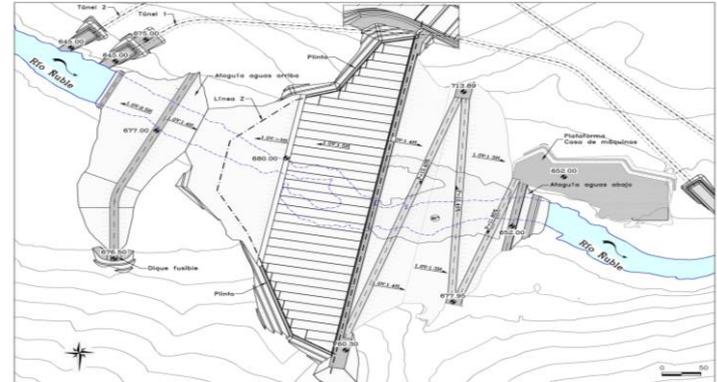
• L = 570 m (aprox.)

Talud aguas arriba

• 1.5H:1V

Talud aguas abajo

• 1.3H+1.4H:1V entre bermas (promedio = 1.6H:1V)



CFRD en Áreas Sísmicas

Análisis Estática y
Dinámica de la Presa
CRFD de Punilla
(H=137 m)



Introducción:

- CFRDs son adecuadas para diferentes condiciones de sitio y alcanzan mayores alturas a medida que se desarrollan nuevos proyectos.
- Los terremotos recientes de mayor magnitud han causado daños en la superficie de concreto de varias presas, pero no hay mucha evidencia sobre su desempeño en condiciones de carga sísmica muy alta (es decir, MCE).
- La tecnología de computación y el software están mejorando progresivamente el desarrollo del diseño de la presa
- A continuación se presenta una modelación numérica tridimensional de la CFRD Punilla (Chile) en condiciones de alta sismicidad con el objetivo de diseñar adecuadamente la losa impermeabilización y garantizar la seguridad de la presa.
- Los resultados indican que el diseño de la cara de hormigón sujeta a un fuerte movimiento del suelo difiere significativamente del diseño basado en enfoques empíricos.

Presas de Zipingpu

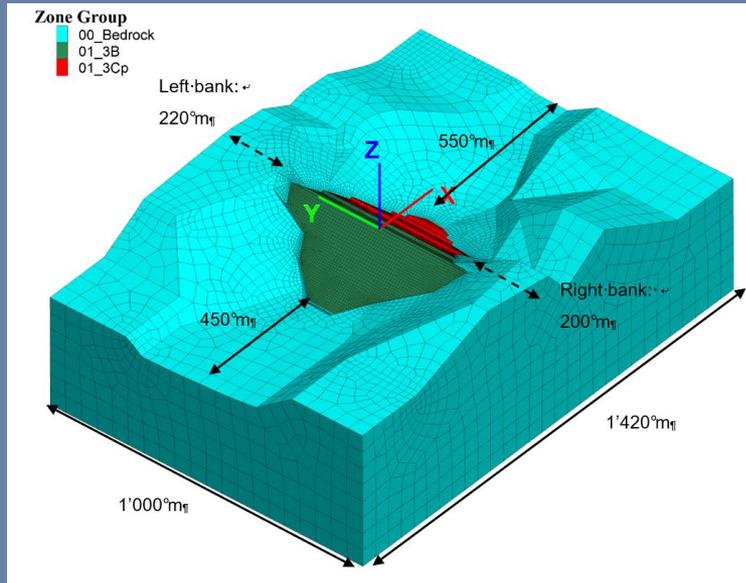
- ✓ Altura de 156m
- ✓ Sismo en 2008 M=8,0 a 17km



(Modelo de Cálculo)

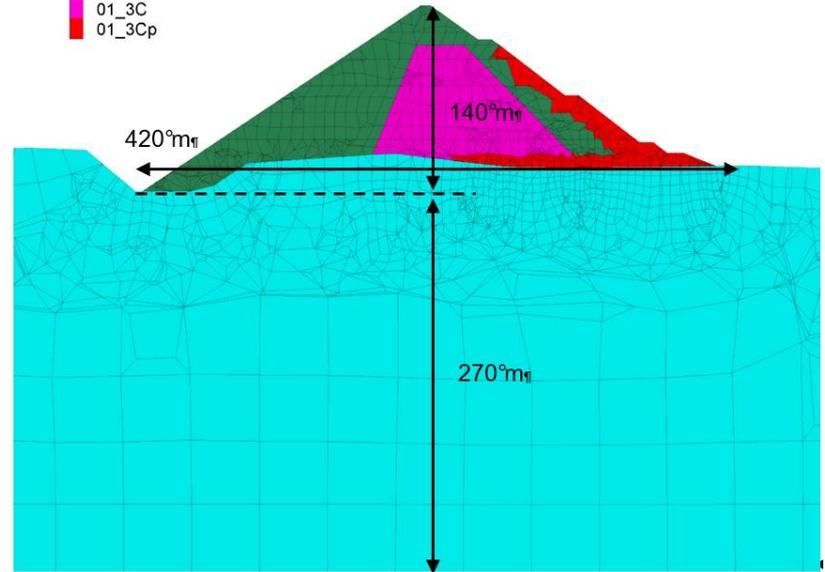
Diferencias Finitas FLAC 3D

177'000 Elementos volumetricos

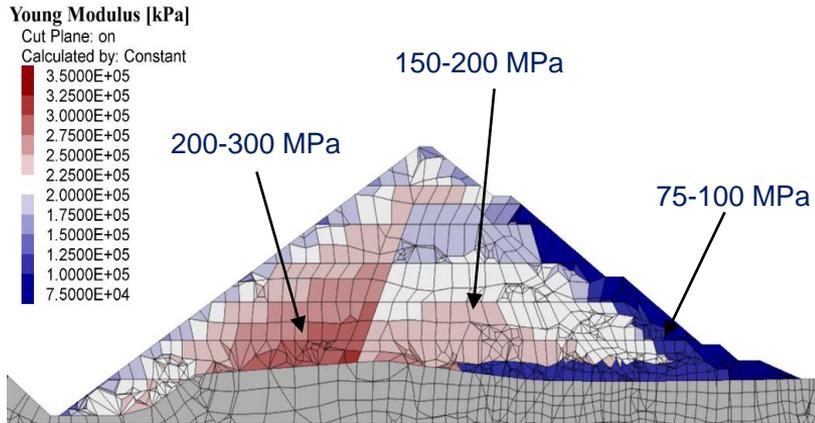


Zone Group

- 00_Bedrock
- 01_3B
- 01_3C
- 01_3Cp

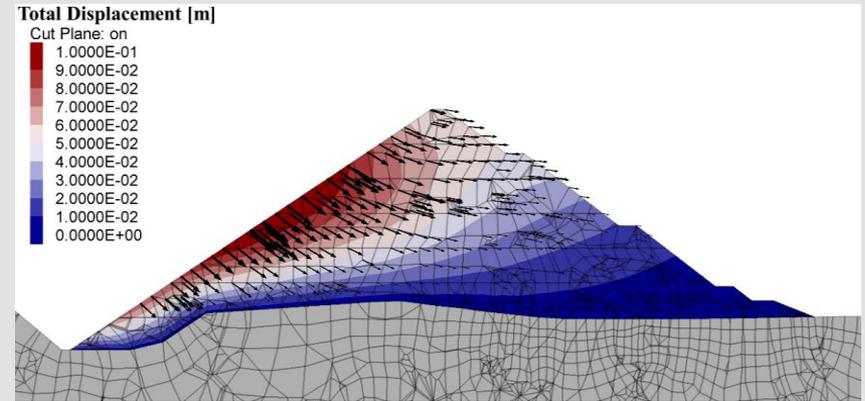


Módulos de deformación al final de construcción

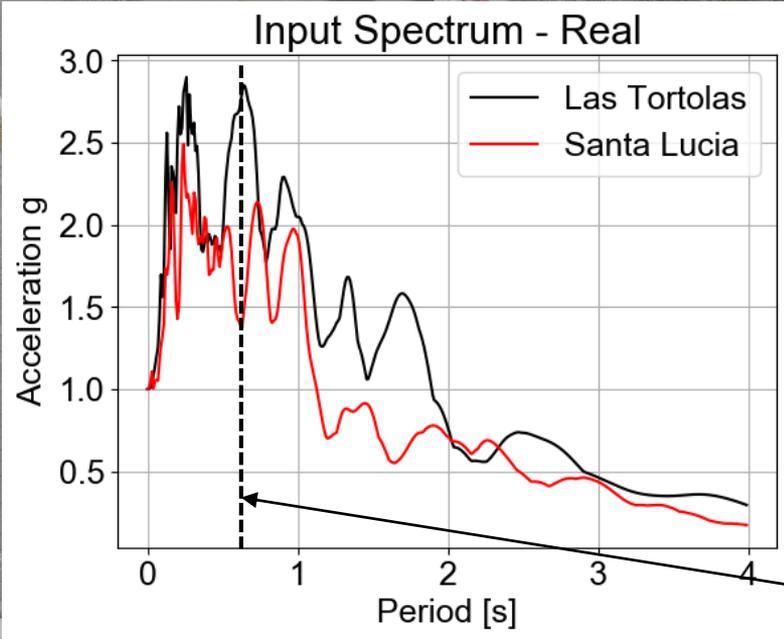


Llenado del embalse (carga hidrostática)

Deformación de la losa < 20cm



(Parámetros Sísmicos)



MCE

$T_R = 4'750$ years

PGA = 0.507 g

Arias intensity 12 m/s

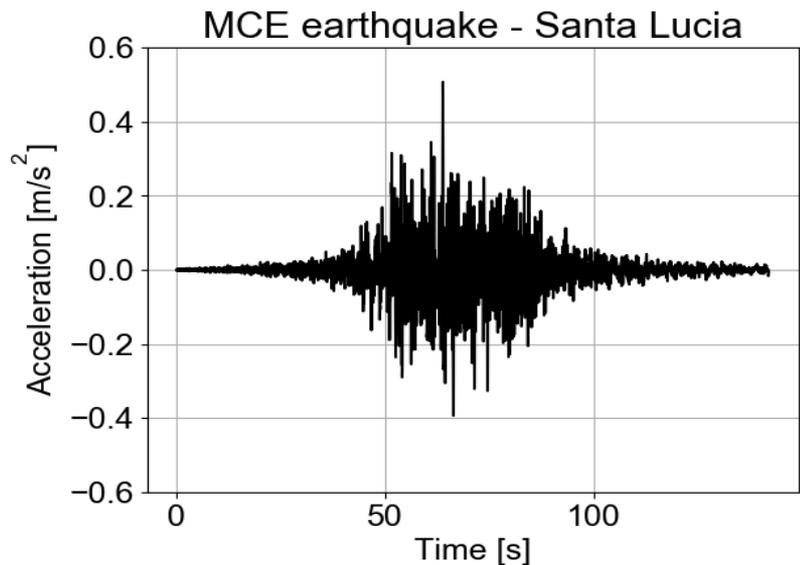
OBE

$T_R = 475$ years

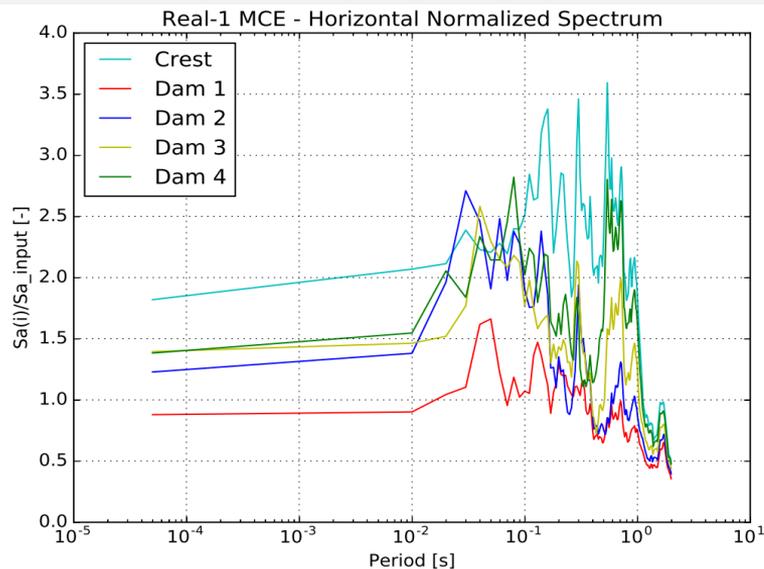
PGA = 0.344 g

Arias intensity 5.5 m/s

*Acelerograma real de cálculo
Arias intensity 12 m/s (MCE)*



*Amplificación de la aceleración sísmica
en la presa (MCE)*

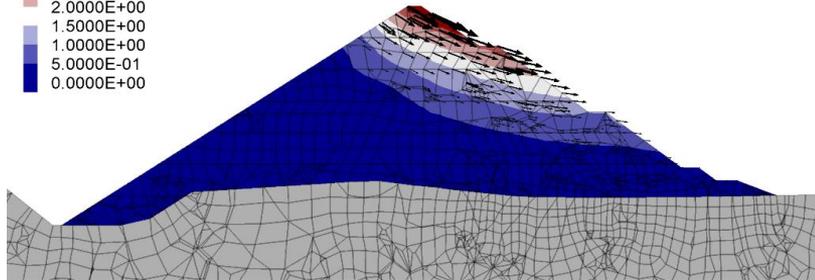
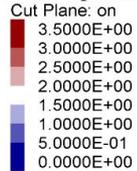


(Resultados)

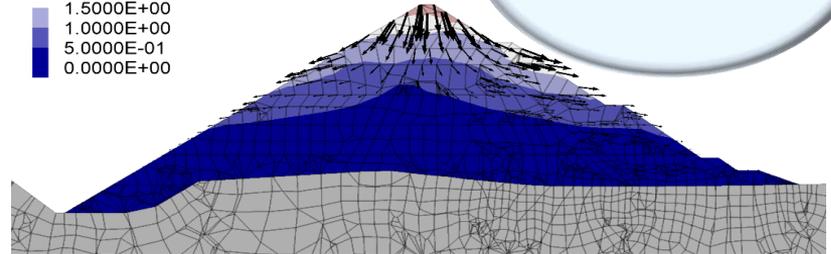
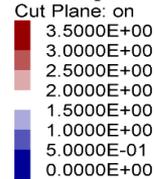
Desplazamientos horiz.
3,0 m

Asentamiento en la cresta
1,45 m (1,0% H)

Total Displacement [m]



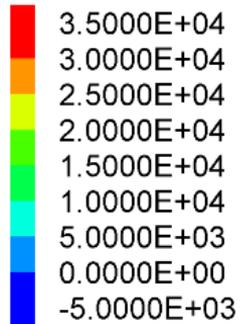
Total Displacement [m]



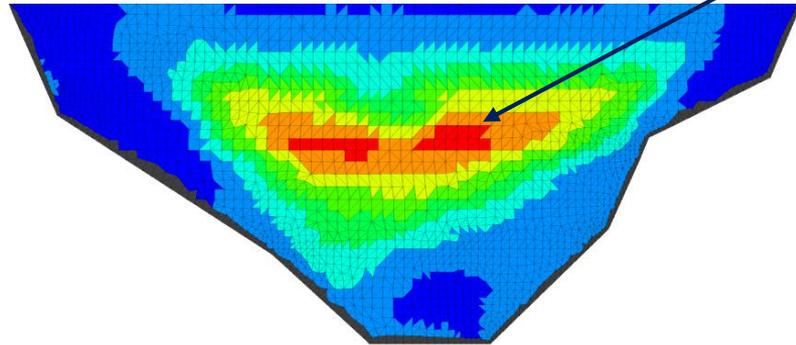
FREE BOARD
4,40 m (OK)

Método ESI (Bureau 1985) = 1,8%

Pseudo-vertical stress [kPa]

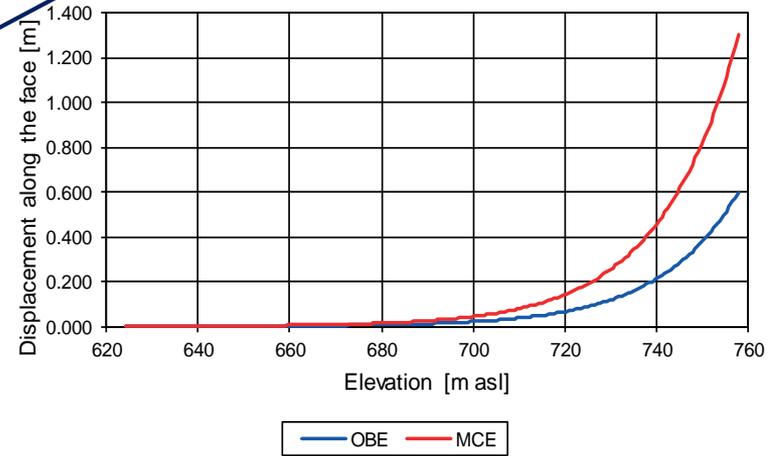


**Embalse
lleno**



(Tensiones en la losa)

- ✓ Losa de hormigón modelada como un elemento *placa* (fricción entre interface $c=0$, $\phi=36^\circ$)
- ✓ Tensión de tracción superior a 35MPa!



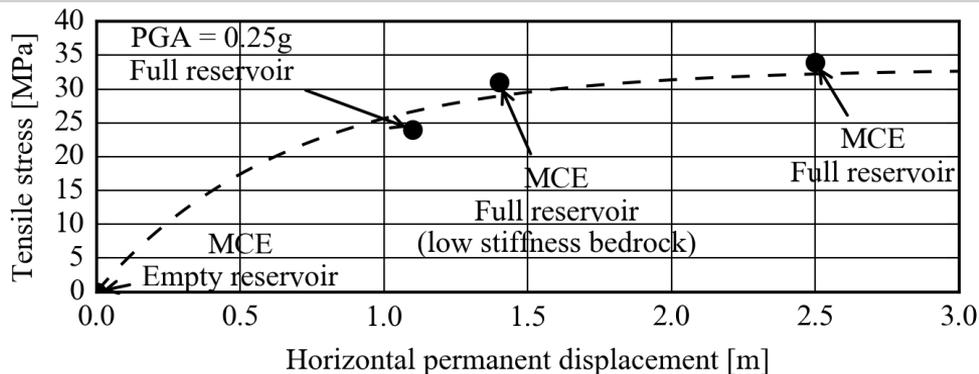
Simulaciones

Causas y efectos:

El PGA es muy alto?



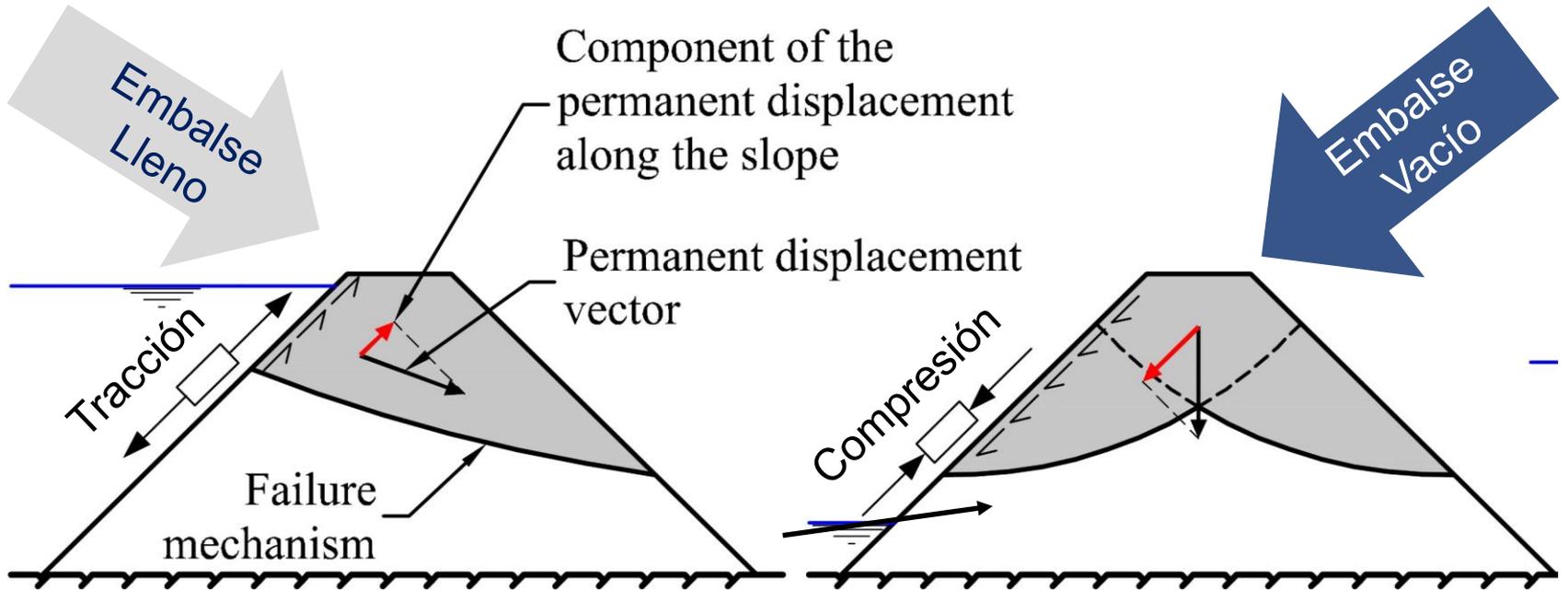
	Horizontal displacement [m]	Vertical displacement [m]	Traction on concrete [MPa]
MCE, Full reservoir	2.5	-1.2	34
MCE, Empty reservoir	-	-2.0	(-3)
PGA = 0.25g, Full reservoir	1.1	-0.5	24
MCE, Full reservoir Low stiffness bedrock	1.4	-0.5	31



La cimentación es muy rígida?

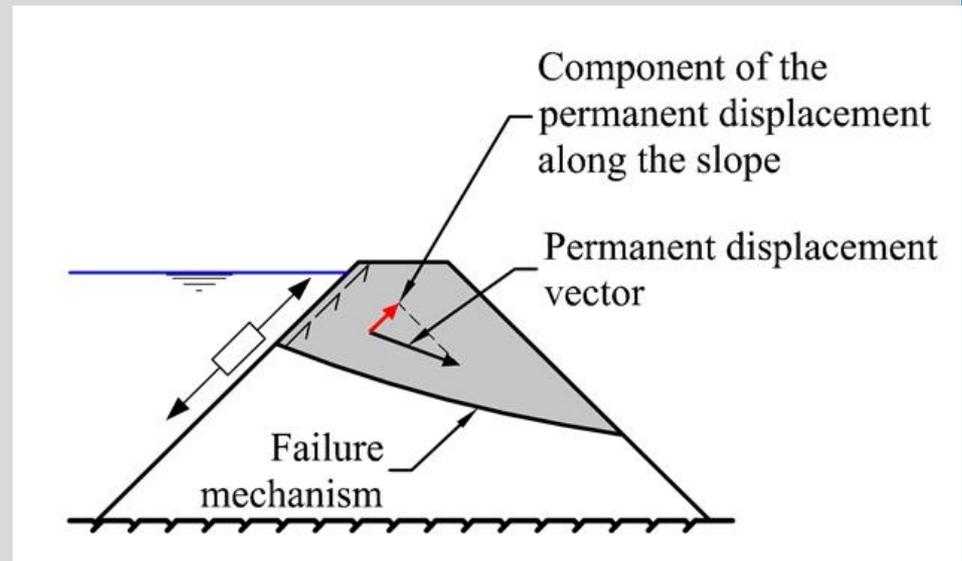
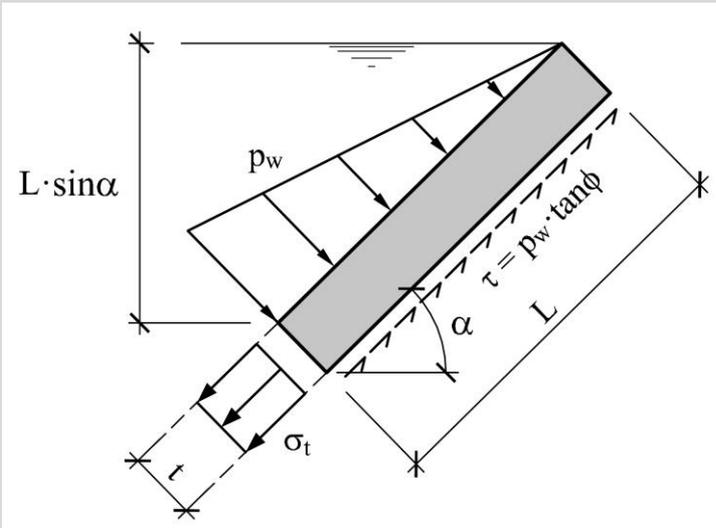


Mecanismo



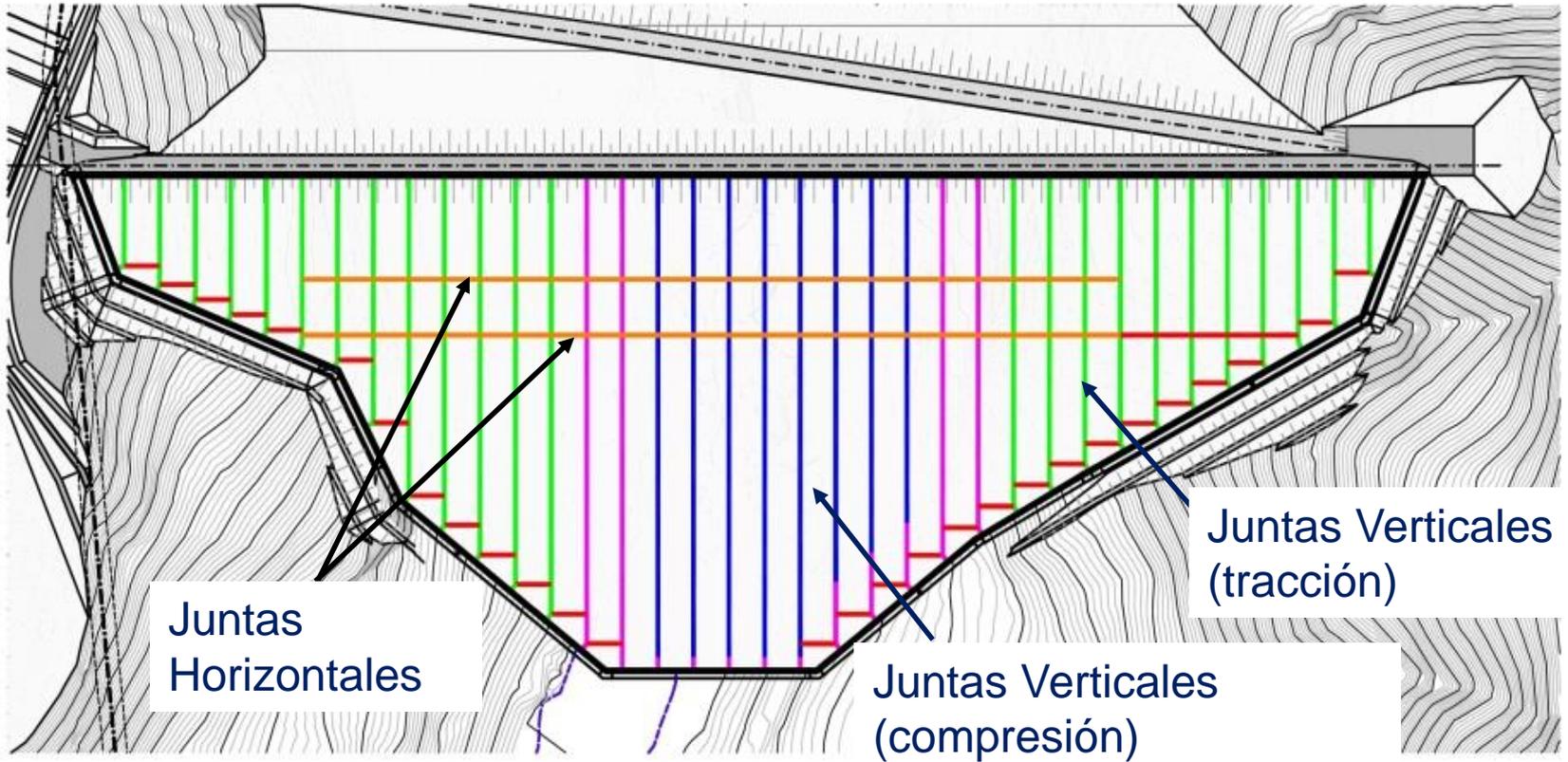
Mecanismo

$$\sigma_t = 0.5 \cdot \gamma_w \cdot L^2 \cdot \sin\alpha \cdot \tan\phi / t$$

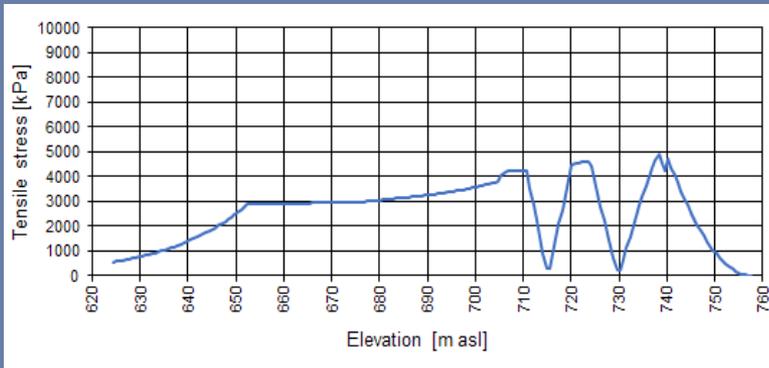


Medidas de mitigación

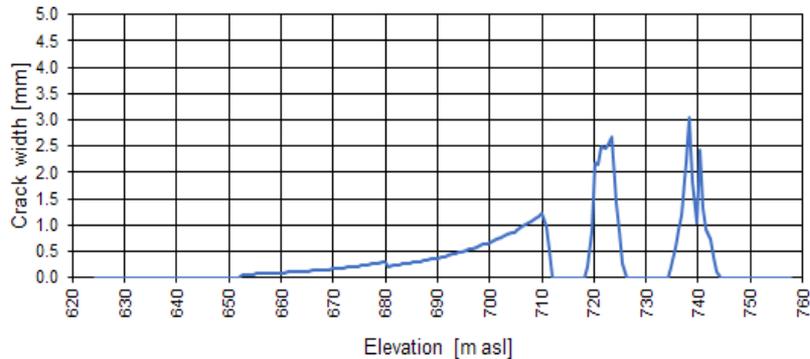
- **Mayor cantidad de armadura relaciones empíricas habituales para evitar la formación de grietas con aberturas decimétricas;**
- **Minimizar la fricción entre el relleno y la losa para reducir los esfuerzos de tracción.**
- **Inclusión de juntas horizontales en el tercio superior de la cara de concreto para posibilitar un alivio de tensiones y limitar la abertura de las grietas.**
- **Incrementar el ancho de la cresta y/o incluir refuerzos en el macizo de enrocado en la parte superior a fin de reducir los desplazamientos horizontales**

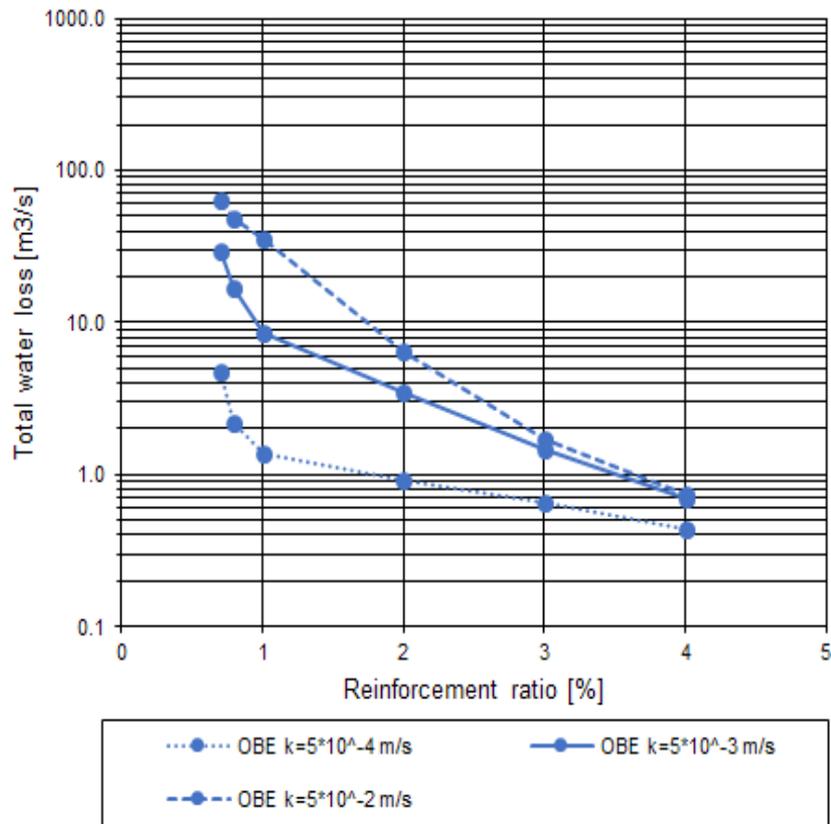


Perfil de tensiones a lo largo de la losa



Perfil de apertura de grietas a lo largo de la losa



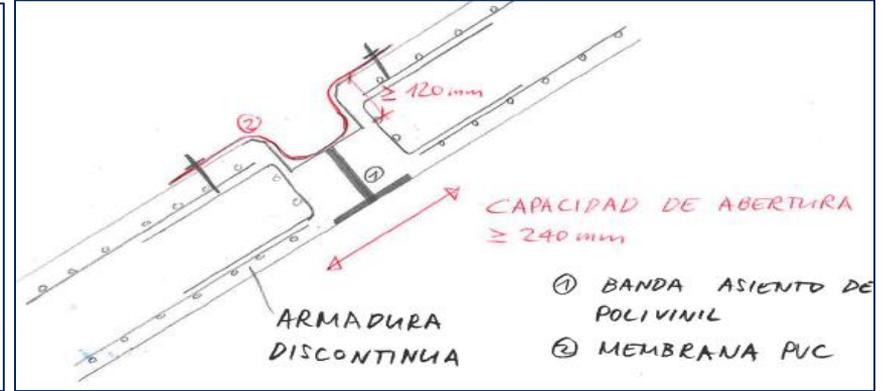
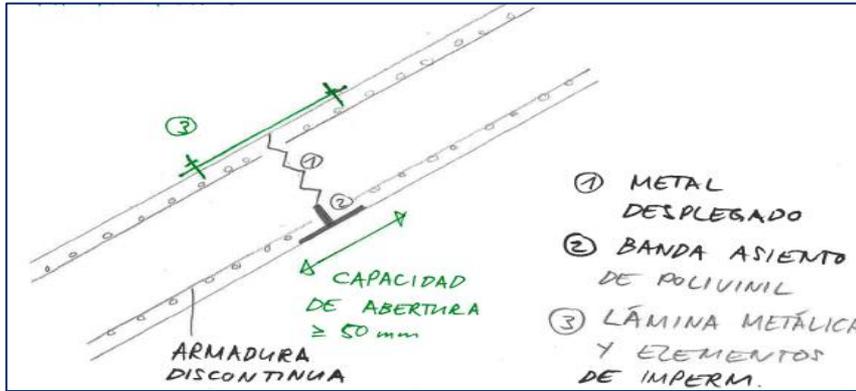


Estudio paramétrico (OBE):

Caudales de infiltración través de la presa vs refuerzo necesarios para controlar abertura de grietas para diferente permeabilidad del macizo.

Resultados:

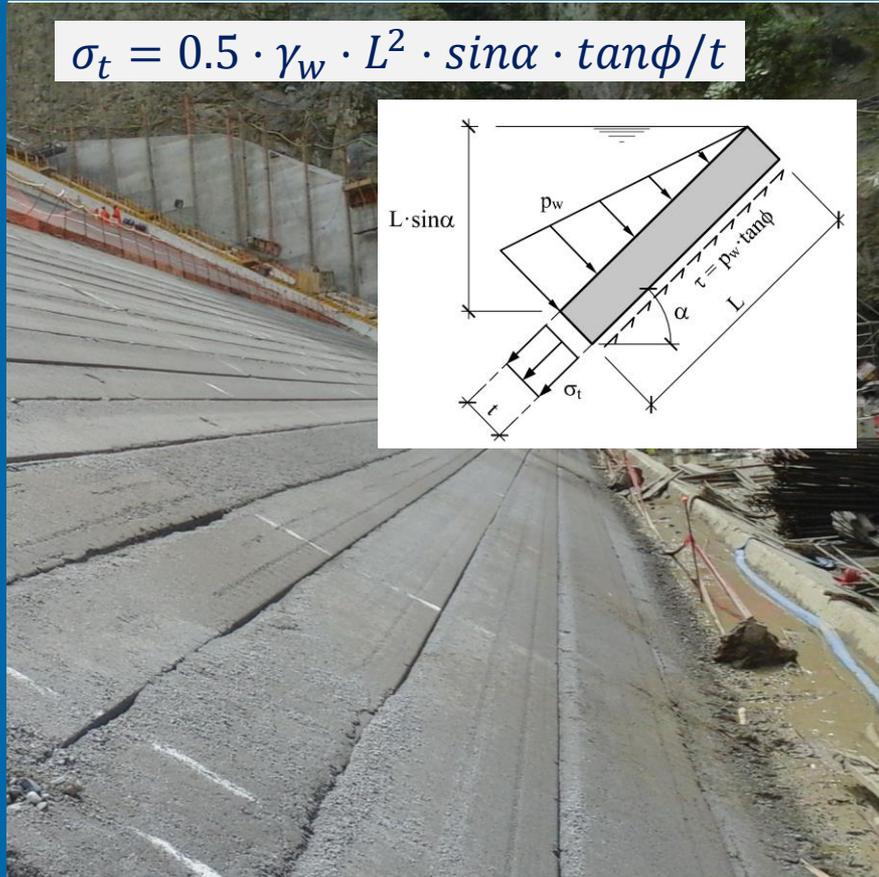
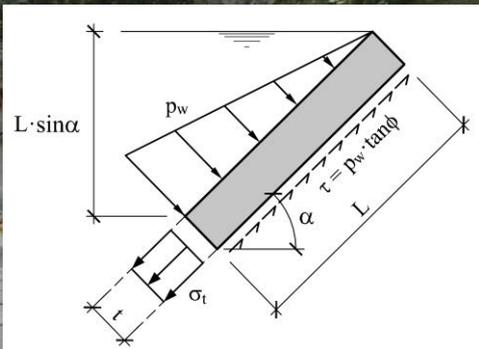
- ✓ Infiltración < 20 m³/s
- ✓ Armadura necesaria (vertical) de 1%



Juntas Horizontales en CFRDs?

- ✓ No presenta antecedentes
- ✓ Dificulta la construcción
- ✓ Cual la performance en condiciones sísmica con embalse parcialmente lleno?

$$\sigma_t = 0.5 \cdot \gamma_w \cdot L^2 \cdot \sin\alpha \cdot \tan\phi / t$$



Solución Optimizada:

- ✓ Minimizar fricción entre losa y relleno (mortero y membrana sobre el bordillo)

Resultados:

- ✓ Armadura 0.8%,
- ✓ sin juntas horizontales
- ✓ membrana de reducción roce ($\tan \phi = 0,30$)
- ✓ Pérdidas por infiltración de 6 m³/s (OBE), 17 m³/s (MCE)

- Las experiencias recientes de grandes CFRDs sujetas a un sismo severo y con embalse parcialmente vacío mostraron una performance segura. No hay evidencia de grandes CFRDs sujetas a un fuerte sismo y embalse lleno.
- Este análisis muestra que los desplazamientos de la parte superior de la presa, en condiciones de embalse lleno, producen una vector componente que induce un esfuerzo de tracción en la cara del concreto debido a la fricción entre el macizo de la presa y la losa. Como consecuencia, se abren grietas en el concreto y los caudales de infiltración podrían superar los límites aceptables.
- Es necesario incrementar la cantidad de armadura de la losa, minimizar la fricción entre la losa y el relleno y proporcionar juntas de dilatación horizontales para limitar el agrietamiento y las fugas de agua.
- Hasta la fecha, no existe un enfoque común para el diseño de las losa de CFRD en regiones altamente sísmicas y muchos aspectos aún están por ser estudiados.

Muchas Gracias !