

*Departamento de Ingeniería del
Terreno, Cartográfica y Geofísica*
**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE
CATALUNYA**



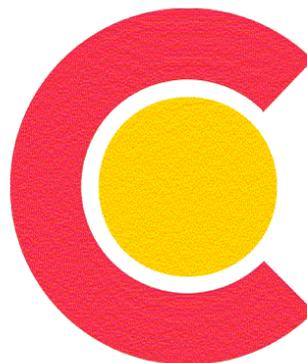
*Instituto de Investigaciones
Antisísmicas "Ing Aldo Bruschi"*
**UNIVERSIDAD NACIONAL DE
SAN JUAN**



Laboratorio de Geotecnia
**UNIVERSIDAD NACIONAL DE
CÓRDOBA**

Geotecnia e Ingeniería Sísmica aplicadas a la Minería

San Juan, Argentina, 16 de Octubre de 2007



**AGENCIA
ESPAÑOLA DE
COOPERACIÓN
INTERNACIONAL**





UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN JUAN
FACULTAD DE INGENIERÍA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES MINERAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

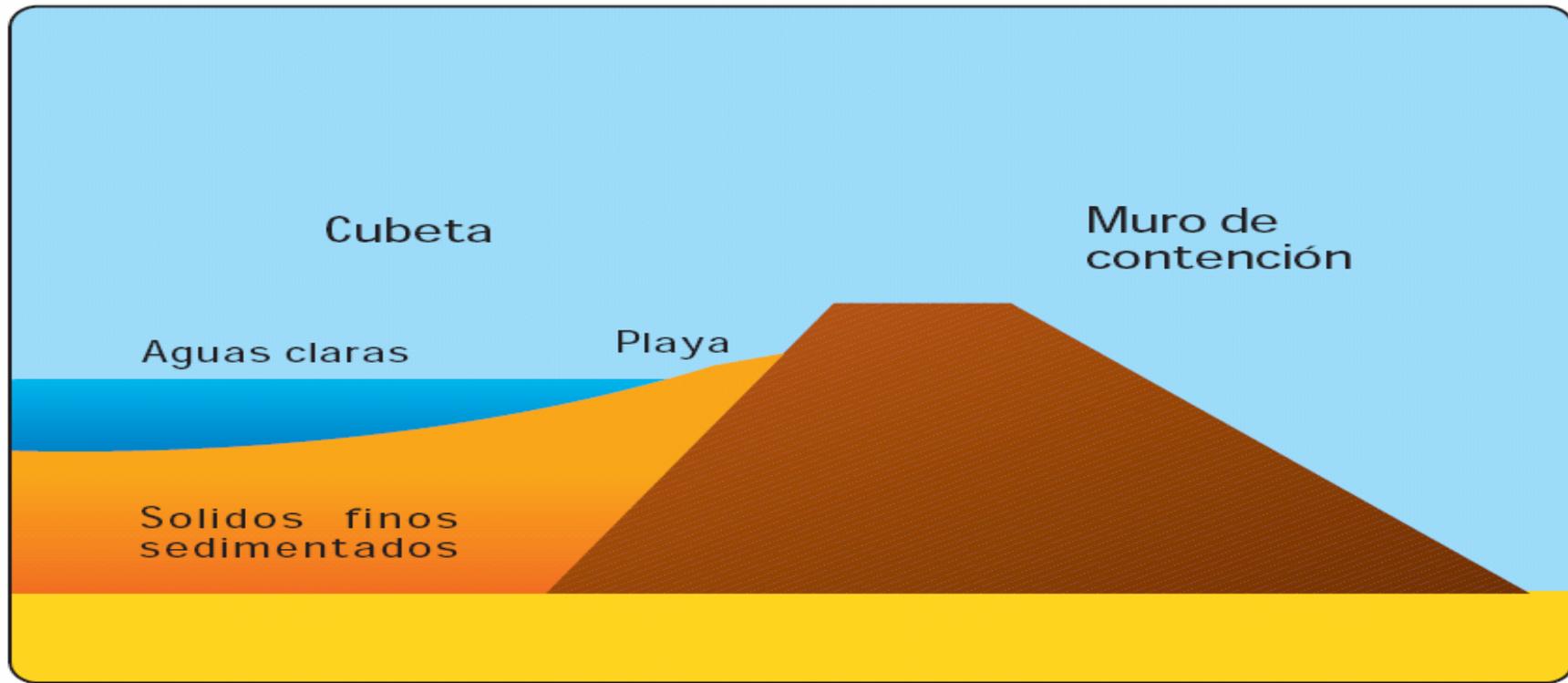
COMPORTAMIENTO HIDRO-MECÁNICO DE DIQUES DE COLAS

Carlos Delahaye

***GEOTECNIA E INGENIERÍA SÍSMICA
APLICADA A LA MINERÍA***

SAN JUAN - OCTUBRE DE 2007

¿Qué es un dique de colas?

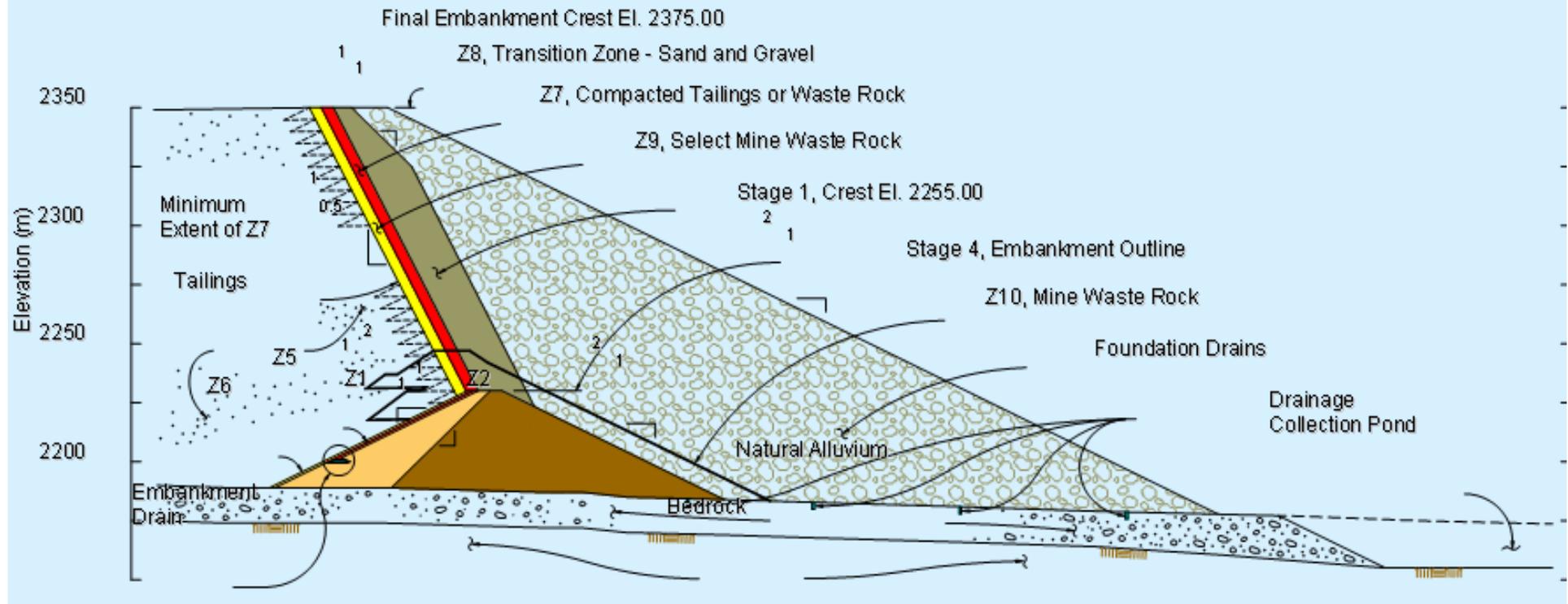


Bajo La Alumbreira, Catamarca (Cu, Au)



Bajo La Alumbreira, Catamarca (Cu, Au)

- Option 1:
Modified Centerline using Rockfill, Current Design



DIQUE DE COLAS vs. PRESAS DE TIERRA Y ESCOLLERA

Los diques de colas difieren de las presas de tierra y escollera convencionales en cuatro aspectos básicos:

- En los diques de colas se almacenan tanto sólidos como líquidos
- En muchos casos, las propias colas se utilizan como material de construcción del dique de la presa
- Los diques de colas se construyen normalmente por etapas, siguiendo el desarrollo de las operaciones a fin de no anticipar inversiones y reducir a un mínimo los desembolsos iniciales
- Suelen requerirse modificaciones en el diseño y operación de llenado de la presa al introducirse cambios en los procesos de tratamiento

SEGURIDAD DE LOS DIQUE DE COLAS



Los Frailes tailings dam failure, Aznalcóllar, Spain (April, 1998)

¿Qué riesgos se deben evitar o minimizar en las distintas fases del dique de colas?

- Falla del muro del dique con vertido de colas
- Arrastre de colas por efecto de lluvias intensas
- Filtración de agua de las colas a través del muro, de su fundación y del fondo del embalse
- Levantamiento y arrastre de material fino por acción del viento

PROCESOS CLAVES E IMPORTANCIA

PROCESOS CLAVES (construcción, rehabilitación y largo plazo)

- Evolución de la superficie libre
- Generación y disipación de presiones intersticiales
- Distribución de presiones, flujos y caudales
- Estados de tensión y deformación (cargas estáticas y dinámicas)

IMPORTANCIA

- Análisis de estabilidad y de deformación de las estructuras
- Control de la contaminación del agua subterránea
- Diseño de las estructuras hidráulicas

¿Cómo podemos estudiar los procesos claves?

- Con una formulación flujo-deformación acoplada, para analizar la construcción en etapas del dique de colas
- Utilizando la potencia del análisis saturado-no saturado, para abordar de forma rigurosa los aspectos claves del comportamiento de un dique de colas y evaluar las posibilidades de su empleo en el diseño de ingeniería de estas obras

MODELO H-M ACOPLADO

➤ Formulación basada en el MEF

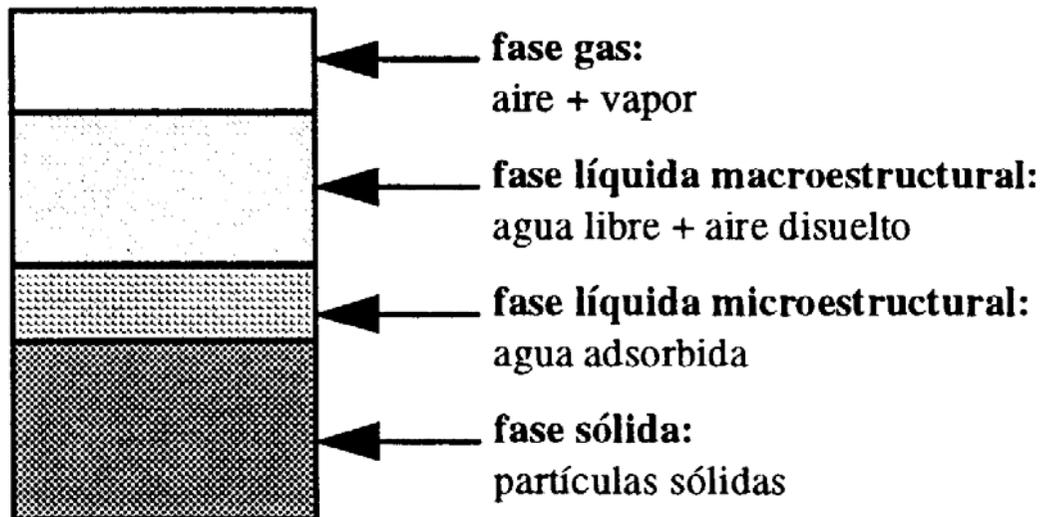
Variables independientes: presión de gas P_g (aire), presión de líquido P_l (agua) y el vector desplazamiento \mathbf{u}

➤ Comportamiento mecánico de los suelos no saturados basado en tensiones “significativas”

tensiones netas: $\sigma' = \sigma - P_g \mathbf{m}$; $\mathbf{m}^T = [1, 1, 1, 0, 0, 0]$

succión: $s = P_g - P_l$

➤ Suelo considerado como una mezcla (sistema multifase-multiespecie)



Alonso et al. (1991),
Gens and Alonso (1992),
Navarro (1997).

MODELO H-M ACOPLADO

➤ Ecuaciones de gobierno: (Olivella et al. (1994), Olivella (1996))

Ecuaciones de balance de masa

Ecuaciones constitutivas y restricciones de equilibrio

Ecuación: balance de la masa de agua:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\begin{array}{l} \text{masa de agua en fase} \\ \text{solido, liquido y gas} \end{array} \right) + \text{divergencia} \left(\begin{array}{l} \text{flujo total} \\ \text{de agua} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} \text{fuente externa} \\ \text{de agua} \end{array} \right)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\theta_s^w (1 - \phi) + \theta_l^w S_l \phi + \theta_g^w S_g \phi \right) + \nabla \cdot (\mathbf{j}_s^w + \mathbf{j}_l^w + \mathbf{j}_g^w) = f^w$$

Incógnita: presión de líquido, P_l (MPa)

Ecuación: balance de la masa de aire:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\begin{array}{c} \text{masa de aire en} \\ \text{fase líquida y gas} \end{array} \right) + \text{divergencia} \left(\begin{array}{c} \text{flujos total} \\ \text{de aire} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{fuente externa} \\ \text{de aire} \end{array} \right)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\theta_l^a S_l \phi + \theta_g^a S_g \phi \right) + \nabla \cdot (\mathbf{j}_l^a + \mathbf{j}_g^a) = f^a$$

Incógnita: presión de gas, P_g (MPa)

Ecuación: ecuaciones de equilibrio mecánico (1, 2 o 3 dimensiones):

$$\text{divergencia} \left(\begin{array}{c} \text{tensor de} \\ \text{tensiones totales} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{vector de} \\ \text{fuerzas de masa} \end{array} \right) = \text{vector} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{b} = \mathbf{0}$$

Incógnita: desplazamientos, $\mathbf{u} = (u_x, u_y, u_z)$

#

Ecuaciones constitutivas y restricciones de equilibrio.

ECUACION	NOMBRE DE VARIABLE	VARIABLE
<i>Ecuaciones constitutivas</i>		
Ley de Darcy	flujo advectivo de líquido y gas	q_l, q_g
Ley de Fick	flujo no-advectivo de vapor y gas	i_g^w, i_l^a
Ley de Fourier	flujo de calor conductivo	i_c
Curva de retención	grado de saturación de la fase líquida y gas	S_b, S_g
Modelo mecánico constitutivo	tensor de tensiones	σ
Densidad de la fase	densidad del líquido	ρ_l
Ley de los Gases	densidad del gas	ρ_g
<i>Restricciones de Equilibrio</i>		
Ley de Henry	fracción de masa del aire disuelto en el líquido	ω_l^a
Ley Psicrométrica	fracción de masa del vapor en fase gaseosa	ω_g^w

□

Ecuaciones constitutivas - hidráulico

1. Flujo de líquido y gas (Ley de Darcy)

$$\mathbf{q}_l = -\mathbf{K}_l (\nabla P_l - \rho_l \mathbf{g})$$

$$\mathbf{q}_g = -\mathbf{K}_g (\nabla P_g - \rho_g \mathbf{g})$$

2. Permeabilidades

$$\mathbf{K}_\alpha = k k_{r\alpha} / \mu_\alpha$$

$$k = k_o \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \frac{(1-\phi_o)^2}{\phi_o^3}$$

$$k_{rl} = S_e^{1/2} \left(1 - \left(1 - S_e^{1/\lambda} \right)^\lambda \right)^2$$

$$k_{rg} = A (1 - S_e)^\beta$$

$$S_e = \frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}} \leq 1$$

3. Curva de retención (van Genuchten)

$$S_e = \frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}} = \left(1 + \left(\frac{s}{P_o} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right)^{-\lambda}$$

4. Flujo no-advectivo (Ley de Fick)

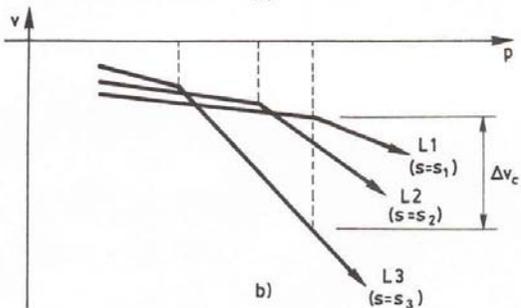
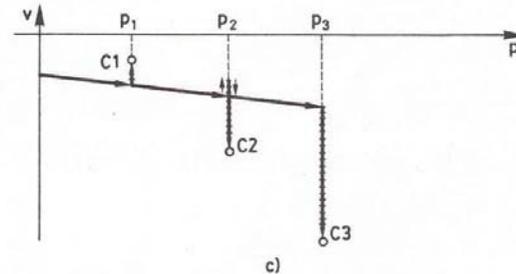
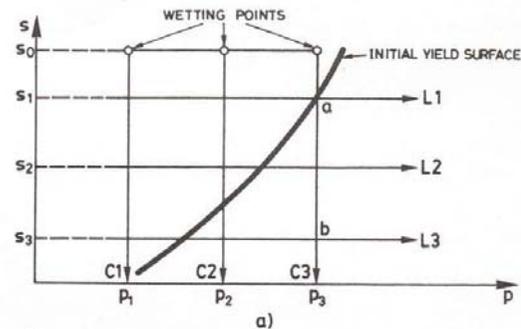
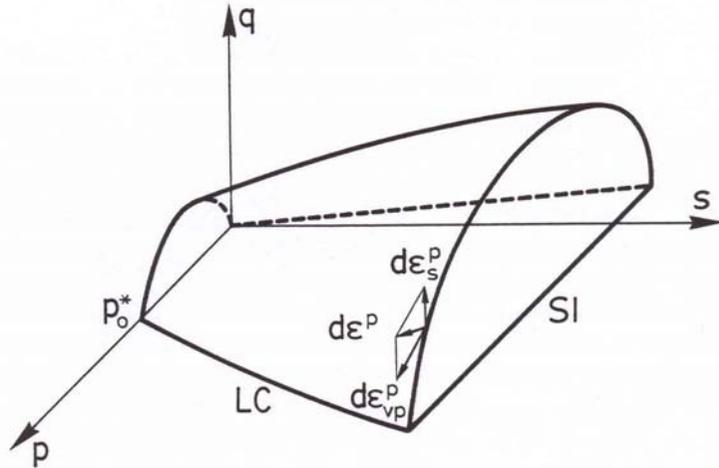
$$\mathbf{i}_l^a = -\mathbf{D}_l^a \nabla \omega_l^a = - \left(\phi \rho_l S_l \tau D_m^a \mathbf{I} + \rho_l \mathbf{D}_l' \right) \nabla \omega_l^a$$

5. Restricciones de equilibrio

$$\omega_l^g = \frac{P_g}{H} \frac{M_g}{M_w} \quad \text{Ley de Henry}$$

Ecuaciones constitutivas - mecánico

A background model for unsaturated soils : BBM.
Yield surface in a triaxial state space (Alonso et al, 1990)



Model parameters

k_{io}
k_{so}
v
α_{ss} (MPa ⁻¹)
α_{is} (MPa ⁻¹)
α_{sp}
P_r
$\lambda(0)$
r
β (MPa ⁻¹)
ρ (°C ⁻¹)
k
P^c (MPa)
M
α
P_o^* (MPa)
P_{s0} (MPa)

Elastic
behaviour

$$k_s(p', s) = k_{so} \left(1 + \alpha_{sp} \ln p' / P_r \right) \exp(\alpha_{ss} s)$$

$$k_i(s) = k_{io} \left(1 + \alpha_{is} s \right)$$

Sistema de Cálculo

Sistema de Cálculo CODE-BRIGHT

- ***Basado en el método de los elementos finitos.***
- ***Capaz de efectuar análisis Termo-Hidro-Mecánico (THM) acoplados en dos y tres dimensiones***
- ***Puede simular aspectos tales como: estructura y discontinuidad del terreno, excavación y construcción, filtraciones, comportamiento termo-hidro-mecánico de suelos, rocas y discontinuidades, distintas opciones de refuerzo y otras***

CODE-BRIGHT ha sido desarrollado por el Departamento de Ingeniería del Terreno, de la Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

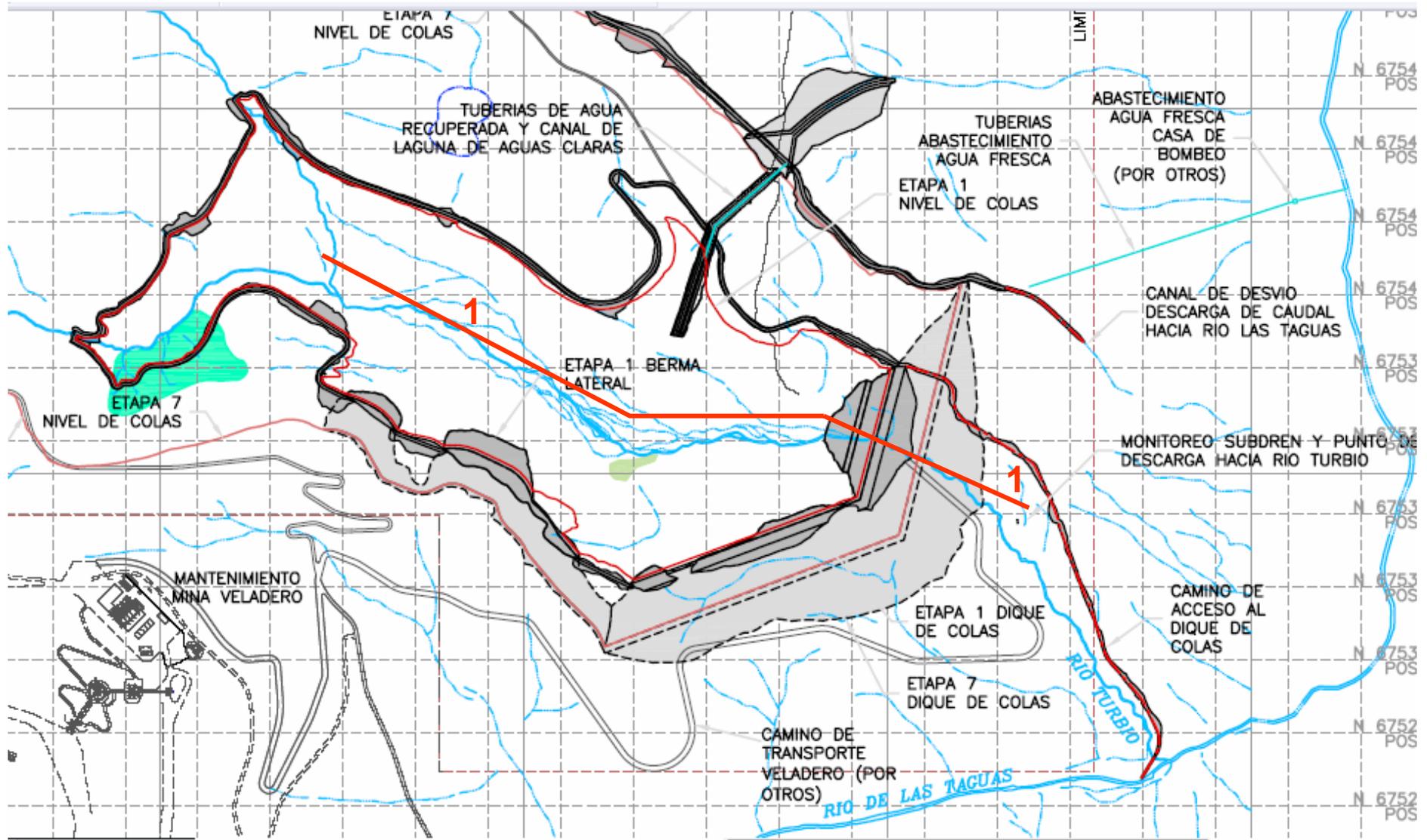
Sistema de Cálculo

Sistema Gráfico Interactivo GID

- *Interface gráfica interactiva que permite la definición, preparación y visualización de toda la información resultante de la simulación numérica*
- *Los datos incluyen la definición de la geometría, materiales, condiciones de contorno e iniciales, información de la solución y otros parámetros*
- *GID puede generar la malla de elementos finitos y construir los archivos de entrada de CODE-BRIGHT.*

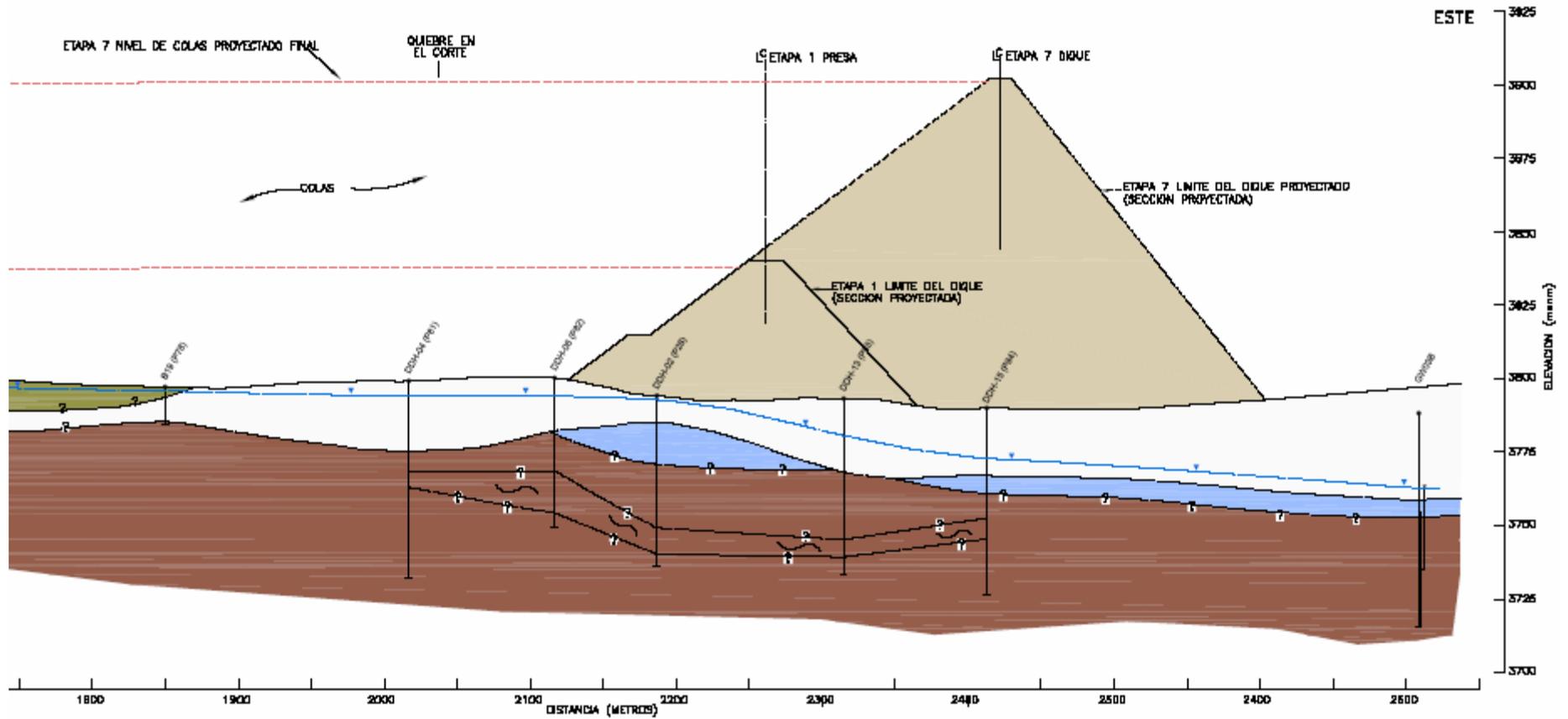
El Sistema Gráfico Interactivo GID ha sido desarrollado por el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Barcelona, España.

Proyecto Pascua-Lama (Au, Ag)



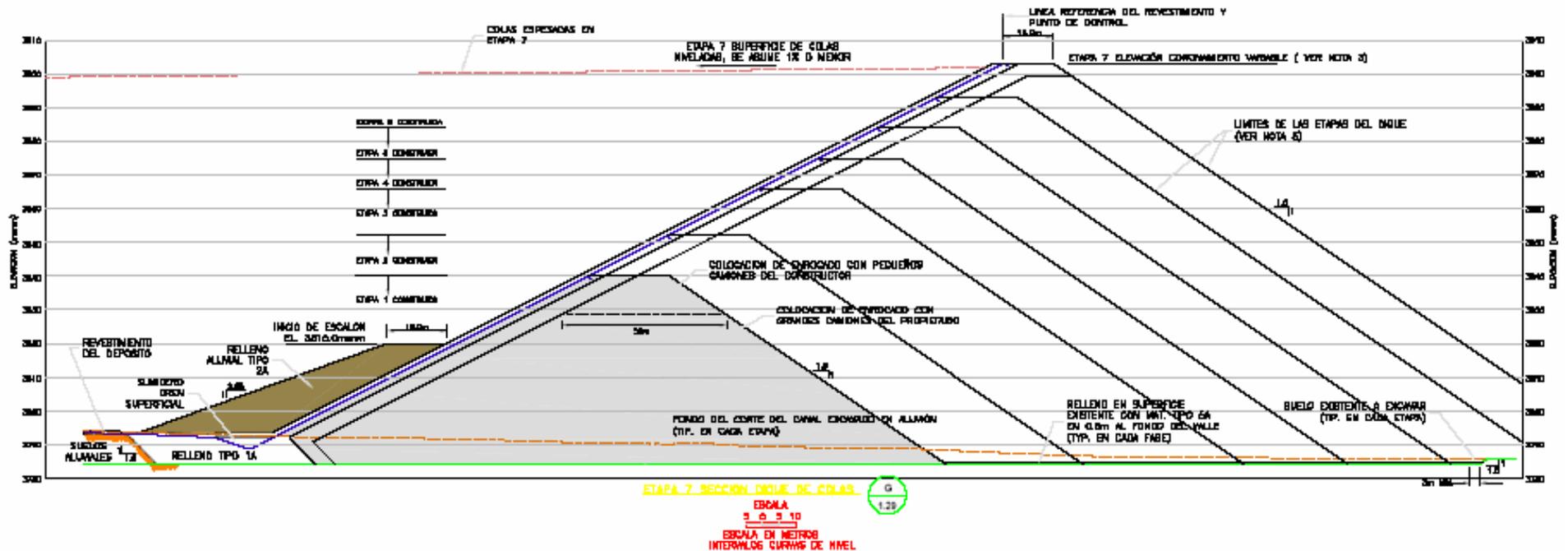
Proyecto Pascua-Lama (Au, Ag)

SECCIÓN 1 - 1



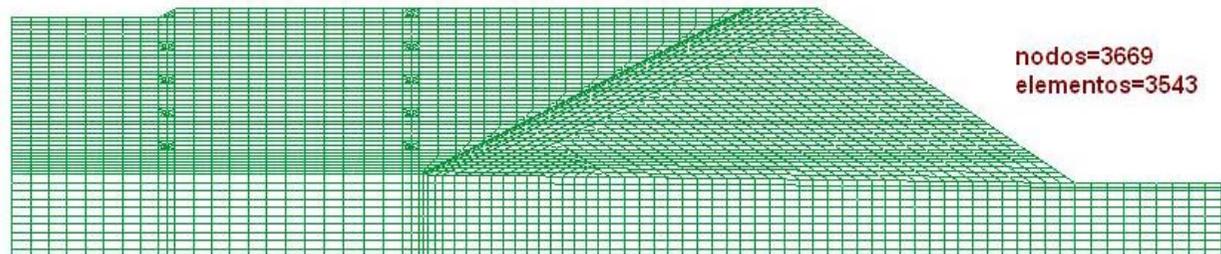
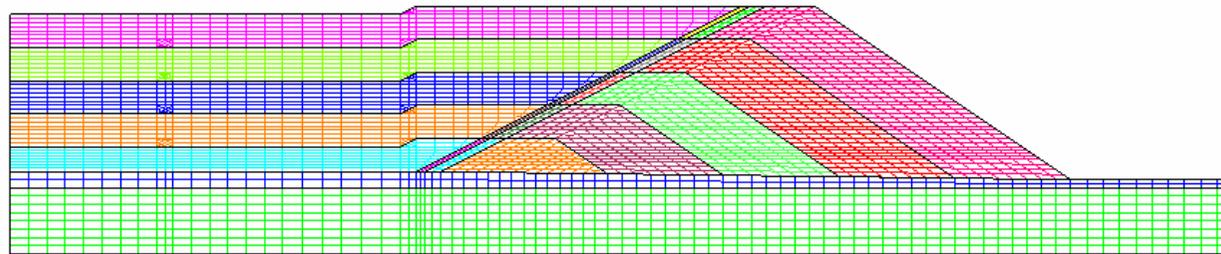
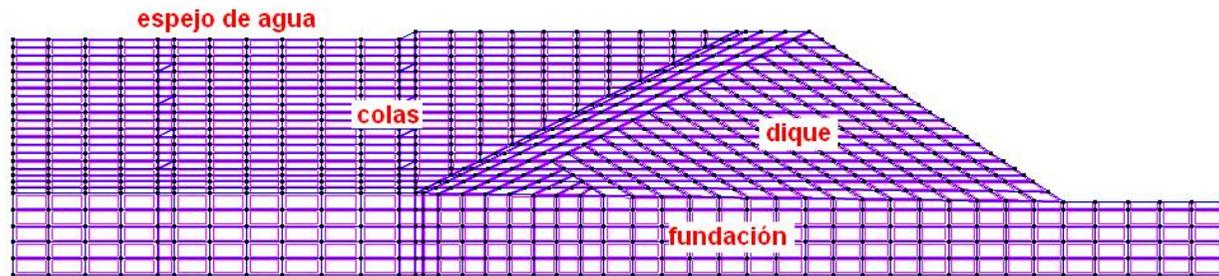
Proyecto Pascua-Lama (Au, Ag)

SECCIÓN 1 - 1



CONSTRUCCIÓN DEL MODELO ELEMENTOS FINITOS

PASCUA LAMA - SECCIÓN 1 - 1



APLICACIÓN DEL MODELO HM A UN EJEMPLO DE DIQUE DE COLAS TÍPICO

Flujo bidimensional no confinado en estado transitorio y estacionario en un dique de colas constituido por una presa homogénea y el embalse de lodos cercano a la presa.

El análisis es bidimensional (2D) y abarca el estado transitorio correspondiente a la construcción de la presa, el llenado del embalse con colas y la infiltración hasta alcanzar el estado estacionario.

La presa se construye en 10 etapas durante los primeros 2 años. El llenado del embalse se realiza también en 10 etapas durante los siguientes 16 años.

Se evalúa:

- Posición de la superficie libre.
- Caudales aguas abajo de la presa.
- Crecimiento de las presiones de poro.
- Estado tenso-deformacional.

GEOMETRÍA

CONDICIONES DE CONTORNO

CONDICIONES INICIALES

La geometría, condiciones de contorno y parámetros de los materiales se han obtenido de la bibliografía existente sobre diques de colas reales.

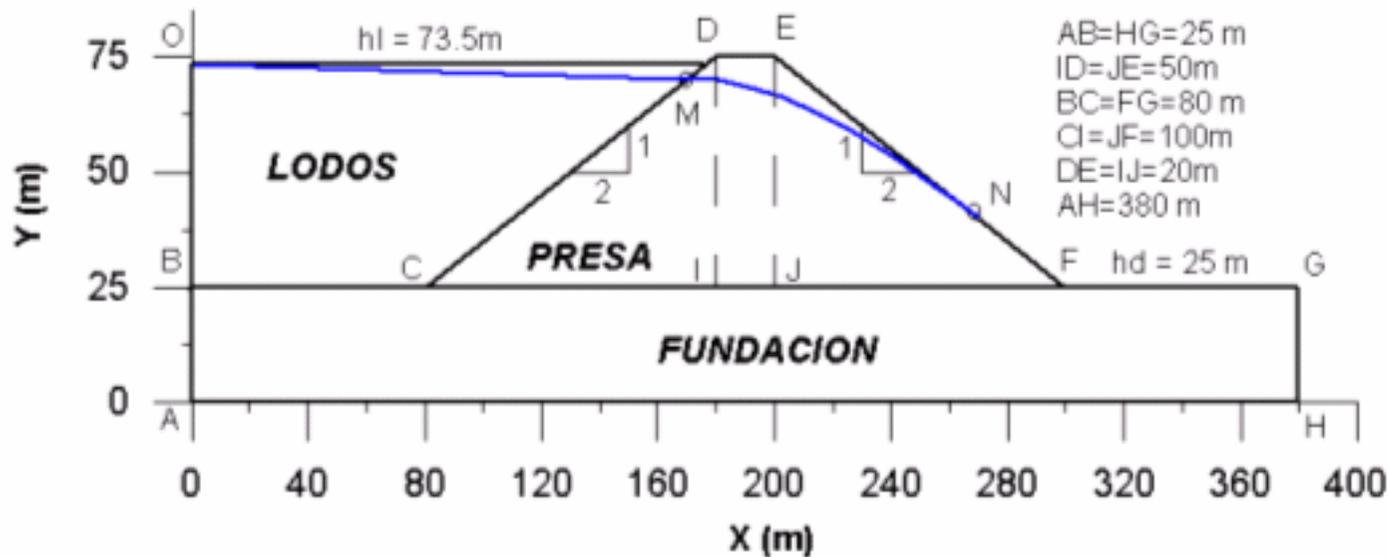


Fig. 1: Geometría general de la presa, fundación y lodos.

AH = impermeable
BCG = NF inicial
BO = NF variable en construcción

Condiciones Iniciales

Presa:

$s_0 = 49.4\text{ kPa}$
 $Sl_0 = 62.4\% (w_{opt})$
 $n_0 = 0.30$

Fundación:

saturado
 $n_0 = 0.25$

Lodos:

saturado
 $n_0 = 0.50$

Fundación:

$u_0 = 0$
 $\sigma_0 = \text{esfuerzos geostáticos,}$
 $K_0 = 1$



Fig. 2: Materiales y etapas de construcción de la presa y de llenado con lodos.

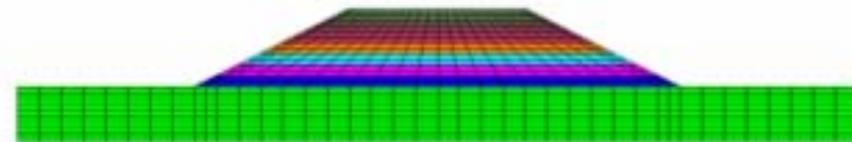
Construcción de una capa de presa de 5m cada 0.2 años. Tiempo construcción de la presa = 2 años.
 Capas de lamas: 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 14, 16 y 18 años.



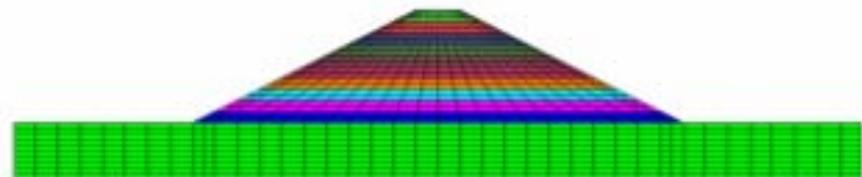
a) Construcción Estado inicial, $t = 0$. año.



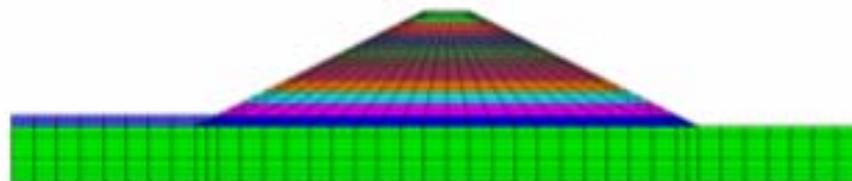
b) Construcción Etapa 4, Capa 4, $t = 0.8$ años.



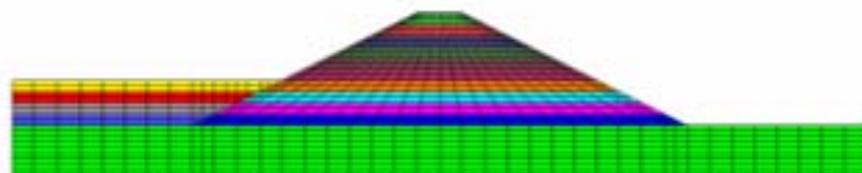
c) Construcción Etapa 7, Capa 7, $t = 1.4$ años.



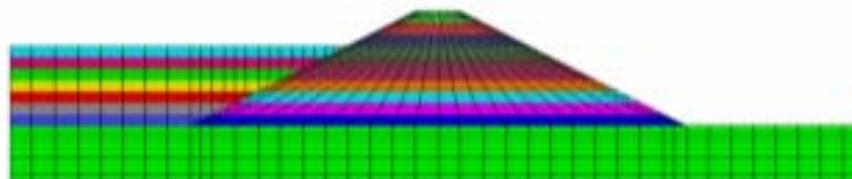
d) Construcción Etapa 10, capa 10, $t = 2$ años.



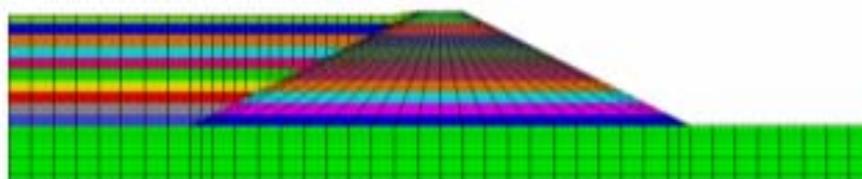
e) Llenado Etapa 1, Capa 1, $t = 3$ años.



f) Llenado Etapa 4, Capa 4, $t = 6$ años.



g) Llenado Etapa 7, Capa 7, $t = 12$ años.

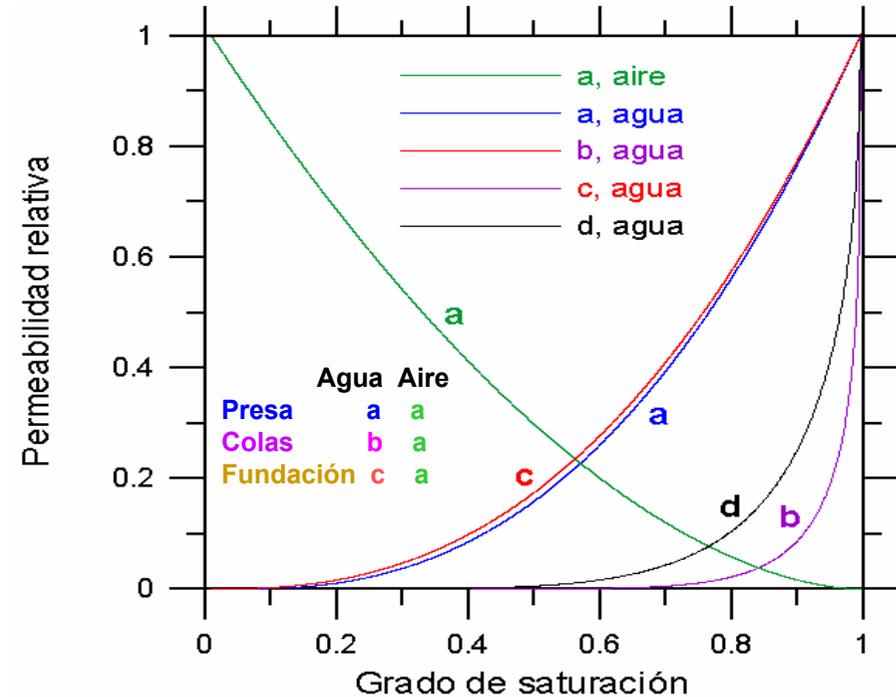
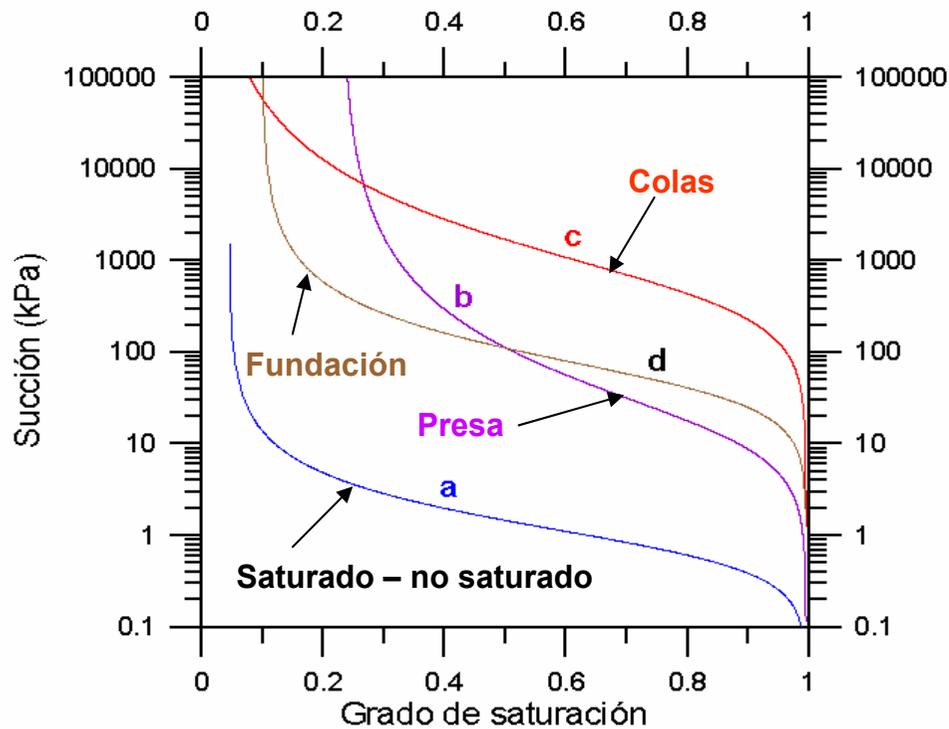


h) Llenado Etapa 10, Capa 10, $t = 18$ años.

Fig. 3: Malla de elementos finitos correspondiente a algunas etapas de construcción de la presa y llenado del embalse.

MATERIALES

PROPIEDADES HIDRÁULICAS IMPORTANTES



Curvas de retención del material

$$S_e = \frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}} = \left(1 + \left(\frac{s}{P_o} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right)^{-\lambda}$$

(van Genuchten)

Permeabilidades relativas

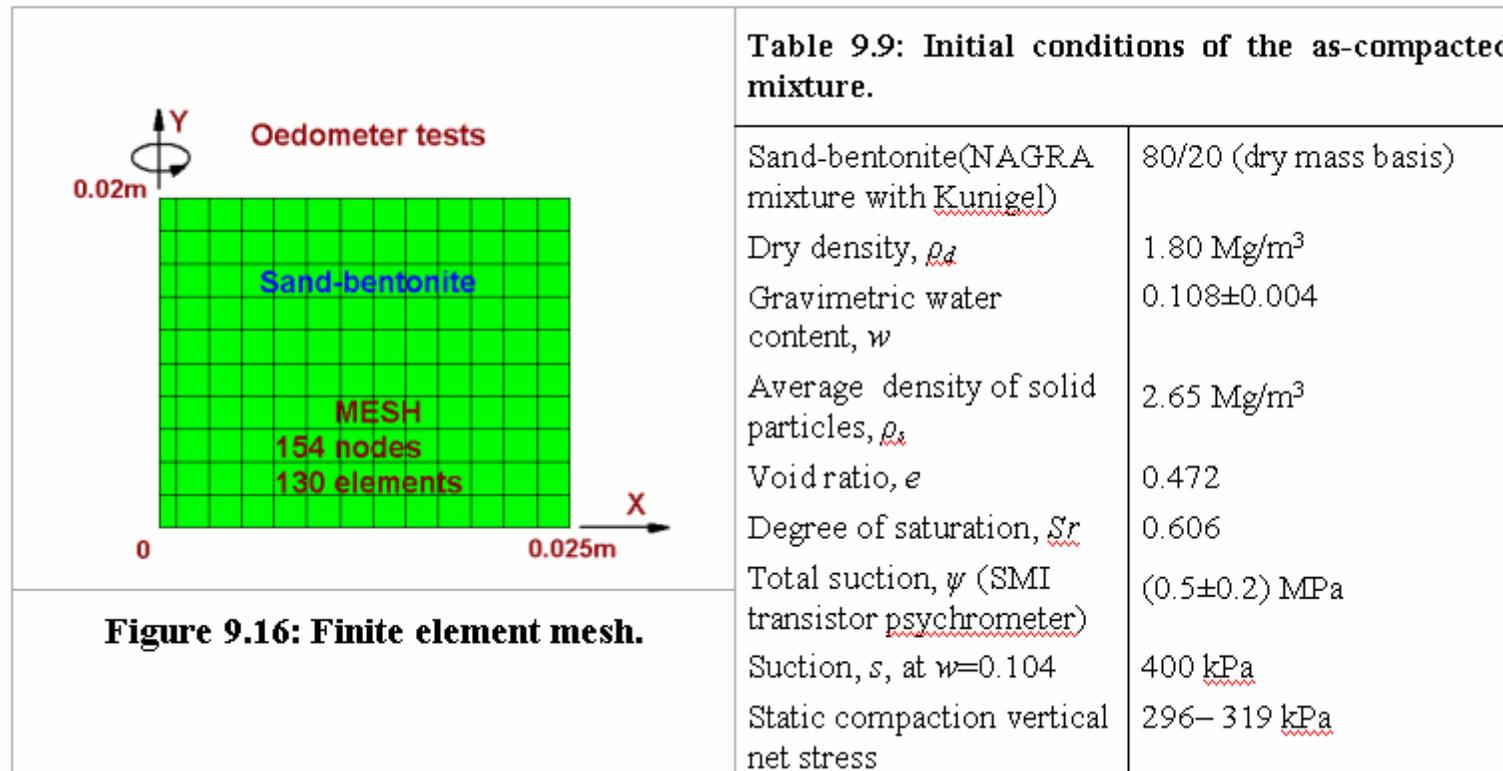
$$k_{rl} = S_e^{1/2} \left(1 - \left(1 - S_e^{1/\lambda} \right)^\lambda \right)^2 \quad \text{agua}$$

$$k_{rl} = A S_e^\beta \quad \text{agua}$$

$$k_{rg} = A_g (1 - S_e)^{\beta_g} \quad \text{aire}$$

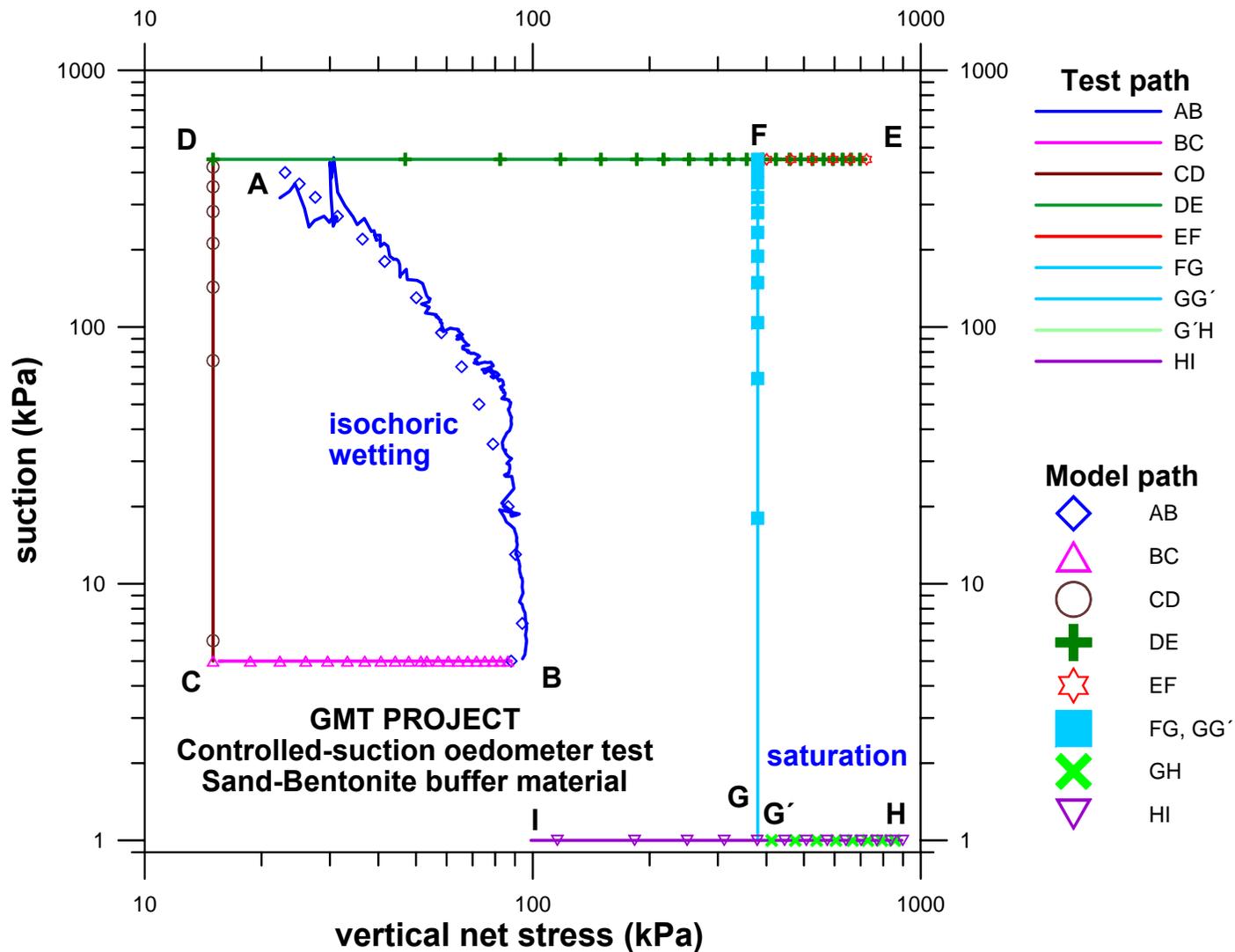
Determinación de los parámetros elasto-plásticos de la mezcla arena-bentonita

Backanalysis of Suction controlled oedometer test on sand-bentonite mixture
(Romero et al., 2002, 2003)



La calibración del modelo se ha realizado simulando un ensayo en edómetro con succión controlada realizado en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la UPC. Este ensayo edométrico es bastante completo ya que considera varias trayectorias de humedecimiento, secado, carga y descarga.

Las variables calculadas están en buen acuerdo con los resultados del ensayo indicando que el modelo BBM con los parámetros seleccionados es capaz de reproducir el comportamiento real de la mezcla arena-bentonita.



Stress paths followed on the sand-bentonite mixture under controlled-suction oedometer conditions at laboratory test and by the model.

Tabla 1: Propiedades hidráulicas

Propiedad		Material		
		Presas	Colas	Fundación
Permeabilidad Intrínseca (m ²)	k_{xxx}	10 ⁻¹⁴	10 ⁻¹⁴	10 ⁻¹⁴
	k_{yyy}	10 ⁻¹⁵	10 ⁻¹⁴	10 ⁻¹⁴
Porosidad ϕ (-)		0.30	0.50	0.25
Curva de retención (van Genuchten, ecuación 10)	Curva (Fig. 6)	b	c	d
	P_o (MPa)	0.014	0.45	0.05
	λ	0.33	0.33	0.47
	S_{rl}	0.23	0.01	0.10
	S_{ls}	0.995	0.995	0.995
Permeabilidad relativa al agua VG: van Genuchten, ecuación 7 LPG: ley potencial generalizada, ecuación 8	Modelo	VG	LPG	VG
	Curva (Fig. 7)	b	c	d
	A	-	1	-
	β	-	2.5	-
	λ	0.33	-	0.47
	S_{rl}	0.23	0.01	0.10
	S_{ls}	0.995	0.995	0.995
Permeabilidad relativa al aire (ley potencial generalizada, ecuación 9)	Curva (Fig. 7)	a	a	a
	A	10 ⁴	10 ⁴	10 ⁴
	β	1.76	1.76	1.76
	$(1-S_{rl})$	0.995	0.995	0.995
	$(1-S_{ls})$	0.01	0.01	0.01

Tabla 2: Propiedades mecánicas

Modelo		Propiedad	Material		
			Presa	Colas	Fundación
Modelo elástico lineal		E (MPa)	-----	-----	28200
		ν (-)	-----	-----	0.33
Modelo elasto-plástico - BBM (Alonso <i>et al</i> 1990)	Parámetros elásticos	k_{io} (-)	0.016	0.016	-----
		k_{so} (-)	0.0225	0.0225	-----
		α_{ss} (MPa ⁻¹)	-0.004	-0.004	-----
		α_{is} (MPa ⁻¹)	-0.002	-0.002	-----
		α_{sp} (-)	-0.343	-0.343	-----
		P_{ref} (MPa)	0.023	0.023	-----
	Parámetros plásticos	$\lambda(\theta)$ (-)	0.049	0.049	-----
		r (-)	0.97	0.97	-----
		β (MPa ⁻¹)	7.	7.	-----
		k (-)	0.003	0.003	-----
		P_c (MPa)	0.01	0.01	-----
		M (-)	1.0915	1.0915	-----
		α (-)	0.00732	0.00732	-----
		e_0 (-)	0.472	0.472	-----
		P_0^* (MPa)	0.267	0.267	-----
P_{s0} (MPa)	0.1	0.1	-----		

RESULTADOS

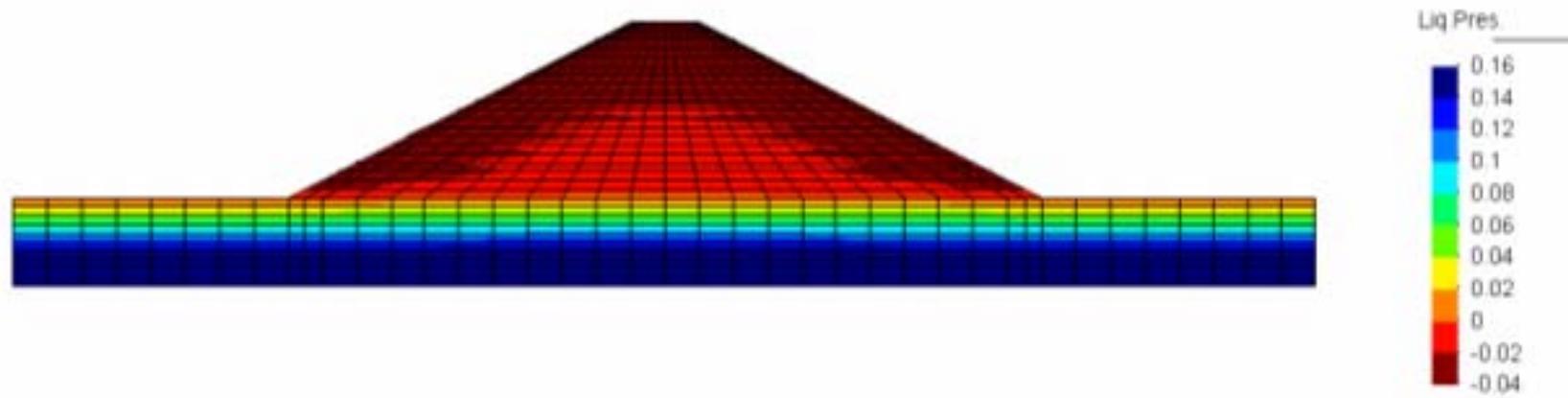


Fig. 8: Contornos de presión de agua al final de la construcción de la presa (t = 2 años).

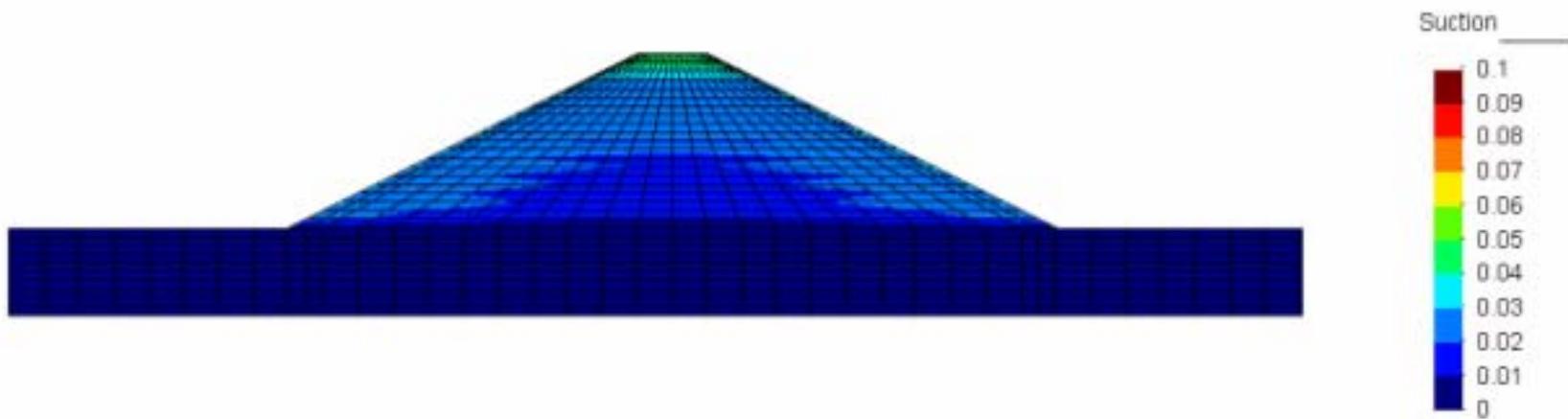


Fig. 9: Contornos de succión al final de la construcción de la presa (t = 2 años).

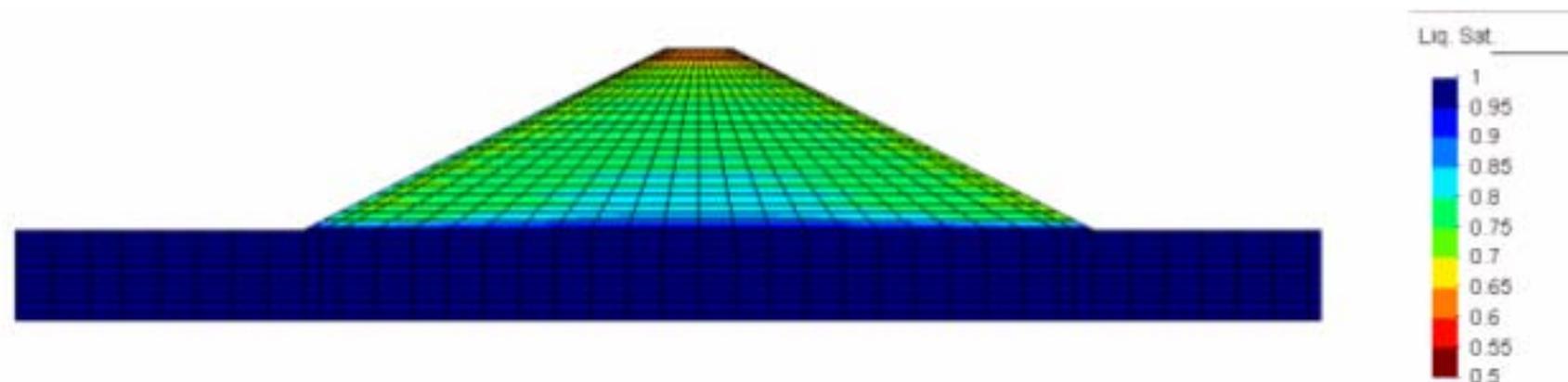


Fig. 10: Contornos de grado de saturación al final de la construcción de la presa (t = 2 años).

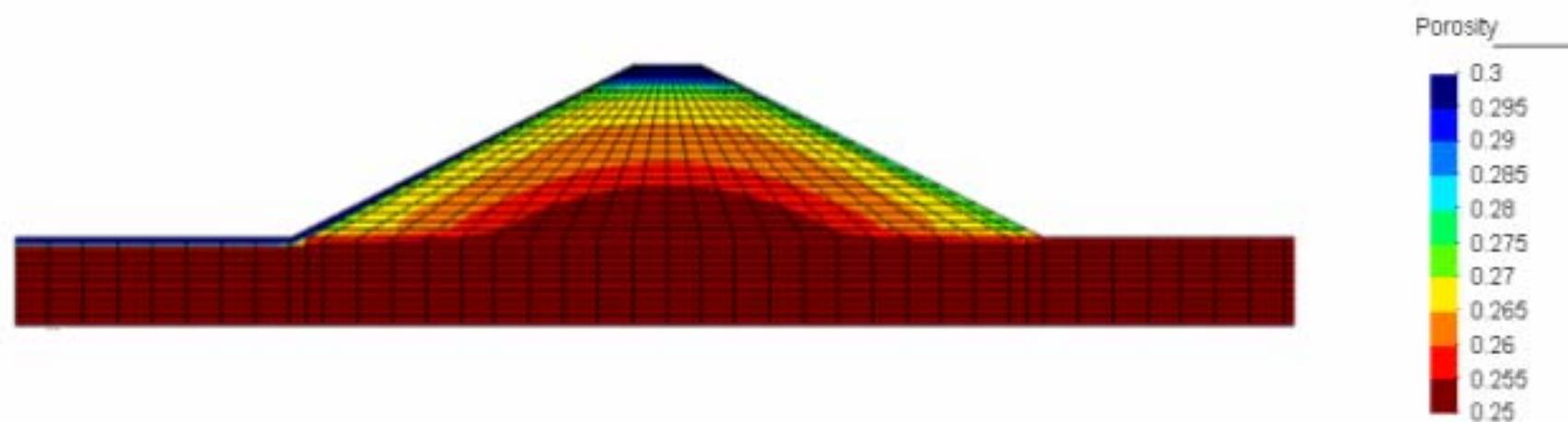


Fig. 11: Contornos de porosidad al final de la construcción de la presa (t = 2 años).

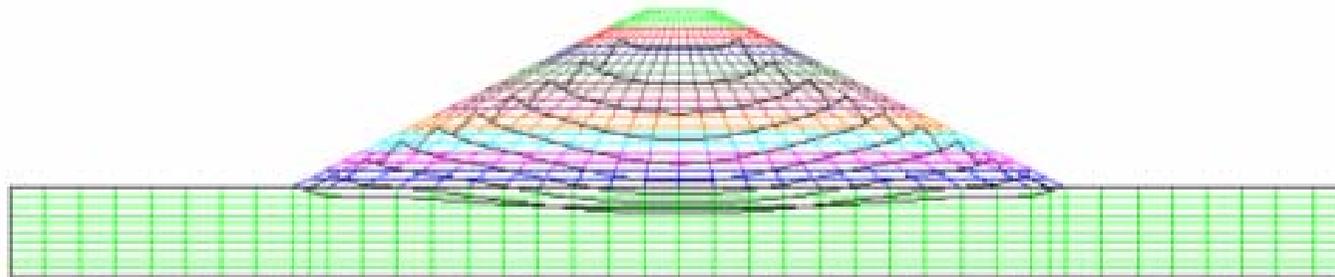


Fig. 12: Malla inicial y deformada (factor escala = 30) al final de la construcción de la presa (t = 2 años).

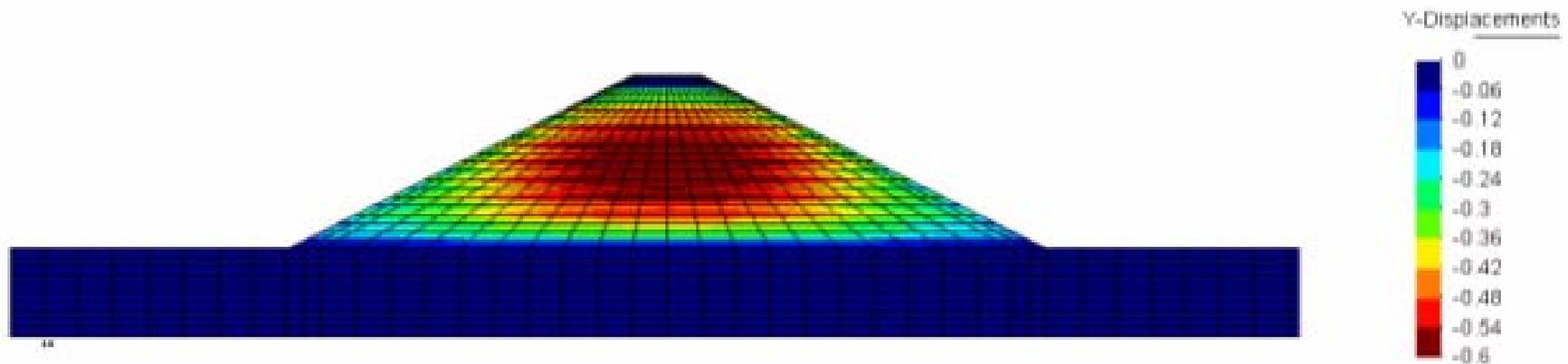


Fig. 13: Contornos de desplazamientos verticales al final de la construcción de la presa (t = 2 años).

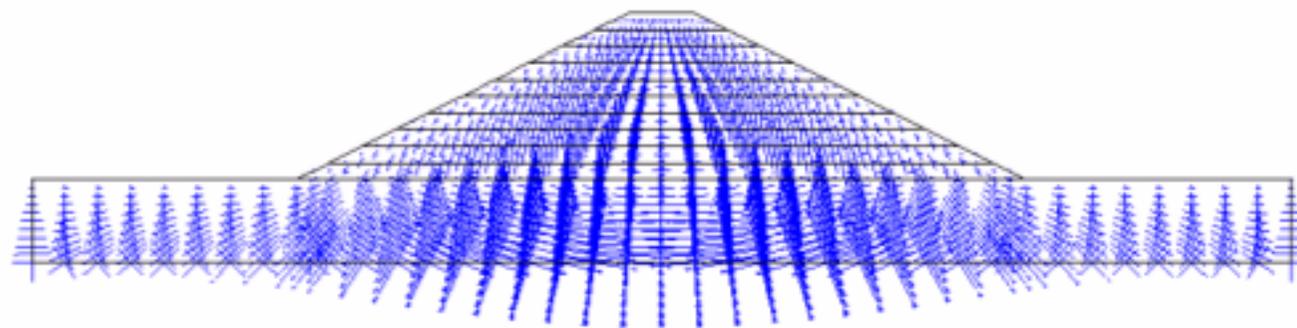


Fig. 14: Tensiones principales al final de la construcción de la presa (t = 2 años).

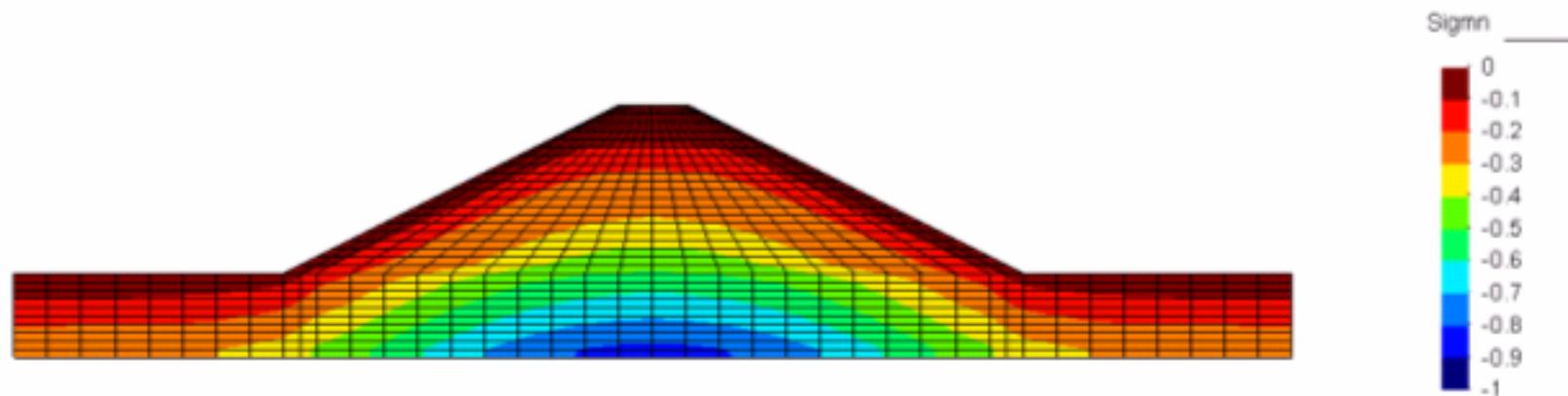
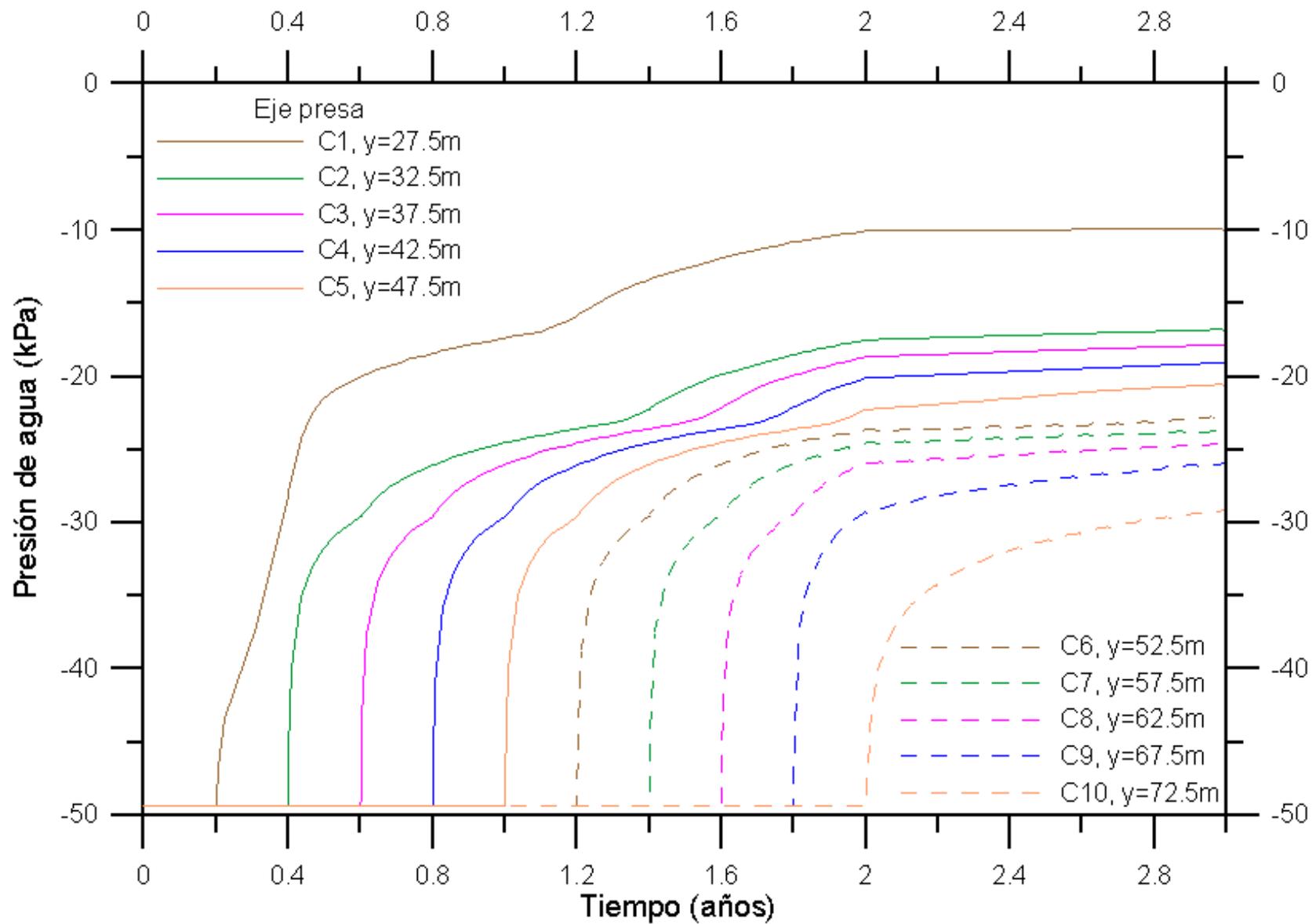
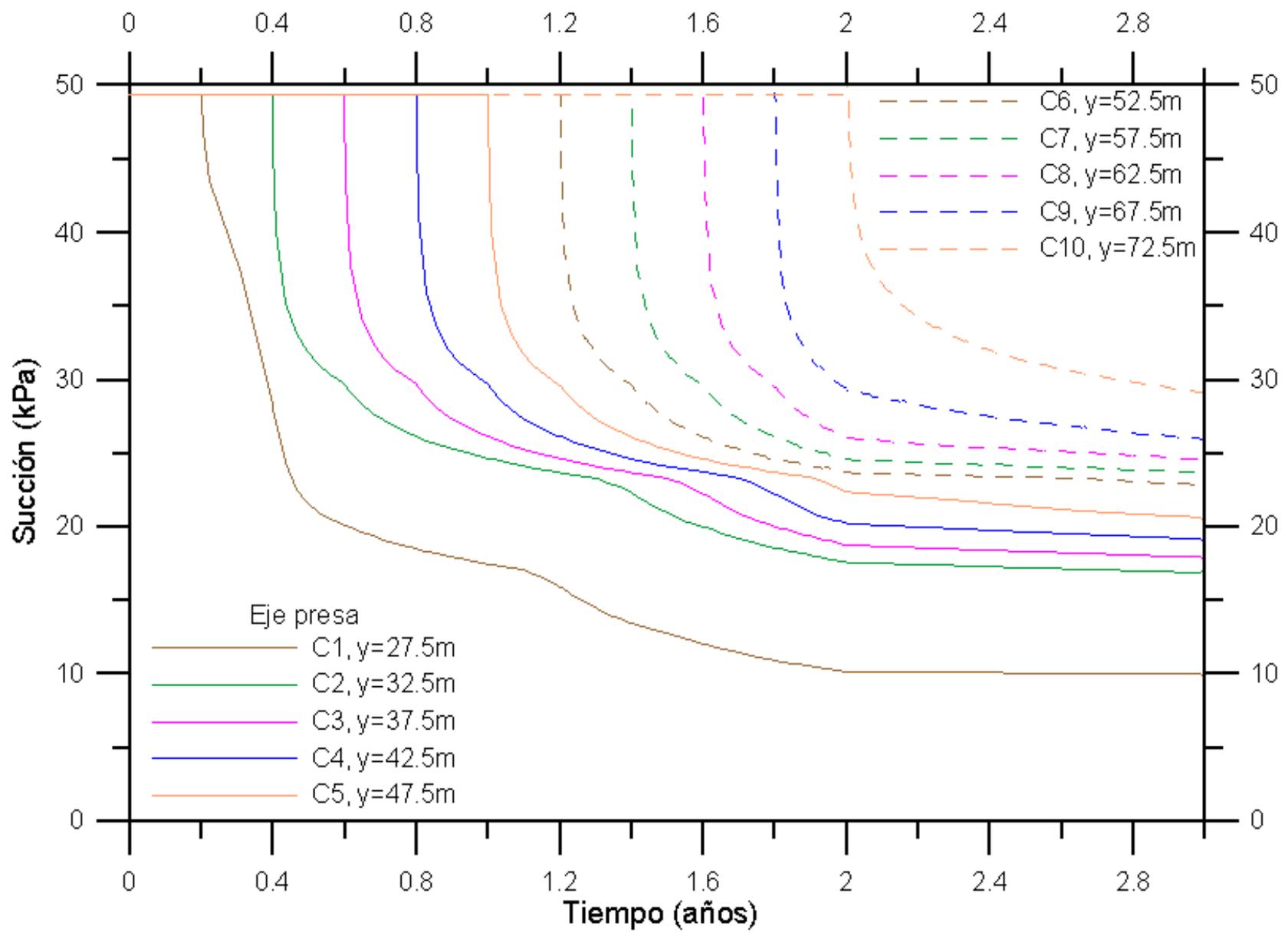
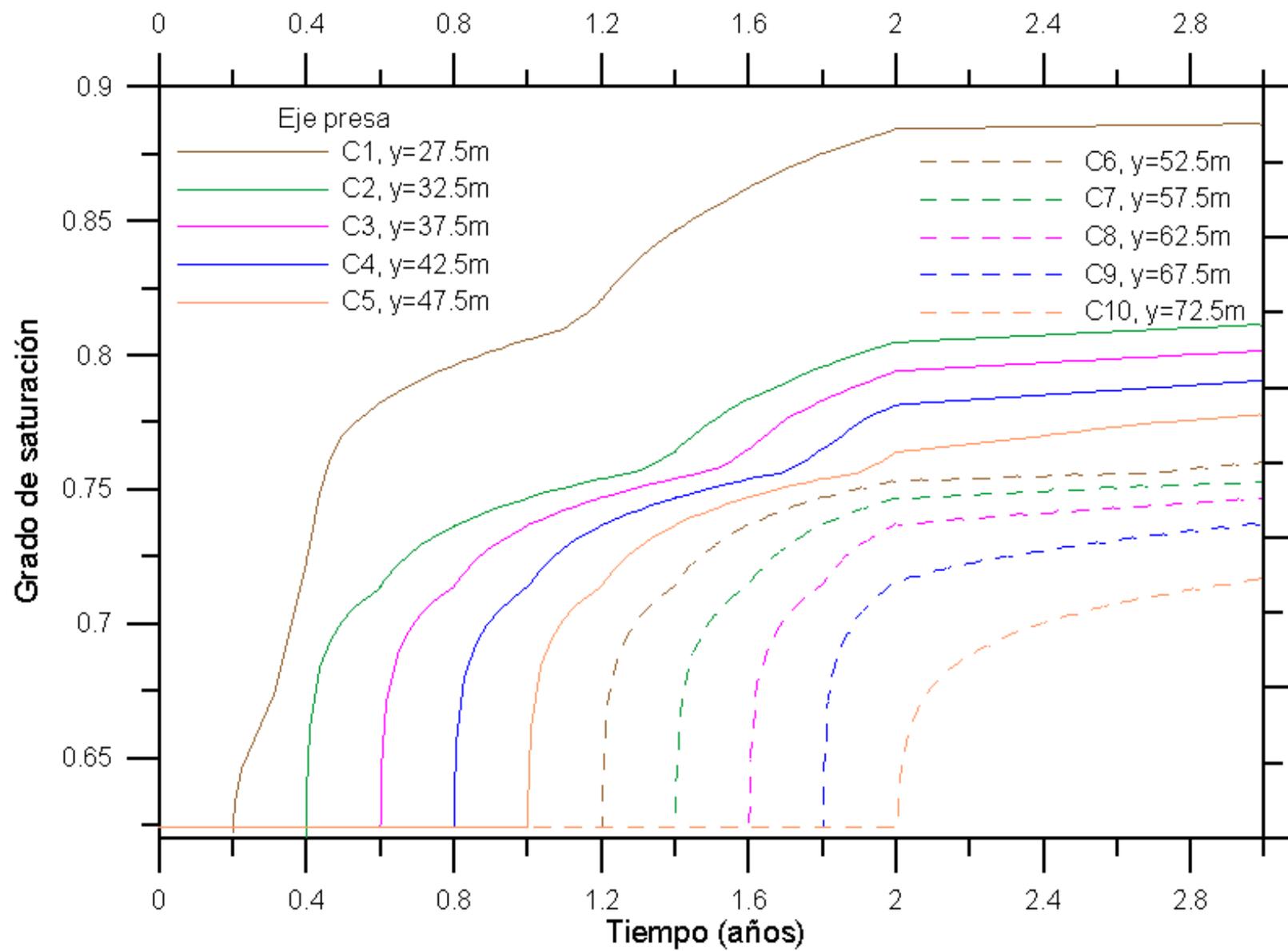
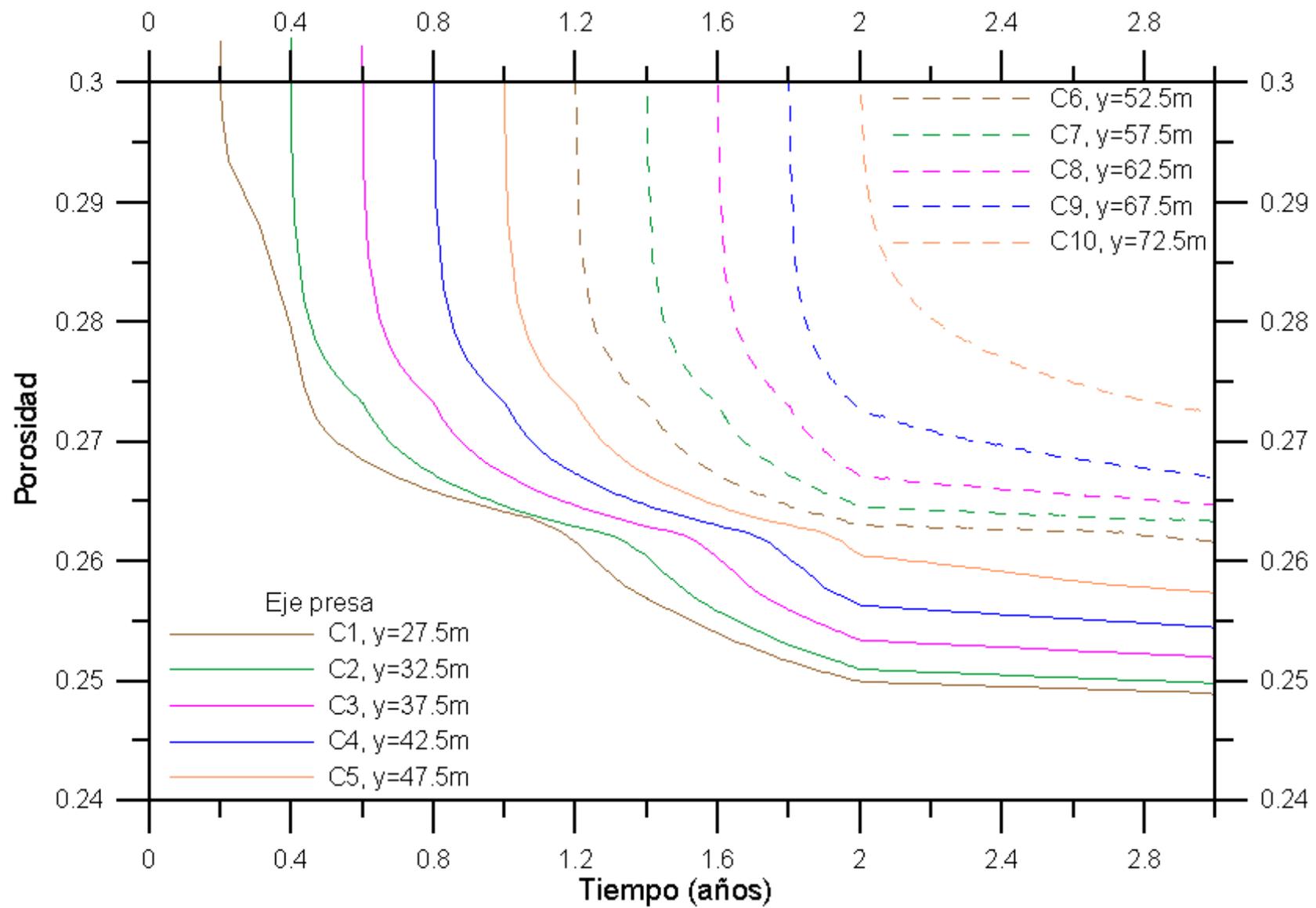


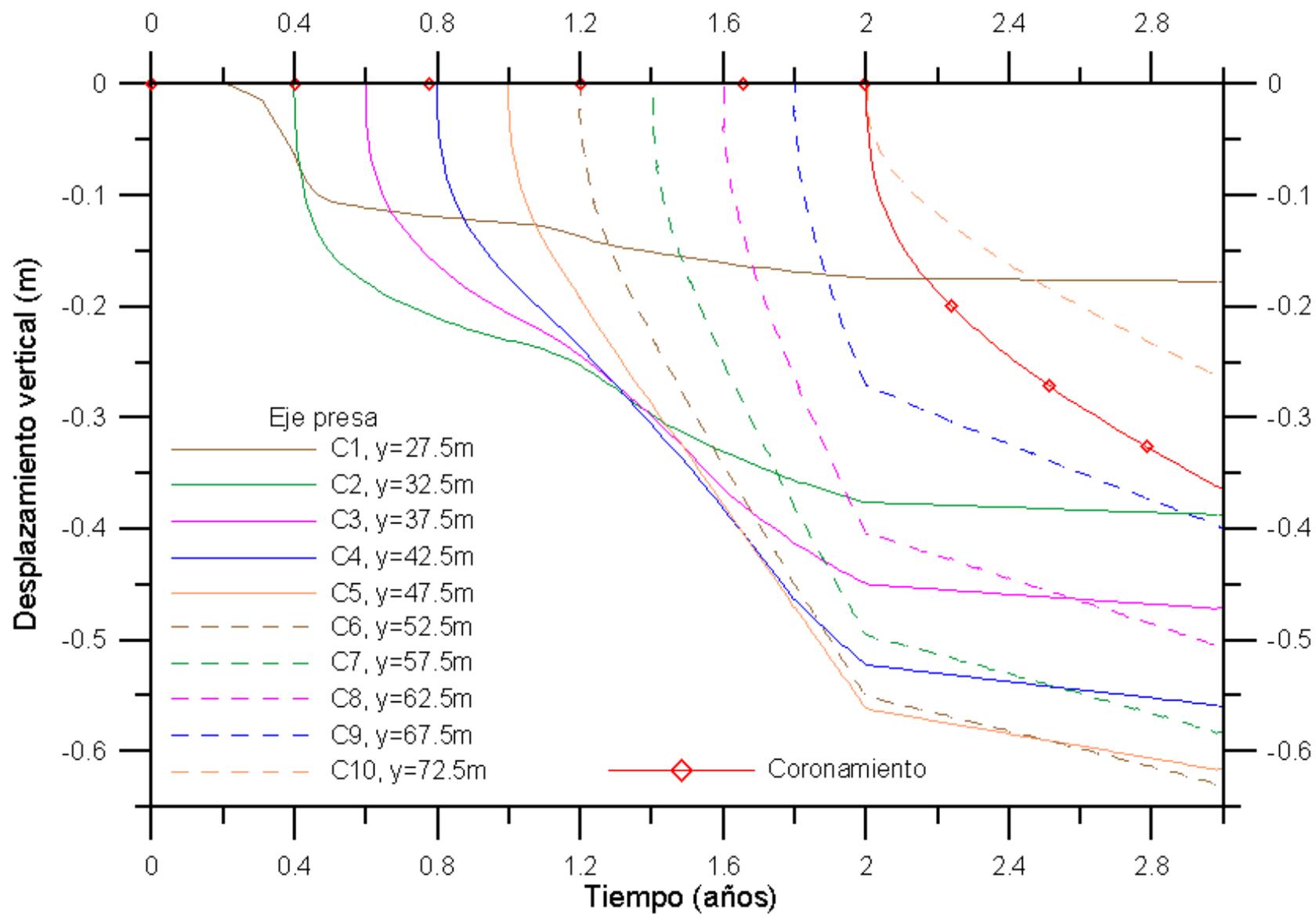
Fig. 15: Contornos de tensión media neta al final de la construcción de la presa (t = 2 años).

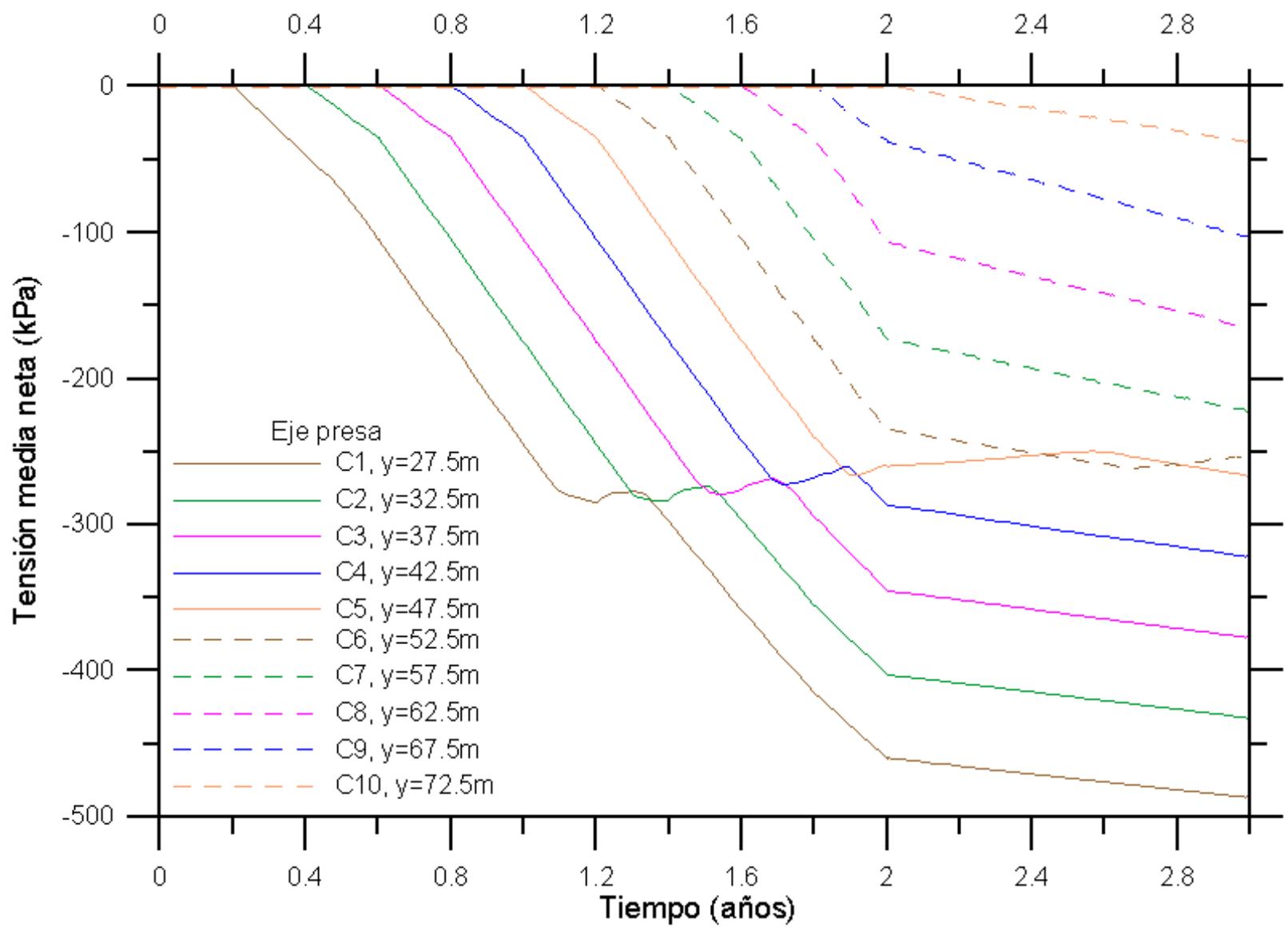












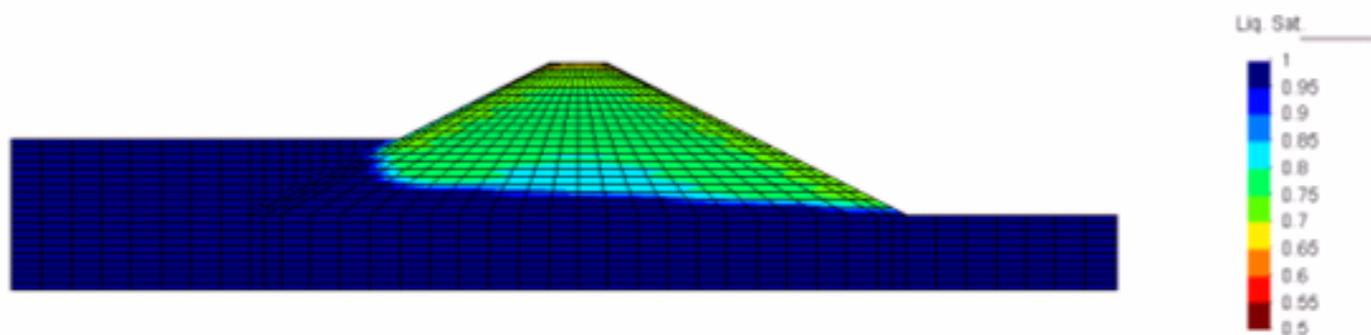


Fig. 17: Grado de saturación, 2 años después de colocar la capa 5 de lodos, $t = 10$ años.

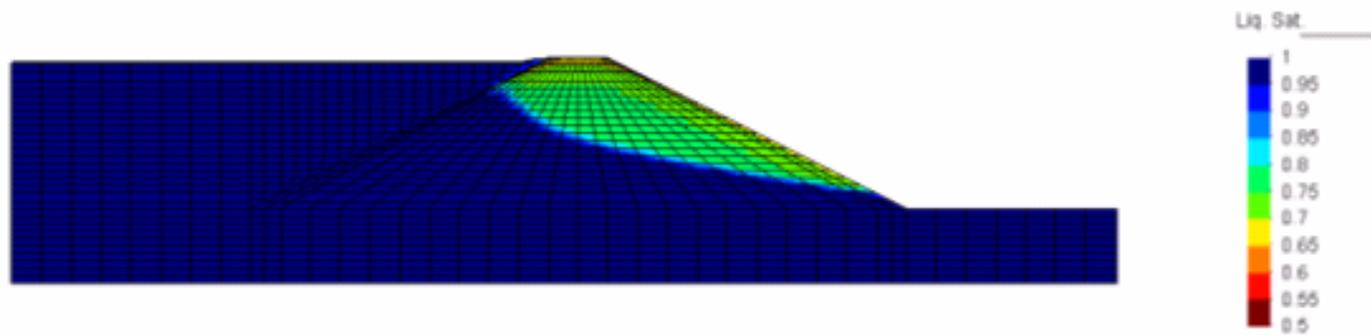


Fig. 18: Grado de saturación, 2 años después de finalizar el llenado del embalse, $t = 20$ años.

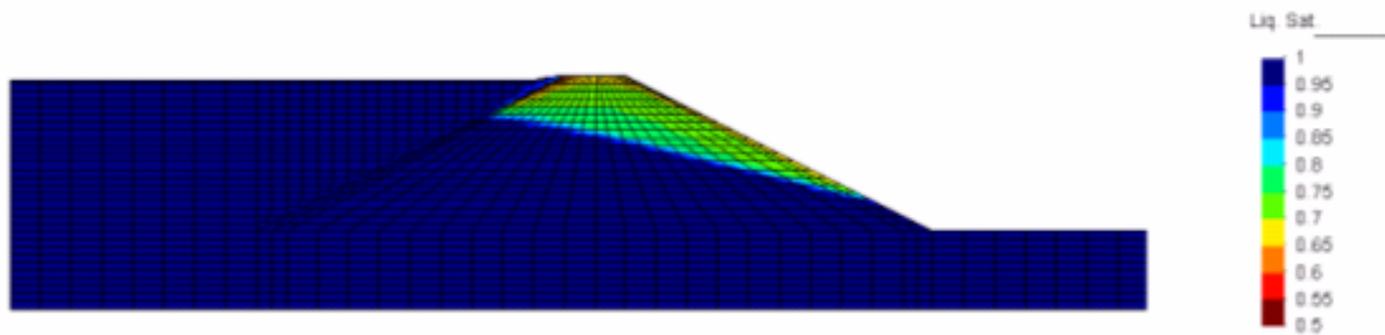


Fig. 19: Grado de saturación, 12 años después de finalizar el llenado del embalse, $t = 30$ años.

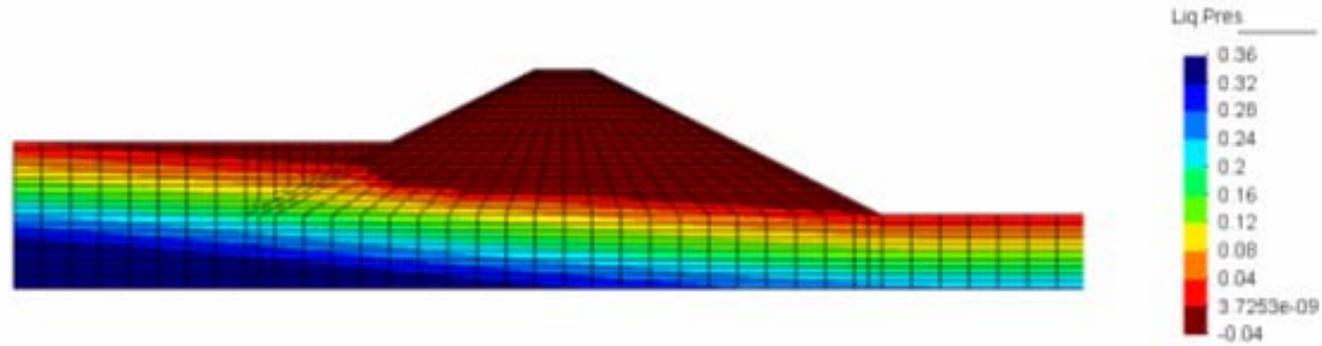


Fig. 20: Presión de agua, 2 años después de colocar la capa 5 de lodos, $t = 10$ años.

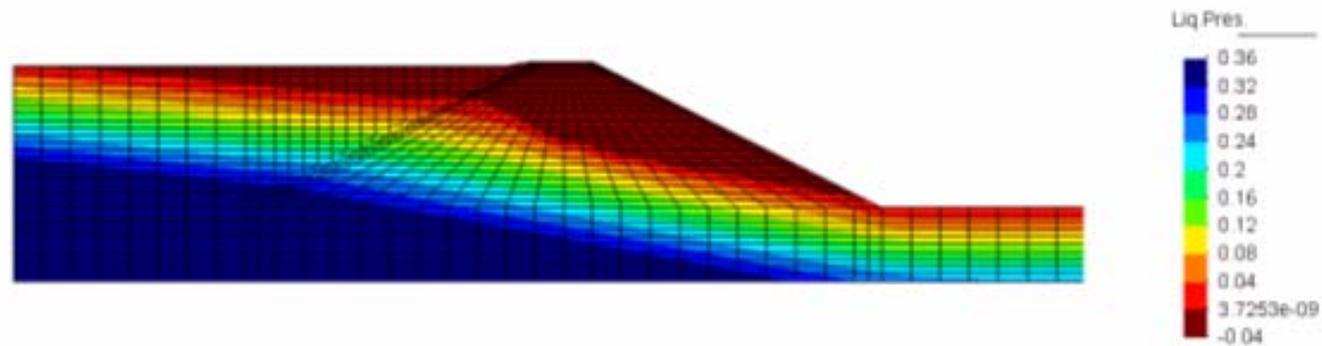


Fig. 21: Presión de agua, 2 años después de finalizar el llenado del embalse, $t = 20$ años.

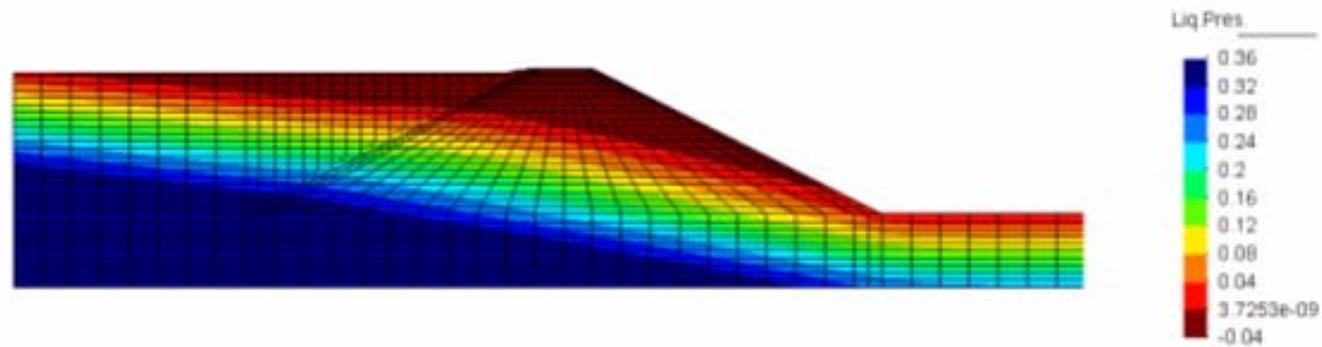


Fig. 22: Presión de agua, 12 años después de finalizar el llenado del embalse, $t = 30$ años.

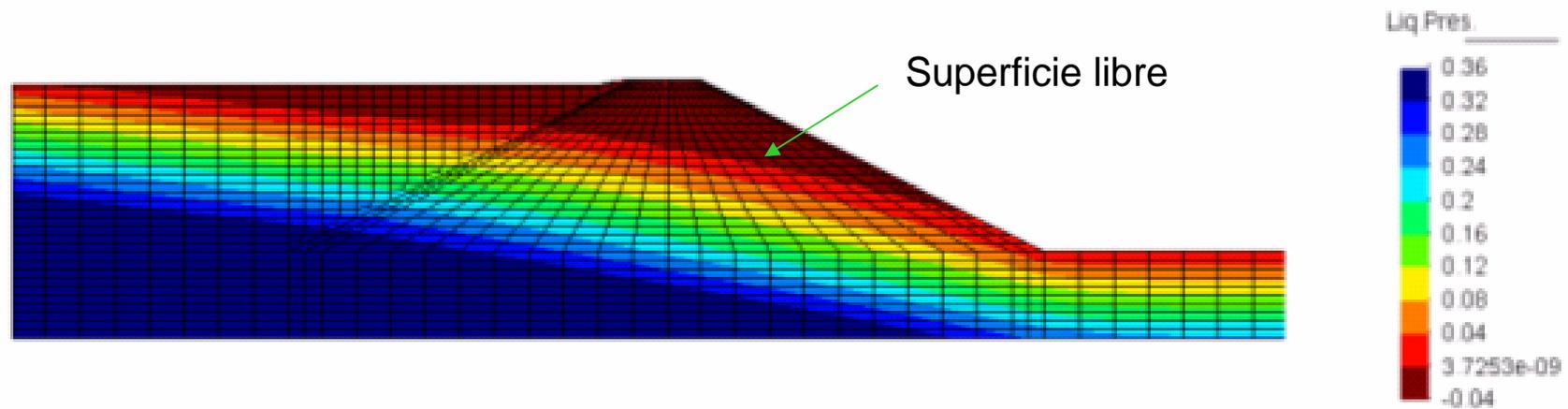


Fig. 23: Contornos de presión de agua, estado estacionario.

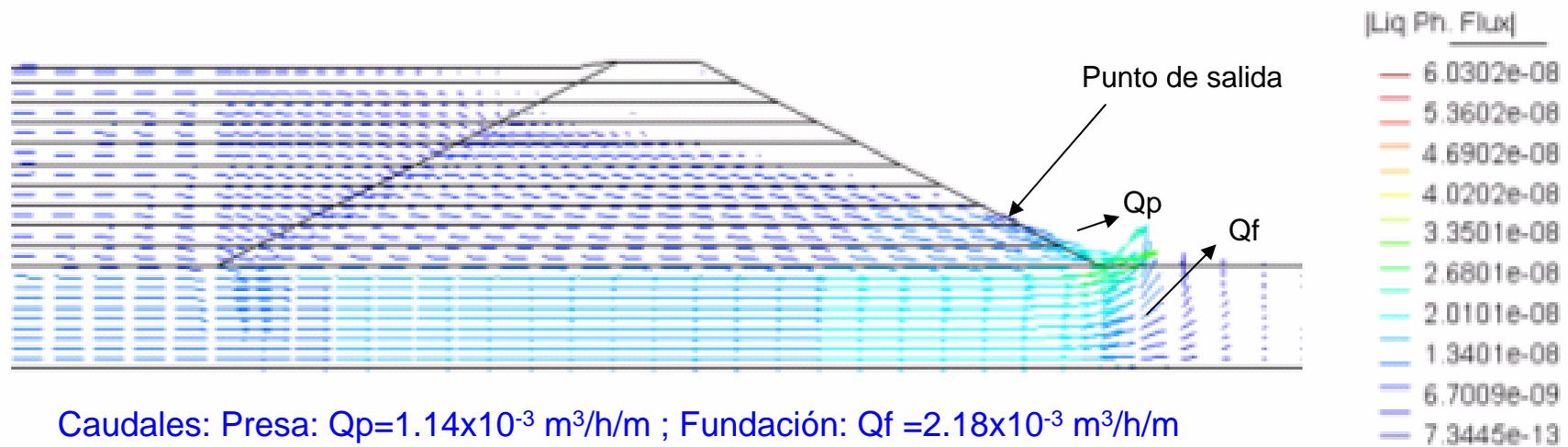


Fig. 24: Campo de velocidades de flujo de agua, estado estacionario.

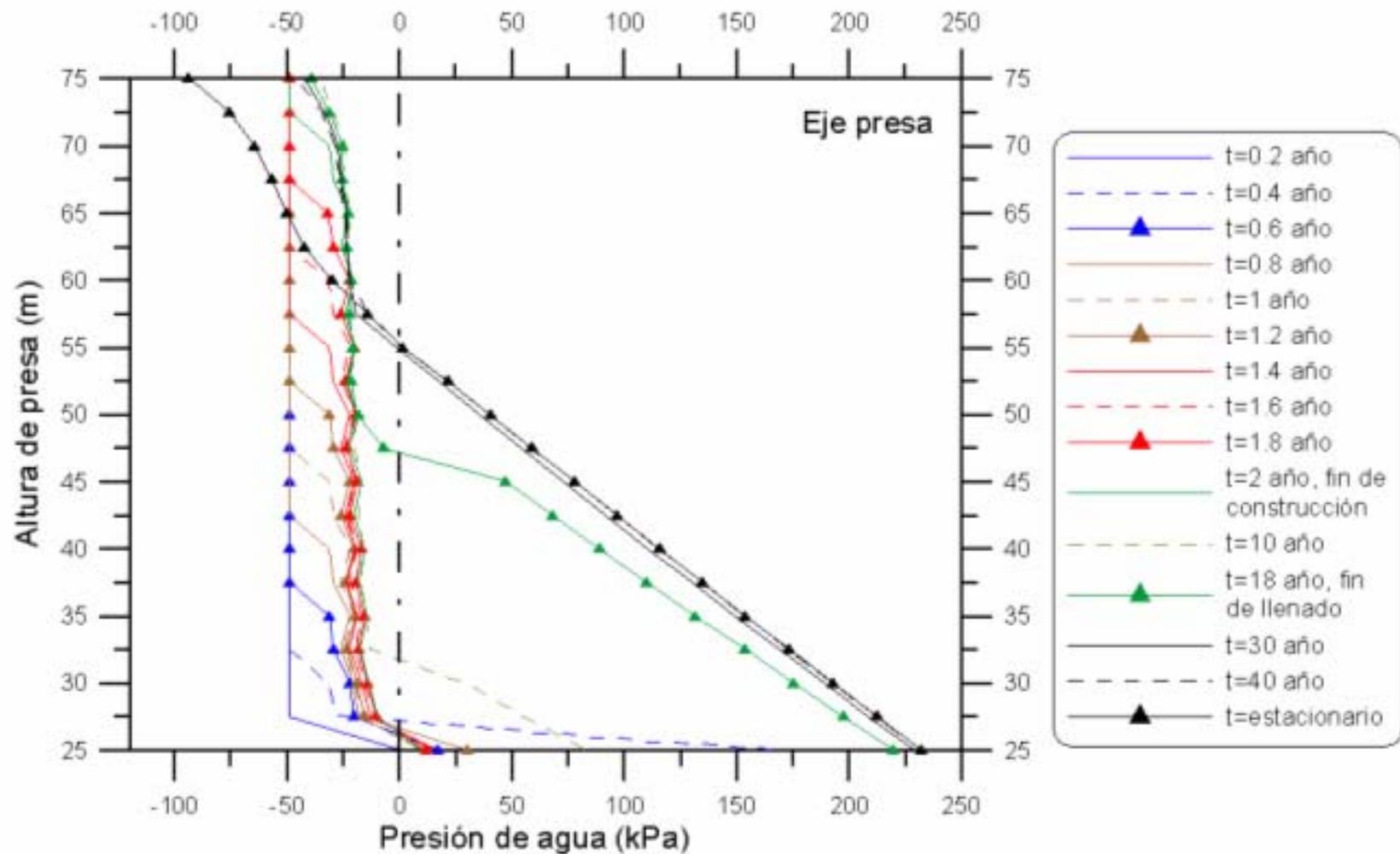


Fig. 25: Perfiles de presión de agua. Plano vertical central de la presa.

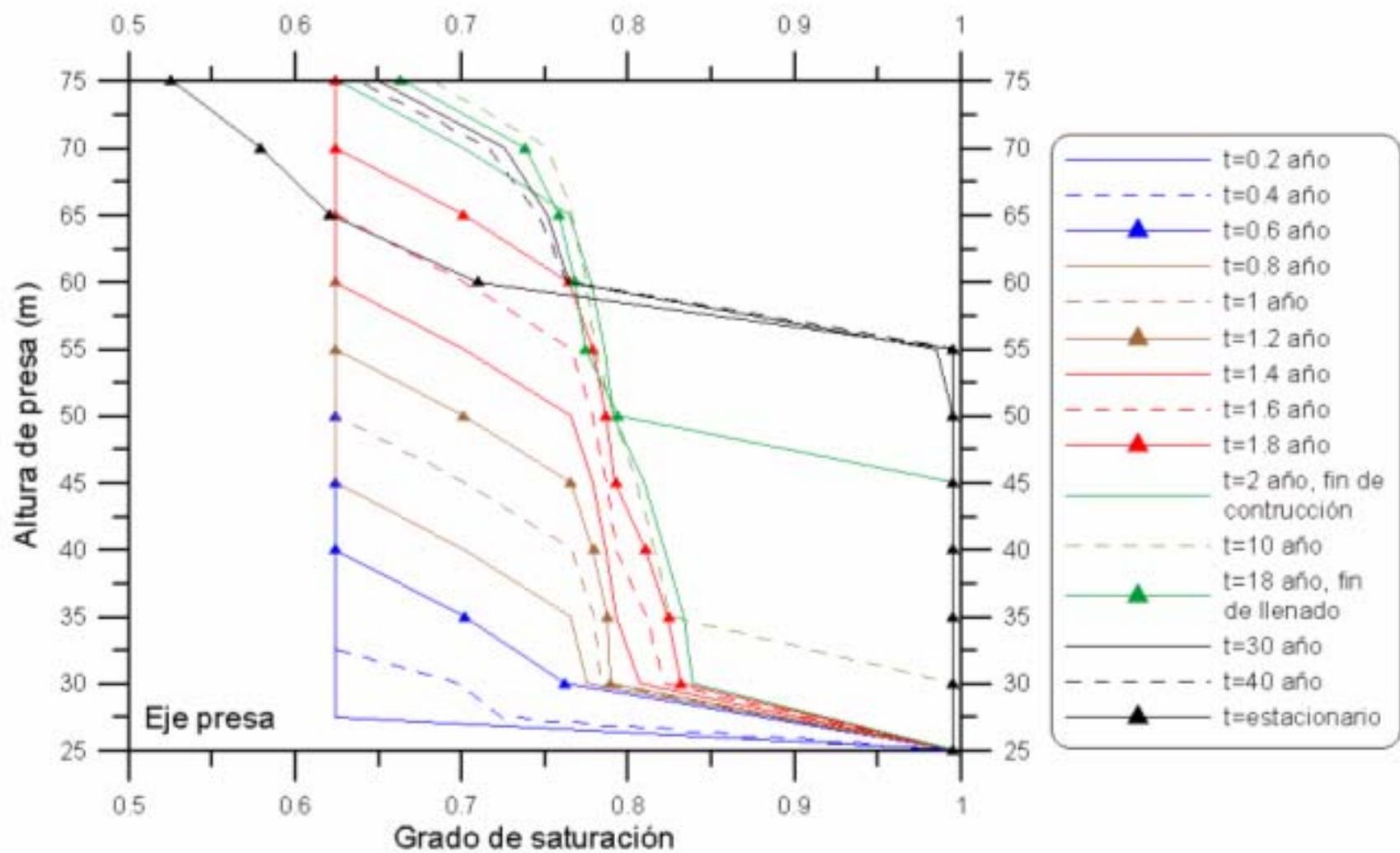


Fig. 26: Perfiles de grado de saturación. Plano vertical central de la presa.

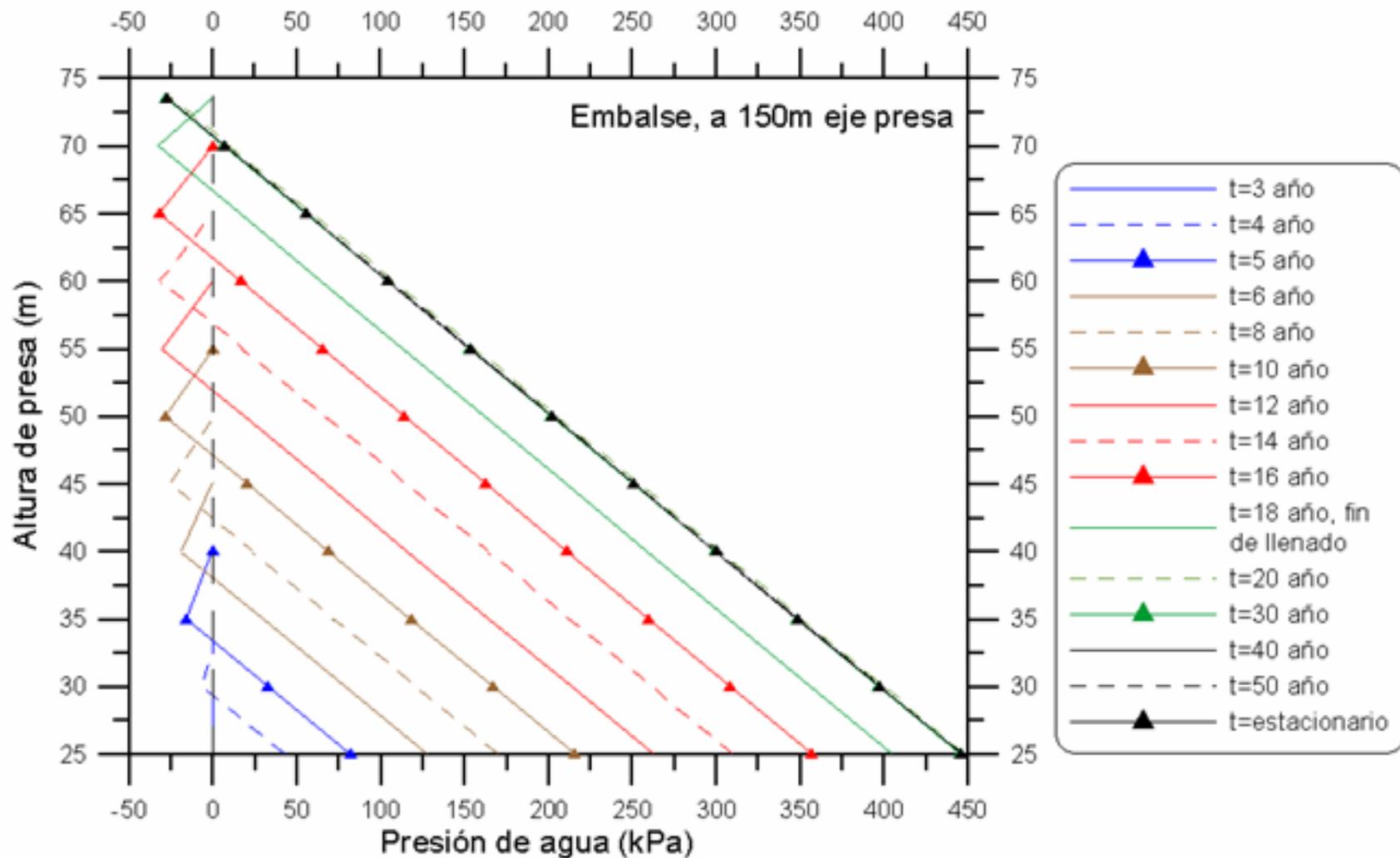


Fig. 27: Perfiles de presión de agua. Plano vertical en embalse a 150m del eje de la presa.

□

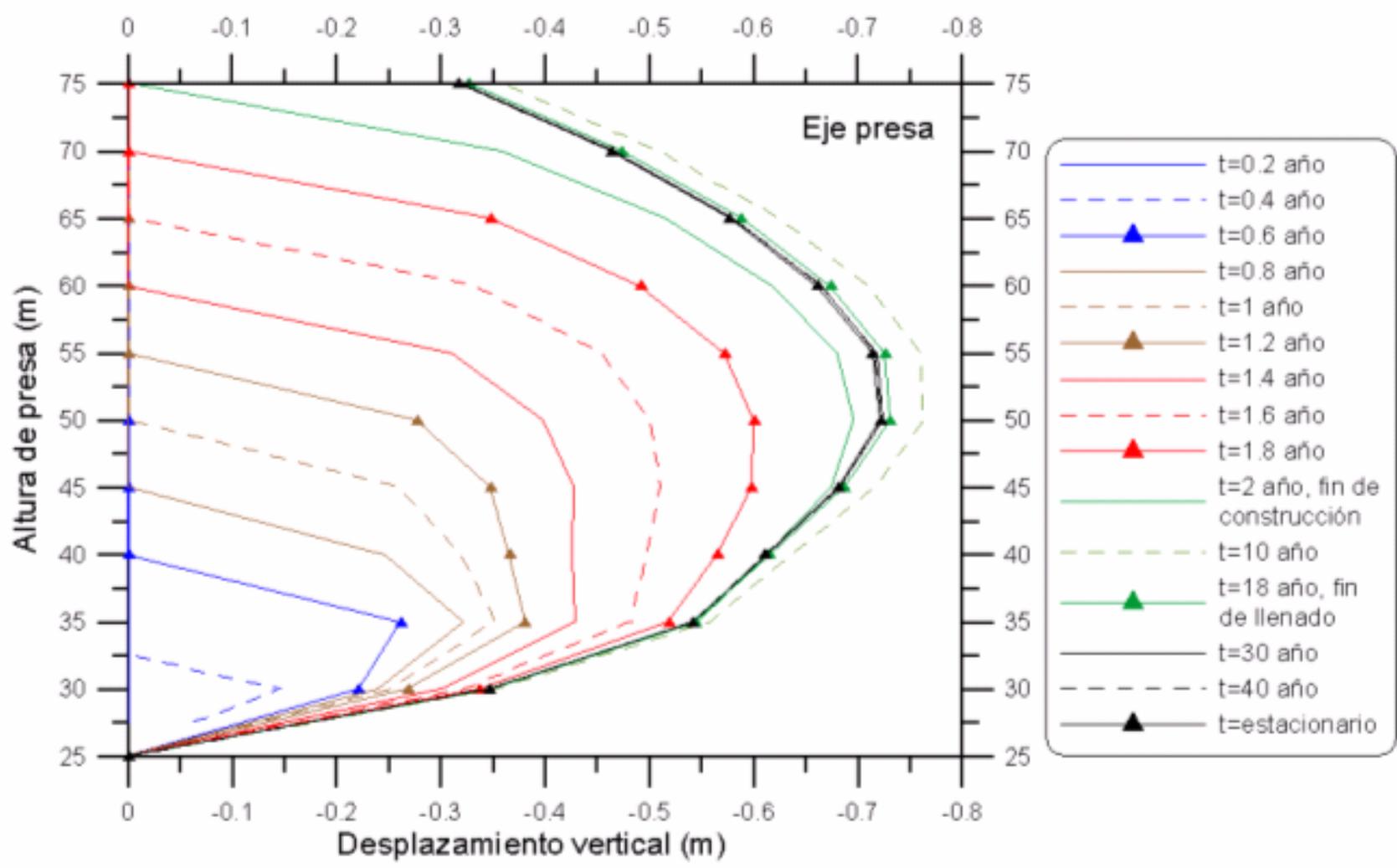


Fig. 28: Perfiles de desplazamiento vertical. Plano vertical central de la presa.

□

13

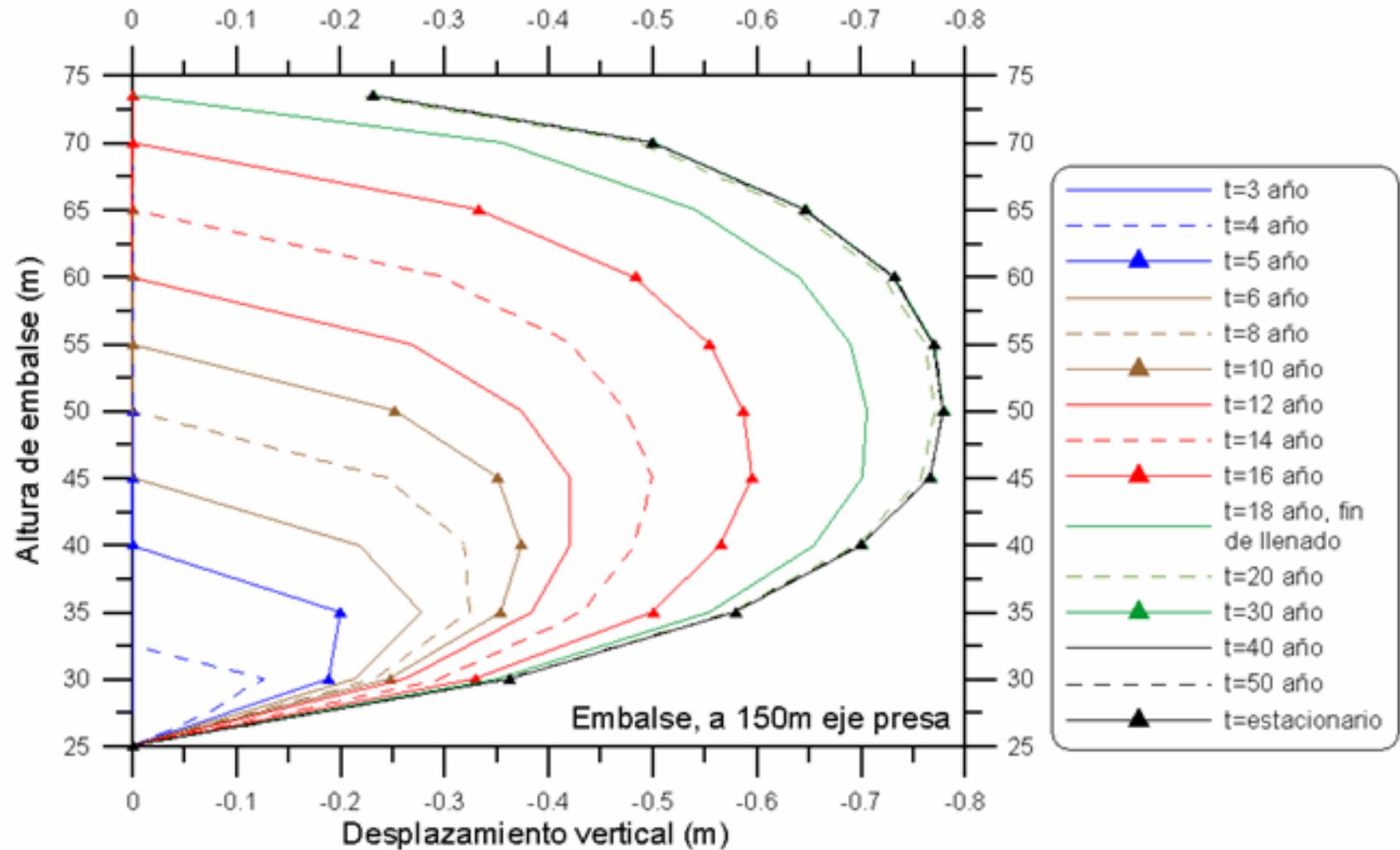


Fig. 29: Perfiles de desplazamiento vertical. Plano vertical en embalse a 150m del eje de la presa.

CONCLUSIONES

Algunas ventajas del modelo hidro-mecánico utilizado:

- **Se cree que representa mejor las condiciones reales, ya que en la presa y en el embalse de colas se consideran ambas regiones, saturada y no saturada.**
- **Se resuelve automáticamente la importante cuestión de la posición de la línea freática o de saturación, como una transición entre la zona saturada (presión de agua positiva) y la zona no saturada (presión de agua negativa).**
- **Puede observarse el incremento y disipación de las presiones de poro en la presa.**

CONCLUSIONES

- **Puede analizarse el proceso de consolidación de las colas.**
- **Da una respuesta a interrogantes sobre las condiciones de filtración y de estabilidad de diques de colas que son habituales en el diseño de ingeniería de estas obras, donde tanto la geometría, materiales y condiciones de contorno son complejas en la mayoría de los casos, y los métodos tradicionales no resultan adecuados para resolverlos.**
- **El modelo HM debe ser ajustado en el tiempo con los datos reales medidos en obra.**

Mantenimiento, Monitoreo y Vigilancia

- Selección del sitio y diseño
- Construcción, operación y recrecimiento
- Cierre y restauración
- Post-cierre (largo plazo)

**¡MUCHAS GRACIAS POR
SU ATENCIÓN!**