



Autora: Carmen M^a Baena Berrendero

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN
2. EL YESO EN LA NATURALEZA
3. PRESAS UBICADAS SOBRE CIMIENTOS YESÍFEROS
4. ANÁLISIS TEÓRICO DE LA FILTRACIÓN – DISOLUCIÓN EN CIMENTACIONES
5. MODELACIÓN NUMÉRICA DEL PROCESO ACOPLADO FILTRACIÓN-DISOLUCIÓN
6. CRITERIOS DE DISEÑO DE PRESAS SOBRE CIMIENTOS YESÍFEROS
7. CONCLUSIONES FINALES

1. INTRODUCCIÓN

Existen numerosas presas en todo el mundo construidas sobre yesos; algunas han tenido problemas por disolución del cemento y otras se han comportado bien tras años de explotación.

El proceso de disolución de un cemento yesífero es complejo y conlleva un aumento del caudal filtrado a lo largo del tiempo, como consecuencia del aumento de la porosidad.

OBJETIVO: analizar en fase de Proyecto de un presa qué parámetros influyen y cómo se puede elegir la sección tipo de presa más adecuada para controlar el proceso de disolución del cemento.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de las presas ubicadas sobre cimientos yesíferos se ha realizado desde varios puntos de vista:

- Geológico
- Histórico
- Químico y físico
- Experimental
- Ingenieril

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN
- 2. EL YESO EN LA NATURALEZA**
3. PRESAS UBICADAS SOBRE CIMIENTOS YESÍFEROS
4. ANÁLISIS TEÓRICO DE LA FILTRACIÓN – DISOLUCIÓN EN CIMENTACIONES
5. MODELACIÓN NUMÉRICA DEL PROCESO ACOPLADO FILTRACIÓN-DISOLUCIÓN
6. CRITERIOS DE DISEÑO DE PRESAS SOBRE CIMIENTOS YESÍFEROS
7. CONCLUSIONES FINALES

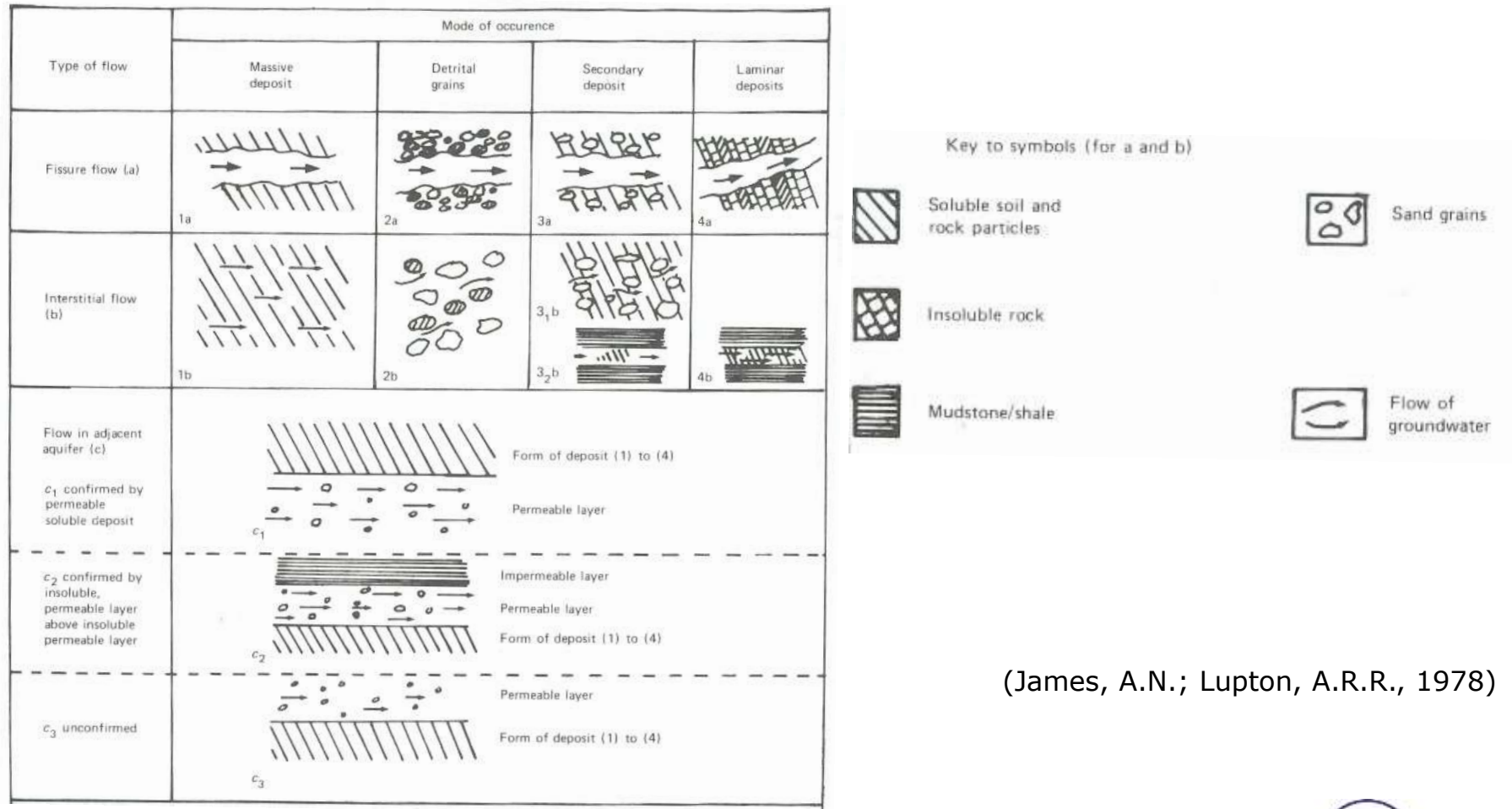
2. EL YESO EN LA NATURALEZA

CARACTERIZACIÓN DE LA PRESENCIA DE YESOS EN LA NATURALEZA

- ✓ Yesos masivos
- ✓ Yesos interestratificados: entre margas, arcillas, areniscas,...
- ✓ Partículas de yeso: limos yesíferos

2. EL YESO EN LA NATURALEZA

CARACTERIZACIÓN DE LA PRESENCIA DE YESOS EN LA NATURALEZA

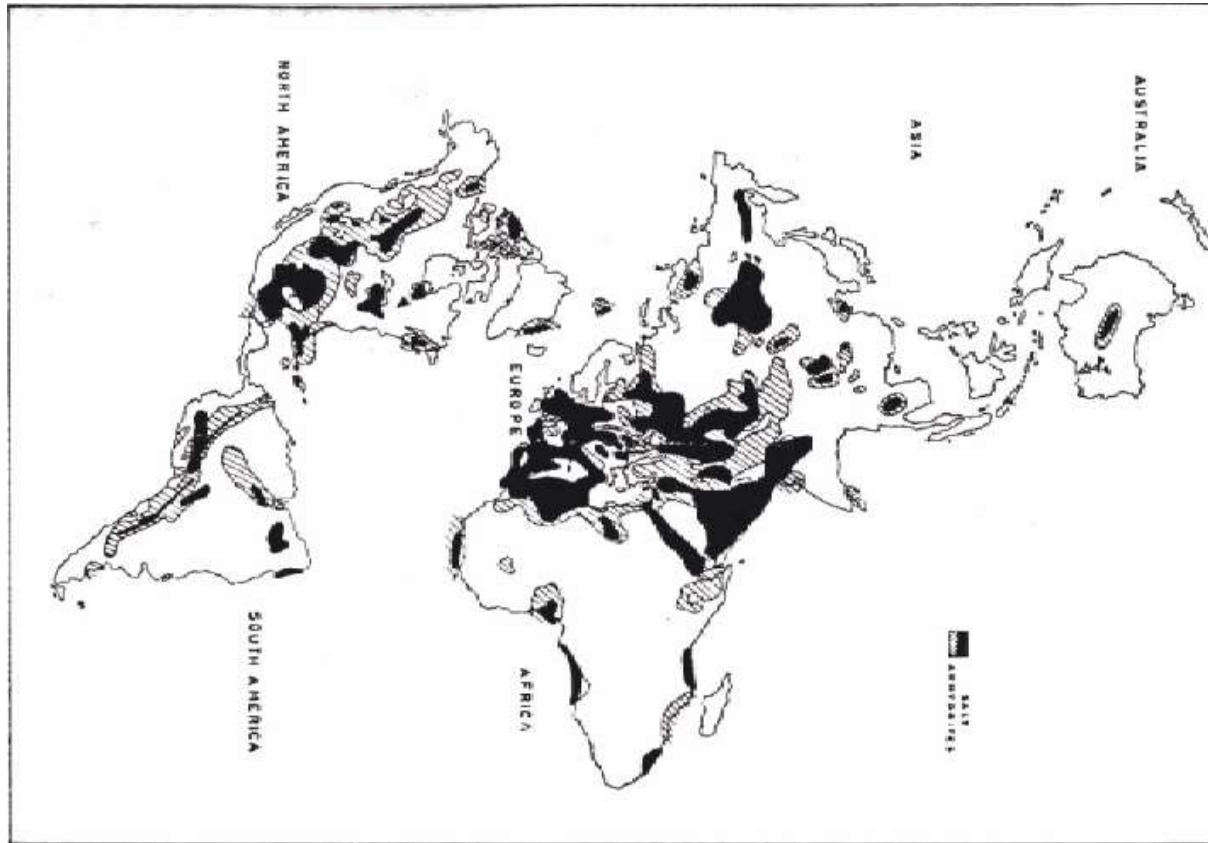


(James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978)

ÍNDICE

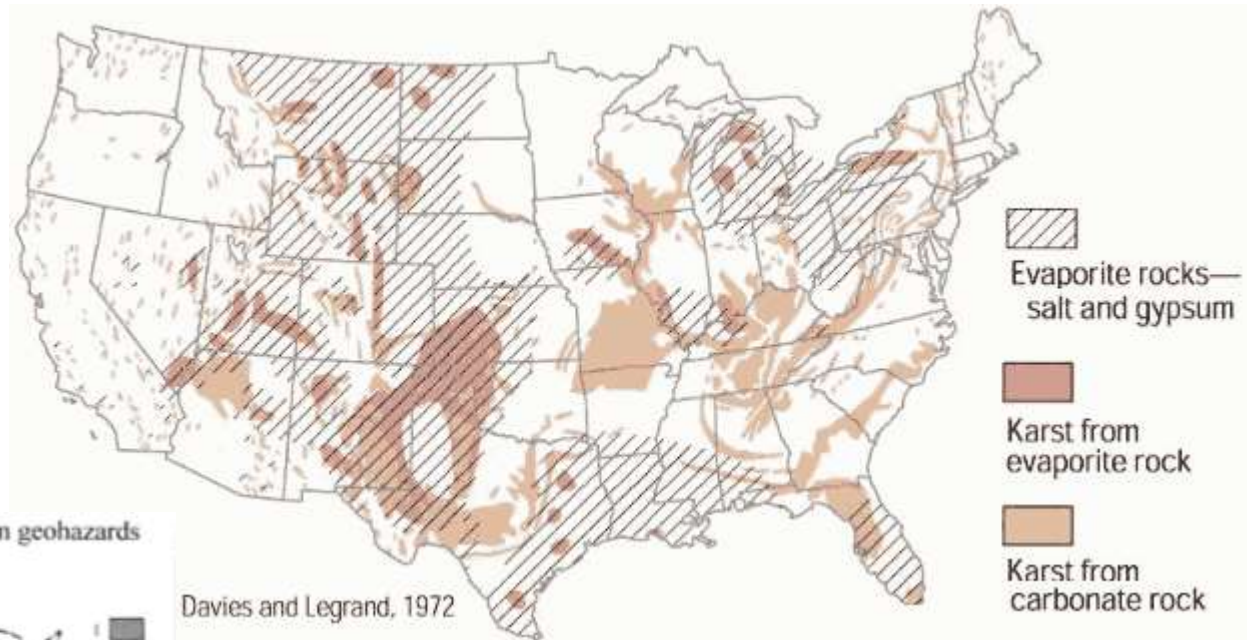
1. INTRODUCCIÓN
2. EL YESO EN LA NATURALEZA
- 3. PRESAS UBICADAS SOBRE CIMIENTOS YESÍFEROS**
4. ANÁLISIS TEÓRICO DE LA FILTRACIÓN – DISOLUCIÓN EN CIMENTACIONES
5. MODELACIÓN NUMÉRICA DEL PROCESO ACOPLADO FILTRACIÓN-DISOLUCIÓN
6. CRITERIOS DE DISEÑO DE PRESAS SOBRE CIMIENTOS YESÍFEROS
7. CONCLUSIONES FINALES

3. PRESAS UBICADAS SOBRE CIMIENTOS YESÍFEROS

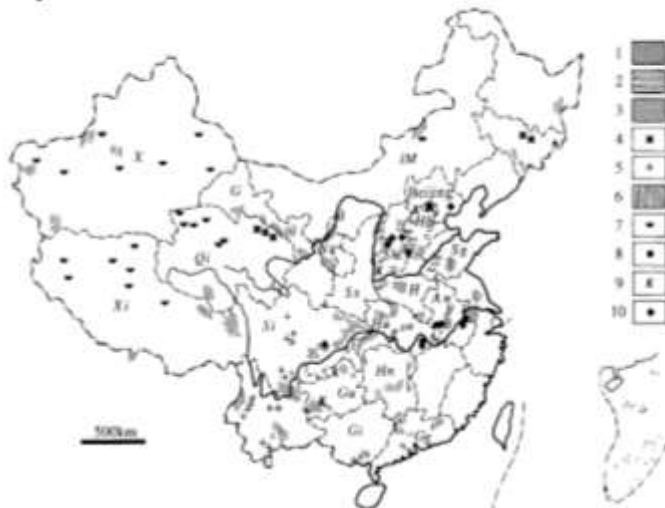


Mapa mundial con la ubicación de evaporitas (Kozary, M.T.; Dunlap, J.C.; Humphrey, W.E., 1968).

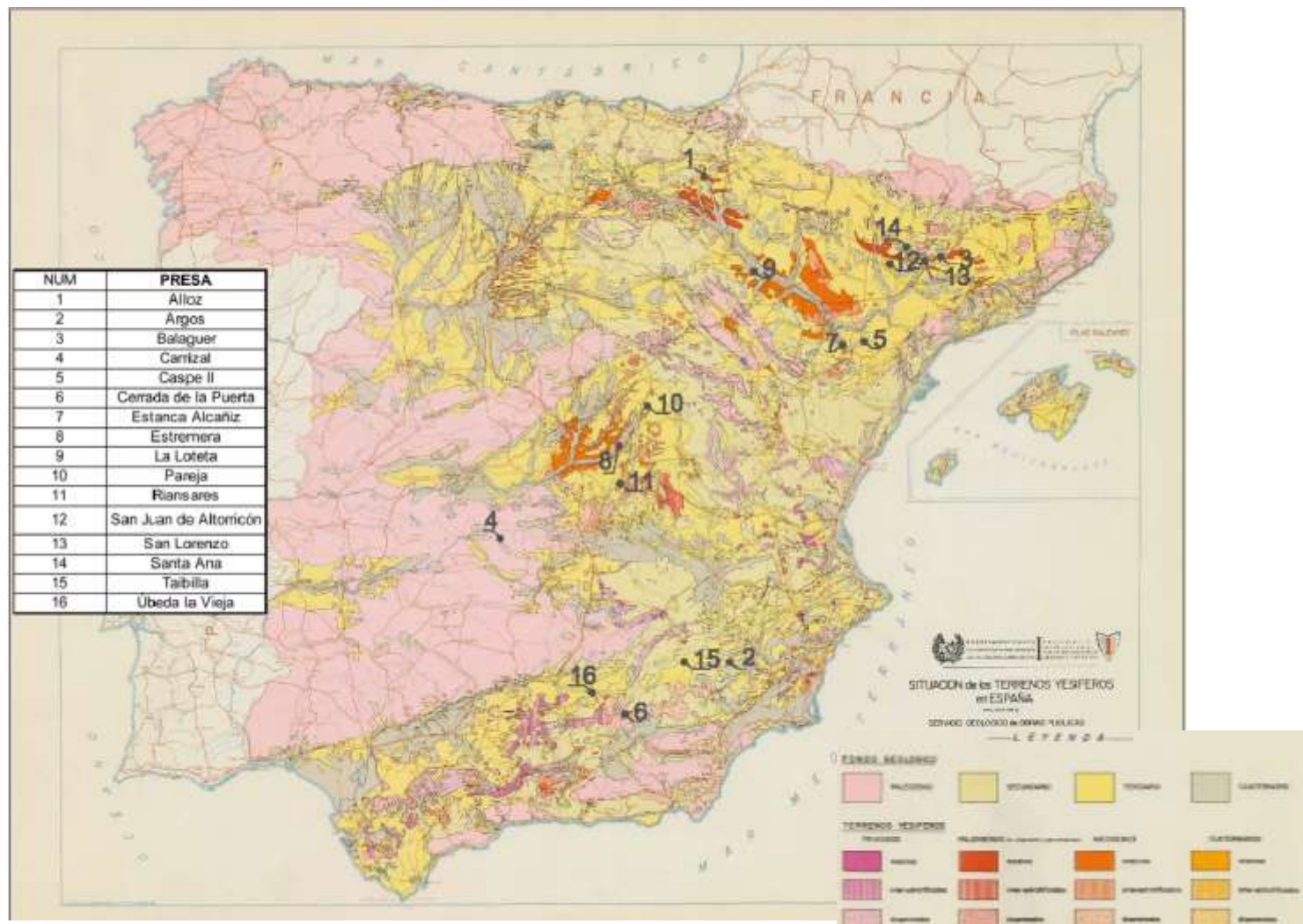
3. PRESAS UBICADAS SOBRE CIMIENTOS YESÍFEROS



Box 3. Areas of gypsum in China where gypsum geohazards may occur.

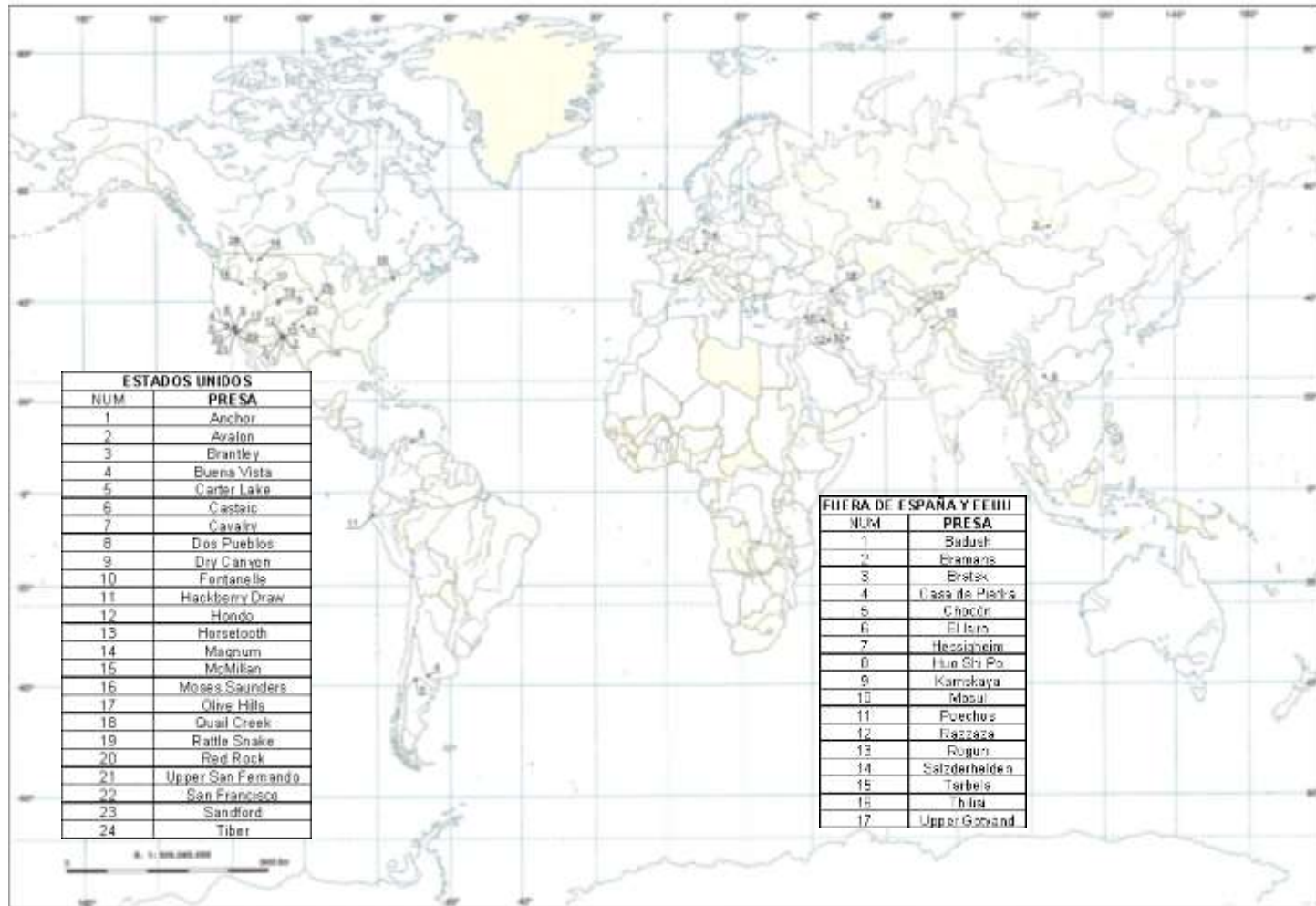


3. PRESAS UBICADAS SOBRE CIMIENTOS YESÍFEROS



Macau, F.; Riba, O., 1962

3. PRESAS UBICADAS SOBRE CIMIENTOS YESÍFEROS

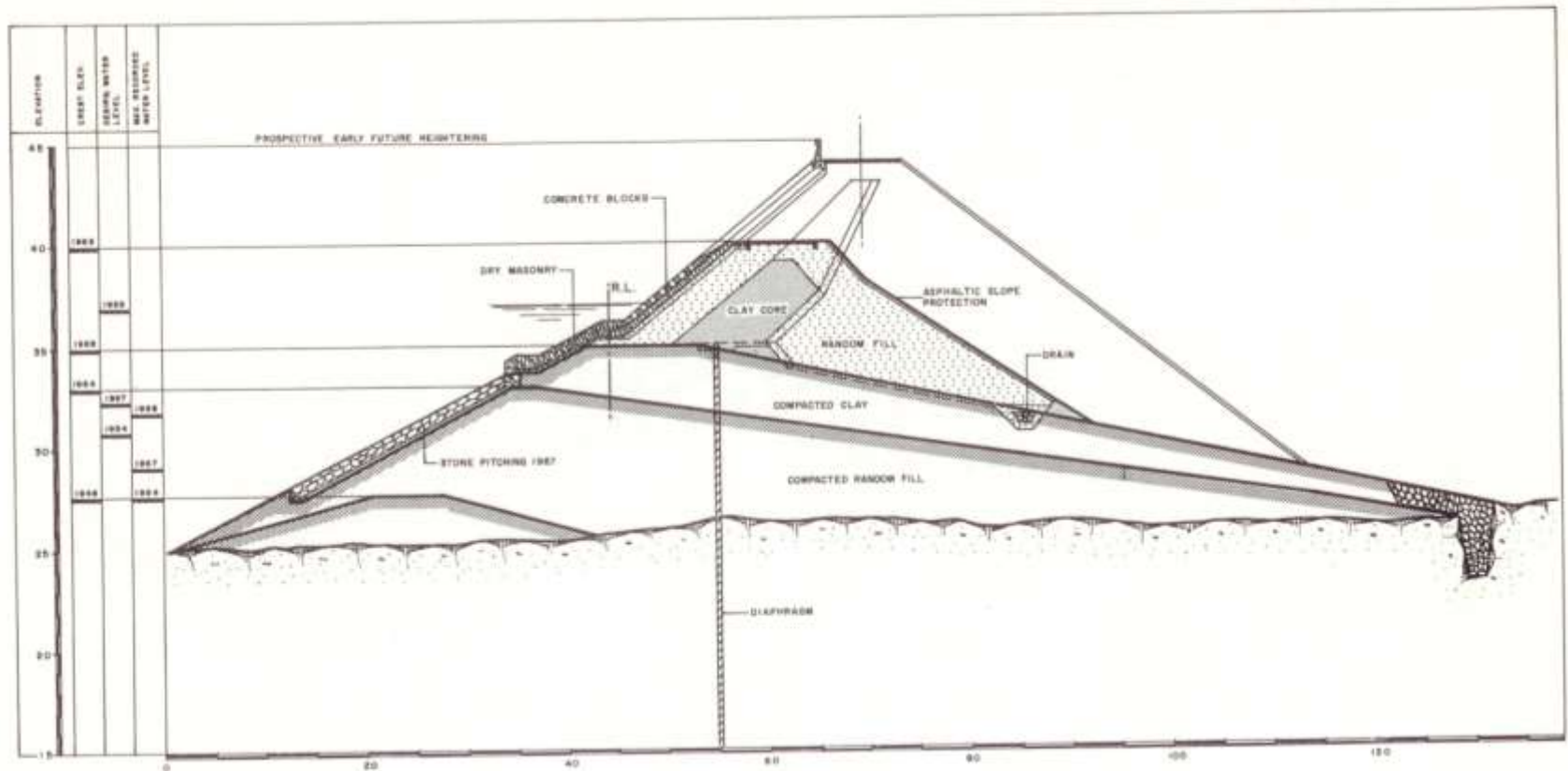


3. PRESAS UBICADAS SOBRE CIMIENTOS YESÍFEROS

NOMBRE-DE-LA-PRESA	RÍO-/PROVINCIA-/ESTADO-/PAÍS	ALTURA-S.C.-(m)/-AÑO-CONSTR./-TIPOLOGÍA	REFERENCIAS	GEOLOGÍA	TIPO-DE-FLUJO-/CAUDAL	OTROS-DATOS
Pareja	Cola-del-embalse-de-Entrepeñas-/Guadalajara-/España	15-/2005-/Materiales-sueltos	Torcal, R., 2003	La cimentación son margas, margas con yeso, areniscas y conglomerados (mioceno) y gravas, gravilla, limos y arcilla gris-oscuro (cuaternario de hasta 16 m de espesor). Mioceno. Máxima permeabilidad de 8·UL (la mayoría 0-UL)	□ □	
Poechos	Chira-/Sullana (es parte del proyecto Chira-Piura)/Perú	48 (longitud 9000 m)/-1976-/Materiales sueltos	James, A.N.; Kirkpatrick, I.M., 1980/-James, A.N., 1992/-Paine, M.; Escobar, E.; Hallows, G.R.; Sodha, V.G.; Anagnosti, P., 1982; Hansen, M., 2002/-James, A.N., 1992/-Catanach, R.B.; Hall, R.B.; James, O'Neill; Von Thun, 1991/-Soriano Peña, A., 1993/-Johnson, K.S., 2008	Lutas arcillosas con yeso (fragmentos de 5-20 mm de espesor y del orden de 5-10%), sobre areniscas. Kh=5.10 ⁻⁷ m/s y gradiente de 0,3/-10%	INTERGRANULAR	Se estimó una velocidad de avance del frente de disolución de 0,05-0,1 m/año (muy pequeña). Concentración de sulfato cálcico de 6,1 g/l, debido a presencia de otros iones
Quail-Creek	Arroyo-Quail-/Oregon-/EEUU	24-/1984-/Dique de materiales sueltos	Flores-Calcaño, C.E.; Rodríguez-Alzuru, P., 1967/-James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978	Estaba cimentada en formaciones sedimentarias del Triásico, con dolomías y yesos. Según Soriano, el yeso jugó un papel menor	1 m ³ /s en el pie de aguas abajo. En 12 horas, se multiplicó por 2	El dique Sur falló catastróficamente en 1989, a los 4 años de acabar la construcción. Se construyó una nueva presa en 1990
Rattle-Snake	Arroyo-Rattle-Snake-/California-/EEUU	24-/1952-/Materiales sueltos		Cimentada en lutitas en los estribos y en un suelo gravoso permeable en el centro del valle	INTERGRANULAR/800 l/min	No presenta problemas relacionados con el yeso. En embalse 298 ppm de carbonatos, frente a 326 de las aguas filtradas
Razzaza (lago Abu-Dibbis)	lago comunicado por canal con río Eúfrates-/Kerbalá-/Irak	17-/1948-/Materiales sueltos	Torán, A., 1970/-Cuesta, P.L.; Fernández, R., 1970/-Jiménez-Salas, J.A. et al., 1980	Areniscas cementadas con yeso. Coeficiente de permeabilidad 10 ⁻³ -10 ⁻⁴ m/s	□	José Torán participó en el recrecimiento del dique en 1968, subiendo a 5 m el previsto inicialmente de 2 m. Se construyó con arcilla con yeso en un porcentaje superior al 6%, dominando el diseminado en cristales milimétricos. Se construyó una pantalla de bentonita cemento de 0,50 m de espesor

3. PRESAS UBICADAS SOBRE CIMIENTOS YESÍFEROS

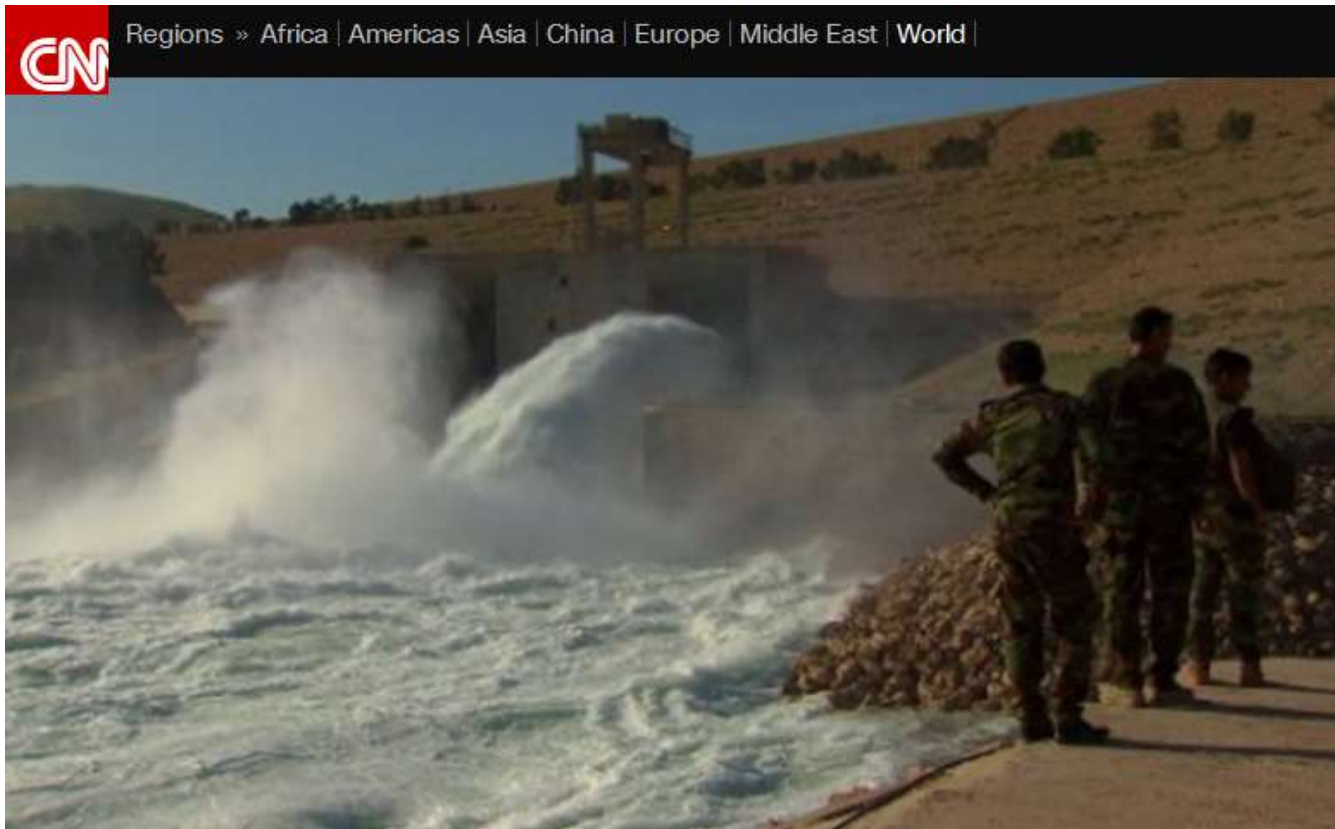
PRESA DE RAZZAZA (Irak)



Torán, J., 1970: Spanish way: *“to stand and fight the bullying river”*

3. PRESAS UBICADAS SOBRE CIMIENTOS YESÍFEROS

PRESA DE MOSUL (Irak)



ISIS and the dam that could destroy a city

8-4-2016

CNN's Arwa Damon goes beneath the Mosul dam in Iraq, where workers are trying to stabilize the foundations.

Source: CNN

3. PRESAS UBICADAS SOBRE CIMIENTOS YESÍFEROS

PRESA DE MOSUL (Guzina, B.J.; Saric, M.; Petrovic, N., 1991)

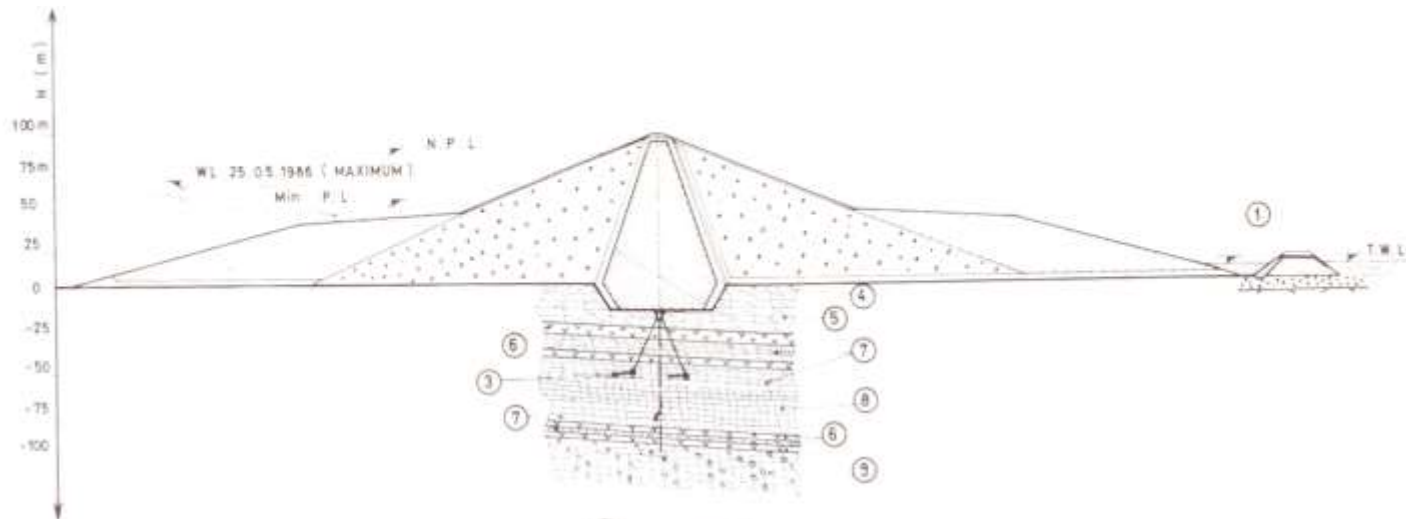


Fig. 2

Typical dam section

Coupe transversale type du barrage

1. Cofferdam No. 6
2. Deep Grout Curtain
3. Point Piezometer
4. River Alluvium
5. Marly Breccia
6. Gypsum/Gypsum Breccia/Anhydrite
7. Marl/Marly Limestone
8. Chalky Serie (Vuggy Limestone)
9. Limestone (Hard and Dense)

1. Butardeau n° 6
2. Voile d'injection profond
3. Piezomètre
4. Alluvions fluviales
5. Brèche marneuse
6. Gypse/brèche gypseuse/anhydrite
7. Marne/Calcaire marneux
8. Série crétacée (calcaire poreux)
9. Calcaire (dur et massif)

3. PRESAS UBICADAS SOBRE CIMIENTOS YESÍFEROS

PRESA DE BADUSH (paralizada en 2003 su construcción)



3. PRESAS UBICADAS SOBRE CIMIENTOS YESÍFEROS

PRESA DE CASPE

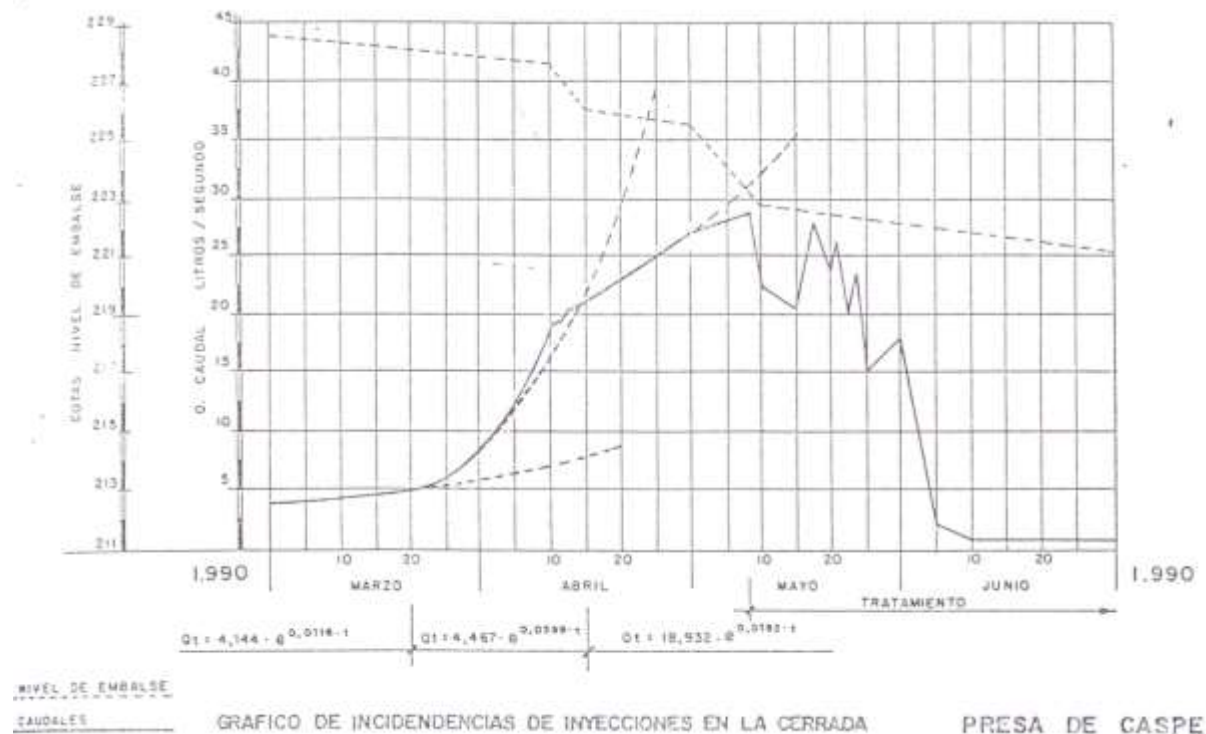


Gráfico de caudales filtrados en el tiempo en la presa de Caspe (Araoz Sánchez-Albornoz, A., 1992).

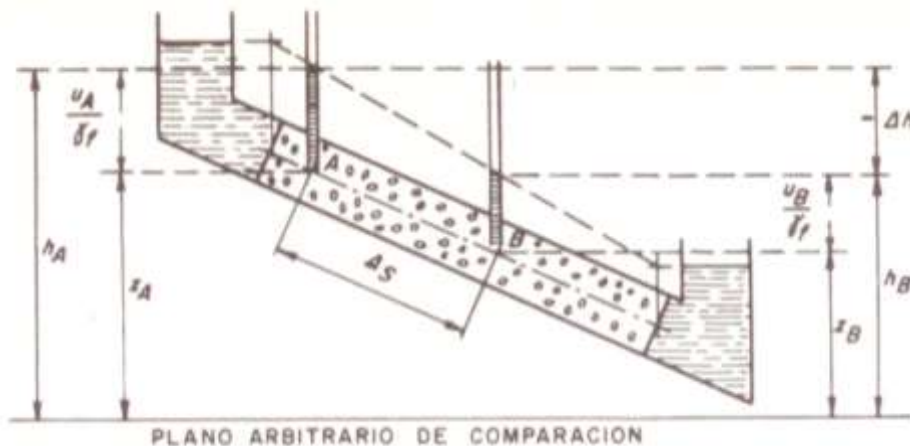
ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN
2. EL YESO EN LA NATURALEZA
3. PRESAS UBICADAS SOBRE CIMIENTOS YESÍFEROS
- 4. ANÁLISIS TEÓRICO DE LA FILTRACIÓN –
DISOLUCIÓN EN CIMENTACIONES**
5. MODELACIÓN NUMÉRICA DEL PROCESO ACOPLADO
FILTRACIÓN-DISOLUCIÓN
6. CRITERIOS DE DISEÑO DE PRESAS SOBRE CIMIENTOS
YESÍFEROS
7. CONCLUSIONES FINALES

4. ANÁLISIS TEÓRICO DE LA FILTRACIÓN – DISOLUCIÓN EN CIMENTACIONES

4.1.FLUJO EN MEDIOS POROSOS

El movimiento del agua dentro del terreno (considerado éste como un medio continuo, homogéneo e isótropo) en régimen laminar, se rige por la ley de Darcy:



$$v = ki$$

Esquema de la ley de Darcy (Jiménez Salas, J.A.; De Justo Alpañes, J.L.; Serrano González, A., 1976)

4. ANÁLISIS TEÓRICO DE LA FILTRACIÓN – DISOLUCIÓN EN CIMENTACIONES

4.2. PERMEABILIDAD Y POROSIDAD

Relación permeabilidad-porosidad (KOZENY, J.; CARMAN, P.C., 1956)

$$K_0 = \frac{1}{5} \left(\frac{V_g}{S} \right)^2 \frac{n^3}{(1-n)^2}$$

$$K_0 = \frac{1}{5} \left(\frac{V_g}{S} \right)^2 \frac{e^3}{(1+e)}$$

Donde: 1/5 valor usual, aunque depende de un factor de forma y de un factor de tortuosidad del medio

n: porosidad

e: índice de poros

V_g/S : diámetro equivalente de los granos

(relación entre el volumen y la superficie)

4. ANÁLISIS TEÓRICO DE LA FILTRACIÓN – DISOLUCIÓN EN CIMENTACIONES

4.3. DISOLUCIÓN DEL YESO

Disolución de un sólido en un líquido (NERNST, H.W., 1904)

$$\frac{dM}{dt} = K_d A (C_s - C)^\theta$$

Donde: K_d : constante de disolución

A : área expuesta a la disolución

C : concentración

C_s : concentración de saturación

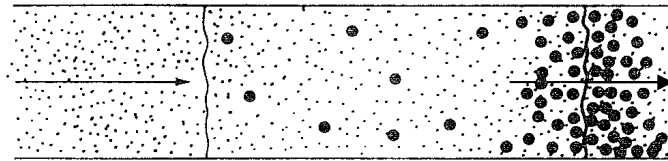
θ : exponente que depende del material

4. ANÁLISIS TEÓRICO DE LA FILTRACIÓN – DISOLUCIÓN EN CIMENTACIONES

4.4. MODELOS DE DISOLUCIÓN DEL CIMIENTO

Modelo de disolución de partículas (JAMES, A.N., 1992)

(JAMES, A.N., 1992) Permeable layer of soluble soil



Fresh water flow
(velocity v)

Zone stripped of
soluble particles

"Solution front"
(velocity u)

Zone unaffected
by dissolution

$$u = v \times \frac{C_s}{C_s + \sigma_0}$$

Insoluble soil particles

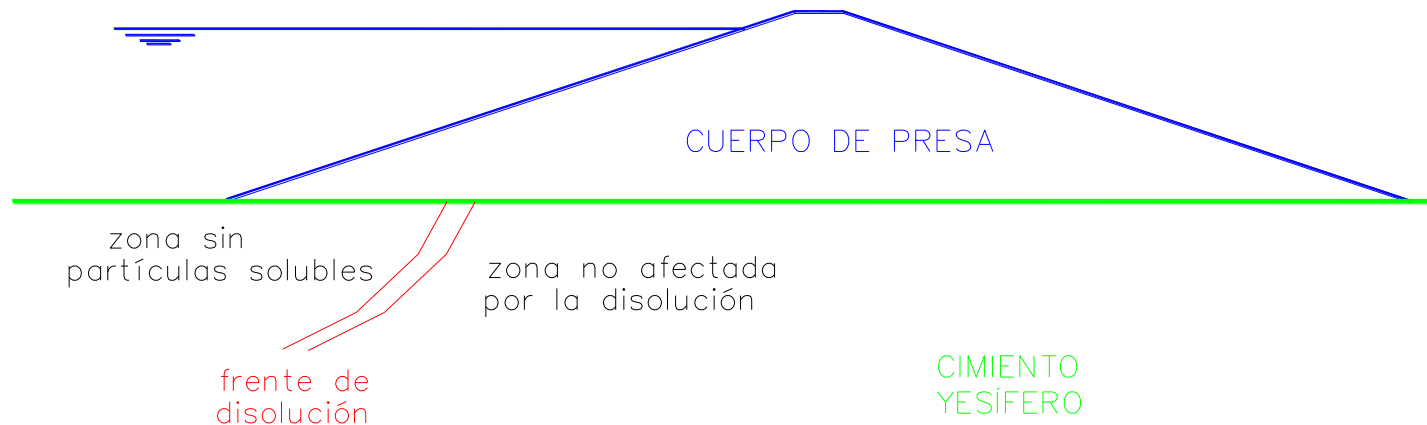
Soluble soil particles

Donde: u : velocidad del frente de disolución
 v : velocidad de filtración
 C_s : concentración de saturación
 σ_0 : masa de partículas solubles por
unidad de volumen de suelo

4. ANÁLISIS TEÓRICO DE LA FILTRACIÓN – DISOLUCIÓN EN CIMENTACIONES

4.4. MODELOS DE DISOLUCIÓN DEL CIMIENTO

Modelo de disolución de partículas (JAMES, A.N., 1992)



$$t_{ucte} = \frac{L}{u} = \frac{L}{\frac{u}{v} \cdot \frac{Q_0}{S}} = \frac{\sigma_0}{C_s} \cdot \frac{L^2}{K_0 \cdot H} \% = 958,33 \cdot \frac{L^2}{K_0 \cdot H} \%$$

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN
2. EL YESO EN LA NATURALEZA
3. PRESAS UBICADAS SOBRE CIMIENTOS YESÍFEROS
4. ANÁLISIS TEÓRICO DE LA FILTRACIÓN – DISOLUCIÓN EN CIMENTACIONES
- 5. MODELACIÓN NUMÉRICA DEL PROCESO ACOPLADO FILTRACIÓN-DISOLUCIÓN**
6. CRITERIOS DE DISEÑO DE PRESAS SOBRE CIMIENTOS YESÍFEROS
7. CONCLUSIONES FINALES

5. MODELACIÓN NUMÉRICA DEL PROCESO ACOPLADO FILTRACIÓN-DISOLUCIÓN

5.1. MODELACIÓN NUMÉRICA Y PROGRAMA DISOLUCIÓN2D

5.2. VALIDACIÓN DE LA MODELACIÓN MEDIANTE ENSAYOS

5.1. Modelación numérica y programa DISOLUCIÓN2D

* Avance del frente de disolución en el modelo de partículas

$$u = v \times \frac{C_s}{C_s + \sigma_0} \quad \frac{u}{v} = \frac{C_s}{C_s + \sigma\phi}$$

* Relación permeabilidad-porosidad

$$K_0 = \frac{1}{5} \left(\frac{V_g}{S} \right)^2 \frac{n^3}{(1-n)^2}$$

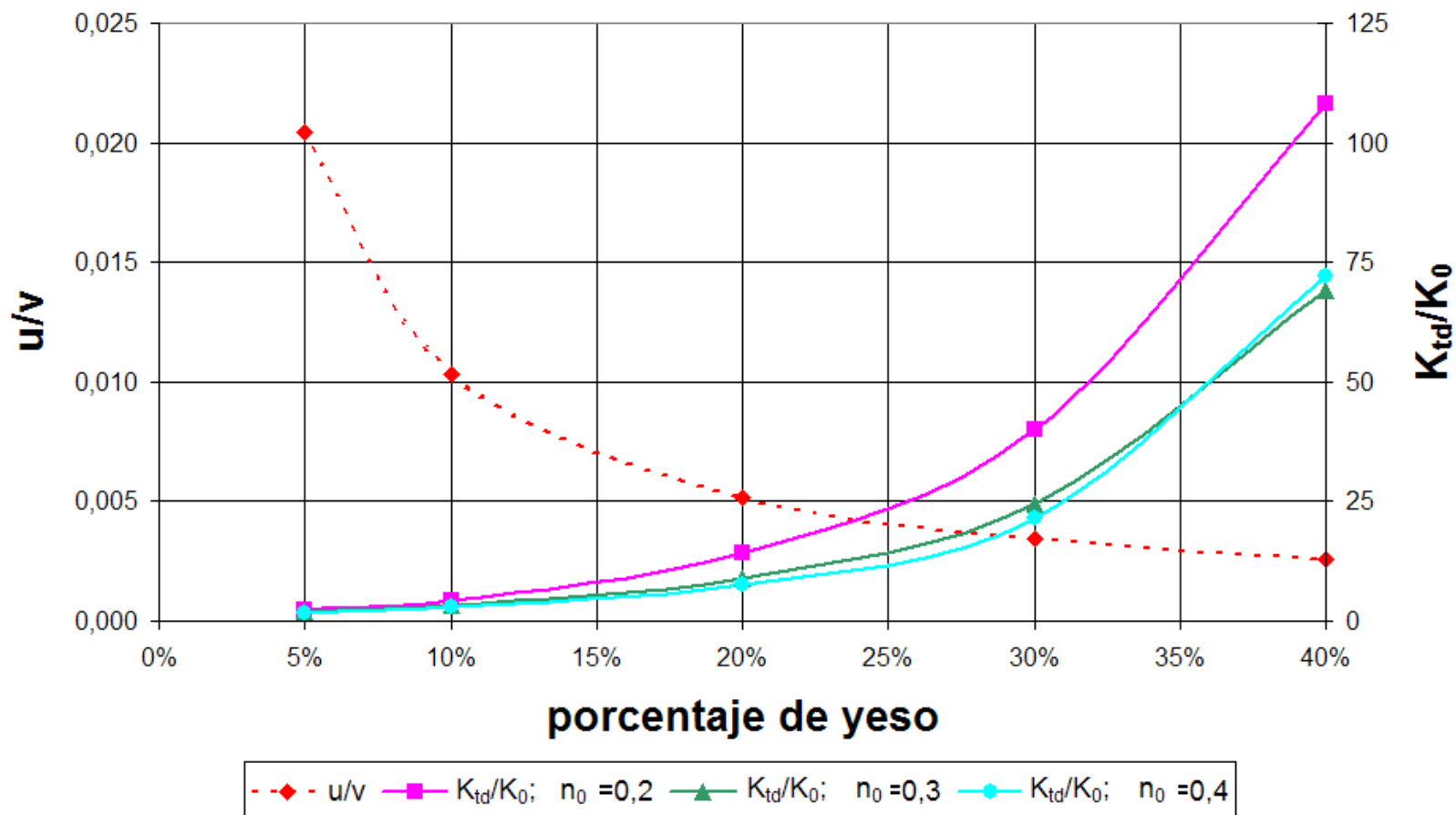
Si $n_{td} = n_0 + \phi$ y el resto de parámetros no cambian significativamente:

$$K_{td} = K_0 \times \frac{(1-n_0)^2}{n_0^3} \times \frac{n_{td}^3}{(1-n_{td})^2}$$

$$\frac{K_{td}}{K_0} = \frac{(1-n_0)^2}{n_0^3} \times \frac{(n_0 + \phi)^3}{(1-n_0 - \phi)^2}$$

5.1. Modelación numérica y programa DISOLUCIÓN2D

RELACIÓN DE u/v Y K_{TD}/K_0 EN FUNCIÓN DEL % DE YESO



5.1. Modelación numérica y programa DISOLUCIÓN2D

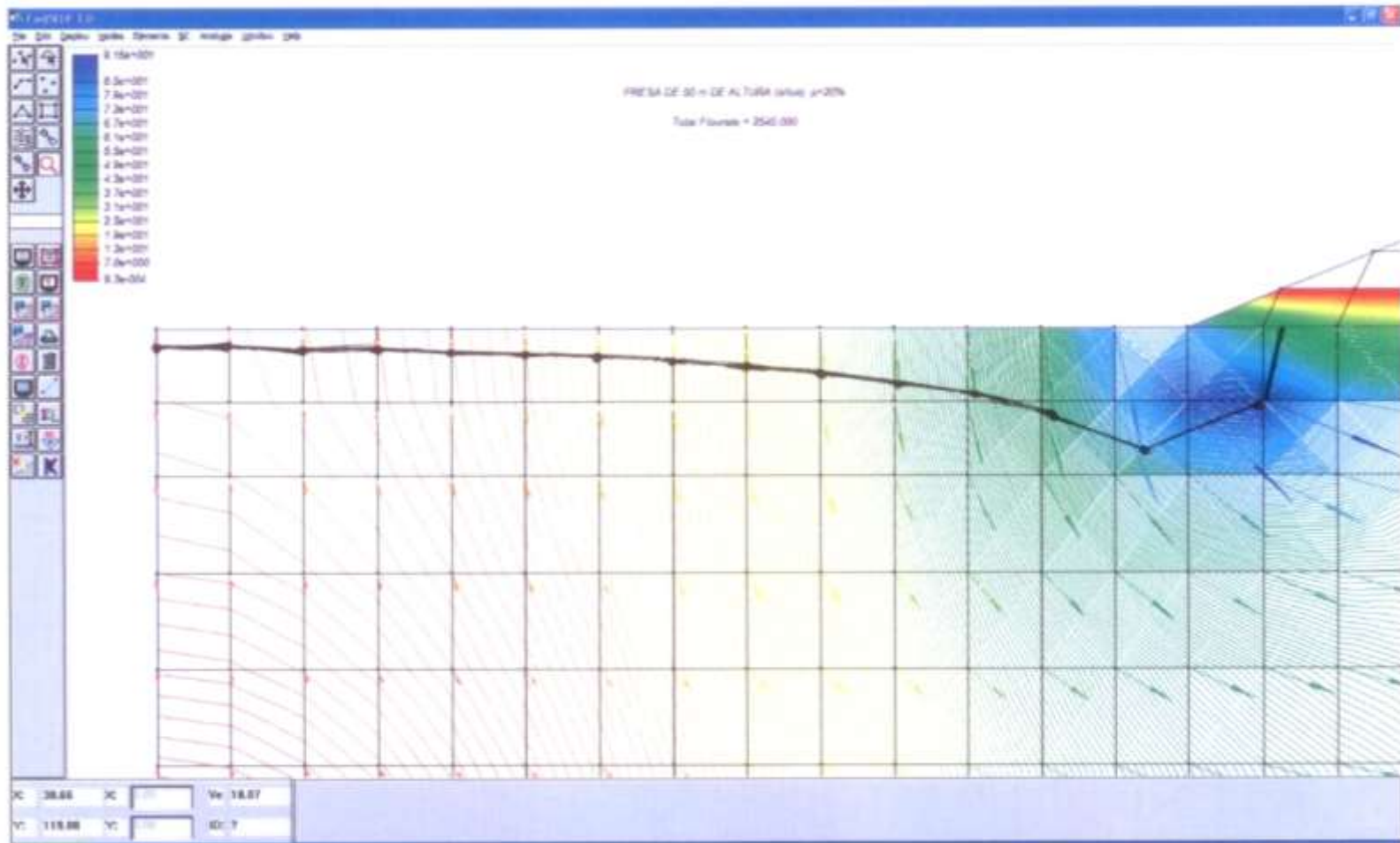
Programa DISOLUCIÓN2D (Visual Basic)

- Realiza el cálculo del avance del frente de disolución mediante iteraciones, llamando al programa comercial FastSEEP para obtener el campo de velocidades (modelo de elementos finitos de presa y cimentación).
- Se acepta que la longitud del frente de disolución es despreciable para el caso del cemento yesífero, por lo que se simplifica el proceso.

5.1. Modelación numérica y programa DISOLUCIÓN2D

[illegible]

5.1. Modelación numérica y programa DISOLUCIÓN2D



5.1. Modelación numérica y programa DISOLUCIÓN2D

Programa DISOLUCIÓN2D

- Régimen laminar
- Flujo intergranular → Modelo de disolución de partículas
- No se tiene en cuenta el efecto mecánico de la disolución → Porcentaje de yeso moderado
- Terrenos donde el flujo del agua se realiza a través del material, no por las fisuras: lutitas yesíferas, areniscas, conglomerados cementados con yeso, margas con vetas de poco espesor, arena yesífera,...

5. MODELACIÓN NUMÉRICA DEL PROCESO ACOPLADO FILTRACIÓN-DISOLUCIÓN

5.1. MODELACIÓN NUMÉRICA DEL PROCESO DE DISOLUCIÓN
DEL CIMIENTO YESÍFERO

**5.2. VALIDACIÓN DE LA MODELACIÓN MEDIANTE
ENSAYOS**

5.2. Validación de la modelación mediante ensayos



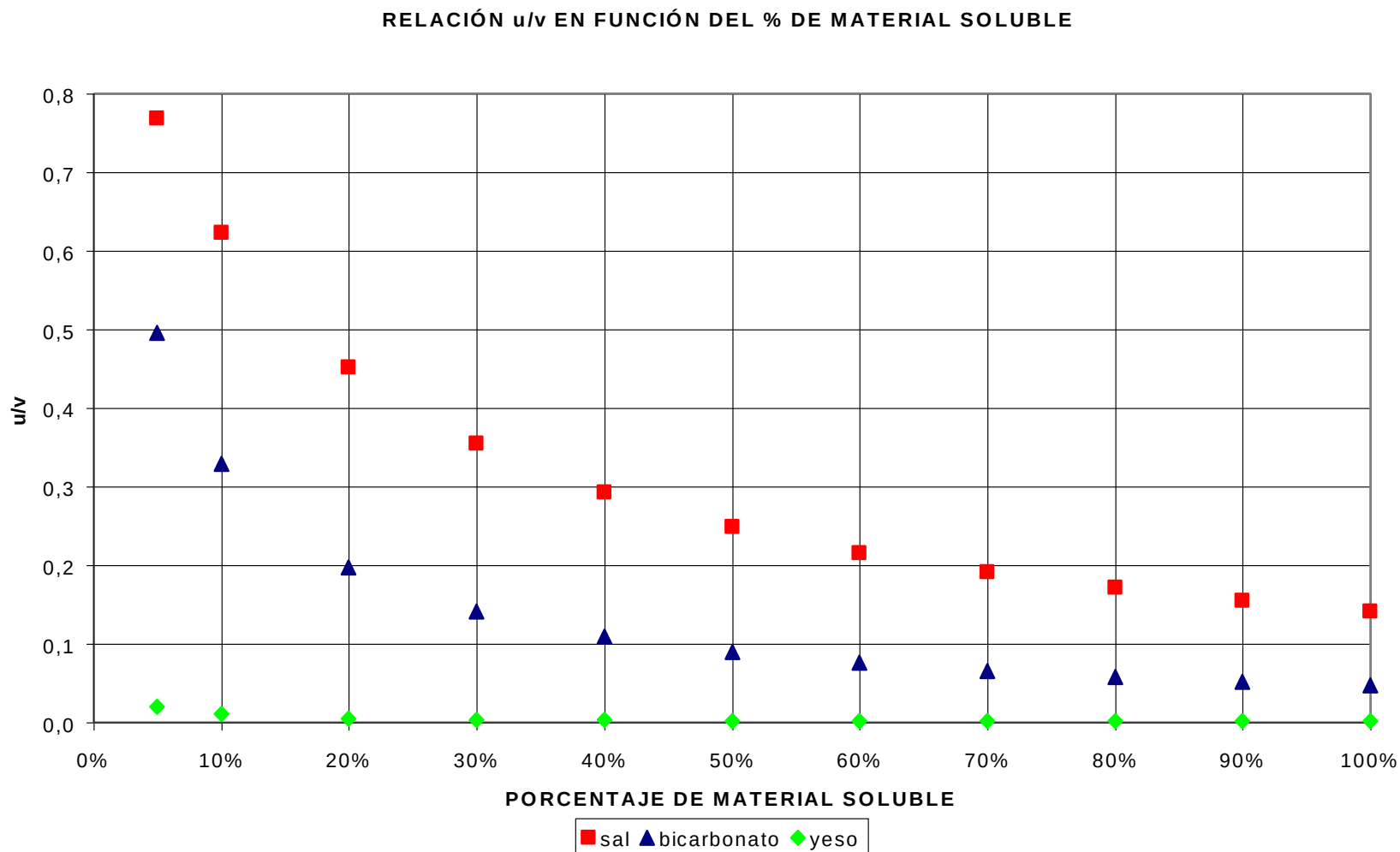
Permeámetro de carga
constante del Laboratorio de
Geotecnia del CEDEX

5.2. Validación de la modelación mediante ensayos



Materiales utilizados en los ensayos

5.2. Validación de la modelación mediante ensayos



5.2. Validación de la modelación mediante ensayos

Nº	FECHA	MATERIAL	h ₀ (cm)	L _T (cm)	M _{ms} (g)	i ₀	Q ₀ (cm ³ /s)	v ₀ (m/s)	u ₀ (m/s)	Φ	K ₀₁ (cm/s)	K ₂ (cm/s)	K ₀ equiv (cm/s)	K _{td1} (cm/s)	Q _{td} /Q ₀ (ensayo)	FA
1	27-oct	BICARBONATO	12	22,5	220	0,53	0,42	0,009	0,00295	9,3%	0,01598			0,0416	3,88	1,36
3	03-nov	BICARBONATO	8	22,5	220	0,36	0,38	0,008	0,00266	9,3%	0,02157			0,0561	5,22	1,36
6	18-nov	BICARBONATO	10	22	220	0,45	0,43	0,009	0,00303	9,5%	0,01950			0,0524	4,52	1,37
9	01-dic	BICARBONATO	8	21,5	220	0,37	0,23	0,005	0,00160	9,7%	0,01282			0,0357	3,75	1,37
4	11-nov	BICARBONATO	10	21,5	145	0,47	0,50	0,010	0,00279	13,1%	0,0263	0,019	0,02198	0,1028	2,25	1,09
8	25-nov	BICARBONATO	6	23,5	145	0,26	0,18	0,004	0,00106	12,5%	0,0143	0,015	0,01468	0,0513	2,32	1,28
10	10-dic	BICARBONATO	8	23,5	145	0,34	0,23	0,005	0,00135	12,5%	0,0130	0,015	0,01402	0,0467	2,50	1,18
12	15-ene	BICARBONATO	10	22,5	150	0,44	0,23	0,005	0,00125	13,5%	0,0090	0,0125	0,01058	0,0368	2,79	1,16
2	28-oct	BICARBONATO	8	23,5	200	0,34	0,43	0,009	0,00193	17,2%	0,0195	0,035	0,02553	0,1125	5,59	1,25
5	12-nov	BICARBONATO	9	22	200	0,41	0,33	0,007	0,00146	18,0%	0,0122	0,025	0,01666	0,0788	3,00	1,31
7	24-nov	BICARBONATO	6	22	200	0,27	0,24	0,005	0,00105	18,0%	0,0138	0,025	0,01800	0,0889	3,82	1,31
13	18-ene	BICARBONATO	10	23	250	0,43	0,17	0,003	0,00063	21,5%	0,0045	0,025	0,00784	0,0405	5,20	1,46
14	01-feb	BICARBONATO	10	22,5	250	0,44	0,12	0,002	0,00043	22,5%	0,0029	0,02	0,00537	0,0306	6,57	1,59
11	14-dic	BICARBONATO	8	23,5	400	0,34	0,18	0,004	0,00052	29,1%	0,0073	0,0225	0,01051	0,1494	5,33	1,57
1Y	28-dic	YESO	82	23	88	3,57	0,40	0,008	0,00012	6,8%	0,0012	0,036	0,00229	0,0025	2,42	1,21

$$FA = \frac{t_{ucte}}{t_{ab}}$$

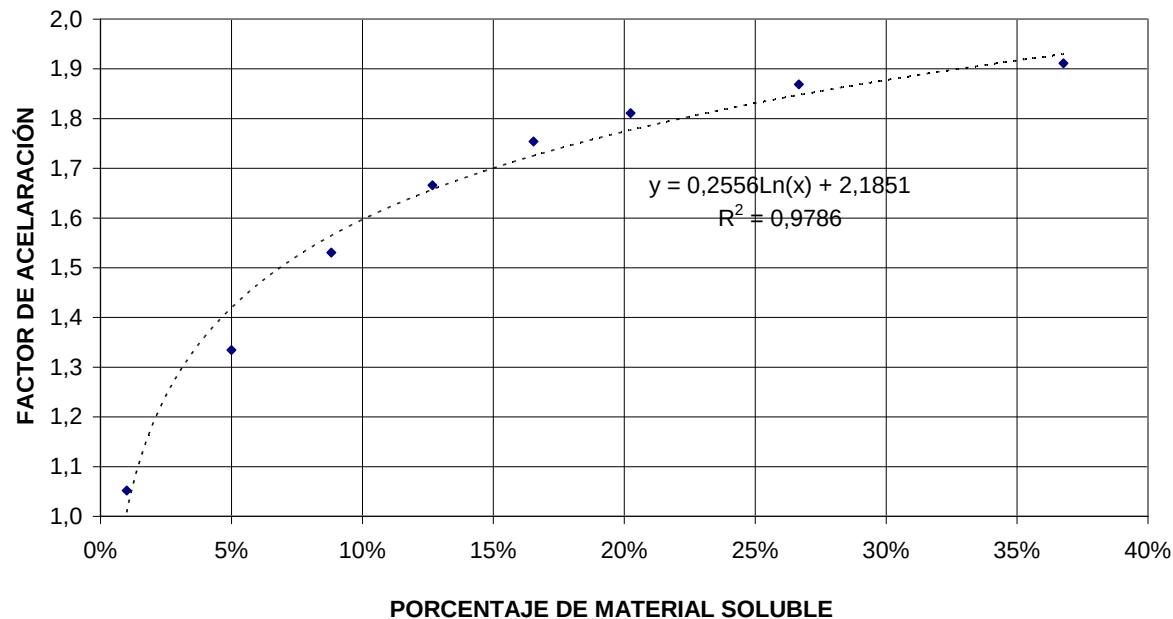
5.2. Validación de la modelación mediante ensayos

$$FA = \frac{t_{ucte}}{t_{ab}}$$



$$FA = \frac{K_{td} / K_0}{0,5 \cdot (1 + K_{td} / K_0)}$$

FACTOR DE ACELERACIÓN PARA UN CILINDRO DE SUELO CON $n_0=0,2$



VIII CONVOCATORIA PREMIO JOSÉ TORÁN

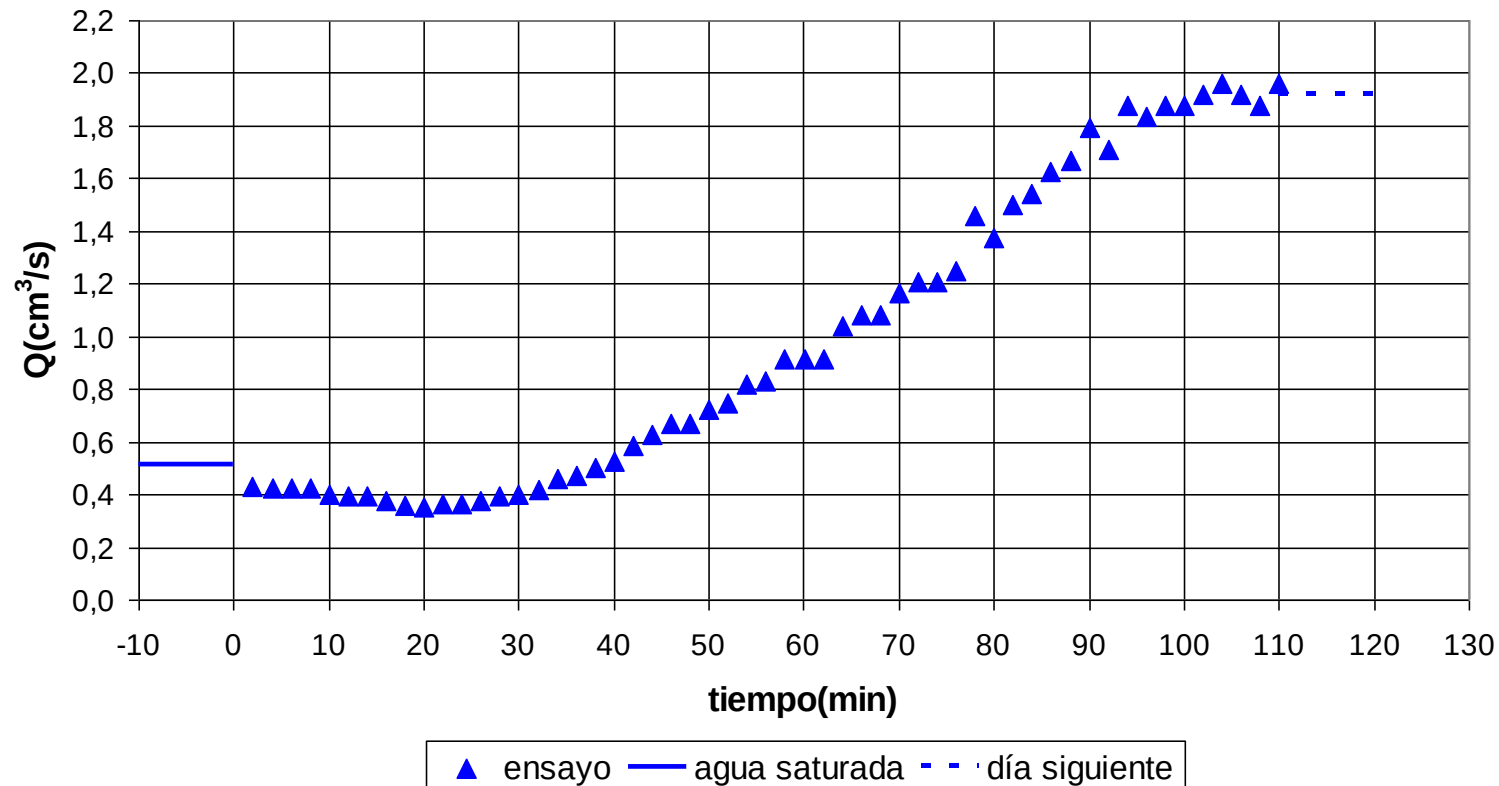
5.2. Validación de la modelación mediante ensayos

tiempo (min)	tiempo (s)	INCR t (s)	VOLUMEN (ml)	INCR V (ml)	CAUDAL (cm³/s)	Q _{td} /Q ₀	DATOS
0	0		0				MATERIA: BICARBONATO
2	120	120	52	52	0,43	1,00	A ₀ 48,9 (cm³)
4	240	120	103	51	0,43	0,98	b (ensayo) 10 (cm)
6	360	120	154	51	0,43	0,98	b (en modelo) 10 (cm)
8	480	120	205	51	0,43	0,96	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
10	600	120	253	48	0,40	0,92	V 500 (ml)
12	720	120	300	47	0,39	0,90	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
14	840	120	347	47	0,39	0,90	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
16	960	120	392	45	0,38	0,87	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
18	1080	120	435	43	0,36	0,83	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
20	1200	120	477	42	0,35	0,81	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
22	1320	120	521	44	0,37	0,85	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
24	1440	120	565	44	0,37	0,85	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
26	1560	120	610	45	0,38	0,87	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
28	1680	120	657	47	0,39	0,90	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
30	1800	120	705	48	0,40	0,92	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
32	1920	120	755	50	0,42	0,96	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
34	2040	120	807	52	0,43	1,00	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
36	2160	120	862	55	0,46	1,10	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
38	2280	120	920	58	0,50	1,16	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
40	2400	120	980	60	0,53	1,21	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
42	2520	120	1040	60	0,53	1,25	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
44	2640	120	1105	65	0,53	1,44	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
46	2760	120	1215	88	0,67	1,54	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
48	2880	120	1295	88	0,67	1,54	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
50	3000	120	1382	87	0,73	1,67	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
52	3120	120	1472	90	0,75	1,73	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
54	3240	120	1570	98	0,82	1,88	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
56	3360	120	1670	100	0,83	1,92	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
58	3480	120	1780	110	0,92	2,12	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
60	3600	120	1890	110	0,92	2,12	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
62	3720	120	2000	110	0,92	2,12	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
64	3840	120	2125	125	1,04	2,40	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
66	3960	120	2255	130	1,08	2,50	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
68	4080	120	2385	130	1,08	2,50	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
70	4200	120	2520	140	1,17	2,69	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
72	4320	120	2670	145	1,21	2,79	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
74	4440	120	2815	145	1,21	2,79	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
76	4560	120	2965	150	1,25	2,88	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
78	4680	120	3140	175	1,48	3,37	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
80	4800	120	3305	185	1,38	3,17	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
82	4920	120	3485	180	1,50	3,46	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
84	5040	120	3670	185	1,54	3,56	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
86	5160	120	3865	195	1,63	3,75	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
88	5280	120	4065	200	1,67	3,86	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
90	5400	120	4280	215	1,79	4,13	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
92	5520	120	4485	225	1,71	3,94	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
94	5640	120	4710	225	1,88	4,35	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
96	5760	120	4935	220	1,83	4,25	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
98	5880	120	5155	225	1,89	4,35	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
100	6000	120	5380	225	1,89	4,35	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
102	6120	120	5610	230	1,92	4,42	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
104	6240	120	5845	235	1,96	4,52	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
106	6360	120	6075	230	1,92	4,42	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
108	6480	120	6300	225	1,88	4,35	Q ₀ 0,433 (cm³/s)
110	6600	120	6535	235	1,96	4,52	Q ₀ 0,433 (cm³/s)

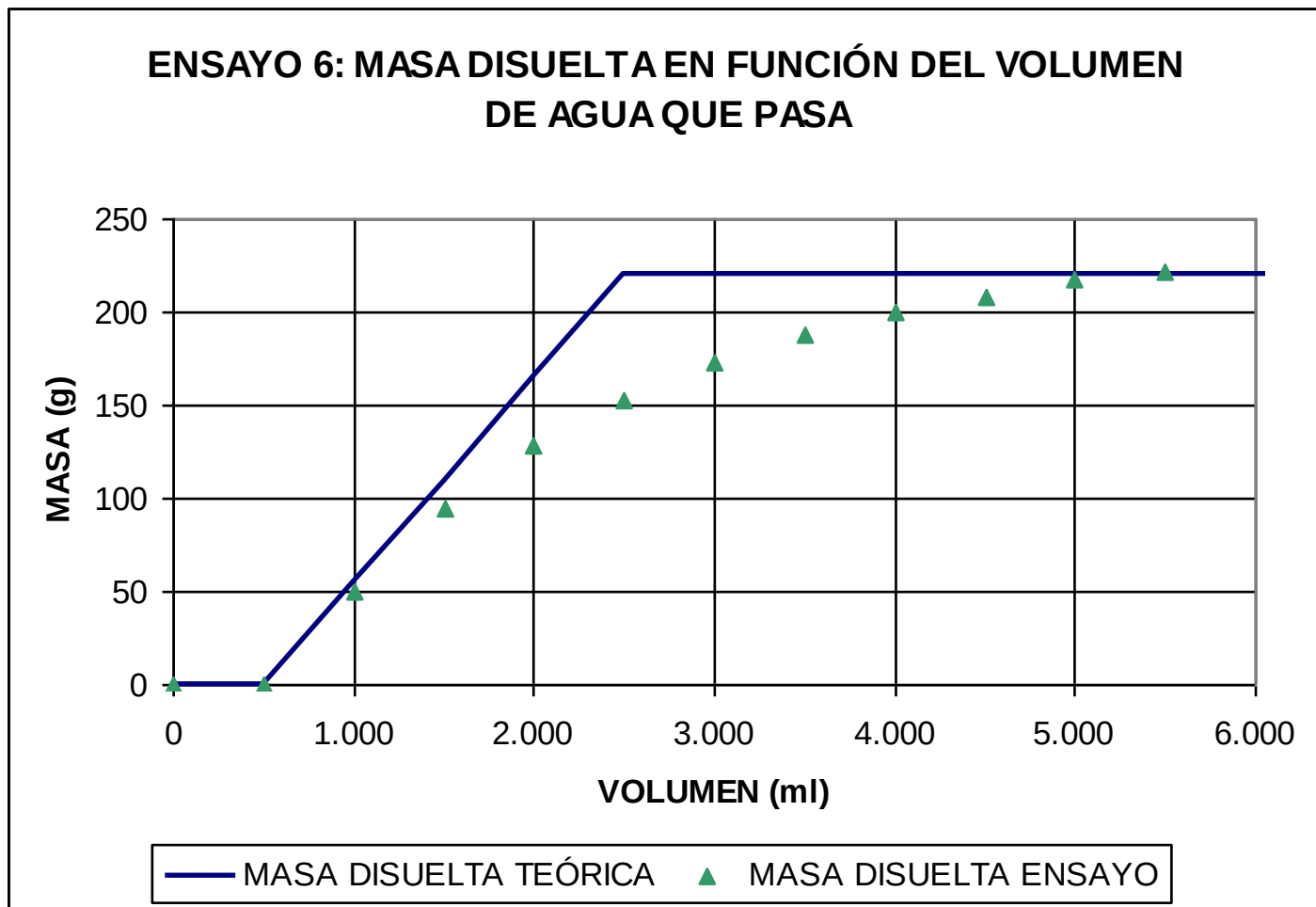
tiempo (min)	tiempo (s)	INCR t (s)	VOLUMEN (ml)	INCR V (ml)	CAUDAL (cm³/s)	Q _{td} /Q ₀
0	0		0			
2	120	120	52	52	0,43	1,00
4	240	120	103	51	0,43	0,98
6	360	120	154	51	0,43	0,98
8	480	120	205	51	0,43	0,98
10	600	120	253	48	0,40	0,92
12	720	120	300	47	0,39	0,90
14	840	120	347	47	0,39	0,90
16	960	120	392	45	0,38	0,87
18	1080	120	435	43	0,36	0,83
20	1200	120	477	42	0,35	0,81
22	1320	120	521	44	0,37	0,85
24	1440	120	565	44	0,37	0,85
26	1560	120	610	45	0,38	0,87
28	1680	120	657	47	0,39	0,90
30	1800	120	705	48	0,40	0,92
32	1920	120	755	50	0,42	0,96

5.2. Validación de la modelación mediante ensayos

ENSAYO 6: CON 9,47 % DE BICARBONATO Y CARGA DE 10 cm -
1 capa



5.2. Validación de la modelación mediante ensayos



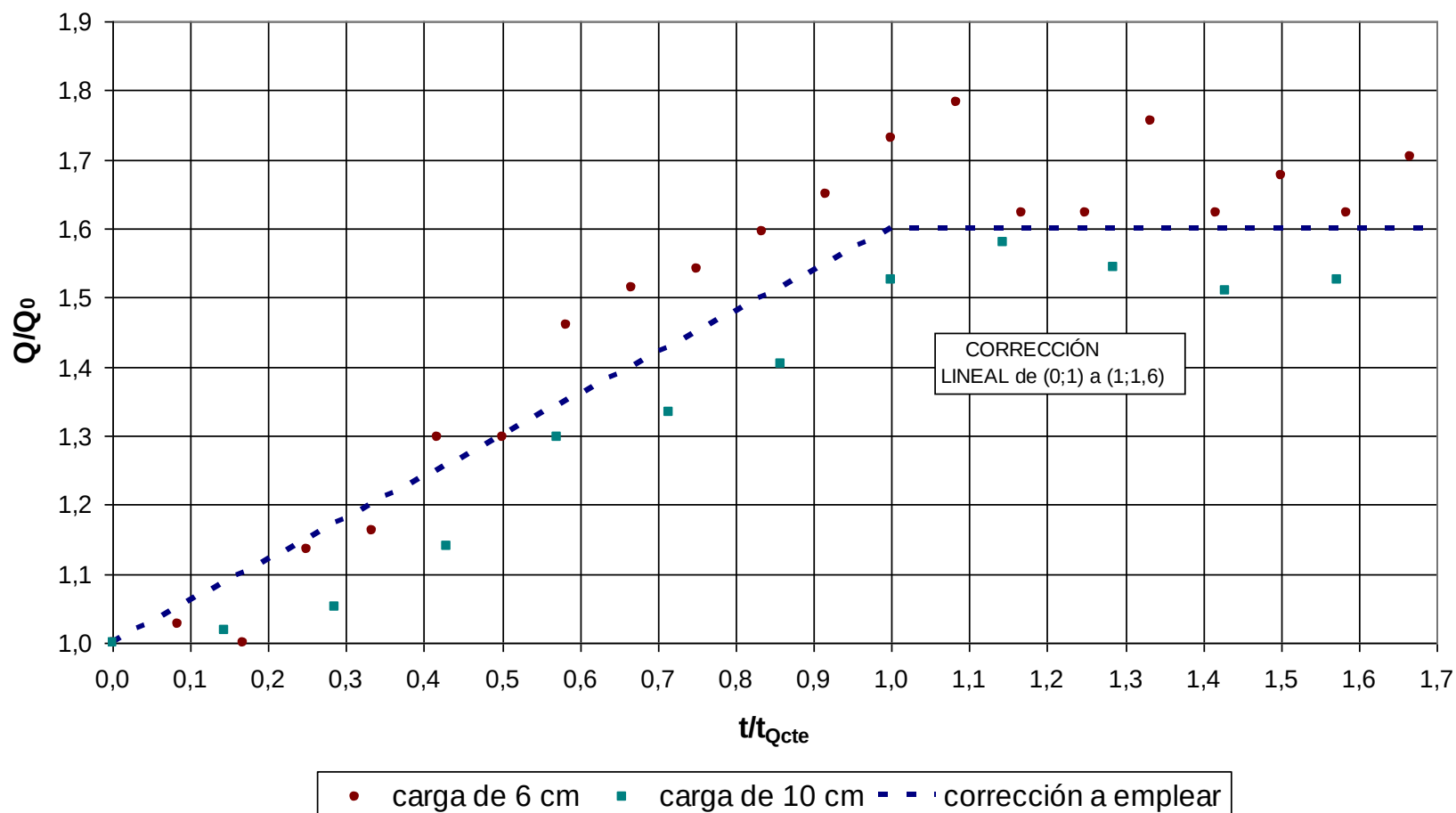
5.2. Validación de la modelación mediante ensayos

Efecto del cambio de agua en los ensayos con bicarbonato

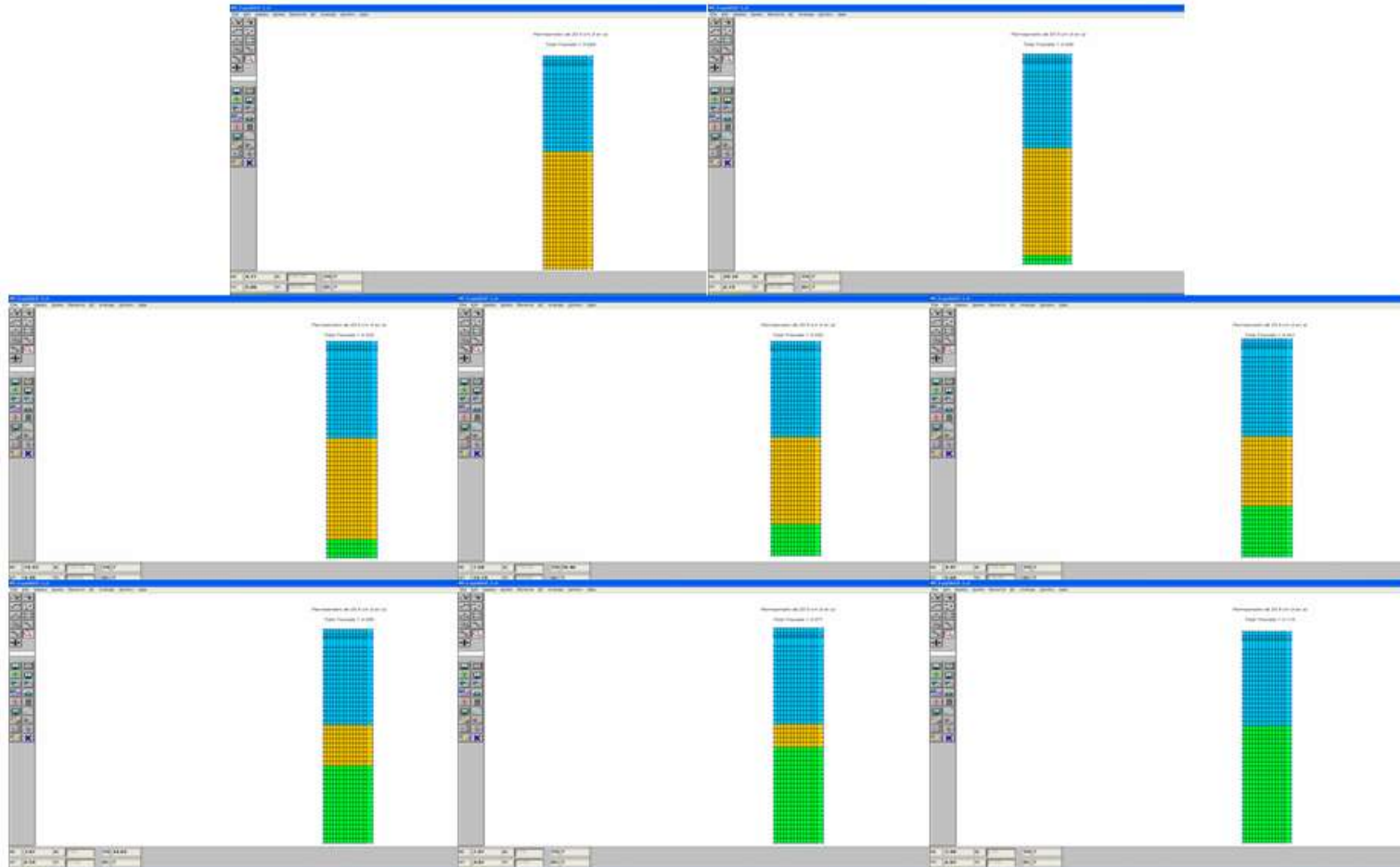


5.2. Validación de la modelación mediante ensayos

Ensayo sólo con arena – efecto del cambio de agua



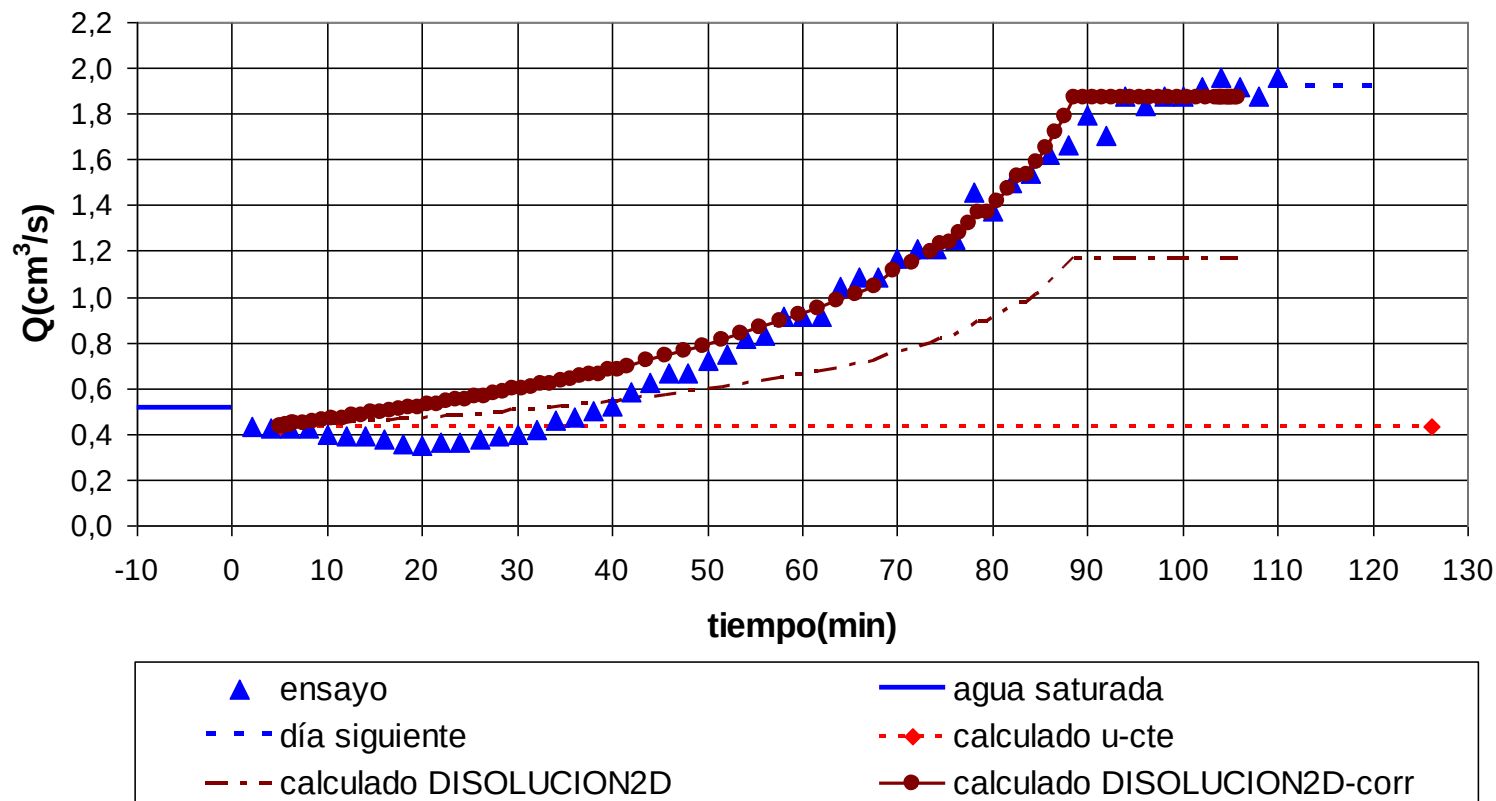
5.2. Validación de la modelación mediante ensayos



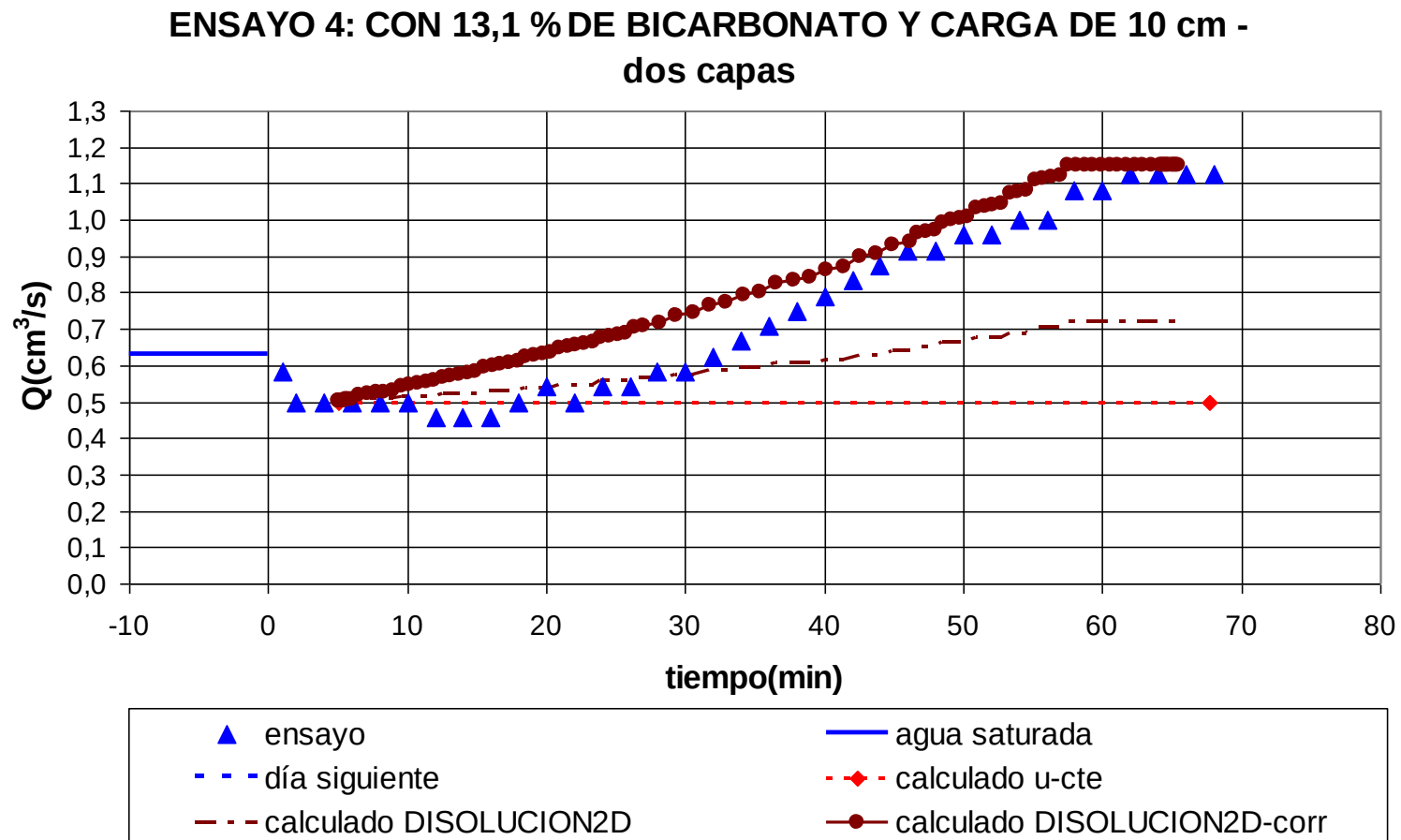
GRÁFICOS DEL AVANCE DEL FRENTE DE DISOLUCIÓN EN EL ENSAYO 11 (cálculo mediante DISOLUCIÓN2D)

5.2. Validación de la modelación mediante ensayos

ENSAYO 6: CON 9,47 % DE BICARBONATO Y CARGA DE 10 cm -
1 capa

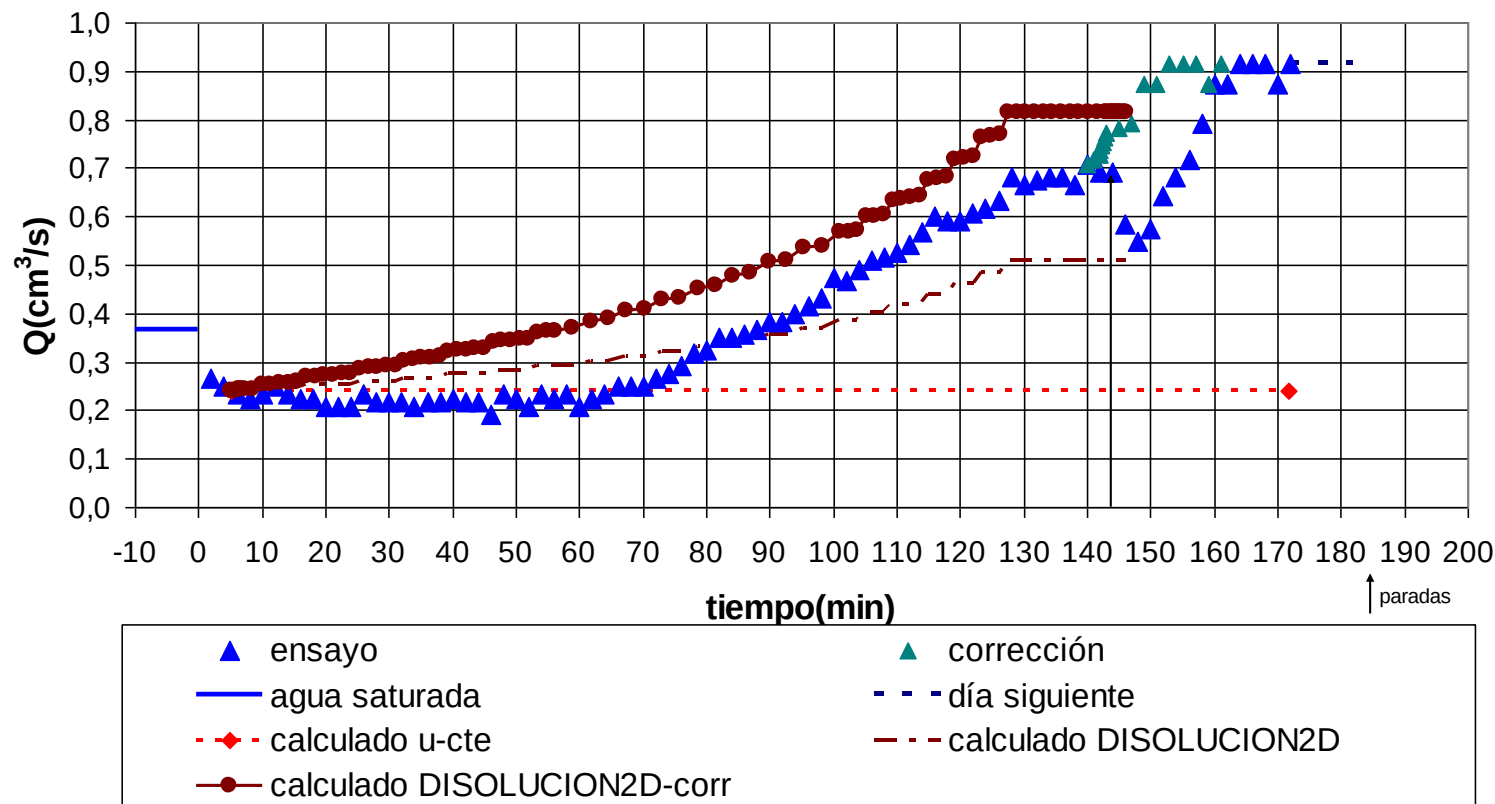


5.2. Validación de la modelación mediante ensayos



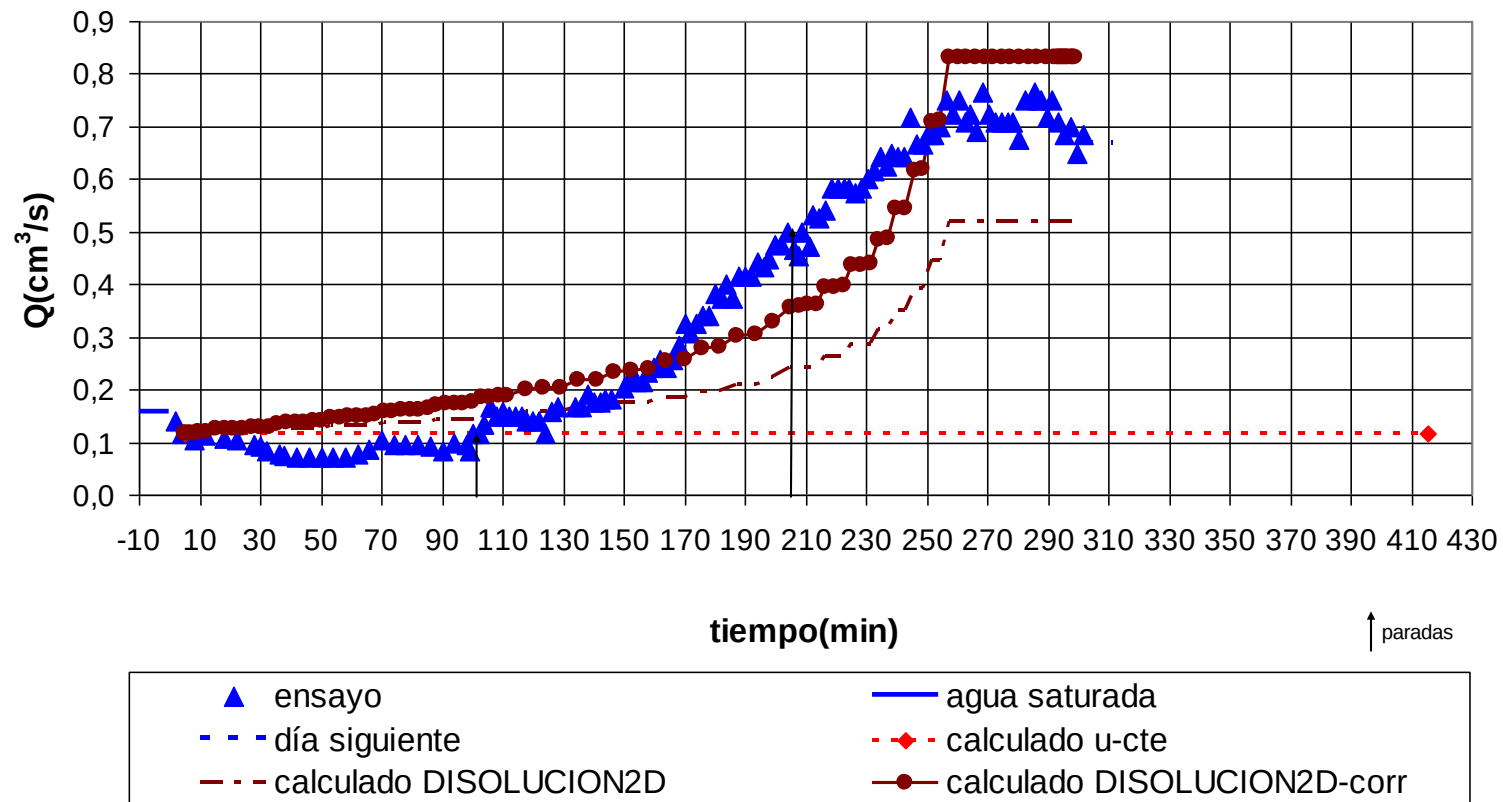
5.2. Validación de la modelación mediante ensayos

ENSAYO 7: CON 18,03 % DE BICARBONATO Y CARGA DE 6 cm - dos capas



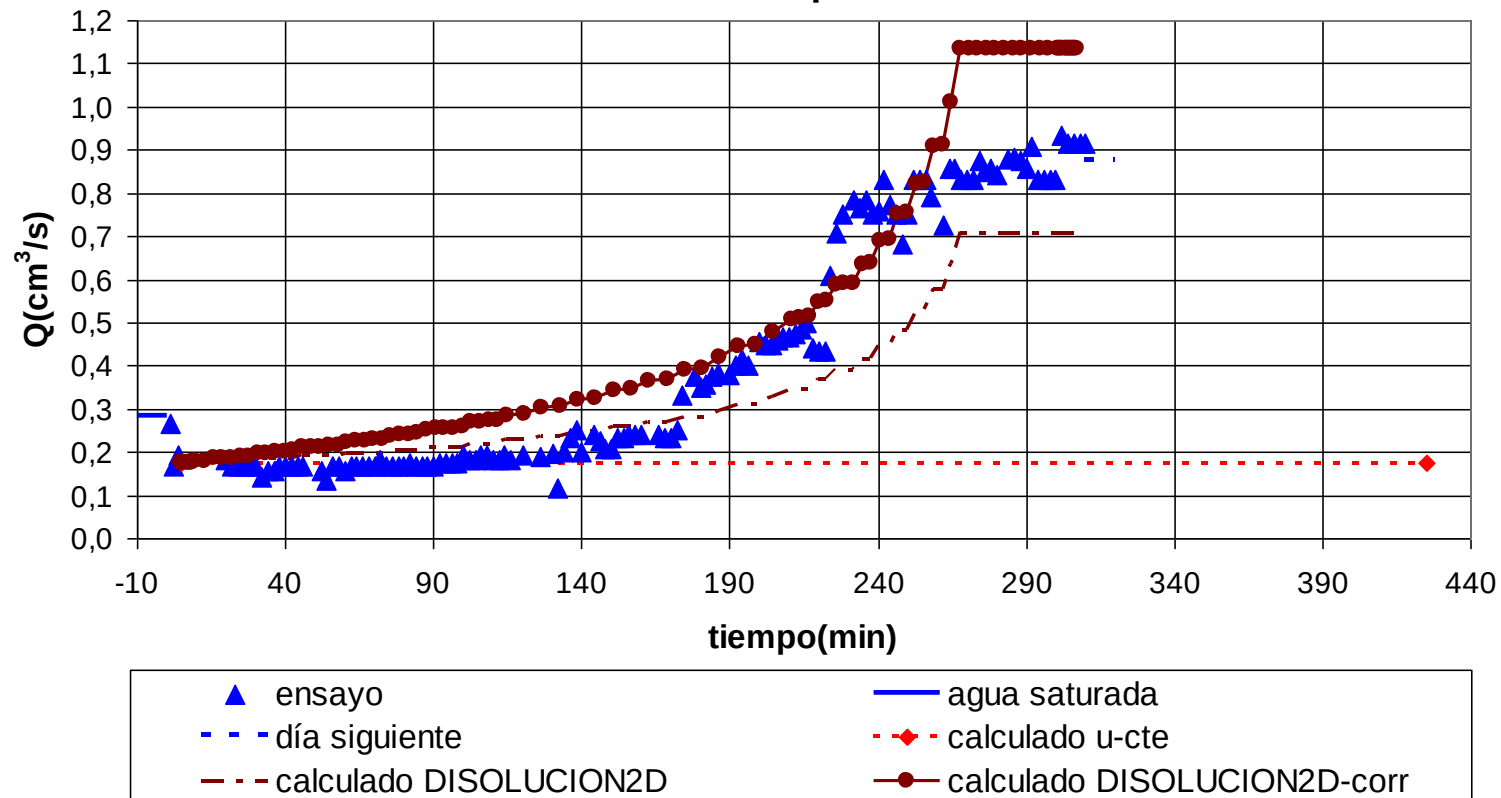
5.2. Validación de la modelación mediante ensayos

ENSAYO 14: CON 22,54 % DE BICARBONATO Y CARGA DE 10 cm - dos capas



5.2. Validación de la modelación mediante ensayos

ENSAYO 11: CON 29,13 % DE BICARBONATO Y CARGA DE 8 cm - dos capas

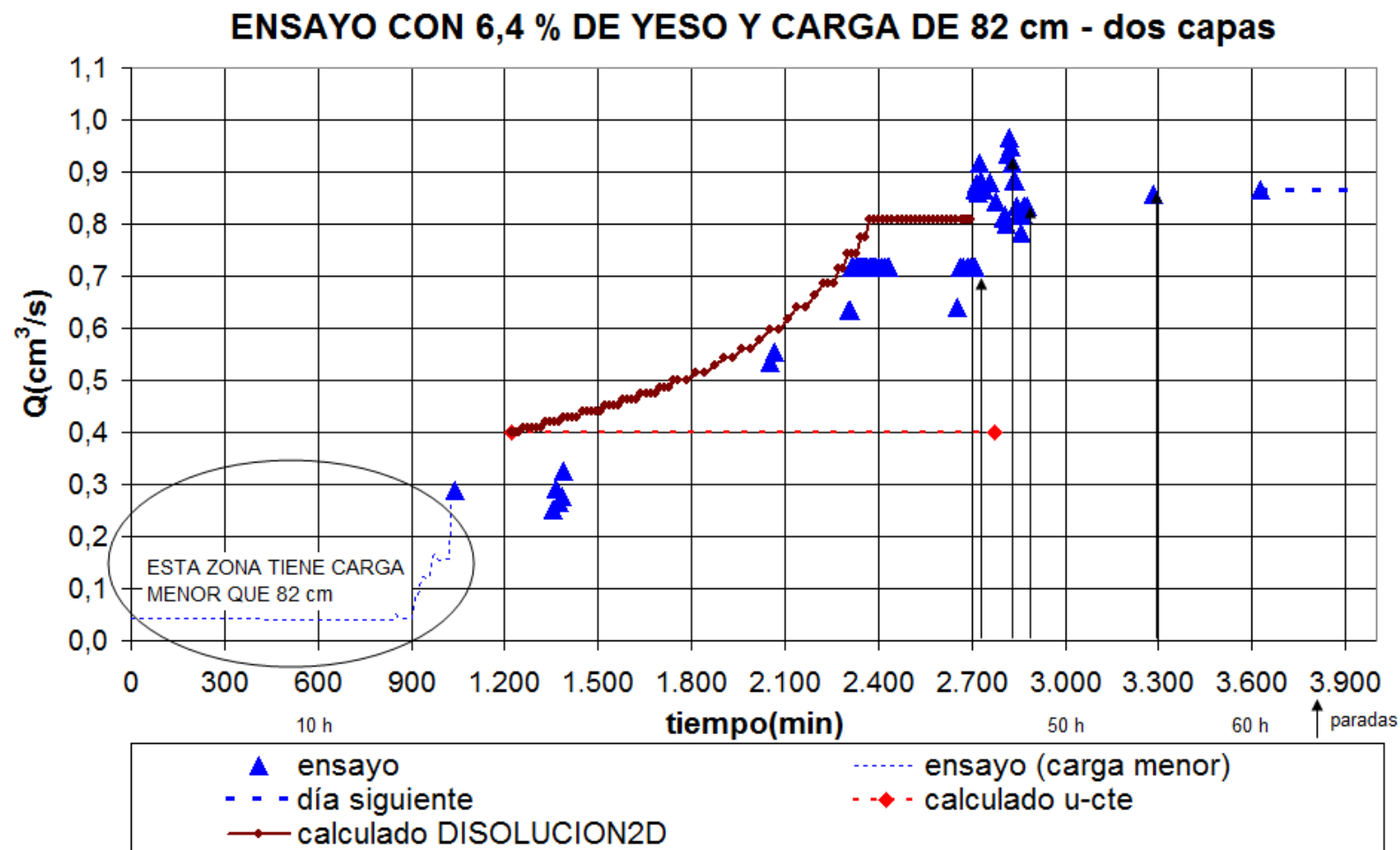


5.2. Validación de la modelación mediante ensayos

Efecto de la compactación



5.2. Validación de la modelación mediante ensayos



5.2. Validación de la modelación mediante ensayos

- Los ensayos confirmaron que la disolución aumenta la permeabilidad del suelo y el caudal filtrado.
- Todo el material soluble incrementa la porosidad efectiva al disolverse, si bien existe compactación para porcentajes altos.
- A pesar de que la mayoría de los ensayos se han realizado con bicarbonato sódico, las hipótesis se han validado para el yeso.
- Se ha comprobado la validez del modelo de disolución de partículas de James.
- Al aumentar la permeabilidad, la velocidad de avance del frente no es constante y el proceso se acelera.
- FA no depende del material y es mayor si el porcentaje aumenta.
- **Los ensayos validaron la metodología y el programa DISOLUCIÓN2D.**

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN
2. EL YESO EN LA NATURALEZA
3. PRESAS UBICADAS SOBRE CIMIENTOS YESÍFEROS
4. ANÁLISIS TEÓRICO DE LA FILTRACIÓN – DISOLUCIÓN EN CIMENTACIONES
5. MODELACIÓN NUMÉRICA DEL PROCESO ACOPLADO FILTRACIÓN-DISOLUCIÓN
- 6. CRITERIOS DE DISEÑO DE PRESAS SOBRE CIMIENTOS YESÍFEROS**
7. CONCLUSIONES FINALES

6. CRITERIOS DE DISEÑO DE PRESAS SOBRE CIMIENTOS YESÍFEROS

6.1. CAMPAÑA DE EXPERIMENTACIÓN NUMÉRICA

6.2. CONCLUSIONES DE LA CAMPAÑA DE EXPERIMENTACIÓN NUMÉRICA VÁLIDAS PARA EL DISEÑO

6.3. FORMULACIONES PARA LOS PARÁMETROS REPRESENTATIVOS

6.4. CRITERIOS DE DISEÑO DE PRESAS SOBRE CIMIENTOS YESÍFEROS

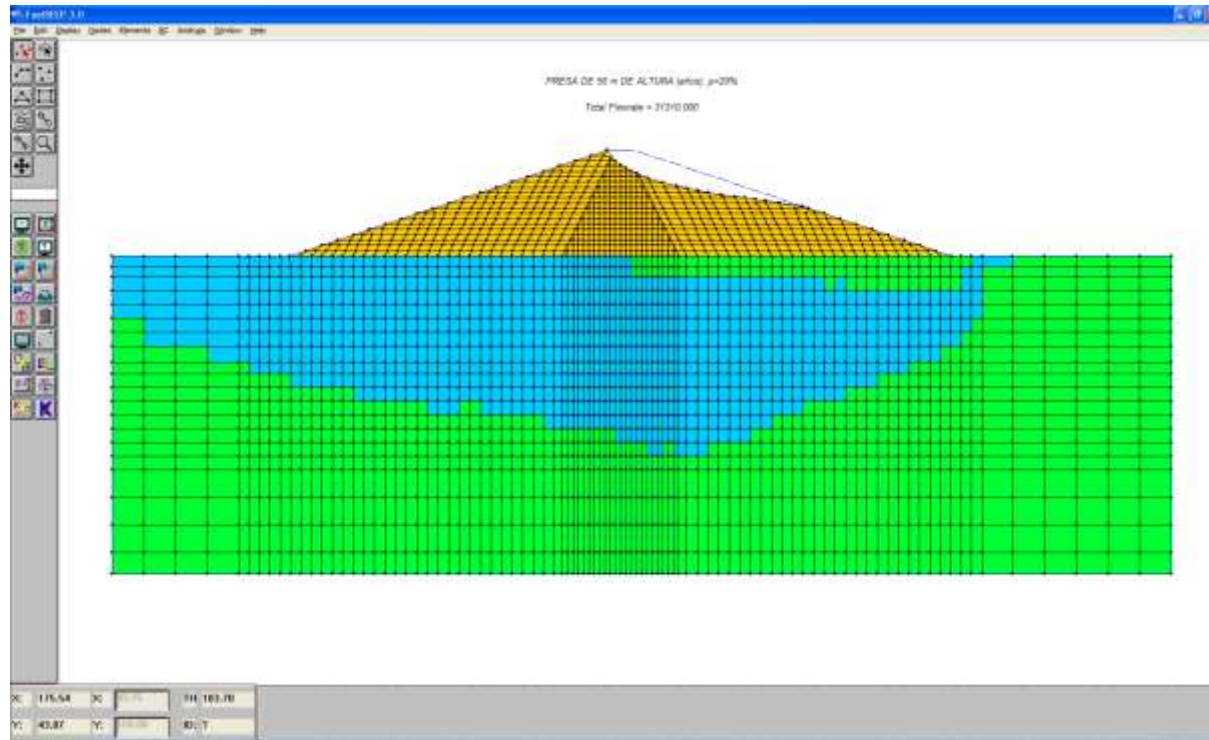
6.1. Campaña de experimentación numérica

○ ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS

	PARÁMETROS	VALOR / RANGO
RELATIVOS A TERRENO	K_0	10^{-5} m/s
	K_{td}	función de K_0 y $\emptyset$
	$\emptyset$	5 - 10 - 20 - 30 - 40%
	E/H	0,2 - 1 - 3
RELATIVOS A MODELO	Tamaño de la malla	H/10
	Iteraciones	100
RELATIVOS A PRESA	H	50 m
	Sección tipo	H - HP - Z - ZT - ZTT - ZTPR - ZPC - ZTPC
	Taludes, K de los materiales	valores fijados
RELATIVOS A K_d	T^a , iones presentes, etc.	valor fijado

6.1. Campaña de experimentación numérica

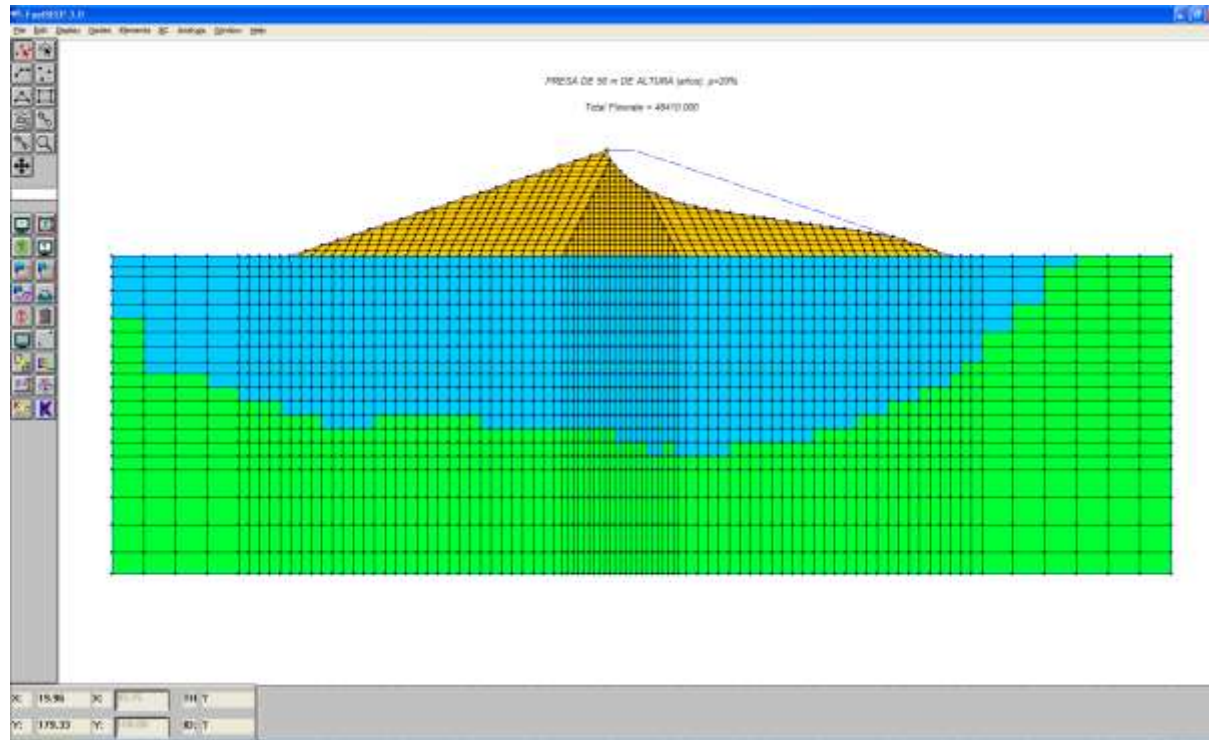
- PARÁMETROS OBTENIDOS TRAS EL CÁLCULO



Q_{ab} y t_{ab}

6.1. Campaña de experimentación numérica

- PARÁMETROS OBTENIDOS TRAS EL CÁLCULO

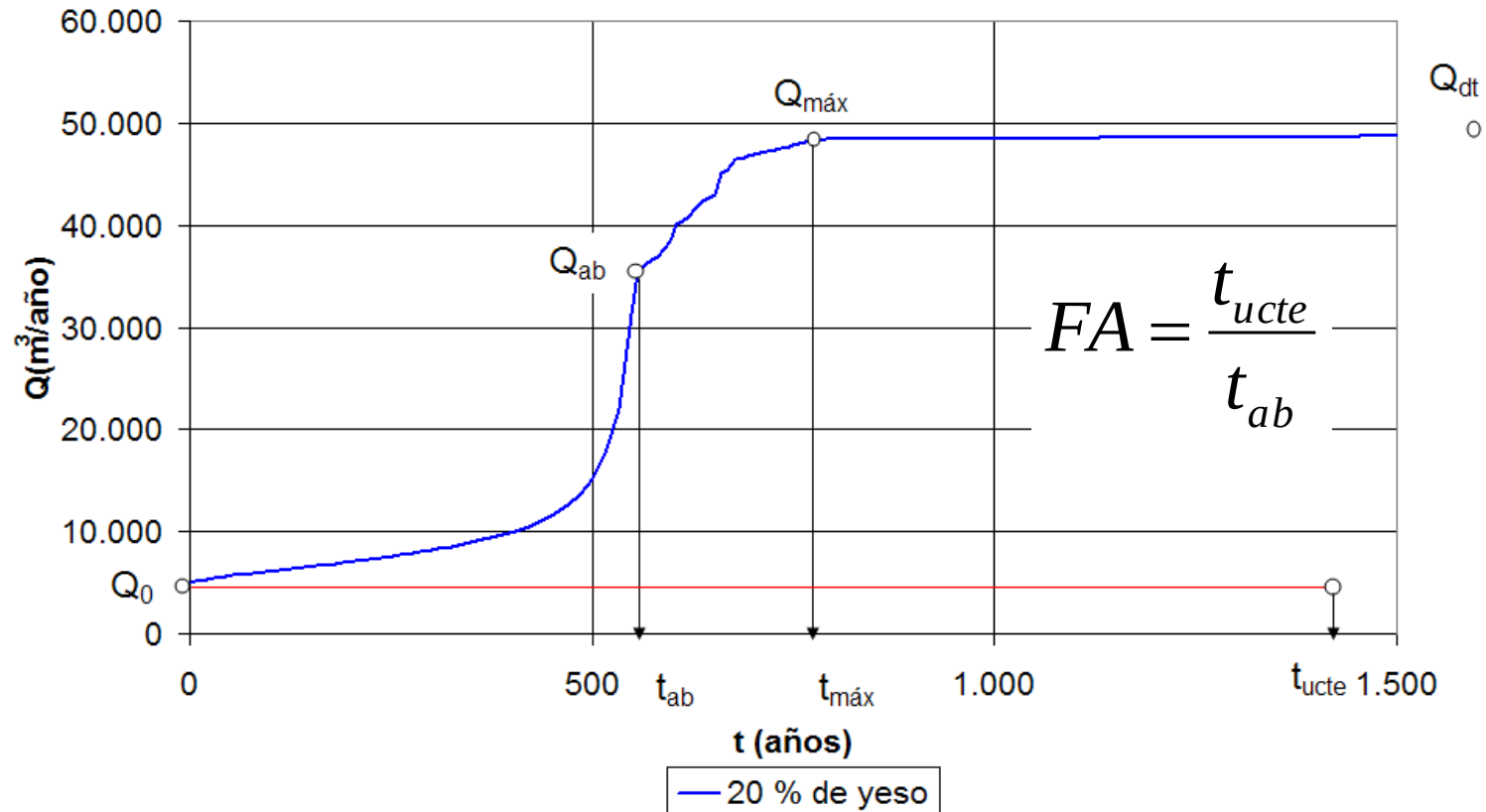


$Q_{\text{máx}}$ y $t_{\text{máx}}$

6.1. Campaña de experimentación numérica

- PARÁMETROS OBTENIDOS TRAS EL CÁLCULO

PRESA HOMOGÉNEA SIN PANTALLA (L/H=6,25) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)



- ESTUDIO ADIMENSIONAL DE PARÁMETROS (H, K_0, C_s)

6.1. Campaña de experimentación numérica

SECCIÓN TIPO DE PRESA Y TIPOS DE CIMIENTO ANALIZADOS

ALTURA	PORCENTAJE (FICHERO)	TIPOLOGÍA PRESA	E CAPA YESÍFERA	DIRECTORIO
50	5% (h50p5)	HOMOGÉNEA	3H	H3H
			1H	H1H
			H/5	H0.2H
		HOMOGÉNEA CON PANTALLA CENTRADA	3H0.5	HPC3H1
			3H1	HPC3H0.5
			1H	HPC1H
		ZONIFICADA	H/5	HPC0.2H
			3H	Z3H
			1H	Z1H
		ZONIFICADA CON TAPIZ	H/5	Z0.2H
			3H	ZT3H
			1H	ZT1H
		ZONIFICADA CON TAPIZ MÁS LARGO	H/5	ZT0.2H
			3H	ZTT3H
			1H	ZTT1H
		ZONIFICADA CON TAPIZ Y CON PANTALLA ARRIBA	H/5	ZTT0.2H
			3H0.5	ZPR3H1
			3H1	ZPR3H0.5
		ZONIFICADA CON PANTALLA CENTRADA	1H	ZPR1H
			H/5	ZPR0.2H
			3H0.5	ZPC3H1
		ZONIFICADA CON TAPIZ Y CON PANTALLA CENTRADA	3H1	ZPC3H0.5
			1H	ZPC1H
			H/5	ZPC0.2H
			3H0.5	ZTPC3H1
			3H1	ZTPC3H0.5
			1H	ZTPC1H
			H/5	ZTPC0.2H

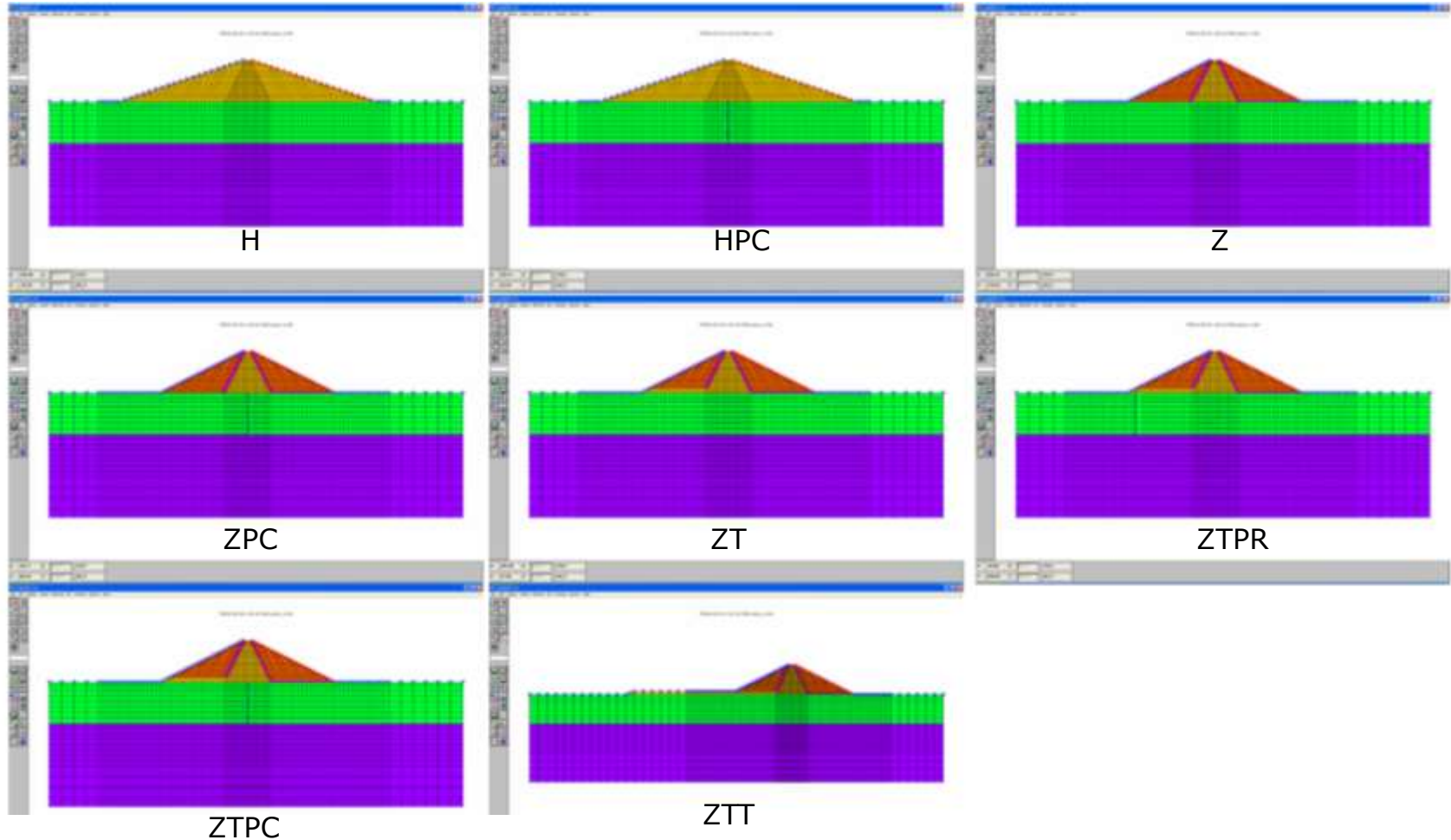
140 casos calculados (espesor capa yesífera, porcentaje de yeso, sección tipo de presa):

-28 modelos geométricos

-15 tipos de cimiento

6.1. Campaña de experimentación numérica

- SECCIÓN TIPO DE PRESA Y TIPOS DE CIMIENTO ANALIZADOS

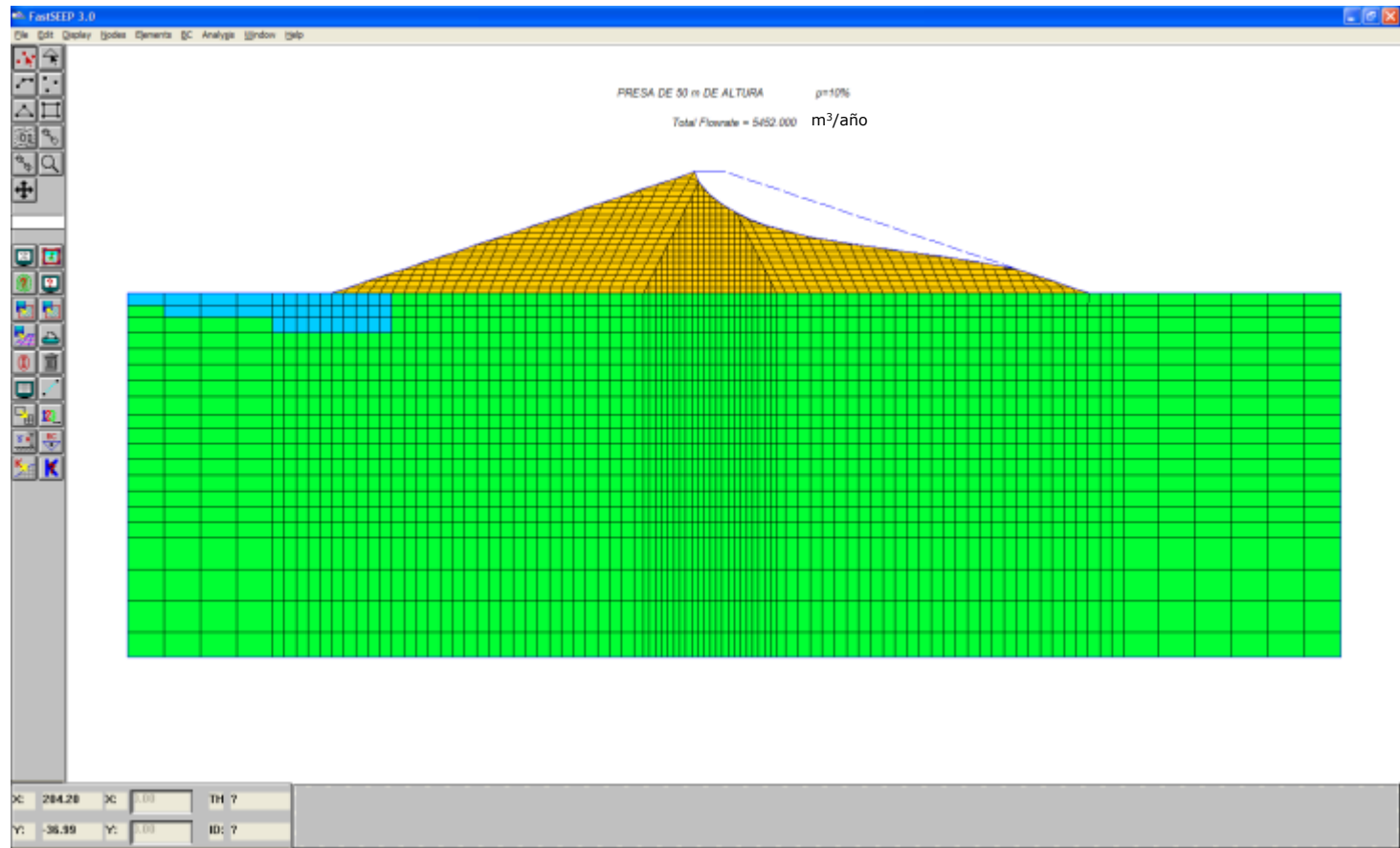


6.1. Campaña de experimentación numérica

- RESULTADOS DE LA CAMPAÑA DE EXPERIMENTACIÓN NUMÉRICA
 - Resultados de un ejemplo de cálculo con DISOLUCIÓN2D (avance del frente de disolución)
 - Resultados para analizar parámetros (28 modelos geométricos de presa y cimentación)
 - Resultados del factor de aceleración $FA = \frac{t_{ucte}}{t_{ab}}$
 - Resultados para comparar secciones tipo de presa (15 tipos de cimientto)

6.1. Campaña de experimentación numérica

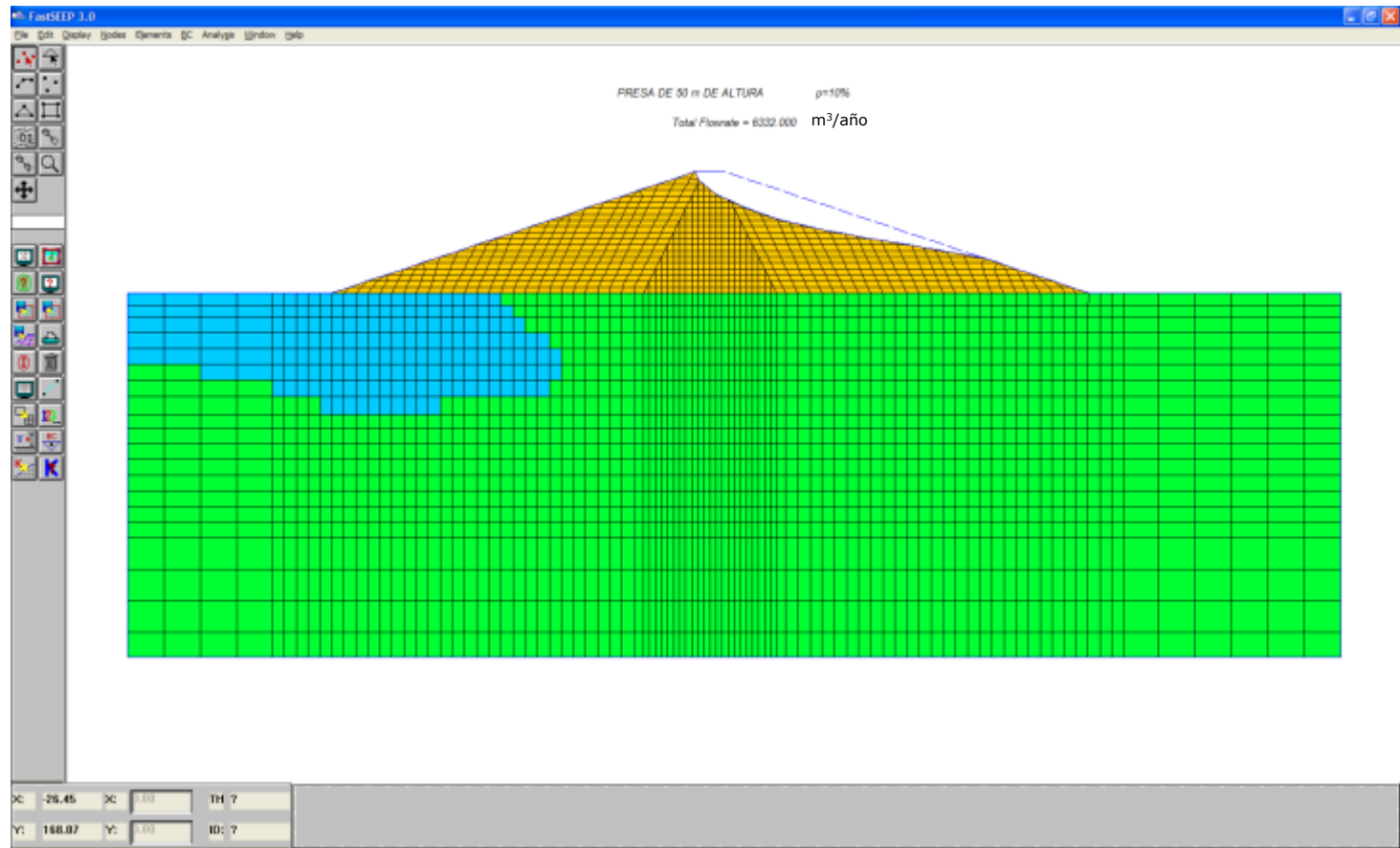
Ejemplo de cálculo H3H con 10% de yeso



t=23,5 años

6.1. Campaña de experimentación numérica

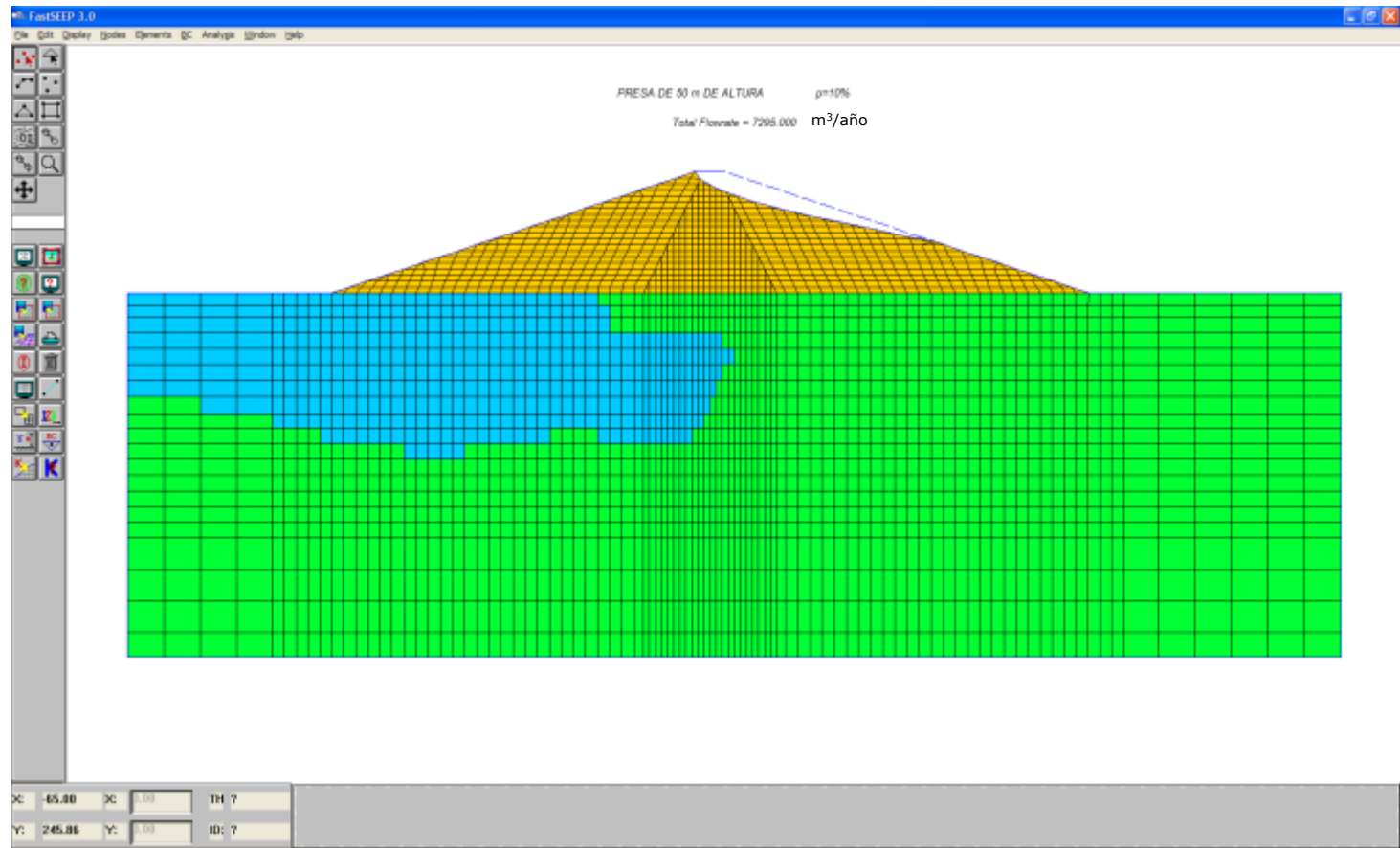
Ejemplo de cálculo H3H con 10% de yeso



$t=113,5$ años

6.1. Campaña de experimentación numérica

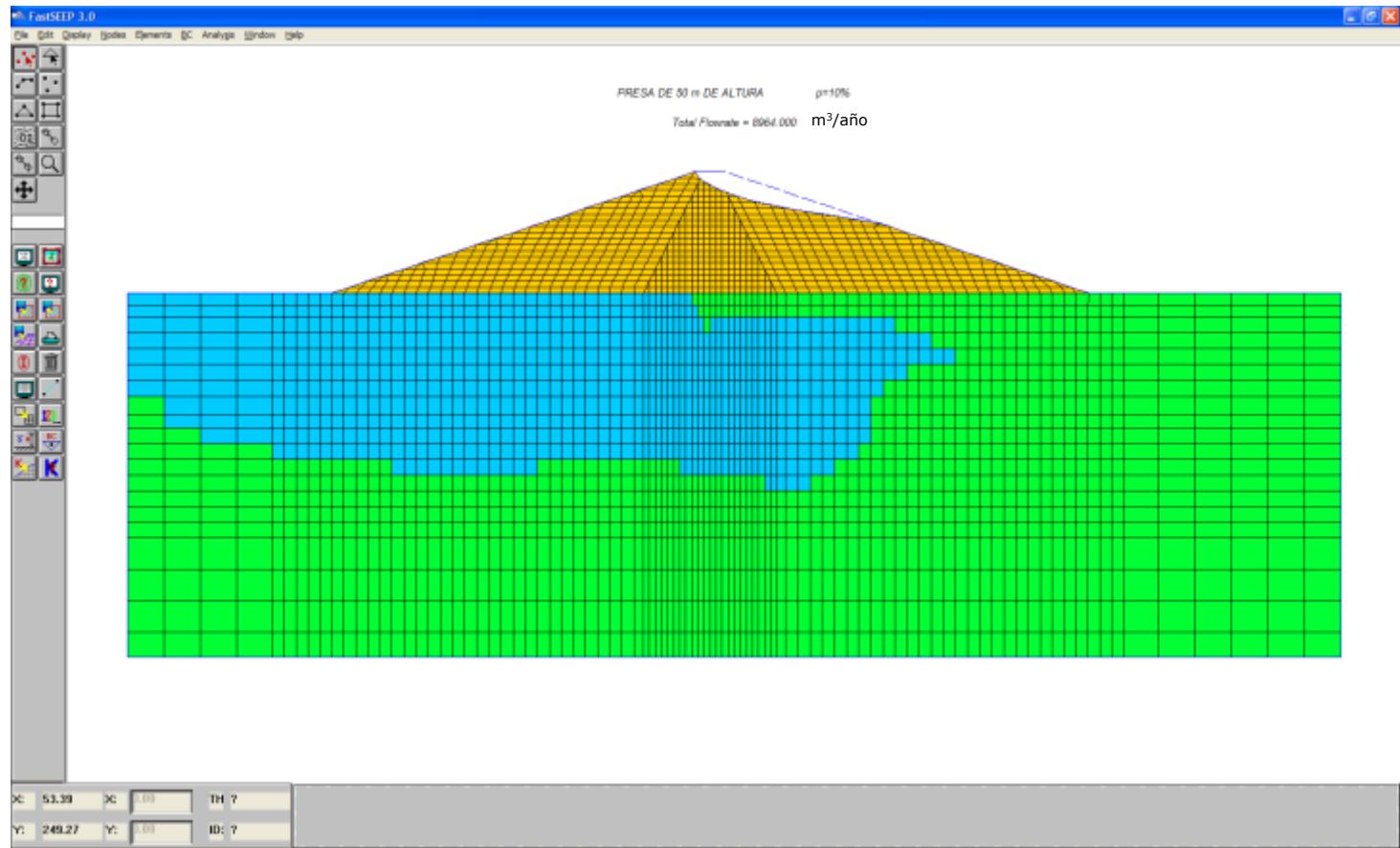
Ejemplo de cálculo H3H con 10% de yeso



$t=203,5$ años

6.1. Campaña de experimentación numérica

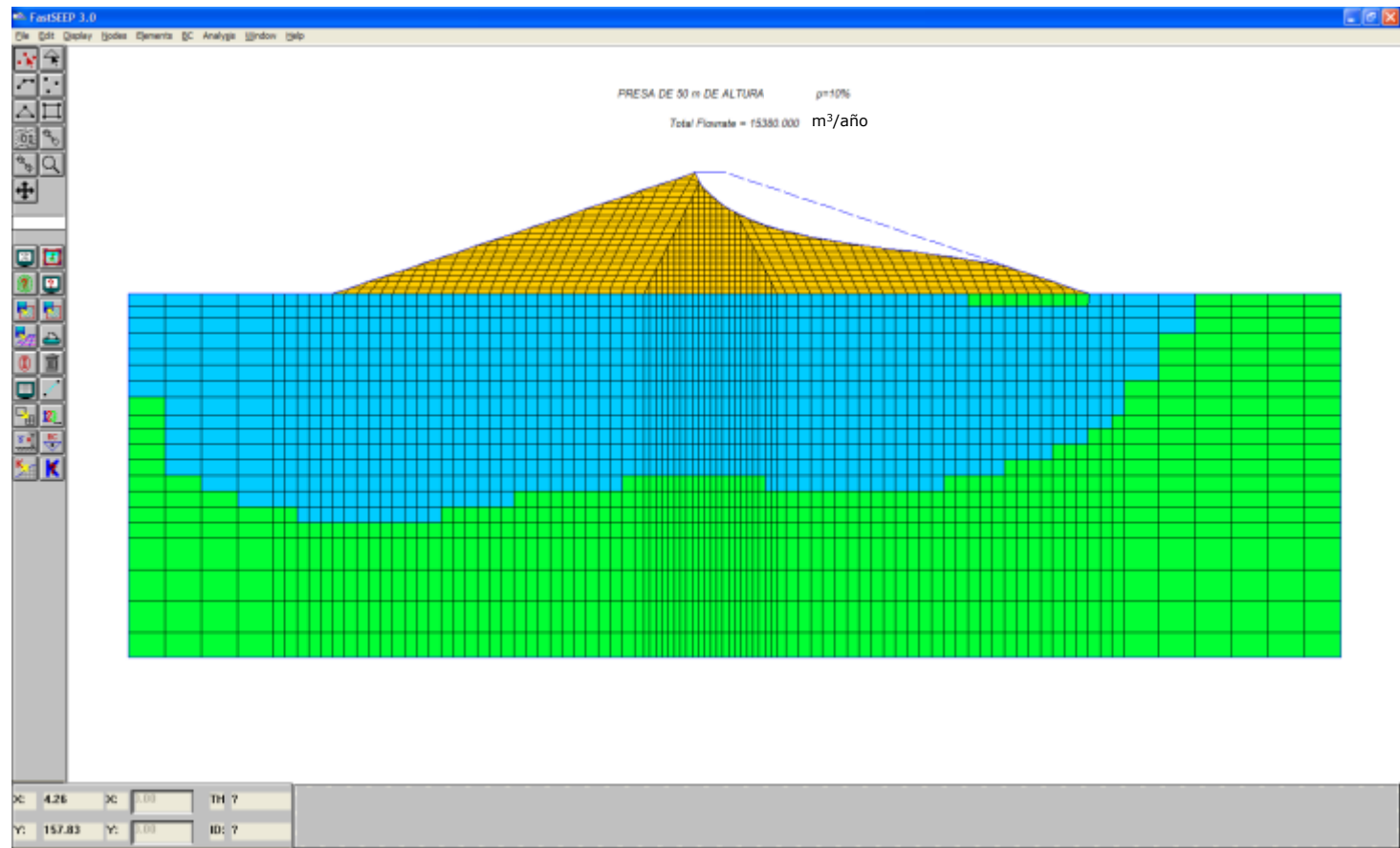
Ejemplo de cálculo H3H con 10% de yeso



$t=293,5$ años

6.1. Campaña de experimentación numérica

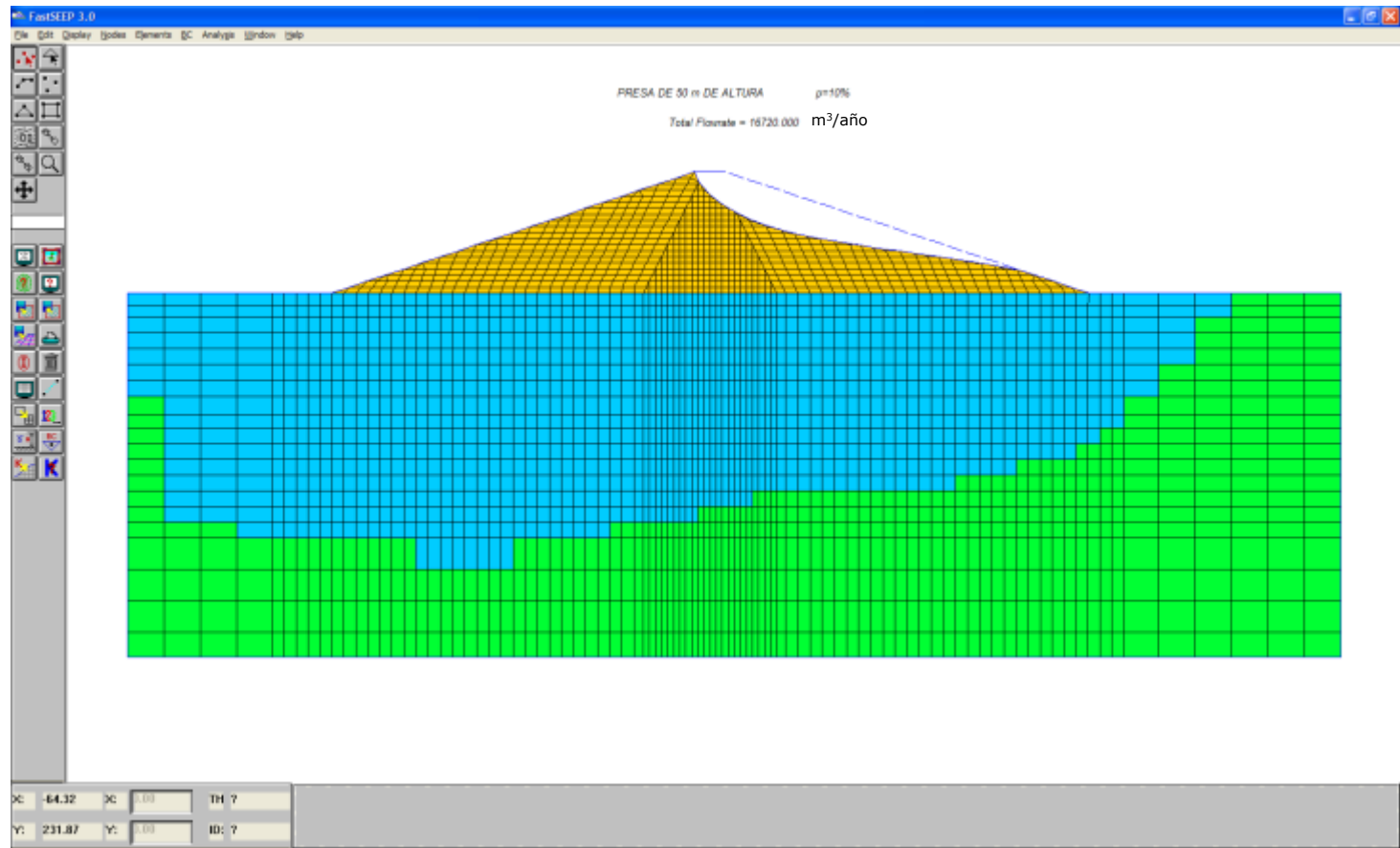
Ejemplo de cálculo H3H con 10% de yeso



$t=437,5$ años

6.1. Campaña de experimentación numérica

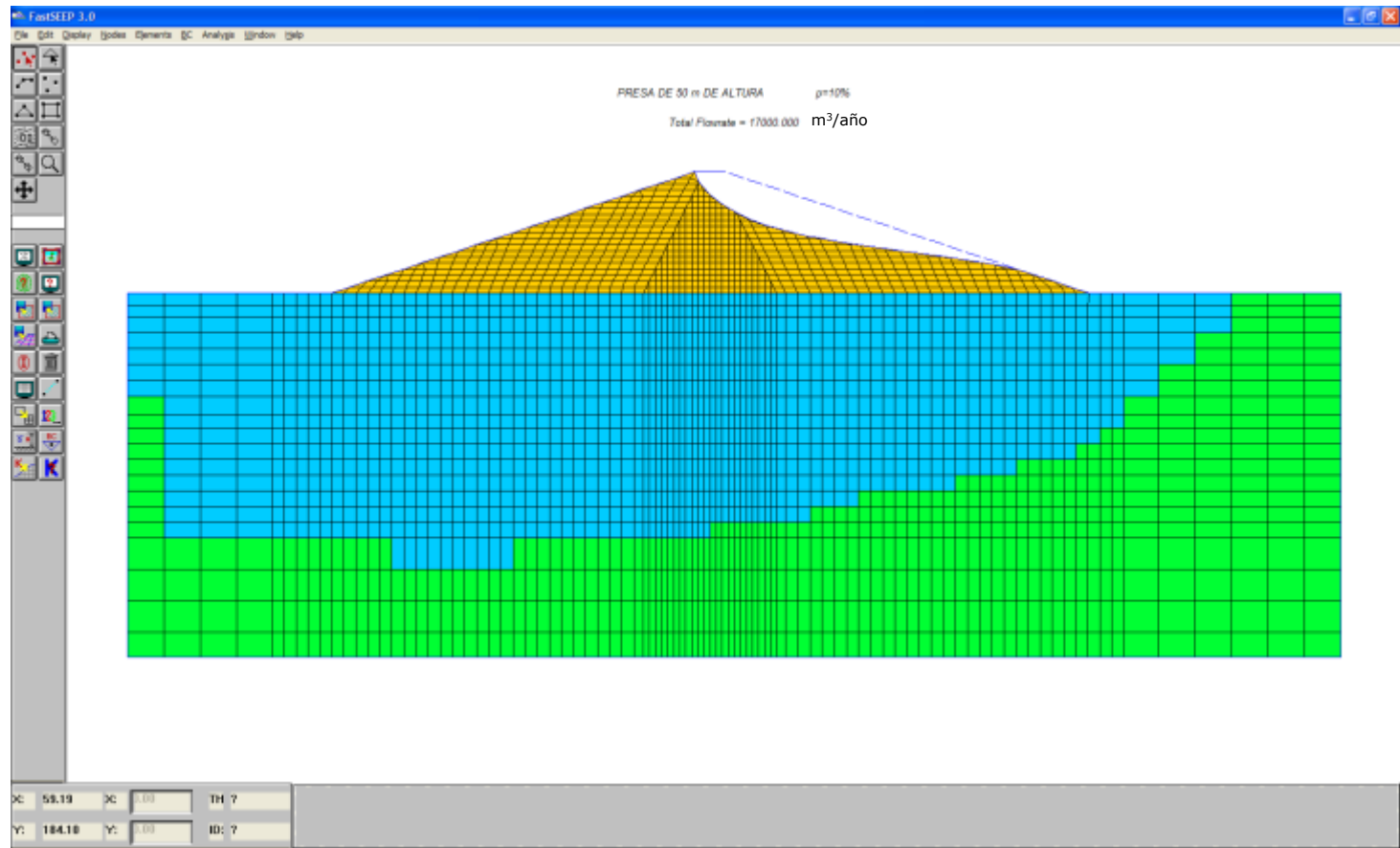
Ejemplo de cálculo H3H con 10% de yeso



$t=617,5$ años

6.1. Campaña de experimentación numérica

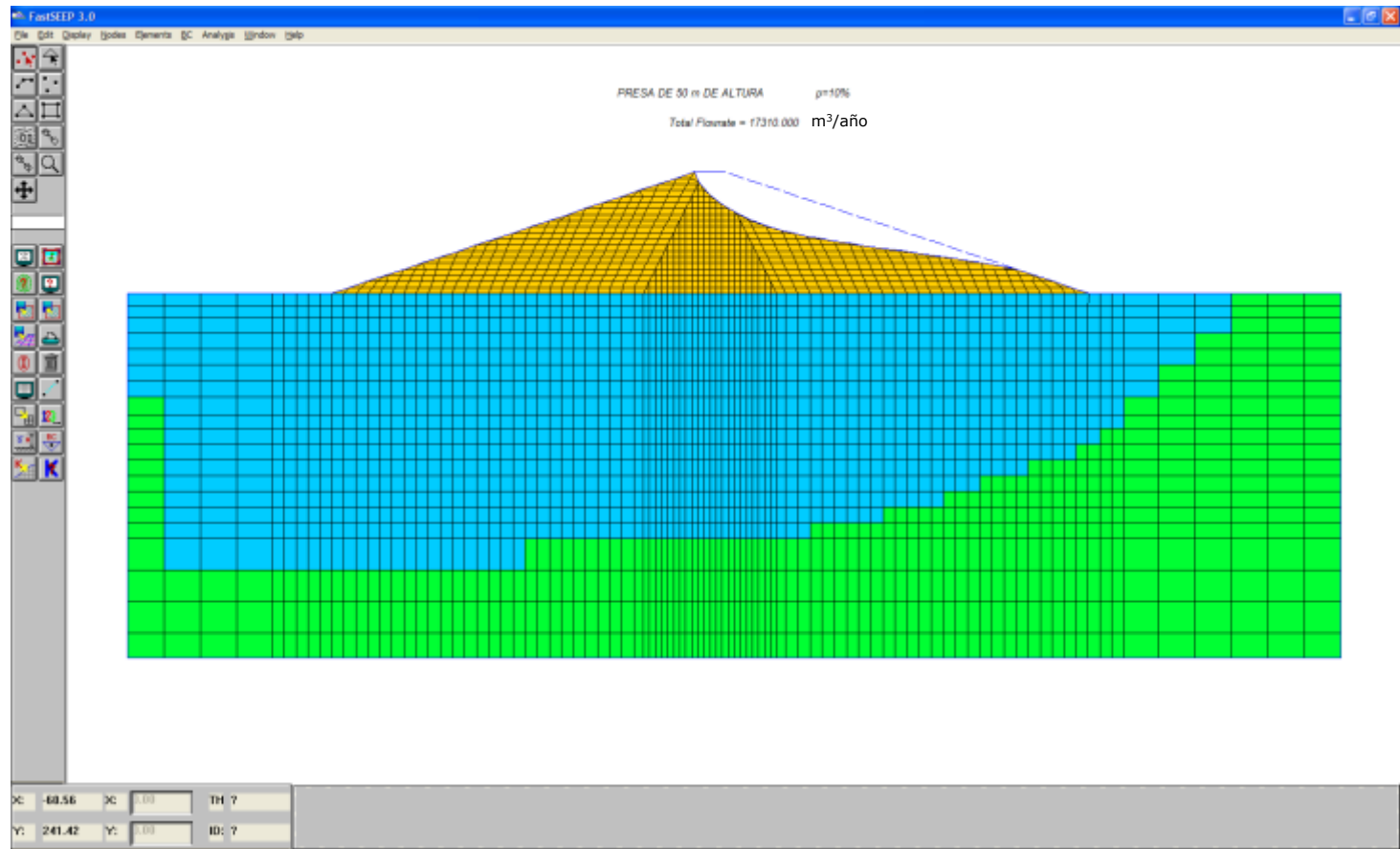
Ejemplo de cálculo H3H con 10% de yeso



$t=707,5$ años

6.1. Campaña de experimentación numérica

Ejemplo de cálculo H3H con 10% de yeso



$t=797,5$ años

6.1. Campaña de experimentación numérica

❖ RESULTADOS PARA ANALIZAR PARÁMETROS

Gráficos para $H=50$ m, $K_0=315$ m/año y K del resto de materiales fijadas:

DATOS DE PERMEABILIDADES		
MATERIALES	$K(m/s)$	$K(m/año)$
Cimiento impermeable	10^{-8}	0,315
Cimiento yesífero antes de la disolución	10^{-5}	315
Todo uno (presa homogénea)	10^{-8}	0,315
Núcleo (presa zonificada)	10^{-9}	0,032
Filtro (presa zonificada)	10^{-5}	315
Espaldón (presa zonificada)	10^{-4}	3154
Pantalla	10^{-8}	0,315

6.1. Campaña de experimentación numérica

❖ RESULTADOS PARA ANALIZAR PARÁMETROS

Gráficos para $H=50$ m, $K_0=315$ m/año y K del resto de materiales fijadas:

$t-Q$

$t-Q/Q_0$

porcentaje de yeso – t_{ucte} , t_{ab} y $t_{máx}$

porcentaje de yeso – Q_{ab} y $Q_{máx}$

Gráficos adimensionales para cualquier H , para cualquier K_0 ; si se cumplen las relaciones de K de los materiales:

t adim - Q adim

t adim - Q/Q_0

%- t_{ab} adim

%- $t_{máx}$ adim

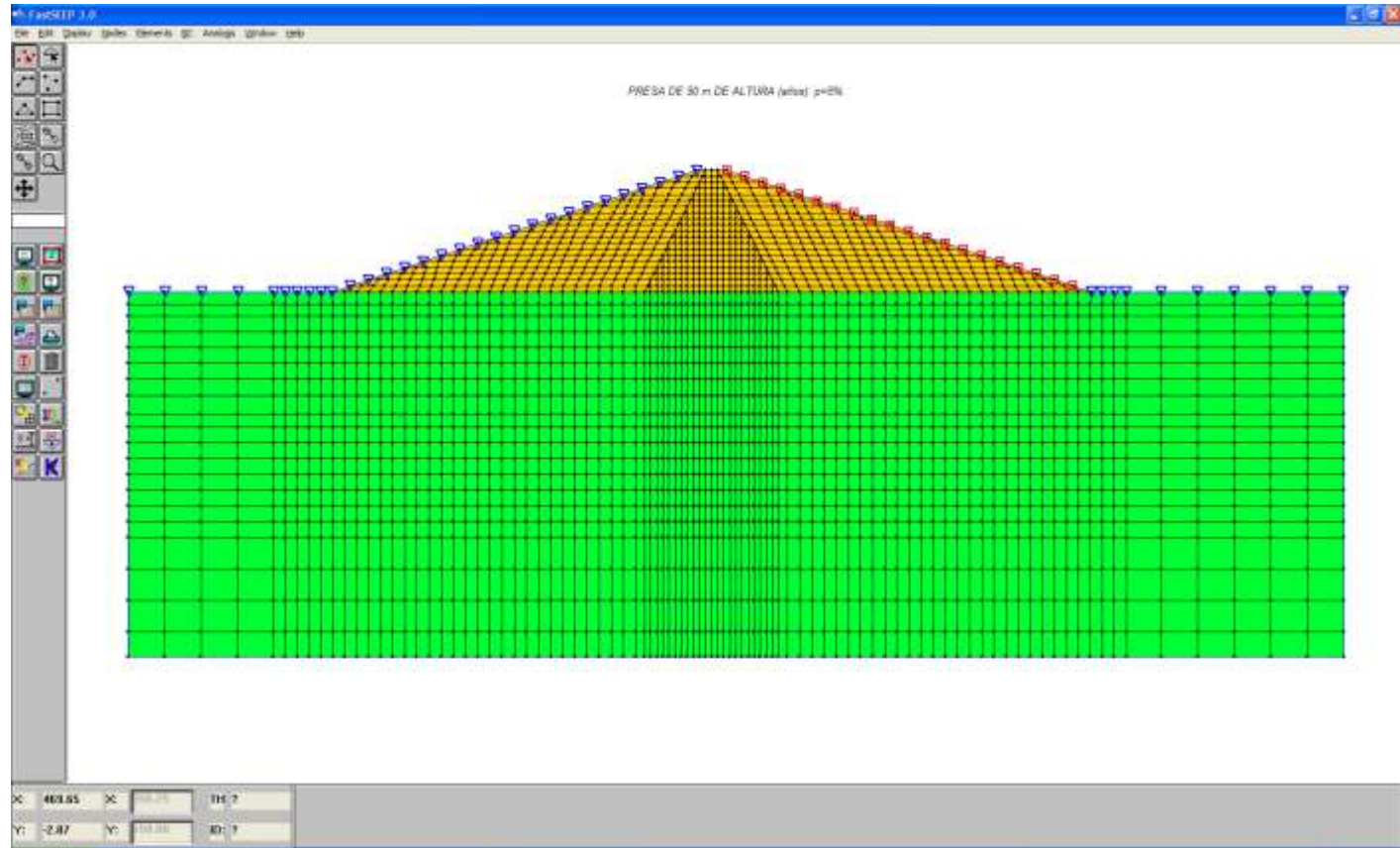
%- Q_{ab} adim

%- $Q_{máx}$ adim

%- Q/Q_0

%-FA

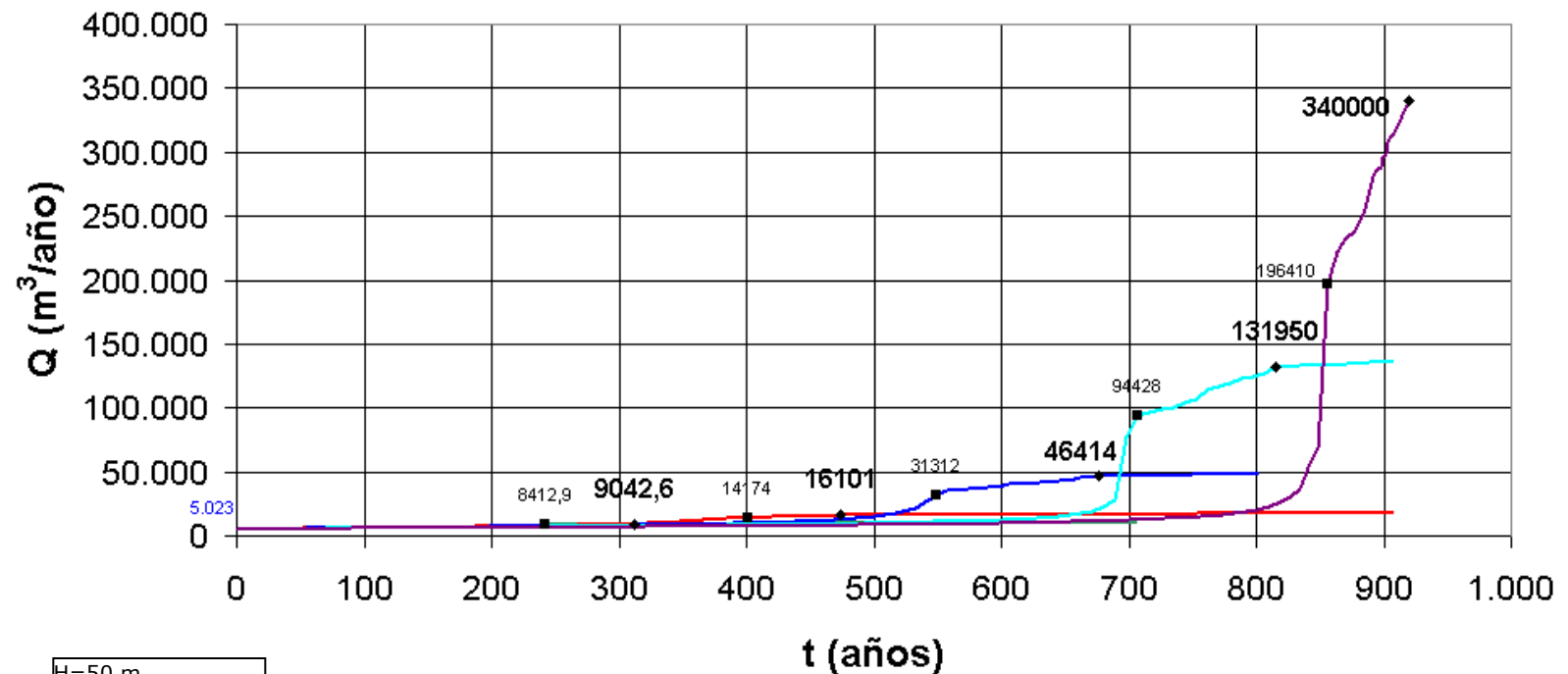
6.1. Campaña de experimentación numérica



H=50 m
 $K_0=315$ m/año
K materiales fijadas

6.1. Campaña de experimentación numérica

PRESA HOMOGÉNEA SIN PANTALLA (L/H=6,25) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)

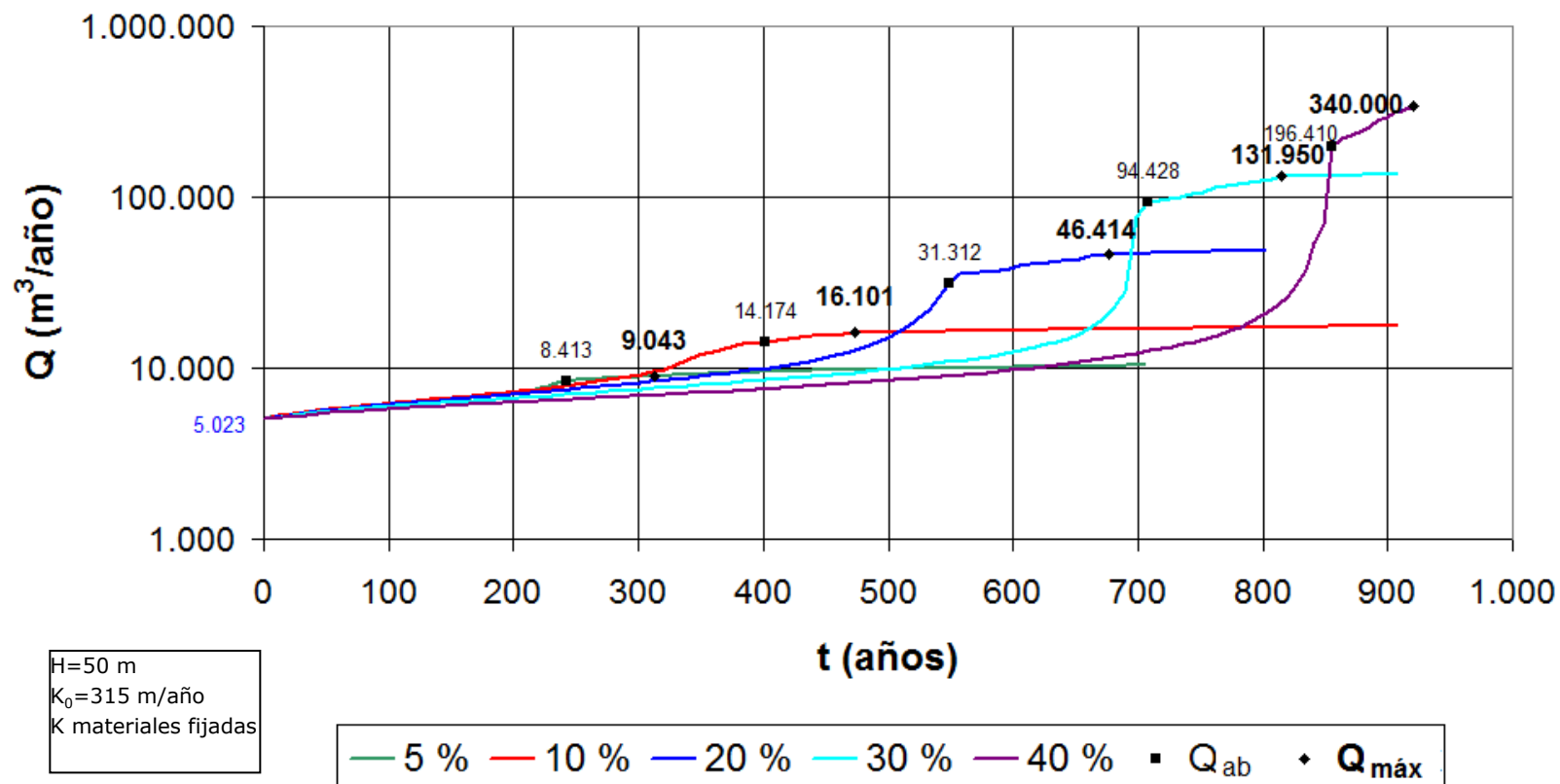


H=50 m
 $K_0=315$ m/año
 K materiales fijadas

— 5 % — 10 % — 20 % — 30 % — 40 % ■ Q_{ab} ♦ $Q_{m\acute{a}x}$

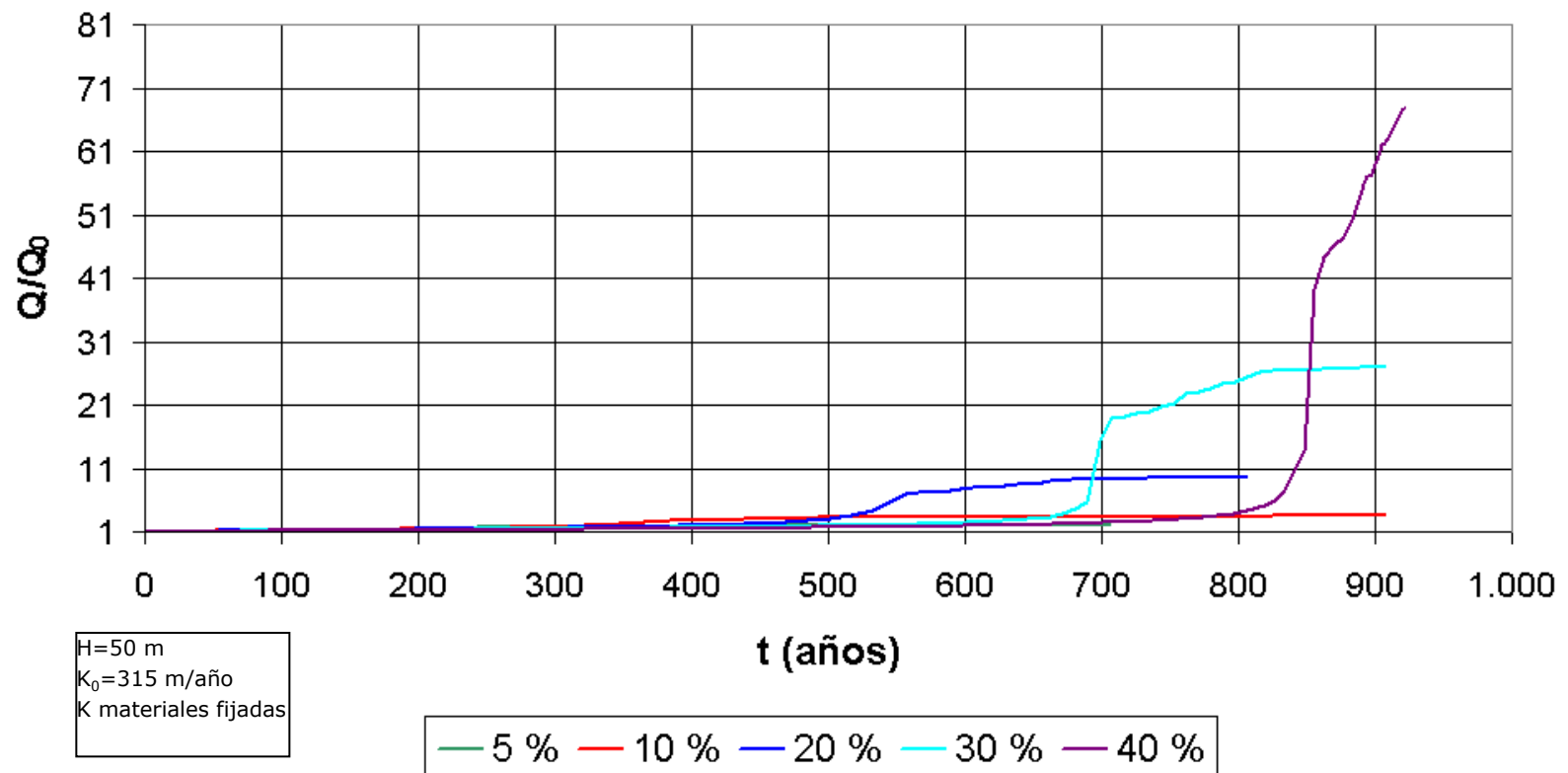
6.1. Campaña de experimentación numérica

PRESA HOMOGÉNEA SIN PANTALLA (L/H=6,25) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)



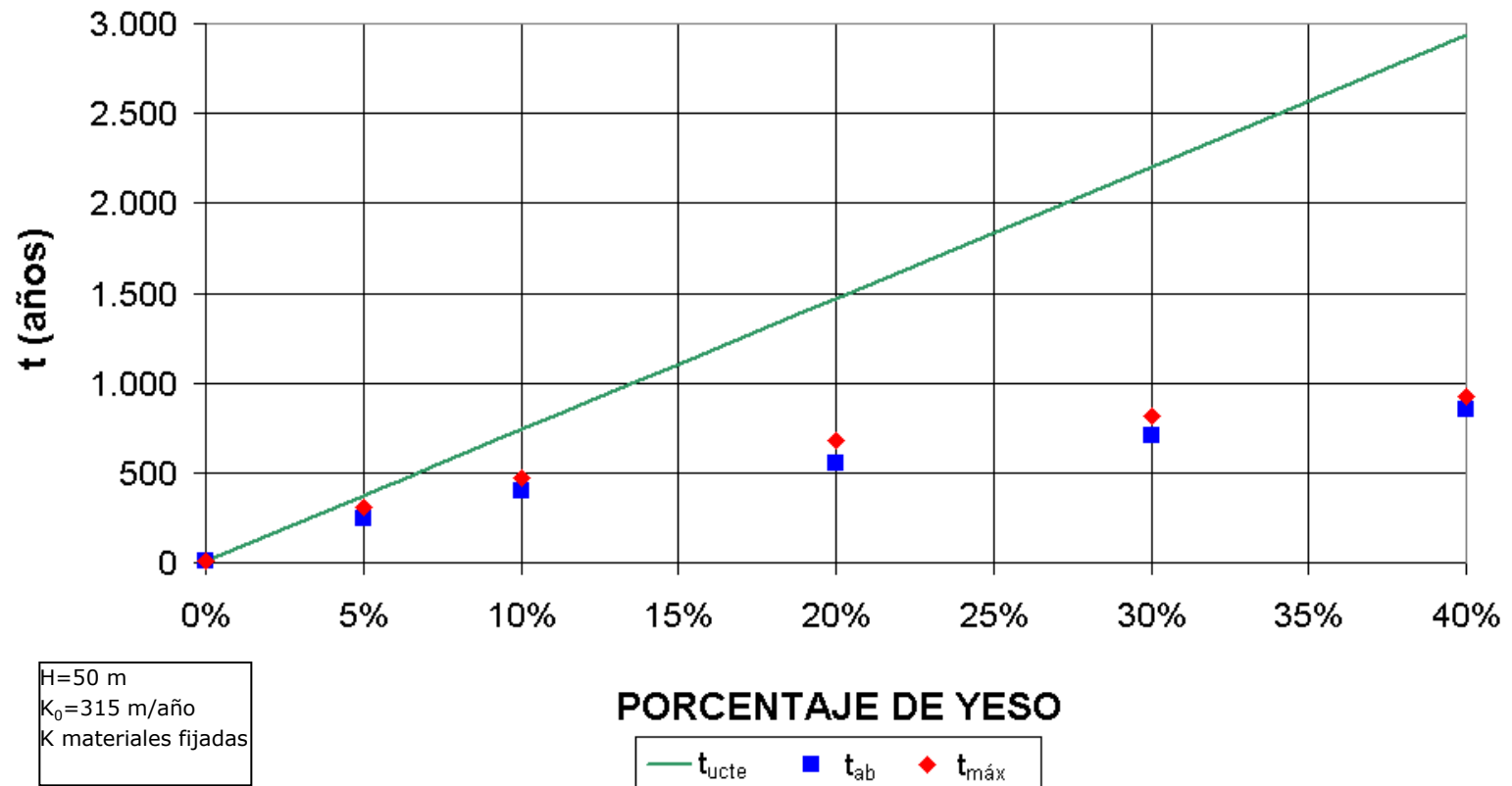
6.1. Campaña de experimentación numérica

PRESA HOMOGÉNEA SIN PANTALLA (L/H=6,25) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)



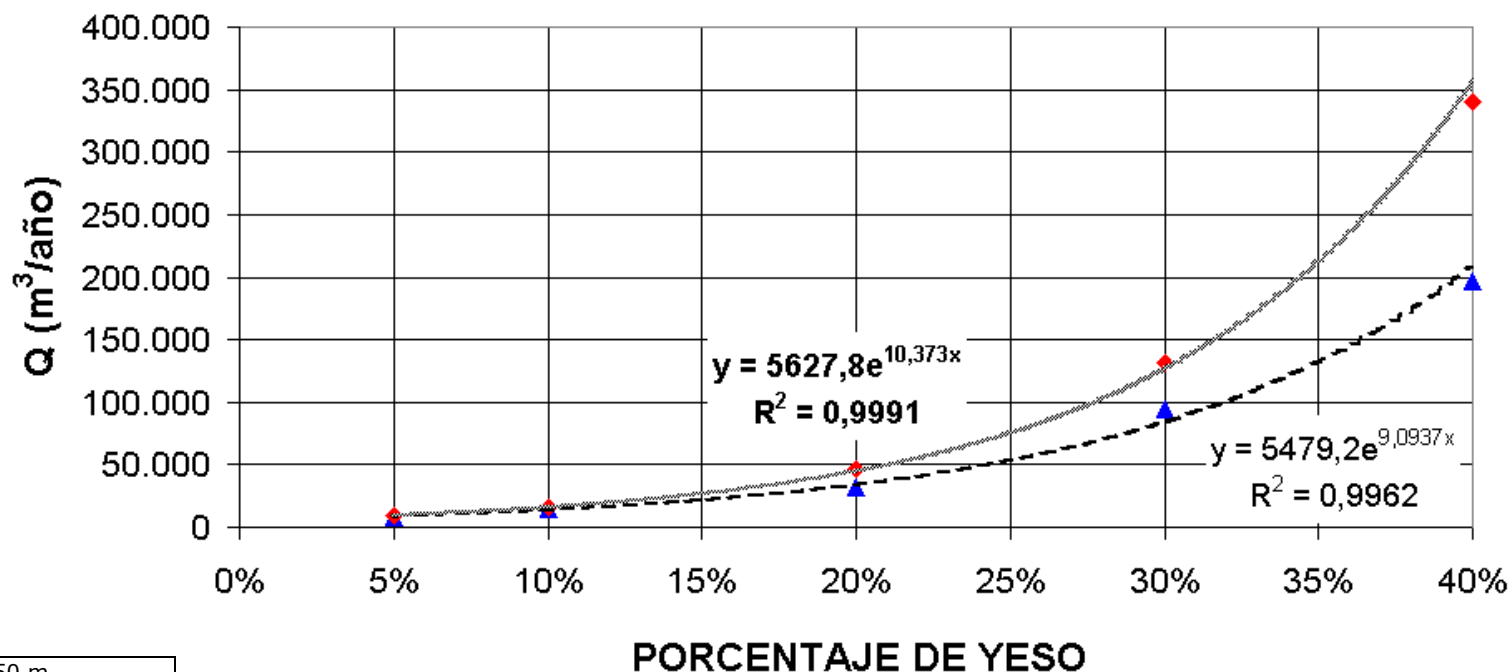
6.1. Campaña de experimentación numérica

PRESA HOMOGÉNEA SIN PANTALLA ($L/H=6,25$) Y CON CAPA YESÍFERA ($E/H=3$)



6.1. Campaña de experimentación numérica

PRESA HOMOGÉNEA SIN PANTALLA (L/H=6,25) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)

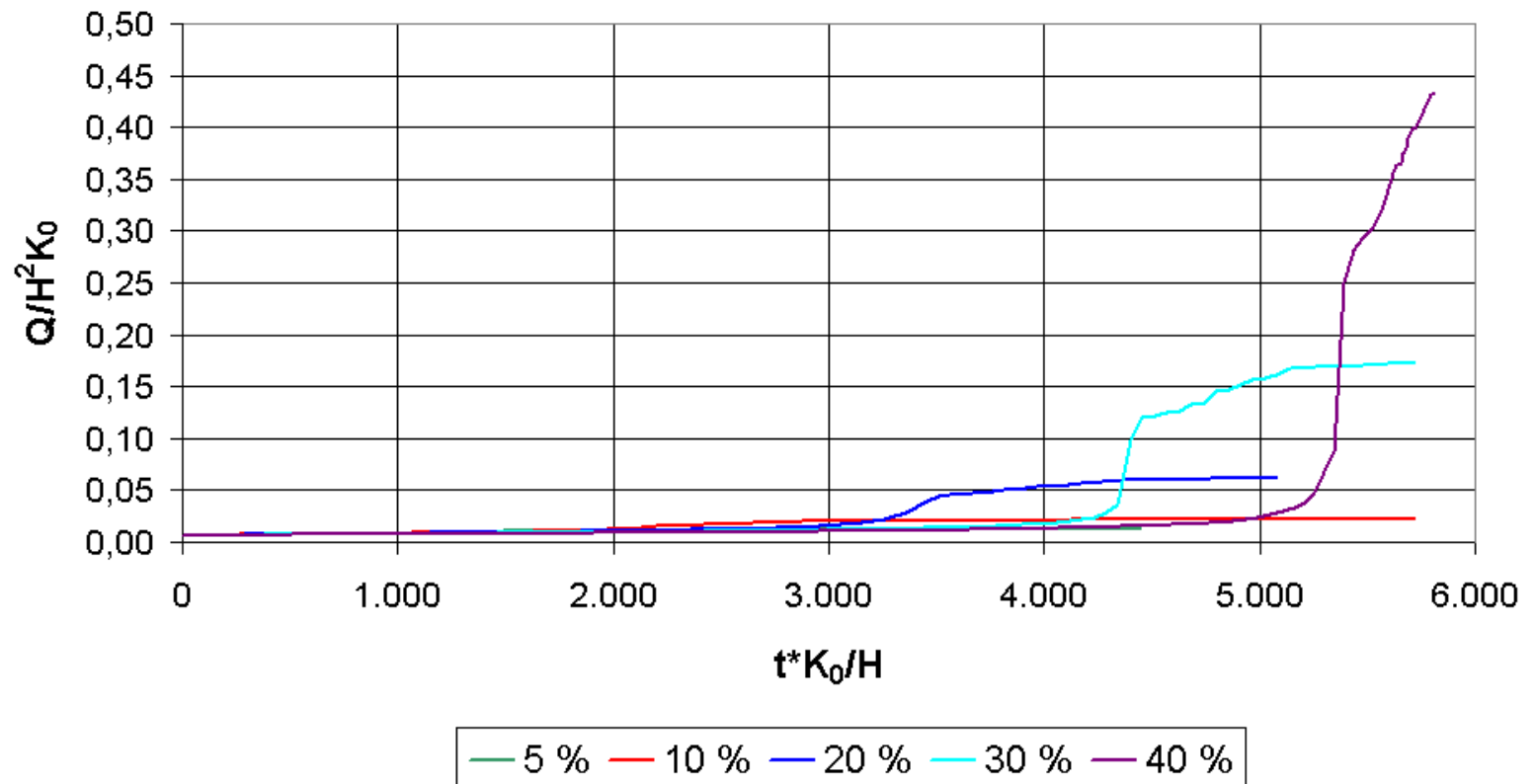


H=50 m
 $K_0=315 \text{ m/año}$
 K materiales fijadas

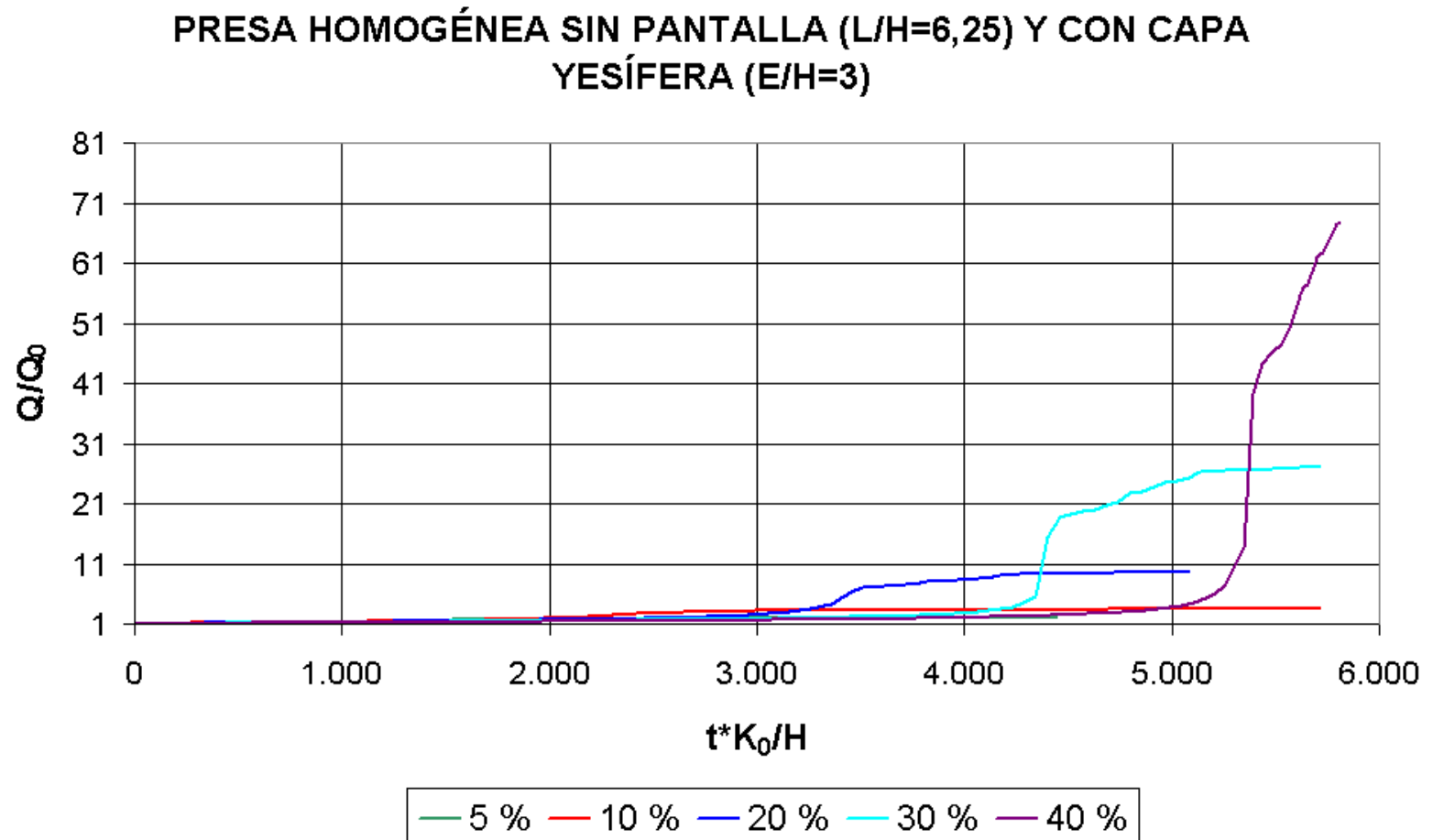
▲ Q_{ab} ♦ $Q_{máx}$ -- Exponencial (Q_{ab}) — Exponencial ($Q_{máx}$)

6.1. Campaña de experimentación numérica

PRESA HOMOGÉNEA SIN PANTALLA ($L/H=6,25$) Y CON CAPA YESÍFERA ($E/H=3$)

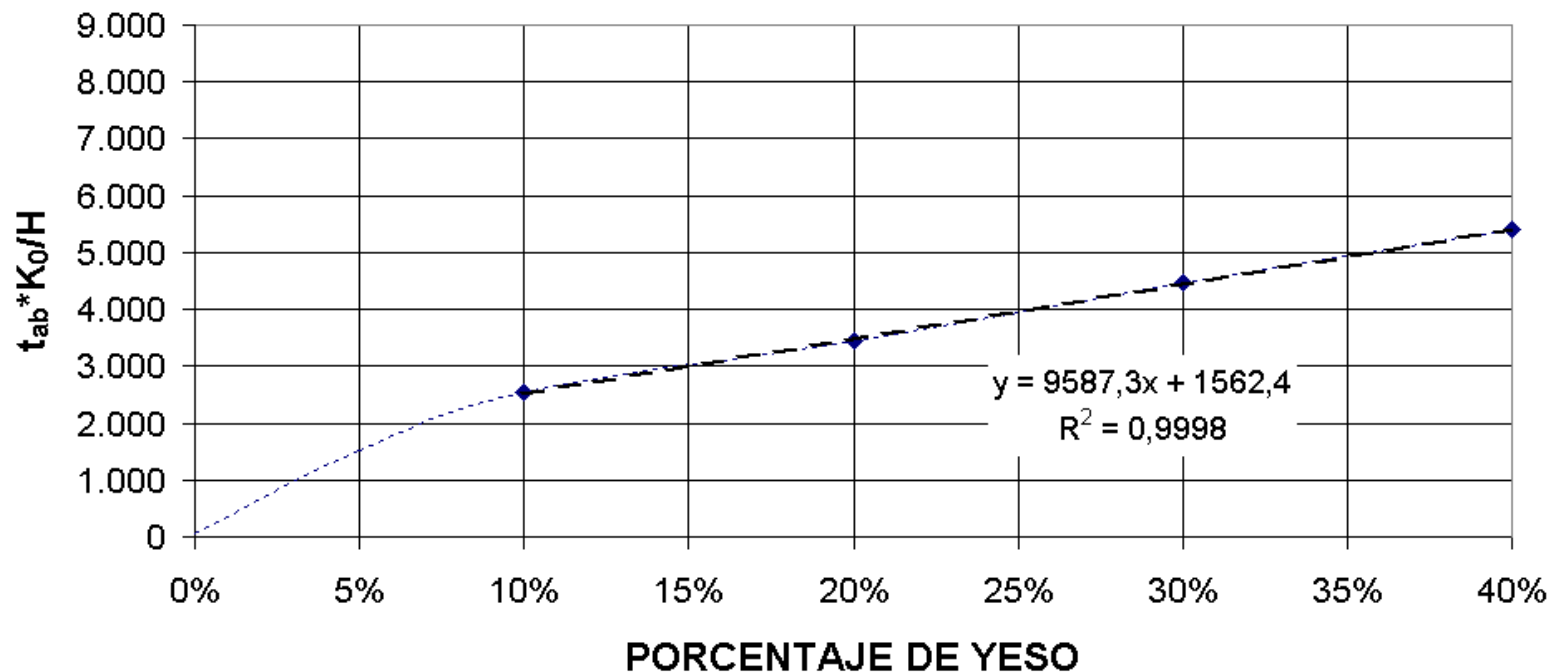


6.1. Campaña de experimentación numérica



6.1. Campaña de experimentación numérica

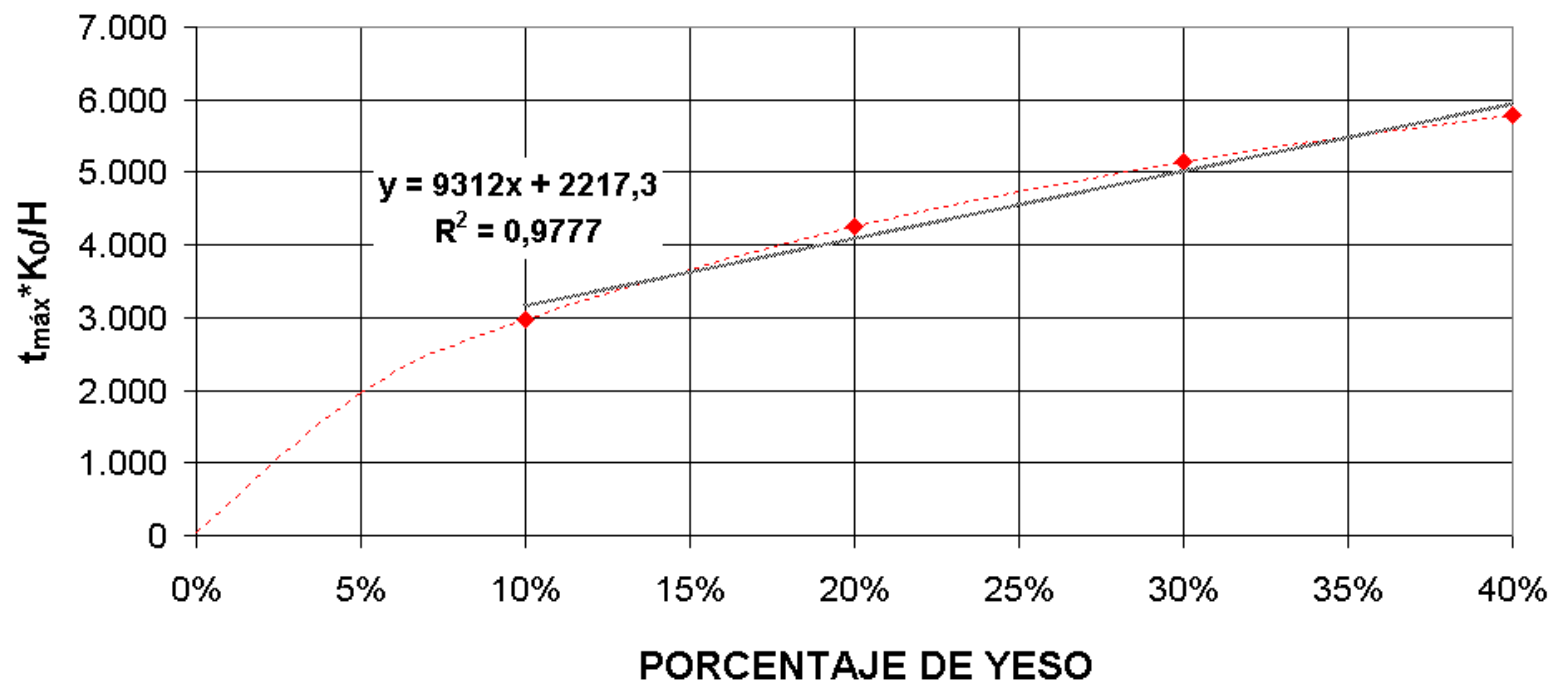
PRESA HOMOGÉNEA SIN PANTALLA (L/H=6,25) Y CON CAPA
YESÍFERA (E/H=3)



◆ adim t_{ab} (10-40%) adim t_{ab} — — Lineal (adim t_{ab} (10-40%))

6.1. Campaña de experimentación numérica

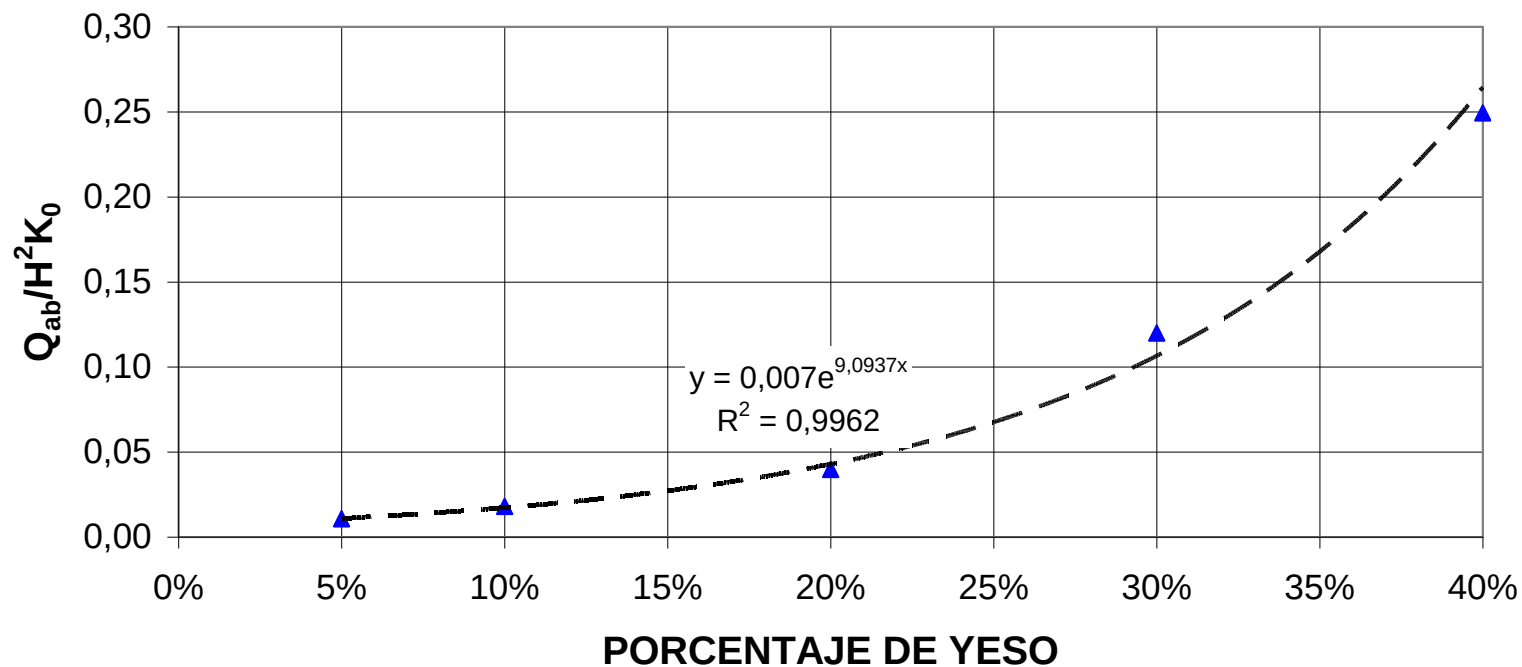
PRESA HOMOGÉNEA SIN PANTALLA (L/H=6,25) Y CON CAPA
YESÍFERA (E/H=3)



◆ adim $t_{\text{máx}}$ (10-40%) - - - - - adim $t_{\text{máx}}$ — Lineal (adim $t_{\text{máx}}$ (10-40%))

6.1. Campaña de experimentación numérica

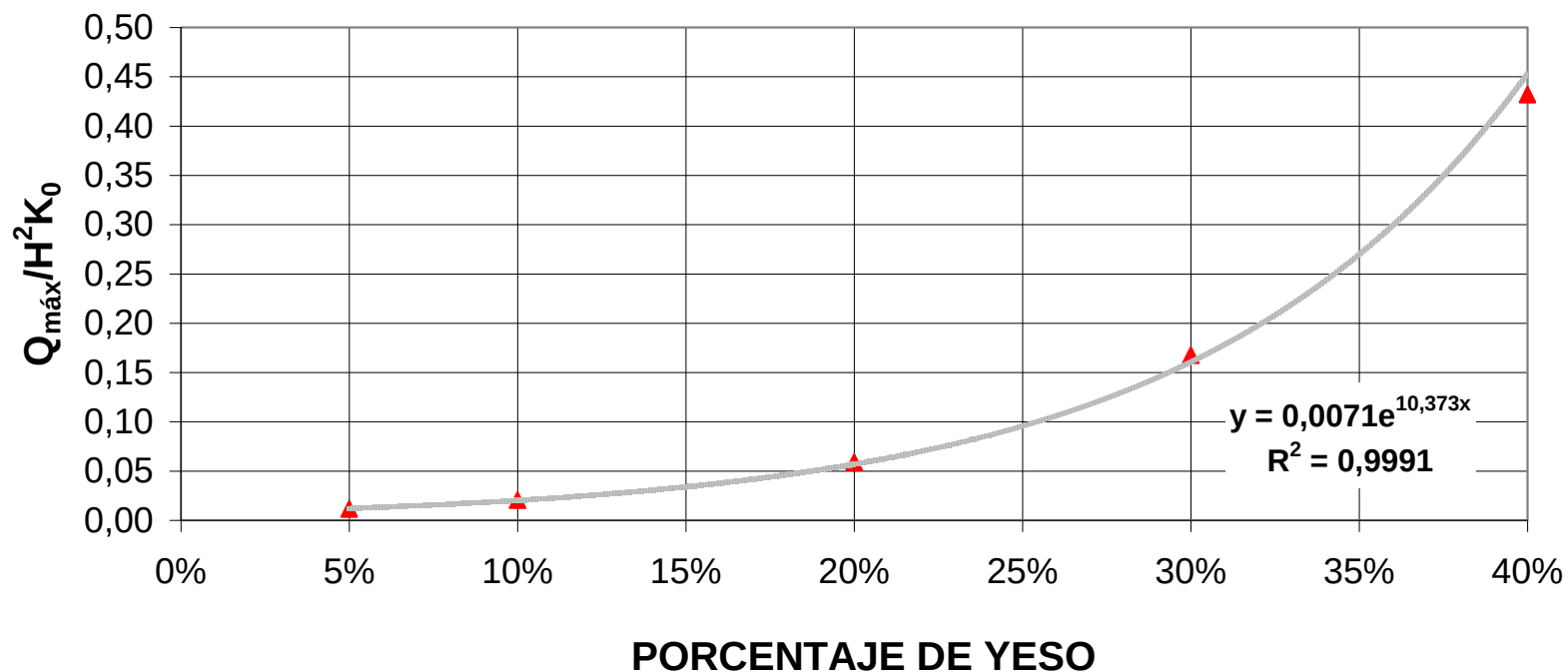
PRESA HOMOGÉNEA SIN PANTALLA (L/H=6,25) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)



▲ adim Q_{ab} — - Exponencial (adim Q_{ab})

6.1. Campaña de experimentación numérica

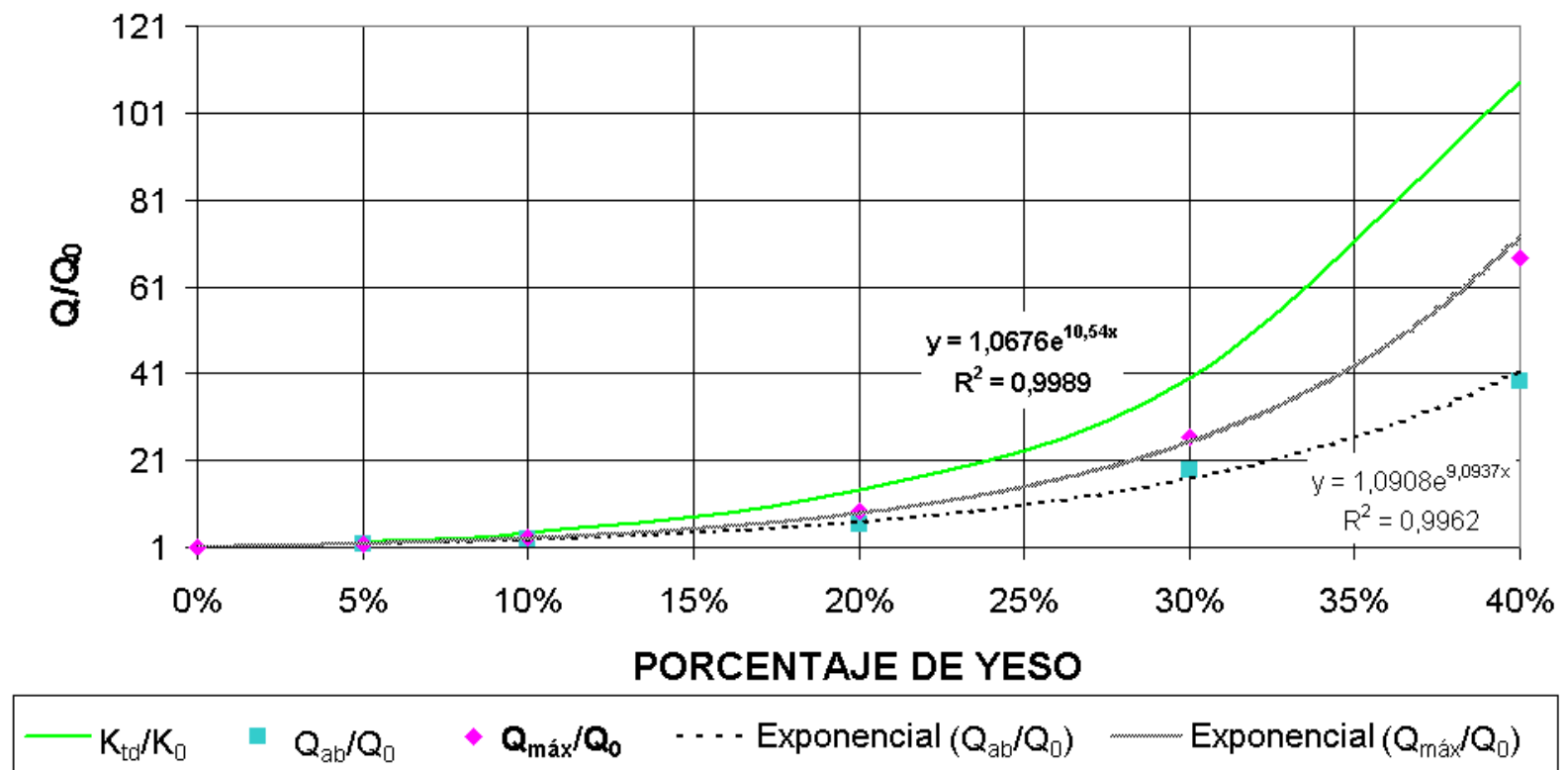
PRESA HOMOGÉNEA SIN PANTALLA (L/H=6,25) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)



▲ adim $Q_{\text{máx}}$ — Exponencial (adim $Q_{\text{máx}}$)

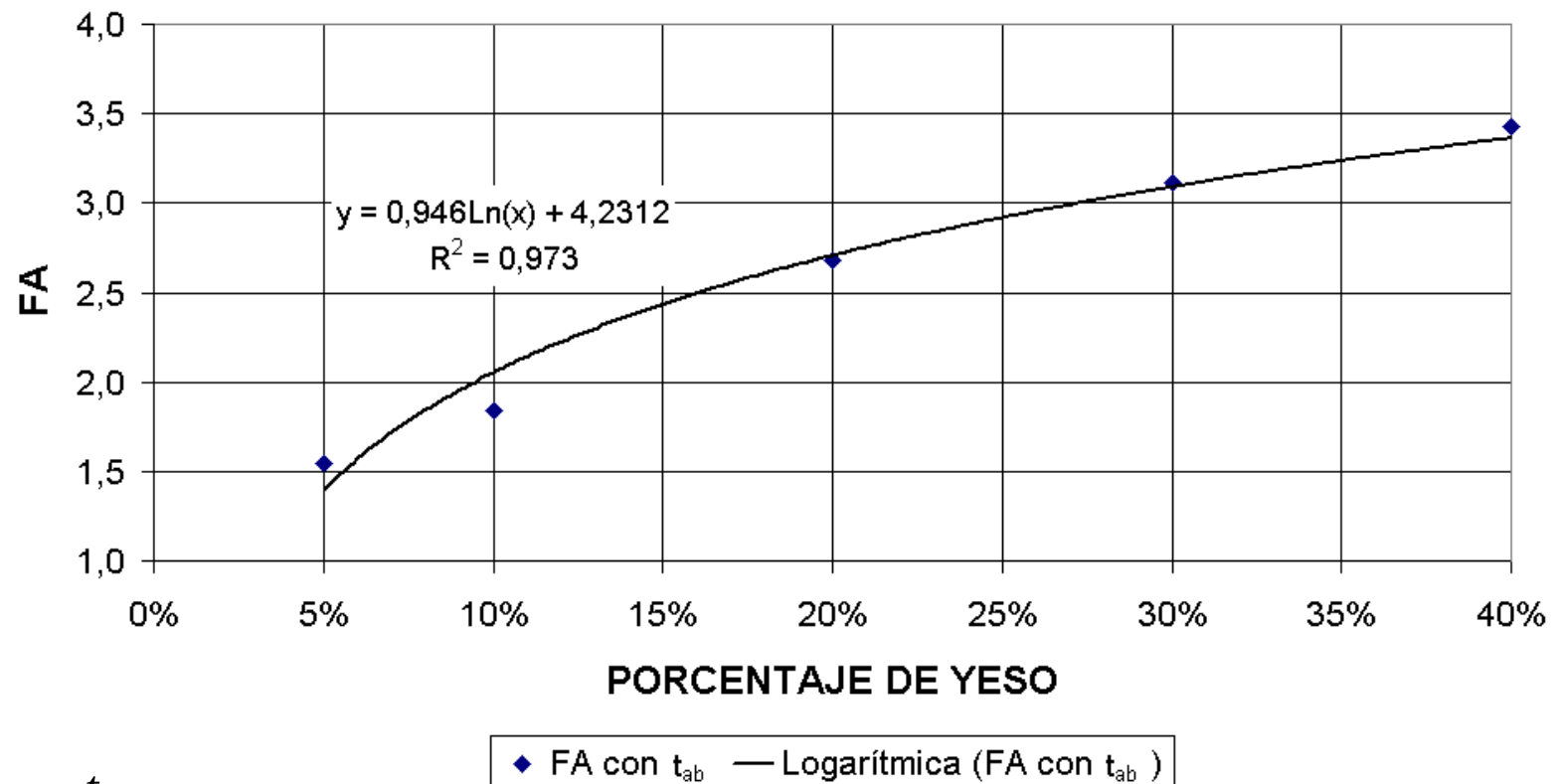
6.1. Campaña de experimentación numérica

PRESA HOMOGÉNEA SIN PANTALLA (L/H=6,25) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)



6.1. Campaña de experimentación numérica

PRESA HOMOGÉNEA SIN PANTALLA (L/H=6,25) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)



$$FA = \frac{t_{ucte}}{t_{ab}}$$

6.1. Campaña de experimentación numérica

PORCENTAJE (FICHERO)	TIPOLOGÍA PRESA	E CAPA YESÍFERA	DIRECTORIO	PARÁMETROS ADIMENSIONALES					
				Q_0^*	t_{ab}^*	Q_{ab}^*	Q_{ab}/Q_0	t_{ucte}^*	FA
5%	HOMOGÉNEA	3H	H3H	0,00638	1526	0,01068	1,67	2355	1,54
		1H	H1H	0,00284	1469	0,00527	1,86	2195	1,49
		H/5	H0.2H	0,00064	1802	0,00125	1,94	2706	1,50
	HOMOGÉNEA CON PANTALLA CENTRADA	3H1	HPC3H1	0,00603	1989	0,01046	1,73	2706	1,36
		3H0.5	HPC3H0.5	0,00630	1535	0,01020	1,62	2511	1,64
		1H	HPC1H	0,00092	5727	0,00108	1,18	6478	1,13
		H/5	HPC0.2H	0,00024	6162	0,00029	1,20	7237	1,17
	ZONIFICADA	3H	Z3H	0,01319	111	0,01656	1,26	155	1,40
		1H	Z1H	0,00741	111	0,01030	1,39	142	1,28
		H/5	Z0.2H	0,00237	96	0,00381	1,61	181	1,88
	ZONIFICADA CON TAPIZ	3H	ZT3H	0,00950	411	0,01317	1,39	594	1,45
		1H	ZT1H	0,00468	393	0,00707	1,51	560	1,42
		H/5	ZT0.2H	0,00125	466	0,00229	1,83	719	1,54
	ZONIFICADA CON TAPIZ MÁS LARGO	3H	ZTT3H	0,00602	1830	0,00914	1,52	2756	1,51
		1H	ZTT1H	0,00253	1919	0,00439	1,74	2619	1,36
		H/5	ZTT0.2H	0,00059	2347	0,00108	1,84	3329	1,42
	ZONIFICADA CON TAPIZ Y CON PANTALLA ARRIBA	3H1	ZTPR3H1	0,00794	839	0,01216	1,53	1136	1,35
		3H0.5	ZTPR3H0.5	0,00891	536	0,01268	1,42	785	1,46
		1H	ZTPR1H	0,00101	2514	0,00109	1,08	2842	1,13
		H/5	ZTPR0.2H	0,00028	2514	0,00030	1,09	3002	1,19
	ZONIFICADA CON PANTALLA CENTRADA	3H1	ZPC3H1	0,01060	420	0,01508	1,42	516	1,23
		3H0.5	ZPC3H0.5	0,01228	168	0,01598	1,30	276	1,64
		1H	ZPC1H	0,00107	1109	0,00111	1,04	1134	1,02
		H/5	ZPC0.2H	0,00028	1256	0,00029	1,04	1273	1,01
	ZONIFICADA CON TAPIZ Y CON PANTALLA CENTRADA	3H1	ZTPC3H1	0,00842	768	0,01304	1,55	1103	1,44
		3H0.5	ZTPC3H0.5	0,00921	506	0,01323	1,44	732	1,45
		1H	ZTPC1H	0,00101	2325	0,00108	1,07	2908	1,25
		H/5	ZTPC0.2H	0,00026	2615	0,00028	1,09	3494	1,34

6.1. Campaña de experimentación numérica

❖ RESULTADOS PARA COMPARAR SECCIONES TIPO

15 TIPOS DE CIMIENTO: porcentaje de yeso (5-10-20-30-40%) y espesor de capa yesífera (0,2-1-3H)

- tiempo adimensional-caudal adimensional ($tadim - Qadim$)

$$\boxed{\frac{tK_0}{H}; \frac{Q}{K_0H^2}}$$

- tiempo adimensional-caudal filtrado/caudal inicial ($tadim - Q/Q_0$)

$$\boxed{\frac{tK_0}{H}; \frac{Q}{Q_0}}$$

6.1. Campaña de experimentación numérica

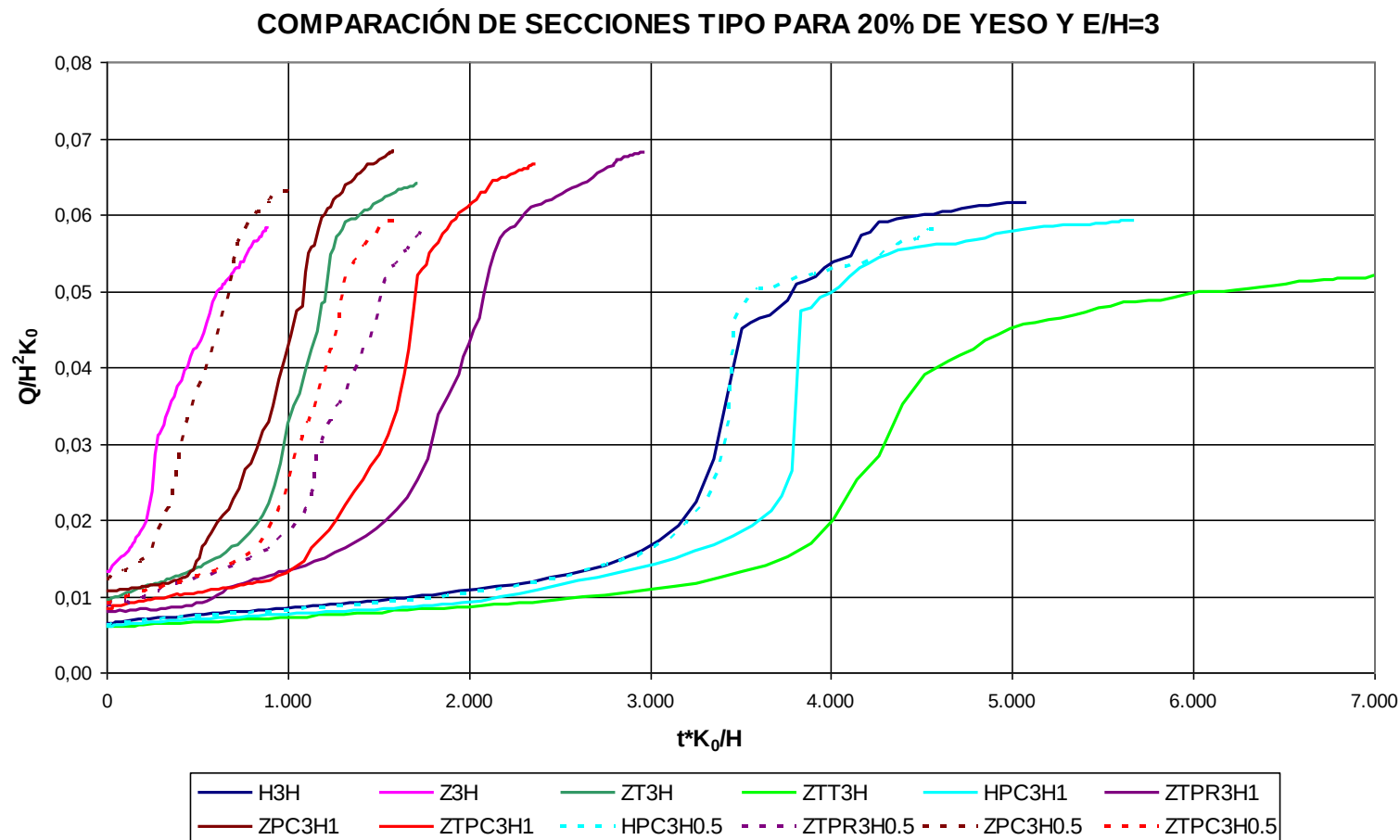


Gráfico t adim - Q adim

6.1. Campaña de experimentación numérica

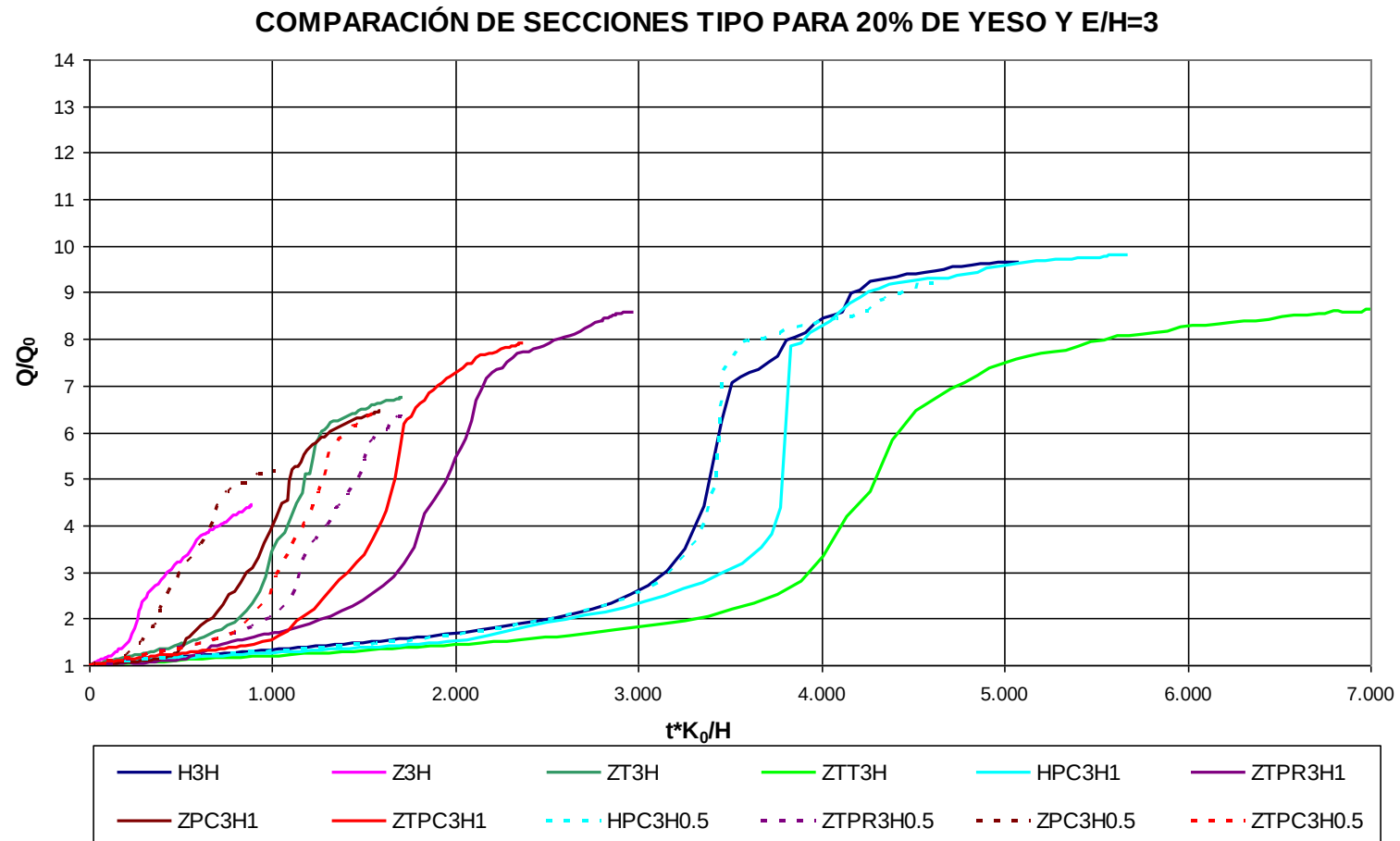


Gráfico t adim – Q/Q_0

6. CRITERIOS DE DISEÑO DE PRESAS SOBRE CIMIENTOS YESÍFEROS

6.1. CAMPAÑA DE EXPERIMENTACIÓN NUMÉRICA

**6.2. CONCLUSIONES DE LA CAMPAÑA DE
EXPERIMENTACIÓN NUMÉRICA VÁLIDAS
PARA EL DISEÑO**

6.3. FORMULACIONES PARA LOS PARÁMETROS
REPRESENTATIVOS

6.4. CRITERIOS DE DISEÑO DE PRESAS SOBRE
CIMIENTOS YESÍFEROS

6.2. Conclusiones de la campaña de exp. numérica

- Influencia de los parámetros
 - Porcentaje de yeso
 - Espesor de capa yesífera
 - Sección tipo de presa
 - Relación de permeabilidades entre los materiales
- Criterios de elección de la sección tipo de la presa
 - Fijando un tiempo en el que se deba cumplir Q/Q_0
 - Fijando un tiempo en el que se deba cumplir Q

	CIMENTACIÓN IMPERMEABLE	CIMENT. SEMIPERMEABLE	CIMENT. PERMEABLE
Q (l/s/m)	0,03	0,1	0,3
Q (m ³ /año/m)	946,08	3.153,60	9.460,80

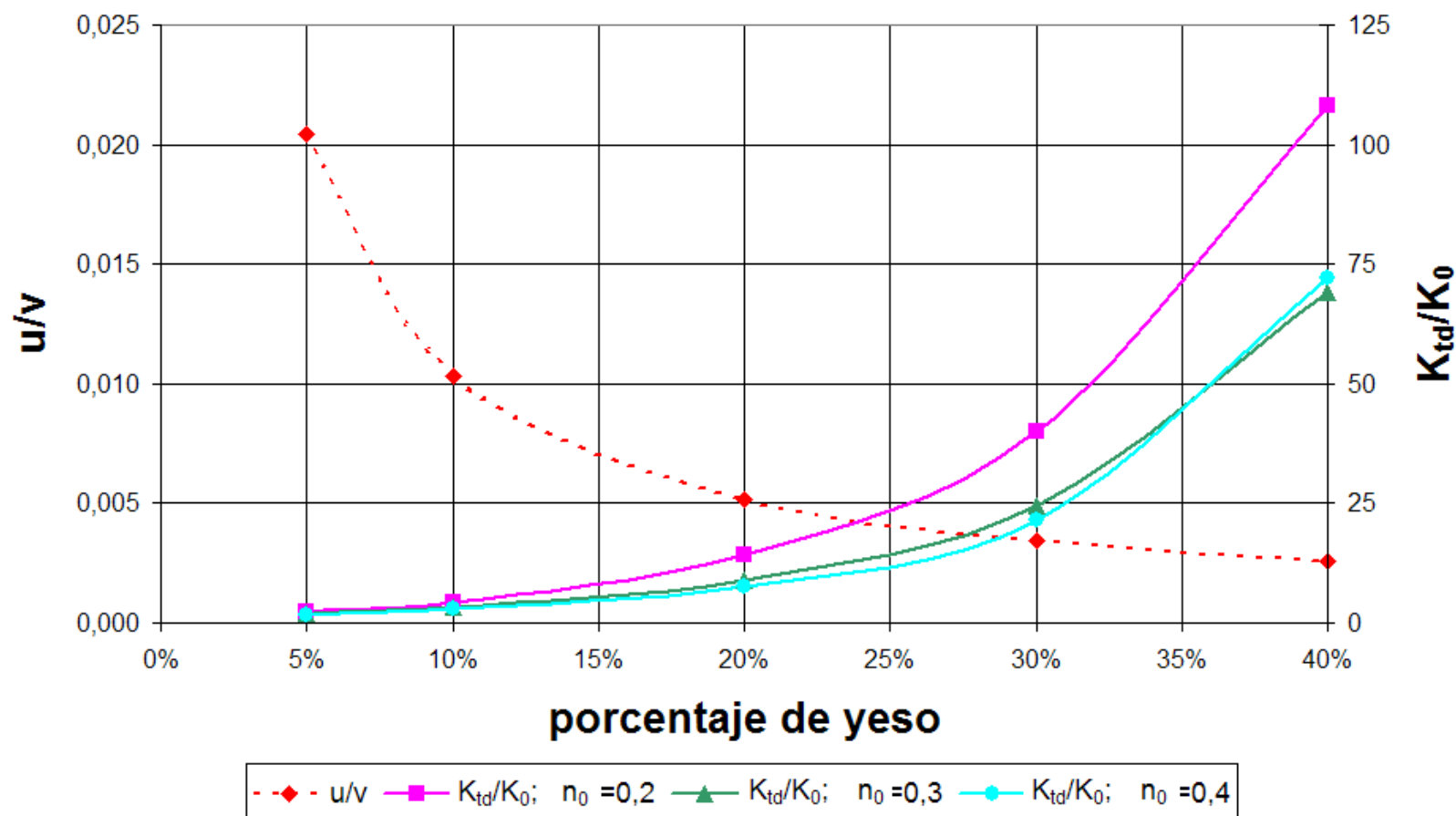
“Control de comportamiento de presas durante su fase de puesta en carga”: De Cea, J.C., 2002

6.2. Conclusiones de la campaña de exp. numérica

- INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS
 - **Porcentaje de yeso**
 - La evolución del caudal filtrado a través del cemento con respecto al tiempo, para cualquier sección tipo, es más rápida, pero menos adversa si el porcentaje de yeso es menor.

6.2. Conclusiones de la campaña de exp. numérica

RELACIÓN DE u/v Y K_{TD}/K_0 EN FUNCIÓN DEL % DE YESO

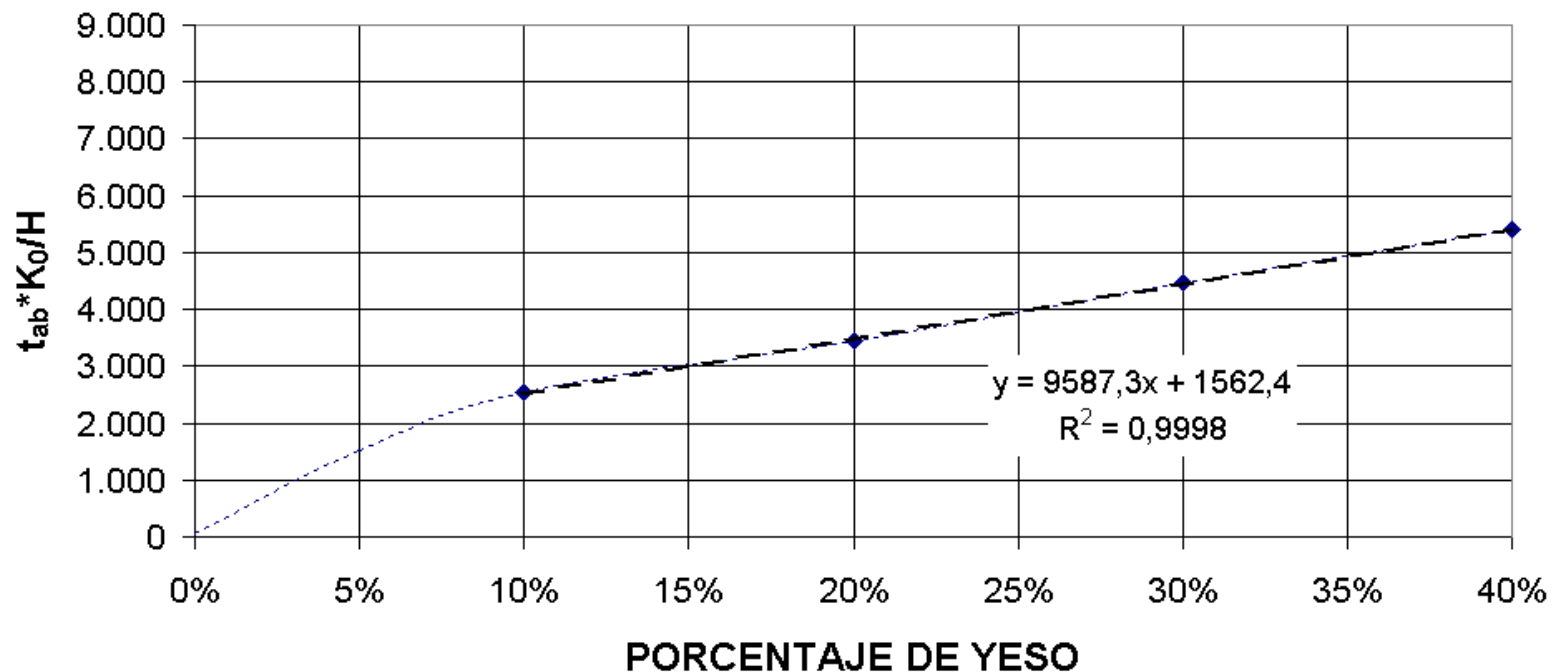


6.2. Conclusiones de la campaña de exp. numérica

- INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS
 - **Porcentaje de yeso**
 - La evolución del caudal filtrado a través del cemento con respecto al tiempo, para cualquier sección tipo, es más rápida, pero menos adversa si el porcentaje de yeso es menor.
 - La relación entre el porcentaje de yeso y el t_{ab} (o $t_{máx}$) es prácticamente lineal para porcentajes de yeso entre 10 y 40%, para cualquier sección tipo.

6.2. Conclusiones de la campaña de exp. numérica

PRESA HOMOGÉNEA SIN PANTALLA (L/H=6,25) Y CON CAPA
YESÍFERA (E/H=3)



◆ adim t_{ab} (10-40%) adim t_{ab} — — Lineal (adim t_{ab} (10-40%))

6.2. Conclusiones de la campaña de exp. numérica

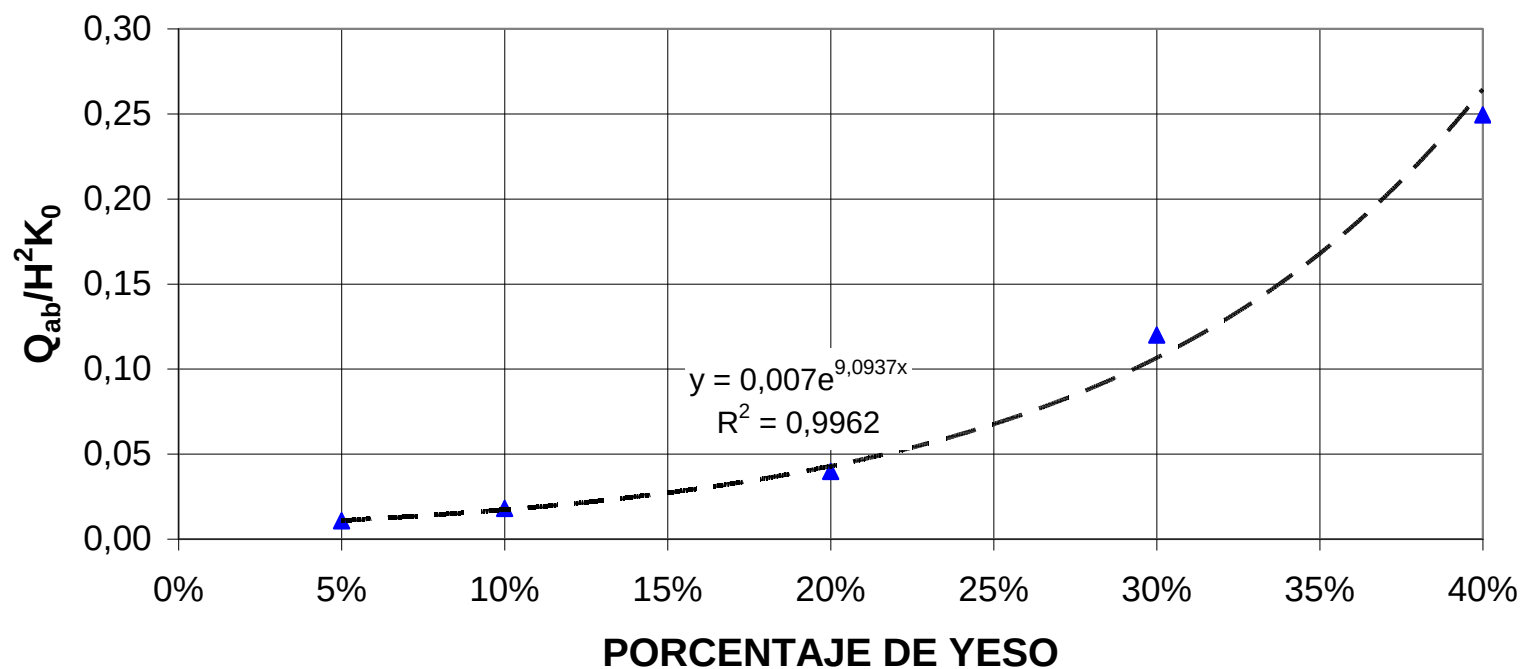
➤ INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS

• **Porcentaje de yeso**

- La evolución del caudal filtrado a través del cimientado con respecto al tiempo, para cualquier sección tipo, es más rápida, pero menos adversa si el porcentaje de yeso es menor.
- La relación entre el porcentaje de yeso y el t_{ab} (o $t_{máx}$) es prácticamente lineal para porcentajes de yeso entre 10 y 40%, para cualquier sección tipo.
- La relación entre el porcentaje de yeso y el Q_{ab} (o $Q_{máx}$) depende de la sección tipo:
 - ✓ Exponencial (sin pantalla o pantalla sin empotrar)
 - ✓ Logarítmica (pantalla empotrada en capa más impermeable)

6.2. Conclusiones de la campaña de exp. numérica

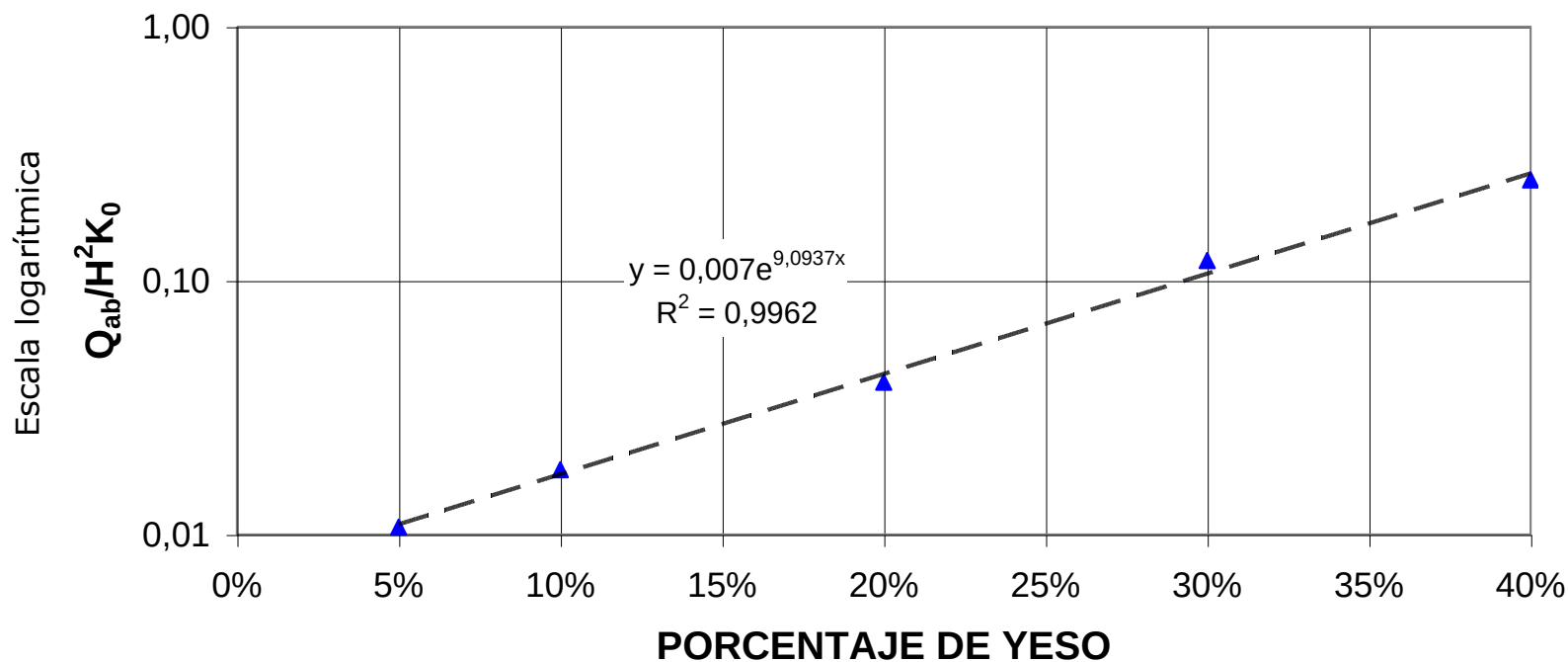
PRESA HOMOGÉNEA SIN PANTALLA (L/H=6,25) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)



▲ adim Q_{ab} — - Exponencial (adim Q_{ab})

6.2. Conclusiones de la campaña de exp. numérica

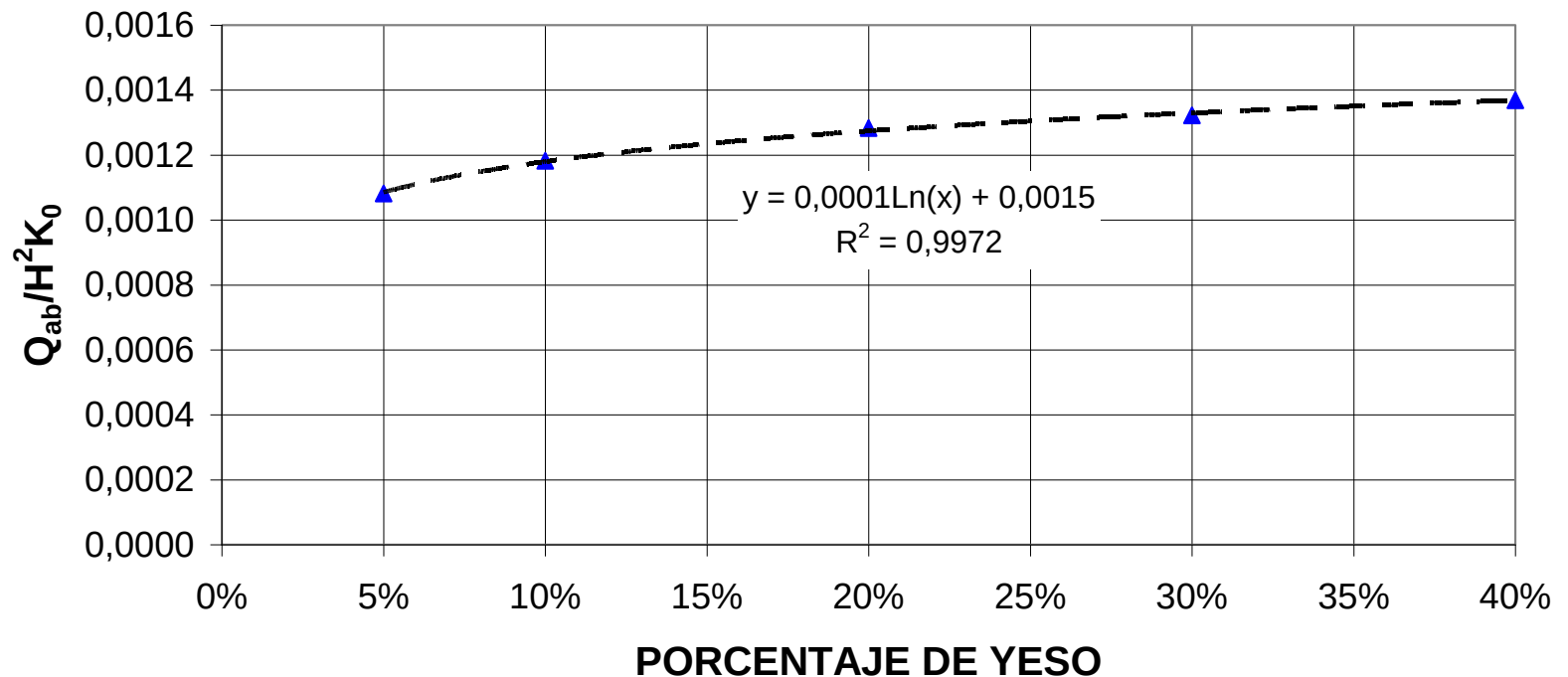
PRESA HOMOGÉNEA SIN PANTALLA (L/H=6,25) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)



▲ adim Q_{ab} - - Exponencial (adim Q_{ab})

6.2. Conclusiones de la campaña de exp. numérica

**PRESA HOMOGÉNEA (L/H=6,25) CON PANTALLA (P/H=1) Y CON
CAPA YESÍFERA (E/H=1)**



▲ adim Q_{ab} — - Logarítmica (adim Q_{ab})

6.2. Conclusiones de la campaña de exp. numérica

➤ INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS

• **Porcentaje de yeso**

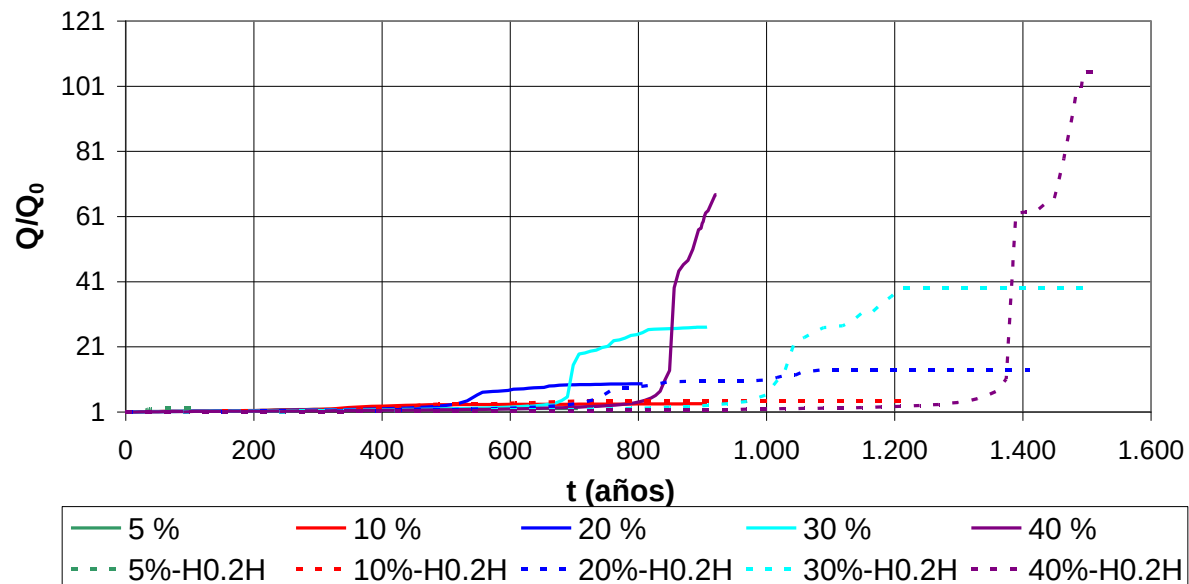
- La evolución del caudal filtrado a través del cemento con respecto al tiempo, para cualquier sección tipo, es más rápida, pero menos adversa si el porcentaje de yeso es menor.
- La relación entre el porcentaje de yeso y el t_{ab} (o $t_{m\acute{a}x}$) es prácticamente lineal para porcentajes de yeso entre 10 y 40%, para cualquier sección tipo.
- La relación entre el porcentaje de yeso y el Q_{ab} (o $Q_{m\acute{a}x}$) depende de la sección tipo:
 - ✓ Exponencial (sin pantalla o pantalla sin empotrar)
 - ✓ Logarítmica (pantalla empotrada en capa más impermeable)
- La forma de avance es más extendida si el porcentaje es menor.

6.2. Conclusiones de la campaña de exp. numérica

- Espesor de la capa yesífera E**

- A igualdad de otros factores, si E es mayor, el incremento de los caudales filtrados es menor, pero el avance es más rápido.

PRESA HOMOGÉNEA SIN PANTALLA (L/H=6,25) - COMPARACIÓN
CON CAPA YESÍFERA E/H=3 Y CON E/H=0,2



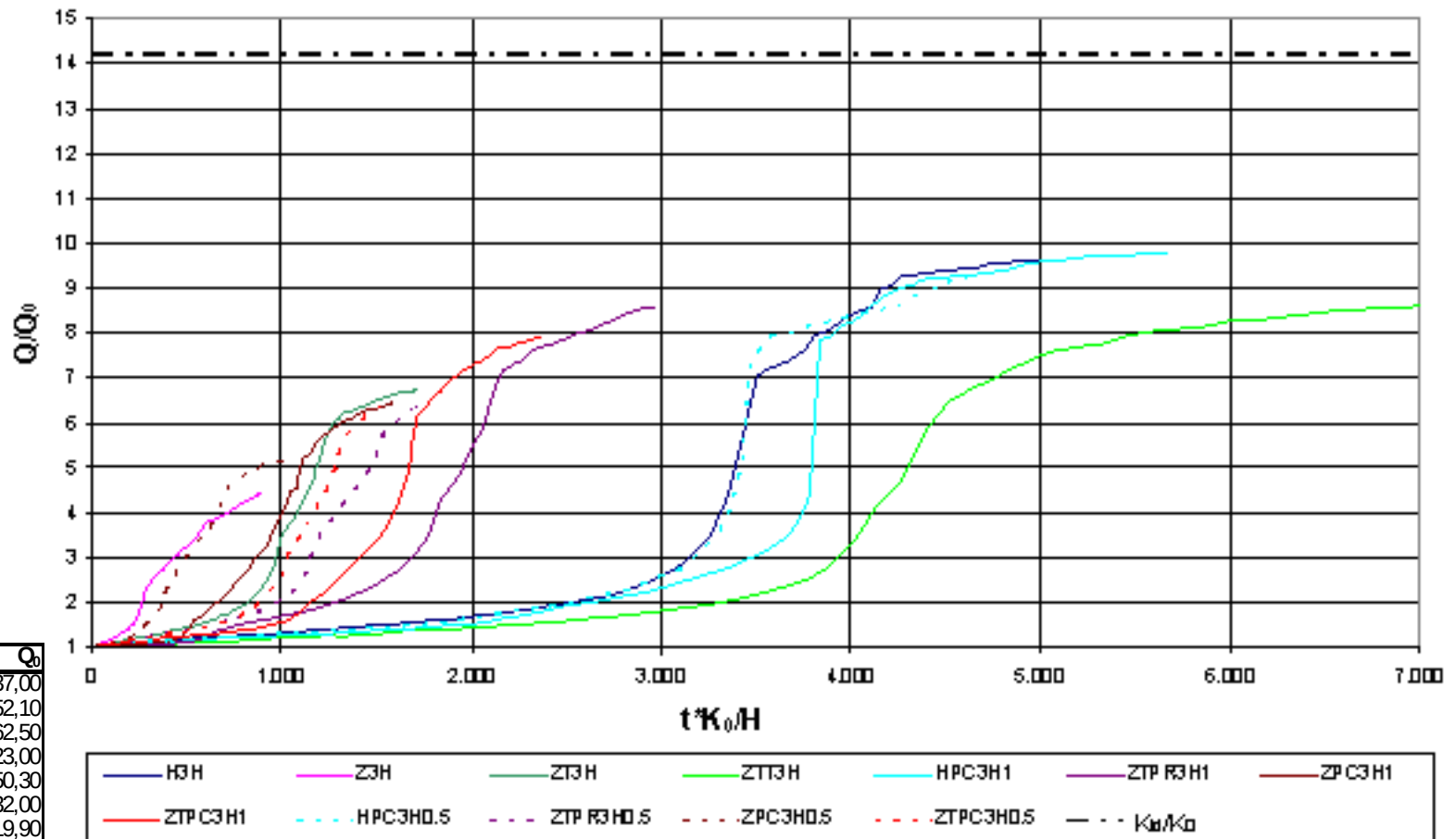
H=50 m
 $K_0=315$ m/año
K materiales fijadas

6.2. Conclusiones de la campaña de exp. numérica

- **Sección tipo de la presa**
 - Análisis de los resultados para 15 tipos de cimientos: las curvas de cada sección tipo están ordenadas por Q_0 , y este hecho hace que este dato sea determinante en la comparación de secciones.

6.2. Conclusiones de la campaña de exp. numérica

COMPARACIÓN DE SECCIONES TIPO PARA 20% DE YESO Y E/H=3



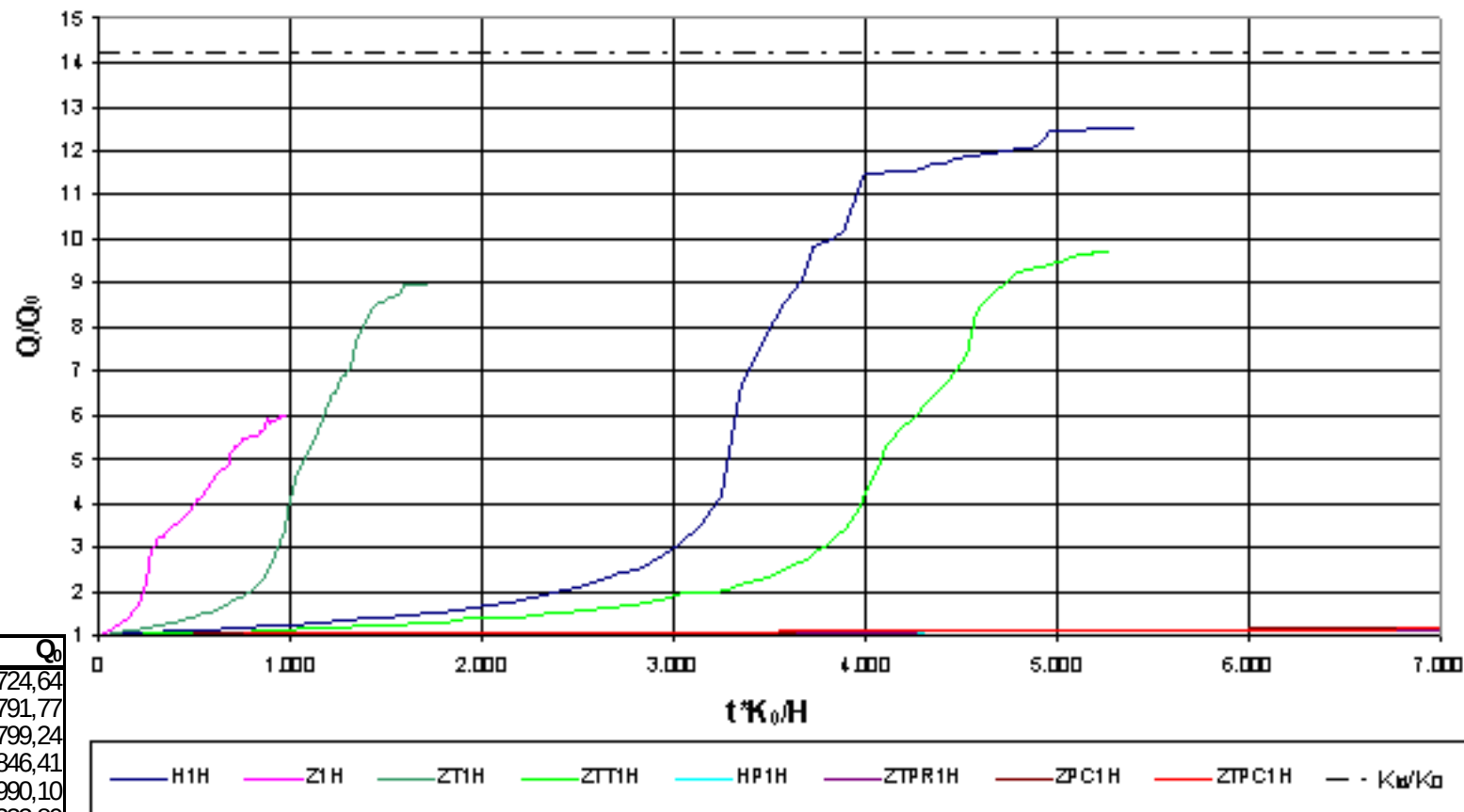
3H	Q_0
ZTT3H	4.737,00
HPC3H1	4.752,10
HPC3H0,5	4.962,50
H3H	5.023,00
ZTPR3H1	6.250,30
ZTPC3H1	6.632,00
ZTPR3H0,5	7.019,90
ZTPC3H0,5	7.250,30
ZT3H	7.480,20
ZPC3H1	8.345,00
ZPC3H0,5	9.674,40
Z3H	10.390,00

6.2. Conclusiones de la campaña de exp. numérica

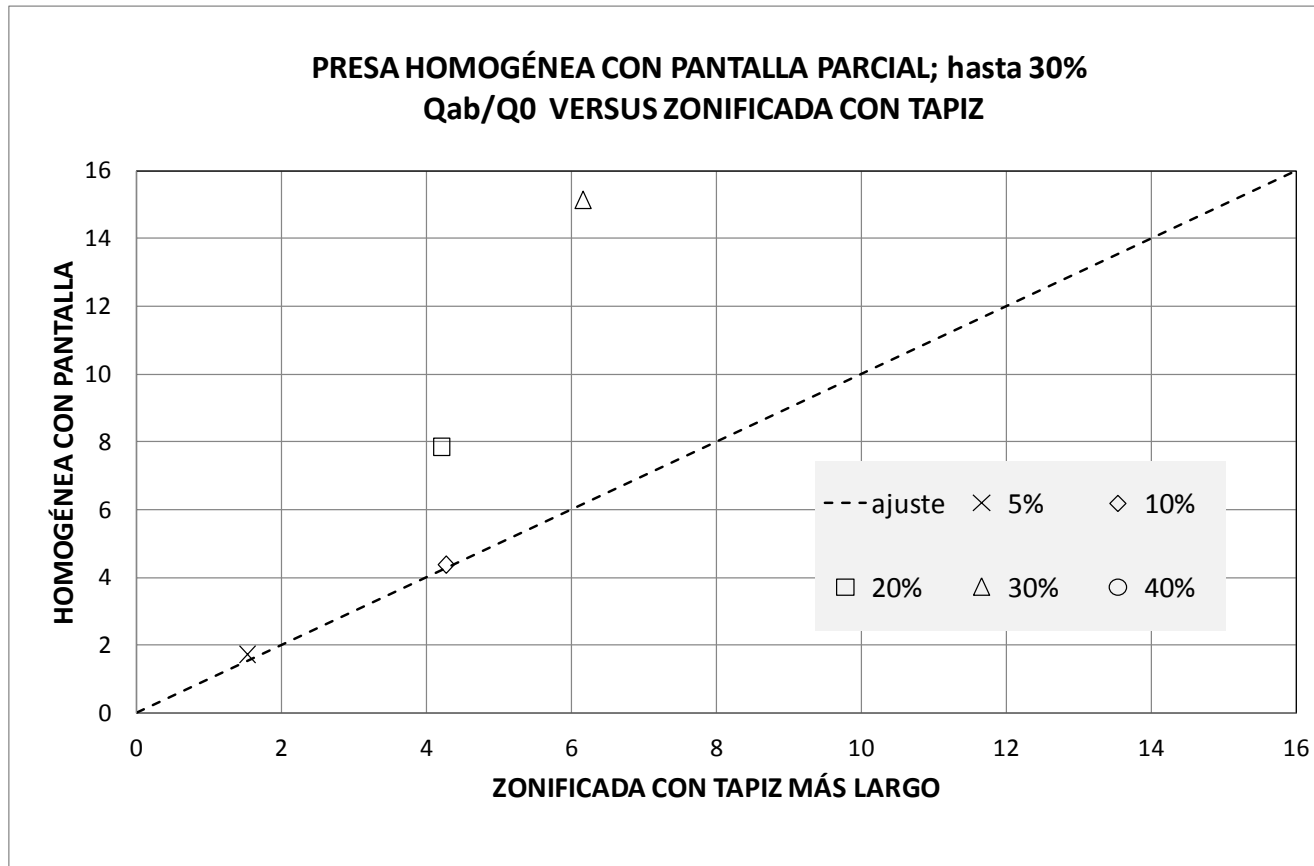
- **Espesor de la capa yesífera E**
 - A igualdad de otros factores, si E es mayor, el incremento de los caudales filtrados es menor, pero el avance es más rápido.
- **Sección tipo de la presa**
 - Análisis de los resultados para 15 tipos de cimienta: las curvas de cada sección tipo están ordenadas por Q_0 , y este hecho hace que este dato sea determinante en la comparación de secciones.
 - Que Q_0 sea mayor no implica que $Q_{máx}$ sea mayor.
 - Si la pantalla empotra en una capa más impermeable, la efectividad de la pantalla es prácticamente total para controlar la disolución (Q prácticamente no aumenta). Si no empotra, los caudales aumentan de forma más parecida al resto de secciones tipo, aunque con diferencias importantes entre todas ellas.

6.2. Conclusiones de la campaña de exp. numérica

COMPARACIÓN DE SECCIONES TIPO PARA 20% DE YESO Y E/H=1

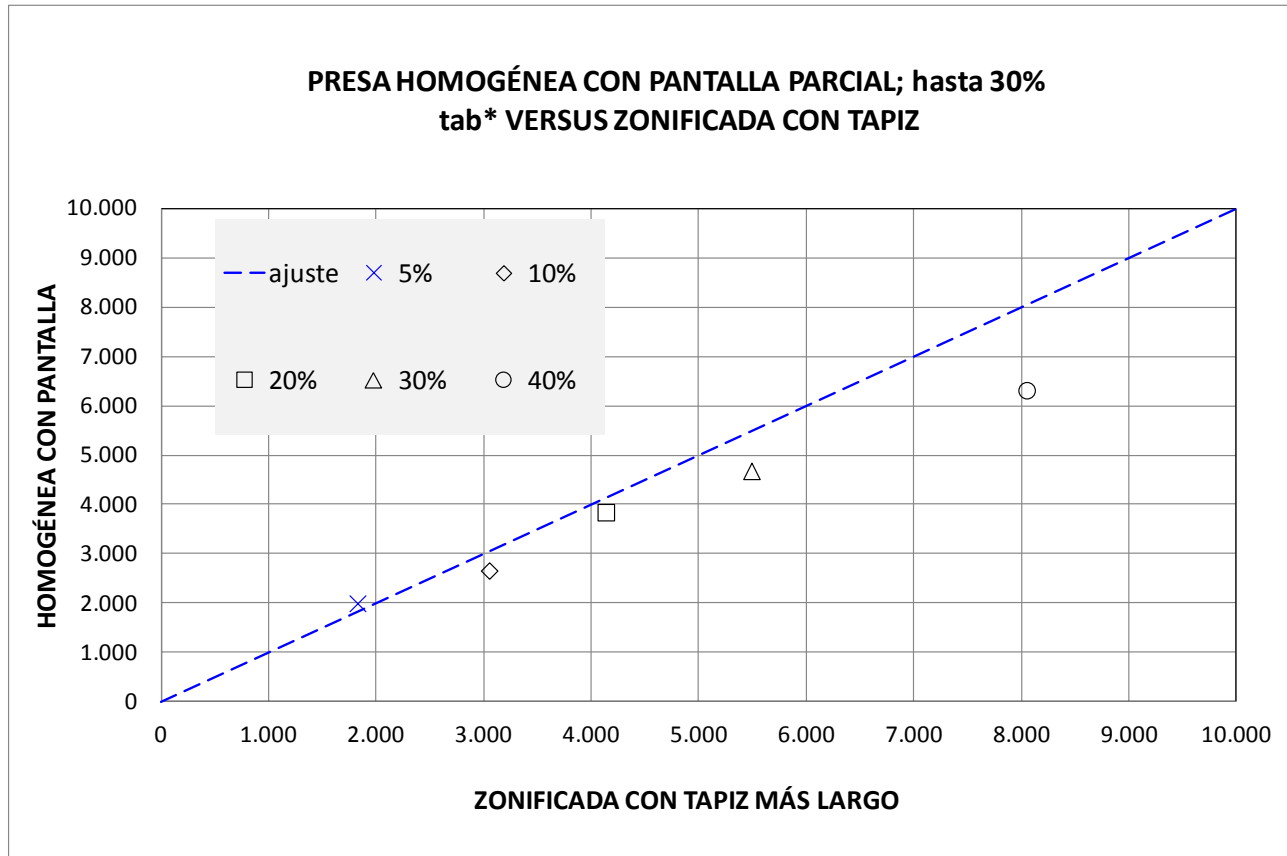


6.2. Conclusiones de la campaña de exp. numérica



Comparación tapiz-pantalla: si la capa yesífera es de gran espesor en comparación con la altura de la presa, un tapiz de una longitud equivalente al doble de la profundidad de la pantalla, es más eficaz que la pantalla

6.2. Conclusiones de la campaña de exp. numérica

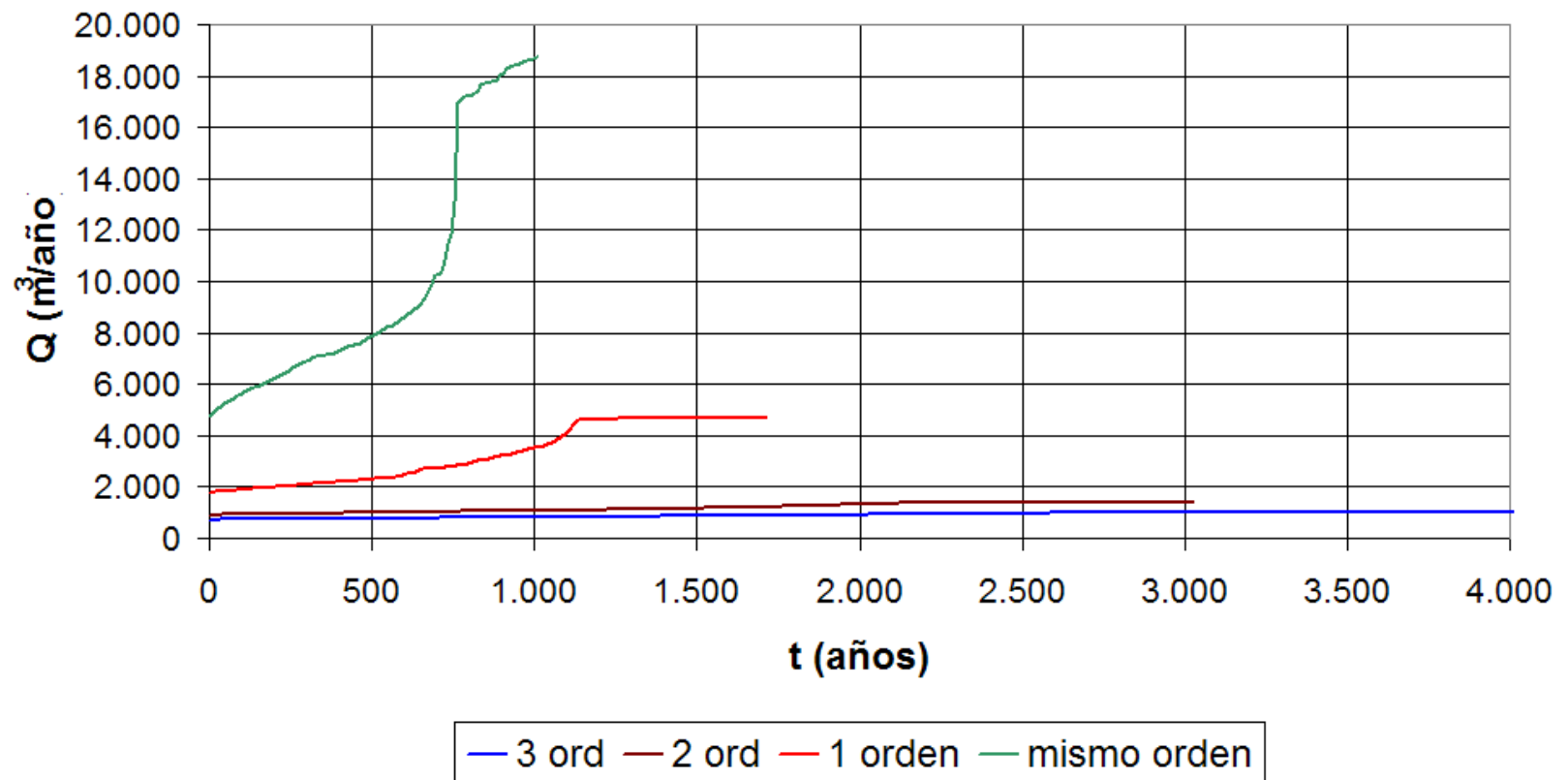


Comparación tapiz-pantalla: si la capa yesífera es de gran espesor en comparación con la altura de la presa, un tapiz de una longitud equivalente al doble de la profundidad de la pantalla, es más eficaz que la pantalla

6.2. Conclusiones de la campaña de exp. numérica

- Relación de permeabilidades entre los materiales**

PRESA HOMOGÉNEA ($L/H=6,25$) CON PANTALLA ($P/H=1$) Y CON
CAPA YESÍFERA ($E/H=1$). 20 % DE YESO



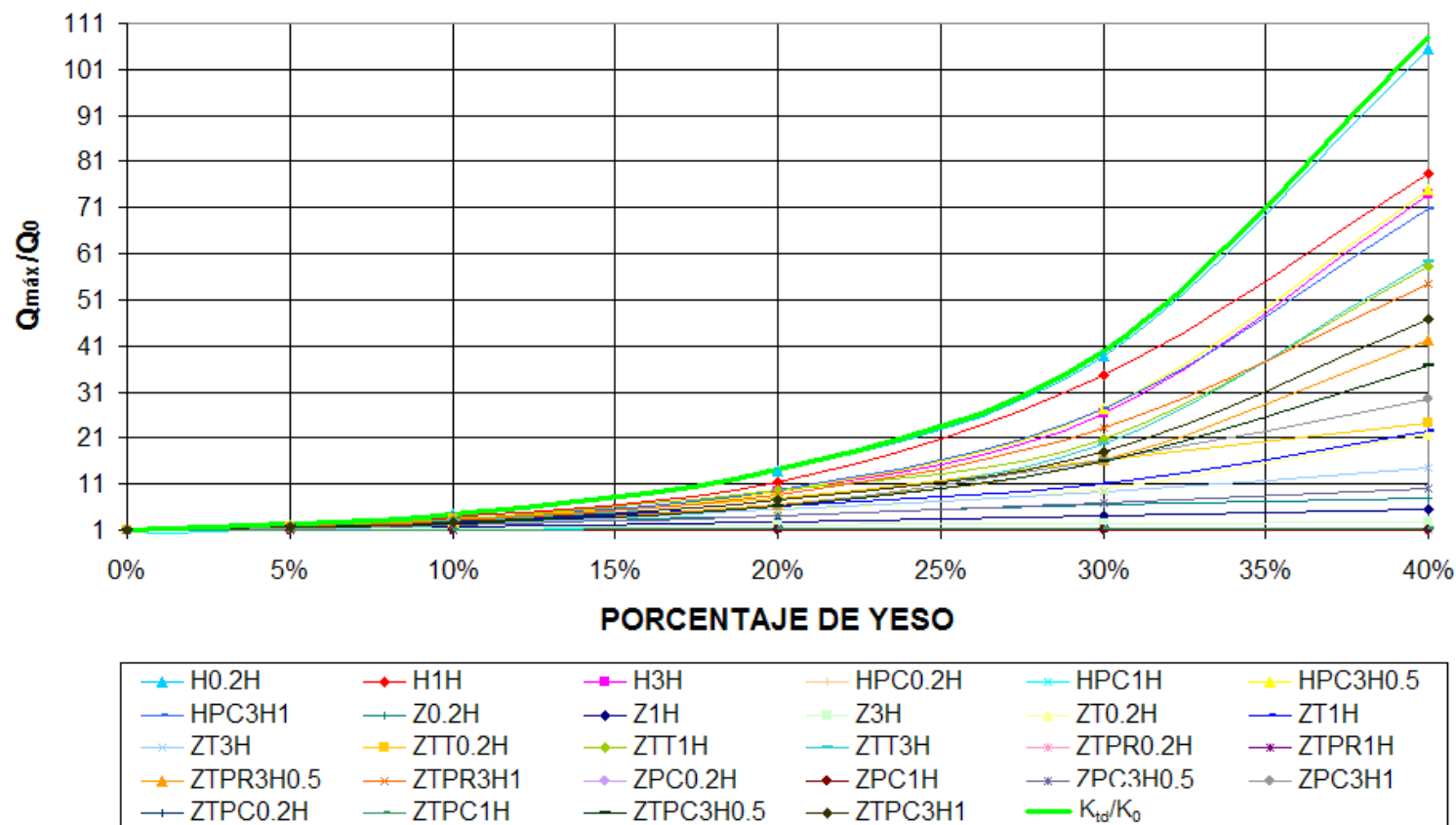
$H=50$ m
 $K_0=315$ m/año
K materiales fijadas

6.2. Conclusiones de la campaña de exp. numérica

- En general, si se plantea estudiar una cerrada donde existan yesos, para ubicar una presa, se tendrá que realizar el procedimiento de cálculo de un caso concreto (utilizando el modelo numérico DISOLUCIÓN2D).
- Se ha analizado la influencia de los tres factores que se han variado en los cálculos: *porcentaje de yeso en la capa yesífera, espesor de la capa yesífera y sección tipo de la presa.*
- Existe un límite superior para $Q_{\text{máx}}/Q_0$ en función del porcentaje de yeso, para todos los modelos geométricos de presa y cimiento, y es la relación K_{td}/K_0 . Coincide con el modelo H0.2H, debido a que es un caso muy similar al planteamiento teórico de la disolución de partículas en un cilindro de suelo.

6.2. Conclusiones de la campaña de exp. numérica

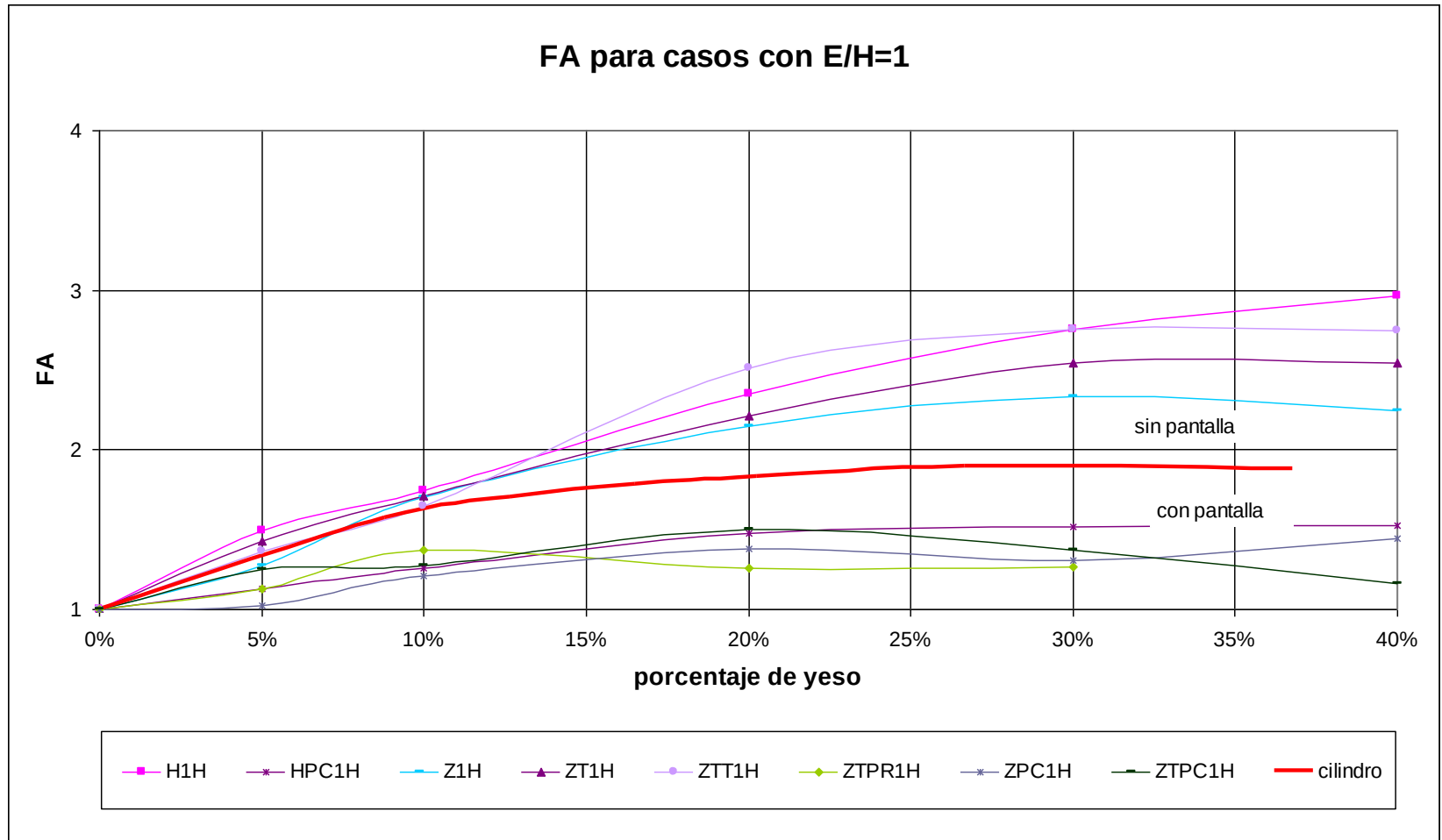
PRESA DE H=50 m, COMPARACIÓN DE MODELOS



6.2. Conclusiones de la campaña de exp. numérica

- La efectividad de una pantalla que empotre en una capa más impermeable no yesífera es prácticamente total para controlar la disolución (Q prácticamente no aumenta).
- El FA evalúa el efecto del cambio de permeabilidad debido a la disolución del yeso en el avance del frente de disolución. Es decir, el frente avanzaría con velocidad constante si no se tiene en cuenta el aumento de la permeabilidad. Debido a este aumento, el proceso se acelera y con el análisis del factor de aceleración, se investiga este efecto.
- FA no depende del material soluble, pero sí de la sección tipo de la presa, y los casos en los que se produce un mayor control de la disolución, se corresponden con valores más bajos del factor.

6.2. Conclusiones de la campaña de exp. numérica



6. CRITERIOS DE DISEÑO DE PRESAS SOBRE CIMIENTOS YESÍFEROS

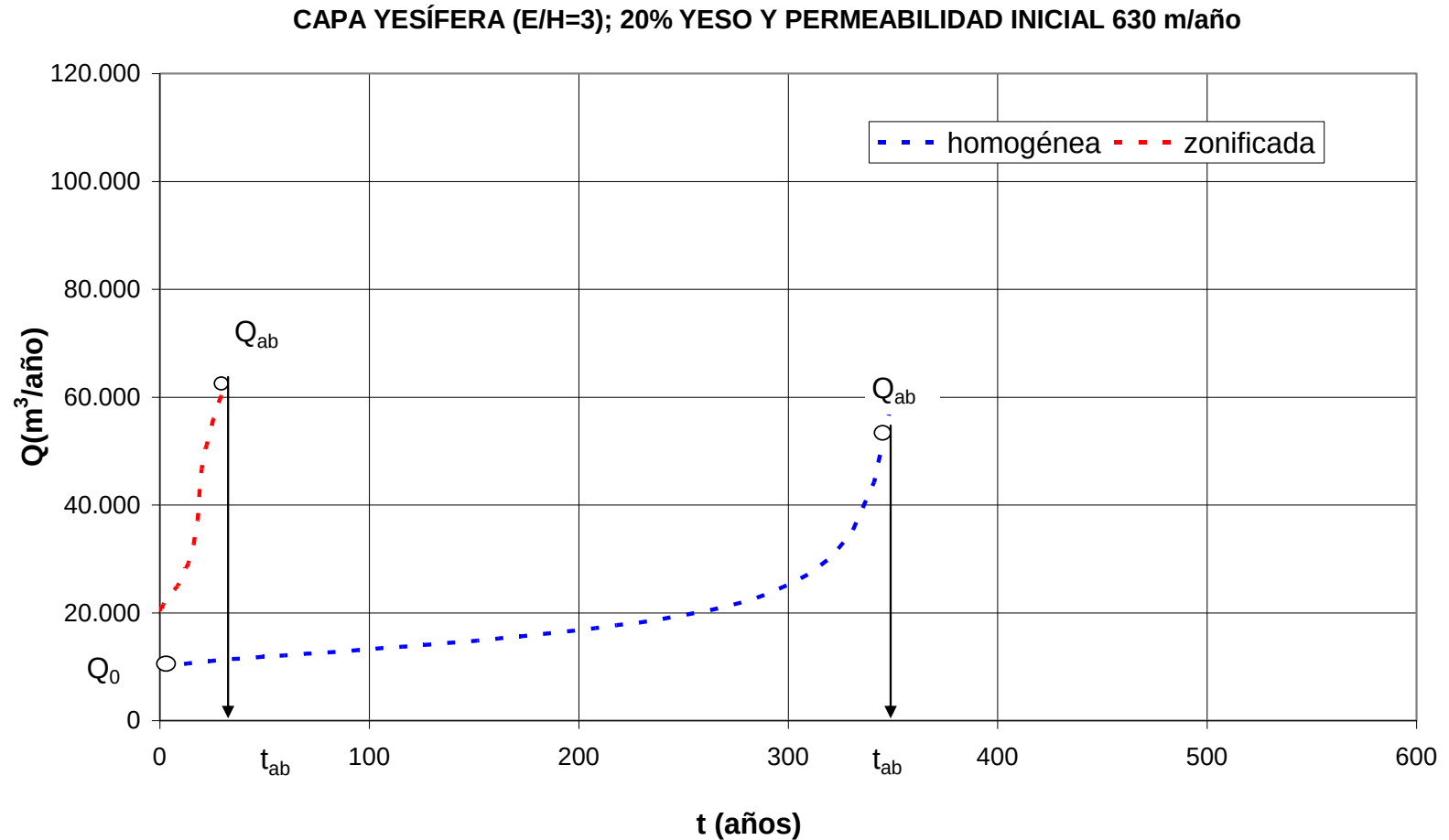
6.1. CAMPAÑA DE EXPERIMENTACIÓN NUMÉRICA

6.2. CONCLUSIONES DE LA CAMPAÑA DE
EXPERIMENTACIÓN NUMÉRICA VÁLIDAS PARA EL
DISEÑO

**6.3. FORMULACIONES PARA LOS PARÁMETROS
REPRESENTATIVOS**

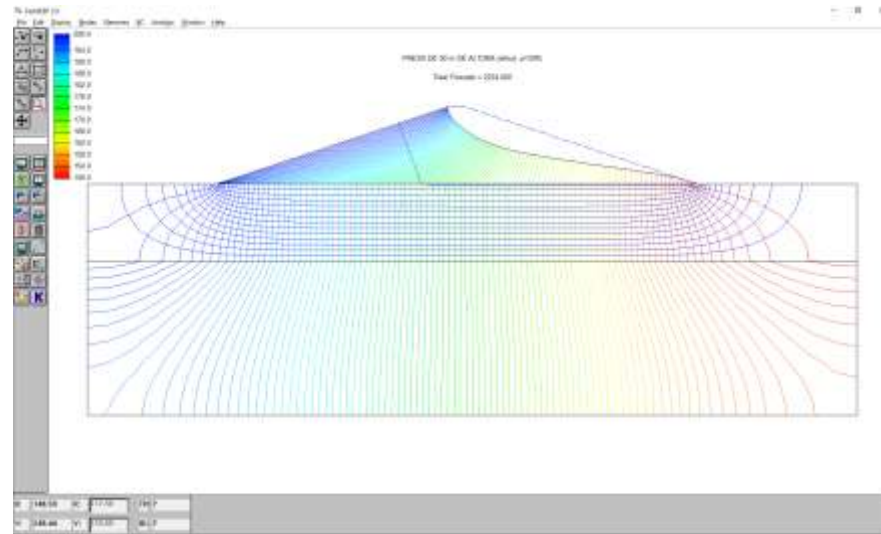
6.4. CRITERIOS DE DISEÑO DE PRESAS SOBRE
CIMIENTOS YESÍFEROS

6.3. Formulaciones para los parámetros representativos



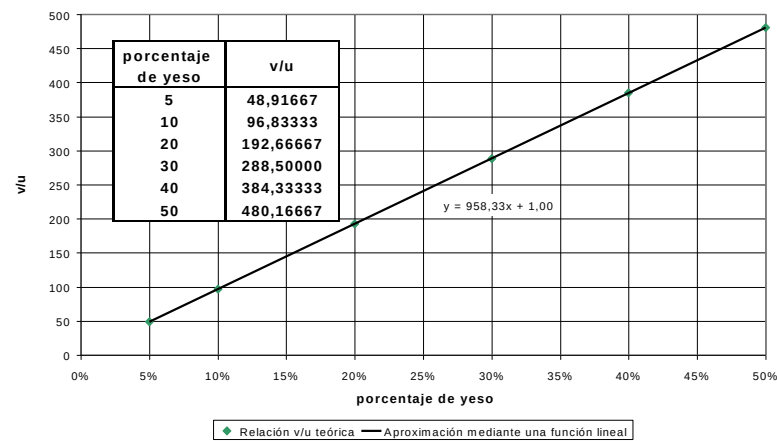
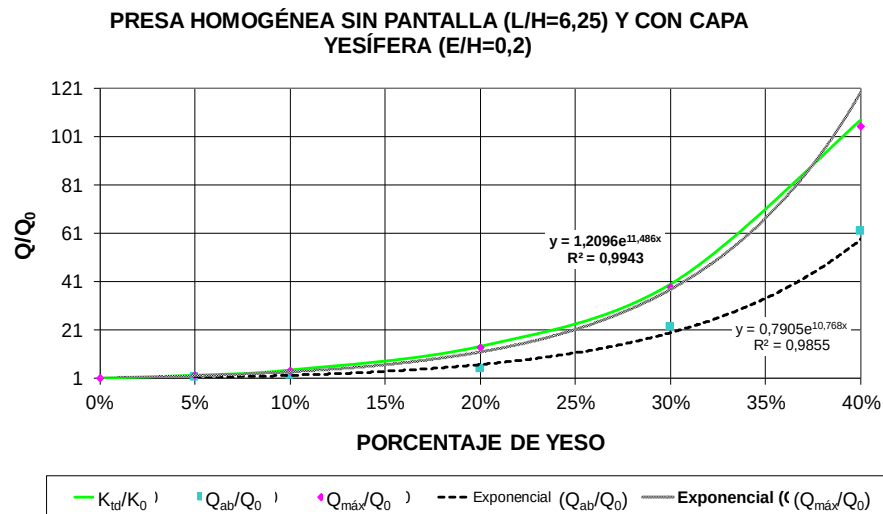
6.3. Formulaciones para los parámetros representativos

$$Q_0 \text{ por m} = v \cdot S = K_0 \frac{H}{L_{med}} E_{med} \cdot 1 \quad \longrightarrow \quad \frac{E_{med}}{L_{med}} = \frac{Q_0}{K_0 H}$$



$$FF = \frac{L_t / E_t}{L_{med} / E_{med}}$$

6.3. Formulaciones para los parámetros representativos



6.3. Formulaciones para los parámetros representativos

$$\frac{Q_{ab}}{Q_0} = 1,216e^{9,781FF \cdot \%}$$

$$t_{ucte} = \frac{\sigma_0}{C_s} \cdot \frac{L_{med}^2}{K_0 \cdot H} \% = 958,33 \cdot \frac{L_{med}^2}{K_0 \cdot H} \%$$

$$FA = \frac{Q_{ab} / Q_0}{0,50 \cdot (1 + FF \cdot Q_{ab} / Q_0)}$$

$$t_{ab} = \frac{t_{ucte}}{FA}$$



$$Q_{ab}, t_{ab}$$

	Lmed/Lmín
H3H	1,11
H1H	1,07
H0.2H	1,04
HPC3H1	1,03
HPC3H0.5	1,02
Z3H	1,62
Z1H	1,55
Z0.2H	1,45
ZT3H	1,30
ZT1H	1,26
ZT0.2H	1,23
ZTT3H	1,20
ZTT1H	1,17
ZTT0.2H	1,15
ZTPR3H1	1,31
ZTPR3H0.5	1,26
ZPC3H1	1,68
ZPC3H0.5	1,48
ZTPC3H1	1,29
ZTPC3H0.5	1,22

6. CRITERIOS DE DISEÑO DE PRESAS SOBRE CIMIENTOS YESÍFEROS

6.1. CAMPAÑA DE EXPERIMENTACIÓN NUMÉRICA

6.2. CONCLUSIONES DE LA CAMPAÑA DE
EXPERIMENTACIÓN NUMÉRICA VÁLIDAS PARA EL
DISEÑO

6.3. FORMULACIONES PARA LOS PARÁMETROS
REPRESENTATIVOS

**6.4. CRITERIOS DE DISEÑO DE PRESAS SOBRE
CIMIENTOS YESÍFEROS**

6.4. Criterios de diseño de presas sobre cimientos yesíferos

6.4.1. Caso que cumple con las condiciones necesarias para utilizar el modelo, pero que no se puede asimilar a uno de los calculados

6.4.2. Caso que cumple con las condiciones necesarias para utilizar el modelo y, además, se puede asimilar a uno de los calculados

6.4.3. Ejemplos de aplicación

6.4. Criterios de diseño de presas sobre cimientos yesíferos

EJEMPLO DE APLICACIÓN

DATOS

El porcentaje de yeso en la capa yesífera es del 10%, el espesor de ésta es grande comparado con la altura de la presa y la permeabilidad inicial es de 200 m/año.

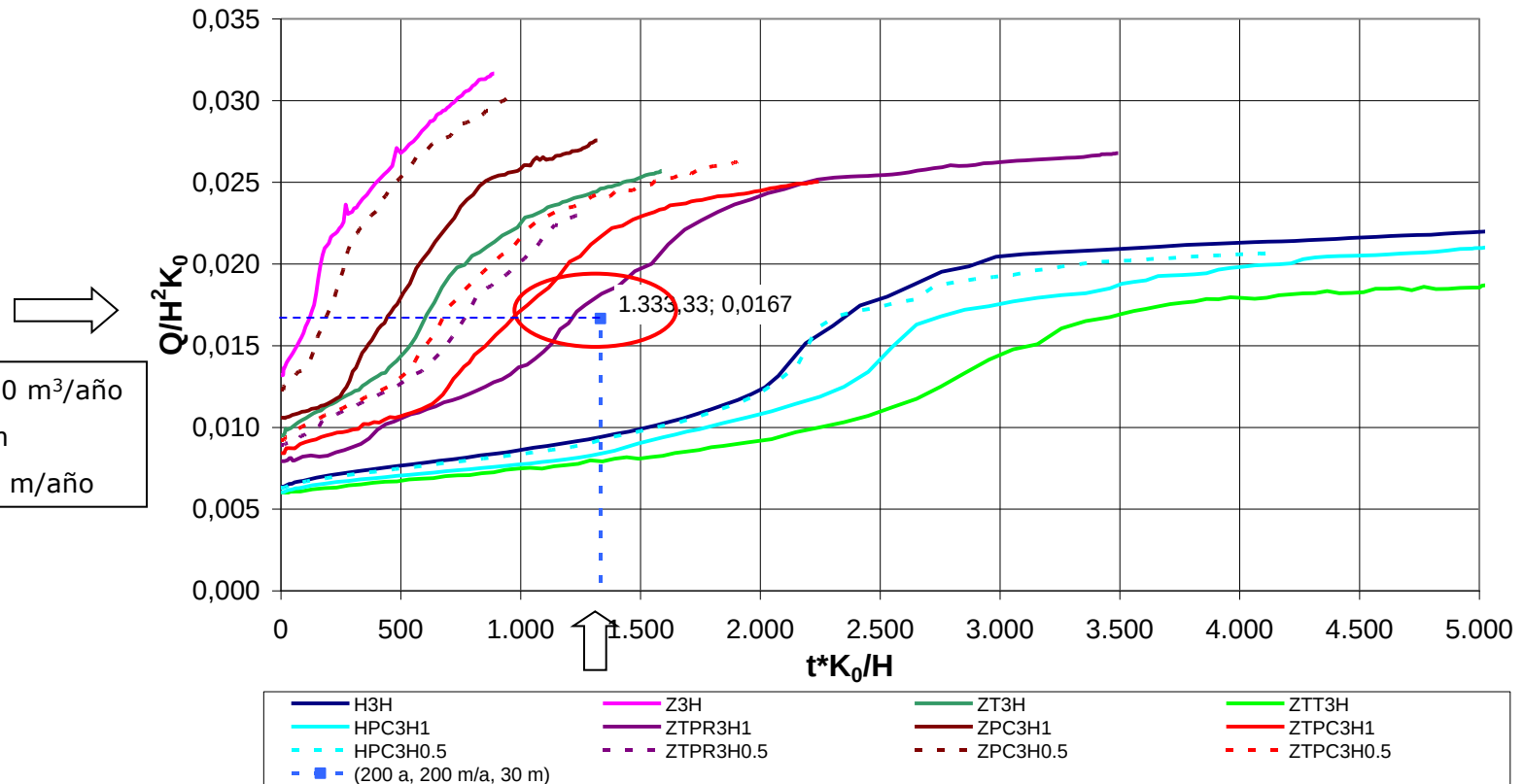
La presa tiene 30 m de altura.

Aplicamos el CRITERIO b)

En 200 años se quiere limitar el caudal filtrado a 3.000 m³/año, independientemente del caudal inicial.

6.4. Criterios de diseño de presas sobre cimientos yesíferos

COMPARACIÓN DE SECCIONES TIPO PARA 10% DE YESO Y $E/H=3$



t=200 años
H=30 m
K₀=200 m/año

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN
2. EL YESO EN LA NATURALEZA
3. PRESAS UBICADAS SOBRE CIMIENTOS YESÍFEROS
4. ANÁLISIS TEÓRICO DE LA FILTRACIÓN – DISOLUCIÓN EN CIMENTACIONES
5. MODELACIÓN NUMÉRICA DEL PROCESO ACOPLADO FILTRACIÓN-DISOLUCIÓN
6. CRITERIOS DE DISEÑO DE PRESAS SOBRE CIMIENTOS YESÍFEROS
- 7. CONCLUSIONES FINALES**

7. CONCLUSIONES FINALES

- El objetivo, desde un principio, fue desarrollar un modelo numérico, validado mediante experimentación, que permita calcular el avance a lo largo del tiempo de la disolución de un cemento yesífero y su influencia en el progresivo aumento de la permeabilidad del mismo (en régimen laminar y con flujo intergranular).
- La aplicación de este modelo a 140 casos, permitió conocer cómo influyen los distintos parámetros que intervienen en el proceso de disolución: porcentaje, espesor de la capa, altura de la presa...
- Y definir y cuantificar parámetros básicos: t_{ab} , Q_{ab} , $t_{máx}$, $Q_{máx}$, FA ,...
- Con la finalidad de fijar criterios para la elección de la sección tipo de la presa y para el diseño de elementos que frenen el proceso de disolución de su cemento (tapices, pantallas).

DEDICADO A JESÚS GRANELL



MUCHAS GRACIAS