

PREMIO JOSÉ TORÁN

2016 - VIII CONVOCATORIA

PRESAS SOBRE CIMIENTOS YESÍFEROS

MODELACIÓN NUMÉRICA DEL PROCESO DE DISOLUCIÓN Y CRITERIOS DE DISEÑO



CARMEN MARÍA BAENA BERRENDERO

PORTADA: Presa de La Loteta (Confederación Hidrográfica del Ebro)

RESUMEN

Este estudio comenzó en el año 1995, con el Proyecto y posterior construcción de la presa de la Loteta (Zaragoza). Esta presa, de materiales sueltos y 34 m de altura, cimentada sobre margas con abundantes niveles de yesos y argilitas con escasa presencia de yeso, supuso un reto técnico importante para los geotécnicos y para los ingenieros de presas españoles.

De hecho, hay muchas zonas yesíferas en el mundo, donde fue y todavía es necesario estudiar la construcción de presas (los terrenos yesíferos se presentan en una superficie considerable en el mundo, el 25%, y particularmente en España, el 58,5%, con un 7,2% en afloramientos). Por eso, numerosas presas a lo largo del mundo están cimentadas en formaciones geológicas que contienen yeso; algunas de ellas sufrieron problemas por disolución en la cimentación y otras se han comportado bien después de años de explotación. El principal problema es que, bajo el efecto de la filtración, el yeso incrementa la porosidad a lo largo del tiempo y, por tanto, la permeabilidad de la cimentación. Como consecuencia, el caudal filtrado a través de la cimentación aumenta progresivamente. Para grados altos de disolución, podría haber también peligro de subsidencia.

Un incremento de caudal a través de la cimentación puede tener consecuencias adversas para la explotación normal del embalse y para la seguridad de la presa. Cuando se proyecta una presa, son necesarios los criterios y las herramientas adecuadas para elegir el tipo de presa y la posición y profundidad de la pantalla o la longitud del tapiz para controlar de forma apropiada el proceso de disolución, limitando el caudal filtrado a través de la cimentación. Este fue el propósito de esta investigación.

Primeramente, se realizó una metodología del proceso acoplado filtración-disolución, para cimientos con flujo preferentemente intergranular y en régimen laminar. Y se programó en un código de desarrollo propio DISOLUCIÓN2D, que calcula el avance del frente de disolución (zona donde se está produciendo la

disolución) hacia aguas abajo a través del cimient. El procedimiento fue verificado experimentalmente realizando ensayos en permeámetro con mezclas de arena y materiales solubles, que se han modelado numéricamente con este programa.

Con el modelo validado, se realizó una campaña de experimentación numérica con 140 casos de presas y cimient calculados, obteniendo gráficos para estudiar la relación entre los principales parámetros (algunos de ellos, fueron definidos para caracterizar el proceso: tiempo de llegada aguas abajo del frente de disolución (t_{ab}) y caudal correspondiente (Q_{ab}), factor de aceleración (FA), etc.) y gráficos adimensionales para comparar tipologías de presas.

En general, si se plantea estudiar una cerrada donde existan yesos, para ubicar una presa, se tendrá que modelar y calcular la presa y el cimient en cuestión, con el programa desarrollado, pero los gráficos adimensionales (válidos para cualquier altura de presa y para cualquier permeabilidad inicial de la capa yesífera) son una herramienta válida para comparar presas al inicio del estudio.

Con las herramientas necesarias, se estuvo en disposición de fijar criterios de diseño para presas de materiales sueltos y para sus elementos, tales como pantallas de impermeabilización o tapices.

En este sentido, si se cumplen las hipótesis de partida (que el caudal principalmente se filtre por la capa yesífera y que las relaciones de permeabilidades entre los materiales sean del orden de las utilizadas en los cálculos), se puede proceder de cuatro maneras:

- a) Fijando una vida útil para la presa o un tiempo en el que se deba cumplir una limitación de la relación Q/Q_0 . En este caso, se calcularía el tiempo adimensional correspondiente a esa vida útil y se seleccionarían los gráficos que tienen las condiciones del cimient de nuestra cerrada (porcentaje de yeso y espesor de la capa yesífera en función de la altura de la presa).

Entrando en abscisas en el gráfico $t_{\text{adim}}-Q/Q_0$ con este valor de tiempo adimensional, y en ordenadas con la limitación del aumento de caudal, se tendría un punto que representa el criterio fijado. Todas las secciones tipo que queden por debajo de este punto cumplirán las condiciones impuestas y podría elegirse cualquiera de ellas como sección tipo previa a estudiar, según las características de los materiales disponibles para configurar la sección tipo de presa.

b) Fijando una vida útil para la presa o un tiempo en el que se deba cumplir una limitación del caudal Q . En este caso, se elegiría el gráfico correspondiente a las características de la cerrada y se calcularía el tiempo adimensional correspondiente a esa vida útil y el caudal adimensional. Se procedería de forma similar a la anterior, con el gráfico $t_{\text{adim}}-Q_{\text{adim}}$.

c) Con la formulación de los parámetros representativos.

Para ello, es preciso calcular, para la cerrada de estudio y para una tipología de presa inicial, el caudal filtrado al inicio, antes del comienzo de la disolución y el factor de forma. Y por medio de la formulación, se estiman Q_{ab} y t_{ab} , que permite la comparación entre tipologías o comprobar si se cumplen criterios del tipo a) o b) para el tiempo igual a t_{ab} . Además, estas formulaciones, sencillas y con un ajuste suficiente para un proceso tan complejo, suponen un avance muy importante, porque permiten comprender las relaciones entre todos los parámetros.

d) Fijando un límite al avance del frente de disolución durante la vida útil o periodo fijado a priori.

Se han realizado varios ejemplos de aplicación de estos criterios.

Hay que destacar que muchos aspectos del análisis realizado son aplicables para otros cimientos solubles, si bien los criterios fijados para el diseño lo son para presas sobre cimientos yesíferos.

ABSTRACT

This study began in 1995, with the Project and the construction of La Loteta Dam (Zaragoza). This dam, zoned typology and 34 m high, founded on marl with abundant levels of gypsum and claystone with little presence of gypsum, posed a major technical challenge for Spanish geotechnical and engineers of dams.

There are many gypsiferous zones in the world, where it was and still is necessary to study the construction of dams (gypsiferous terrains are present in a large area in the world, 25%, and particularly in Spain, 58,5%, with 7,2% in outcrops). So, many dams worldwide are founded on geological formations containing gypsum; some of them suffered problems due to foundation dissolution and others behaved well after years of exploitation. The main problem is that, because of the seepage, over time gypsum increases the porosity and, with it, the foundation permeability. As a consequence, the flow rate across the foundation progressively rises. For high degrees of dissolution there is also a risk of subsidence.

An increasing flow rate through the foundation may have adverse consequences for the normal exploitation of the reservoir and for the safety of the dam. When designing a dam, adequate criteria and tools are needed to choose the type of dam and the position and depth of the cut off or the blanket length, in order to properly control the dissolution process, and limit the flow rate through the foundation. That was the purpose of this research.

First, a methodology for the coupled process of seepage-dissolution was developed, for foundations with a preferably intergranular flow and laminar regime. And it was programmed in an own code, DISOLUCION2D, that calculates the solution front advance (the zone where the dissolution is taking place) downstream through the foundation. The procedure was verified by performing permeameter testing using sand and soluble material mixtures, with the tests being numerically modelled.

Once the model was proved to be valid, a study covering 140 dams and their foundations, using DISOLUCION2D, was carried out, obtaining graphs to study the relationship between the main parameters (some of them were defined to characterize the process: time of arrival downstream of the dissolution front (t_{ab}) and corresponding flow rate (Q_{ab}), acceleration factor (FA), among others) and dimensionless graphs to compare types of dams.

In general, if it is necessary to study a damsite where there is gypsum, to locate a dam, you will need to model and calculate the particular dam and its foundation with the developed program, but dimensionless graphs (valid for any height of dam and for any initial permeability of the gypsiferous layer) are a good tool to compare dams at the beginning of the study.

Once we had the necessary tools, we were able to set design criteria for earthfill dams and their elements, such as cut off or blanket.

If underlying assumptions are fulfilled (that mainly the flow rate is through the gypsiferous layer and that permeability relationships between the materials are of the order of those used in the calculations), we can proceed in four ways:

- a) Setting a lifetime for a dam or a time that is required to fulfil a limitation of the ratio Q/Q_0 . In this case, the dimensionless time is calculated for that lifespan and the graph with the foundation characteristics of our damsite (gypsum percentage and layer thickness related to height dam) is chosen.

Reading in abscissa axis in $t_{adim}-Q/Q_0$ graph with this value of dimensionless time, and in ordinate axis with the limitation of flow rate increasing, the point represents the fixed criterion. All section types below this point satisfy the imposed conditions and any of them could be chosen as a preliminary section type according to the characteristics of the available materials to configure the type of dam section.

b) Setting a lifespan for the dam or a time that is required to fulfil a limitation of the flow rate Q . In this case, we choose the graph with the foundation characteristics of our damsite and we calculate the dimensionless time corresponding to the lifespan and the dimensionless flow rate. We would proceed similarly to the previous paragraph, with $t_{\text{adim}}-Q_{\text{adim}}$ graph.

c) By means of formulations of the representative parameters.

First, it is necessary to calculate, both for the study damsite and for the dam typology, the initial flow rate at the start, before the beginning of the dissolution and the shape factor. And through the formulation, Q_{ab} and t_{ab} , which allow comparison between types or to check if criteria types a) or b) have been satisfied for the time equal to t_{ab} . In addition, these formulations are simple and with enough fit for this complex process, and they represent an important step forward, because they allow us to understand the relationships between all the parameters.

d) Setting a limit to the advance of the dissolution front over the lifespan or a priori set period.

Several examples of application of these criteria were added.

It should be noted that many aspects of the analysis are applicable to other soluble foundations, although the criteria in this study are for the design of dams on gypsiferous foundation.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1.	INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 2.	EL YESO EN LA NATURALEZA.....	3
2.1.	PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DEL YESO	4
2.2.	SITUACIÓN Y EXTENSIÓN DE LOS TERRENOS YESÍFEROS.....	5
2.2.1.	En España	5
2.2.2.	En el Resto del Mundo.....	7
2.3.	CARACTERIZACIÓN DE YESOS	8
2.3.1.	Caracterización en cuanto a su edad de formación	8
2.3.2.	Caracterización en cuanto a su tectónica	12
2.3.3.	Caracterización en cuanto a su origen.....	13
2.3.4.	Caracterización en cuanto a su forma de presentarse en la naturaleza	14
CAPÍTULO 3.	PRESAS UBICADAS SOBRE CIMENTOS YESÍFEROS	18
CAPÍTULO 4.	ANÁLISIS TEÓRICO DE LA FILTRACIÓN – DISOLUCIÓN EN CIMENTACIONES	35
4.1.	FLUJO EN MEDIOS POROSOS	36
4.1.1.	Ley de Darcy	36
4.1.2.	Régimen laminar	37
4.2.	PERMEABILIDAD Y POROSIDAD	38
4.2.1.	Permeabilidad	38
4.2.2.	Porosidad	40
4.2.3.	Relación permeabilidad – porosidad.....	42
4.3.	DISOLUCIÓN DEL YESO	46
4.3.1.	Proceso químico.....	47
4.3.2.	Proceso físico	48
4.3.2.1.	Ecuación de Nernst	48

4.3.2.2. Factores que influyen en la constante de disolución K_d	53
4.4. MODELOS DE DISOLUCIÓN DEL CIMIENTO	57
4.4.1. Disolución de fisuras	59
4.4.2. Disolución de partículas	60
4.4.3. Flujo en un acuífero adyacente a una capa soluble	67
CAPÍTULO 5. MODELACIÓN NUMÉRICA DEL PROCESO ACOPLADO FILTRACIÓN-DISOLUCIÓN	70
5.1. MODELACIÓN NUMÉRICA DEL PROCESO DE DISOLUCIÓN DEL CIMIENTO YESÍFERO	71
5.1.1. Modelación numérica del proceso de filtración	71
5.1.2. Modelación numérica del proceso de disolución mediante el código DISOLUCIÓN2D	71
5.1.2.1. Hipótesis básicas	71
5.1.2.2. Proceso de cálculo	79
5.1.2.3. Comprobaciones finales a realizar	85
5.1.3. Tipos de cimientos a los que puede aplicarse el modelo DISOLUCIÓN2D	87
5.2. VALIDACIÓN DE LA MODELACIÓN MEDIANTE ENSAYOS	87
5.2.1. Finalidad de los ensayos	87
5.2.2. Esquema del permeámetro	88
5.2.3. Materiales de los ensayos	90
5.2.4. Procedimiento de montaje de la muestra	94
5.2.5. Criterios de validez de los ensayos	95
5.2.6. Cálculo mediante DISOLUCIÓN2D de los modelos correspondientes a los ensayos	96
5.2.6.1. Ensayos con bicarbonato sódico	97
5.2.6.1.1. Resultados de caudales filtrados a lo largo del tiempo en los ensayos con bicarbonato sódico	97
5.2.6.1.2. Resultados del cálculo de los modelos correspondientes a los ensayos mediante el modelo numérico DISOLUCIÓN2D	97
5.2.6.1.3. Resultados de masa disuelta en los ensayos con bicarbonato	99
5.2.6.2. Ensayo con yeso	103

5.2.6.3. Hojas de cálculo y gráficos de los ensayos de validación	104
5.2.7. Factor de aceleración en un cilindro de suelo	106
5.2.8. Conclusión de los ensayos de validación	108
5.2.8.1. Análisis del efecto del cambio de agua en los ensayos con bicarbonato sódico	108
5.2.8.2. Comparación de los resultados medidos en los ensayos y los resultados calculados mediante DISOLUCIÓN _{2D}	110
5.2.8.3. Otros efectos que se producen en los ensayos	114
5.2.9. Conclusiones finales de los ensayos	117
CAPÍTULO 6. CRITERIOS DE DISEÑO DE PRESAS SOBRE CIMIENTOS YESÍFEROS	119
6.1. CAMPAÑA DE EXPERIMENTACIÓN NUMÉRICA	120
6.1.1. Parámetros analizados	120
6.1.1.1. Parámetros relativos al terreno	120
6.1.1.1.1. Permeabilidad inicial de la capa con yeso (K_o)	120
6.1.1.1.2. Permeabilidad tras la disolución de la capa con yeso (K_{td})	120
6.1.1.1.3. Porcentaje de material soluble ($\emptyset$)	121
6.1.1.1.4. Espesor de la capa yesífera (E)	121
6.1.1.2. Parámetros relativos al modelo	121
6.1.1.2.1. Mallado de la cimentación	121
6.1.1.2.2. Número de iteraciones	122
6.1.1.3. Parámetros relativos a la presa	122
6.1.1.3.1. Altura de la presa	122
6.1.1.3.2. Sección tipo de la presa y coeficientes de permeabilidad de los materiales	123
6.1.1.4. Parámetros relacionados con K_d	123
6.1.1.5. Resumen de los parámetros analizados	124
6.1.2. Definición de parámetros significativos	125
6.1.3. Estudio adimensional de parámetros	128
6.1.4. Casos calculados	129
6.1.5. Resultados de la campaña de experimentación numérica	137

6.1.5.1. Resultados de los cálculos de los modelos geométricos de presa y cimiento	137
6.1.5.2. Resultados de comparación de secciones tipo de presa	152
6.2. CONCLUSIONES DE LA CAMPAÑA DE EXPERIMENTACIÓN NUMÉRICA VÁLIDAS PARA EL DISEÑO .	169
6.2.1. <u>Influencia de los parámetros de la cimentación.....</u>	<u>169</u>
6.2.1.1. Influencia del porcentaje de yeso	169
6.2.1.2. Influencia del espesor de la capa yesífera	183
6.2.1.3. Influencia de la relación de permeabilidades entre la capa yesífera y la capa no yesífera (casos 1H y 0,2H)	186
6.2.2. <u>Influencia de los parámetros de diseño de la sección tipo</u>	<u>187</u>
6.2.2.1. Influencia de la tipología de presa. Caudal inicial	187
6.2.2.2. Influencia de la pantalla de impermeabilización del cimiento.....	189
6.2.2.3. Influencia del tapiz.....	199
6.2.2.4. Tapiz versus pantalla parcial.....	201
6.2.3. <u>Influencia en la estabilidad de la presa</u>	<u>203</u>
6.3. FORMULACIONES PARA LOS PARÁMETROS REPRESENTATIVOS	204
6.4. CRITERIOS DE DISEÑO DE PRESAS SOBRE CIMIENTOS YESÍFEROS	212
6.4.1. <u>Caso que cumple con las condiciones necesarias para utilizar el modelo, pero que no se puede asimilar a uno de los calculados</u>	<u>212</u>
6.4.2. <u>Caso que cumple con las condiciones necesarias para utilizar el modelo y, además, se puede asimilar a uno de los calculados</u>	<u>214</u>
6.4.3. <u>Ejemplos de aplicación</u>	<u>216</u>
6.4.4. <u>Límites de aplicación.....</u>	<u>225</u>
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES FINALES.....	227

BIBLIOGRAFÍA

APÉNDICE N° 1: EJEMPLO DE UN CÁLCULO CONCRETO

APÉNDICE N° 2: GRÁFICOS DEL ANÁLISIS DE PARÁMETROS PARA LOS 28 MODELOS GEOMÉTRICOS DE PRESA Y CIMENTACIÓN

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA N° 1 : Características de la roca de yeso.	4
TABLA N° 2 : Presas referenciadas.	30
TABLA N° 3 : Velocidad límite de régimen laminar para distintas temperaturas y diámetros.	37
TABLA N° 4 : Valores de la permeabilidad en cm/s, para distintos suelos (Angelone, S; Garibay, M.T.; Casaux M.C., 2006).	39
TABLA N° 5 : Ejemplos de porosidad e índice de poros de distintos materiales (McKay, L.D., 2002).	41
TABLA N° 6 : Rango de porosidad para distintas rocas (Custodio, E.; Llamas, M.R., 1976).	42
TABLA N° 7 : Clasificación de rocas para uso geotécnico (González de Vallejo, L.I.; Ferrer, M.; Ortuño, L.; Oteo, C., 2002).	43
TABLA N° 8 : Rangos de la porosidad y la permeabilidad para suelos y rocas (original de Gregory, K.J.; Walling, D.E., 1973; adaptación de González del Tánago, M., 2010).	44
TABLA N° 9 : Variación de la constante de disolución del yeso con la temperatura (para una velocidad de flujo de 0,25 m/s). (James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978).	54
TABLA N° 10 : Datos de temperatura del agua subterránea (Mezquita, B.; Escuer, J., 2009).	55
TABLA N° 11 : Variación de la Constante de disolución del yeso para distintas concentraciones de cloruro sódico (velocidad de filtración: 0,15 m/s). (James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978).	56
TABLA N° 12 : Variación de la constante de disolución para diferentes rocas yesíferas (para una velocidad de flujo de 0,25 m/s y temperatura de 23 °C), (James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978).	57
TABLA N° 13 : Velocidad límite de filtración para un avance del frente de disolución de 0,1 m/año, con partículas de diámetro 50 mm, en agua pura (James, A.N.; Kirkpatrick, I.M., 1980).	66
TABLA N° 14 : Permeabilidad tras la disolución a partir de la permeabilidad inicial, de la porosidad inicial y del porcentaje de material soluble.	77
TABLA N° 15 : Relación “permeabilidad tras la disolución / permeabilidad inicial” en función del porcentaje de material soluble y de la porosidad inicial.	78

TABLA N° 16 : Obtención de la longitud aproximada del frente de disolución tras el cálculo.....	86
TABLA N° 17 : Tabla resumen de los parámetros más importantes de los ensayos de validación.....	96
TABLA N° 18 : Resumen de los datos y resultados de los ensayos de validación.	106
TABLA N° 19 : Datos de permeabilidades de los materiales para las distintas secciones tipo.....	123
TABLA N° 20 : Tabla resumen de los parámetros analizados en los cálculos de las presas.....	124
TABLA N° 21 : Parámetros de los 28 modelos geométricos (combinación de distintas secciones tipo de presas y espesores de capa yesífera).	135
TABLA N° 22 : Casos calculados (combinaciones de distintas secciones tipo de presa, espesores de capa yesífera y porcentajes de yeso).	136
TABLA N° 23 : Parámetros de los casos calculados (presa de 50 m de altura, con permeabilidad inicial de la capa yesífera de 10^{-5} m/s y relaciones de permeabilidades fijadas).	147
TABLA N° 24 : Parámetros adimensionales de los casos calculados (presa de cualquier altura, con cualquier permeabilidad inicial de la capa yesífera, pero con relaciones de permeabilidades fijadas).	150
TABLA N° 25 : Caudales máximos filtrados por la cimentación (adaptado de De Cea Azañedo, J.C., 2002).	168
TABLA N° 26 : Longitud media y gradiente inicial medio para las distintas secciones tipo de presas y espesores de capa yesífera.	179
TABLA N° 27 : Tabla de factor I para obtener Lmed en los casos calculados.	208

ÍNDICE DE FOTOS

FOTO N° 1	: Diversas muestras de yeso (Servicio Geológico de Obras Públicas) (1).	16
FOTO N° 2	: Diversas muestras de yeso (Servicio Geológico de Obras Públicas). (2)	17
FOTO N° 3	: Presa inacabada de Badush (Irak)	34
FOTO N° 4	: Permeámetro de carga constante del laboratorio de Geotecnia del CEDEX.	88
FOTO N° 5	: Llaves de entrada al permeámetro del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX.	90
FOTO N° 6	: Materiales utilizados en los ensayos	92
FOTO N° 7	: Avance no uniforme del frente de disolución en el ensayo.	115
FOTO N° 8	: Efecto de compactación en ensayo con porcentaje de bicarbonato de 29%.	116

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA Nº 1	: Mapa de España con la ubicación de terrenos yesíferos (Macau, F.; Riba, O., 1962).....	6
FIGURA Nº 2	: Mapa mundial con la ubicación de evaporitas (Kozary, M.T.; Dunlap, J.C.; Humphrey, W.E., 1968).....	7
FIGURA Nº 3	: División del tiempo geológico (Amorós, J.L.; García, F.J.; Ramírez, E.; Simancas, R., 1979).	8
FIGURA Nº 4	: Mapa de la Figura Nº 1 con la ubicación de las presas documentadas.....	19
FIGURA Nº 5	: Mapa mundial con la ubicación de las presas documentadas.....	19
FIGURA Nº 6	: Gráfico de caudales filtrados en el tiempo en la presa de Caspe (Araoz Sánchez-Albornoz, A., 1992).....	31
FIGURA Nº 7	: Sección tipo de la presa de Rogun (Tajikistan). (Nedriga, V.P.; Dem'yanova, É.A., 1986).	32
FIGURA Nº 8	: Sección tipo del dique de Razzaza (Irán). (Toran, J., 1970).	32
FIGURA Nº 9	: Sección tipo de la presa de Mosul (Irak). (Guzina, B.J.; Saric, M.; Petrovic, N., 1991).	33
FIGURA Nº 10	: Esquema de la ley de Darcy (Jiménez Salas, J.A.; De Justo Alpañes, J.L.; Serrano González, A., 1976).	36
FIGURA Nº 11	: Relación entre textura y porosidad (Meinzer, O.E., 1923).....	40
FIGURA Nº 12	: Esquemas de distribución de partículas y porosidad (McKay, L.D., 2002).	41
FIGURA Nº 13	: Modelo de fisuras (original de Bear, J., 1972; adaptación de Donado, L.D., 2004).	45
FIGURA Nº 14	: Modelo de hueco de paloma (Pape, H.; Clauser, C.; Iffland, J., 1999).....	45
FIGURA Nº 15	: Disolución de un sólido controlado por difusión (James, A.N.; Kirkpatrick, I.M., 1980)....	48
FIGURA Nº 16	: Aparato para circulación de agua a través de rocas de sulfato cálcico (James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978).....	50
FIGURA Nº 17	: Variación de la concentración, para primer y segundo orden (James, A.N., 1992).	51
FIGURA Nº 18	: Comparación de la curva experimental de disolución del yeso con la teórica (James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978).....	51
FIGURA Nº 19	: Variación de $\ln(C_s/C_s - C)$ en función del tiempo, para ecuación de primer orden (James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978).....	52
FIGURA Nº 20	: Comparación de la cinética de disolución de primer orden para el yeso, con círculos (James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978).....	53

FIGURA Nº 21	: Constante de disolución del yeso en función de la velocidad del flujo (a 23 °C). (James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978).....	54
FIGURA Nº 22	: Extrapolación de la variación de la constante de disolución del yeso con la velocidad de flujo, para distintas temperaturas.	55
FIGURA Nº 23	: Influencia de 1% de NaCl en la Constante de disolución del yeso (a 23 °C) (James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978).....	56
FIGURA Nº 24	: Modos de presentación del sulfato cálcico (James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978).	58
FIGURA Nº 25	: Modelo de disolución de fisuras (James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978).	59
FIGURA Nº 26	: Perfil de disolución del orificio realizado en yeso, de radio inicial 1,25 mm, tras 8 días (con $v=0,002$ m/s). (James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978).....	60
FIGURA Nº 27	: Modelo de disolución de partículas (Adaptado de James, A.N., 1992).....	61
FIGURA Nº 28	: Esquema del frente de disolución al inicio del proceso.	62
FIGURA Nº 29	: Esquema del frente de disolución transcurrido un tiempo t.	62
FIGURA Nº 30	: Forma de las partículas solubles (James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978)	63
FIGURA Nº 31	: Relación t/T con C/C_s para el yeso.	65
FIGURA Nº 32	: Disolución de partículas de yeso en agua (para una velocidad de flujo de $4,3 \cdot 10^{-6}$ m/s). (James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978).	66
FIGURA Nº 33	: Modelo de disolución en capas no confinadas (James, A.N., 1992).....	67
FIGURA Nº 34	: Modelo de flujo parcialmente confinado (James, A.N., 1992).	68
FIGURA Nº 35	: Modelo de disolución de una roca por difusión (James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1985).	69
FIGURA Nº 36	: Relación u/v en función del porcentaje de yeso.....	72
FIGURA Nº 37	: Relación v/u en función del porcentaje de yeso.....	73
FIGURA Nº 38	: Modelo de FastSEEP de una presa homogénea de 50 m de altura y capa yesífera de 10 m de espesor (en verde, con 10% de porcentaje de yeso).	74
FIGURA Nº 39	: Velocidades de filtración bajo una presa homogénea de 50 m de altura y capa yesífera de 10 m de espesor (con 10% de porcentaje de yeso). (Cálculo mediante FastSEEP).	74
FIGURA Nº 40	: Relación “permeabilidad tras la disolución / permeabilidad inicial” en función del porcentaje de material soluble (para distintas porosidades iniciales).....	78
FIGURA Nº 41	: Relación de “ u/v ” y de “ K_{td}/K_o ” con el porcentaje de yeso.	79

FIGURA Nº 42	: Modelo de elementos finitos de una presa homogénea de 50 m de altura y capa yesífera de espesor igual a la altura de la presa (con 20% de yeso). (Mediante FastSEEP).	80
FIGURA Nº 43	: Velocidades de filtración bajo una presa homogénea de 50 m de altura y capa yesífera de espesor igual a la altura de la presa (con 20% de yeso). (Cálculo mediante FastSEEP).....	80
FIGURA Nº 44	: Ejemplo de la entrada de datos del programa DISOLUCIÓN2D.....	81
FIGURA Nº 45	: Ejemplo de vectores velocidad en los nudos. (Cálculo mediante FastSEEP).	82
FIGURA Nº 46	: Esquema del recinto que forma el frente de disolución tras la primera iteración (Cálculo mediante DISOLUCIÓN2D).	83
FIGURA Nº 47	: Diagrama de flujo del programa DISOLUCIÓN2D.	84
FIGURA Nº 48	: Modelo de elementos finitos de una presa homogénea de 50 m de altura y capa yesífera de espesor H (con 20% de porcentaje de yeso), tras la disolución del cemento.	85
FIGURA Nº 49	: Velocidades de filtración bajo una presa homogénea de 50 m de altura y capa yesífera de espesor H (con 20% de porcentaje de yeso), tras la disolución del cemento.	86
FIGURA Nº 50	: Esquema de un permeámetro de carga constante (Jiménez Salas, J.A.; Justo Alpañes, J.L., 1971).....	89
FIGURA Nº 51	: Curva granulométrica teórica de la arena de Hostun (Estaire Gepp, J., 2004).....	91
FIGURA Nº 52	: Curvas granulométricas de los materiales utilizados en los ensayos.....	92
FIGURA Nº 53	: Curvas de solubilidad de los materiales utilizados en los ensayos.....	93
FIGURA Nº 54	: Relación de u/v con el porcentaje de material soluble, para los materiales utilizados en los ensayos.	93
FIGURA Nº 55	: Relación t-Q en ensayo con porcentaje de bicarbonato de 22,5%.....	97
FIGURA Nº 56	: Gráficos del avance del frente de disolución en el ensayo 11 (cálculo mediante DISOLUCIÓN2D).	98
FIGURA Nº 57	: Gráficos de las velocidades de filtración antes y después de la disolución, en el ensayo 11.	99
FIGURA Nº 58	: Relación entre el peso de la disolución y la masa disuelta o la concentración (para el bicarbonato sódico).	100
FIGURA Nº 59	: Relación V-M en ensayo con porcentaje de bicarbonato de 9%.....	101
FIGURA Nº 60	: Relación V-M en ensayo con porcentaje de bicarbonato de 13%.....	101
FIGURA Nº 61	: Relación V-M en ensayo con porcentaje de bicarbonato de 18%.....	102

FIGURA N° 62	: Relación V-M en ensayo con porcentaje de bicarbonato de 22%.....	102
FIGURA N° 63	: Relación V-M en ensayo con porcentaje de bicarbonato de 29%	103
FIGURA N° 64	: Relación t-Q en ensayo con porcentaje de yeso de 6,4%	104
FIGURA N° 65	: Ejemplo de hoja de cálculo para los ensayos (ENSAYO 6).....	105
FIGURA N° 66	: Gráfico porcentaje de yeso - FA para un cilindro de suelo de porosidad inicial 0,2.....	107
FIGURA N° 67	: Esquema de cambio de permeabilidad debido a la disolución en un cilindro de suelo. ..	107
FIGURA N° 68	: Ensayo con arena – efecto del cambio de agua.	109
FIGURA N° 69	: Ensayo con arena – efecto del cambio de agua (adimensional).	110
FIGURA N° 70	: Comparación de la relación t-Q entre cálculo y ensayo, con porcentaje de bicarbonato de 9%.....	111
FIGURA N° 71	: Comparación de la relación t-Q entre cálculo y ensayo, con porcentaje de bicarbonato de 13%.....	111
FIGURA N° 72	: Comparación de la relación t-Q entre cálculo y ensayo, con porcentaje de bicarbonato de 18%.	112
FIGURA N° 73	: Comparación de la relación t-Q entre cálculo y ensayo, con porcentaje de bicarbonato de 22,5%.	112
FIGURA N° 74	: Comparación de la relación t-Q entre cálculo y ensayo, con porcentaje de bicarbonato de 29%.	113
FIGURA N° 75	: Comparación de la relación t-Q entre cálculo y ensayo, con porcentaje de yeso de 6,4%.113	
FIGURA N° 76	: Mallado con tamaño H/10.....	121
FIGURA N° 77	: Mallado con tamaño H/20.	122
FIGURA N° 78	: Ejemplo de Q_{ab}	125
FIGURA N° 79	: Ejemplo de $Q_{máx}$	126
FIGURA N° 80	: Ejemplo de Q_{dt}	126
FIGURA N° 81	: Ejemplo de definición de parámetros temporales (t_{ab} , $t_{máx}$), de caudales (Q_{ab} , $Q_{máx}$, Q_{dt}) y adimensionales, durante el proceso de disolución del yeso.	127
FIGURA N° 82	: Modelos geométricos de las presas homogéneas.....	131
FIGURA N° 83	: Modelos geométricos de presas zonificadas.....	134
FIGURA N° 84	: Gráfico t – Q, para H3H.	138

FIGURA N° 85 : Gráfico $t - Q$ (escala logarítmica), para H ₃ H.	138
FIGURA N° 86 : Gráfico $t - Q/Q_0$, para H ₃ H.	139
FIGURA N° 87 : Gráfico t adimensional - Q/Q_0 , para H ₃ H.	139
FIGURA N° 88 : Gráfico t adimensional - Q adimensional, para H ₃ H.	140
FIGURA N° 89 : Gráfico porcentaje de yeso - t_{ab} y $t_{máx}$, para H ₃ H.	140
FIGURA N° 90 : Gráfico porcentaje de yeso - t_{ab} adimensional, para H ₃ H.	141
FIGURA N° 91 : Gráfico porcentaje de yeso - $t_{máx}$ adimensional, para H ₃ H.	141
FIGURA N° 92 : Gráfico porcentaje de yeso - Q , para H ₃ H.	142
FIGURA N° 93 : Gráfico porcentaje de yeso - Q_{ab} adimensional, para H ₃ H.	142
FIGURA N° 94 : Gráfico porcentaje de yeso - $Q_{máx}$ adimensional, para H ₃ H.	143
FIGURA N° 95 : Gráfico porcentaje de yeso - Q_{ab}/Q_0 y $Q_{máx}/Q_0$, para H ₃ H.	143
FIGURA N° 96 : Gráfico porcentaje de yeso - FA, para H ₃ H.	144
FIGURA N° 97 : Avance del frente de disolución (8 iteraciones) para H ₃ H con un porcentaje del 10%. Cálculo mediante DISOLUCIÓN2D.	151
FIGURA N° 98 : Relación $t_{adim}-Q_{adim}$ con porcentaje de yeso de 5% y $E/H=3$	152
FIGURA N° 99 : Relación $t_{adim}-Q/Q_0$ con porcentaje de yeso de 5% y $E/H=3$	153
FIGURA N° 100 : Relación $t_{adim}-Q_{adim}$ con porcentaje de yeso de 5% y $E/H=1$	153
FIGURA N° 101 : Relación $t_{adim}-Q/Q_0$ con porcentaje de yeso de 5% y $E/H=1$	154
FIGURA N° 102 : Relación $t_{adim}-Q_{adim}$ con porcentaje de yeso de 5% y $E/H=0,2$	154
FIGURA N° 103 : Relación $t_{adim}-Q/Q_0$ con porcentaje de yeso de 5% y $E/H=0,2$	155
FIGURA N° 104 : Relación $t_{adim}-Q_{adim}$ con porcentaje de yeso de 10% y $E/H=3$	155
FIGURA N° 105 : Relación $t_{adim}-Q/Q_0$ con porcentaje de yeso de 10% y $E/H=3$	156
FIGURA N° 106 : Relación $t_{adim}-Q_{adim}$ con porcentaje de yeso de 10% y $E/H=1$	156
FIGURA N° 107 : Relación $t_{adim}-Q/Q_0$ con porcentaje de yeso de 10% y $E/H=1$	157
FIGURA N° 108 : Relación $t_{adim}-Q_{adim}$ con porcentaje de yeso de 10% y $E/H=0,2$	157
FIGURA N° 109 : Relación $t_{adim}-Q/Q_0$ con porcentaje de yeso de 10% y $E/H=0,2$	158
FIGURA N° 110 : Relación $t_{adim}-Q_{adim}$ con porcentaje de yeso de 20% y $E/H=3$	158
FIGURA N° 111 : Relación $t_{adim}-Q/Q_0$ con porcentaje de yeso de 20% y $E/H=3$	159

FIGURA N° 112 : Relación t_{adim} - Q_{adim} con porcentaje de yeso de 20% y $E/H=1$.	159
FIGURA N° 113 : Relación t_{adim} - Q/Q_o con porcentaje de yeso de 20% y $E/H=1$.	160
FIGURA N° 114 : Relación t_{adim} - Q_{adim} con porcentaje de yeso de 20% y $E/H=0,2$.	160
FIGURA N° 115 : Relación t_{adim} - Q/Q_o con porcentaje de yeso de 20% y $E/H=0,2$.	161
FIGURA N° 116 : Relación t_{adim} - Q_{adim} con porcentaje de yeso de 30% y $E/H=3$.	161
FIGURA N° 117 : Relación t_{adim} - Q/Q_o con porcentaje de yeso de 30% y $E/H=3$.	162
FIGURA N° 118 : Relación t_{adim} - Q_{adim} con porcentaje de yeso de 30% y $E/H=1$.	162
FIGURA N° 119 : Relación t_{adim} - Q/Q_o con porcentaje de yeso de 30% y $E/H=1$.	163
FIGURA N° 120 : Relación t_{adim} - Q_{adim} con porcentaje de yeso de 30% y $E/H=0,2$.	163
FIGURA N° 121 : Relación t_{adim} - Q/Q_o con porcentaje de yeso de 30% y $E/H=0,2$.	164
FIGURA N° 122 : Relación t_{adim} - Q_{adim} con porcentaje de yeso de 40% y $E/H=3$.	164
FIGURA N° 123 : Relación t_{adim} - Q/Q_o con porcentaje de yeso de 40% y $E/H=3$.	165
FIGURA N° 124 : Relación t_{adim} - Q_{adim} con porcentaje de yeso de 40% y $E/H=1$.	165
FIGURA N° 125 : Relación t_{adim} - Q/Q_o con porcentaje de yeso de 40% y $E/H=1$.	166
FIGURA N° 126 : Relación t_{adim} - Q_{adim} con porcentaje de yeso de 40% y $E/H=0,2$.	166
FIGURA N° 127 : Relación t_{adim} - Q/Q_o con porcentaje de yeso de 40% y $E/H=0,2$.	167
FIGURA N° 128 : Relación u/v y K_{td}/K_o en función del porcentaje de yeso.	170
FIGURA N° 129 : Gráfico $t - Q/Q_o$, para HPC1H.	171
FIGURA N° 130 : Gráfico porcentaje de yeso - $Q_{máx}/Q_o$ para todos los modelos geométricos.	172
FIGURA N° 131 : Gráfico porcentaje de yeso - $Q_{máx}/Q_o$ para sección tipo de presa homogénea y $E/H=0,2$.	173
FIGURA N° 132 : Gráfico porcentaje de yeso - t_{ab} adimensional, para HPC1H.	174
FIGURA N° 133 : Gráfico porcentaje de yeso - Q_{ab} adimensional, para Z1H.	175
FIGURA N° 134 : Gráfico porcentaje de yeso - Q_{ab} adimensional, para HPC3H1.	175
FIGURA N° 135 : Gráfico porcentaje de yeso - Q_{ab} adimensional, para HPC1H.	176
FIGURA N° 136 : Gráfico porcentaje de yeso - FA para los distintos modelos geométricos de presa y cimiento.	177
FIGURA N° 137 : Modelo H3H al inicio.	180
FIGURA N° 138 : Modelo H3H con 5% de yeso tras la disolución.	180

FIGURA N° 139 : Modelo H3H con 10% de yeso tras la disolución.	181
FIGURA N° 140 : Modelo H3H con 20% de yeso tras la disolución.....	181
FIGURA N° 141 : Modelo H3H con 30% de yeso tras la disolución.	182
FIGURA N° 142 : Modelo H3H con 40% de yeso tras la disolución.	182
FIGURA N° 143 : Gráfico $t-Q/Q_0$ para una presa homogénea sin pantalla – Comparación con $E/H=3$ y $E/H=0,2$ (discontinua).....	183
FIGURA N° 144 : Gráfico porcentaje de yeso - FA para distintas secciones tipo de presa en el caso de capa yesífera de espesor $3H$	184
FIGURA N° 145 : Gráfico porcentaje de yeso - FA para distintas secciones tipo de presa en el caso de capa yesífera de espesor $1H$	185
FIGURA N° 146 : Gráfico porcentaje de yeso - FA para distintas secciones tipo de presa en el caso de capa yesífera de espesor $0,2H$	185
FIGURA N° 147 : Relación $t-Q$ en modelo HPC1H con porcentaje de yeso de 20%, según la relación de permeabilidades entre las capas de cemento.	186
FIGURA N° 148 : Relación $t_{adim}-Q/Q_0$ con porcentaje de yeso de 20% y $E/H=3$	188
FIGURA N° 149 : Relación $t_{adim}-Q/Q_0$ con porcentaje de yeso de 20% y $E/H=1$	188
FIGURA N° 150 : Relación $t_{adim}-Q/Q_0$ con porcentaje de yeso de 20% y $E/H=0,2$	189
FIGURA N° 151 : Comparativa entre el aumento de caudales Q_{ab}/Q_0 para presas homogéneas con pantalla centrada versus sin pantalla.	190
FIGURA N° 152 : Comparativa entre el t_{ab} adimensional para presas homogéneas con pantalla centrada versus sin pantalla.	191
FIGURA N° 153 : Comparativa entre el aumento de caudales Q_{ab}/Q_0 para presas zonificadas con pantalla centrada versus sin pantalla.	191
FIGURA N° 154 : Comparativa entre el t_{ab} adimensional para presas zonificadas con pantalla centrada versus sin pantalla.	192
FIGURA N° 155 : Comparativa entre el aumento de caudales Q_{ab}/Q_0 para presas homogéneas con pantalla centrada total versus sin pantalla.....	193
FIGURA N° 156 : Comparativa entre el t_{ab} adimensional para presas homogéneas con pantalla centrada total versus sin pantalla.	193

FIGURA N° 157 : Comparativa entre el aumento de caudales Q_{ab}/Q_o para presas zonificadas con pantalla centrada total versus sin pantalla.....	194
FIGURA N° 158 : Comparativa entre el t_{ab} adimensional para presas zonificadas con pantalla centrada total versus sin pantalla.	194
FIGURA N° 159 : Comparativa entre el aumento de caudales Q_{ab}/Q_o para presas homogéneas con pantalla centrada parcial versus sin pantalla.....	195
FIGURA N° 160 : Comparativa entre el t_{ab} adimensional para presas homogéneas con pantalla centrada parcial versus sin pantalla.	196
FIGURA N° 161 : Comparativa entre el aumento de caudales Q_{ab}/Q_o para presas homogéneas con pantalla centrada parcial de profundidad 1H versus 0,5H.	196
FIGURA N° 162 : Comparativa entre el t_{ab} adimensional para presas homogéneas con pantalla centrada parcial de profundidad 1H versus 0,5H.	197
FIGURA N° 163 : Relación $t_{adim}-Q/Q_o$ con porcentaje de yeso de 30% y $E/H=3$	197
FIGURA N° 164 : Comparativa entre el aumento de caudales Q_{ab}/Q_o para presas homogéneas con pantalla centrada parcial aguas arriba - aguas abajo.	198
FIGURA N° 165 : Comparativa entre el t_{ab} adimensional para presas homogéneas con pantalla centrada parcial aguas arriba - aguas abajo.	198
FIGURA N° 166 : Relación $t_{adim}-Q/Q_o$ con porcentaje de yeso de 20% y $E/H=1$	199
FIGURA N° 167 : Comparativa entre el aumento de caudales Q_{ab}/Q_o para presa zonificada con tapiz y presa homogénea.....	200
FIGURA N° 168 : Comparativa entre el t_{ab} adimensional para presa zonificada con tapiz y presa homogénea.....	200
FIGURA N° 169 : Comparativa entre el aumento de caudales Q_{ab}/Q_o para presa zonificada con tapiz y presa homogénea con pantalla.	201
FIGURA N° 170 : Comparativa entre el t_{ab} adimensional para presa zonificada con tapiz y presa homogénea con pantalla.	202
FIGURA N° 171 : Cambio en la línea de saturación para caso ZT1H con un porcentaje del 30% (inicio – medio – final). Cálculo mediante DISOLUCIÓN2D.....	203
FIGURA N° 172 : Gráfico porcentaje de yeso – Q_{ab}/Q_o para sección tipo de presa homogénea y $E/H=0,2$	205
FIGURA N° 173 : Ajuste de la formulación para el aumento de caudal Q_{ab}/Q_o (10% yeso).	205
FIGURA N° 174 : Ajuste de la formulación para el aumento de caudal Q_{ab}/Q_o (20% yeso).....	206

FIGURA N° 175 : Ajuste de la formulación para el aumento de caudal Q_{ab}/Q_0 (30% yeso).....	206
FIGURA N° 176 : Ajuste de los casos para el aumento de caudal Q_{ab}/Q_0 (20% yeso).....	207
FIGURA N° 177 : Ajuste de la formulación para el tiempo de llegada aguas abajo t_{ab} (10% yeso).....	209
FIGURA N° 178 : Ajuste de la formulación para el tiempo de llegada aguas abajo t_{ab} (20% yeso).	210
FIGURA N° 179 : Ajuste de la formulación para el tiempo de llegada aguas abajo t_{ab} (30% yeso).....	210
FIGURA N° 180 : Ajuste de FA.	211
FIGURA N° 181 : Relación $t_{adim}-Q/Q_0$ con porcentaje de yeso de 10% y $E/H=3$. Criterio a), altura de presa de 30 m y permeabilidad inicial de 200 m/año. Ejemplo 1.....	216
FIGURA N° 182 : Relación $t_{adim}-Q/Q_0$ con porcentaje de yeso de 10% y $E/H=3$. Criterio a), altura de presa de 80 m y permeabilidad inicial de 200 m/año. Ejemplo 2.....	217
FIGURA N° 183 : Relación $t_{adim}-Q/Q_0$ con porcentaje de yeso de 10% y $E/H=3$. Criterio a), altura de presa de 30 m y permeabilidad inicial de 400 m/año. Ejemplo 3	218
FIGURA N° 184 : Relación $t_{adim}-Q_{adim}$ con porcentaje de yeso de 10% y $E/H=3$. Criterio b), altura de presa de 30 m y permeabilidad inicial de 200 m/año. Ejemplo 4	219
FIGURA N° 185 : Relación $t_{adim}-Q_{adim}$ con porcentaje de yeso de 10% y $E/H=3$. Criterio b), altura de presa de 80 m y permeabilidad inicial de 200 m/año. Ejemplo 5	220
FIGURA N° 186 : Relación $t_{adim}-Q_{adim}$ con porcentaje de yeso de 10% y $E/H=3$. Criterio b), altura de presa de 30 m y permeabilidad inicial de 300 m/año. Ejemplo 6	221
FIGURA N° 187 : Caudal inicialmente filtrado para la presa homogénea del ejemplo 7 (porcentaje de yeso de 20%, $E/H=3$, altura de presa de 50 m y permeabilidad inicial de 630 m/año).	222
FIGURA N° 188 : Estimativa del aumento de caudales en las presas homogénea y zonificada del ejemplo 7 (porcentaje de yeso de 20%, $E/H=3$, altura de presa de 50 m y permeabilidad inicial de 630 m/año).	224
FIGURA N° 189 : Gráfico para el modelo del ejemplo 8: presa de 50 m de altura, con porcentaje de yeso de 5% y $E/H=1$. Criterio c), y permeabilidad inicial de 315 m/año.....	225

RELACIÓN DE SÍMBOLOS

A:	área expuesta a la disolución (L^2)
A_c :	sección transversal del cilindro de suelo (L^2)
C:	concentración del material soluble (M/L^3)
C_s :	concentración de saturación del material soluble (M/L^3)
D_{50} :	abertura de tamiz que deja pasar el 50% del material (L)
e:	índice de poros
E:	espesor de la capa yesífera (L)
E_t :	espesor del tapiz (L)
FA:	factor de aceleración
FF:	factor de forma
FT:	factor de tortuosidad
h:	potencial (L)
H:	altura de la presa (L)
K:	conductividad hidráulica o permeabilidad o coeficiente de permeabilidad (L/T)
K_d :	constante de disolución (L/T). Normalmente es K en la bibliografía consultada
K_o :	permeabilidad inicial (L/T)
K_{td} :	permeabilidad tras la disolución (L/T)
K_i :	es la permeabilidad intrínseca del terreno (L^2)
L_t :	longitud media teórica de la filtración (L)
L_h :	longitud horizontal del elemento impermeable (L)
l_0 :	diámetro inicial de las partículas (L)
M:	masa disuelta (M)
n:	porosidad
n_o :	porosidad inicial
n_{td} :	porosidad tras la disolución
P:	profundidad de la pantalla (L)
Q_o :	caudal inicial (L^3/T)
Q_{ab} :	caudal de llegada aguas abajo, correspondiente a la llegada del frente de disolución al pie de aguas abajo del elemento impermeable de la presa (L^3/T)
$Q_{máx}$:	caudal de recinto completo, correspondiente a la formación de un recinto de disolución cerrado bajo la presa (L^3/T)
Q_{dt} :	caudal de disolución total, correspondiente a la disolución de todos los elementos solubles del cimiento (L^3/T)
Re:	número de Reynolds
S:	superficie de los granos (L^2)
T^* :	temperatura ($^{\circ}C$)
T:	tiempo característico (T)
t:	tiempo (T)
t_{95} :	tiempo que tardan en disolverse el 95% de las partículas solubles (T)
t_{99} :	tiempo que tardan en disolverse el 99% de las partículas solubles (T)
t_{ab} :	tiempo correspondiente a la llegada aguas abajo de la presa (T)

$t_{\max}$: tiempo correspondiente a la formación de un recinto cerrado bajo la presa (T)

t_{ucte} : tiempo correspondiente a una velocidad de avance del frente de disolución constante (T)

u : velocidad de avance del frente de disolución (L/T)

v : velocidad de filtración (L/T)

V_g : volumen de granos (L^3)

w : apertura de la fisura (L)

ρ : densidad (M/L^3)

ν : viscosidad ($M/L/T$)

σ : densidad de partículas solubles (M/L^3)

σ_o : masa de partículas solubles por unidad de volumen de suelo (M/L^3)

$\emptyset$: volumen de partículas solubles por unidad de volumen de suelo (porcentaje de material soluble en volumen)

Ω : número de partículas solubles por unidad de volumen de suelo

NOMENCLATURA DE LOS MODELOS GEOMÉTRICOS DE PRESA Y CIMENTACIÓN CALCULADOS EN LA CAMPAÑA DE EXPERIMENTACIÓN NUMÉRICA

La nomenclatura de los 28 modelos geométricos calculados es la siguiente: la primera letra es la tipología genérica (H es presa homogénea, Z zonificada); si la segunda letra es T, tiene un tapiz (de longitud igual a la base del espaldón de aguas arriba) y si es TT el tapiz tiene una longitud mayor (sumada a la longitud del núcleo es igual a la longitud de la presa homogénea).

Si contiene la letra P es que tiene pantalla (PR es pantalla aguas arriba y PC es pantalla centrada).

El número que antecede a la H final indica la relación entre el espesor de la capa yesífera y la altura de la presa y el número que sucede a la H es la relación entre la profundidad de la pantalla y la altura de la presa (si no existe este número y tiene pantalla, la profundidad de la pantalla coincide con la de la capa yesífera).

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se realiza un estudio de las presas ubicadas sobre cimientos yesíferos, desde diversos puntos de vista:

- Geológico, analizando cómo se presenta el yeso en la naturaleza y cómo se puede caracterizar en un modelo matemático,
- Histórico, con análisis de las presas en España y en el mundo cimentadas en materiales con yeso, extrayendo los datos más relevantes de su proyecto, construcción y explotación,
- Químico y físico, analizando cómo es el proceso de disolución del yeso dentro del cimiento cuando se pone en carga la presa y desarrollando un modelo matemático para flujo preferentemente intergranular (implementado en un nuevo programa, DISOLUCIÓN2D) que aúna los dos fenómenos acoplados en el proceso: filtración y disolución,
- Experimental, desarrollando unos ensayos sencillos que permitieran validar el modelo matemático,
- y sobre todo, Ingenieril, aplicando el modelo matemático a 140 casos de presas con distintas condiciones en su cimiento (porcentaje de yeso, espesor de capa, etc.) y en su sección tipo (pantalla, tapiz, etc.), para establecer criterios de diseño para el proyecto de futuras presas.

La disolución de un cimiento yesífero de una presa, como consecuencia del aumento de la carga de agua en el embalse, es un fenómeno muy complejo, pero se puede resumir en los siguientes pasos: por el efecto de la carga hidráulica se produce un aumento en la velocidad de filtración a través del cimiento y, también, en la velocidad de disolución de las partículas solubles diseminadas en él. La disolución se establece, debido a la entrada de agua no saturada en yeso desde el embalse, en una zona denominada frente de disolución, que progresa hacia aguas abajo; en este frente se está produciendo un aumento de la porosidad y, por lo tanto, de la permeabilidad del cimiento. Esto producirá, asimismo, un aumento progresivo del caudal filtrado por el cimiento, que podría llegar a ser inaceptable en la vida útil de la presa.

Los primeros puntos se desarrollarán con detalle en los sucesivos capítulos, pero relativo al último punto, es preciso mencionar que se han definido nuevos parámetros necesarios para caracterizar el proceso de filtración-disolución en el cimiento yesífero de una presa, como son t_{ab} el tiempo de llegada del frente de disolución aguas abajo del elemento impermeable (y su caudal correspondiente Q_{ab}) y el factor de aceleración FA , parámetro adimensional que evalúa el efecto de aceleración que se produce por aumento de permeabilidad debido a la disolución en el avance del frente de disolución. Del análisis de estos nuevos parámetros para los 140 casos calculados se han podido extraer conclusiones muy significativas sobre cómo

afectan todos los factores implicados (bien impuestos por la cerrada o bien de elección del proyectista) en el proceso de disolución de un cimiento yesífero de una presa.

Para presas ubicadas sobre cimientos yesíferos, lo primordial, en fase de Proyecto, es diseñar una sección tipo de presa que limite, dentro de valores aceptables y en la vida útil considerada, el complejo proceso de disolución del cimiento.

Finalmente, destacar que aspectos del análisis realizado son válidos para otros cimientos solubles, si bien los criterios fijados para el diseño lo son para presas sobre cimientos yesíferos, con flujo predominantemente intergranular, en régimen laminar y con porcentajes de yeso diseminado en la capa inferiores al 40%.

CAPÍTULO 2. EL YESO EN LA NATURALEZA



En este apartado se realiza la primera aproximación al problema ¿cómo modelizar un cimiento yesífero?, para lo cual se caracteriza el yeso, según su forma de presentarse en la naturaleza.

Cueva de los cristales, Naica (México)

ÍNDICE

CAPÍTULO 2.	EL YESO EN LA NATURALEZA.....	3
2.1.	PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DEL YESO	4
2.2.	SITUACIÓN Y EXTENSIÓN DE LOS TERRENOS YESÍFEROS	5
2.2.1.	En España.....	5
2.2.2.	En el Resto del Mundo	7
2.3.	CARACTERIZACIÓN DE YESOS.....	8
2.3.1.	Caracterización en cuanto a su edad de formación.....	8
2.3.2.	Caracterización en cuanto a su tectónica	12
2.3.3.	Caracterización en cuanto a su origen.....	13
2.3.4.	Caracterización en cuanto a su forma de presentarse en la naturaleza	14

2.1. PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DEL YESO

Yeso procede del nombre Griego "gyps" que significa "mineral calcinado". Selenitoso, lo que tiene yeso, es de etimología griega "de la luna", en alusión a su brillo. El yeso es un mineral y es también una roca sedimentaria evaporita, es decir, se forma principalmente por precipitación química al evaporarse el agua de las lagunas interiores, que contiene sales disueltas. El yeso natural se denomina algez y es sulfato cálcico dihidratado ($\text{SO}_4 \text{Ca } 2\text{H}_2\text{O}$). Su composición es de 32,47% de CaO, 46,50% de SO_3 y 20,93% de H_2O .

Las principales rocas evaporitas o salinas son la halita, la anhidrita y el yeso. El orden de precipitación de las sales depende de la temperatura y de los iones presentes. En un depósito de evaporitas pueden existir tres fases, por orden de formación: carbonatada, sulfatada y clorurada. Se presenta de formas muy diversas: masivamente, en lechos de escasa potencia interestratificados con arcillas, margas, calizas, etc., en pequeños cristales diseminados en masas de arcilla,...La textura es variable: fibrosa, terrosa, cristalizada, laminar, sacaroidea,... El color también es variado; puede ser blanco, rojo, negro, verde, amarillo claro, incoloro,...

La estructura de la roca de yeso varía de macrocristalina a finamente granular (ésta es la más común y casi la única en el terciario del Ebro). Cuando es de grano muy fino recibe el nombre de alabastro, y entonces su dureza es mayor que 2. Cristaliza en el sistema monoclinico, en macla de punta de flecha o lanza. Cuando la exfoliación es laminar muy marcada, formando láminas transparentes, se trata de yeso laminar o selenita. La variedad yeso rojo está teñida de este color, por impurezas, y se presenta frecuentemente asociada al jacinto de Compostela y al aragonito. La escasez de fósiles en yesos es un hecho casi universal.

Las principales características de la roca (Jiménez Salas, J.A.; Justo Alpañes, J.L., 1971, González de Vallejo, L.I.; Ferrer, M.; Ortuño, L.; Oteo, C., 2002 y López Marinas, J. M., 2000) son:

Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	Resistencia a la tracción (kg/cm ²)	Módulo de elasticidad (kg/cm ²)	Cohesión (kg/cm ²)	Porosidad (%)	Coefficiente de Poisson
Sana: 50-500 Alterada: 15-50	10-25	De 54.0000 a 350.000	100	5	0,22-0,31

Velocidad de la onda longitudinal (m/s)	Solubilidad en agua a 25 °C (g/l)	Coefficiente permeabilidad de la matriz (cm/s)	Tamaño de grano (mm)	Dureza (escala Mohs)	Densidad (t/m ³)
3.000-4.000	2,5	$10^{-5} - 10^{-7}$	0,06-20	2	2,2-2,3

TABLA N° 1 : Características de la roca de yeso.

El yeso se emplea en la construcción como yeso comercial o escayola, tras calcinarlo a altas temperaturas. De este modo pierde agua, pasando a sulfato cálcico hemihidratado, que posteriormente, en el proceso de fraguado, mezclándolo con agua, recupera. Según Gárate Rojas, I., 1994, los egipcios fueron los primeros en utilizar la escayola para unir bloques de la pirámide de Keops y cubrir su superficie con un estuco rojo; según se ha determinado recientemente, es del 2600 a.C. También se usa el polvo en crudo en la fabricación de cemento, para retardar el fraguado.

El yeso natural pulverizado se usa para mejorar las tierras agrícolas (en porcentajes pequeños, del orden del 2%), pues su composición química, rica en azufre y calcio, fertiliza los suelos. Una de las aplicaciones más recientes es la eliminación de elementos contaminantes de los suelos, especialmente metales pesados.

2.2. SITUACIÓN Y EXTENSIÓN DE LOS TERRENOS YESÍFEROS

2.2.1. En España

La superficie total de los terrenos yesíferos que afloran al exterior en la península y en las islas Baleares es 35.487 km², que representa el 7,2%. Del total, 4.580 km² corresponden al Keuper (yesos triásicos del secundario), 14.500 km² a las formaciones del Paleógeno, 15.920 km² a las del Neógeno, ambas del terciario y 487 km² al cuaternario. Hay zonas en las que el yeso no aflora al exterior, como los páramos castellanos, pero que está inmediatamente debajo de una delgada capa de caliza que lo recubre, y el agua puede afectarle. Sin embargo, la España yesífera (superficie que engloba estos terrenos que no afloran) es de unos 290.520 km², es decir, el 58,5%.

Las provincias con mayor porcentaje de yeso son, en este orden: Almería, Zaragoza, Jaén, Guadalajara, Cádiz, Granada, Málaga, Cuenca, Logroño, Madrid y Navarra. Las provincias exentas de yeso son las de Galicia, Badajoz, León, Zamora, Salamanca, Ávila y Huelva. En cuanto a cavidades yesíferas, en Valencia, se ubica el túnel dels Sumidors (karst triásico de Vallada), que constituye la de mayor profundidad en el mundo.

Se presenta en la FIGURA N° 1 un mapa con la distribución (por edades y por tipos: masivo, interestratificado o diseminados) de los terrenos yesíferos en España, realizado por el Servicio Geológico de Obras Públicas en 1962, con motivo de la Celebración en España del “I Coloquio Internacional sobre las Obras Públicas en los terrenos yesíferos” (original a escala 1/2.000.000).

Se puede observar que España es un país con una presencia de yesos considerable, y como se verá en el siguiente apartado: PRESAS UBICADAS SOBRE CIMIENTOS YESÍFEROS, donde ha sido preciso estudiar numerosos emplazamientos de presas en cerradas con características geológicas y geotécnicas del cimiento no tan favorables como sería deseable.

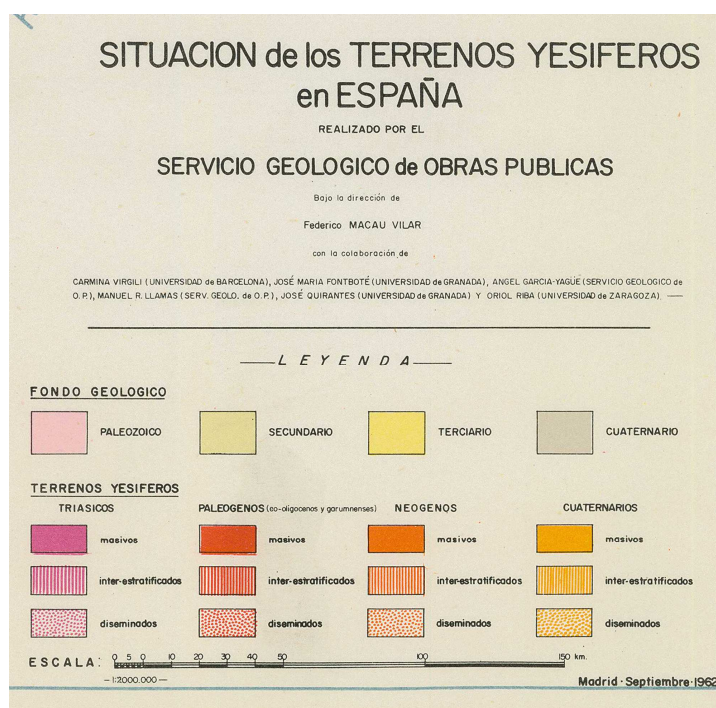
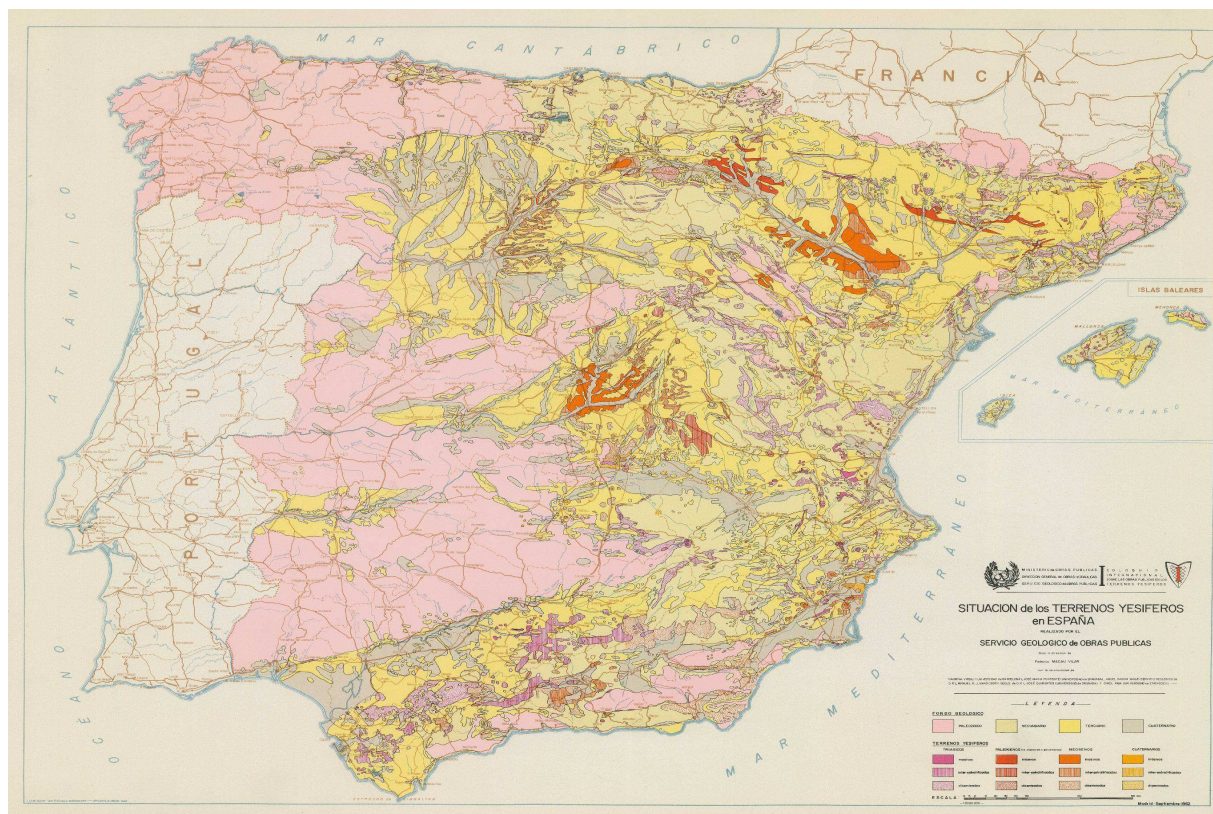


FIGURA Nº 1 : Mapa de España con la ubicación de terrenos yesíferos (Macau, F.; Riba, O., 1962).

[Cortesía del Laboratorio de Geología de la ETSICCP de Madrid].

2.2.2. En el Resto del Mundo

En cuanto a la extensión, Ford, D.C.; Williams, P.W., 1989, estiman que las rocas evaporitas constituyen un 25% de la superficie continental del mundo. Maksimovich, G.A., 1964, calcula que la superficie de yeso y anhidrita que aflora es del orden de un 10% de la anterior. Las mayores extensiones de rocas de sulfato se encuentran en el hemisferio norte, particularmente en los Estados Unidos, donde son alrededor del 35-40% de la superficie de la nación y en la antigua URSS, donde Gorbunova, K.A., 1977, estima una cifra de 5 millones de km². Los afloramientos de rocas de sulfato son generalmente mucho más pequeños que los de los carbonatos.

A pesar de que existe un mapa muy reciente de la distribución mundial de los afloramientos de rocas calizas (Ford, D.C.; Williams, P.W., 2007), de yesos sólo se tiene constancia de la existencia del que se adjunta en la FIGURA N° 2, que data de 1968 y en el que se muestra conjuntamente la anhidrita y el yeso con una trama rayada (en el 90% de los casos cubiertos por otros materiales).

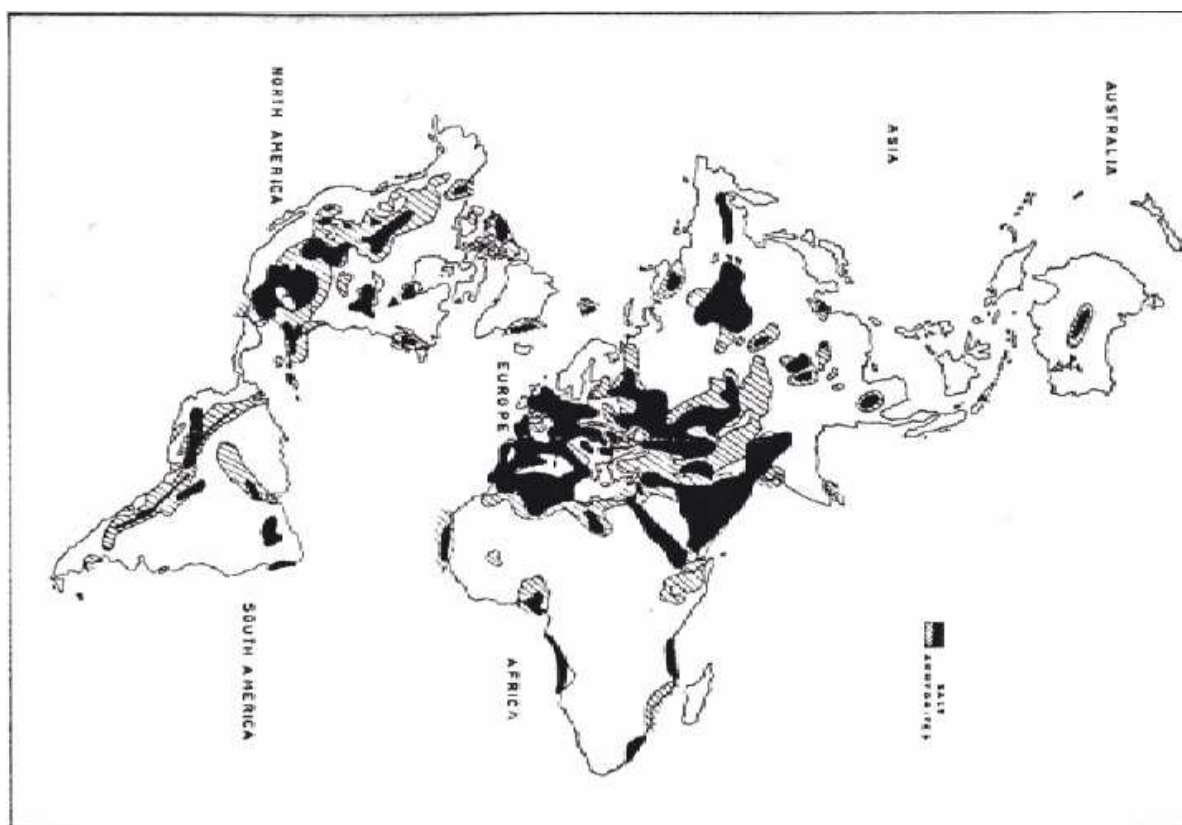


FIGURA N° 2 : Mapa mundial con la ubicación de evaporitas (Kozary, M.T.; Dunlap, J.C.; Humphrey, W.E., 1968).

Lo que sí existen son mapas con áreas con karst en yesos en Europa (Cooper, A.H.), China (Calow, R.C., 1998), EEUU (U.S. Geological Survey, en su página de Internet), Australia (Grimes, K.G. et al., 2007).

2.3. CARACTERIZACIÓN DE YESOS

Existen diversas formas de caracterizar los yesos, como pueden ser, edad de formación, tectónica, origen y forma de presentarse en la naturaleza.

2.3.1. Caracterización en cuanto a su edad de formación

Se muestra a continuación un esquema con la división del tiempo geológico:

TIEMPO GEOLOGICO m.a.	EONES	ERATEMA	SISTEMA	SERIE	PRINCIPALES FASES TECTONICAS
0	FANEROZOICO	CENOZOICO	CUATERNARIO	Holoceno	Walachica Attica
1,8				Pleistoceno	
			TERCIARIO	Plioceno	Sávica Pirenaica
				Neogeno	
				Mioceno	
22,5			Paleogeno	Oligoceno	Larámica
				Eoceno	
				Paleoceno	
65		MESOZOICO	CRETACICO	Senonense	Austriaca
				Superior	
				Inferior	
			JURASICO	Neocomense	Neokimmérica
141				Malm	
				Dogger	
				Lias	
195			TRIASICO	Superior	
				Medio	
				Inferior	
230				Superior	Pfálica Saálica
				Inferior	
280		PALEOZOICO	PERMICO	Superior	Astúrica Sudética
			CARBONIFERO	Inferior	
347				Superior	Bretónica Erica
			DEVONICO	Medio	
				Inferior	Ardénica
395			SILURICO	Superior	
				Inferior	Tacónica
435			ORDOVICICO	Superior	
				Inferior	Sárdica
500			CAMBRICO	Superior	
				Medio	Cadomiense
570				Inferior	
	PROTEROZOICO	PRECAMBRIICO	ALGONQUICO		
600					
4,000	CRIPTOZOICO		ARCAICO		

FIGURA N° 3 : División del tiempo geológico (Amorós, J.L.; García, F.J.; Ramírez, E.; Simancas, R., 1979).

En España, por debajo del Trías, no se han encontrado depósitos salinos en superficie.

De mayor a menor antigüedad (y marcados con rectángulos rojos en la FIGURA N° 3) encontramos:

- ❑ Yesos triásicos (era mesozoica; 200 millones de años): tienen mucha presencia en España. Son características las arcillas yesíferas del Keuper. Por lo general, son formaciones continuas y únicas y suelen presentar una tectónica complicada.
- ❑ Yesos wealdenses (era mesozoica, cretácico inferior; 120 millones de años): con menor presencia.
- ❑ Yesos paleógenos (era cenozoica, terciario inferior, 40 millones de años): con presencia media. Son característicos los yesos plegados del eoceno y oligoceno. Es raro encontrar en España una formación oligocena que no esté plegada.
- ❑ Yesos del neógeno (era cenozoica, terciario superior, 20 millones de años): constituyen los de mayor presencia en España. Son características las margas yesíferas del mioceno y los yesos masivos del Sarmatiense. Tienen como característica la multiplicidad, ya que se formaron en lagunas pequeñas y de poca profundidad.
- ❑ Yesos cuaternarios (era cenozoica): destacan los limos yesíferos, procedentes de la meteorización de los terrenos terciarios.

A continuación se detallan las formaciones más importantes en España (Macau, F.; Riba, O., 1962):

YESOS TRIÁSICOS

Se caracteriza por sus facies rojizas y abigarradas. El triásico español es pobre en fósiles, por este motivo los límites estratigráficos del Trías están poco fijados. Sin embargo, las facies litológicas son muy características y a menudo, exclusivas de él. Existe el Triásico de facies germánica, que va desde Gerona a Huelva y desde Asturias a Albacete y es de carácter continental, y el Trías alpino, en las cordilleras Béticas, de carácter marino, con formaciones yesíferas del Werfeniense, consistente en bancos lenticulares de yeso.

Puede ser yeso masivo (diapiro de Estella, en Navarra) o margas irisadas (arcillitas o margas rojas y grises con yeso, anhidrita y sal, que constituyen la típica facies Keuper). En un principio, se pensaba que las margas irisadas del Keuper eran una formación continental, pero finalmente se comprobó que se originaron en condiciones marinas, bajo las aguas poco profundas de la plataforma costera. En estas margas suelen

encontrarse ofitas en masas de tamaños muy variados. Abundan los jacintos de Compostela y los aragonitos, que son minerales típicos del Trías.

En el diapiro de Estada (Huesca) aparecen caóticamente rotos, plegados, mezclados con margas de todos los colores y al mojarse adquieren textura jabonosa.

Otra característica es la salinidad, y la presencia de manantiales salinos de cuyas aguas se explota la sal común. Las formaciones masivas de sal común no suelen aflorar por la lixiviación.

La facies alpina en las Cordilleras Sub-béticas presenta un Keuper muy rico en yesos. Se encuentra también en la prolongación oriental del geosinclinal bético, correspondiente a las islas de Ibiza y Mallorca. En el resto del Mesozoico de la península tiene facies germánicas, presentando margas irisadas yesíferas y algún nivel yesífero intercalado en las calizas o dolomías del Muschelkalk (ejemplo en la Sierra de Albarracín). En el Buntsandstein, hay margas detríticas rojizas, a veces yesíferas (Röt), que se presentan en las Cordilleras Costeras Catalanas, en las Subpirenaicas de Cataluña y Aragón, en la zona Cantábrica entre Santander y Asturias.

YESOS TERCIARIOS

El origen de las tres grandes cuencas sedimentarias españolas se debe a la evaporación de aguas salobres en las depresiones, en un clima bastante árido y sin salida al mar (origen endorreico). Estas cuencas se crearon tras el movimiento orogénico alpino. En el centro de la cubeta se depositarían las evaporitas, y hacia los bordes se encuentran calizas lacustres, margas y areniscas y conglomerados, en este orden. En la depresión del Guadalquivir no hay yesos porque fue dominio marítimo en todo el Terciario.

Se detallan las formaciones yesíferas que contienen estas cuencas:

❑ Depresión del Ebro

Las formaciones yesíferas van desde el Eoceno inferior hasta el Mioceno. Las más antiguas están en el Pirineo Catalán. Existen las “margas de Banyoles”, las “margas de Manlleu”, las “margas de Igualada”...

En Suria hay bancos aflorantes de yesos que recubren formaciones de halita y sales potásicas, en el anticlinal de Pons existen yesos masivos. En Undiano hay yesos eocenos, en bancos potentes, recubriendo las potasas de Navarra. En Puentelarreina, en Desojo, en Losarcos, son

de edad oligocena y la potencia total es probablemente superior a los tres mil metros. En la Ribera de Navarra, se encuentran las formaciones yesíferas de mayor extensión y potencia.

En el bajo Aragón hay formaciones potentes de yesos masivos miocenos, casi horizontales, de las Bardenas a los Monegros y zona Sur de Zaragoza. También aparecen entre Casalarreina y Briviesca, y en Calatayud y alrededores de Teruel.

Hay terrenos yesíferos formados por un paquete de estratos delgados de yeso (menos de 1 cm) que alternan con otros todavía más delgados de margas. Son de gran compacidad (Canal de Lodosa). Otros tienen capas de yeso más potente (hasta 25 ó 50 cm) y las intercalaciones margosas o arcillosas ocupan mayor proporción que aquéllas (en Monegros y Canal Imperial).

❑ Cuenca del Duero

Existe una disposición horizontal de yesos masivos del Sarmatiense o margas yesosas grises o blanquecinas sobre una potente serie de arenas, margas y arcillas. Sobre los yesos hay calizas en los páramos castellanos.

En Almazán aparecen yesos paleógenos plegados.

❑ Cuenca del Tajo

En esta cuenca, los yesos tienen mayor importancia que en la anterior.

Existen yesos paléogenos levantados y plegados en el borde oriental: bandas intercaladas en margas rojizas en Torrelaguna, hacia el Sureste y se extienden hacia Cuenca. En zona de Jadraque aparece yeso masivo.

Al oeste de la Sierra de Altomira ocupan gran extensión los yesos masivos, de disposición horizontal.

En Madrid, existen yesos masivos y tableados, formados en los grandes lagos del interior. También aparecen alternancias de yesos con arcillas y, como depósitos del borde de cuenca, arcosas y arenas con niveles de arcillas. En el Sur del término, en la margen izquierda del río Manzanares, se pueden observar los yesos masivos que forman la base del Terciario evaporítico de la cuenca de Madrid. En la zona de Vallecas, se ubica el Cerro Fraternidad que era una

antigua cantera de yesos. En el recinto de Mercamadrid pueden observarse parte de las formaciones de arcillas con yesos.

- ❑ Otras cuencas: existen yesos en la depresión prelitoral catalana, en la cuenca terciaria de Oviedo, en la depresión valenciana, en la Penibética (granadina y Hoya de Baza), en los valles del Segura y del Mundo,...

YESOS CUATERNARIOS

Existen zonas en las que se encharcan aguas muy salobres: Campo de Criptana, las lagunas de la Nava, de Villarín de Campos, la laguna de Gallocanta y la zona endorreica de Bujaraloz y Sástago.

También existen los limos yesíferos, que son suelos de formación reciente, producto de la erosión de roca de yeso (aparecen en los barrancos como productos de la meteorización). Jiménez Salas, J.A.; Justo Alpañes, J.L.; Serrano González, A., 1976, citan los limos y arcillas yesíferos que aparecen junto a la autopista Zaragoza-Alfajarín, cuyo contenido en yesos variaba entre 12 y 100% y con un grado de saturación entre 24 y 59%.

En la tesis doctoral de Faraco, C., 1972, se concluye que los limos yesíferos causan problemas graves en los canales cimentados sobre ellos por su gran velocidad de karstificación y su pérdida de resistencia por acción del agua (tienen grandes parecidos con los loess).

2.3.2. Caracterización en cuanto a su tectónica

En cuanto al criterio tectónico, existen dos grupos principales:

- Yesos que han sufrido plegamiento o migración (halocinesis o diapirismo)

El Trías suele presentar una tectónica complicada, debido a que las propiedades mecánicas de los niveles arcillosos-evaporíticos han jugado un papel decisivo en la orogénesis alpina, ya que facilitan el deslizamiento de mantos de corrimiento o la formación de pliegues diapíricos, frecuentes en el Norte de España.

El diapirismo produce que los yesos triásicos aparezcan anormalmente entre conjuntos sedimentarios más modernos, debido a la gran plasticidad de las margas yesíferas, características de estas formaciones del Trías.

- Yesos que se presentan en disposición horizontal o tabular.

En la cuenca del Ebro y demás cuencas sedimentarias del terciario, la estratificación es prácticamente horizontal, con pocas excepciones. Esto es debido a que están poco afectadas por la orogenia alpina.

Los geólogos han atribuido de forma general el carácter de yesos oligocenos o eocenos a los plegados y el de yesos miocenos a los horizontales, pero en ciertos lugares de la península esto no es válido.

2.3.3. Caracterización en cuanto a su origen

Flores Calcaño, C.E.; Rodríguez Alzuru, P., 1967, escriben un artículo muy interesante como consecuencia de entrevistas con ingenieros que habían estado en contacto con problemas de disolución de yesos para evaluar el caso de la presa El Isiro en Venezuela. En él se hace incidencia en esta caracterización:

- ❑ **De origen primario o de primera formación:** durante la deposición de sedimentos marinos, grandes cantidades de yeso pueden ser depositados conjuntamente con la sedimentación dando origen a los depósitos de yeso de origen primario (espesores relativamente grandes de yesos interestratificado con los sedimentos o en forma de domos o cúpulas).

Las cuencas en las que se originan pueden ser de tres tipos: lagunas costeras, mares interiores o lagunas interiores.

Otra forma es el yeso depositado por las aguas en los poros de los sedimentos marinos, que con presiones posteriores, llega a formar parte del material cementante o matriz de las rocas.

Los depósitos de yeso de origen primario, en contacto con las aguas del embalse, tienden a formar rápidamente grandes cavernas por disolución que se van incrementando con el tiempo, que aumentan las filtraciones. Puede haber asentamientos súbitos o subsidencias que pueden producir un fallo en la estructura.

Si el yeso está como material cementante en las rocas, es una condición de las más desfavorables porque en tamaños muy finos es más sensible al agua y puede producirse la disolución total convirtiendo la roca en un suelo saturado sin resistencia.

- **De origen secundario:** Existen formaciones que proceden de la meteorización de yesos más antiguos y que se denominan limos yesíferos. También de segunda formación son las láminas, vetas, cristales,... que rellenan fracturas y diaclasas o que están diseminados dentro de la masa rocosa.

A veces, los yesos se forman como consecuencia del ataque del ácido sulfúrico a las calizas (no es frecuente en el terciario del Ebro, ya que este ácido en la naturaleza procede de la oxidación de menas metálicas sulfuradas o del ácido sulfhídrico que contienen los sedimentos de origen orgánico).

En el caso de yesos secundarios formados en la zona de meteorización de rocas marinas en climas áridos, pueden disolverse progresivamente las delgadas vetas que rellenan los planos de discontinuidad, aumentando las filtraciones con consecuencias peligrosas. Los asentamientos producidos no son de grandes proporciones y suelen ser inocuos para las estructuras.

2.3.4. Caracterización en cuanto a su forma de presentarse en la naturaleza

Los tipos de terreno más característicos son los yesos masivos, los yesos en vetas y los limos yesíferos (diferenciados así por Llamas, M.R., 1962):

- o Los **yesos en masa** se presentan en el Trías, en el Eoceno, en la base del Oligoceno (Ludiense), en el Mioceno y en el Cuaternario. Se formaron por la precipitación de sales en aguas sobresaturadas.

Los yesos estratificados son una roca fuerte, compacta y, si no están agrietados, bastante impermeable.

El volumen de yeso disuelto depende en gran parte del caudal de agua circulante y de las fisuras iniciales en la masa de roca.

- o Los **yesos interestratificados** se presentan entre margas, arcillas y areniscas, formando bolsadas, lentejones o vetas de mayor o menor espesor, o incluso pueden formar parte del material cementante de las rocas.

Constituyen las características arcillas irisadas o multicolores del Keuper, o las arcillas y margas con coloración grisácea del Eoceno, o las margas o arcillas grises o incluso rojizas del Oligoceno y Mioceno. A veces, aparecen entremezcladas con acarreos fluviales del Cuaternario.

En contacto con areniscas pueden presentarse también en todo el Terciario, y en forma de bolsadas en las calizas del Pontienne e incluso entre dolomías y carniolas del Infralías.

El yeso suele presentarse claramente estratificado, aunque a veces también forme cuerpos compactos. Es frecuente encontrar vetas de yesos de textura fibrosa y color blanco en las rocas de yeso y anhidrita y en los estratos próximos de distinta naturaleza. Estas vetas proceden de la precipitación de soluciones saturadas de sulfato cálcico, que han circulado por la roca después de su consolidación. Si estas vetas tapan las grietas existentes, puede formarse un conjunto rocoso compacto e impermeable.

Los terrenos formados por margas y areniscas con vetas de yeso blanco, por lo general fibroso, constituyen un conjunto bastante compacto e impermeable, si las vetas están aisladas entre sí.

Es frecuente encontrar nódulos y cristales de yeso en las margas o arcillas próximas a bancos yesíferos. Las rocas evaporitas suelen estar asociadas a sedimentos comunes, más frecuentemente con margas y dolomías de precipitación química (en el Ebro con margas y arcillas). Los estratos de margas o arcillas que aparecen frecuentemente asociados a los yesos, son más erosionables que el yeso compacto.

- o Las **partículas yesíferas** pueden aparecer diseminadas entre arcillas o tierras, en mayor o menor proporción, formando los limos yesíferos (procedentes de la meteorización de estratos yesíferos).

Los encargados de canales en terrenos yesíferos afirmaban que las arcillas o tierras con yesos diseminados o microscópicos eran más peligrosas que los yesos netamente estratificados (debido a que si la superficie específica es mayor, la disolución es mayor, como se verá más adelante). Además, a pesar de que las arcillas sean prácticamente impermeables, la permeabilidad depende de la composición de los líquidos que la embeben y con las aguas selenitosas la permeabilidad puede disminuir.

Estos son los terrenos que fueron considerados como más peligrosos para los canales de la cuenca del Ebro (tierras limosas o con su arcilla floculada con unos porcentajes medios de yeso del 3,5 por ciento del peso de la tierra).

En la FOTO N° 1 y FOTO N° 2 se adjuntan las fotografías de algunas de las cien muestras que el Servicio Geológico de Obras Públicas recopiló con motivo de la celebración del “I Coloquio Internacional sobre las

obras públicas en los terrenos yesíferos” en 1962 y que fue un hito en la puesta en común de conocimientos sobre este material y su relación con las obras.

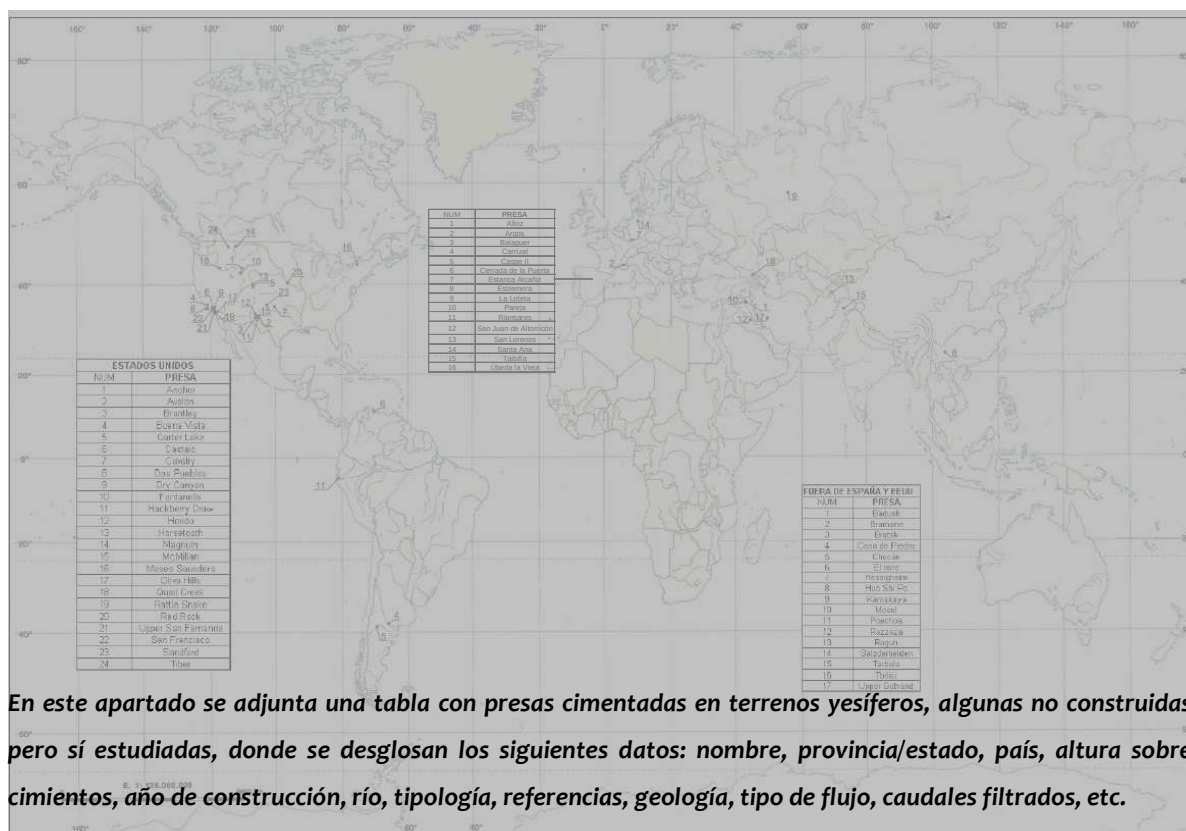


FOTO N° 1 : Diversas muestras de yeso (Servicio Geológico de Obras Públicas) (1).



FOTO N° 2 : Diversas muestras de yeso (Servicio Geológico de Obras Públicas).(2)

CAPÍTULO 3. PRESAS UBICADAS SOBRE CIMIENTOS YESÍFEROS



Existen numerosas presas en todo el mundo ubicadas en cerradas con yesos; algunas han tenido problemas por disolución del cemento y otras se han comportado bien tras años de explotación. En algunas se han tomado medidas antes de su construcción, para limitar la disolución del cemento y otras, se han proyectado de forma convencional. También se han estudiado diversas ubicaciones de cerradas españolas con yesos, desechadas tras su estudio y embalses con yesos en el vaso, pero no en la cerrada (Baena, C.M., 2011).

Por tanto, la siguiente aproximación al análisis planteado ha sido la elaboración de una tabla con la recopilación de datos sobre las presas ubicadas sobre cimientos yesíferos, extrayendo los datos más relevantes para el estudio de filtración – disolución, como son geología, tipo de flujo, velocidad de filtración, caudal filtrado, aumento de caudal filtrado, masa disuelta, etc. Con la limitación lógica de que cuando se ha desarrollado un problema en alguna de ellas, la principal medida ha sido bajar el nivel de embalse y/o tratar el cemento mediante inyecciones de impermeabilización, para restaurar la permeabilidad perdida. Con estas medidas, se pierde la posibilidad de tener datos fiables del proceso de disolución una vez desarrollado. A continuación se adjunta el mapa de la FIGURA N° 1 y un mapa mundial, con la ubicación de las presas que se han documentado (ver TABLA N° 2):

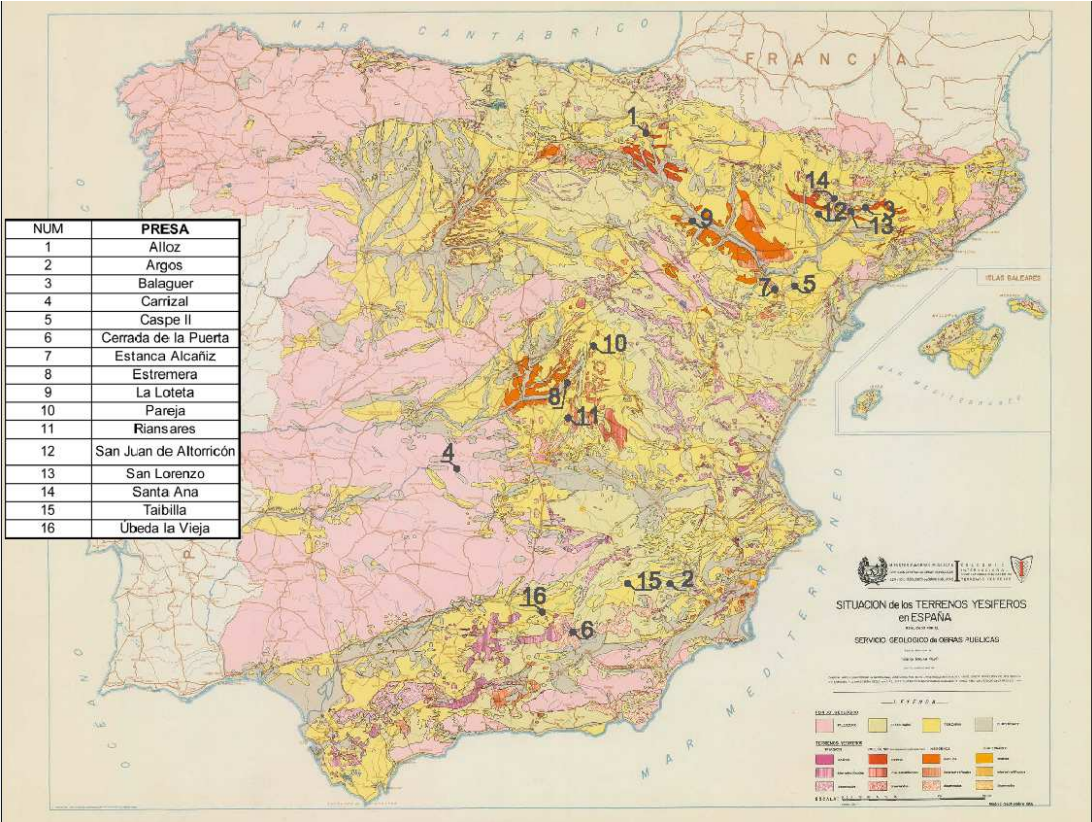


FIGURA Nº 4 : Mapa de la Figura Nº 1 con la ubicación de las presas documentadas.

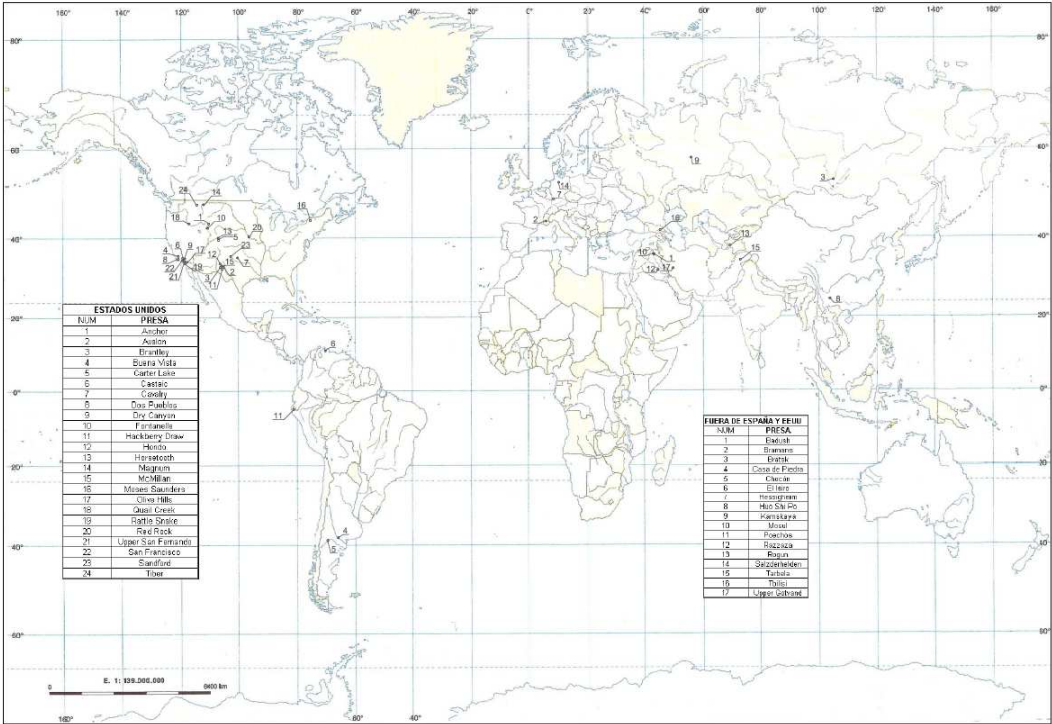


FIGURA Nº 5 : Mapa mundial con la ubicación de las presas documentadas.

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
Alloz	Salado/ Navarra/ España	67/ 1930/ Hormigón (Bóveda)	Fernández M.; Gascón J.L.; Fraga F.; Esteras L.; Escolar I., 2001 / Flores Calcaño, C.E.; Rodríguez Alzuru, P., 1967 / Sáenz, C.; Valdés J.M., 1952 / García Yagüe A., 2003 / García Yagüe A., 1971	Calizas eocenas subverticales. Estratos yesíferos en margen derecha. La geología de este estribo no estuvo clara desde el primer momento (en el que se pensó que era de edad oligocena), pero con las observaciones realizadas en 1952 se concluyó que la mancha triásica de Lorca y de Lácar penetra profundamente en el vaso del embalse y que en las inmediaciones del estribo derecho coinciden los típicos índices del Keuper: cobertera de carniolas, jacintos de Compostela y chimeneas ofíticas. Existen discordancias estratigráficas, fallas y en general, es un terreno atormentado por fuerzas orogénicas. Diapiro Triásico.	FISURAS/ 700 l/s	Velocidad de filtración de 0,4 m/s: no fue disolución, fue erosión. En una distancia de 350 m, el agua disolvió entre 0,3-0,6 g/l
Anchor	Arroyo Owl/ Wyoming/ EEUU	60/ 1960/ Hormigón (arco delgado)	Johnson, K. S., 2008	Cimentada en formaciones yesíferas triásicas y pérmicas. También existen dolomías kársticas fracturadas.		La existencia de grietas, hundimientos y karstificación causaron problemas para retener el agua del embalse. A pesar de las inyecciones, el problema no se ha erradicado
Argos	Argos/ Murcia/ España	33/ 1970/ Materiales sueltos	Escario, V., 1967	La margen derecha está formada por un escarpe casi vertical, de calizas y margas. Este bloque está "cabalgado" sobre las calizas y margas del fondo del cauce y entre ambos, existe una capa de yesos y arcillas yesíferas del Keuper, que sirvieron de lubricante para desplazar un bloque sobre otro	Hubo filtraciones destacables en el estribo derecho	La solución de Proyecto consistió en eliminar la grieta de yesos y arcillas bajo el núcleo de la presa y rellenarla con hormigón. Se dejaron los terrenos yesíferos bajo los espaldones. Se realizaron dos pantallas de inyecciones, con el fin de dejar los yesos en zonas estancas
Avalon	Pecos/ Nuevo México/ EEUU	18/ 1936/ Materiales sueltos	Flores Calcaño, C.E.; Rodríguez Alzuru, P., 1967 / James, A.N., 1992 / Milanovic, P.T., 2000	Grandes depósitos de yeso asociado con calizas. Los estribos, en su parte alta, presentan capas de yeso	FISURAS/ Gran cantidad de agua se filtra en los estribos	Abandonada por problemas de disolución. No se pudo llenar hasta su nivel de diseño por las filtraciones

NOMBRE DE LA PRESA	RÍO/ PROVINCIA/ ESTADO/ PAÍS	ALTURA S.C. (m)/ AÑO CONSTR./ TIPOLOGÍA	REFERENCIAS	GEOLOGÍA	TIPO DE FLUJO/ CAUDAL	OTROS DATOS
Badush	Tigris/ Mosul / Irak	90 m en Proyecto original, pero se ha construido de 20 m/ 1990 (se paró en 2003)/ Mixta	Anagnosti, P.; Adamo, N.N., 1991	Yesos y calizas del Mioceno		Situada entre la presa de Mosul y la ciudad de Mosul. Se empezó a construir en 1990, pero se paró antes de 2003. Su finalidad era la producción de energía eléctrica, pero al estar aguas abajo de Mosul, los ingenieros americanos, quieren que contenga la avenida que produciría la rotura de Mosul; sin embargo, el gobierno iraquí no está dispuesto a invertir ese dinero
Balaguer	Segre/ Lleida/ España	11/ 1958/ Mixta	Llamas, M.R., 1965			Se cita en el artículo, pero no se da ningún dato
Bramans	Arc/ Alpes (cerca de Grenoble)/ Francia	8/ 1912/ Azud de toma del canal del salto de Avrieux	Llamas, M.R., 1965	La región se caracteriza por su violenta tectónica de mantos de corrimientos. La superficie de despegue de unos mantos con otros está constituida, por lo general, por yesos, que han actuado como lubricante. Estas masas de yesos constituyen una milonita que con frecuencia engloba materiales del manto superior y del inferior y bloques de calizas dolomíticas y margas transformadas en esquistos. Se supone que los yesos, las calizas dolomíticas y los esquistos son triásicos y las calizas del Muschelkalk, pero en cualquier caso, sometidos a fuerte tectonización	FISURAS/ 200 l/s	La presa no está apoyada sobre los yesos, sino sobre los depósitos aluviales cuaternarios más o menos cementados y sobre los materiales residuales procedentes de la alteración del conjunto yesífero. La filtración fue por debajo del muro de acompañamiento del aliviadero, pero procedía de una zona lejana, concluyéndose que provenían de un conducto formado a través de los yesos
Brantley	Pecos/ Nuevo México/ EEUU	46/ 1988/ Mixta	James, A.N., 1992 / Claassen, H.C., 1981	Acuífero con dolomía, caliza y calcita cementada de yeso y anhidrita, arcilla y arenisca. Permeabilidad de 23 m/s antes de la construcción. Velocidad de 10 mm/s. Pero se podría incrementar con el llenado		Se estudió la ubicación debido a los yesos. Acuífero de alta permeabilidad. La masa disuelta se estimó en 16.000 m³/año
Bratsk	Angara/ Este de Siberia/ Rusia	125/ 1963/ Hormigón (recta)	Milanovic, P.T., 2004	Formaciones de yeso-sal-carbonatos de Cambrian		Con problemas de disolución de yesos. Karst con sumideros

NOMBRE DE LA PRESA	RÍO/ PROVINCIA/ ESTADO/ PAÍS	ALTURA S.C. (m)/ AÑO CONSTR./ TIPOLOGÍA	REFERENCIAS	GEOLOGÍA	TIPO DE FLUJO/ CAUDAL	OTROS DATOS
Buena Vista	No está en un río/ California/ EEUU	3/ 1890/ Materiales sueltos	James, A.N., 1992 / Sherard, J.L.; Woodward; Gizienski; Clevenger, 1963	Vetas de yeso en la cimentación	Filtraciones importantes	Larga historia de filtraciones, subsidencia, etc.
Carrizal	Arroyo el Carrizal (o la Retuerta)/ Ciudad Real (Retuerta de Bullaque)/ España	15/ 1976/ Hormigón	Yagüe Córdoba, J.; Alonso Franco, M., 1999	Cimiento con yeso		Erosión en cuerpo de presa
Carter Lake	--/ Colorado/ EEUU	65/ 1940/ Materiales sueltos	Johnson, K. S., 2008	Karst yesífero	100 l/s	Pérdida del agua en el embalse debido al karst de la formación Lykins. El agua filtrada está cerca de la saturación en yeso
Casa de Piedra	Colorado/ La Pampa/ Argentina	50/ 1990?/ Materiales sueltos	Cooper, A.H., Calow, R.C., 1998	Yeso en la cimentación. Principalmente en la margen izquierda: banco de yeso de 800 m de largo y 4-5 de profundidad. Se excavó ese banco (unos 2 millones de m ³)		Karst en yeso
Caspe II	Guadalepe/ Zaragoza/ España	56/ 1989/ Materiales sueltos zonificada	Araoz Sánchez-Albornoz, A., 1992 / Araoz Sánchez-Albornoz, A., 1993 / García Yagüe, A., 2003 / Menendez Cornejo, A.; López Palancar, J.J., 1992 / García Yagüe, A., 1988	Terrenos miocenos de margas y areniscas, con interestratos de yeso centimétricos acompañados de limolitas (marga incoherente de cemento limoso) muy susceptibles a la erosión interna, existiendo yeso en las numerosas fracturas y diaclasas e, incluso, en la propia matriz de roca margosa o areniscosa. En cuanto a la estratificación es casi horizontal con buzamientos pequeños hacia el centro de la cuenca, aunque existen pequeños movimientos originados por tectónica o diapirismo. Esto origina que la fracturación sea compleja y confusa.	Primer llenado: 1300 l/s en Mina Ciega. Segundo llenado: filtraciones en estribo derecho	Posteriormente, en el año 1990 y en la cerrada de la presa, se empieza a desarrollar un crecimiento exponencial en la evolución de los caudales, alcanzando un máximo de 28 l/s
Castaic	Castaic/ California/ EEUU	137/ 1971/ Materiales sueltos	James, A.N., 1992	Pizarras y areniscas. Capas de yeso cristalino de 3 a 12 mm, cada m, en la cimentación		
Cavalry	Arroyo Cavalry (afluente del Washita)/ Oklahoma/ EEUU	10/ 1957/ --	Flores Calcaño, C.E.; Rodríguez Alzuru, P., 1967 / James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978	Cimentación con yeso masivo de gran espesor	FISURAS	Apareció un sumidero en el estribo derecho tras el llenado. Se trató y está en observación continua

NOMBRE DE LA PRESA	RÍO/ PROVINCIA/ ESTADO/ PAÍS	ALTURA S.C. (m)/ AÑO CONSTR./ TIPOLOGÍA	REFERENCIAS	GEOLOGÍA	TIPO DE FLUJO/ CAUDAL	OTROS DATOS
Cerrada de la Puerta	Guadiana Menor/ Jaén (Huesca y Pozo Alcón)/ España	--/ No se ha construido. En 2010 se ha aprobado la construcción de la presa/ --	Servicio Central de trabajos hidráulicos. Comisión de estudio de las obras de riego en la región inferior del Guadalquivir (ROP 1906)	Es un estrechamiento seguido de un valle amplísimo. Son macizos de caliza cretácica. Aguas arriba aparecen los yesos y margas que constituyen prácticamente la totalidad del vaso.		En los antecedentes de 1906, quedó pendiente el estudio porque no se sabía si la cerrada era impermeable. En el año 2008 la Confederación del Guadalquivir estaba redactando el Anteproyecto dentro del Programa General de Alternativas al embalse de Úbeda la Vieja
Chocón	Limay/ Neuquén-Río Negro/ Argentina	86/ 1977/ Materiales sueltos	Giuliani, F.L., 2004 / Sánchez Caro, F.J., 2005	Problemas de disolución de yeso presente en las fisuras de la roca de cimentación. Yeso en las discontinuidades del macizo de hasta 2 cm de espesor. Reparación en 1989	40 l/min en la margen derecha	Concentración de sales solubles del orden de 2 g/l. Aguas abajo están las poblaciones de Neuquen y Cipolletti, por lo que se gastaron 60 millones de \$ en repararla
Dos Pueblos	Dos Pueblos/ California/ EEUU	78/ 1946/ Materiales sueltos	Flores Calcaño, C.E.; Rodríguez Alzuru, P., 1967	Problemas de disolución de yeso en los estribos		Limitan el nivel del embalse para disminuir el volumen de filtraciones. No han efectuado tratamiento por considerarlo antieconómico
Dry Canyon	--/ California/ EEUU	20/ 1912/ Materiales sueltos	James, A.N., 1992 / Sherard, J.L.; Woodward; Gizienski; Clevenger, 1963	Capas de yeso entrelazadas. Coeficiente de permeabilidad 3.10^{-5} m/s		Larga historia de reparaciones. Desde 1960 no se ha llenado. En 1938 tuvo filtración que suponía una pérdida de masa de 3,1 m ³ /día. En 1944, de 60 m ³ /día
El Isiro	Coro/ Falcón/ Venezuela	35/ 1963/ Materiales sueltos, zonificada	Flores Calcaño, C.E.; Rodríguez Alzuru, P., 1967 / James, A.N., 1992	Yeso en vetas, láminas, Está ubicada en una zona de meteorización de rocas marinas en climas áridos.		Parecida a San Fernando. Se realizaron inyecciones de cemento; no tiene pantalla ni tapiz. Un piezómetro aguas arriba y otro ag. abajo separados 50 m detectaban un incremento del arrastre en 10.000 ppm. Muestras de 3 g se disolvieron agua corriente en 20 días; de 16 g, perdió la mitad de su peso en 21 días
Estanca Alcañiz	Derivación del río Guadalepe/ Teruel/ España	15/ Siglo XIII. Fue recrecido en 1930/ Materiales sueltos homogénea	Morlans Martín, H.J.; Cid Rodríguez-Zúñiga, V., 1993 / García Yagüe A., 2003	Terrenos del mioceno medio-inferior, con alternancia de arcillas, margas, areniscas, calizas y yesos de origen secundario (en forma de vetas en las margas y de espesores entre 1 mm y varios cm)	En 1991, aguas abajo de la presa aparecieron filtraciones de 2 l/s, que aumentaron hasta 8 l/s	Se decidió impermeabilizar la presa mediante una pantalla plástica de bentonita cemento, de 0,6 m de espesor, ejecutada con hidrofresa

NOMBRE DE LA PRESA	RÍO/ PROVINCIA/ ESTADO/ PAÍS	ALTURA S.C. (m)/ AÑO CONSTR./ TIPOLOGÍA	REFERENCIAS	GEOLOGÍA	TIPO DE FLUJO/ CAUDAL	OTROS DATOS
Estremera	Tajo/ Guadalajara/ España	13/ 1950/ Hormigón (planta recta)	Llamas, M.R., 1965	Cimentada en el mioceno yesífero del Sarmatiense, constituido por un conjunto margoso de tonos grisáceos, azulados o verdosos en el que aparecen intercalados frecuentes niveles yesosos o salíferos. Hay depósitos fluviales cuaternarios sobre este conjunto y a veces se intercala una masa arcillosa procedente de la alteración de los materiales sarmatienses. En la zona central, sobre margas yesíferas, las pantallas de tablaestacas construidas han protegido de la posible disolución del cemento	25.000 l/s por estribo derecho, en 1955, debido al sifonamiento de los materiales cuaternarios	En 1955 hubo unas filtraciones por el estribo derecho que dieron lugar al arrastre de sedimentos cuaternarios. Se rellenó de hormigón (250 m³), se inyectó y se hicieron también tablaestacas en las laderas. Las margas yesíferas dan valores de 2-5 l/m/min con presiones entre 2 y 5 atm / El porcentaje era menor que 1% en materiales cuaternarios.
Fontanelle	Green / California/ EEUU	42/ 1963/ Materiales sueltos	James, A.N., 1992	Presencia de minerales altamente solubles (areniscas, limolitas y lutitas)		Disolución de yeso. Requirió atención urgente en 1983. Pantalla de hormigón. La masa disuelta se estimó en 3,1 m³/día
Hackberry Draw	Hackberry Draw/ Nuevo México/ EEUU	hay 2, una de 34 m y otra 46 m/ 1966/ Materiales sueltos	Flores Calcaño, C.E.; Rodríguez Alzuru, P., 1967	Cimentación altamente yesífera		La presa falló totalmente debido a grandes asentamientos diferenciales y tubificación
Hessigheim	Neckar/ Ludwigsburg/ Alemania	6/ 1958/ Hormigón	Milanovic P.T., 2004 / Samman Pepprah E., 2004 / Wittke, W.; Hermening, H., 1997	Triásico. Bajo los sedimentos de arena y grava del río y de otra capa de arcilla residual, existe una capa de roca que contiene un 99% de yeso, y bajo ésta, capas de yeso de aproximadamente el 60% de yeso. Coeficiente de permeabilidad del yeso 10 ⁻⁹ m/s	FISURAS	Karst. Se analiza la evolución de los huecos (karst) con condiciones de flujo limitadas (ya que sobre el yeso masivo existe una capa bastante impermeable, de 10 ⁻⁷ m/s)
Hondo	Hondo/ Nuevo México/ EEUU	43/ 1968/ Mixto	Flores Calcaño, C.E.; Rodríguez Alzuru, P., 1967 / James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978 / James, A.N., 1992 / Milanovic, P.T., 2000	Grandes depósitos asociados con calizas donde se han desarrollado sumideros por disolución del yeso y hundimiento posterior del terreno suprayacente	FISURAS	Abandonada por problemas de disolución. Nunca se pudo mantener el agua del embalse, pues se escapaba por nuevos sumideros que se abrían y que aparecían como manantiales aguas abajo
Horsetooth	Fuera de un curso/ Colorado/ EEUU	47/ 1949/ Materiales sueltos	Willmann, M., 2001 / Johnson, K. S., 2008 / Craft, C. D.; Pearson, R. M.; Hurcomb, D., 2007	Formaciones de triásico y pérmico. Existe una capa que aflora en un estribo de pizarras y delgadas capas de yeso.	FISURAS	Karstificación con permanente filtración bajo la presa

NOMBRE DE LA PRESA	RÍO/ PROVINCIA/ ESTADO/ PAÍS	ALTURA S.C. (m)/ AÑO CONSTR./ TIPOLOGÍA	REFERENCIAS	GEOLOGÍA	TIPO DE FLUJO/ CAUDAL	OTROS DATOS
Huo Shi Po	--/ Guizhou/ China	23/ --/ Materiales sueltos	Milanovic, P.T., 2004 / Milanovic, P.T., 2000 / Cooper, A.H., Calow, R.C., 1998 / Wuzhou, H., 1988	Embalse en formaciones triásicas con dolomías intercaladas con yesos (espesores de las capas de varios mm a 1,5 m). Estratos con yeso disuelto	FISURAS	Karst. Tras el primer llenado, y debido a la disolución, la filtración laminar fue reemplazada por flujo a través de conductos. Tuvieron que tratar el cimiento con inyecciones y tapizaron con arcilla las capas de yeso
Kamskaya	Kama/ Perm/ Rusia	21/ 1954/ Hormigón	Kushlin, V.V.; Shestopal, A.O.; Sinyanskaya, A.A., 1990 / Klimchouk, A.; Andrejchuk, V., 1996 / Milanovic, P.T., 2004 / Milanovic, P.T., 2000 / Nedriga, V.P.; Dem'yanova, É.A., 1986	Está ubicada en una zona de geología compleja, con calizas, yesos, anhidrita, dolomías....	FISURAS/ Después del llenado de la presa, las filtraciones a través de la cimentación aumentaron	El incremento de sulfatos en la filtración indicaba un proceso de disolución del yeso. Se reconstituyó la pantalla existente. Se empezó a llenar el embalse y se produjo una sufusión que incrementó la permeabilidad de forma muy importante y en el periodo de 1956 a 1961 ocurrieron 11 colapsos frente a los 2 que habían sido registrado en los 50 años previos
La Loteta	Arroyo Carrizal/ Zaragoza/ España	34/ 2005/ Materiales sueltos zonificada	Lafuente Dios, R. J.; Gómez López de Munain, R.; Alonso Franco, M.; Martínez Parrondo, J.M., 2002 / Lafuente Dios, R. J.; Gómez López de Munain, R.; Soriano Peña, A.; Sánchez Caro, F.J.; Martínez Parrondo, J.M., 2002 / Lafuente Dios, R. J.; Gómez López de Munain, R.; Gesti Canuto, J.A.; Martínez Parrondo, J.M., 2002	El embalse está enclavado dentro del relleno terciario del sector central de la Depresión del Ebro. Corresponde a la edad miocena (Aragoniense). La cimentación está compuesta por dos series subhorizontales alternantes, de margas grises con abundantes niveles de yesos (algunos ligeramente karstificados) y argilitas marrones y pardo-rojizas con escasa presencia de yeso. Por debajo de esta serie aparecen niveles salinos de halitas y glauberitas. Coeficiente de permeabilidad capa yesífera 10^{-6} cm/s		Los materiales que forman la cimentación de la presa presentan problemas de disolución de yesos que producen fenómenos de subsidencia kársticas: las margas y las arcillas se amoldan a las formas subsidentes y los paquetes de yeso alabastrino, se fracturan. Se empezó a llenar en 2009
Magnum o Burkhartsmeier	Trsage/ Montana/ EEUU	15/ 1950/ Materiales sueltos	Johnson, K. S., 2001 / Johnson, K. S., 2008			

NOMBRE DE LA PRESA	RÍO/ PROVINCIA/ ESTADO/ PAÍS	ALTURA S.C. (m)/ AÑO CONSTR./ TIPOLOGÍA	REFERENCIAS	GEOLOGÍA	TIPO DE FLUJO/ CAUDAL	OTROS DATOS
MacMillan	Pecos/ Nuevo México/ EEUU	17/ 1893/ Materiales sueltos	Flores Calcaño, C.E.; Rodríguez Alzuru, P., 1967 / James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978 / Esmiol, E.E., 1957 / James, A.N., 1992 / Sherard, J.L.; Woodward; Gizienski; Clevenger, 1963 / Claassen, H.C., 1981 / Milanovic, P.T., 2004 / Milanovic, P.T., 2000	Grandes depósitos de yesos asociados con calizas. También había grandes sumideros en el lado izquierdo del embalse y que formaban manantiales a 6 km de la presa	FISURAS	Abandonada por problemas de disolución. Karst. El agua salía a 6 km aguas abajo de la cerrada. Entre 1893-1942 se estimaron que 50 millones de m ³ de canales se crearon por disolución
Moses Saunders	Trcanandaigua/ New York-Ontario/ Frontera EEUU- Canadá	20/ 1966/ Hormigón	Flores Calcaño, C.E.; Rodríguez Alzuru, P., 1967 / Dayal Z.; Bechai K., 1990	Yeso en las cimentaciones		Proyectaron una pantalla principal de inyecciones y una cantidad importante de cemento para estabilización de la base de la presa. Las aguas recogidas por las galerías de drenaje contenían un alto porcentaje de sulfatos y hubo que reinyectar, disminuyéndose las filtraciones que tenían lugar
Mosul o Chambarakat (antiguamente de Saddam)	Tigris/ Mosul / Irak	110/ 1984/ Materiales sueltos	James, A.N.; Kirkpatrick, I.M., 1980 / Guzina, B.J.; Saric, M.; Petrovic, N., 1991 / James, A.N., 1992 / Calvino, F.; Costantino, F.; Mirri, F., 1981 / Claassen, H.C., 1981 / Milanovic, P.T., 2004 / Jassim, S.Z.; Jibril, A.S.; Numan, N.M.S., 1995 / Milanovic, P.T., 2000	Margas yesíferas miocenas. También anhidrita	FISURAS/ De 500 a 1500 l/s entre febrero y agosto de 1986	Potencialmente, la presa actual más peligrosa en términos de erosión interna del cimiento (ver presa Badush). Karst. Filtraciones muy importantes. La pérdida de masa se estimó en 130.000 t entre febrero y agosto de 1986 (42-80 t/día)
Olive Hills	-/ California/ EEUU	30/ 1962/ Balsa	Flores Calcaño, C.E.; Rodríguez Alzuru, P., 1967 / James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978 / James, A.N., 1992	Cimentado en lutitas que presentan yeso en cristales y pedazos macizos grandes	FISURAS/ 60 l/min	Aguas filtradas 1000 ppm de cloruro; en el embalse 99 ppm. No ha presentado problemas relacionados con el yeso, pero está en constante observación

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 Flores Calcaño, C.E.; Rodríguez Alzuru, P., 1967 / James, A.N.; Lupton, A.R., 1978	Luitas arcillosas con yeso (fragmentos de 5-20 mm de espesor y del orden de 5-10%), sobre areniscas. $K_h=5 \cdot 10^{-7}$ m/s y gradiente de 0,3 / 10%	INTERGRA-NULAR	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		Estaba cimentada en formaciones sedimentarias del Triásico, con dolomías y yesos. Según Soriano, el yeso jugó un papel menor	1 m³/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	INTERGRA-NULAR/ 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 Éufrates/ Kerbala/ 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 o en cristales milimétricos. Se construyó una pantalla de bentonita cemento de 0,50 m de espesor

NOMBRE DE LA PRESA	RÍO/ PROVINCIA/ ESTADO/ PAÍS	ALTURA S.C. (m)/ AÑO CONSTR./ TIPOLOGÍA	REFERENCIAS	GEOLOGÍA	TIPO DE FLUJO/ CAUDAL	OTROS DATOS
Red Rock	Des Moines/ Iowa/ EEUU	30 ó 34/ 1969/ Materiales sueltos	Flores Calcaño, C.E.; Rodríguez Alzuru, P., 1967 / James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978 / James, A.N., 1992	Cimentada en interestratificación de areniscas y calizas con lutitas más profundas. El yeso se encuentra en forma de domos a una profundidad entre 3 y 12 m por debajo de la lutita y con un espesor de hasta 6 m. Por encima, lutita impermeable y sobre ésta, areniscas y calizas o grava y arena de 8-10 m de espesor en el lecho del río Facies yesífera del Vindoboniense (Mioceno) en la cerrada: bancos de yesos sacaroideos blancos y margas yesíferas miocenos. Lugeon muy variable en yesos (de 0 a más de 10) / Contenidos de yeso en paquetes masivos entre 40 y 55% en sulfato (próximos al 100% de yeso)	FISURAS	El yeso se tuvo en cuenta para el diseño de la presa. Se programaron inyecciones de cemento intensivas. Muestras del yeso sumergidas en agua corriente disminuyeron su tamaño a la mitad en un par de semanas
Riansares	Río Riansares (junto confluencia con Bedija)/ Cuenca/ España	-/ No se ha construido/ Materiales sueltos	Foyo, A.; Tomillo, C., 1995 / Barrera Serrano, J., 1991			No está construida, pero se estudió el emplazamiento. Hay dos referencias, una de hace 200 años ligada a la construcción de la presa del Gasco en Corral de Almoguer y otra más reciente, en 1991, ligada a la recuperación de lagunas y estudiada por el Servicio Geológico en Horcajo de Santiago
Rogun	Vakhsh/ cerca de Komsomolabad/ Tajikistán	335/ En 1993, cuando tenía 60 m de altura fue destruida por una avenida y no se continuó la construcción/ Materiales sueltos	Nedriga, V.P.; Dem'yanova, É.A., 1986	Cimentada en areniscas, limolitas y argilitas, con intercalaciones de yesos y con una falla bajo el espaldón de la presa rellena de halita		El espesor de la capa de halita es de 20-25 m en la parte superior y de 100 m a unos 500 m de profundidad. Proyectaron una galería y una pantalla de inyecciones en la parte superior de esta capa
Salzderhelden	Leine/ Salzderhelden / Alemania	14,5/ 1961/ Diques y un aliviadero con compuertas para control de inundaciones	Heitfeld, K.H.; Krapp, L., 1991	Sedimentos clásticos, calizas y evaporitas (yeso y anhidrita)	FISURAS/	Karst de yesos. El aliviadero y el dique este están sobre cavidades detectadas en sondeos; se inyectó. El dique norte está considerado seguro La situada más aguas arriba, en 1922, tuvo filtraciones. Aguas filtradas 1130 ppm de azufre; en el embalse 130 ppm. 200 m³ de sólidos disueltos, principalmente sulfatos, del año 1933 al 1964 (31 años). 1130 mg/l como azufre = 3390 mg/l como sulfato = 6,1 g/l como yeso Sufrió un terremoto en 1971. Están fuera de servicio. Hay una nueva presa entre Upper y Lower.
San Fernando (Upper)	-/ California/ EEUU	25/ 1918/ Materiales sueltos	Flores Calcaño, C.E.; Rodríguez Alzuru, P., 1967 / James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978 / James, A.N., 1992	Cimentación de lutita meteorizada, con delgadas vetas de yeso (hasta 0,5 cm de espesor) en bastante cantidad. Es yeso de origen secundario, rellenando fracturas, diaclasas y planos de estratificación	INTERGRANULAR/ 240 l/min (18 l/min tras las inyecciones)	

NOMBRE DE LA PRESA	RÍO/ PROVINCIA/ ESTADO/ PAÍS	ALTURA S.C. (m)/ AÑO CONSTR./ TIPOLOGÍA	REFERENCIAS	GEOLOGÍA	TIPO DE FLUJO/ CAUDAL	OTROS DATOS
San Francisco	Arroyo San Fracisquito/ California/ EEUU	59/ 1925/ Hormigón	Flores Calcaño, C.E.; Rodríguez Alzuru, P., 1967 / James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978 / James, A.N., 1992 / Sánchez Caro, F.J., 2005	Conglomerado con cemento yesífero en la cimentación de uno de los estribos. Coeficiente de permeabilidad 10^{-5} - 10^{-6} m/s (el último más real). Porcentaje 1-10% de yeso en el cemento del conglomerado	INTERGRANULAR	Falló catastróficamente en 1928, a la semana del primer llenado. James, A.N. estima una velocidad de avance del frente de disolución de 1 m/año (gradiente de 3, $K=10^{-6}$ m/s). La causa de la rotura no debió ser por la disolución del yeso, pero agravó el proceso
San Juan de Altorricón	Arroyo Orriols/ Huesca/ España	20/ 2000/ Balsa de riego con diques de tierra	Gutiérrez, F.; Desir, G.; Gutiérrez, M., 2003	Aluvial yesífero y arcillas dispersivas. Porcentaje 40% de yeso		Falló en 2001
San Lorenzo (Mongay)	Segre/ Lleida/ España	25/ 1930/ Mixta	Llamas, M.R., 1965			Se cita en el artículo, pero no se da ningún dato
Sandford	Canadian/ Texas/ EEUU	70/ 1964/ Materiales sueltos	Flores Calcaño, C.E.; Rodríguez Alzuru, P., 1967 / James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978	Las formaciones de los estribos presentan lutitas con vetas de yeso de 1 a 1,5 m de espesor, en forma laminada o masiva. A 30 m de profundidad existen chimeneas rellenas de materiales de formaciones superiores y que se formaron por la disolución del yeso	FISURAS E INTERGRANULAR/	En buen estado
Santa Ana	Noguera Ribagorçana/ Huesca/ España	101/ 1961/ Arco Gravedad	García Yagüe, A., 2003	Existe una fractura rellena de arcilla roja con yeso que atraviesa su estribo derecho		
Taibilla	Taibilla/ Albacete/ España	40/ 1973/ Materiales sueltos	Alonso Franco M., 1993 / Alonso Franco M., 2003	Arcillas, margas arcillosas, yesos grises y blancos	A nivel normal 90 l/s En el primer llenado, se formaron 400 dolinas en el tapiz y una filtración de 1800 m³/s bajo la presa	Disolución de yesos en el cimiento provocó un cráter en el espaldón de aguas arriba
Tarbela	Indus/ Haripur/ Pakistán	145/ 1974/ Escollera con núcleo inclinado	Tariq, S.M., 2003 / Izhar-Ul-Haq, 1991	Aluvial de 220 m de espesor. Yesos en el estribo derecho		Tiene un tapiz de arcilla de 2280 m de longitud, 12,8 m de espesor cerca de la presa, aunque luego disminuye (para que el gradiente fuera 1/15). Pérdida de masa en yesos de 50 t/día
Tbilisi	--/ cerca de Tbilisi/ Georgia	20/ --/ Hormigón	Nedriga, V.P.; Dem'yanova, É.A., 1986	Cimentada en areniscas, limolitas y argilitas. A una profundidad entre 15-20 m, las rocas contienen entre 7-21% de yeso. Coeficiente de permeabilidad de 7-10 m/día	Aumentó a 0,015 m³/s	En el llenado de la presa hubo desplazamientos y grietas en los bloques de la presa, debido a la disolución. Fue construida sin pantalla, pero se ejecutó tras los problemas del llenado. Pérdida de masa de 2,6 t/día

NOMBRE DE LA PRESA	RÍO/ PROVINCIA/ ESTADO/ PAÍS	ALTURA S.C. (m)/ AÑO CONSTR./ TIPOLOGÍA	REFERENCIAS	GEOLOGÍA	TIPO DE FLUJO/ CAUDAL	OTROS DATOS
Tiber	Marías/ Montana/ EEUU	64/ 1951 - 1956/ Materiales sueltos	Fell, R.; MacGregor, P.; Stapledon, D., 1992	Luitas con pequeñas vetas de yeso	FISURAS	Tuvo asentamientos después del primer llenado, en 1956, debidos a la disolución
Úbeda la Vieja	Guadalquivir (entre Doña Aldonza y Pedro Marín)/ Jaén/ España	60/ No se ha construido/ -	García Yagüe, A., 1988	Trías diapírico (sales)		Estudio de la cerrada 2 de 5/88. Se consideró factible su construcción por el Servicio Geológico
Upper Gotvand	Karun/ Gotvand/ Irán	178/ En construcción/ Materiales sueltos	Sadrekarami, J.; Kiyani, M.; Fakhri, B.; Vahdatirad, M.J.; Barari, A., 2010	Cimentada en las formaciones Bakhtiari y Aghajari, esta última con venas de yeso usualmente asociadas con arcillas. La disolución de las venas de yeso aumentaron la permeabilidad de 75-300 veces dependiendo del ancho y del espaciamiento de fisuras considerados en el cálculo		Se ha realizado un estudio de la filtración mediante SEEP3D. El análisis en 3D obtenía caudales de 2 a 4 veces mayores que el análisis en 2D. Se recomendó una pantalla plástica profunda de hormigón y una galería longitudinal para el caso de tener que realizar inyecciones en el futuro

TABLA N° 2 : Presas referenciadas.

Como ejemplo de una documentación detallada del proceso de evolución de caudales a lo largo del tiempo, en la FIGURA N° 6 se muestra un gráfico realizado para la presa de Caspe. Esta presa de materiales sueltos está cimentada en margas y areniscas, con interestratos de yeso centimétricos acompañados de limolitas muy susceptibles a la erosión interna, existiendo yeso en las numerosas fracturas y diaclasas e, incluso, en la propia matriz de roca margosa o areniscosa. Durante sus primeros llenados tuvo diversas incidencias, debidas a la disolución del yeso, pero también a la erosión del cimientto.

En el gráfico citado se puede observar el crecimiento exponencial experimentado por los caudales en apenas unos meses (correlacionado con el nivel del embalse) y el efecto del tratamiento de inyecciones realizado para disminuir las filtraciones.

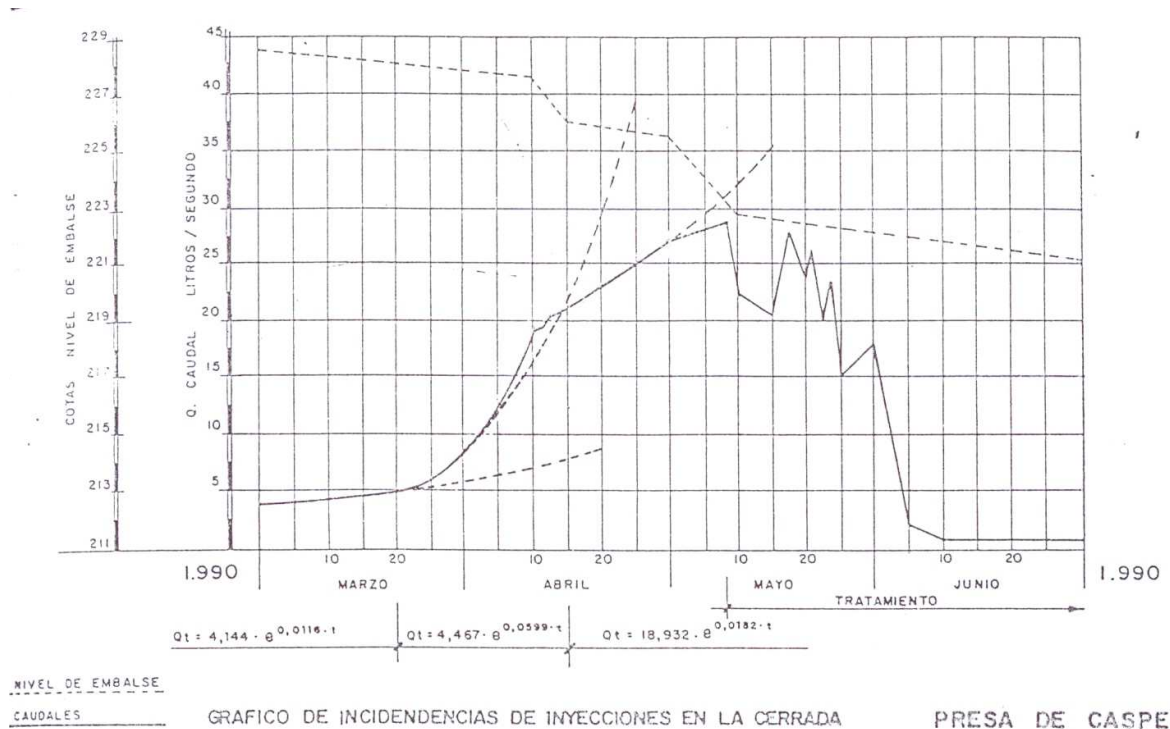


FIGURA N° 6 : Gráfico de caudales filtrados en el tiempo en la presa de Caspe (Araoz Sánchez-Albornoz, A., 1992).

Es destacable, fundamentalmente por su complicada geología y su gran altura (335 m), la presa Rogun, proyectada en 1976 en Tajikistán y destruida en 1993, con 60 m de altura, por una avenida. Está cimentada en areniscas, limolitas y argilitas, con intercalaciones de yeso y con una falla bajo el espaldón de la presa rellena de halita. En la actualidad, se quiere reiniciar el proyecto con una presa de 350 m de altura.

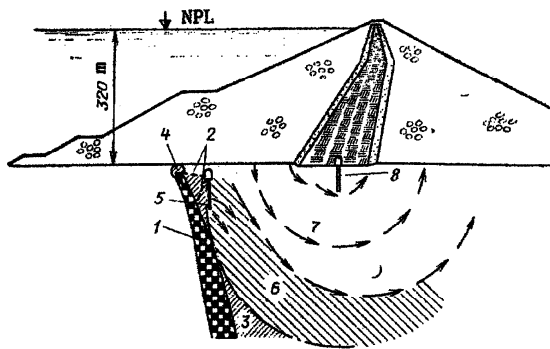


Fig. 2. Diagram of protectant salt bed in the base of the Rogun dam: 1) salt bed; 2) holes for delivering brine; 3) zone of flow of brine; 4) zone of grouting above the head of the salt bed; 5) holes for delivering fresh water; 6) zone of flow of fresh waters from holes of the hydraulic curtain; 7) zone of flow of fresh waters from the reservoir; 8) grout curtain.

FIGURA N° 7 : Sección tipo de la presa de Rogun (Tajikistan). (Nedriga, V.P.; Dem'yanova, É.A., 1986).

Es muy interesante, en el artículo de Nedriga, V.P.; Dem'yanova, É.A., 1986, la referencia a una presa en el río Kafirnigan (Tajikistán), donde se analizó la influencia de la disposición de una capa de yeso aguas arriba de la presa con la finalidad de saturar de yeso el agua antes de filtrarse por el cimiento.

En cuanto a referencias de presas constituidas por materiales yesíferos, se ha estudiado la presa de Razzaza, en Irán (Jiménez Salas, J.A. et al., 1980). Se construyó con arcilla que contenía yeso en un porcentaje superior al 6%, dominando el diseminado o en cristales milimétricos. En cuanto al cimiento, son areniscas cementadas con yeso. Esta presa ha sido recrecida en varias ocasiones (ver FIGURA N° 8), aunque su construcción data de 1948.

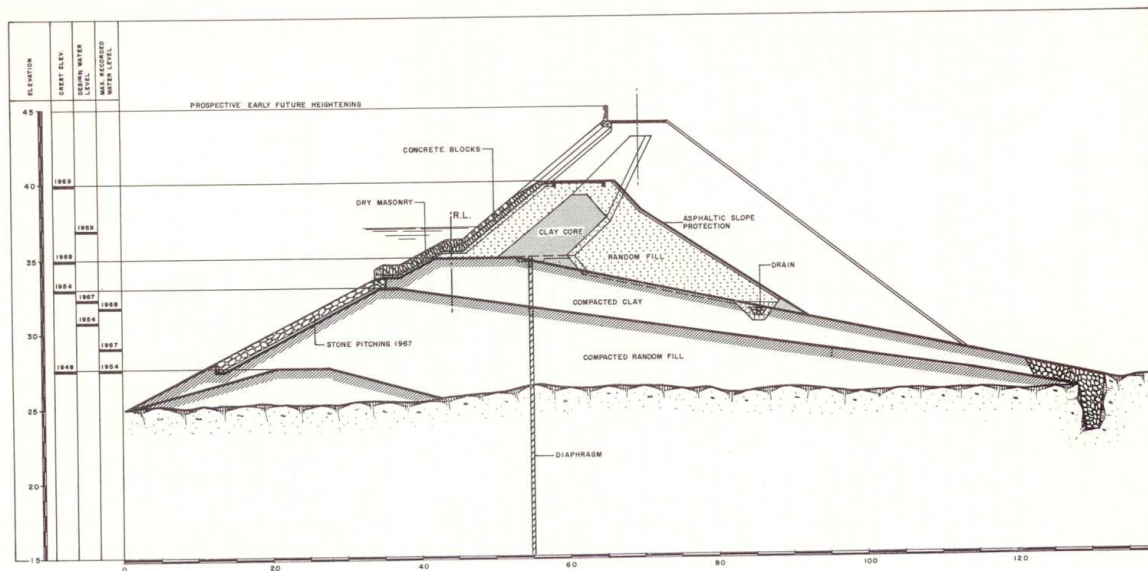


FIGURA N° 8 : Sección tipo del dique de Razzaza (Irán). (Toran, J., 1970).

Este dique no contenía al río, sino que configuraba el cierre de una depresión natural en la que se acumulaba el agua con las crecidas (lago Abu Dibbis). La evaporación era la única salida del agua (del orden de 2 m por

año). El lago abarca una superficie de 2.400 km² y tiene una capacidad de 31.000 hm³. La ciudad de Kerbala está ubicada unos 16 kilómetros aguas abajo del dique.

El último recrecimiento tiene una historia muy singular. En 1968, el gobierno iraquí le encargó a José Torán la evaluación de las ofertas y la supervisión de las obras del recrecimiento de 2 metros del dique. Finalmente, redactaron un nuevo proyecto, en el que decidieron construir el diafragma impermeable necesario, eliminando del primitivo sistema de “albarda sobre albarda” de acumular sólo tierras.

Por otra parte, Torán, basándose en un estudio hidrológico de las riadas del Éufrates de Témez Peláez, J.R. consiguió que el recrecimiento fuera de 5 metros. En primavera de 1969, cuando todavía no se había alcanzado la cota definitiva, se presentaron 10.500 hm³ en 5 meses (5.000 hm³ en un mes), quedándose el nivel en el lago a 1 m de la cota de construcción en ese momento. De este modo, se salvó la ciudad de Kerbala (Del Campo y Francés, A., 1982).

Por otro lado, en 2007, diversos periódicos se hicieron eco de una noticia sobre la presa de Mosul, en el río Tigris (Irak), debido a que ingenieros de la Armada americana la definían con la presa potencialmente más peligrosa del mundo (por riesgo de erosión interna del cimiento). Se muestra en la FIGURA N° 9 la sección tipo de la presa, con el corte geológico.

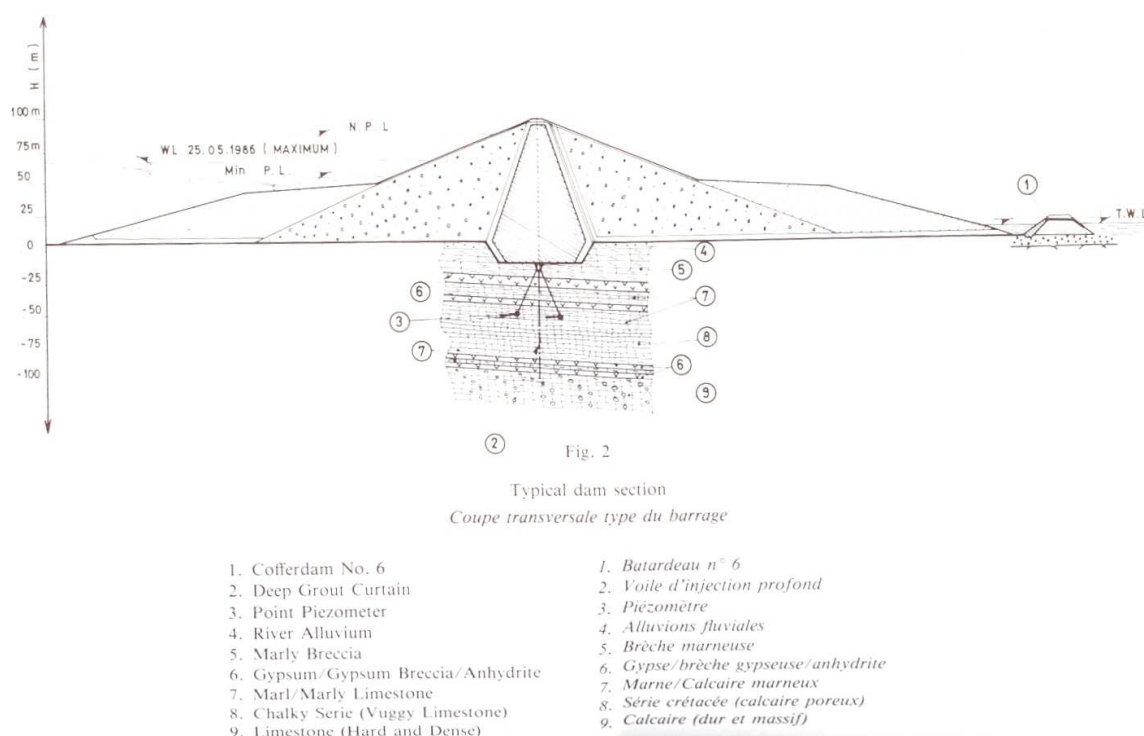


FIGURA N° 9 : Sección tipo de la presa de Mosul (Irak). (Guzina, B.J.; Saric, M.; Petrovic, N., 1991).

Esta presa, de 110 m de altura, está cimentada sobre margas yesíferas miocenas y su rotura afectaría a los 500.000 habitantes de la ciudad de Mosul.

En 1986 registró un aumento del caudal de filtración, de 500 l/s a 1.500 l/s en medio año, y la disolución de material del cemento que se estimó fue de 130.000 t.

La construcción de la presa de Badush, de 90 m de altura, ubicada aguas abajo de ésta, y que contuviera las aguas en caso de rotura de la presa de Mosul, se paralizó en 2003.



FOTO N° 3 : Presa inacabada de Badush (Irak)

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS TEÓRICO DE LA FILTRACIÓN – DISOLUCIÓN EN CIMENTACIONES

En este capítulo, se analiza la filtración en una cimentación de una presa como un flujo en un medio poroso, profundizando en conceptos tales como la porosidad efectiva y la permeabilidad, básicos para los modelos de redes de filtración; en cuanto a la disolución, se analiza el proceso químico y físico que la rige y se detallan los modelos de disolución posibles en el cimientto: por las fisuras o de partículas.

Sorbas (Almería)

ÍNDICE

CAPÍTULO 4.	ANÁLISIS TEÓRICO DE LA FILTRACIÓN – DISOLUCIÓN EN CIMENTACIONES	35
4.1.	FLUJO EN MEDIOS POROSOS	36
4.1.1.	Ley de Darcy.....	36
4.1.2.	Régimen laminar.....	37
4.2.	PERMEABILIDAD Y POROSIDAD	38
4.2.1.	Permeabilidad.....	38
4.2.2.	Porosidad.....	40
4.2.3.	Relación permeabilidad – porosidad	42
4.3.	DISOLUCIÓN DEL YESO.....	46
4.3.1.	Proceso químico	47
4.3.2.	Proceso físico.....	48
4.3.2.1.	Ecuación de Nernst.....	48
4.3.2.2.	Factores que influyen en la constante de disolución K_d	53
4.4.	MODELOS DE DISOLUCIÓN DEL CIMIENTO	57
4.4.1.	Disolución de fisuras.....	59
4.4.2.	Disolución de partículas.....	60
4.4.3.	Flujo en un acuífero adyacente a una capa soluble	67

4.1. FLUJO EN MEDIOS POROSOS

El análisis de la filtración en un cimiento se realiza habitualmente mediante la consideración de flujo en un medio poroso, considerando el terreno como un medio continuo, con los huecos interconectados.

4.1.1. Ley de Darcy

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:

$$v = Ki$$

donde la velocidad de filtración es proporcional al gradiente hidráulico i (pérdida de potencial por unidad de longitud en una línea de corriente), siendo la permeabilidad K el factor de proporcionalidad. El esquema se muestra en la FIGURA N° 10:

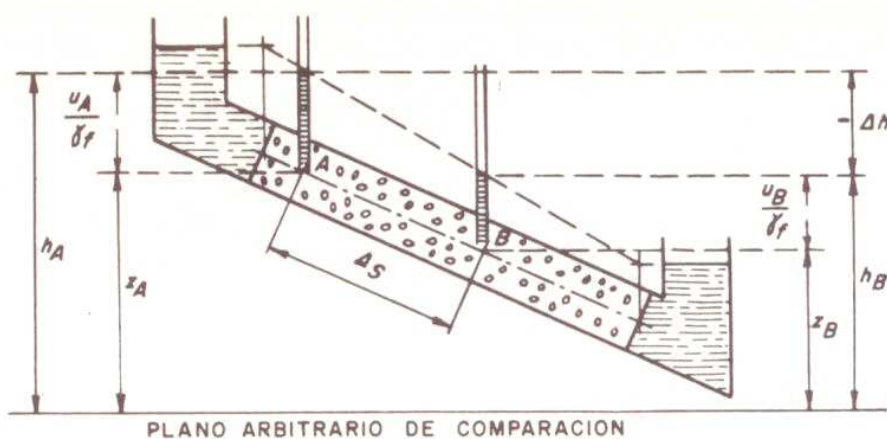


FIGURA N° 10 : Esquema de la ley de Darcy (Jiménez Salas, J.A.; De Justo Alpañes, J.L.; Serrano González, A., 1976).

La ley de Darcy considera el dominio de filtración como un continuo, sin tener en cuenta qué ocurre en cada camino que recorre el agua entre las partículas. La velocidad de Darcy no es la velocidad real del agua, que se puede obtener a partir de la anterior dividiendo por la porosidad eficaz (ya que el agua circula por los huecos intercomunicados).

La permeabilidad es: $K = \frac{g \times \rho}{\nu} \times K_i$ (unidades: L/T)

donde el primer término depende del fluido (de su densidad ρ (M/L³), su viscosidad ν (M/L/T) y por lo tanto, su temperatura) y K_i es la permeabilidad intrínseca del terreno (L²) y depende sólo de las características de

éste. Por lo tanto, la filtración del agua dentro del terreno se puede caracterizar únicamente con el parámetro K, en estas condiciones.

4.1.2. Régimen laminar

La condición de régimen laminar en un medio poroso se verifica para valores del número de Reynolds menores que 10 (aceptado por diversos autores, por ejemplo: González de Vallejo, L.I.; Ferrer, M.; Ortuño, L.; Oteo, C., 2002), siendo su expresión:

$$Re = \frac{\rho \times d \times v}{\nu}$$

Donde ρ = densidad del fluido (M/L³).

d = diámetro representativo de los poros (L). Se suele considerar el D_{50} (abertura de tamiz que deja pasar el 50% del material) en medios granulares y dos veces el ancho de la fisura en medios fisurados.

v = velocidad de Darcy (L/T).

ν = viscosidad del fluido (M/L/T).

A partir de esta expresión, y fijando el número de Reynolds, puede obtenerse para cada terreno dado cuál es el valor límite de la velocidad con régimen laminar. Si la velocidad aumenta, sobrepasando el régimen laminar y pasando a turbulento, deja de ser válida la ley de Darcy porque ya no actúan únicamente las fuerzas viscosas.

En la TABLA N° 3 se muestran valores de la velocidad límite de régimen laminar para distintas temperaturas y diámetros.

OBTENCIÓN PARA CADA DIÁMETRO Y T° DE LA VELOCIDAD LÍMITE PARA RÉGIMEN LAMINAR									
N° de Reynolds límite	10								
densidad agua (kg/m ³)	1,00E+03								
temperatura (°C)	20			10			5		
viscosidad (kg/m/s)	1,00E-03			1,31E-03			1,52E-03		
diámetro (cm)	0,001	0,010	0,100	0,001	0,010	0,100	0,001	0,010	0,100
v límite (m/s)	1,003	0,100	0,0100	1,306	0,131	0,0131	1,519	0,152	0,0152
v límite (cm/s)	100,300	10,030	1,003	130,600	13,060	1,306	151,900	15,190	1,519
v límite (m/día)	86.659,2	8.665,9	866,6	112.838,4	11.283,8	1.128,4	131.241,6	13.124,2	1.312,4
v límite (m/año)	31.630.608,0	3.163.060,8	316.306,1	41.186.016,0	4.118.601,6	411.860,2	47.903.184,0	4.790.318,4	479.031,8
v límite (cm/hora)	361.080,0	36.108,0	3.610,8	470.160,0	47.016,0	4.701,6	546.840,0	54.684,0	5.468,4

TABLA N° 3 : Velocidad límite de régimen laminar para distintas temperaturas y diámetros.

Las velocidades en suelos pueden ser menores de 10^{-4} m/s; sin embargo, en fisuras, juntas o fracturas de rocas, pueden ser 10.000 veces mayores. En un macizo diaclasado el flujo puede ser laminar o turbulento dependiendo de la apertura de las fisuras. Con suficiente densidad de fisuras, puede asimilarse a un macizo homogéneo con una permeabilidad equivalente.

4.2. PERMEABILIDAD Y POROSIDAD

4.2.1. Permeabilidad

La permeabilidad en un cimiento es debida a los “conductos” que se forman en su interior. Como se ha comentado anteriormente, el movimiento del agua a través de estos huecos se rige por la ecuación de Darcy, cuando están distribuidos con cierta uniformidad y conectados entre ellos. La filtración, en este caso se realiza por porosidad y es más propia de los suelos (“SEEPAGE”).

Otra forma de permeabilidad, más propia de las rocas, se efectúa a través de las fracturas y dependiendo del tamaño de éstas, puede ser un movimiento capilar, laminar o incluso turbulento (según los números de Weber y Reynolds, respectivamente). En este caso, la filtración se suele denominar percolación (“LEAKAGE”).

En el primer caso y en macizos rocosos con suficiente densidad de fisuras y con flujo laminar, el terreno se puede considerar como un medio continuo, siendo el parámetro que define al medio la permeabilidad. En el caso de las rocas, la permeabilidad a través de las fisuras depende del número de familias, del espaciamiento, de la apertura, del material de relleno,... pero todos estos factores se engloban en K, que se fija a partir de ensayos in situ ya que no se puede predecir a partir de las fisuras. Normalmente, se realizan ensayos Lugeon en rocas, ensayos Lefranc en suelos y rocas blandas y ensayos con permeámetros en suelos bastante permeables.

Por lo tanto, la permeabilidad de un terreno define la filtración del agua a través de él; pero es un valor muy variable (entre 10^3 cm/s en una escollera y hasta 10^{-12} cm/s en una arcilla muy pura). El hormigón tiene una permeabilidad entre 10^{-7} y 10^{-11} cm/s; un testigo de roca sana puede llegar a 10^{-10} cm/s o incluso menos y una muestra de roca diaclasada podría oscilar entre 10^{-2} y 10^{-4} cm/s (datos de Jiménez Salas, J.A.; Justo Alpañes, J.L., 1971).

En la TABLA N° 11 se muestra un resumen de la permeabilidad y los métodos para determinarla, para distintos suelos.

Los huecos del cimiento pueden variar por ensanchamiento (debido al efecto de la presión intersticial), por estrechamiento (debido a una mayor compresión de la roca), por arrastre del material de relleno que existe en los huecos o por **disolución**. Este último efecto es muy importante en el yeso, que en principio puede ser una roca bastante impermeable, pero que, al aumentar la carga hidráulica existente, por ejemplo, con la creación de un embalse, puede degenerar en altamente permeable en un periodo de tiempo relativamente corto.

Las filtraciones empiezan a disolver las pequeñas vías, así aumenta el caudal de filtración progresivamente y se acelera el proceso de forma exponencial con el tiempo.

	100	10	1	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹
Drenaje	Bueno						Pobre	Prácticamente impermeable				
Tipo de suelo	Grava limpia	Arenas limpias y mezclas limpias de arena y grava			Arenas muy finas, limos orgánicos e inorgánicos, mezclas de arena, limo y arcilla, morenas glaciares, depósitos de arcilla estratificada				Suelos "impermeables", es decir, arcillas homogéneas situadas por debajo de la zona de descomposición			
					Suelos "impermeables", modificados por la vegetación o la descomposición. ^d							
Determinación directa de k	Ensayo directo del suelo "in situ" por ensayos de bombeo. Se requiere mucha experiencia, pero bien realizados son bastante exactos.											
	Permeámetro de carga hidráulica constante. No se requiere mayor experiencia.											
Determinación indirecta de k		Permeámetro de carga hidráulica decreciente. No se requiere mayor experiencia y se obtienen buenos resultados			Permeámetro de carga hidráulica decreciente. Resultados dudosos. Se requiere mucha experiencia.				Permeámetro de carga hidráulica decreciente. Resultados de regular a bueno. Se requiere mucha experiencia.			
	Por cálculo, partiendo de la curva granulométrica. Sólo aplicable en el caso de arenas y gravas limpias sin cohesión.								Cálculos basados en los ensayos de consolidación. Resultados buenos. Se necesita mucha experiencia			

TABLA N° 4 : Valores de la permeabilidad en cm/s, para distintos suelos (Angelone, S; Garibay, M.T.; Casaux M.C., 2006).

En el apartado 4.3 se describe el proceso de disolución del yeso, que hay que distinguir del proceso de erosión, proceso mecánico que requiere velocidades altas ya que se produce en flujos turbulentos. Sin embargo, el proceso de disolución es químico, y puede acelerarse por la erosión.

En el caso de cimientos de presas, la velocidad del agua en el terreno será, en general, pequeña y el régimen, por lo tanto, laminar; el proceso que se analiza en el cimiento yesífero es el de disolución.

4.2.2. Porosidad

La porosidad “n” de un suelo o una roca se define como la relación entre el volumen de huecos ocupados por fluidos (aire o agua) y el volumen total. Si se consideran sólo los huecos intercomunicados (por los que puede circular el agua) la porosidad se denomina eficaz.

En la FIGURA N° 11 se adjuntan unos esquemas que relacionan la textura y la porosidad.

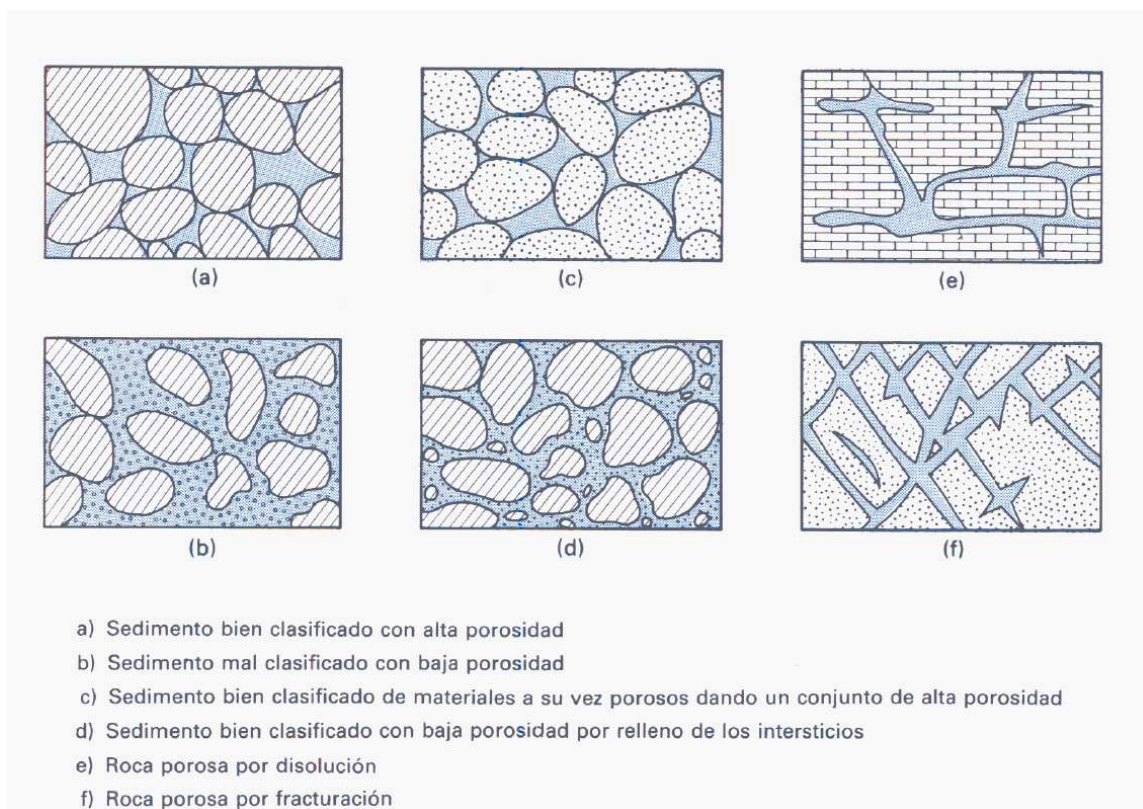


FIGURA N° 11 : Relación entre textura y porosidad (Meinzer, O.E., 1923).

El empaquetado (distribución espacial de los granos) influye en la porosidad, como se muestra en la FIGURA N° 12.

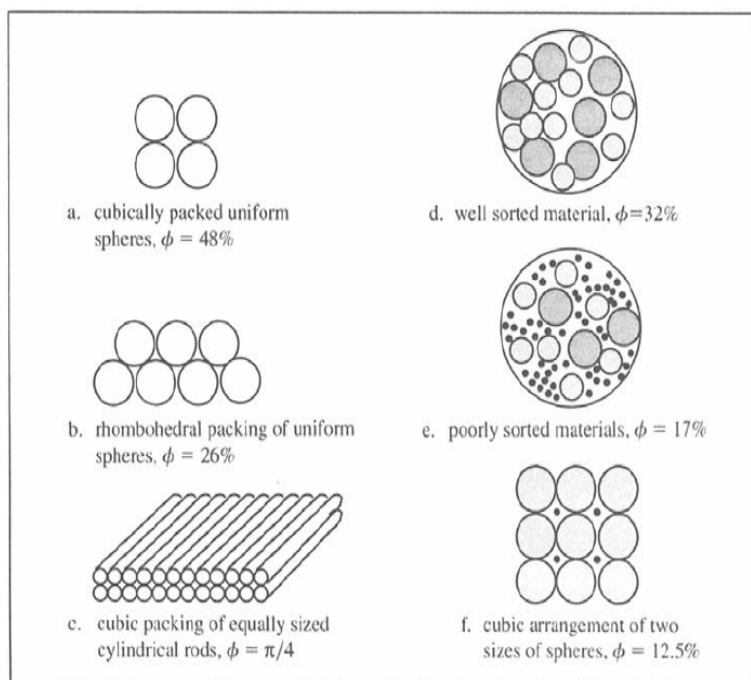


FIGURA N° 12 : Esquemas de distribución de partículas y porosidad (McKay, L.D., 2002).

En la TABLA N° 5 se muestran rangos de porosidad y de índice de poros “e” (relación entre volumen de huecos y el volumen de sólidos) para distintos materiales.

	Rock type	Porosity, n	Void ratio, e
Unconsolidated	Sands & Gravel	25 – 50%	33 – 100%
	Clays	40 – 70%	67 – 230%
Consolidated Intergranular	Sandstone	5 – 30%	5 – 43%
	Shale	0 – 10%	0 – 11%
	Granite	Often < 1%	Often < 1%
Fracture	Shales	Often 0.001 to 1%	Often 0.001 to 1%
Karst features	Limestone	Up to 50%	Up to 100%

TABLA N° 5 : Ejemplos de porosidad e índice de poros de distintos materiales (McKay, L.D., 2002).

En la TABLA N° 6 se muestran porosidades reales y eficaces (máxima, media y mínima) para distintos tipos de roca.

MATERIAL		Porosidad total % (m)			Porosidad eficaz % (m _e)		
Tipo	Descripción	Media	Máx	Mín	Media	Máx	Mín
Rocas Masivas	Granito	0,3	4	0,2	<0,2	0,5	0,0
	Caliza masiva	8	15	0,5	<0,5	1,0	0,0
	Dolomía	5	10	2	<0,5	1,0	0,0
Volcánicas	Piroclastos y tobas	30	50	10	<5	20	0,0
	Escoria	25	80	10	20	50	1,0
	Pumitas	85	90	50	<5	20	0,0
	Basaltos densos	2	5	0,1	<1	2	0,1
	Basaltos vacuolares	12	30	5	5	10	1
Rocas sedimentarias consolidadas y rocas metamórficas	Pizarras sedim.	5	15	2	<2	5	0
	Areniscas	15	25	3	10	20	0
	Cresta blanda	20	50	10	1	5	0,2
	Caliza detritica	10	30	1,5	3	20	0,5
Rocas sedimentarias sueltas	Aluviones	25	40	20	15	35	5
	Dunas	35	40	30	20	30	10
	Gravas	30	40	25	25	35	15
	Loess	45	55	40	<5	10	0,1
	Arenas	35	45	20	25	35	10
	Depósitos glaciares	25	35	15	15	30	5
	Limos	40	50	35	10	20	2
	Arcillas sin compactar	45	60	40	2	10	0
	Suelos superiores	50	60	30	10	20	1

TABLA N° 6 : Rango de porosidad para distintas rocas (Custodio, E.; Llamas, M.R., 1976).

4.2.3. Relación permeabilidad – porosidad

En **medios granulares y en limos no plásticos**, la permeabilidad intrínseca puede expresarse en función de la porosidad según la ecuación de Kozeny, J.; Carman, P.C., 1956:

$$K_i = \frac{1}{5} \left(\frac{V_g}{S} \right)^2 \frac{n^3}{(1-n)^2} = \frac{1}{5} \left(\frac{V_g}{S} \right)^2 \frac{e^3}{(1+e)} \quad (\text{unidades: L}^2)$$

$$FT = \left(\frac{\text{longitud desarrollada}}{\text{longitud recta}} \right)^2 \text{ y, por lo tanto, es mayor que 1.}$$

- En una esfera y en un cubo, $V_g/S = l/6$, siendo l el diámetro o el lado, respectivamente.
- En un cilindro y en un prisma, $V_g/S = l/4$, siendo l el diámetro o el lado de la base, respectivamente.
- En una laja, $V_g/S = l/2$, siendo l el espesor.

Clasificación de las rocas para usos geotécnicos																		
Tamaño de grano, mm	Rocas estratificadas (mayormente sedimentarias)							Rocas con foliación			Rocas con estructura masiva y textura cristalina (mayormente ígneas)				Tamaño de grano, mm			
Mayor de 20															Mayor de 20			
Descripción por tamaño de grano	CONGLOMERADO Cantos redondos, bolos y gravas cementados por una matriz fina.							>50% de los granos son carbonatos	>50% de los granos son de rocas volcánicas de grano fino	DESCRIPCIÓN por tamaño de grano	GNEISS Foliación bien desarrollada frecuentemente muy espaciada	DESCRIPCIÓN por tamaño de grano	PEGMATITA GRANITO DIORITA	Proveniencia				
20	R U D I T A S	BRECHA Fragmentos irregulares de roca en una matriz fina.							C A L C I N I T A	FRAGMENTOS de productos volcánicos en una matriz fina	ROCAS SALINAS	MARMOL CUARCITA	Estas rocas a veces son porfíricas y entonces se describen como granitos porfíricos	GABRIO	20			
8	I T A S	Y							Hailita	GRUESO	NIMATITA Foliación irregular. Esquistos y veines mezclados.	GRUESO		Peridotita	8			
2	A R E N I T A S	Gruoso Medio Fino							D O L O M I T A	Anhidrita	Serpentina				2			
0.6	E N I T A S	ARENISCA Granos angulosos o redondeados, cementados por minerales de arcilla, carbonatos o de hierro. Cuando granos de cuarzo y cemento silíceo. Arcosa: mayoría de gravas feldespáticas. Grauvaca: diversos fragmentos de roca.							C A L C I N I T A	Ceniza volcánica cementada	FENO	ESQUISTO Foliación claudrada bien desarrollada generalmente abundante mica	MICRO-GRANITO MICRO-DIORITA	A veces son porfíricos y se describen como porfidos	Dolerita	0.6		
0.2	I T A S											MEDIO				0.2		
0.06	L U T I T A S	MASIVAS LIMOLITAS							C A R S O N I T A	TOBA de grano fino	FINO	FILITA Foliación ligeramente claudrada	FINO	RIOLITA ANDESITA	BASALTO	0.06		
0.002	I T A S	LAMINARIAS ARCILLITAS							C A L C I N I T A	TOBA de grano grueso	Pizarra Planos de foliación bien desarrollados					0.002		
Menor de 0.002	Amorfo o Cristalino	Siliceo: aparece como bandas o nódulos en la arena. Chert: aparece como nodulos y bandas en limolitas y calcarenitas.								CARBÓN LIGNITO		MILONITA Asociado a zonas de falla, principalmente en ámbitos ígneos y metamórficos		Obsidiana Vidrio volcánico		Menor de 0.002		
		Cemento granular excepto rocas amorfas									CRISTALINAS		Claro <-> Oscuro					
		SILICEAS								SILICEAS	Principalmente SILICEAS		Ácida Mucho cuarzo INTERMED. Algo de cuarzo BÁSICA Nada de cuarzo ULTRA BÁSICA					
ROCAS SEDIMENTARIAS Las rocas con contenido granular presentan gran variación de resistencia, algunas areniscas son más resistentes que muchas rocas ígneas. La estratificación puede no observarse en muestras de mano seco ni en afloramiento. Sólo las rocas sedimentarias y algunas rocas metamórficas derivadas de ellas contienen folios. Las rocas caláreas contienen calcita (CaCO ₃) que se reconoce por su efervescencia con ácido clorhídrico diluido.									ROCAS METAMÓRFICAS Se distinguen por su foliación. La foliación en los gneises se observa mejor en el afloramiento. Las rocas metamórficas sin foliación son muy difíciles de reconocer. Cualquier roca generada por metamorfismo de contacto se describen como corneanas y generalmente son algo más resistentes que la roca original.					ROCAS ÍONEAS Constituidas por granos minerales fuertemente unidos. Elevada resistencia cuando aparecen sanos, no porosa Aparecen como: 1. Batolitos; 2. Lacolitos; 3. Sills; 4. Diques; 5. Plujos de lava; 6. Filones				

TABLA N° 7 : Clasificación de rocas para uso geotécnico (González de Vallejo, L.I.; Ferrer, M.; Ortuño, L.; Oteo, C., 2002).

El yeso se encuentra en todas las fracciones, pero predomina el tamaño arena y, en segundo lugar, tamaño limo.

En la TABLA N° 8, realizada por González del Tánago, M., 2010, a partir de los datos recopilados por Gregory K.J.; Walling, D.E., 1973, se muestran rangos de porosidad y permeabilidad para distintos terrenos.

Roca	Porosidad (%)	Permeabilidad (m/día)
No consolidada: Arcilla	45 - 60	$10^{-6} - 10^{-4}$
Limo	20 - 50	$10^{-3} - 10$
Arena	30 - 40	$10 - 10^4$
Grava	25 - 40	$10^2 - 10^6$
Consolidada: Argillita	5 - 15	$10^{-7} - 10$
Arenisca	5 - 20	$10^{-2} - 10^2$
Caliza	1 - 10	$10^{-2} - 10$
Conglomerados	5 - 25	$10^{-4} - 1$
Granito	$10^{-5} - 10$	$10^{-7} - 10^{-3}$
Basalto	$10^{-4} - 50$	$10^{-5} - 10^{-2}$
Pizarra metamórfica	$10^{-4} - 1$	$10^{-9} - 10^{-6}$
Esquistos	$10^{-4} - 1$	$10^{-9} - 10^{-5}$
Gneiss	$10^{-5} - 1$	$10^{-9} - 10^{-6}$
Roca volcánica	10 - 80	$10^{-6} - 10^{-2}$

TABLA N° 8 : Rangos de la porosidad y la permeabilidad para suelos y rocas (original de Gregory, K.J.; Walling, D.E., 1973; adaptación de González del Tánago, M., 2010).

En **rocas**, la expresión equivalente de Kozeny-Carman de la permeabilidad intrínseca es (Bear, J, 1972):

$$K_i = n_f \frac{b^2}{12} = \frac{n_f^3}{(1 - n_f)^2} \frac{a^2}{12} \text{ (unidades: L}^2\text{)}$$

Siendo: a la distancia entre fracturas, n_f el número de fracturas por unidad de longitud y b la apertura de éstas. Responde al modelo de la FIGURA N° 13.

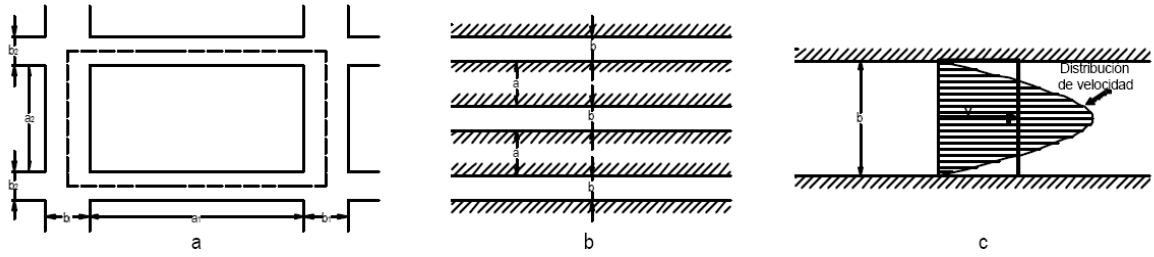


FIGURA N° 13 : Modelo de fisuras (original de Bear, J., 1972; adaptación de Donado, L.D., 2004).

En **areniscas**, se ha estudiado con profusión la validez de la expresión de Kozeny-Carman, debido principalmente a su localización en depósitos de petróleo. Pape, H.; Clauser, C.; Iffland, J., 1999, comprueban que la expresión citada, para porosidades mayores del 10%, no se ajusta a las relaciones empíricas. Concluyen que esto es debido a que la superficie interna de un poro medio se compone de subestructuras que varían en tamaño en varios órdenes de magnitud. La medida de estas superficies interiores en las areniscas muestran propiedades de escala características de los fractales, como se observa en la FIGURA N° 14.

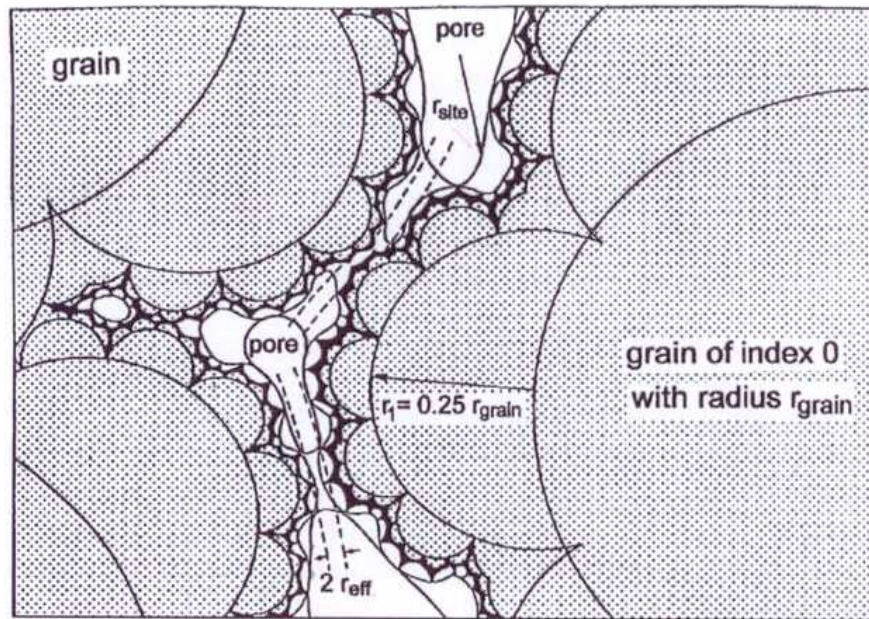


FIGURA N° 14 : Modelo de hueco de paloma (Pape, H.; Clauser, C.; Iffland, J., 1999).

El modelo fractal requiere determinar 3 parámetros: D (dimensión fractal), F (factor de formación), T (tortuosidad); a partir de ellos, se obtiene la expresión general de la permeabilidad intrínseca.

$$K_i = An + Bn^{\exp 1} + C(10n)^{\exp 2} \text{ (unidades: } L^2 \text{)}$$

Siendo A, B, C, exp1 y exp2 unos parámetros dependientes de D, que se determinan para cada arenisca a partir de la calibración de los datos de porosidad y permeabilidad obtenidos de las muestras de dicha arenisca.

Correspondiendo el primer término a una porosidad mayor que 0,1, el segundo a porosidades comprendidas entre 0,01 y 0,1 y el tercero a una porosidad menor que 0,01; de modo que, para cada rango de porosidades, los otros dos términos no son significativos.

Para un valor de la dimensión fractal D igual a 2,36 (correspondiente al valor medio obtenido para un conjunto de muestras diferentes de areniscas, analizadas por los autores citados), la expresión anterior queda:

$$K_i = 31n + 7463n^2 + 191(10n)^{10} \text{ (unidades: L}^2\text{)}$$

En **arcillas**, la formulación de la permeabilidad intrínseca en función del índice de poros “e” dada por Taylor, D.W., 1948, es:

$$\log K_i = \log K_k + \frac{e - e_k}{c_k} \text{ (unidades: L}^2\text{)}$$

Siendo e_k un índice de poros de referencia, K_k una permeabilidad de referencia y c_k un índice de cambio de permeabilidad (es la pendiente de la recta $(e - e_k) - (\log K_i - \log K_k)$ y para arcillas naturales suele ser la mitad del índice de poros).

Para arcillas normalmente consolidadas, Samarasinghe, A.M.; Huang, Y.H.; Drnevich, V.P., 1982, proponen una ligera modificación de la ecuación de Kozeny-Carman:

$$K_i = C \frac{e^b}{(1 + e)} \text{ (unidades: L}^2\text{)}$$

Siendo C una permeabilidad de referencia que caracteriza al material y b un valor entre 4 y 5.

4.3. DISOLUCIÓN DEL YESO

Se denomina disolución a la difusión de las partículas constituyentes del soluto (sulfato cálcico dihidratado en este caso) en el disolvente (agua) hasta formar una sola fase (en este caso, líquida). Cuando la disolución no admite más soluto se denomina disolución saturada.

La solubilidad (de una sustancia respecto de un disolvente) es la máxima cantidad de dicha sustancia que se disuelve en una cantidad dada de disolvente, a una presión y una temperatura determinadas. Se referencia normalmente por gramos de soluto por 100 gramos de disolvente.

4.3.1. Proceso químico

Las ecuaciones de disolución de materiales se escriben como reacciones de disociación. La disolución del yeso se expresa:



Cuando se establece un equilibrio en la disolución, se define la constante de equilibrio como:

$$K_{eq,yeso} = \frac{[SO_4^{--}] + [Ca^{++}]}{[SO_4Ca2H_2O]}$$

La actividad de un sólido es 1 ($SO_4Ca2H_2O = 1$), por lo que $K_{eq,yeso} = [SO_4^{--}] + [Ca^{++}] = 10^{-4,60}$ a 25 °C y en agua destilada. Una constante de equilibrio mucho menor que 1 indica que el equilibrio de la reacción se logra cuando los reactivos permanecen casi sin reaccionar y sólo se han formado cantidades muy pequeñas de productos.

Esta constante de equilibrio de la disolución depende la temperatura y de la presencia de iones comunes. El estado de equilibrio sólo puede existir en un sistema cerrado, que es el que permite el contacto mutuo entre los productos de reacción.

La concentración molar (moles por litro de disolución) es la misma para el ión calcio que para el ión sulfato; la concentración de cada uno de ellos, en la solución saturada, es la mitad, es decir 0,005 moles/l.

La conductividad eléctrica del agua (capacidad para conducir electricidad) es un parámetro fácil de medir y un trazador muy valioso para investigar fugas en los embalses. Cuando el componente mayoritario es el sulfato cálcico y el agua se encuentra saturada en yeso, varía entre 1.500 y 3.500 $\mu S/cm$, dependiendo de las concentraciones de los otros iones presentes. Conductividades mayores de 3.500 indican la presencia de cloruro sódico o sulfato sódico como componentes adicionales o mayoritarios. Las disoluciones que poseen iones son las que conducen la corriente eléctrica y se llaman electrolíticas. La conductividad de las disoluciones varía con la concentración (relación lineal entre la conductividad equivalente y la raíz cuadrada de la concentración: Ley de Kohlrausch, F.W., 1894).

4.3.2. Proceso físico

4.3.2.1. Ecuación de Nernst

Como se ha comentado en el apartado anterior, el yeso se disuelve por disociación molecular. Un sólido se disuelve en un líquido con ratios gobernados por su concentración C (menor que la de saturación C_s). Nernst, W.Z., 1904, consideró que estos ratios son determinados por difusión de las especies disolventes a través de una capa límite o fronteriza que ataca la superficie del sólido. El esquema de la disolución de un sólido se muestra a continuación:

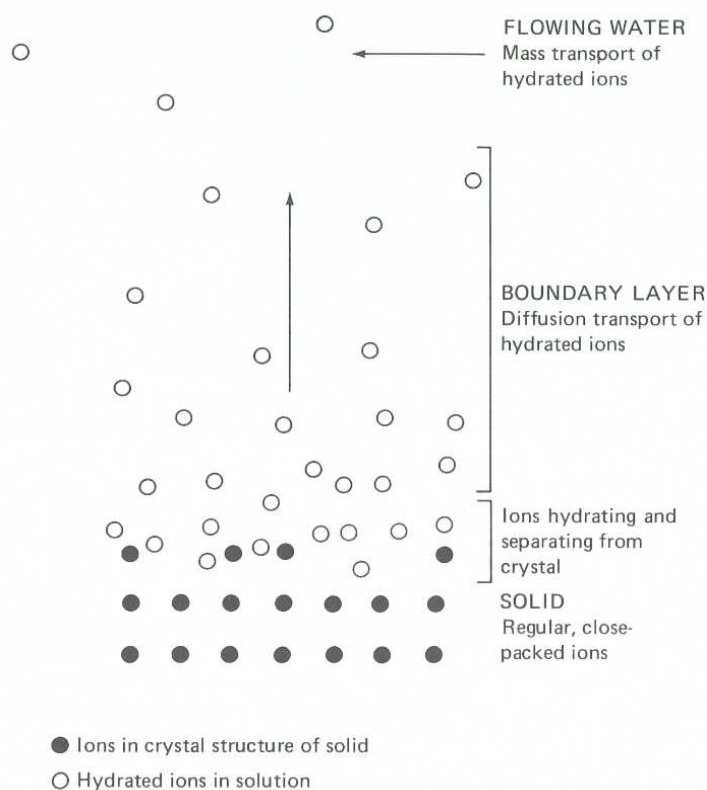


Fig. 2.1 — A model for sodium chloride and its dissolution. (Reproduced by permission of the Geological Society, from *Design of foundations of dams containing soluble soils and rocks*, James & Kirkpatrick, *Quarterly Journal of Engineering Geology*, **13**, 1980).

FIGURA N° 15 : Disolución de un sólido controlado por difusión (James, A.N.; Kirkpatrick, I.M., 1980).

La ecuación de Nernst es la siguiente:

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

Expresa la pérdida de masa en el tiempo (en kg/s) de un sólido de área A (en m²) expuesta a la disolución. K_d es la constante de disolución y representa las propiedades de difusión combinadas de la capa límite y de las especies disolventes (en m/s). La diferencia de concentraciones se denomina potencial de disolución, siendo C_s la solubilidad (para el yeso es del orden de 2,4 kg/m³) y C la concentración en el instante considerado.

En la bibliografía consultada la constante de disolución se nombra como K, pero lo nombraremos como K_d , para diferenciarlo claramente de la permeabilidad. Más adelante se analizan los factores de los que depende este coeficiente.

Esta ecuación implica que el transporte de las especies disueltas, desde el sólido a la capa límite, es rápido comparado con la difusión a través de la capa, que es lo que controla el proceso. Esto es correcto para muchas sustancias solubles, pero las de estructura cristalina densa son lentas para proveer moléculas o iones a la capa límite. La disolución entonces implica dos pasos, por lo que la ecuación en su forma general es (James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978):

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

En el caso de que $\theta = 1$ es una ecuación de primer orden y si $\theta = 2$ es de segundo orden.

Liu, S.T.; Nancollas, G.H., 1971, establecen que la disolución de pequeños cristales de yeso obedece a una cinética de disolución de primer orden, que expresada en términos de concentración queda:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{K_d A}{V} (C_s - C)$$

El valor de la constante de disolución se determina experimentalmente, dado que depende de muchos factores. A continuación se adjuntan diversas curvas obtenidas en experimentos realizados por James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978, con muestras cilíndricas de rocas a las que se les practicaba un orificio para hacer circular el agua a su través, midiendo a continuación su concentración mediante un conductivímetro. En la FIGURA N° 16 se muestra el esquema del aparato utilizado.

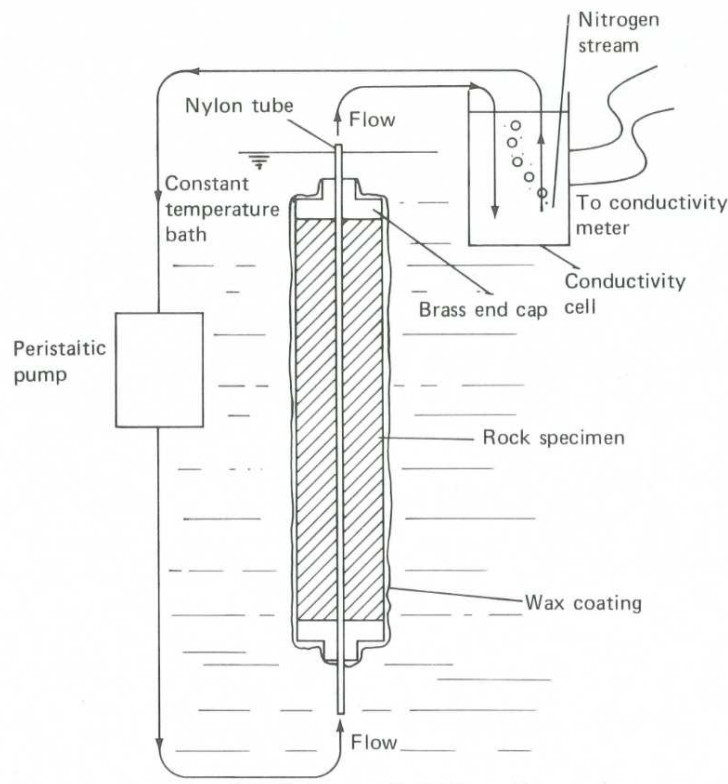


FIGURA N° 16 : Aparato para circulación de agua a través de rocas de sulfato cálcico (James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978).

Estos ensayos confirmaron una ecuación de primer orden para el yeso y de segundo orden para la anhidrita. También responden a una ecuación de primer orden el cloruro sódico (halita) y el carbonato cálcico (caliza). En cuanto a la solubilidad, la de la halita es del orden de 150 veces mayor que la del yeso y la de la caliza, del orden de 200 veces menor que la del yeso.

Los resultados más importantes de estos ensayos, que demuestran la validez de las formulaciones (en este caso para el yeso) y que analizan los parámetros de los que depende la constante de disolución, se muestran a continuación.

En la FIGURA N° 17 se representa la evolución de la concentración con el tiempo (para el yeso se obtiene la curva A).

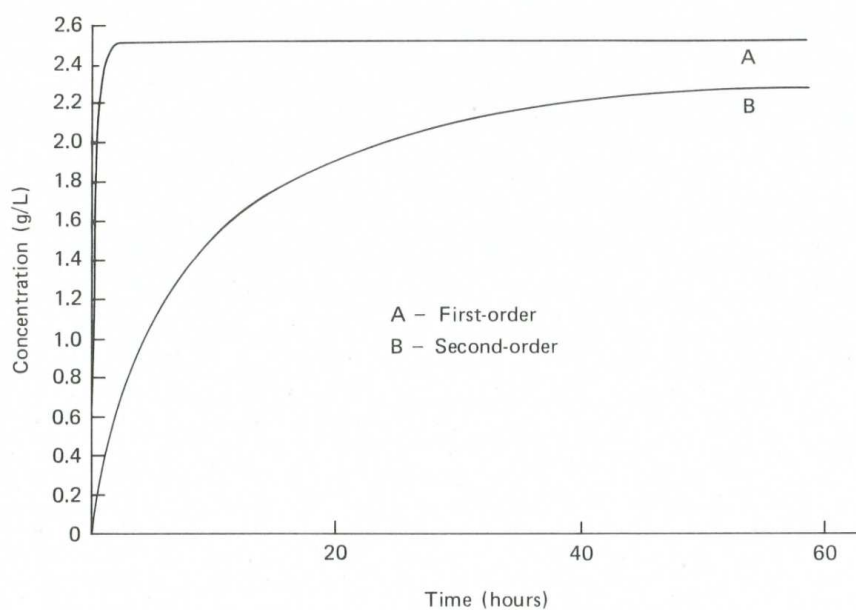


FIGURA N° 17 : Variación de la concentración, para primer y segundo orden (James, A.N., 1992).

Para una velocidad de flujo elevada (0,3 m/s) se comprobó la validez de la ecuación de primer orden y se obtuvo la curva que puede observarse en la FIGURA N° 18.

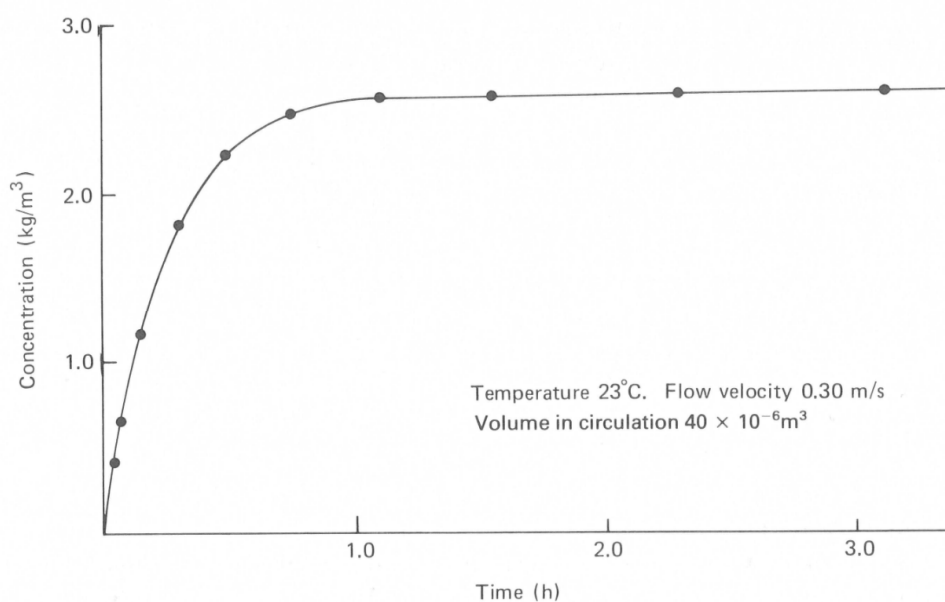


FIGURA N° 18 : Comparación de la curva experimental de disolución del yeso con la teórica (James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978).

La ecuación de Nernst puede integrarse en términos de concentración, resultando:

$$\ln \left[\frac{C_s}{C_s - C} \right] = \frac{K_d A}{V} t$$

Tomando como abscisas el tiempo y como ordenada el primer término de la ecuación resulta una recta, de pendiente $K_d A/V$, pudiendo obtenerse la K_d , para los valores de A y V conocidos (FIGURA N° 19).

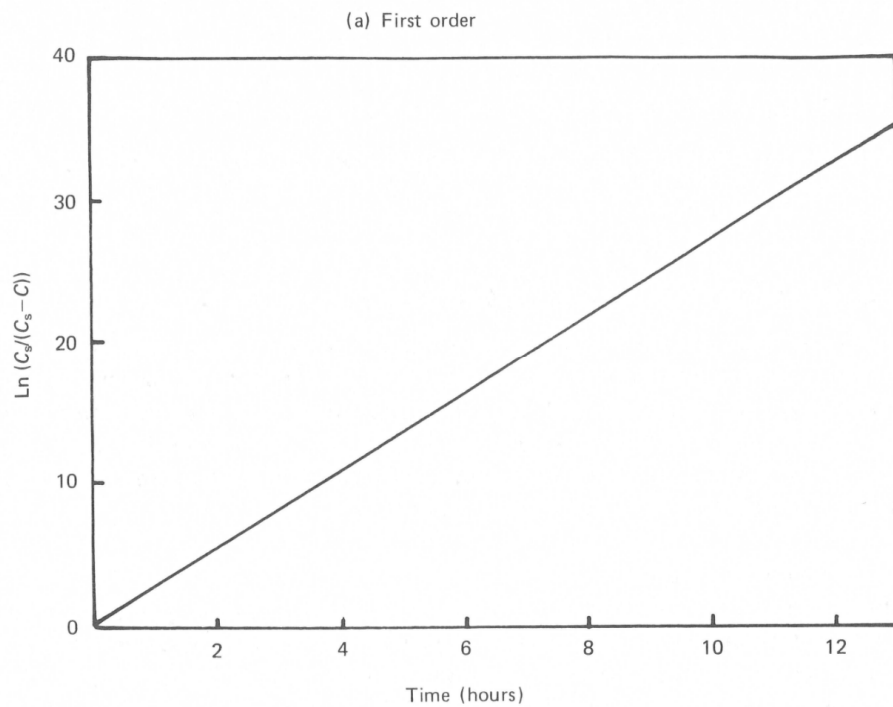


FIGURA N° 19 : Variación de $\ln(C_s / (C_s - C))$ en función del tiempo, para ecuación de primer orden (James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978).

En la FIGURA N° 20 se puede comprobar el ajuste para el experimento realizado con yeso.

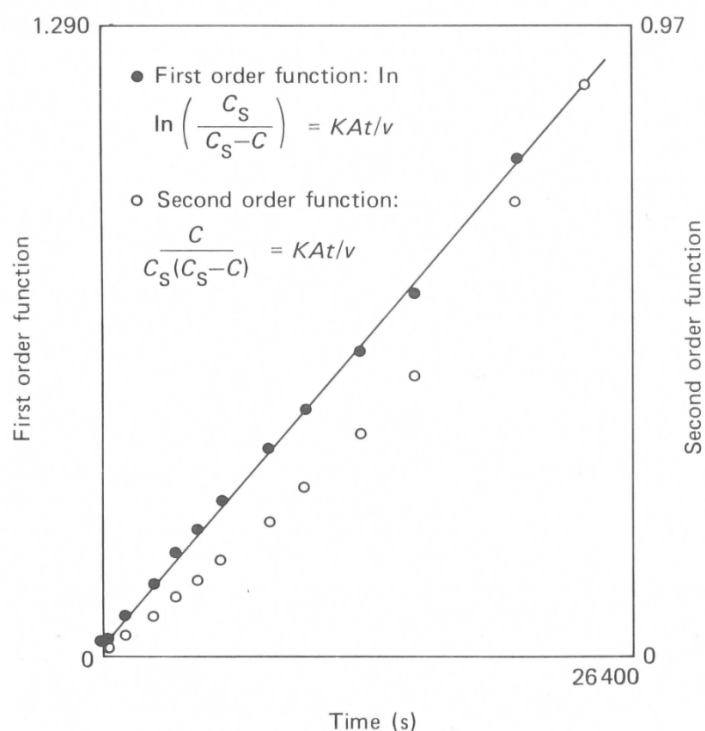


FIGURA N° 20 : Comparación de la cinética de disolución de primer orden para el yeso, con círculos (James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978).

Además de verificar la formulación de Nernst, los ensayos sirvieron para analizar los factores que influyen en K_d .

4.3.2.2. Factores que influyen en la constante de disolución K_d

La constante de disolución depende principalmente de los siguientes factores: velocidad del flujo, temperatura, iones disueltos (por ejemplo, el cloruro sódico: NaCl) presentes en el agua de disolución y mineralogía. Se muestran a continuación los resultados de los ensayos realizados:

- **Dependencia de la velocidad de flujo:** es lineal aún en el caso de velocidades elevadas (entre 0,1 y 0,5 m/s), como se observa en la FIGURA N° 21.

Para velocidades de flujo muy pequeñas, como es el caso de cimentaciones de presas, la constante de disolución tendría el valor de la ordenada en el origen (10^{-6} m/s). Y en este caso, podría considerarse constante en todo el proceso de disolución.

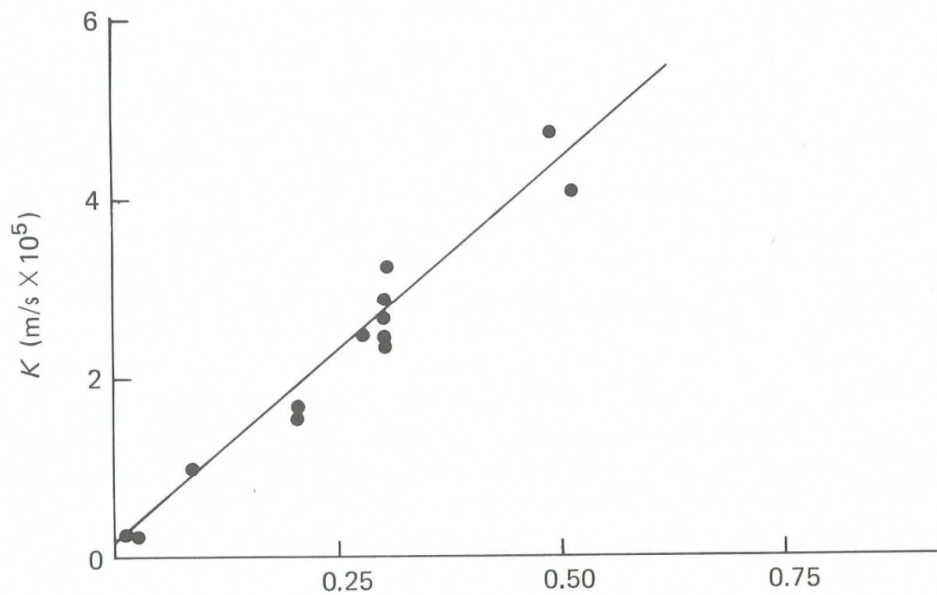


FIGURA N° 21 : Constante de disolución del yeso en función de la velocidad del flujo (a 23 °C). (James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978).

- **Dependencia de la Temperatura:** K_d aumenta con la temperatura, como se observa en la TABLA N° 9:

Rate constant (K) $K \times 10^5$ (m/s)	$\text{Log}_{10} K$	Temperature (T) °Kelvin [°C]	$(1/T) \times 10^3$
2.6	5.41	296 [23]	3.38
1.7	5.23	288 [15]	3.47
0.8	4.90	278 [5]	3.60

TABLA N° 9 : Variación de la constante de disolución del yeso con la temperatura (para una velocidad de flujo de 0,25 m/s). (James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978).

Dado que la permeabilidad y la solubilidad dependen de la temperatura del fluido, se ha analizado el gradiente geotérmico del terreno en cimentaciones. En general, las rocas y los suelos presentan una conductividad térmica muy baja.

Existe una zona superficial o zona de transición, de unos 10 m, donde el terreno es afectado por la temperatura exterior y bajo esta capa, la temperatura aumenta con un gradiente geotérmico de 3 °C / 100 m (Freeze, R.A.; Cherry J.A., 1979). La temperatura del terreno bajo esta capa, pero a profundidades reducidas

(menores que 100 m), oscila habitualmente entre 10 y 20 °C, con un valor medio de 15 °C. Mezquita, B.; Escuer, J., 2009, muestran datos para diversas masas de aguas subterráneas (ver TABLA N° 10).

	TEMPERATURA	nov-06	jun-07	abr-08	oct-08	abr-09	MEDIA
POZOS MUY POCO PROFUNDOS < 20 m	MAXIMA	18,8	20,2	16,8	18,8	18,1	15,78
	MINIMA	14,1	14,7	11,7	12,9	11,7	
	PROMEDIO	16,0	17,5	15,1	15,9	14,7	
	MÁX-MÍN	4,7	5,5	5,1	5,9	6,4	
POZOS POCO PROFUNDOS 20-50 m	MAXIMA	15,6	16,0	16,3	16,5	15,7	14,44
	MINIMA	12,7	15,3	14,1	12,4	12,2	
	PROMEDIO	13,8	15,7	14,9	13,9	14,0	
	MÁX-MÍN	2,9	0,7	2,2	4,1	3,5	
POZOS PROFUNDOS > 50 m	MAXIMA	18,7	17,8	20,9	18,4	20	16,08
	MINIMA	14	15,1	13	11,9	12	
	PROMEDIO	15,831	16,3	16,858	15,51	15,957	
	MÁX-MÍN	4,7	2,7	7,9	6,5	8	

TABLA N° 10 : Datos de temperatura del agua subterránea (Mezquita, B.; Escuer, J., 2009).

En el caso de que el terreno esté en contacto con el agua de un embalse, y dado que en el fondo de éste el agua sufre pocas variaciones (si se mantiene lleno, puede considerarse que oscila entre 5 y 10 °C), el espesor de la zona superficial de transición será menor. Por todo lo anterior, para el terreno de cimentación de una presa se puede considerar una temperatura constante de unos 15 °C.

Combinando los dos factores (temperatura y velocidad de flujo), se ha obtenido el gráfico de la FIGURA N° 22, que relaciona la constante de disolución K_d con la velocidad para tres valores de la temperatura:

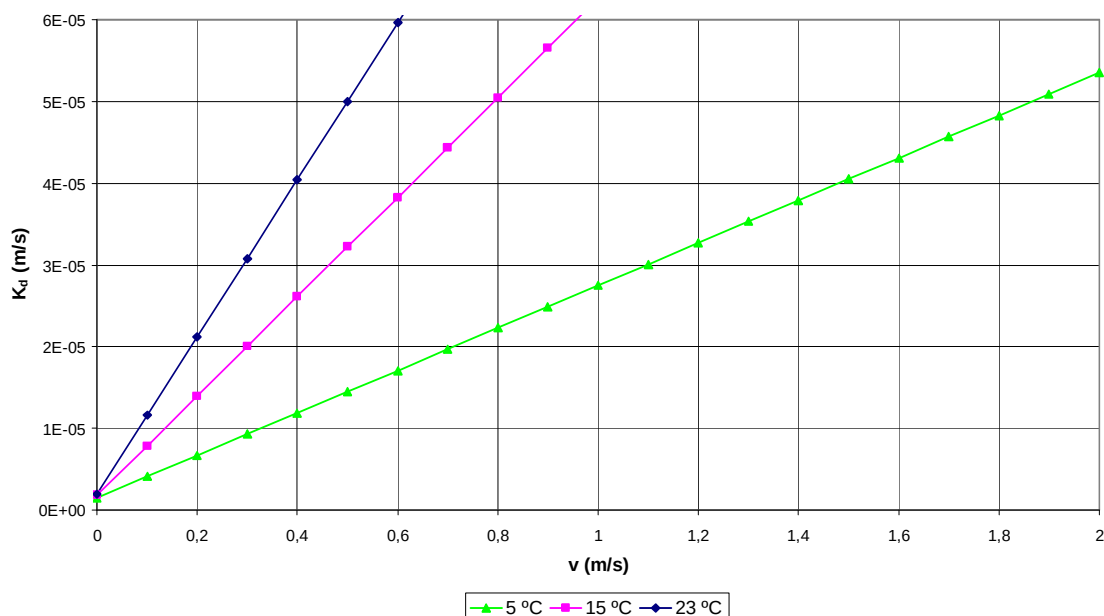


FIGURA N° 22 : Extrapolación de la variación de la constante de disolución del yeso con la velocidad de flujo, para distintas temperaturas.

- **Dependencia de los iones presentes en el agua de disolución:** la presencia de un 1% de cloruro sódico, por ejemplo, puede multiplicar por dos la constante de disolución respecto a la del agua pura, como se observa en la FIGURA N° 23.

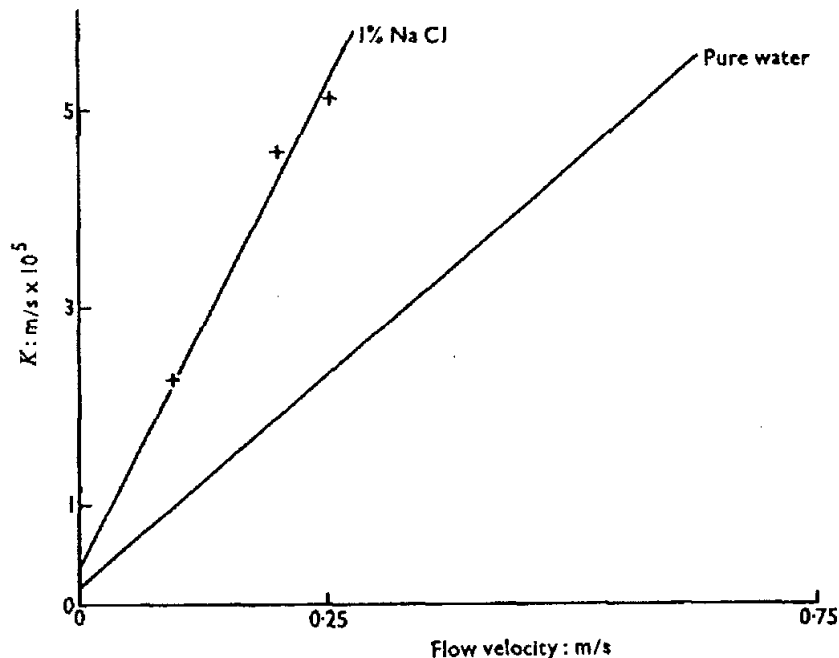


FIGURA N° 23 : Influencia de 1% de NaCl en la Constante de disolución del yeso (a 23 °C) (James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978).

También se adjunta la TABLA N° 11 con los valores obtenidos para distintas concentraciones de cloruro sódico.

Concentration of sodium chloride (kg/m^3)	$K \times 10^5$ (m/s)
0	1.5
10	2.9
30	3.2
100	5.8

TABLA N° 11 : Variación de la Constante de disolución del yeso para distintas concentraciones de cloruro sódico (velocidad de filtración: 0,15 m/s). (James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978).

James, A.N., 1992, cita que en la cimentación de la presa de Poechos (Perú) formada por lutitas arcillosas con yeso (en fragmentos de 5-20 mm de espesor, constituyendo un 5-10% de la capa), la concentración de sulfato

cálcico de las aguas filtradas era 6,1 g/l, cerca de 3 veces la solubilidad del yeso en agua pura. Esto era debido a la presencia de otros iones disueltos (contenía 3,5% de cloruro sódico), que aumentaron la solubilidad del yeso.

- **Mineralogía:** en la TABLA N° 12 se muestra la variación de la constante de disolución para diferentes muestras de yeso, con distintas formas mineralógicas.

Rock type	Gypsum content (CaSO ₄ · 2H ₂ O, %)	Rate constant (m/s × 10 ⁻⁵)
Massive gypsum (Newark)	85.0	2.25
Satinspar (Darwell)	95.0	1.1
Gypsiferous siltstone (Darwell)	92.0	1.5

TABLA N° 12 : Variación de la constante de disolución para diferentes rocas yesíferas (para una velocidad de flujo de 0,25 m/s y temperatura de 23 °C), (James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978).

4.4. MODELOS DE DISOLUCIÓN DEL CIMIENTO

En la FIGURA N° 24 puede verse un esquema muy detallado de la forma en la que se presenta el sulfato cálcico en suelos y rocas (de James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978).

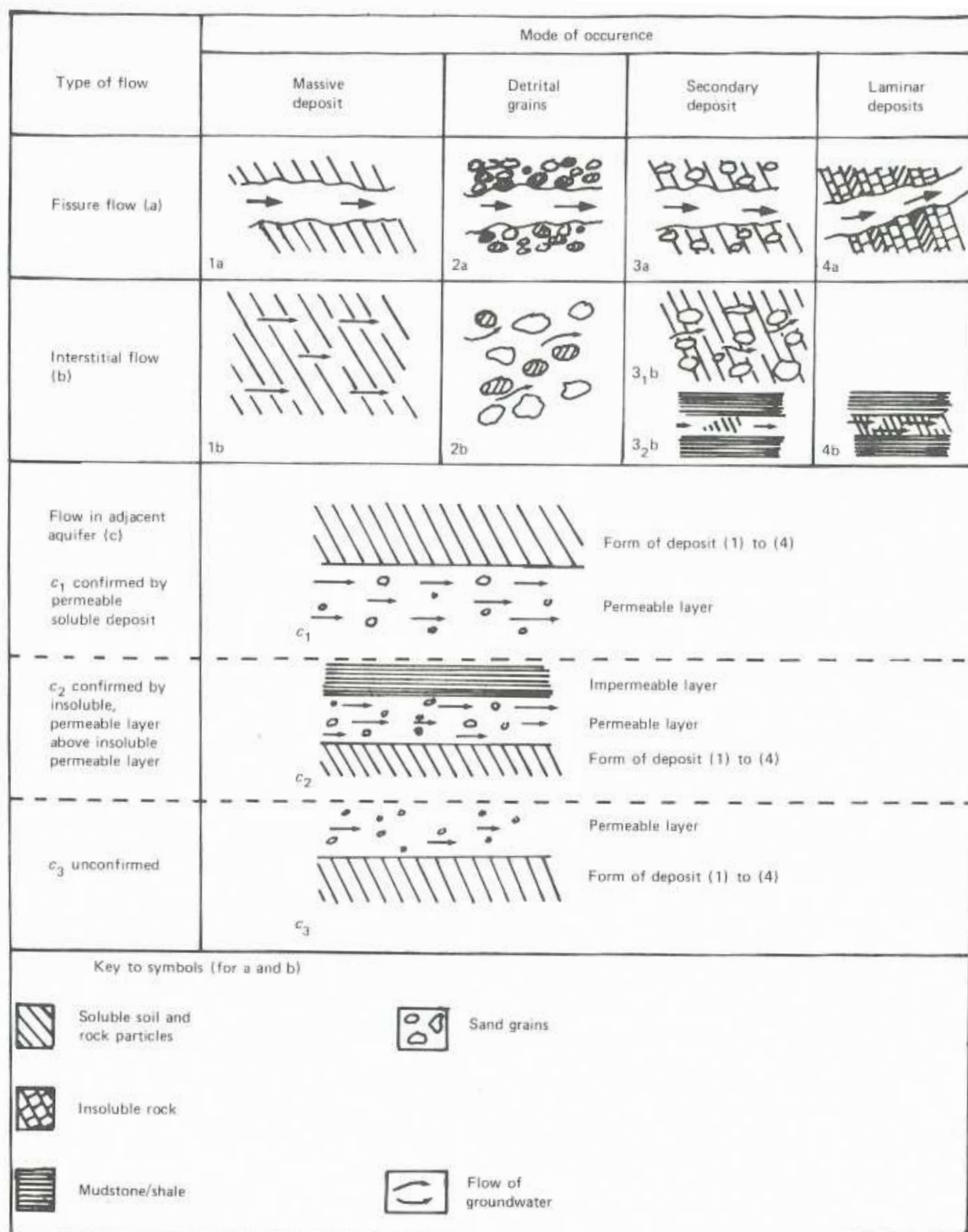


FIGURA N° 24 : Modos de presentación del sulfato cálcico (James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978).

Es muy importante distinguir entre los tres tipos de flujo que se esquematizan en la FIGURA N° 24: flujo a través de las fisuras (principalmente en rocas), flujo intersticial (en lecho granular), o flujo en un acuífero adyacente a la capa yesífera.

4.4.1. Disolución de fisuras

Entrando en más detalle, el esquema de disolución de fisuras que se muestra en la primera fila de la FIGURA N° 24, diferencia 4 tipos de flujo:

- 1a Flujo a través de fisuras en depósitos masivos de yeso o anhidrita.
- 2a Flujo a través de fisuras en rocas formadas por dunas de arena yesífera.
- 3a Flujo a través de fisuras en depósitos arenosos o arcillosos cementados con yeso o flujo a través de fisuras que contienen yeso secundario.
- 4a Flujo a través de rocas calizas o margosas con depósitos delgados de yeso o anhidrita primarios.

En el modelo de disolución asociado, se parte de una fisura cuya apertura antes de la disolución es constante y que crece, cuando el agua fluye a través de ella. El esquema de este crecimiento puede verse en la FIGURA N° 25.

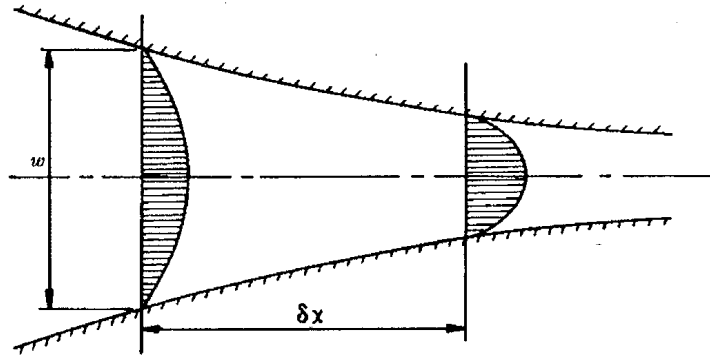


FIGURA N° 25 : Modelo de disolución de fisuras (James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978).

La masa disuelta en la longitud δx en un tiempo δt , aplicando la ecuación de Nernst, W.Z., 1904, es:

$M_{disuelta} = K_d 2b \delta x (C_s - C)^\theta \delta t$, ya que el área expuesta a la disolución es $2.b.\delta x$, siendo b la dimensión de la fisura perpendicular al plano de la representación.

Si se obtiene a partir del material de las paredes que se disuelve, $M_{disuelta} = \frac{d}{dt} (\rho b w \delta x) \delta t$

O a partir del transporte de soluto acumulado en la disolución, $M_{disuelta} = Q \delta t \frac{\partial C}{\partial x} \delta x + w b \delta x \frac{\partial C}{\partial t} \delta t$

Igualando las tres expresiones (dividiendo por $b \cdot \delta x \cdot \delta t$), resulta la siguiente ecuación que se puede resolver por aproximaciones sucesivas:

$$K_d 2(C_s - C)^\theta = \rho \frac{dw}{dt} = q \frac{\partial C}{\partial x} + w \frac{\partial C}{\partial t}$$

Los resultados de los experimentos comparados con la teoría se muestran en la FIGURA N° 26.

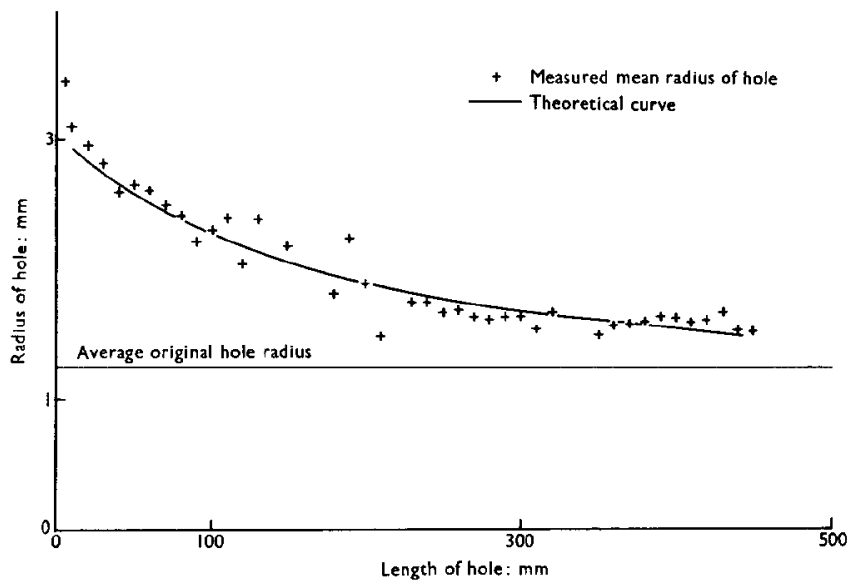


FIGURA N° 26 : Perfil de disolución del orificio realizado en yeso, de radio inicial 1,25 mm, tras 8 días (con $v=0,002$ m/s). (James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978).

En este modelo, las velocidades de flujo (v) son mucho mayores (de hasta 10.000 veces mayores en una fractura que en un suelo granular, que pueden ser de 10^{-4} m/s), por lo que K_d depende de la velocidad de filtración.

Según James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978, en las presas Hondo y MacMillan (Nuevo México, EEUU), la disolución de los yesos masivos del cemento probablemente responde a este modelo.

4.4.2. Disolución de partículas

En el caso de flujo intersticial, que se muestra en la segunda fila de la FIGURA N° 24, existen 4 tipos de flujo:

- 1b Flujo intersticial a través de depósitos masivos de yeso o anhidrita.
- 2b Flujo intersticial a través de depósitos tales como dunas de arena yesífera.

- 31b Flujo intersticial a través de areniscas cementadas con yeso en las que el yeso también rellena los huecos más grandes.
- 32b Flujo intersticial a través de margas que contienen vetas de yeso.
- 4b Flujo intersticial a través de depósitos laminares de yeso contenidos en arcillas o limos impermeables.

La superficie de yeso en contacto con el agua puede ser del orden de 10.000 veces mayor en un suelo granular de diámetro 0,1 mm y porosidad 0,25 (40.000 m² por cada metro en dirección del flujo) que en una junta de roca de 1 m² (que presentaría 2 m² a la disolución). La velocidad del flujo es, en cambio, mucho menor, por lo que se puede considerar que K_d es constante, simplificándose el cálculo. El esquema correspondiente a este modelo de disolución se representa en la FIGURA N° 27.

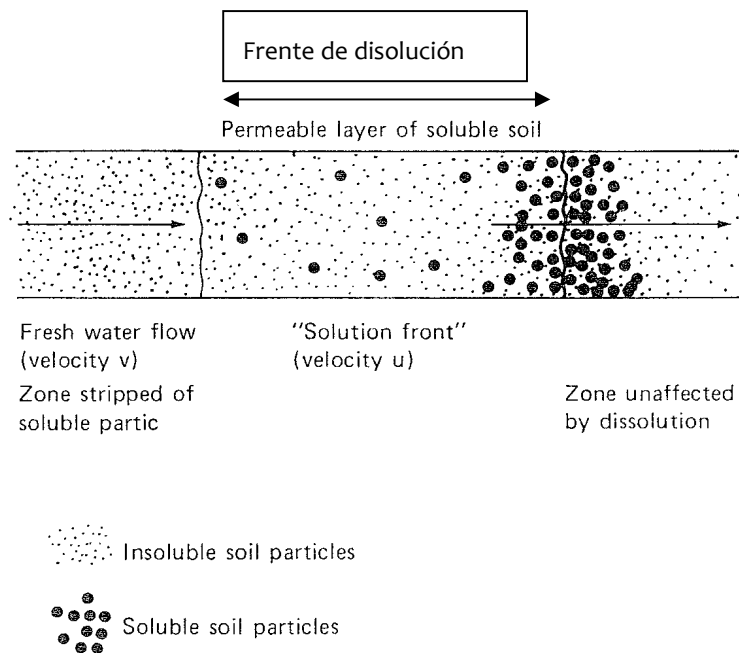


FIGURA N° 27 : Modelo de disolución de partículas (Adaptado de James, A.N., 1992).

El agua avanza de izquierda a derecha con una velocidad de filtración " v ". Existe una zona llamada "frente de disolución" donde se está produciendo la disolución de las partículas solubles. Es decir, a la izquierda de esta zona ya se han disuelto todas las partículas solubles diseminadas en el suelo y a la derecha todavía no ha existido disolución, debido a que el agua está saturada (la concentración en la zona no afectada por la disolución es C_s o concentración de saturación y el diámetro de las partículas es el inicial l_0). El frente de disolución avanza en la dirección del flujo con una velocidad " u ".

Para obtener la velocidad de avance del frente de disolución, se impone el equilibrio de masas global (según FIGURA N° 28 y FIGURA N° 29).

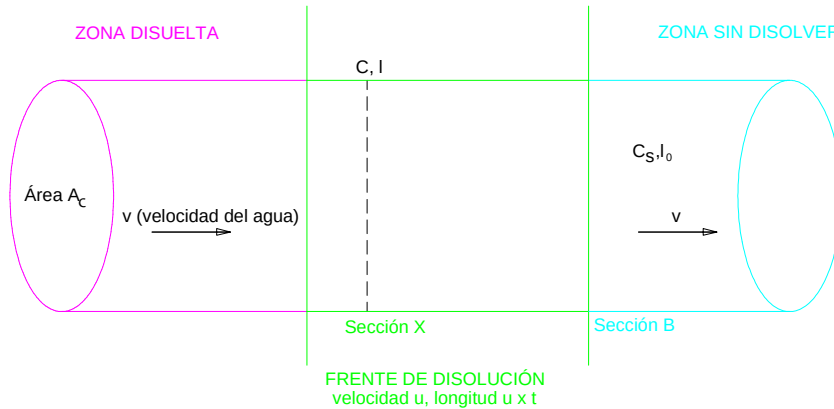


FIGURA N° 28 : Esquema del frente de disolución al inicio del proceso.

Dado que el agua avanza con velocidad “ v ” y el frente de disolución con velocidad “ u ”, se puede restar la velocidad “ u ” para que el frente no se mueva hacia la derecha, por lo que el agua se moverá con velocidad “ $v - u$ ” y el frente estará fijo en el espacio. En estas condiciones, la masa que atraviesa la sección B (donde la concentración es C_s) en un tiempo t es $t(v - u) \times A_c \times C_s$.

Por otro lado, si en un tiempo t se produce toda la disolución de la columna del suelo del frente de disolución, se cumple que la masa que pasa a la disolución es $t \times u \times A_c \times \sigma_0$, siendo σ_0 la masa de partículas solubles por unidad de volumen de suelo, según se observa en la FIGURA N° 29.

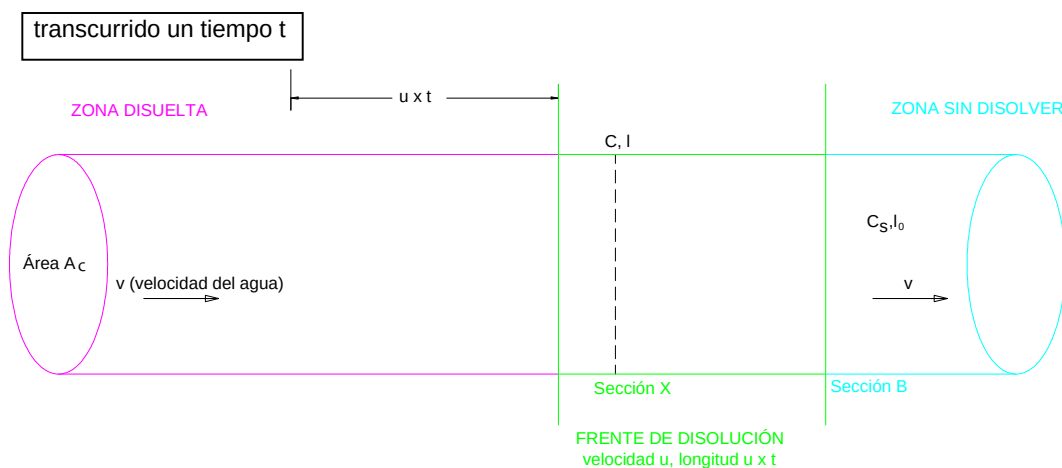


FIGURA N° 29 : Esquema del frente de disolución transcurrido un tiempo t .

Igualando ambas expresiones, resulta: $(v-u) \times C_s = u \times \sigma_0$, que es una ecuación de equilibrio de masa global, en la que se iguala la masa que se disuelve de las partículas solubles del suelo con la masa que pasa disuelta a la disolución.

Despejando la velocidad de avance del frente de disolución: $u = v \times \frac{C_s}{C_s + \sigma_0}$.

Si C_s es despreciable frente a σ_0 (como es el caso del yeso), entonces $u \approx v \times \frac{C_s}{\sigma_0}$.

Es decir, la velocidad del frente de disolución “u” es directamente proporcional a la velocidad del flujo “v” (pero siempre menor que ésta) y a la concentración de saturación “ C_s ” e inversamente proporcional a “ σ_0 ”. La velocidad “u” es independiente de K_d .

La masa de partículas solubles por unidad de volumen de suelo “ σ_0 ” es el producto de dos factores:

σ : densidad de las partículas solubles, en el caso del yeso 2,3 t/m³.

ϕ : volumen de partículas solubles por unidad de volumen de suelo (en tanto por uno). La expresión general es $\phi = \frac{\Omega \pi l_0^3}{2\gamma}$

donde Ω es el número de partículas solubles por unidad de volumen de suelo y $\pi l_0^3 / 2\gamma$ es el volumen equivalente de una partícula según su forma, ya que 2γ es el número de caras expuestas a la disolución, según la FIGURA N° 30.

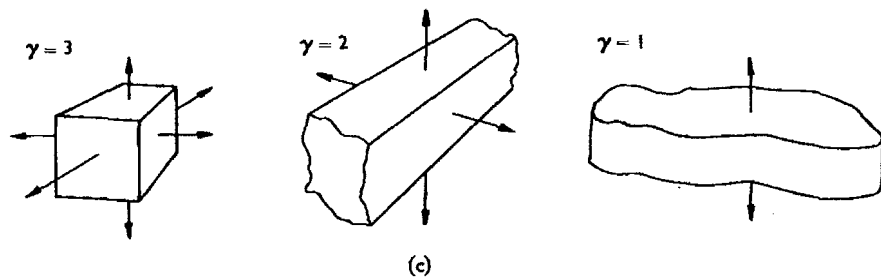


FIGURA N° 30 : Forma de las partículas solubles (James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978)

Por otro lado, si se aplica el equilibrio de masas a una sección genérica X (transcurrido un tiempo t’):

$$(v-u) \times C = u \times \sigma$$

Comparando esta expresión con la de la sección B ($(v-u) \times C_s = u \times \sigma_0$), ver situación de ambas secciones en la FIGURA N° 28, se obtiene una ecuación que relaciona la concentración C en una sección cualquiera

(donde las partículas han pasado a un diámetro equivalente l desde un diámetro inicial l_0 en ese tiempo t' , debido a la disolución) con C_s , con l y con l_0 .

$$\frac{C}{C_s} = \frac{l^3}{l_0^3}$$

Además, el tiempo que se tarda en disolver las partículas de diámetro l , depende de esta relación C/C_s .

Integrando la ecuación de Nernst entre 0 y l , se puede obtener una expresión del tiempo t que tardan en disolverse las partículas de diámetro l .

Esta expresión depende de la forma de las partículas, por lo que se obtiene:

$$\gamma = 1: \frac{t}{T} = \left[\ln \frac{1}{1-z} \right] / 2$$

$$\gamma = 2: \frac{t}{T} = \left[\ln \frac{1-z^2}{(1-z)^2} \right] / 2$$

$$\gamma = 3: \frac{t}{T} = \left[\ln \frac{1-z^3}{(1-z)^3} + 2\sqrt{3} \left(\operatorname{atn} \frac{2z+1}{\sqrt{3}} - \frac{\pi}{6} \right) \right] / 4$$

siendo $z = \left(\frac{C}{C_s} \right)^{1/\gamma}$

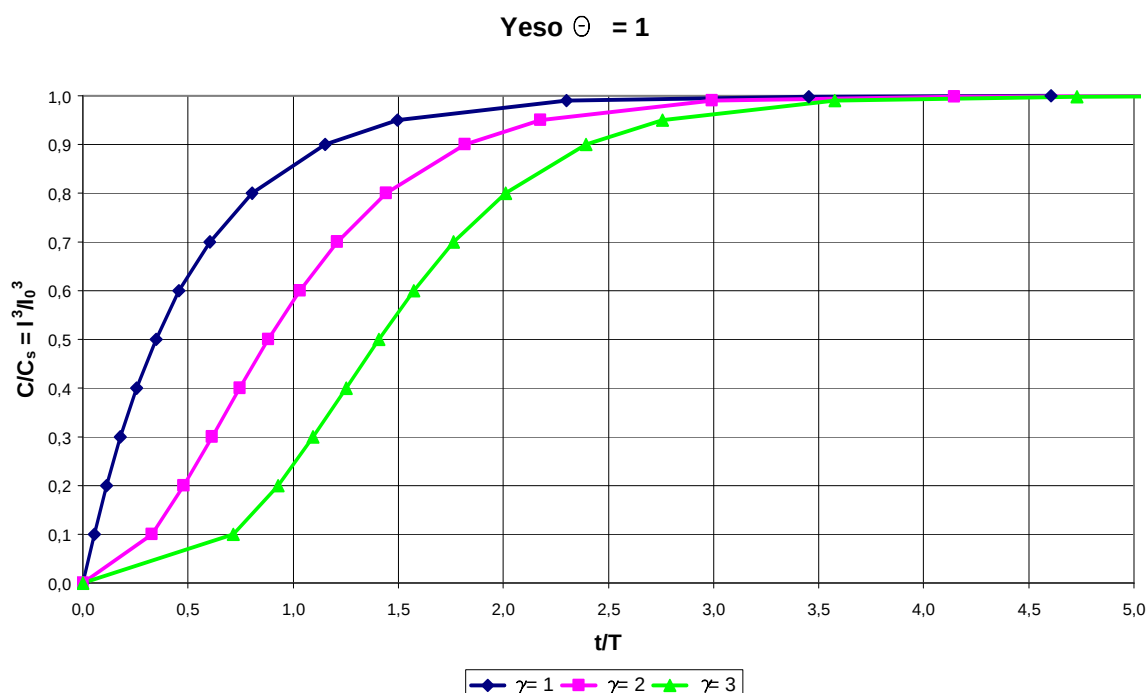
$$T = \frac{\sigma l_0}{\gamma K_d C_s} \text{ se define como el tiempo característico (es el término constante al integrar } t).$$

El tiempo que tardan en disolverse las partículas es mayor si el diámetro inicial es mayor, a igualdad de otros factores, como cabía esperar.

La representación de t/T en función de C/C_s (según la forma de las partículas solubles), puede verse en la FIGURA N° 31.

Se observa que $C = C_s$, que sería el final del frente de disolución, es una condición que se alcanzaría para un tiempo infinito.

Sin embargo, con $C = 0,99C_s$, podríamos encontrar el tiempo en el que prácticamente se disuelven las partículas de diámetro l_0 . Si denominamos t_{99} a este tiempo, la longitud aproximada del frente de disolución es “ u ” multiplicado por t_{99} .

FIGURA N° 31 : Relación t/T con C/C_s para el yeso.

Sustituyendo se obtienen las siguientes relaciones: Para $\gamma = 1$, $t_{99} = 2,3 T$.

$$\gamma = 2, t_{99} = 2,99 T.$$

$$\gamma = 3, t_{99} = 3,58 T.$$

Por lo tanto, a pesar de que la velocidad de avance del frente de disolución es independiente de K_d , la longitud del frente ($u \times t_{99}$) no, porque t_{99} sí depende de K_d . También depende del tamaño de las partículas solubles. Debido a esto, es más complejo obtener la longitud del frente que la velocidad de su avance.

Finalmente, los resultados de los experimentos comparados con la teoría se muestran en la FIGURA N° 32.

James, A.N.; Kirkpatrick, I.M., 1980, elaboraron la TABLA N° 13, que limita la velocidad de filtración en diversos materiales, a partir de un pequeño pero arbitrario valor de la velocidad de avance del frente de disolución (0,1 m/año).

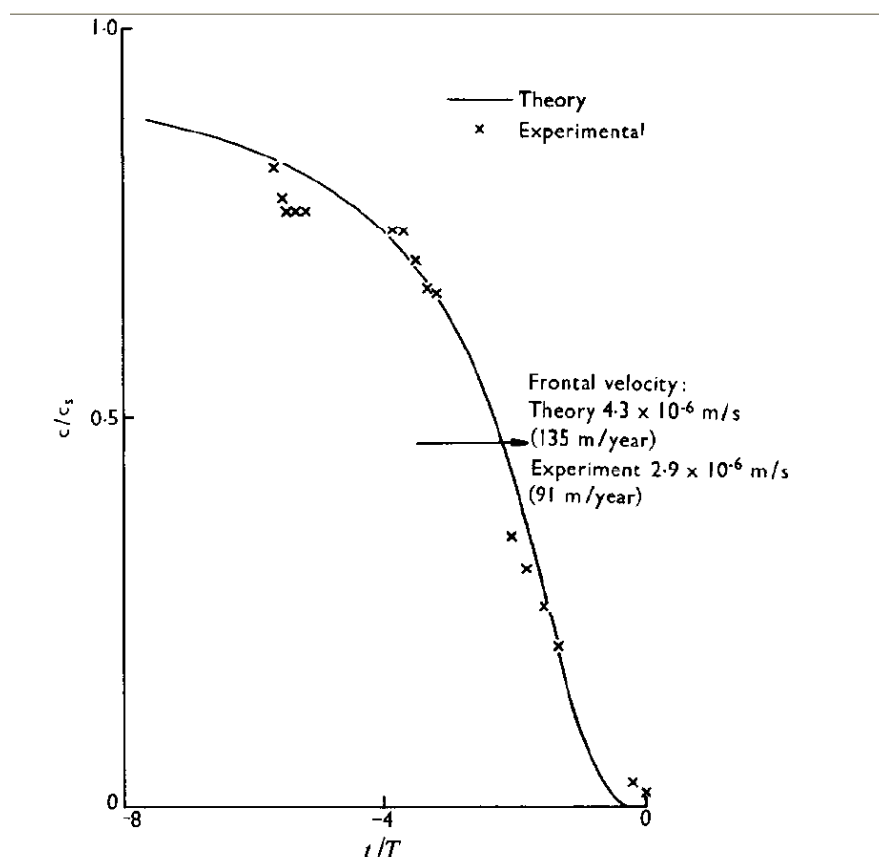


FIGURA N° 32 : Disolución de partículas de yeso en agua (para una velocidad de flujo de $4,3 \cdot 10^{-6}$ m/s).
(James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978).

Mineral	Limiting seepage velocity (m/s)	Length of solution zone (m)
Gypsum	1.4×10^{-6}	0.04
Anhydrite	1.6×10^{-6}	0.09
Halite	6.0×10^{-9}	0.002
Limestone	3.0×10^{-4}	2.8

Note: Rate of movement of solution zone is 0.1 m/year. Mineral particles diameter 50 mm; pure water.

TABLA N° 13 : Velocidad límite de filtración para un avance del frente de disolución de 0,1 m/año, con partículas de diámetro 50 mm, en agua pura (James, A.N.; Kirkpatrick, I.M., 1980).

A partir de u y de v , se puede obtener el porcentaje de yeso, que resulta ser 47,6%. Y a partir de la longitud del frente y de l_0 , podemos obtener K_d , que resulta ser $2,82 \cdot 10^{-6}$ m/s.

Los procesos de disolución ocurridos en las presas de San Fernando, Olive Hills y Rattlesnake (California, EEUU) responderían, según James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978, al modelo descrito.

4.4.3. Flujo en un acuífero adyacente a una capa soluble

Si existe una capa más permeable de material no soluble junto a la capa con material soluble, se pueden dar tres casos, como se muestra en la tercera, cuarta y quinta fila de la FIGURA N° 24, respectivamente:

- C1 Acuífero confinado en su parte superior por una capa yesífera.
- C2 Acuífero confinado en su parte superior por una capa impermeable y sobre una capa yesífera (parcialmente confinado).
- C3 Acuífero no confinado en su parte superior y sobre una capa yesífera.

En estos casos, la disolución que se produce en la capa yesífera se ve influida por la capa permeable y se producen disposiciones entre la disolución de partículas y la de fisuras.

Tanto en C1 como en C3, la forma que adopta la disolución en la capa soluble responde al modelo de disolución por fisuras. En la FIGURA N° 33 se muestra el modelo de disolución C3 (acuífero sobre una capa yesífera).

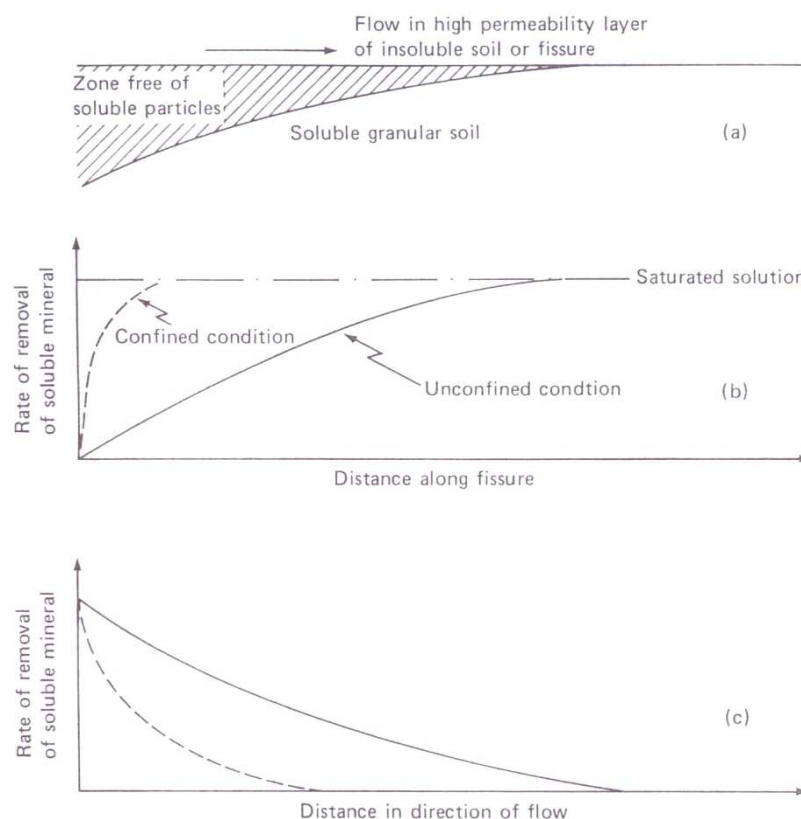


FIGURA N° 33 : Modelo de disolución en capas no confinadas (James, A.N., 1992).

Para el caso C2, donde la capa está parcialmente confinada, influye el espesor de la capa permeable pero insoluble, ya que en el contacto de la capa soluble con la capa permeable existe una zona de mezcla (si el espesor es muy grande, es despreciable). El esquema es el que se muestra en la FIGURA N° 34.

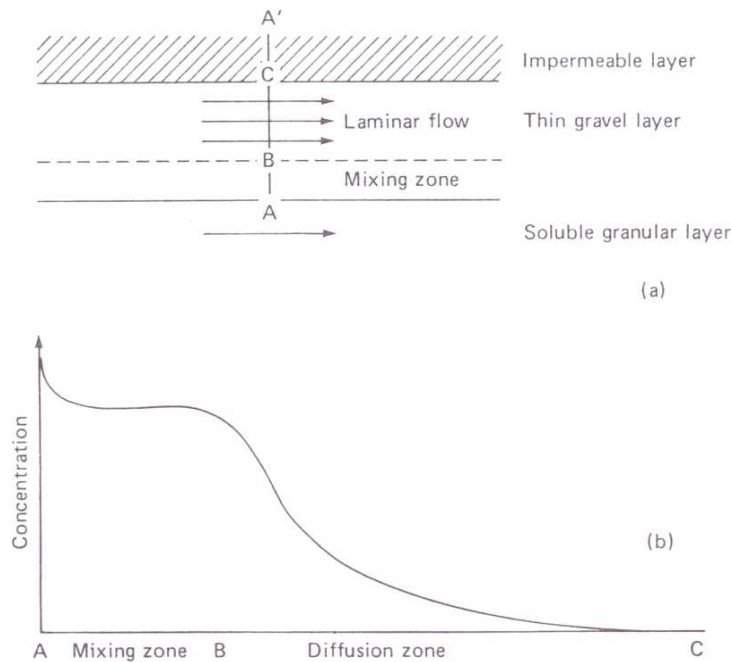


FIGURA N° 34 : Modelo de flujo parcialmente confinado (James, A.N., 1992).

James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1985, aplican el modelo C1 a la presa del río Ross (Queensland, Australia), siendo la roca soluble caliza, en este caso. El espesor de la capa permeable considerado es de 0,5 m. El esquema utilizado para este caso real, se muestra en la FIGURA N° 35.

Willmann M., 2001, analiza la cimentación de la presa de Horsetooth, USA, donde la capa yesífera se presenta bajo una capa de calizas más permeable (3 órdenes de magnitud). El cálculo se realiza mediante un programa de redes de filtración MODFLOW-96, ampliado con los módulos CAVE o EVE (para calizas o evaporitas, respectivamente) que permiten discretizar la red de conductos de un acuífero y calcular la evolución de los huecos. El proceso físico en este caso no es solamente de difusión. En la Universidad de Tübingen (Alemania), donde se ha desarrollado la tesis doctoral citada, se han realizado diversos estudios basados en los cálculos con los módulos CAVE o EVE, como por ejemplo, el de Samman Pepprah, E., 2004, que analiza la evolución de los huecos por disolución del yeso, bajo el azud de Hessigheim (Alemania).

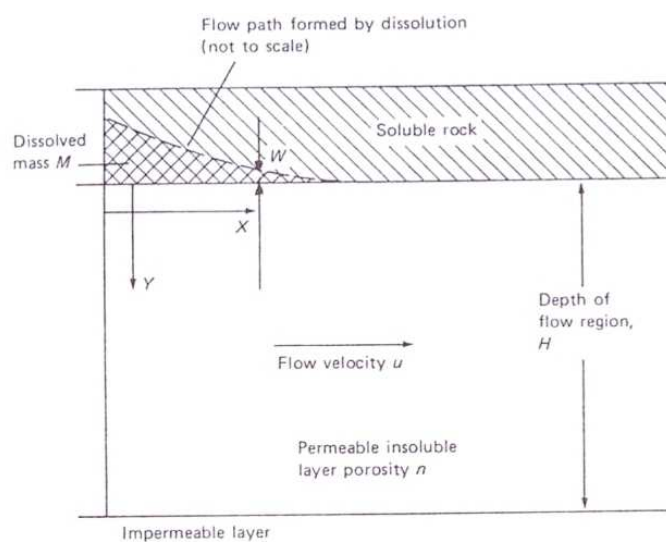
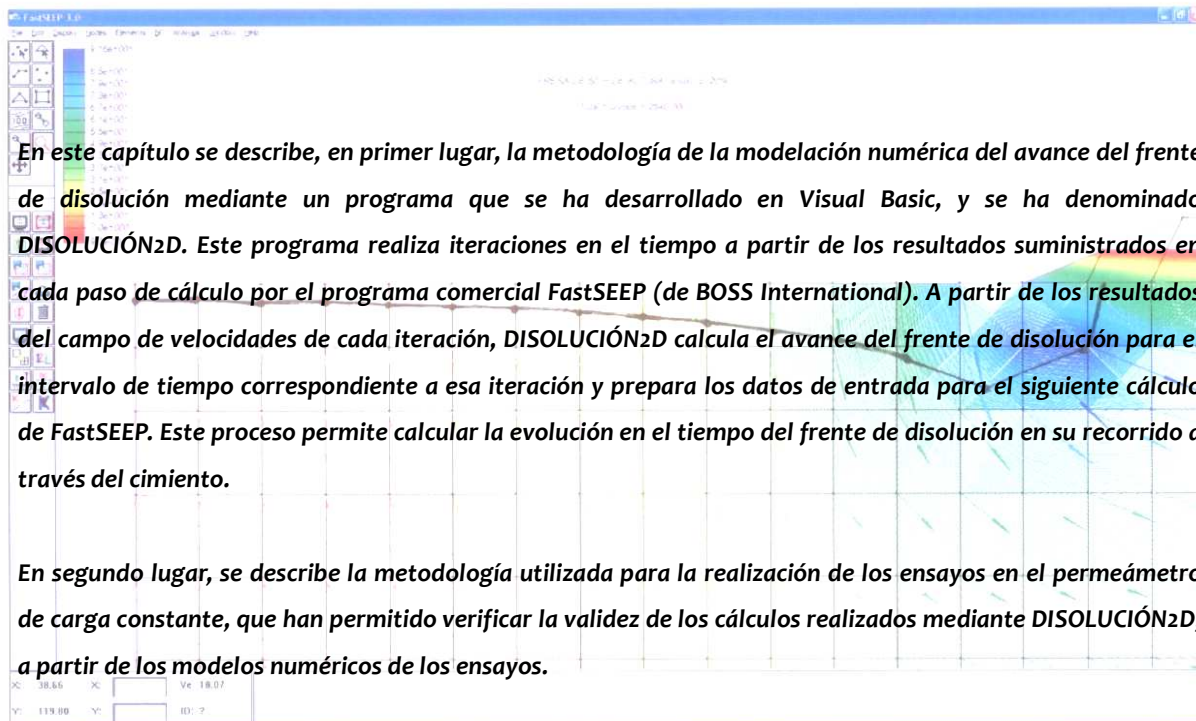


FIGURA N° 35 : Modelo de disolución de una roca por difusión (James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1985).

CAPÍTULO 5. MODELACIÓN NUMÉRICA DEL PROCESO ACOPLADO FILTRACIÓN-DISOLUCIÓN



En este capítulo se describe, en primer lugar, la metodología de la modelación numérica del avance del frente de disolución mediante un programa que se ha desarrollado en Visual Basic, y se ha denominado DISOLUCIÓN2D. Este programa realiza iteraciones en el tiempo a partir de los resultados suministrados en cada paso de cálculo por el programa comercial FastSEEP (de BOSS International). A partir de los resultados del campo de velocidades de cada iteración, DISOLUCIÓN2D calcula el avance del frente de disolución para el intervalo de tiempo correspondiente a esa iteración y prepara los datos de entrada para el siguiente cálculo de FastSEEP. Este proceso permite calcular la evolución en el tiempo del frente de disolución en su recorrido a través del cemento.

En segundo lugar, se describe la metodología utilizada para la realización de los ensayos en el permeámetro de carga constante, que han permitido verificar la validez de los cálculos realizados mediante DISOLUCIÓN2D, a partir de los modelos numéricos de los ensayos.

ÍNDICE

CAPÍTULO 5.	MODELACIÓN NUMÉRICA DEL PROCESO ACOPLADO FILTRACIÓN-DISOLUCIÓN.....	70
5.1.	MODELACIÓN NUMÉRICA DEL PROCESO DE DISOLUCIÓN DEL CIMIENTO YESÍFERO	71
5.1.1.	Modelación numérica del proceso de filtración	71
5.1.2.	Modelación numérica del proceso de disolución mediante el código DISOLUCIÓN2D. 71	
5.1.2.1.	Hipótesis básicas	71
5.1.2.2.	Proceso de cálculo	79
5.1.2.3.	Comprobaciones finales a realizar	85
5.1.3.	Tipos de cimientos a los que puede aplicarse el modelo DISOLUCIÓN2D	87
5.2.	VALIDACIÓN DE LA MODELACIÓN MEDIANTE ENSAYOS	87
5.2.1.	Finalidad de los ensayos	87
5.2.2.	Esquema del permeámetro	88
5.2.3.	Materiales de los ensayos	90
5.2.4.	Procedimiento de montaje de la muestra	94
5.2.5.	Criterios de validez de los ensayos	95
5.2.6.	Cálculo mediante DISOLUCIÓN2D de los modelos correspondientes a los ensayos	96
5.2.6.1.	Ensayos con bicarbonato sódico.....	97
5.2.6.1.1	Resultados de caudales filtrados en los ensayos con bicarbonato sódico.....	97
5.2.6.1.2	Resultados del cálculo de los modelos correspondientes a los ensayos.....	97
5.2.6.1.3	Resultados de masa disuelta en los ensayos con bicarbonato	99
5.2.6.2.	Ensayo con yeso	103
5.2.6.3.	Hojas de cálculo y gráficos de los ensayos de validación	104
5.2.7.	Factor de aceleración en un cilindro de suelo.....	106
5.2.8.	Conclusión de los ensayos de validación	108
5.2.8.1.	Análisis del efecto del cambio de agua en los ensayos con bicarbonato sódico..	108
5.2.8.2.	Comparación de los resultados medidos en los ensayos y los resultados calculados mediante DISOLUCIÓN2D.....	110
5.2.8.3.	Otros efectos que se producen en los ensayos	114
5.2.9.	Conclusiones finales de los ensayos.....	117

5.1. MODELACIÓN NUMÉRICA DEL PROCESO DE DISOLUCIÓN DEL CIMIENTO YESÍFERO

5.1.1. Modelación numérica del proceso de filtración

Se ha utilizado el programa FastSEEP (de BOSS International) que modela el movimiento del agua a través de medios porosos, confinados o con superficie libre, en dos dimensiones o con simetría axial, mediante la integración, por el método de los elementos finitos, de la ecuación en derivadas parciales de Laplace, P.S.:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} + K_{xy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} + K_{yx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) = 0$$

Donde: h = Potencial en un punto (x, y)

K_{xx} , K_{xy} , K_{yx} , K_{yy} = Permeabilidad del material en las direcciones correspondientes.

En medios porosos finos rige la Ley de Darcy: la velocidad es proporcional al gradiente hidráulico, siendo la permeabilidad K el factor de proporcionalidad. Para una geometría dada y unas condiciones de contorno determinadas, las líneas de filtración, las líneas equipotenciales y los gradientes hidráulicos, son independientes de los valores de permeabilidad de las distintas capas (si la relación entre las permeabilidades de éstas no varía). En lo que influyen los valores de la permeabilidad son en las velocidades y en el caudal filtrado. En medios porosos granulares gruesos, ya no es válida la ecuación de Laplace, ya que la relación entre el gradiente hidráulico y la velocidad es de tipo cuadrático.

El programa FastSEEP caracteriza a los materiales con una única variable, la permeabilidad del terreno. Admite que en medios anisótropos la permeabilidad sea distinta en las direcciones vertical y horizontal.

5.1.2. Modelación numérica del proceso de disolución mediante el código DISOLUCIÓN2D

El programa DISOLUCIÓN2D ha sido desarrollado en Visual Basic por Luis Medina Martínez y Carmen María Baena Berrendero (2007).

5.1.2.1. Hipótesis básicas

Avance del frente de disolución

El cálculo del avance de la disolución en un cimiento yesífero de una presa se realiza suponiendo un régimen laminar y un flujo intergranular, por lo tanto el modelo de disolución que se ha aplicado es el de disolución de partículas.

Como se ha explicado en el 4.3.2.2, la constante de disolución K_d se puede considerar constante y al imponer el equilibrio de masas global, la velocidad “u” de avance del frente de disolución (zona donde se está produciendo la disolución de partículas solubles del terreno) resulta ser proporcional a la velocidad de filtración y menor que ésta (James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978):

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

Es decir, las velocidades de filtración son el primer dato necesario para analizar el proceso de avance del frente de disolución (y se obtienen mediante el cálculo con el código comercial FastSEEP).

Si se representa la relación u/v para el yeso, en función del porcentaje del material soluble en la capa del cemento, y considerando que la concentración de saturación es 2,4 g/l (considerando una T° de 15 °C) y la densidad, 2,3 t/m³, se obtiene el gráfico representado en la FIGURA N° 36.

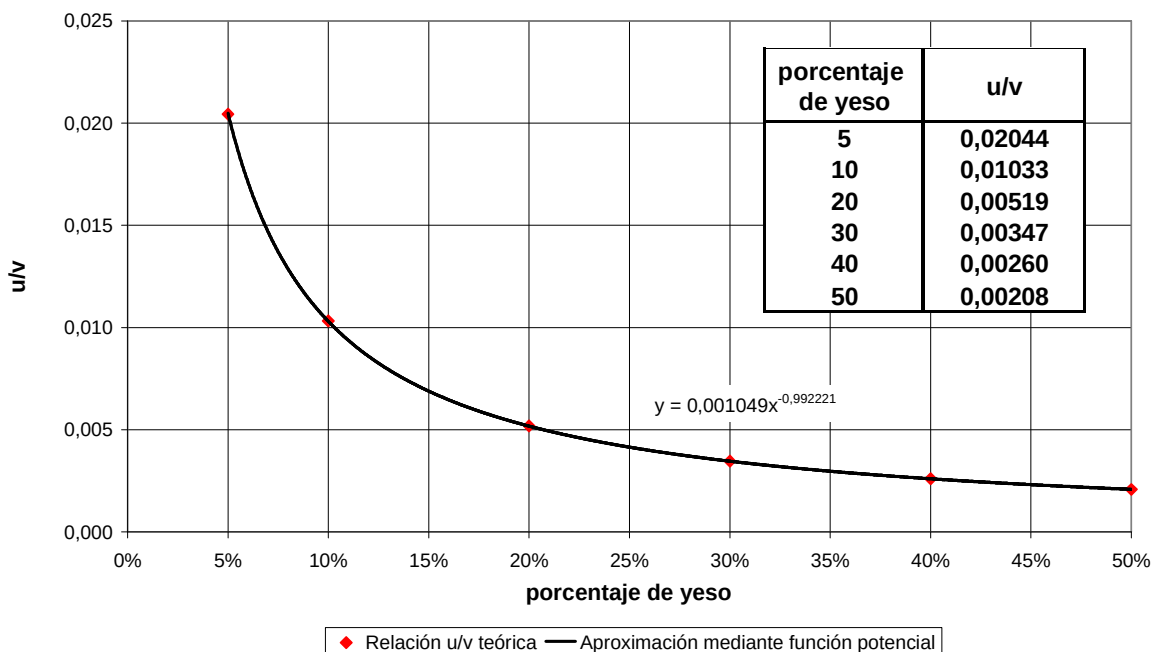


FIGURA N° 36 : Relación u/v en función del porcentaje de yeso.

La relación u/v en función del porcentaje de yeso puede aproximarse bien mediante una función potencial (con exponente negativo, como se observa en la FIGURA N° 36). En cambio, la relación entre v/u y el porcentaje de yeso es prácticamente una función lineal (FIGURA N° 37).

Por otro lado, la longitud del frente de disolución depende del diámetro de las partículas y de la constante de disolución K_d , como se ha detallado en el apartado 4.4.2., pero dado que las velocidades son reducidas en el caso del cimiento de una presa, se ha considerado que K_d es constante y que la longitud del frente (zona donde se está produciendo la disolución de las partículas) es despreciable frente a la longitud de la cimentación, lo que simplifica el cálculo de forma notable.

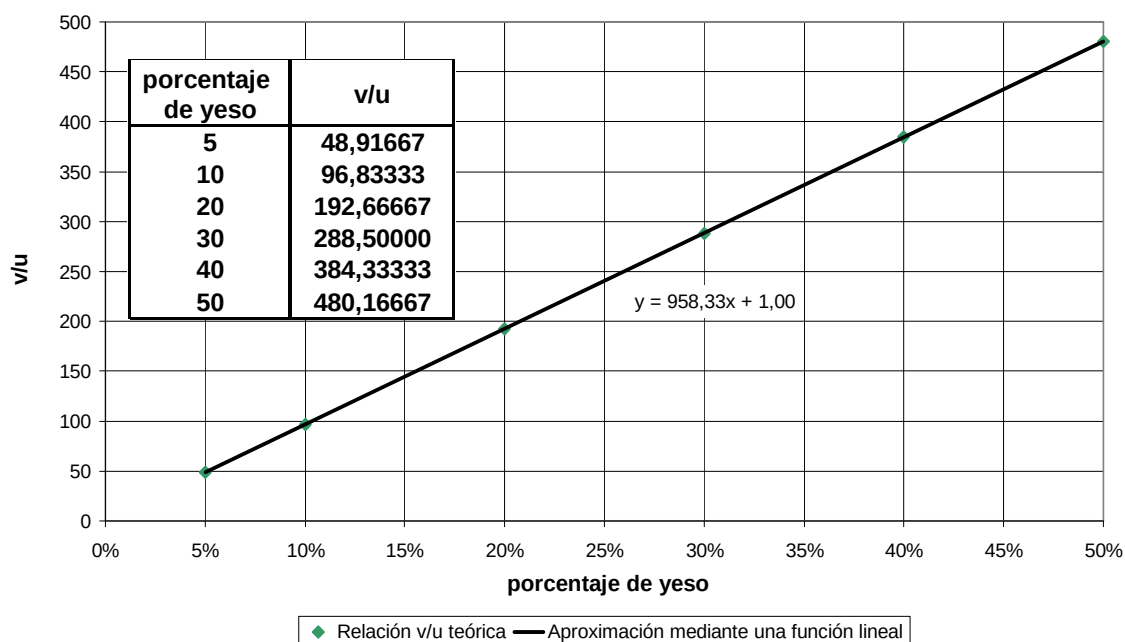


FIGURA N° 37 : Relación v/u en función del porcentaje de yeso.

Es importante destacar que la pendiente de la recta, 958,33 es el valor de C_s/σ_0 , por lo que lógicamente depende del material soluble y que en el caso el yeso, la ordenada en el origen se puede asimilar a 0.

Para analizar los órdenes de magnitud de los parámetros analizados, se muestra un ejemplo:

Cálculo mediante FastSEEP para una presa homogénea de 50 m de altura “H”, bajo la que existe una capa yesífera de espesor igual a $0,2H$ y de porcentaje de yeso por unidad de volumen del 10% (la filtración más importante se produce en la capa yesífera, porque bajo esta capa se ha modelizado una capa prácticamente impermeable y no yesífera). Se adjuntan el modelo de elementos finitos realizado mediante FastSEEP y los resultados del campo de velocidades (FIGURA N° 38 y FIGURA N° 39, respectivamente).

Para una permeabilidad inicial de la capa yesífera igual a 315 m/año (10^{-5} m/s), la velocidad de filtración media inicial en esta capa es de $50,4 \text{ m/año}$ ($1,9 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$) y el caudal total filtrado es $506,7 \text{ m}^3/\text{año}$ ($0,016 \text{ l/s}$) por metro de presa, como se observa en los resultados de FastSEEP.

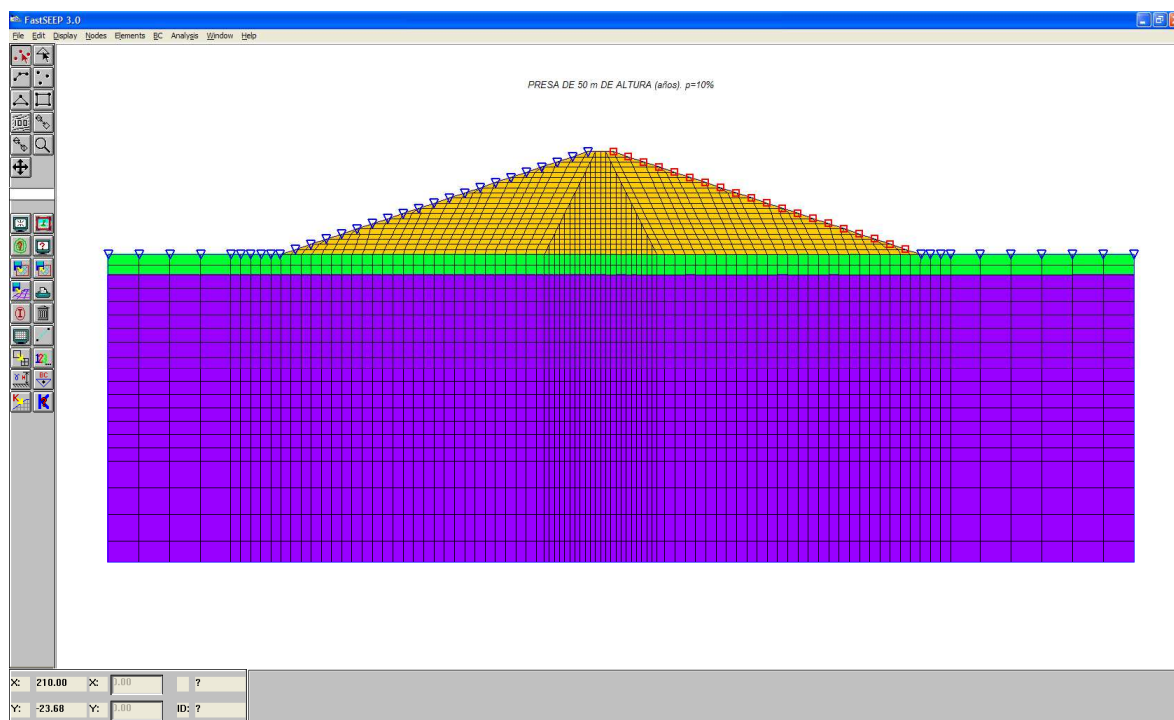


FIGURA N° 38 : Modelo de FastSEEP de una presa homogénea de 50 m de altura y capa yesífera de 10 m de espesor (en verde, con 10% de porcentaje de yeso).

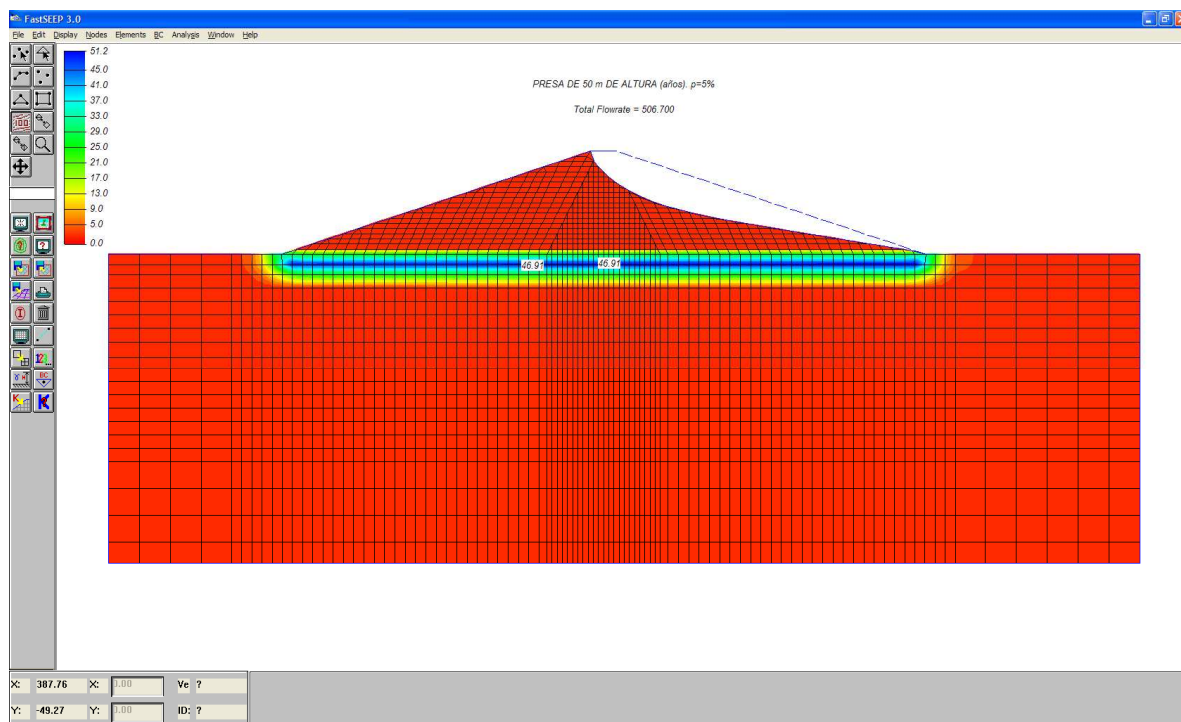


FIGURA N° 39 : Velocidades de filtración bajo una presa homogénea de 50 m de altura y capa yesífera de 10 m de espesor (con 10% de porcentaje de yeso). (Cálculo mediante FastSEEP).

A partir de la velocidad de filtración media inicial, resulta una velocidad inicial de avance del frente $u^0=0,52$ m/año. Considerando una velocidad de avance constante, el frente tardaría 600 años en llegar aguas abajo de la presa.

Si la forma de las partículas corresponde a γ de valor 3, el diámetro medio l_0 es de 1 mm y dado que la velocidad de filtración es muy pequeña, $K_d = 10^{-6}$ m/s, se obtiene que el tiempo que tarda en disolverse el 95% del material soluble del frente de disolución es del orden de:

$$t_{95} = 2,76.T = 2,76. \frac{\sigma_{l_0}}{\gamma K_d C_s} = 235 \text{ horas} = 2,68.10^{-2} \text{ años}$$

Y la longitud del frente de disolución es aproximadamente $ut_{95}=1,4$ cm.

Como se puede observar en la formulación, el tiempo que tardan en disolverse las partículas no depende de la velocidad de filtración ni de la masa soluble. Para el mismo material, depende únicamente de la forma y del tamaño de las partículas.

Por tanto, si la velocidad de filtración es lo suficientemente pequeña, la longitud del frente de disolución será despreciable respecto a la longitud de cemento recorrida por el frente de disolución (1,4 cm respecto de 312,5 m, en este caso), y se producirá un avance del frente con las condiciones del modelo de disolución intergranular, que consiste en que a la derecha del frente la concentración es igual a la concentración de saturación, o lo que es lo mismo, por el pie de aguas abajo de la presa está saliendo el agua saturada hasta que se haya completado el proceso de disolución del cemento.

Así pues, en estas condiciones, la separación entre las zonas del cemento con agua “limpia” y agua saturada con yeso puede establecerse mediante un recinto.

Aumento de la permeabilidad durante el proceso de disolución

Cuando se ha disuelto el material soluble, la permeabilidad de la zona que contenía las partículas solubles ha aumentado respecto a la permeabilidad inicial, debido a que se ha incrementado la porosidad por la disolución de las partículas.

Para calcular la permeabilidad de la zona del terreno cuyas partículas ya se han disuelto se ha partido de la ecuación de Kozeny, J.; Carman, P.C., 1956, que relaciona la porosidad inicial n_0 y el coeficiente de permeabilidad inicial K_0 :

$$K_0 = \frac{g\rho}{\nu} \frac{1}{5} \left(\frac{V_g}{S} \right)^2 \frac{n_0^3}{(1-n_0)^2}$$

Para aplicar esta ecuación se realizan las siguientes hipótesis adicionales:

- Si la unidad de volumen de suelo V_t se compone de una fracción de huecos intercomunicados V_h , una fracción de partículas solubles V_s y una fracción de partículas insolubles V_{in} , tendremos una porosidad eficaz antes de la disolución:

$$n_0 = \frac{V_h}{V_t}$$

- Si se hace la hipótesis de que toda la fracción de partículas solubles, una vez disueltas, pasa a incrementar la porosidad eficaz, entonces la porosidad tras la disolución será:

$$n = \frac{V_h + V_s}{V_t} = n_0 + \phi$$

- Por lo que el coeficiente de permeabilidad tras la disolución de todas las partículas solubles K_{td} es mayor que el inicial y de expresión, en función de la nueva porosidad:

$$K_{td} = \frac{g\rho}{\nu} \frac{1}{5} \left(\frac{V_g}{S} \right)^2 \frac{n^3}{(1-n)^2}$$

- Si todos los demás parámetros (factor de forma, factor de tortuosidad y relación entre el volumen de granos V_g , y la superficie de granos S) se admite que no cambian significativamente, se puede obtener la siguiente expresión para la permeabilidad tras la disolución K_{td} :

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

K_{td} depende de K_0 (permeabilidad inicial), n_0 (porosidad inicial) y ϕ (porcentaje de material soluble en volumen).

Esto es más válido cuanto menor sea el porcentaje de material soluble, ya que debido a la compactación, con porcentajes ϕ altos la relación K_{td}/K_0 disminuirá respecto a este valor teórico. En estos casos, aplicar esta formulación deja del lado de la seguridad.

Se adjunta la TABLA N° 14, con los valores de K_{td} , expresados en m/s, m/día y m/año, a partir de los otros parámetros (K_0 , n_0 y ϕ). También se muestra en la TABLA N° 15 la relación adimensional K_{td}/K_0 , a partir de n_0 y del porcentaje de material soluble por unidad de volumen de suelo. Y en forma de gráfico, en la FIGURA N° 40, se observa que el ajuste es de tipo exponencial.

PERMEABILIDAD TRAS LA DISOLUCIÓN A PARTIR DE LA PERMEABILIDAD INICIAL, DE LA POROSIDAD INICIAL Y DEL PORCENTAJE DE MATERIAL SOLUBLE																
n ₀		0,200					0,300					0,400				
K ₀ (m/s)		1,00E-05	1,00E-06	1,00E-07	1,00E-08	1,00E-09	1,00E-05	1,00E-06	1,00E-07	1,00E-08	1,00E-09	1,00E-05	1,00E-06	1,00E-07	1,00E-08	1,00E-09
% material soluble	u/v	K _{td} (m/s)					K _{td} (m/s)					K _{td} (m/s)				
5	0,02044	2,22E-05	2,22E-06	2,22E-07	2,22E-08	2,22E-09	1,84E-05	1,84E-06	1,84E-07	1,84E-08	1,84E-09	1,69E-05	1,69E-06	1,69E-07	1,69E-08	1,69E-09
10	0,01033	4,41E-05	4,41E-06	4,41E-07	4,41E-08	4,41E-09	3,23E-05	3,23E-06	3,23E-07	3,23E-08	3,23E-09	2,81E-05	2,81E-06	2,81E-07	2,81E-08	2,81E-09
20	0,00519	1,42E-04	1,42E-05	1,42E-06	1,42E-07	1,42E-08	9,07E-05	9,07E-06	9,07E-07	9,07E-08	9,07E-09	7,59E-05	7,59E-06	7,59E-07	7,59E-08	7,59E-09
30	0,00347	4,00E-04	4,00E-05	4,00E-06	4,00E-07	4,00E-08	2,45E-04	2,45E-05	2,45E-06	2,45E-07	2,45E-08	2,14E-04	2,14E-05	2,14E-06	2,14E-07	2,14E-08
40	0,00260	1,08E-03	1,08E-04	1,08E-05	1,08E-06	1,08E-07	6,92E-04	6,92E-05	6,92E-06	6,92E-07	6,92E-08	7,20E-04	7,20E-05	7,20E-06	7,20E-07	7,20E-08
50	0,00208	3,05E-03	3,05E-04	3,05E-05	3,05E-06	3,05E-07	2,32E-03	2,32E-04	2,32E-05	2,32E-06	2,32E-07	4,10E-03	4,10E-04	4,10E-05	4,10E-06	4,10E-07

n_0		0,200					0,300					0,400				
K_0 (m/día)		8,64E-01	8,64E-02	8,64E-03	8,64E-04	8,64E-05	8,64E-01	8,64E-02	8,64E-03	8,64E-04	8,64E-05	8,64E-01	8,64E-02	8,64E-03	8,64E-04	8,64E-05
% material soluble	u/v	K_{td} (m/día)					K_{td} (m/día)					K_{td} (m/día)				
5	0,02044	1,92E+00	1,92E-01	1,92E-02	1,92E-03	1,92E-04	1,59E+00	1,59E-01	1,59E-02	1,59E-03	1,59E-04	1,46E+00	1,46E-01	1,46E-02	1,46E-03	1,46E-04
10	0,01033	3,81E+00	3,81E-01	3,81E-02	3,81E-03	3,81E-04	2,79E+00	2,79E-01	2,79E-02	2,79E-03	2,79E-04	2,43E+00	2,43E-01	2,43E-02	2,43E-03	2,43E-04
20	0,00519	1,23E+01	1,23E+00	1,23E-01	1,23E-02	1,23E-03	7,84E+00	7,84E-01	7,84E-02	7,84E-03	7,84E-04	6,56E+00	6,56E-01	6,56E-02	6,56E-03	6,56E-04
30	0,00347	3,46E+01	3,46E+00	3,46E-01	3,46E-02	3,46E-03	2,12E+01	2,12E+00	2,12E-01	2,12E-02	2,12E-03	1,85E+01	1,85E+00	1,85E-01	1,85E-02	1,85E-03
40	0,00260	9,33E+01	9,33E+00	9,33E-01	9,33E-02	9,33E-03	5,98E+01	5,98E+00	5,98E-01	5,98E-02	5,98E-03	6,22E+01	6,22E+00	6,22E-01	6,22E-02	6,22E-03
50	0,00208	2,63E+02	2,63E+01	2,63E+00	2,63E-01	2,63E-02	2,01E+02	2,01E+01	2,01E+00	2,01E-01	2,01E-02	3,54E+02	3,54E+01	3,54E+00	3,54E-01	3,54E-02

n_0		0,200					0,300					0,400				
K_0 (m/año)		3,15E+02	3,15E+01	3,15E+00	3,15E-01	3,15E-02	3,15E+02	3,15E+01	3,15E+00	3,15E-01	3,15E-02	3,15E+02	3,15E+01	3,15E+00	3,15E-01	3,15E-02
% material soluble	u/v	K_{td} (m/año)					K_{td} (m/año)					K_{td} (m/año)				
5	0,02044	7,01E+02	7,01E+01	7,01E+00	7,01E-01	7,01E-02	5,81E+02	5,81E+01	5,81E+00	5,81E-01	5,81E-02	5,34E+02	5,34E+01	5,34E+00	5,34E-01	5,34E-02
10	0,01033	1,39E+03	1,39E+02	1,39E+01	1,39E+00	1,39E-01	1,02E+03	1,02E+02	1,02E+01	1,02E+00	1,02E-01	8,87E+02	8,87E+01	8,87E+00	8,87E-01	8,87E-02
20	0,00519	4,49E+03	4,49E+02	4,49E+01	4,49E+00	4,49E-01	2,86E+03	2,86E+02	2,86E+01	2,86E+00	2,86E-01	2,39E+03	2,39E+02	2,39E+01	2,39E+00	2,39E-01
30	0,00347	1,26E+04	1,26E+03	1,26E+02	1,26E+01	1,26E+00	7,73E+03	7,73E+02	7,73E+01	7,73E+00	7,73E-01	6,76E+03	6,76E+02	6,76E+01	6,76E+00	6,76E-01
40	0,00260	3,41E+04	3,41E+03	3,41E+02	3,41E+01	3,41E+00	2,18E+04	2,18E+03	2,18E+02	2,18E+01	2,18E+00	2,27E+04	2,27E+03	2,27E+02	2,27E+01	2,27E+00
50	0,00208	9,61E+04	9,61E+03	9,61E+02	9,61E+01	9,61E+00	7,33E+04	7,33E+03	7,33E+02	7,33E+01	7,33E+00	1,29E+05	1,29E+04	1,29E+03	1,29E+02	1,29E+01

TABLA N° 14 : Permeabilidad tras la disolución a partir de la permeabilidad inicial, de la porosidad inicial y del porcentaje de material soluble.

K_{td}/K_0 EN FUNCIÓN DEL PORCENTAJE DE MATERIAL SOLUBLE Y DE n_0					
	n_0				
% material soluble	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
5	2,22	1,98	1,84	1,75	1,69
10	4,41	3,65	3,23	2,97	2,81
20	14,22	10,84	9,07	8,10	7,59
30	40,00	29,58	24,50	22,09	21,44
40	108,00	80,71	69,16	66,52	72,00
50	304,89	243,00	232,30	268,97	410,06

TABLA N° 15 : Relación “permeabilidad tras la disolución / permeabilidad inicial” en función del porcentaje de material soluble y de la porosidad inicial.

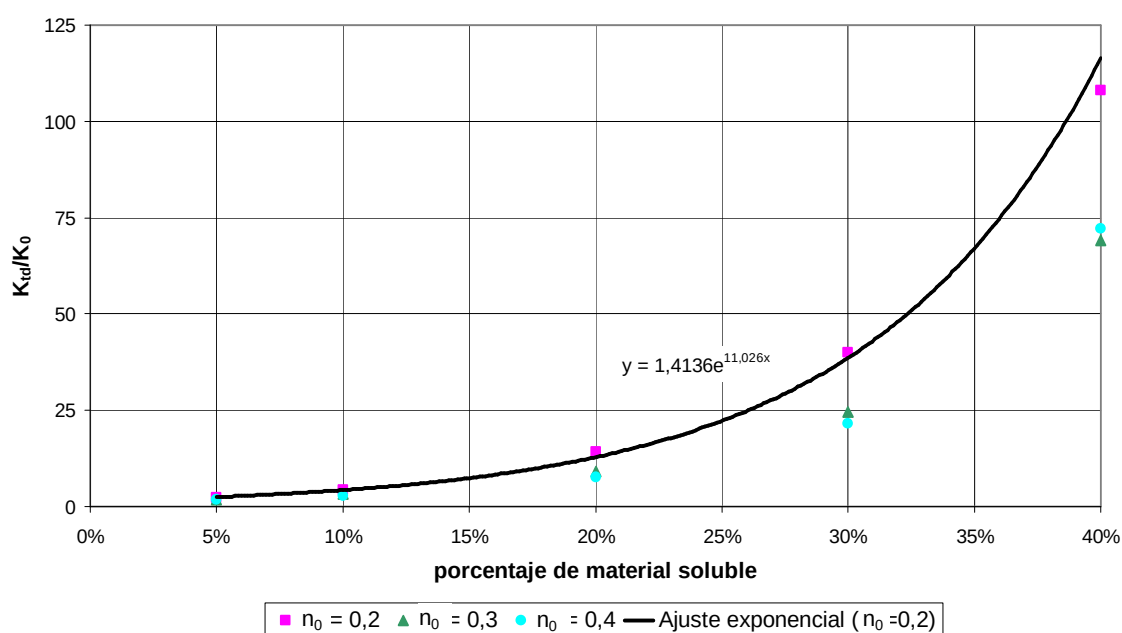


FIGURA N° 40 : Relación “permeabilidad tras la disolución / permeabilidad inicial” en función del porcentaje de material soluble (para distintas porosidades iniciales).

La relación mostrada en la FIGURA N° 40 sería válida para cualquier material soluble, con las consideraciones realizadas anteriormente.

Una vez analizadas las relaciones u/v y K_{td}/K_0 , podemos representar ambas en un mismo gráfico (FIGURA N° 41).

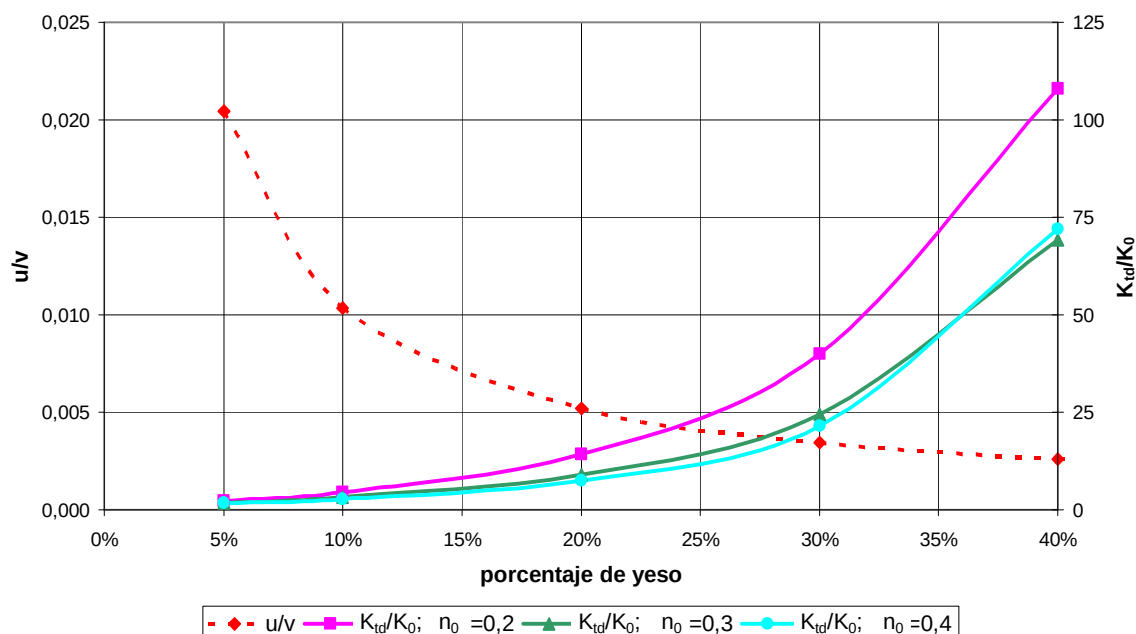


FIGURA N° 41 : Relación de “ u/v ” y de “ K_{td}/K_0 ” con el porcentaje de yeso.

Se puede observar que ambas relaciones son contrapuestas, es decir, para mayor porcentaje de yeso la relación entre permeabilidades es mayor, pero sin embargo el avance del frente de disolución en relación con la velocidad de filtración es más lento.

5.1.2.2. Proceso de cálculo

Todas las hipótesis anteriores se han aplicado al desarrollo del programa DISOLUCIÓN2D, cuyo funcionamiento se detalla a continuación.

Primero se realizó un modelo de elementos finitos para una presa de altura H y con un cimiento constituido por al menos una capa con un porcentaje de partículas yesíferas $\emptyset$, una permeabilidad inicial K_0 y una porosidad inicial n_0 . Además, se deben introducir los datos de las condiciones de contorno y los datos de permeabilidad K_{td} de tantos materiales como capas solubles (calculados a partir de la expresión deducida en el apartado anterior). Para ilustrar el proceso se ha incluido un ejemplo (FIGURA N° 42).

Tras el cálculo con FastSEEP de la situación inicial, se obtiene el campo de velocidades de filtración (FIGURA N° 43), una vez que se establece la red de filtración.

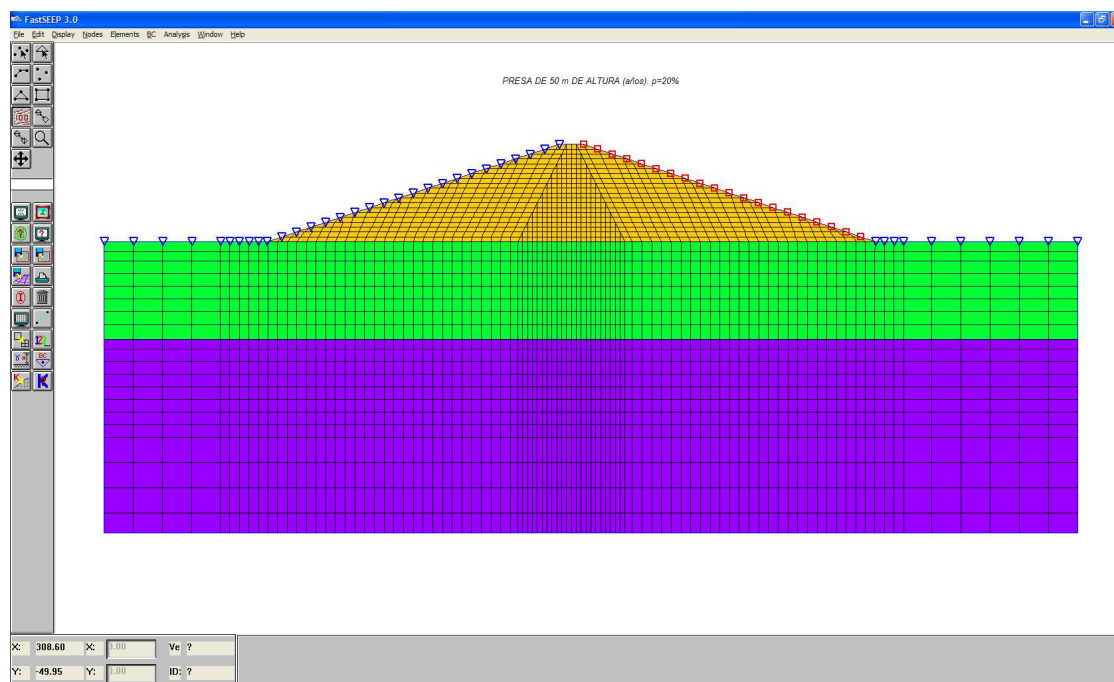


FIGURA Nº 42 : Modelo de elementos finitos de una presa homogénea de 50 m de altura y capa yesífera de espesor igual a la altura de la presa (con 20% de yeso). (Mediante FastSEEP).

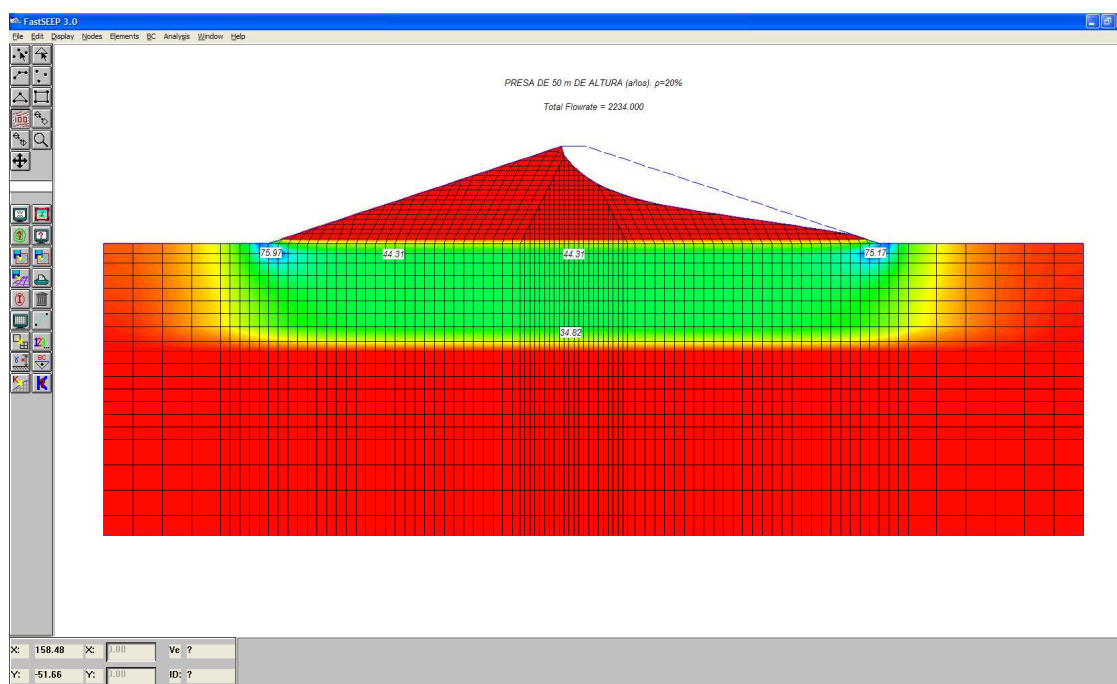


FIGURA Nº 43 : Velocidades de filtración bajo una presa homogénea de 50 m de altura y capa yesífera de espesor igual a la altura de la presa (con 20% de yeso). (Cálculo mediante FastSEEP).

A partir del caudal filtrado, se puede obtener la velocidad media y el gradiente hidráulico medio aproximados en el cimientto. En el ejemplo considerado, dado que el caudal es $2.234 \text{ m}^3/\text{año}$, la velocidad media es $44,68 \text{ m/año}$ y el gradiente hidráulico medio $0,16$, admitiendo de forma simplificada que la longitud de las líneas de corriente es igual al ancho del cimientto de la presa ($312,5 \text{ m}$). También se puede calcular, a partir de la relación u/v , el tiempo que tardaría el frente de disolución en recorrer el cimientto suponiendo que su velocidad de avance es constante (1.348 años).

Se ha considerado que una vez establecida la filtración en la presa y su cimientó se inicia el avance del frente de disolución. Esto resulta aceptable en el caso del cimientó yesífero, porque la velocidad de avance del frente de disolución es mucho menor que la velocidad de filtración.

Los datos necesarios para el cálculo mediante DISOLUCIÓN2D son: el fichero de datos iniciales, los nudos iniciales (o posición inicial del frente de disolución: en una presa homogénea serán los nudos del terreno en contacto con el agua del embalse), el número del material de cemento soluble pero no disuelto (o los números, si son varias capas con distintas características), el número del correspondiente material ya disuelto, la relación u/v para cada material soluble, el número de iteraciones y los intervalos de tiempo de cada iteración. En la FIGURA N° 44, se muestra un ejemplo de la entrada de datos al programa.

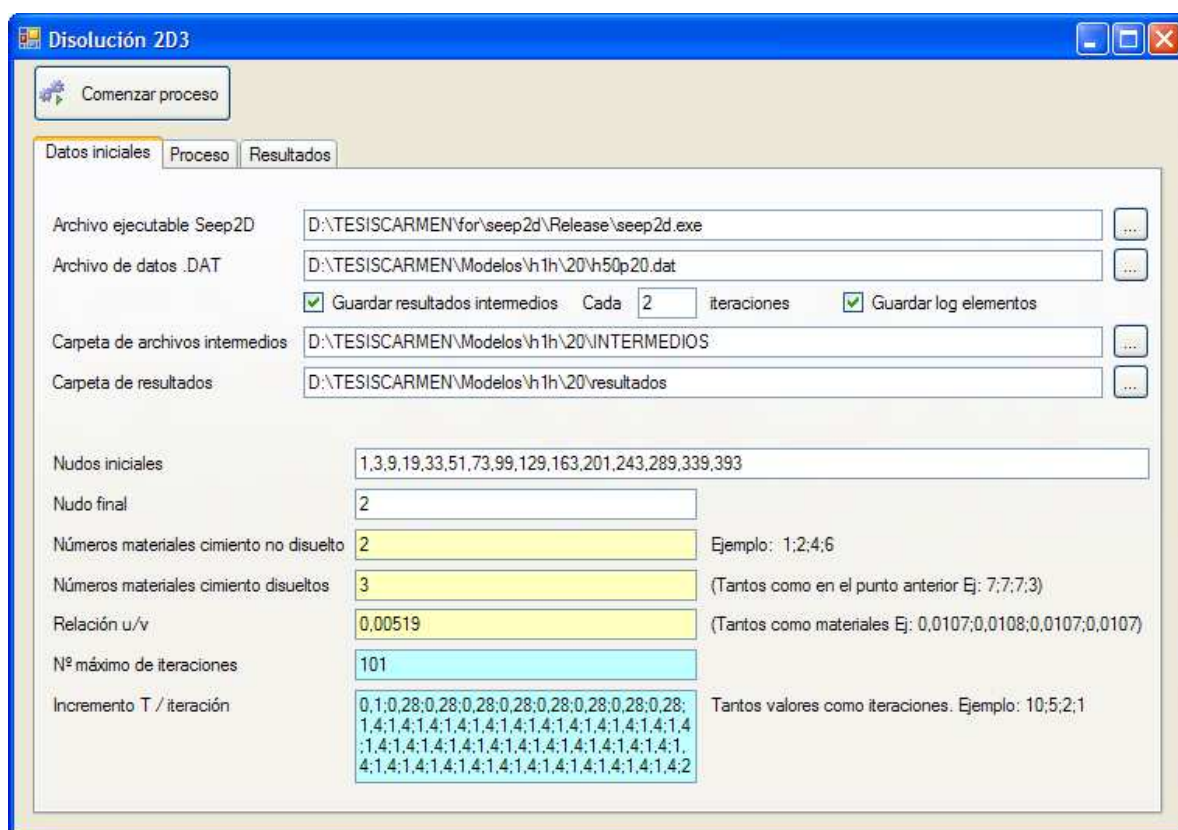


FIGURA N° 44 : Ejemplo de la entrada de datos del programa DISOLUCIÓN_{2D}.

Como se ha comentado, el cálculo mediante FastSEEP proporciona el vector velocidad v_{oi} en cada nudo del modelo (de forma numérica mediante un fichero editable de resultados y de forma gráfica, como se observa en la FIGURA N° 45).

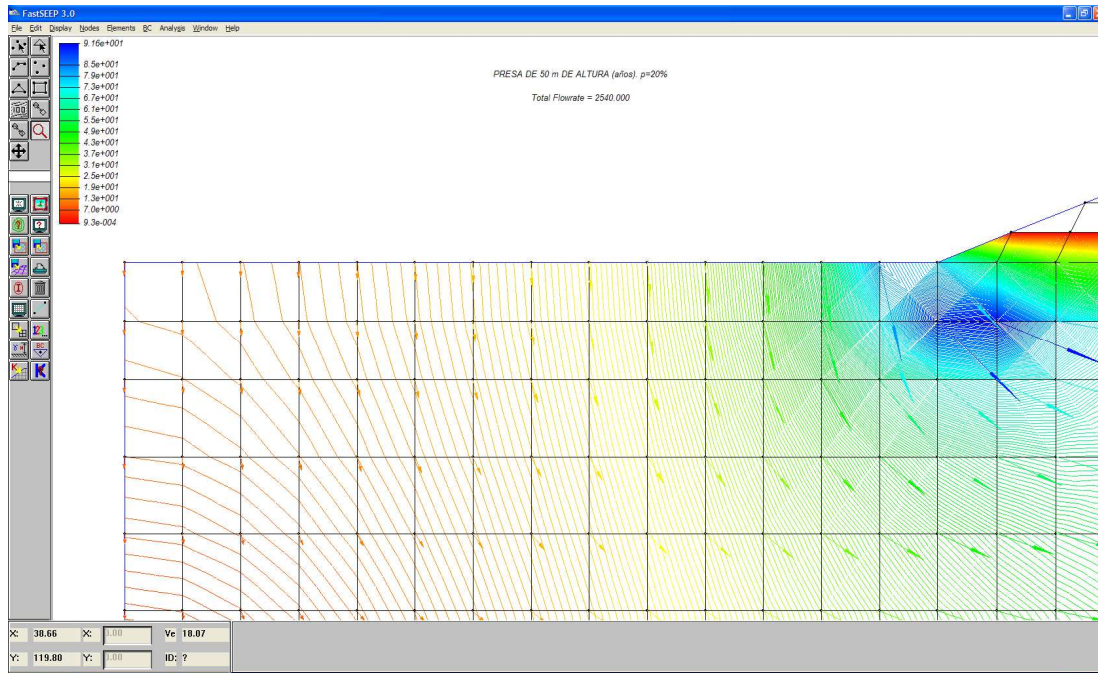


FIGURA N° 45 : Ejemplo de vectores velocidad en los nudos. (Cálculo mediante FastSEEP).

Para cada iteración, DISOLUCIÓN2D calcula la posición del frente de disolución a partir de la posición en la iteración anterior (salvo en el primer cálculo, en que lo hace a partir de los nudos iniciales dados como dato) una vez transcurrido el tiempo de la iteración; es decir, determina un recinto que separa la zona disuelta de la zona por disolver, dado que la longitud del frente de disolución se ha considerado despreciable. La definición analítica del recinto es lo más complicado de la programación de DISOLUCIÓN2D. En la FIGURA N° 46, se muestra con una línea negra un esquema de la formación del recinto.

Los elementos de material soluble se consideran disueltos para una iteración posterior si su centro está dentro del recinto delimitado por el frente de disolución de esa iteración.

Posteriormente, DISOLUCIÓN2D crea un nuevo fichero de datos para FastSEEP para la siguiente iteración. Para los elementos finitos disueltos, cambia el material al número correspondiente al cemento disuelto. Entonces llama a FastSEEP para calcular el fichero de datos modificado de esta forma en la siguiente iteración.

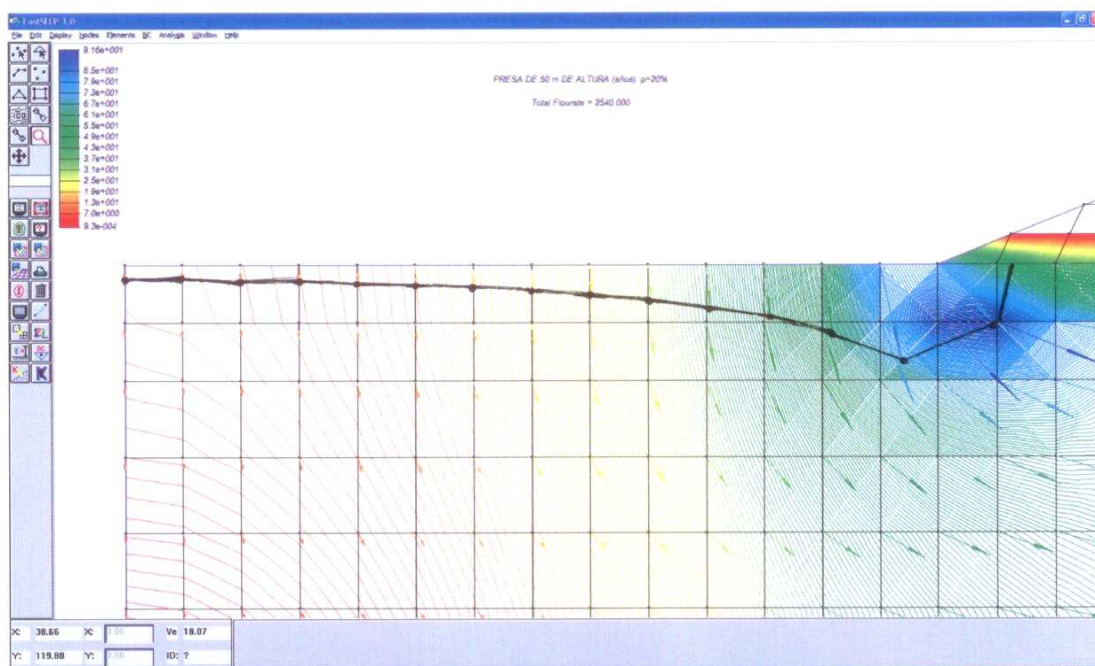


FIGURA Nº 46 : Esquema del recinto que forma el frente de disolución tras la primera iteración (Cálculo mediante DISOLUCIÓN2D).

Resumiendo lo anterior, el programa DISOLUCIÓN2D funciona por iteraciones en el tiempo de la siguiente manera:

- Parte de unos nudos iniciales como posición inicial del frente de disolución y de unos materiales con unas permeabilidades distintas según esté o no disuelto el material soluble.
- Tras establecerse la red de filtración, almacena la velocidad v_{oi} del agua (en valor y dirección) en cada nudo calculada mediante la primera iteración con el programa FastSEEP.
- Calcula, para cada nudo del frente y para cada iteración, la velocidad u_i de avance del frente de disolución, función de su velocidad de filtración, de la solubilidad y del porcentaje de material soluble.
- Transcurrido el tiempo Δt correspondiente a esa iteración, obtiene la nueva posición del frente de disolución.
- En el fichero de datos para el cálculo mediante FastSEEP de la siguiente iteración, cambia el material inicial a los elementos cuyo centro queda dentro de la nueva posición del frente. El

material asignado es el material disuelto que corresponde a ese material inicial (por lo tanto, con el valor de K_{td} en lugar del K_0).

Los cálculos continúan sucesivamente hasta completar el proceso de disolución del cemento soluble.

En la FIGURA N° 47 se muestra un diagrama de flujo del programa DISOLUCIÓN2D.

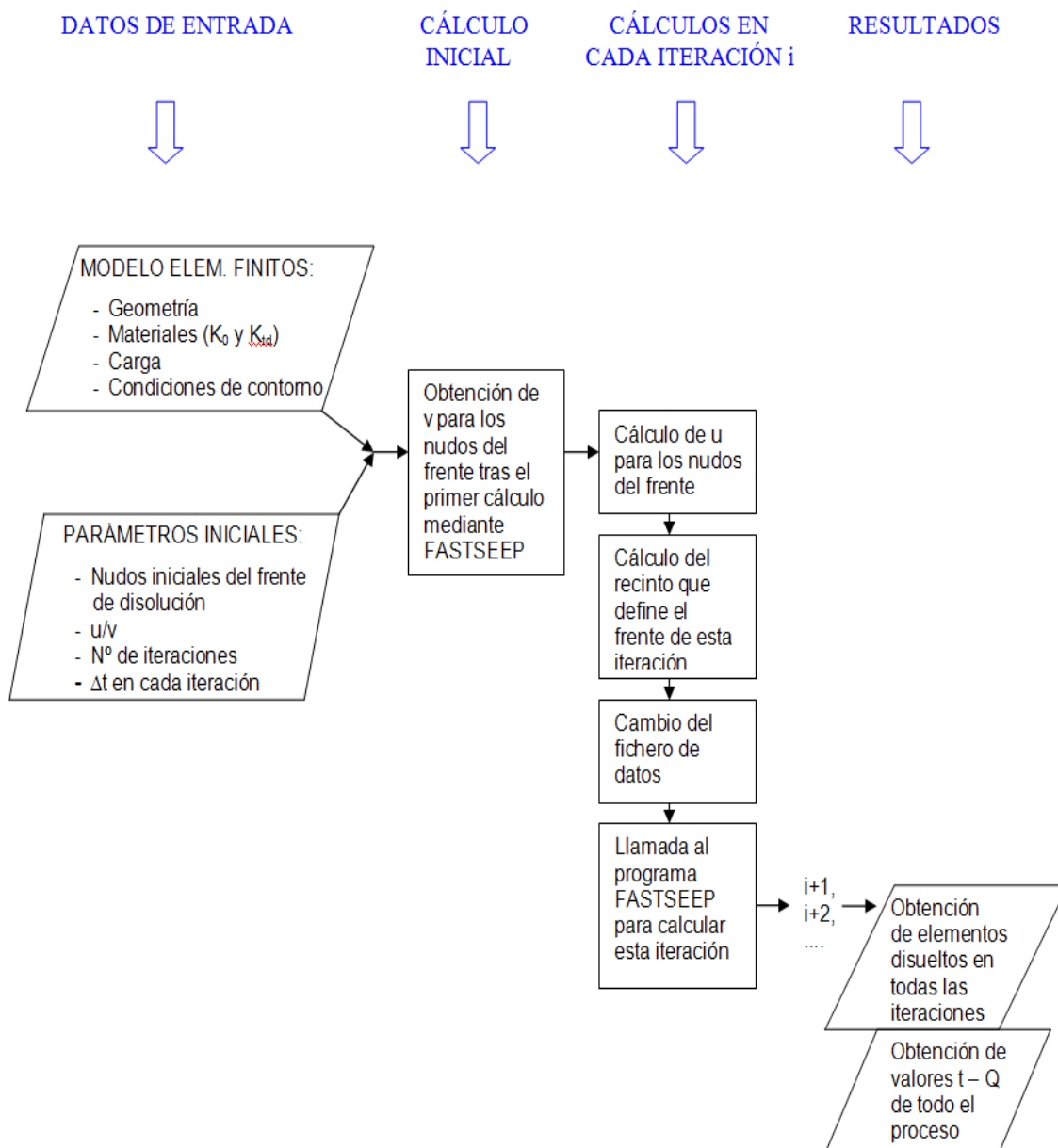


FIGURA N° 47 : Diagrama de flujo del programa DISOLUCIÓN2D.

5.1.2.3. Comprobaciones finales a realizar

Se debe realizar una comprobación final de régimen laminar, para verificar la validez de la formulación.

También se debe comprobar que para la velocidad final, la longitud del frente de disolución sigue siendo despreciable frente al tamaño de los elementos finitos de la modelación de la cimentación de la presa.

Para ello, en la FIGURA N° 48 y FIGURA N° 49 (malla de elementos finitos y campo de velocidades, respectivamente) se muestran los resultados tras la disolución del cimientado del caso analizado en el apartado 5.1.2.2. (los elementos disueltos están en color azul). Los resultados (visualizados con FastSEEP) se han obtenido a partir del cálculo mediante DISOLUCIÓN2D, con 100 iteraciones.

A continuación, para este ejemplo, se han realizado los cálculos resumidos en la TABLA N° 16). Se ha calculado el tiempo característico T y entrando en la gráfica correspondiente (FIGURA N° 31) se obtuvo t_{99} (tiempo que tardan en disolverse el 99% de las partículas solubles); finalmente se ha obtenido una longitud aproximada del frente de disolución a partir de la velocidad máxima de la filtración de 0,012 m, para unas partículas con un factor de forma igual a 3 y para un porcentaje del 20% de yeso.

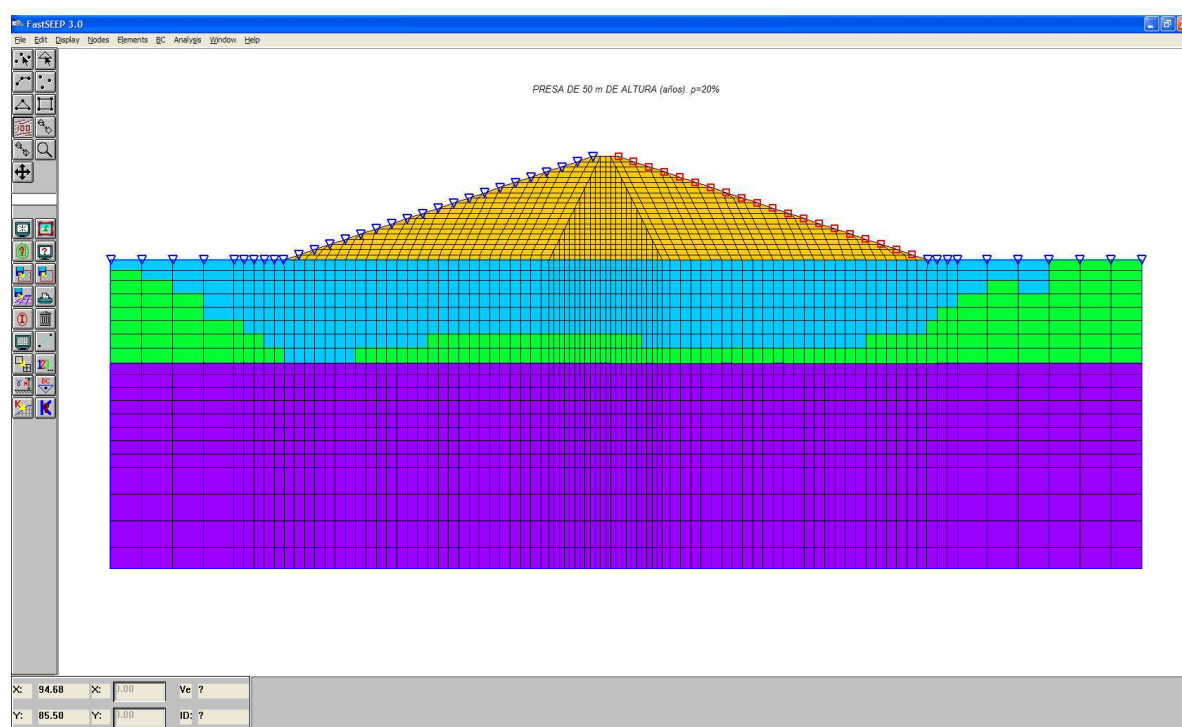


FIGURA N° 48 : Modelo de elementos finitos de una presa homogénea de 50 m de altura y capa yesífera de espesor H (con 20% de porcentaje de yeso), tras la disolución del cimientado.

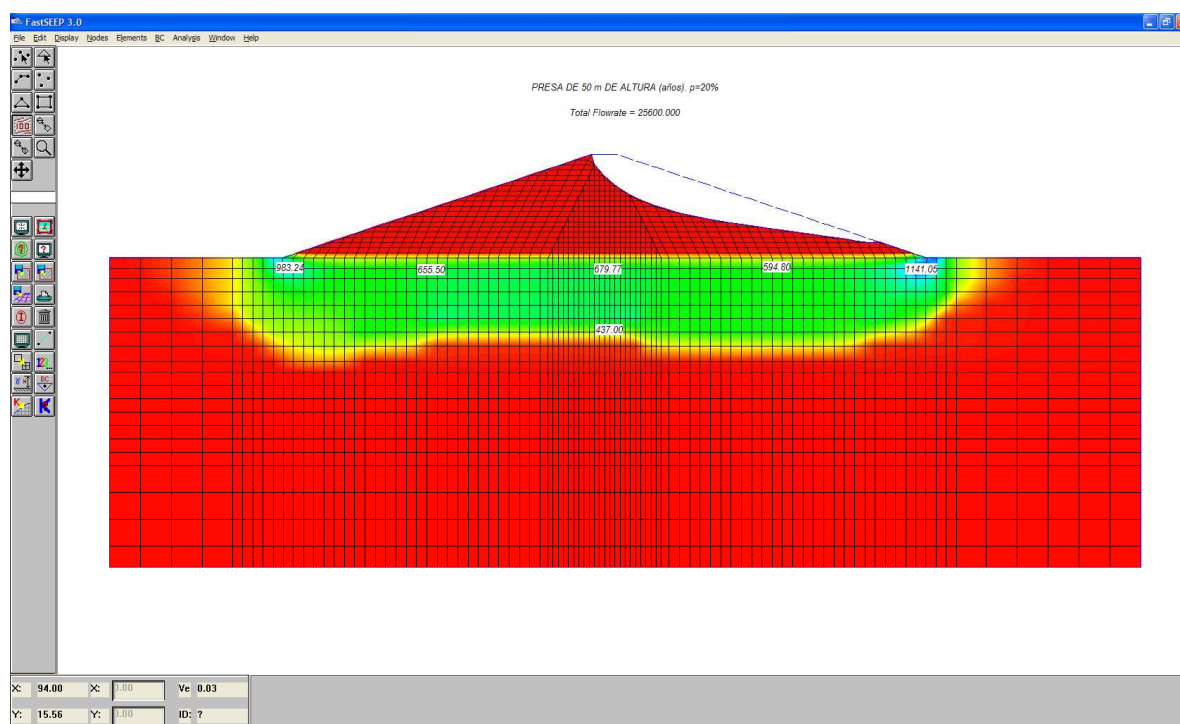


FIGURA N° 49 : Velocidades de filtración bajo una presa homogénea de 50 m de altura y capa yesífera de espesor H (con 20% de porcentaje de yeso), tras la disolución del cemento.

OBTENCIÓN DE LA LONGITUD APROXIMADA DEL FRENTE DE DISOLUCIÓN ut_{99}					
K_d (m/s)	1,80E-06				
Temperatura °C	15				
C_s (kg/m ³)	2,4				
Densidad mat soluble (kg/m ³)	2300				
diámetro (cm)	0,01				
v máxima (m/s)	3,62E-05				
v máxima (m/día)	3,13				
v máxima (m/año)	1141				
v máxima (cm/hora)	13,03				
tamaño del elemento finito (m)	2,5				
porcentaje de yeso	5%	10%	20%	30%	40%
u/v	0,0204	0,0103	0,0052	0,0035	0,0026
FACTOR DE FORMA 1					
T (s)	53176				
t_{99} (s)	122304				
ut_{99} (en m)	0,090	0,046	0,023	0,015	0,012
FACTOR DE FORMA 2					
T (s)	26588				
t_{99} (s)	79498				
ut_{99} (en m)	0,059	0,030	0,015	0,010	0,007
FACTOR DE FORMA 3					
T (s)	17725				
t_{99} (s)	63456				
ut_{99} (en m)	0,047	0,024	0,012	0,008	0,006

TABLA N° 16 : Obtención de la longitud aproximada del frente de disolución tras el cálculo.

5.1.3. Tipos de cimientos a los que puede aplicarse el modelo DISOLUCIÓN2D

En el apartado 4.4. se analizaron los modelos de disolución función del flujo predominante en la capa soluble. En este apartado se detalla qué tipos de cimiento podrían modelarse con el programa DISOLUCIÓN2D.

Podrán modelarse aquellos cimientos que globalmente puedan caracterizarse con una permeabilidad determinada, con un flujo preferentemente intergranular y en régimen laminar. El flujo intergranular está asociado a gran superficie específica expuesta a la disolución.

Cimientos yesíferos de estas características son:

- 1) Roca de yeso muy fracturada.
- 2) Depósitos tales como dunas de arena yesífera.
- 3) Areniscas o conglomerados cementados con yeso.
- 4) Margas conteniendo vetas de yeso.
- 5) Depósitos laminares contenidos en arcillas o limos impermeables.

Flores Calcaño, C.E.; Rodríguez Alzuru P., 1967, analizan casos de presas en los que el modelo predominante de flujo era el intergranular: San Francisco, San Fernando, Olive Hills, Rattle Snake, El Isiro, etc. En estos casos el yeso formaba parte del material cementante en conglomerados o se presentaba en vetas, láminas o cristales. James, A.N., 1992, cita a las lutitas yesíferas como terreno característico del modelo intergranular.

En un cimiento con una fisuración más marcada, el agua circulará principalmente por las fisuras, por lo que las velocidades alcanzadas pueden llegar a alcanzar el régimen turbulento quedando fuera del campo de aplicación. Por supuesto, si la disolución ha desarrollado un karst, se está totalmente fuera del campo de aplicación.

5.2. VALIDACIÓN DE LA MODELACIÓN MEDIANTE ENSAYOS

5.2.1. Finalidad de los ensayos

Para verificar el ajuste a la realidad de las formulaciones utilizadas y validar el modelo numérico DISOLUCIÓN2D, se han realizado diversos ensayos, mediante los permeámetros de carga constante del Laboratorio de Geotecnia de la ETSICCP de Madrid y del CEDEX.

Las hipótesis básicas a verificar son, principalmente, la de velocidad de avance del frente de disolución para flujo intergranular y el incremento de la permeabilidad tras la disolución suponiendo que todo el material soluble contenido en el cimiento aumenta, en el mismo porcentaje, la porosidad efectiva (como ya se ha explicado anteriormente, la relación porosidad-permeabilidad se establece con la expresión de Kozeny, J.; Carman, P.C., 1956).

5.2.2. Esquema del permeámetro

En el caso de sedimentos no cohesivos, para la medida de la permeabilidad en el laboratorio, se utiliza el **permeámetro de carga constante**, cuyo rango de permeabilidades es 10^{-2} y 10^{-6} m/s. En la FIGURA N° 50 se adjunta un esquema de un permeámetro de este tipo.

En la FOTO N° 4 puede verse el permeámetro de carga constante del laboratorio de Geotecnia del CEDEX.



FOTO N° 4 : Permeámetro de carga constante del laboratorio de Geotecnia del CEDEX.

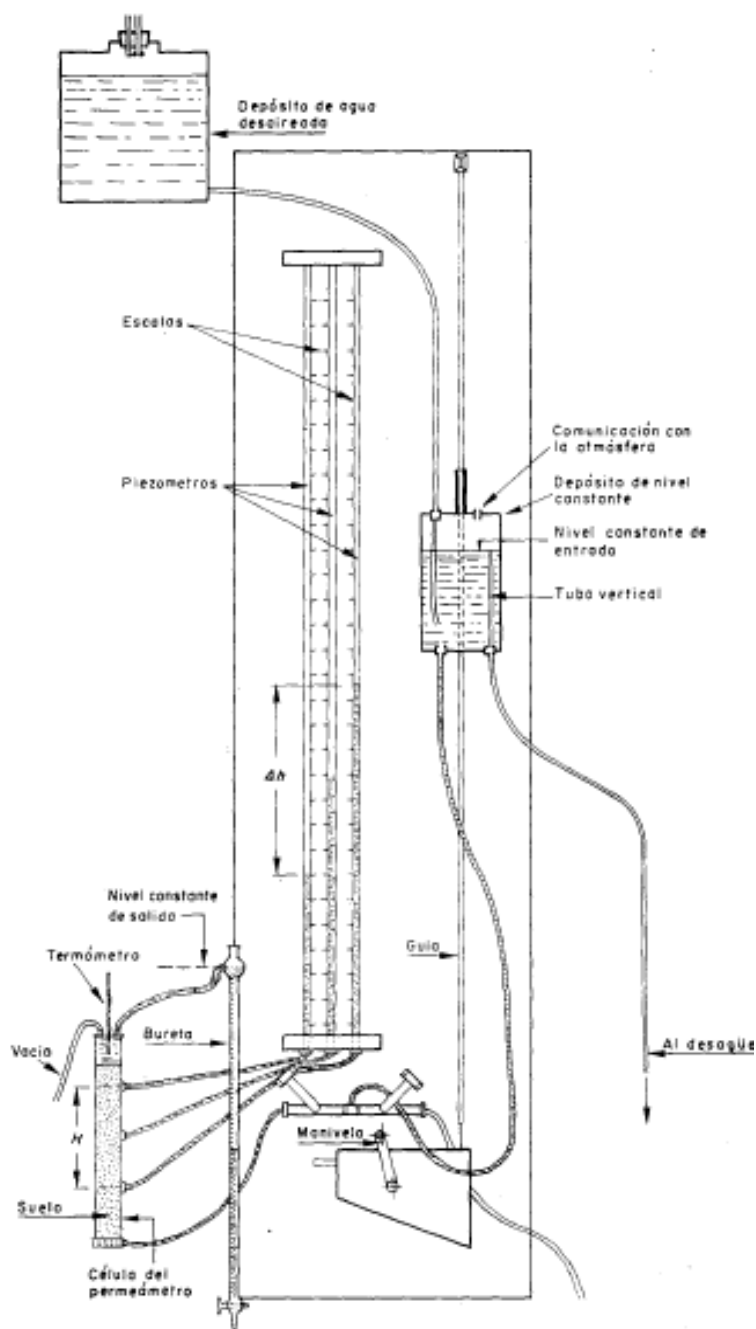


FIGURA Nº 50 : Esquema de un permeámetro de carga constante (Jiménez Salas, J.A.; Justo Alpañes, J.L., 1971).

El funcionamiento es sencillo: el depósito (A) provee agua a la muestra de suelo por la parte inferior de la célula (B). Se genera el flujo a través de la muestra y cuando se alcanza la situación de equilibrio se mide el caudal de salida por la parte superior del permeámetro (C). En la parte superior, existe un émbolo que se fija contra la muestra, mediante 3 tornillos de ajuste. Existen 3 piezómetros (D) a distintas alturas, para medir las alturas piezométricas y poder calcular el gradiente hidráulico que se establece en la muestra de suelo.

Para comprobar el modelo de disolución para flujo intergranular, se debe saturar la muestra con agua con una concentración igual a la de saturación del material soluble, porque el modelo teórico supone que el agua filtrada en el terreno se satura del material soluble y posteriormente, la entrada de agua no saturada (por ejemplo, desde un embalse) produce la disolución. Para conseguirlo, se dispusieron a la entrada del permeámetro dos llaves, para independizar cada entrada de agua, desde el depósito de agua saturada y desde el de agua limpia, como se observa en la FOTO N° 5.



FOTO N° 5 : Llaves de entrada al permeámetro del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX.

En el permeámetro del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX, el diámetro de la célula es 78,9 mm y la altura, 240 mm. La distancia entre piezómetros es 87 mm.

En el permeámetro del Laboratorio de Geotecnia de la ETSICCP de Madrid, el diámetro de la célula es 73 mm y la altura, 415 mm. La distancia entre piezómetros es 100 mm. Los ensayos realizados con este permeámetro han permitido comprender el funcionamiento del proceso, si bien, no se han considerado como ensayos válidos, según los criterios fijados en el apartado 5.2.5.

5.2.3. Materiales de los ensayos

El material utilizado para los ensayos ha sido la arena de Hostun, de tamaño bastante uniforme, cuyas características se muestran en Estaire Gepp, J., 2004. La curva granulométrica teórica de la arena se adjunta en la FIGURA N° 51.

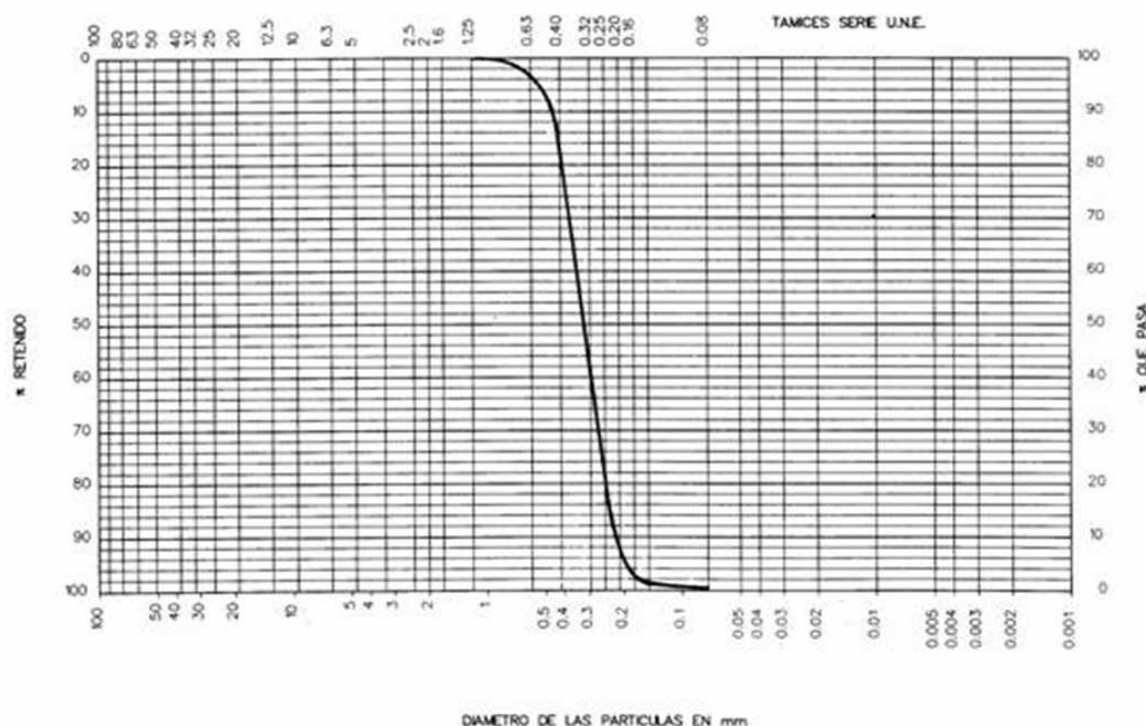


FIGURA N° 51 : Curva granulométrica teórica de la arena de Hostun (Estaire Gepp, J., 2004).

En cuanto a los materiales solubles, se ha utilizado cloruro sódico (sal común), bicarbonato sódico (comercial) y yeso natural (75% de pureza). Se adjunta la FOTO N° 6, con los materiales utilizados. Las curvas granulométricas de todos los materiales se muestran en la FIGURA N° 52.

El porcentaje de yeso se determinó mediante Fluorescencia de Rayos X y mediante Difracción de Rayos X, resultando de 75%. Los resultados de estos ensayos, que se realizaron en el CEDEX, se muestran en Baena, C.M., 2011.

Dado que el avance del frente de disolución depende de la solubilidad en agua del material, en el caso del yeso, de valor 2,4 g/l en agua limpia, el volumen de agua que debe pasar por el permeámetro es muy grande, ya que las velocidades del flujo deben ser limitadas (para dar tiempo a que se produzca la disolución y para que sea régimen laminar). Esto se traduce en tiempos de duración del ensayo muy largos.

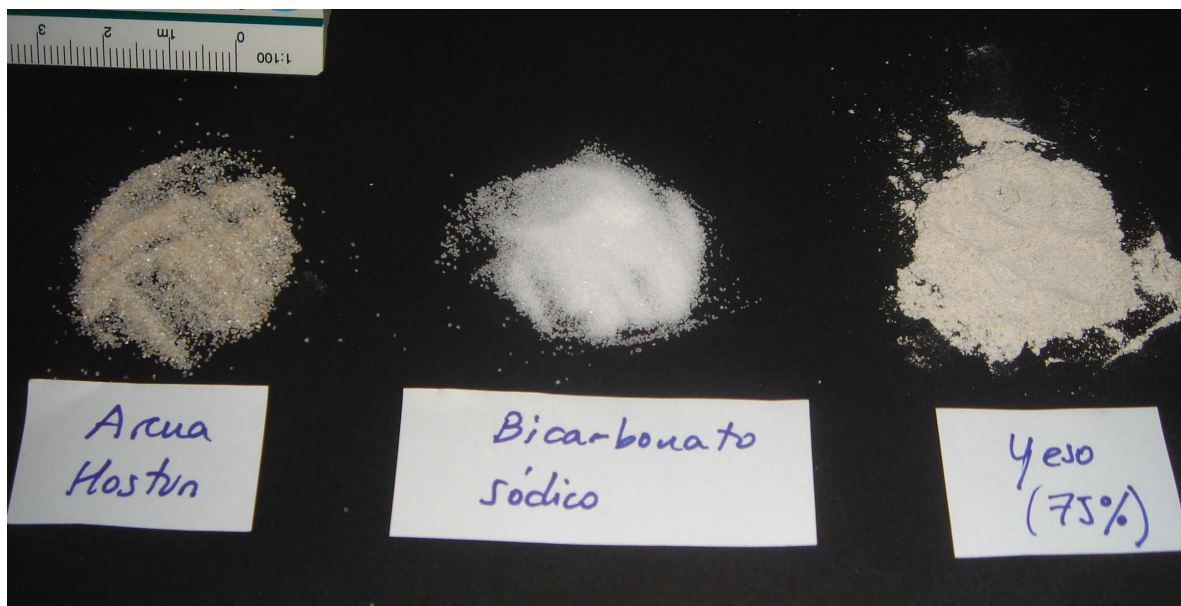


FOTO N° 6 : Materiales utilizados en los ensayos.

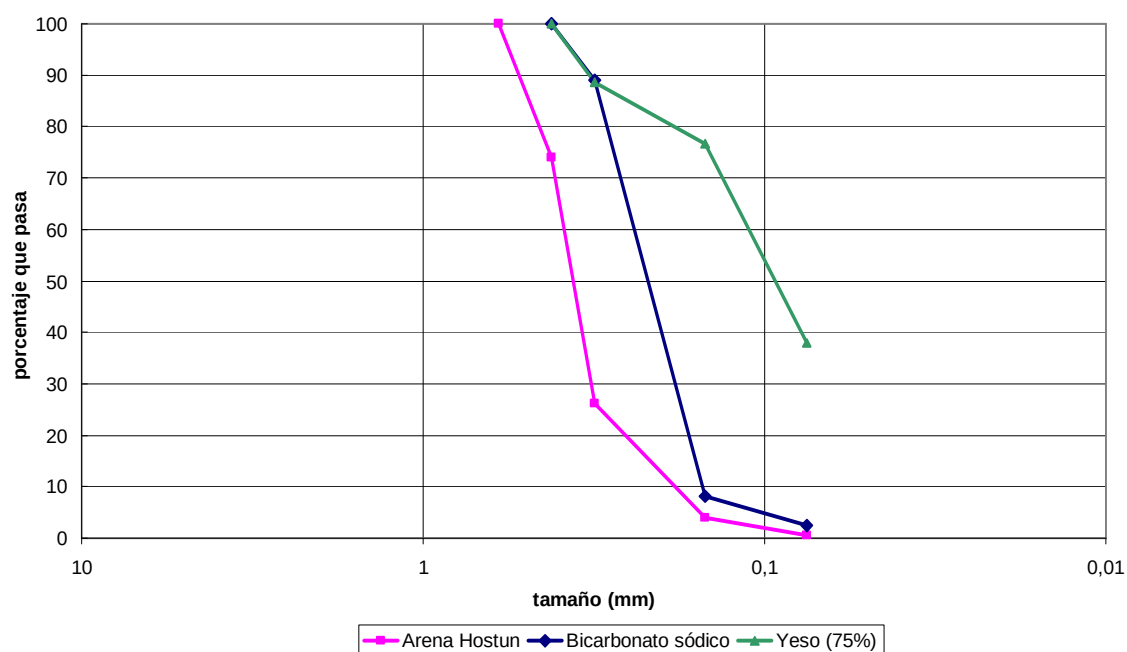


FIGURA N° 52 : Curvas granulométricas de los materiales utilizados en los ensayos.

Por este motivo, al principio, se realizaron los ensayos con sal común, cuya solubilidad es del orden de 100 veces mayor que la del yeso y posteriormente con bicarbonato sódico, del orden de 40 veces mayor que la del yeso. En la FIGURA N° 53, se muestran las curvas de solubilidad de los tres materiales en función de la temperatura, para su comparación.

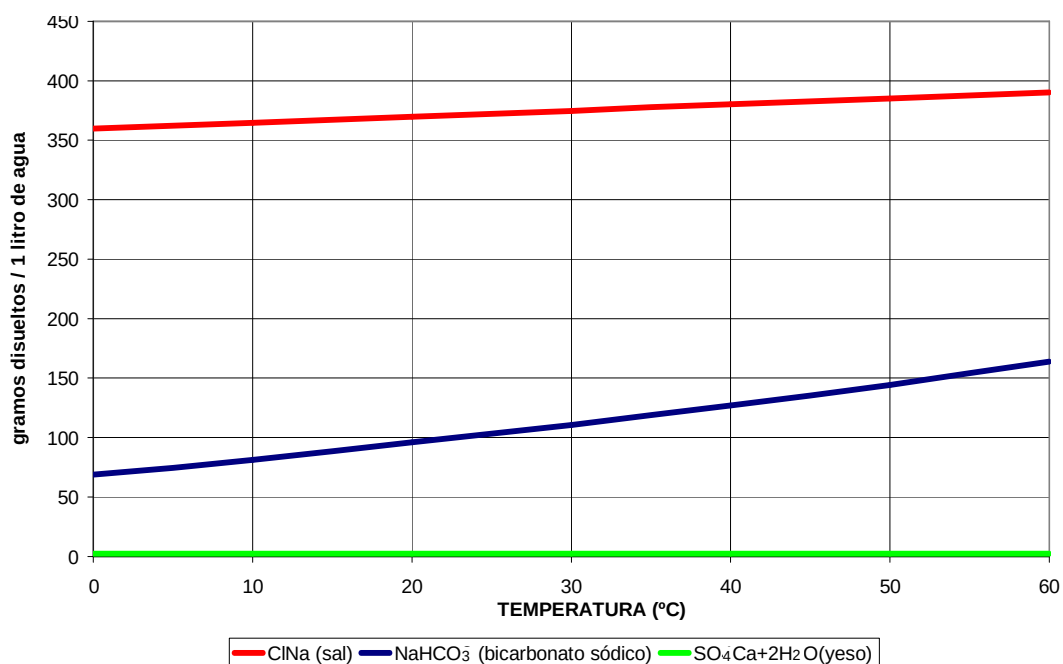


FIGURA N° 53 : Curvas de solubilidad de los materiales utilizados en los ensayos.

En la FIGURA N° 54 puede verse la relación “u/v” en función del porcentaje de material soluble:

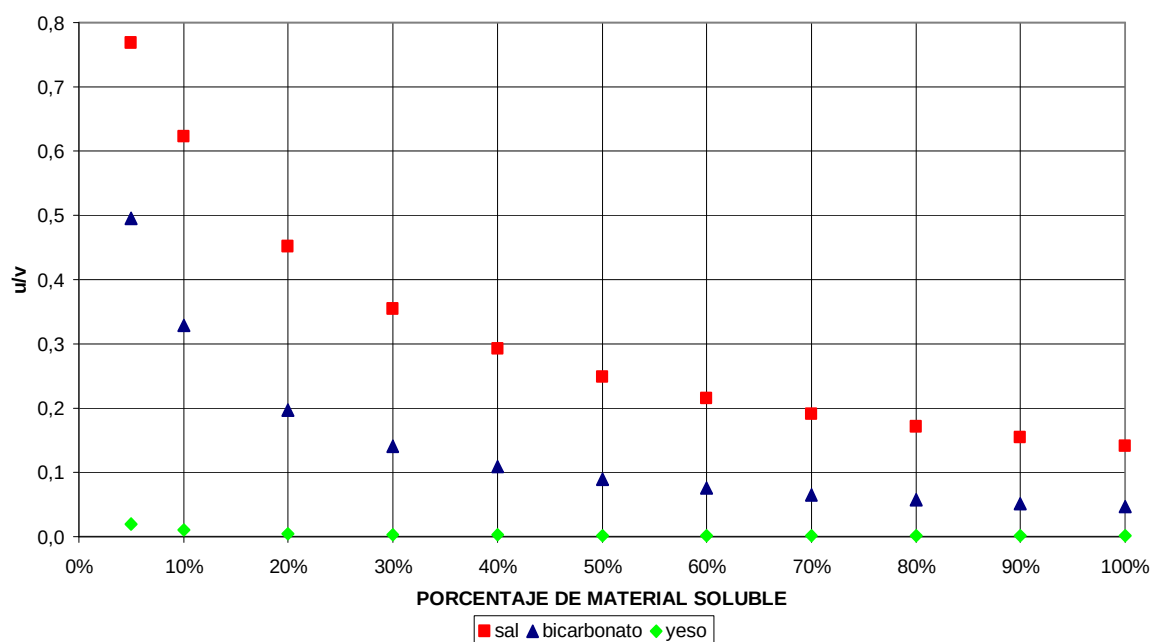


FIGURA N° 54 : Relación de u/v con el porcentaje de material soluble, para los materiales utilizados en los ensayos.

Como se puede observar, para el yeso la relación u/v es mucho menor, por lo que el avance del frente de disolución es mucho más lento y la duración del ensayo, por lo tanto, apreciablemente mayor.

5.2.4. Procedimiento de montaje de la muestra

El procedimiento se describe en la norma española UNE 103403, “Determinación de la permeabilidad de una muestra de suelo. Método de carga constante”.

En primer lugar, se pesa el material soluble y se mezcla con la arena de Hostun, para conseguir un porcentaje prefijado en volumen. En la célula, se coloca una malla de alambre y posteriormente, con un embudo en cuyo extremo se dispone una tubería flexible, se va depositando la mezcla de materiales en el cilindro del permeámetro, con un movimiento de giro en espiral, para evitar la segregación. Se dispone en varias tongadas, que se van compactando por golpeo de la propia muestra sobre una superficie dura. Se nivela, se coloca en la parte superior otra malla de alambre y se bloquea el pistón, una vez presionado sobre la muestra. Es importante dejar sobre el émbolo unos centímetros vacíos de muestra, porque al observar el agua en la zona superior, se puede ver si se está produciendo mezcla de agua saturada con agua limpia (se ven una especie de culebrillas cuando la mezcla tiene lugar), una vez que la disolución se ha producido.

Posteriormente se satura la muestra con agua saturada del material soluble, introduciendo el agua por la parte inferior (para facilitar la salida del aire ocluido entre los granos), de la forma más lenta posible; dejándola reposar un día. Al día siguiente, se deja pasar agua saturada del material soluble, para comprobar que el caudal es constante, y posteriormente se cambia a agua limpia, procedente del depósito A (ver FOTO N° 4), para empezar el proceso de disolución.

En cada ensayo se anota el tiempo y el volumen de agua filtrado. También se pesa el agua filtrada en los ensayos para un volumen constante de 500 ml. Con estos datos se realizan las gráficas t-Q (tiempo-caudal filtrado) y V-M (volumen filtrado-masa disuelta).

Para la correcta interpretación de los resultados, los gradientes hidráulicos utilizados en los ensayos han sido del orden de los que se pueden establecer en el cimiento de una presa de materiales sueltos. En concreto han variado entre 0,26 y 0,53. El exceso de gradiente hidráulico puede producir sifonamiento, e incluso arrastre de las partículas más finas (puede aumentar la permeabilidad de forma irreal por formación de canales preferenciales del flujo o disminuirla por su sedimentación en la zona superior).

Por otra parte, debe cumplirse que la carga de agua no supere el 50% de la longitud de la muestra. Así se garantiza el régimen laminar, que se ha comprobado en los cálculos de cada ensayo.

5.2.5. Criterios de validez de los ensayos

Por todo lo anterior y por el principal problema de estos ensayos, que son las burbujas de aire que pueden llegar a frenar la entrada de agua a la muestra e incluso, a veces, parar la salida del caudal de agua, ha sido necesario discriminar los ensayos fallidos de aquéllos que pueden aceptarse como representativos del fenómeno estudiado.

Para que el ensayo no sea fallido debe cumplirse que:

- Las condiciones de permeabilidad iniciales se corresponden con los valores esperables para la arena de Hostun y para una mezcla de esta arena con determinado porcentaje del material soluble.
- Las alturas piezométricas en los piezómetros han permanecido relativamente constantes a lo largo del proceso. Este hecho es fundamental, porque refleja con claridad la entrada de aire en la tubería de entrada a la muestra (nótese que la disposición de los tubos de salida de los piezómetros de la FOTO N° 4 no permiten la salida de aire ocluido: es preciso que la salida de los tubos flexibles sea siempre ascendente).
- La medición de caudal al día o los días siguientes, una vez finalizado el proceso de disolución es similar al caudal final del día del ensayo; salvo lo que puede suponer la compactación que se haya producido en la muestra en ese intervalo de tiempo.
- Las velocidades son de régimen laminar, la longitud del frente de disolución es pequeña comparada con la longitud de la muestra, ha pasado el volumen de agua suficiente y el tiempo que dura el ensayo permite que se disuelvan las partículas.

A pesar de todo ello, los ensayos fallidos realizados con bicarbonato sódico (del orden de 15), e incluso los de sal (del orden de 10) han servido para la comprensión del complicado proceso que supone la disolución de un cemento yesífero y del ensayo mediante el permeámetro.

Se adjunta la TABLA N° 17 de los ensayos de validación, con los parámetros más importantes:

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
1	27-oct	BICARBONATO	12	22,5	220	0,53	0,42	0,009	0,00295	9,3%
3	03-nov	BICARBONATO	8	22,5	220	0,36	0,38	0,008	0,00266	9,3%
6	18-nov	BICARBONATO	10	22	220	0,45	0,43	0,009	0,00303	9,5%
9	01-dic	BICARBONATO	8	21,5	220	0,37	0,23	0,005	0,00160	9,7%
4	11-nov	BICARBONATO	10	21,5	145	0,47	0,50	0,010	0,00279	13,1%
8	25-nov	BICARBONATO	6	23,5	145	0,26	0,18	0,004	0,00106	12,5%
10	10-dic	BICARBONATO	8	23,5	145	0,34	0,23	0,005	0,00135	12,5%
12	15-ene	BICARBONATO	10	22,5	150	0,44	0,23	0,005	0,00125	13,5%
2	28-oct	BICARBONATO	8	23,5	200	0,34	0,43	0,009	0,00193	17,2%
5	12-nov	BICARBONATO	9	22	200	0,41	0,33	0,007	0,00146	18,0%
7	24-nov	BICARBONATO	6	22	200	0,27	0,24	0,005	0,00105	18,0%
13	18-ene	BICARBONATO	10	23	250	0,43	0,17	0,003	0,00063	21,5%
14	01-feb	BICARBONATO	10	22,5	250	0,44	0,12	0,002	0,00043	22,5%
11	14-dic	BICARBONATO	8	23,5	400	0,34	0,18	0,004	0,00052	29,1%
1Y	28-dic	YESO	82	23	88	3,57	0,40	0,008	0,00012	6,8%

TABLA N° 17 : Tabla resumen de los parámetros más importantes de los ensayos de validación.

5.2.6. Cálculo mediante DISOLUCIÓN2D de los modelos correspondientes a los ensayos

Se ha realizado una modelación numérica de cada ensayo, según el apartado 5.1.2.2. “Proceso de cálculo”, para comparar los datos medidos en los ensayos con los resultados obtenidos mediante el cálculo con DISOLUCIÓN2D y así verificar la validez del programa.

Se ha definido **FA** (factor de aceleración) como la relación entre el tiempo que tardaría el frente en recorrer todo el cilindro del permémetro con velocidad constante (t_{ucte}) y el tiempo que tarda en recorrerlo aplicando el modelo numérico DISOLUCIÓN2D (se denomina t_{ab}).

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

Este factor cuantifica la aceleración del proceso que se produce como consecuencia del aumento de la permeabilidad a medida que avanza el frente de disolución.

En el caso de los ensayos, t_{ucte} se puede calcular de forma inmediata, dado que el caudal inicial se obtiene del cálculo mediante FastSEEP (primera iteración del cálculo de DISOLUCIÓN2D) y la longitud de recorrido de la filtración es la longitud de la muestra:

$$t_{ucte} = \frac{L_T}{u_{media}} = \frac{L_T}{\frac{u}{v} \frac{Q_0}{A_m}} = \frac{L_T^2}{\frac{u}{v} K_0 \cdot h_0}$$

5.2.6.1. Ensayos con bicarbonato sódico

En Baena, C.M., 2011 se adjuntan los resultados de todos los ensayos realizados que cumplen el criterio de validez de los ensayos, fijado en el apartado 5.2.5.

5.2.6.1.1. Resultados de caudales filtrados a lo largo del tiempo en los ensayos con bicarbonato sódico

Se muestra un ejemplo de los gráficos “tiempo t - Caudal filtrado Q” (FIGURA N° 55) obtenido a partir de la medición de estos parámetros en los ensayos realizados. Corresponde a un porcentaje de material soluble del 22,5%:

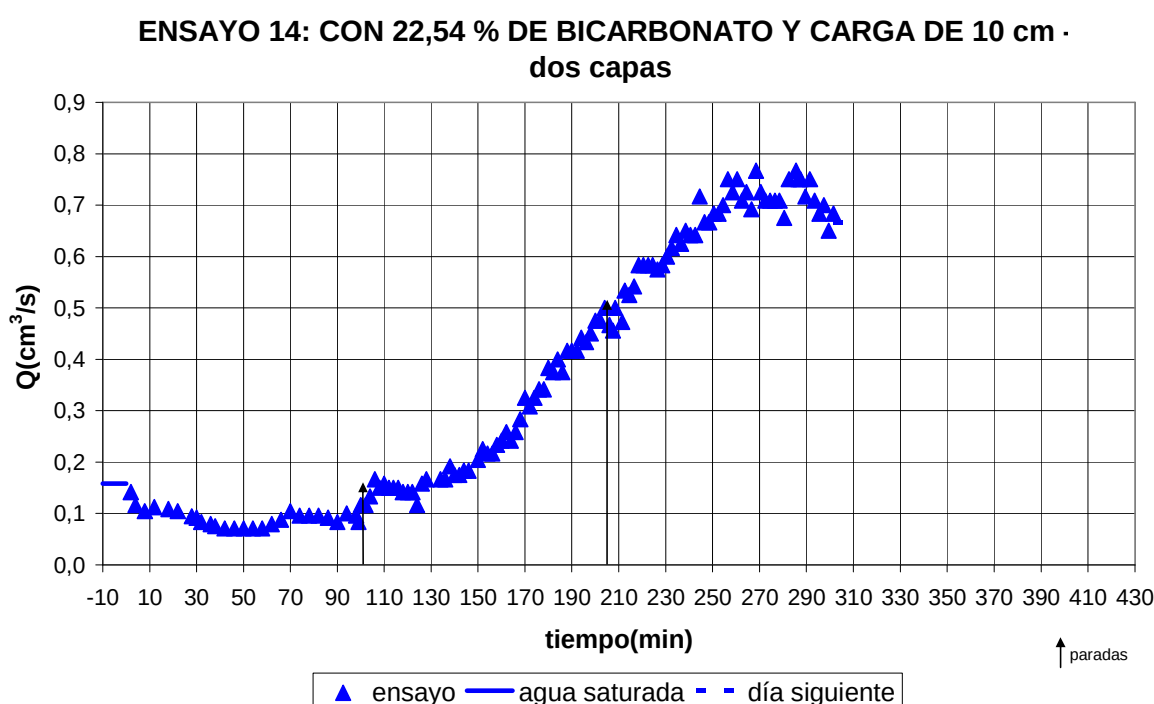


FIGURA N° 55 : Relación t-Q en ensayo con porcentaje de bicarbonato de 22,5%.

5.2.6.1.2. Resultados del cálculo de los modelos correspondientes a los ensayos mediante el modelo numérico DISOLUCIÓN2D

Todos los ensayos de validación se modelizaron mediante el programa DISOLUCIÓN2D. En este caso, la disolución de la muestra de suelo contenida en el permeámetro se corresponde directamente con el cilindro de suelo del esquema de James, A.N., 1992 (ver FIGURA N° 27). En el cilindro de suelo, la velocidad de filtración del agua “v” es constante en todos los puntos y, por lo tanto, la velocidad de avance del frente “u” también.

En los gráficos de la FIGURA N° 56 se puede observar el avance del frente de disolución calculado mediante el programa DISOLUCIÓN2D, para diversas iteraciones (11-21-31-41-51-61-71-91), para el modelo correspondiente al ensayo N° 11. El bicarbonato se encuentra en un porcentaje del 29,13% en la capa amarilla, y se va disolviendo una vez que avanza el frente de disolución, pasando a color verde.

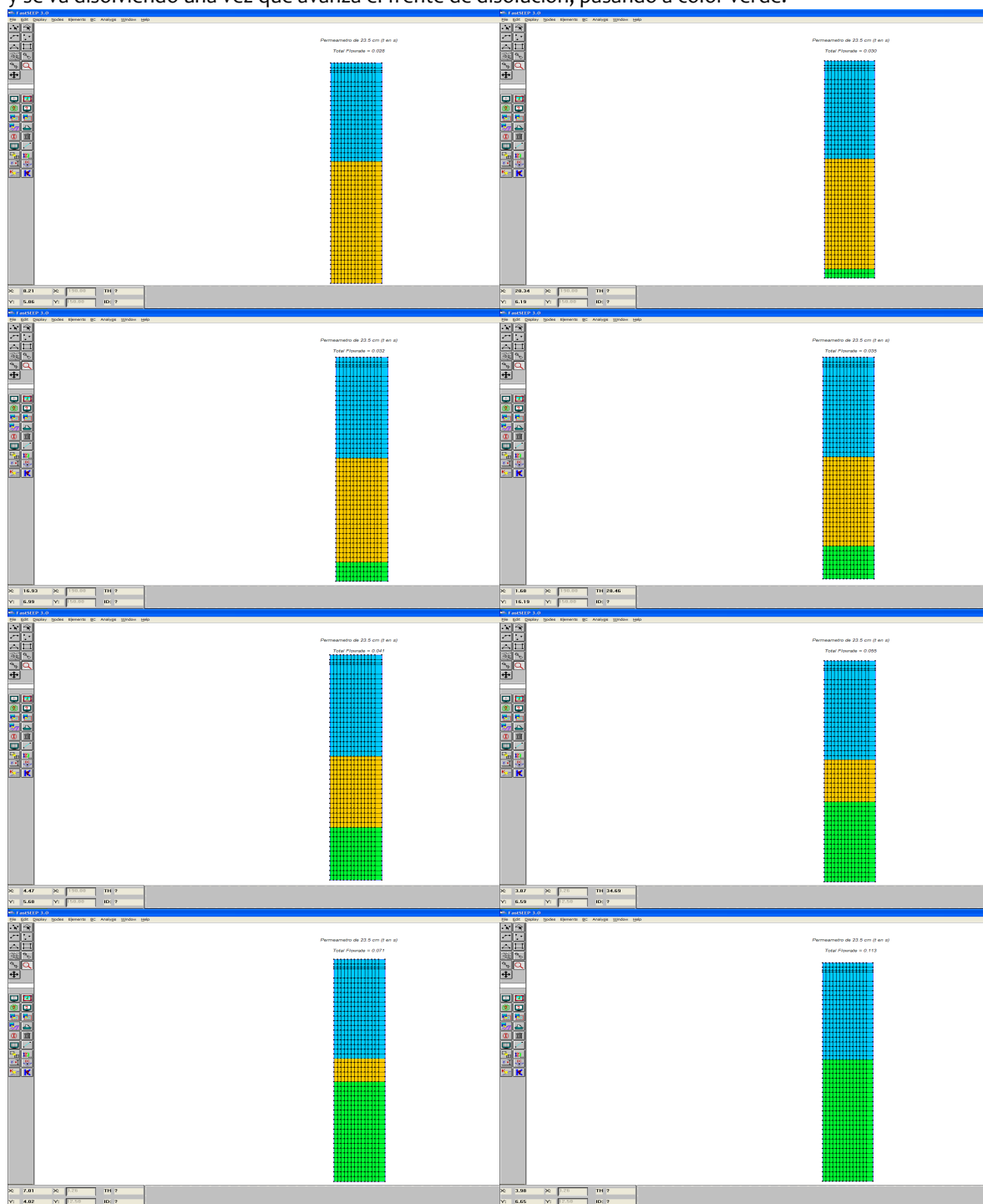


FIGURA N° 56 : Gráficos del avance del frente de disolución en el ensayo 11 (cálculo mediante DISOLUCIÓN2D).

El caudal filtrado inicialmente es $0,028 \text{ cm}^3/\text{s}$ y al final del proceso de disolución aumenta hasta $0,113 \text{ cm}^3/\text{s}$. Dado que el modelo calculado es un cilindro con simetría axial, el caudal filtrado hay que multiplicarlo por 2π , resultando $0,175$ y $0,708 \text{ cm}^3/\text{s}$, respectivamente.

En cuanto a las velocidades de filtración, antes y después de la disolución (visualizados mediante FastSEEP), se han obtenido los siguientes gráficos:

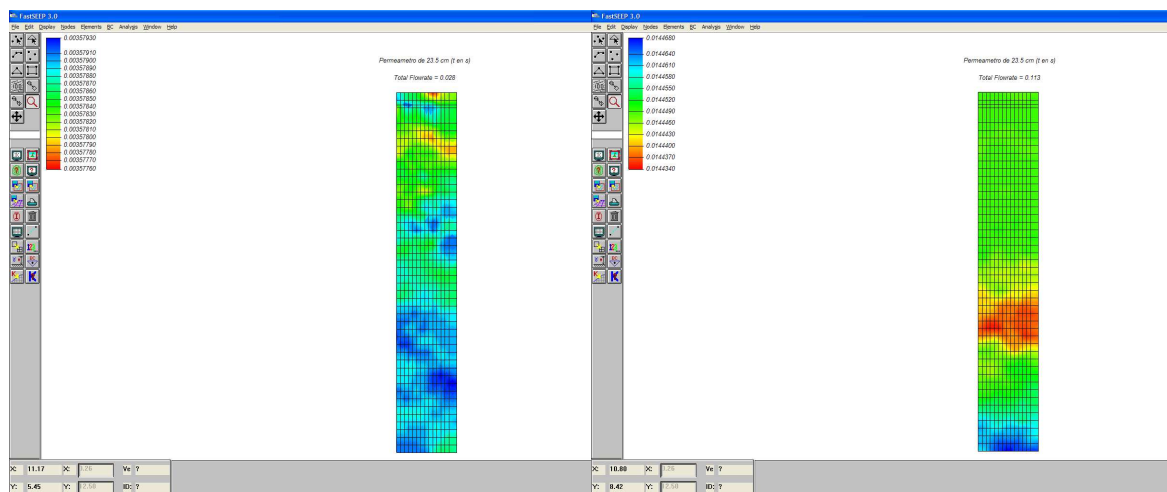


FIGURA N° 57 : Gráficos de las velocidades de filtración antes y después de la disolución, en el ensayo 11.

Las velocidades aumentan de $3,6 \cdot 10^{-3}$ a $14,5 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$, como consecuencia del proceso de disolución.

Se calculó, a partir del tiempo que tardaría en progresar el frente con velocidad constante ($t_{ucte}=419,9 \text{ min}$) y del tiempo t_{ab} ($267,8 \text{ min}$), el factor de aceleración, resultando $1,57$.

5.2.6.1.3. Resultados de masa disuelta en los ensayos con bicarbonato

Los ensayos con bicarbonato tienen el inconveniente de la mayor densidad del agua saturada respecto del agua limpia (cuyo efecto se analiza con detalle en el apartado 5.2.8.1.), pero dos ventajas importantes:

- La duración del ensayo es mucho menor.
- Se puede analizar el proceso de disolución a partir del peso de los volúmenes de agua filtrada.

Para este análisis se ha obtenido una gráfica que relaciona el peso de 500 ml de disolución (en abscisas) con la masa disuelta de bicarbonato sódico y con la concentración (FIGURA N° 58):

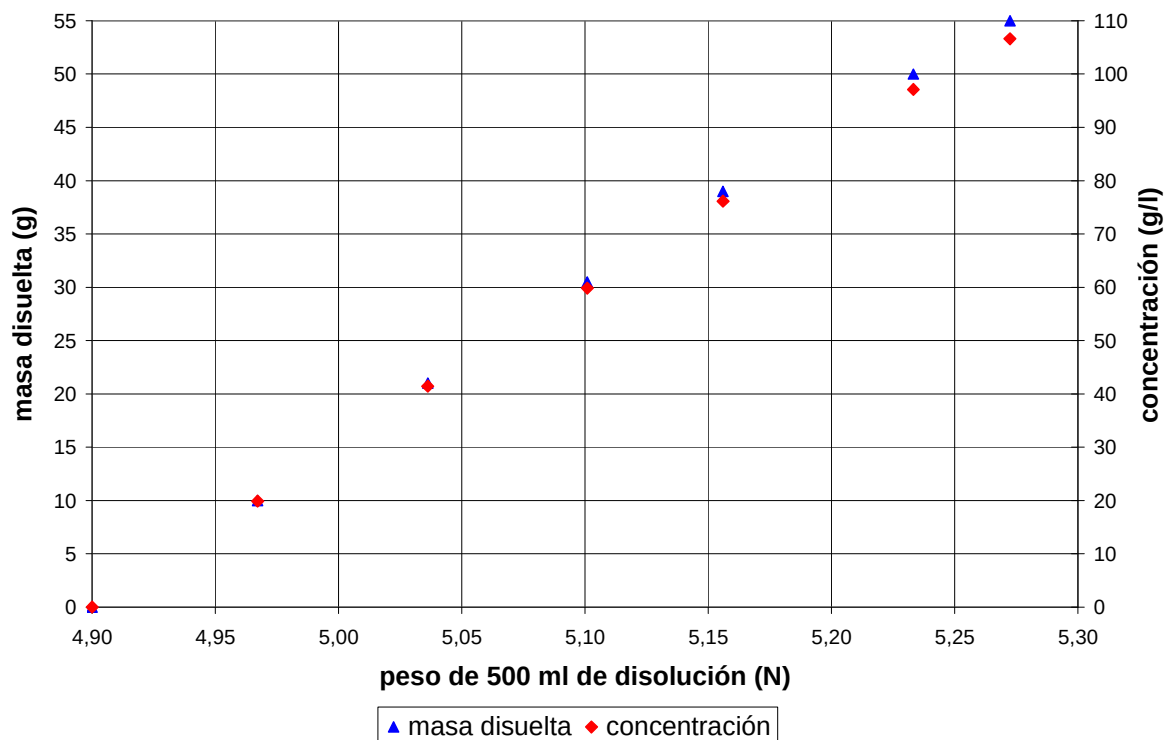


FIGURA N° 58 : Relación entre el peso de la disolución y la masa disuelta o la concentración (para el bicarbonato sódico).

Se observa que la masa máxima disuelta, en las condiciones de temperatura de agua de los ensayos y con las características del agua utilizada, es de 55 g. Es decir, la concentración de saturación es 106 g/l de disolución y el peso máximo de 500 ml de disolución es 5,27 N.

En los ensayos realizados, se ha pesado el agua filtrada y se ha elaborado una gráfica para comparar la evolución de la masa disuelta M en función del volumen filtrado V con la curva teórica (realizada a partir de la concentración de saturación obtenida y suponiendo que el avance del frente de disolución es uniforme y que la longitud del frente es pequeña en comparación con el tamaño de la muestra).

Se muestran estas gráficas desde la FIGURA N° 59 hasta la FIGURA N° 63, correspondientes a cada uno de los ensayos del apartado 5.2.6.1.1.

Finalmente, en la mayoría de los ensayos se ha pesado la muestra antes y después del ensayo (secada previamente), comprobando que todo el material soluble se ha disuelto.

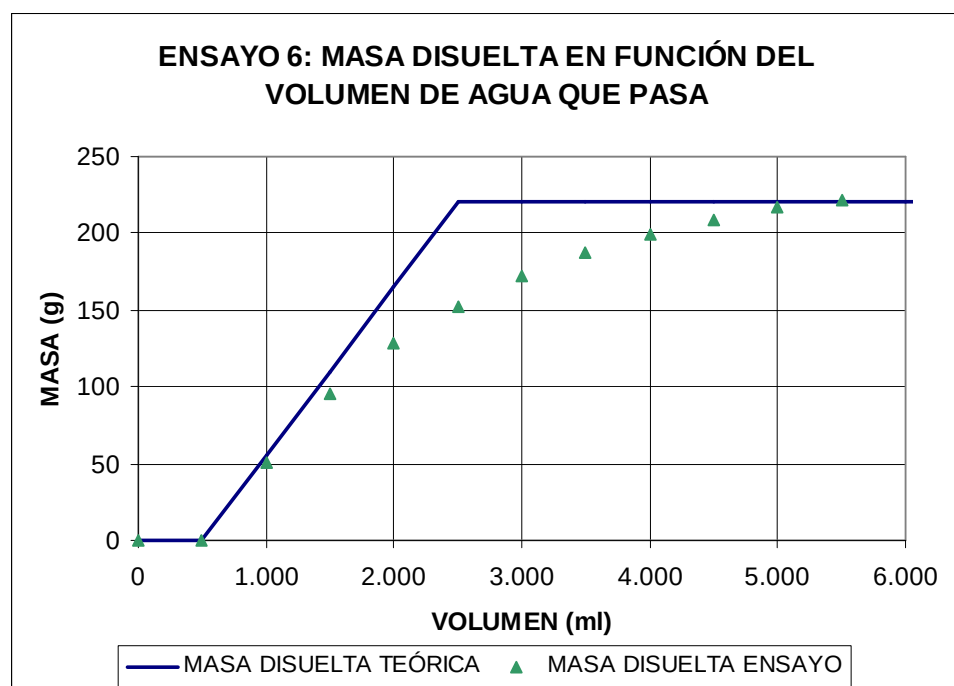


FIGURA N° 59 : Relación V-M en ensayo con porcentaje de bicarbonato de 9%.

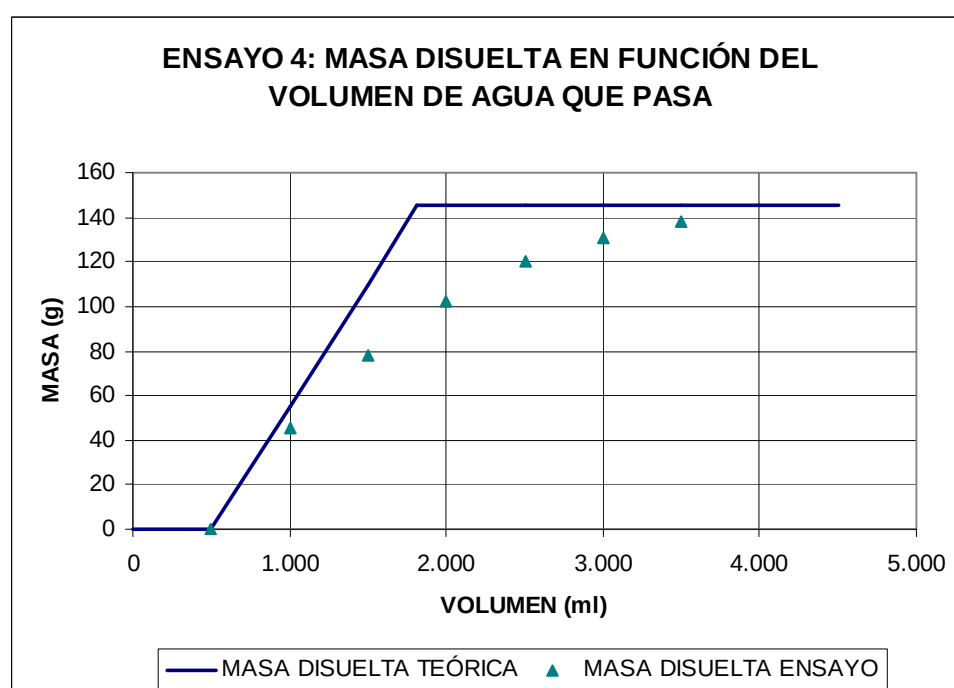


FIGURA N° 60 : Relación V-M en ensayo con porcentaje de bicarbonato de 13%.

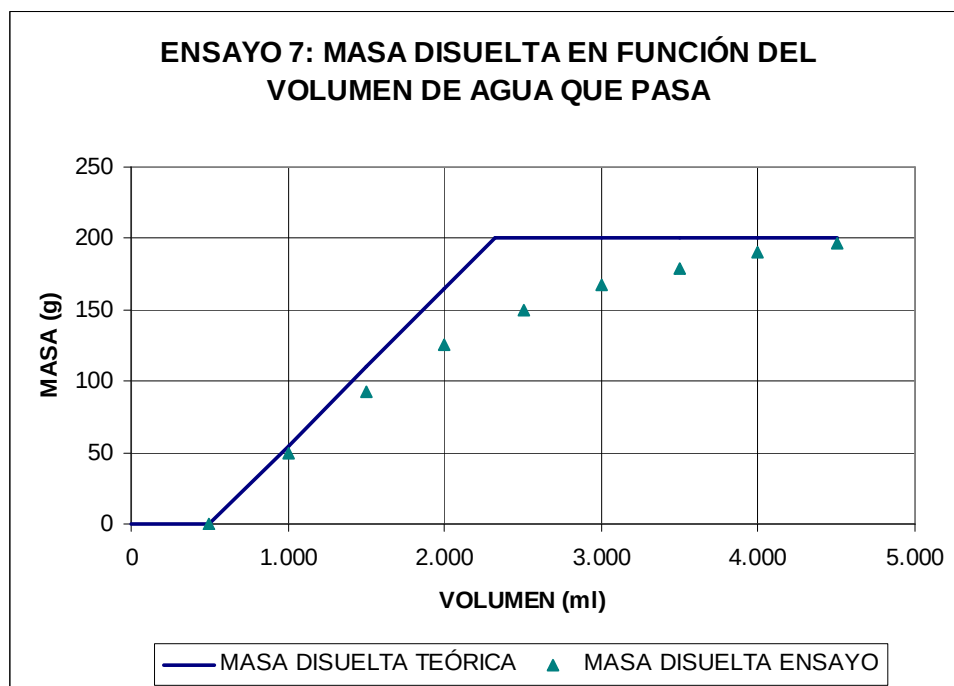


FIGURA Nº 61 : Relación V-M en ensayo con porcentaje de bicarbonato de 18%.

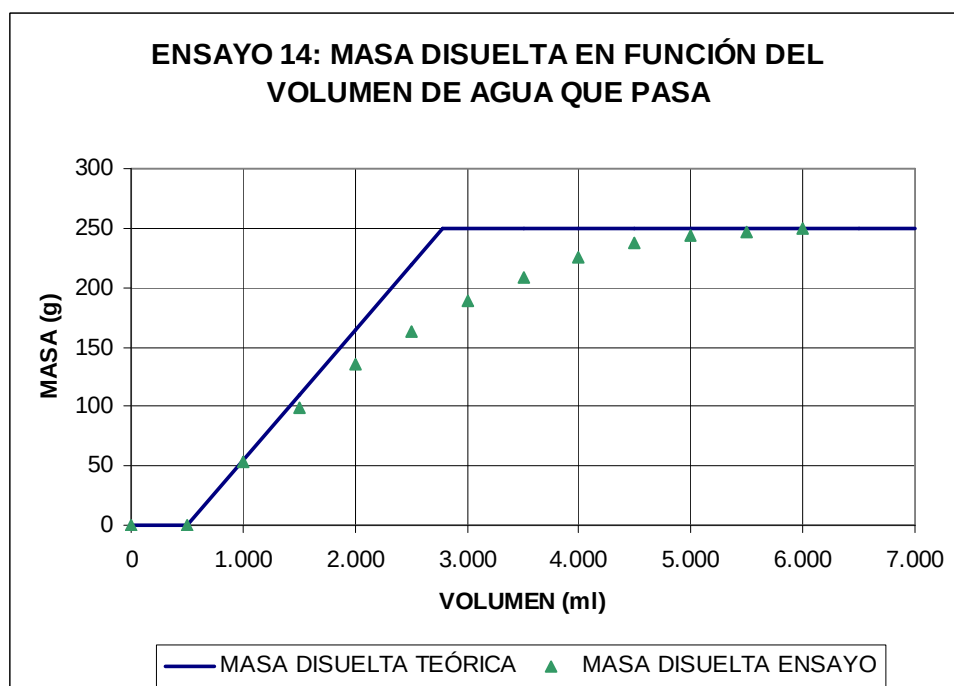


FIGURA Nº 62 : Relación V-M en ensayo con porcentaje de bicarbonato de 22%.

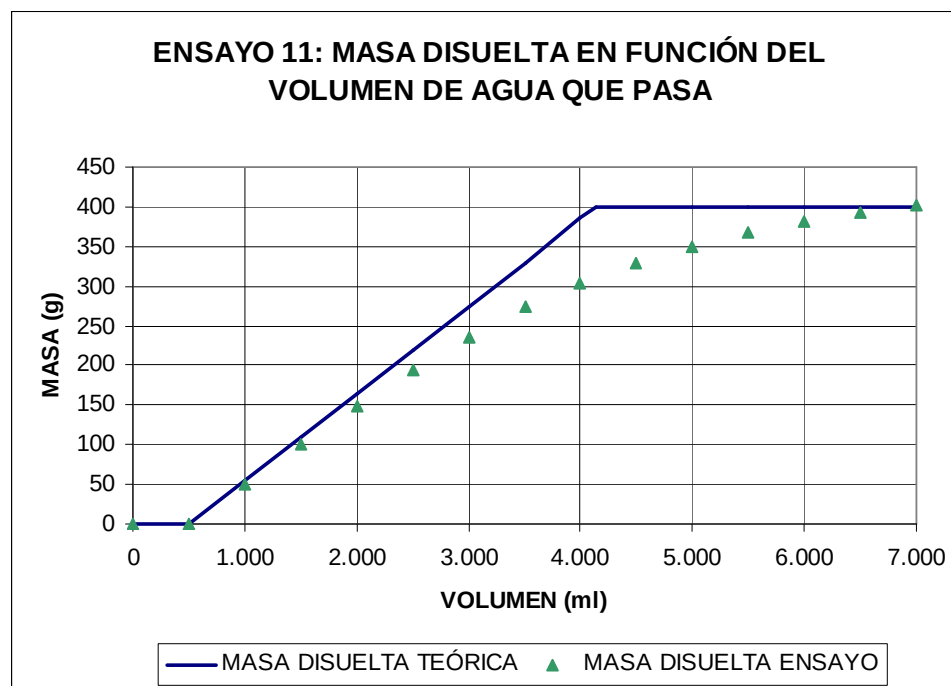


FIGURA N° 63 : Relación V-M en ensayo con porcentaje de bicarbonato de 29%.

5.2.6.2. Ensayo con yeso

Como ya se ha citado anteriormente, el ensayo en el permeámetro de carga constante de una muestra con un porcentaje de partículas yesíferas tiene el inconveniente de que la disolución tarda muchas horas en producirse, para un gradiente inicial similar al de los ensayos con bicarbonato sódico.

El ensayo se realizó en varios días (3 días incluidas las 2 noches, parada de 4 días, continuó 1 día, parada de 7 días, continuó una mañana, parada de 1 día, continuó una mañana, parada de 1 día y finalmente se tomó el valor marcado como “día siguiente” en todos los gráficos).

En la FIGURA N° 64 se muestra el gráfico tiempo-caudal filtrado obtenido con los datos del ensayo.

En la primera parte del ensayo (1.050 minutos = 17 horas) la velocidad inicial era muy pequeña, por lo que los primeros cálculos mostraron que el tiempo necesario sería demasiado grande.

Dado que las partículas del yeso utilizado para el ensayo eran más pequeñas que las de la arena y las del bicarbonato sódico, la permeabilidad de partida es mucho menor que en los ensayos con bicarbonato. Por lo tanto se decidió aumentar la carga a 82 cm, resultando un gradiente hidráulico de 3,57, que se mantuvo ya constante durante el resto del proceso. Lo transcurrido hasta ese momento, con menor carga, equivale a

empezar en 1.220 minutos con la carga considerada de 82 cm. En este ensayo, el cambio de densidad entre el agua saturada y el agua sin saturar es mínimo (del orden del 0,2%).

ENSAYO CON 6,4 % DE YESO Y CARGA DE 82 cm - dos capas

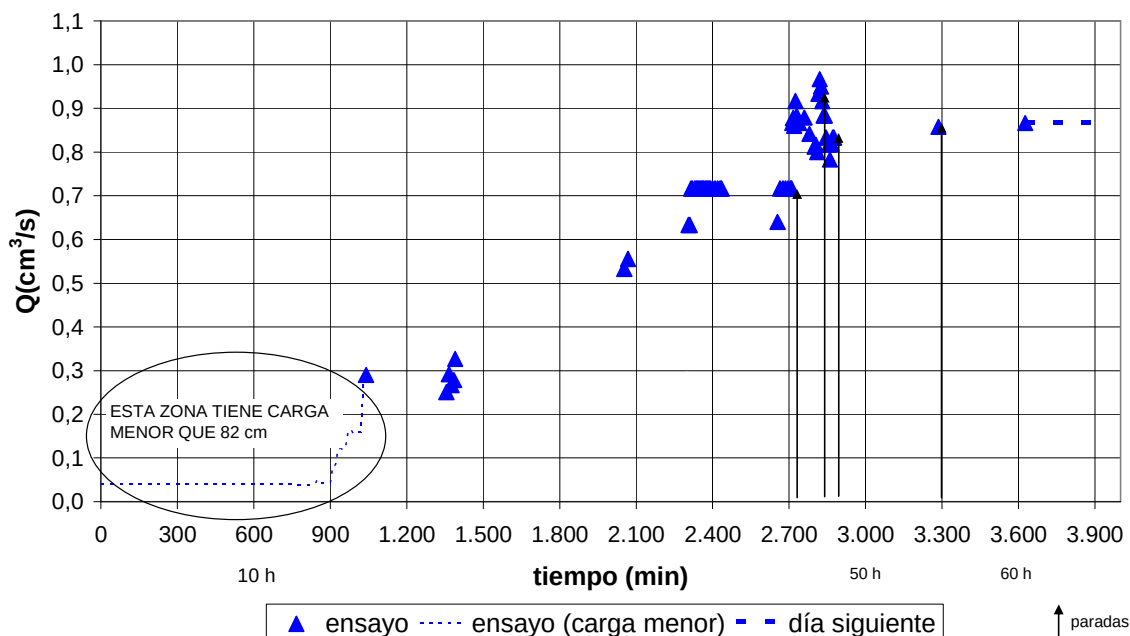


FIGURA N° 64 : Relación t-Q en ensayo con porcentaje de yeso de 6,4%.

5.2.6.3. Hojas de cálculo y gráficos de los ensayos de validación

En Baena, C.M., 2011 se adjuntan las hojas de cálculo realizadas para los ensayos de validación, mostrándose en la FIGURA N° 65 un ejemplo, correspondiente al ensayo N° 6.

En la referencia citada también se muestran los gráficos de evolución del caudal Q filtrado en el tiempo y de la masa disuelta M en función del volumen de agua filtrado.

tiempo (min)	tiempo (s)	INCR t (s)	VOLUMEN (ml)	INCR V (ml)	CAUDAL (cm ³ /s)	Q _{td} /Q ₀	DATOS	
0	0		0				MATERIAL	BICARBONATO
2	120	120	52	52	0.43	1.00	A _m	48,9 (cm ²)
4	240	120	103	51	0.43	0.98	h (ensayo)	10 (cm)
6	360	120	154	51	0.43	0.98	h (en seep)	10 (cm)
8	480	120	205	51	0.43	0.98	Q ₀	0,433 (cm ³ /s)
10	600	120	253	48	0.40	0.92	V	500 (ml)
12	720	120	300	47	0.39	0.90	v ₀	0,0089 (cm/s)
14	840	120	347	47	0.39	0.90	i ₀	0,455
16	960	120	392	45	0.38	0.87	u ₀ /v ₀	0,341
18	1080	120	435	43	0.36	0.83	u ₀	0,003 (cm/s)
20	1200	120	477	42	0.35	0.81	M _{ms}	220 (g)
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	M _T	1660 (g)
28	1680	120	657	47	0.39	0.90	σ	2,16 (kg/dm ³)
30	1800	120	705	48	0.40	0.92	C _s	106 (g/l)
32	1920	120	755	50	0.42	0.96	L ₁	22 (cm)
34	2040	120	810	55	0.46	1.06	L ₂	0 (cm)
36	2160	120	867	57	0.48	1.10	L _T	22 (cm)
38	2280	120	927	60	0.50	1.15	ρ ₁	1,543 (g/cm ³)
40	2400	120	990	63	0.53	1.21	ρ _{p1}	2,532 (g/cm ³)
42	2520	120	1060	70	0.58	1.35	ε ₁	0,641
44	2640	120	1135	75	0.63	1.44		
46	2760	120	1215	80	0.67	1.54	ρ _{pa}	2,6 (g/cm ³)
48	2880	120	1295	80	0.67	1.54		
50	3000	120	1382	87	0.73	1.67		
52	3120	120	1472	90	0.75	1.73	n ₀₁	0,391
54	3240	120	1570	98	0.82	1.88	n _{td1}	0,485
56	3360	120	1670	100	0.83	1.92	σ ₀	0,204 (g/cm ³)
58	3480	120	1780	110	0.92	2.12	Φ	9,468%
60	3600	120	1890	110	0.92	2.12	K _{td1} /K ₀₁	2,688
62	3720	120	2000	110	0.92	2.12	K ₁	0,019 (cm/s)
64	3840	120	2125	125	1.04	2.40		
66	3960	120	2255	130	1.08	2.50		
68	4080	120	2385	130	1.08	2.50		
70	4200	120	2525	140	1.17	2.69		
72	4320	120	2670	145	1.21	2.79	K _{td1}	0,052 (cm/s)
74	4440	120	2815	145	1.21	2.79	Q _{td} /Q ₀ (modelo)	4,2985
76	4560	120	2965	150	1.25	2.88	1,6*K _{td equiv} /K _{0equiv}	4,301
78	4680	120	3140	175	1.46	3.37	Q _{td} /Q ₀ (ensayo)	4,519
80	4800	120	3305	165	1.38	3.17	Q _{td} /Q ₀ (modelo)/Q _{td} /Q ₀ (ensayo)	0,952
82	4920	120	3485	180	1.50	3.46	V _{agua nec}	2,575 (l)
84	5040	120	3670	185	1.54	3.56	V _{agua nec}	2575 (cm ³)
86	5160	120	3865	195	1.63	3.75	t correspondiente a V _{agua nec}	99,057 (min)
88	5280	120	4065	200	1.67	3.85	V _{media}	0,0121 (cm/s)
90	5400	120	4280	215	1.79	4.13	V _{td}	0,038 (cm/s)
92	5520	120	4485	205	1.71	3.94	t correspondiente a V _{media}	88,602 (min)
94	5640	120	4710	225	1.88	4.33	t _{uote}	7272 (s)
96	5760	120	4930	220	1.83	4.23	t _{uote}	121,203 (min)
98	5880	120	5155	225	1.88	4.33	t _{ab} (ensayo)	95 (min)
100	6000	120	5380	225	1.88	4.33	t _{ab} (modelo)	88,60 (min)
102	6120	120	5610	230	1.92	4.42		
104	6240	120	5845	235	1.96	4.52	efecto inicial densidad	0,72
106	6360	120	6075	230	1.92	4.42	efecto compactación	
108	6480	120	6300	225	1.88	4.33	factor aceleración (ensayo)	1,276
110	6600	120	6535	235	1.96	4.52	factor aceleración (modelo)	1,368
							desviación en tiempos	6,7%
							desviación en caudales	4,9%
							ESTIMACIÓN t _{ss} y u _{tss}	
							Re	2,22 <10
							l ₀	0,018 (cm)
							K _d	0,0000010 (m/s)
							u _{tss}	10,21 (cm)
							t _{ss}	56,24 (min)
							t _{ss}	0,94 (hora)
FECHA	18/11/2009							
COMENTARIOS:	Pasaron 200 ml de agua saturada. Lo dejé reposar un día con las llaves abiertas. Pasaron 250 ml más de agua saturada. Entre los 12 y los 35 minutos salieron las burbujas. Se quedó bastante uniforme la muestra. Los piezómetros mantuvieron el incremento. Confirmé el peso de la arena tras la disolución.							
NOTA:	Ver significado de los parámetros en Simbología (en el índice)							

FIGURA N° 65 : Ejemplo de hoja de cálculo para los ensayos (ENSAYO 6).

En la TABLA N° 18, se resumen los datos y resultados de todos los ensayos de validación:

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)	$K_{0\text{equiv}}$ (cm/s)	K_{0d1} (cm/s)	Q_{0d}/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

TABLA N° 18 : Resumen de los datos y resultados de los ensayos de validación.

5.2.7. Factor de aceleración en un cilindro de suelo

Una vez obtenidos los factores de aceleración en cada ensayo, se ha calculado este factor para un ensayo teórico en el que únicamente se ha variado el porcentaje de material soluble, mediante DISOLUCIÓN_{2D} (con una porosidad inicial de 0,2) obteniéndose el gráfico de la FIGURA N° 66.

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

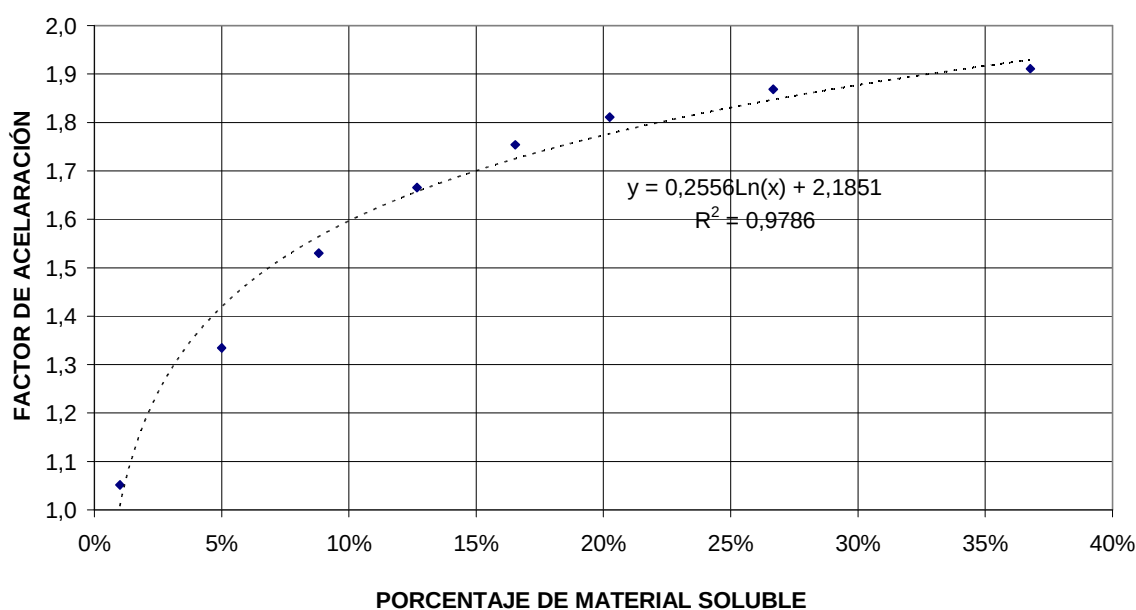


FIGURA Nº 66 : Gráfico porcentaje de yeso - FA para un cilindro de suelo de porosidad inicial 0,2.

Por otro lado, el proceso de aumento de filtración que ocurre en un cilindro de suelo con arena mezclada con un porcentaje de material soluble, debido a la disolución, responde al siguiente esquema, si se divide en n pasos:

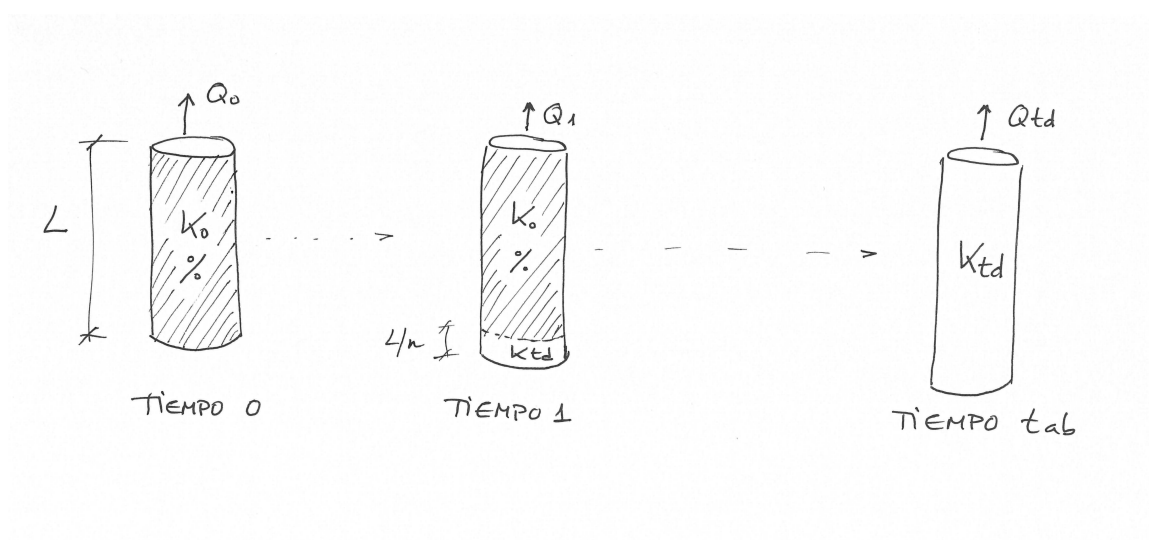


FIGURA Nº 67 : Esquema de cambio de permeabilidad debido a la disolución en un cilindro de suelo.

Del esquema anterior, se tiene que $t_{ab} = \frac{L}{K_0 \cdot i_0} + \frac{L}{K_1 \cdot i_0} + \dots + \frac{L}{K_{td} \cdot i_0}$; siendo $K_1 = \frac{L}{\frac{L/n}{K_{td}} + \frac{(n-1)L/n}{K_0}}$

FA se definió como la relación entre el tiempo que tardaría el frente en recorrer todo el cilindro del perméametro con velocidad constante (t_{ucte}) y el tiempo que tarda en recorrerlo aplicando el modelo numérico DISOLUCIÓN2D (se denomina t_{ab}).

$$FA = \frac{t_{ucte}}{t_{ab}} = \frac{\frac{L}{K_0 \cdot i_0}}{\frac{L}{K_0 \cdot i_0} + \frac{L}{K_1 \cdot i_0} + \dots + \frac{L}{K_{td} \cdot i_0}} = \frac{1}{1 + \frac{K_0}{K_1} + \dots + \frac{K_0}{K_{td}}} = \frac{1}{1 + \frac{K_0}{\frac{1/n}{\frac{1/n}{K_{td}} + \frac{(n-1)/n}{K_0}}} + \dots + \frac{K_0}{K_{td}}}$$

Expresado como sumatorio: $FA = \frac{n^2}{\sum_{j=1}^n \frac{j}{K_{td} / K_0} + j}$

El factor de aceleración, por lo tanto, es sólo función de K_{td}/K_0 , resultando: $FA = \frac{K_{td} / K_0}{0,5 \cdot (1 + K_{td} / K_0)}$.

Se demuestra que no depende del material, sólo del aumento de permeabilidad debido a la disolución (aumento de la porosidad) como se comprobó, en los cálculos de los modelos realizados.

5.2.8. Conclusión de los ensayos de validación

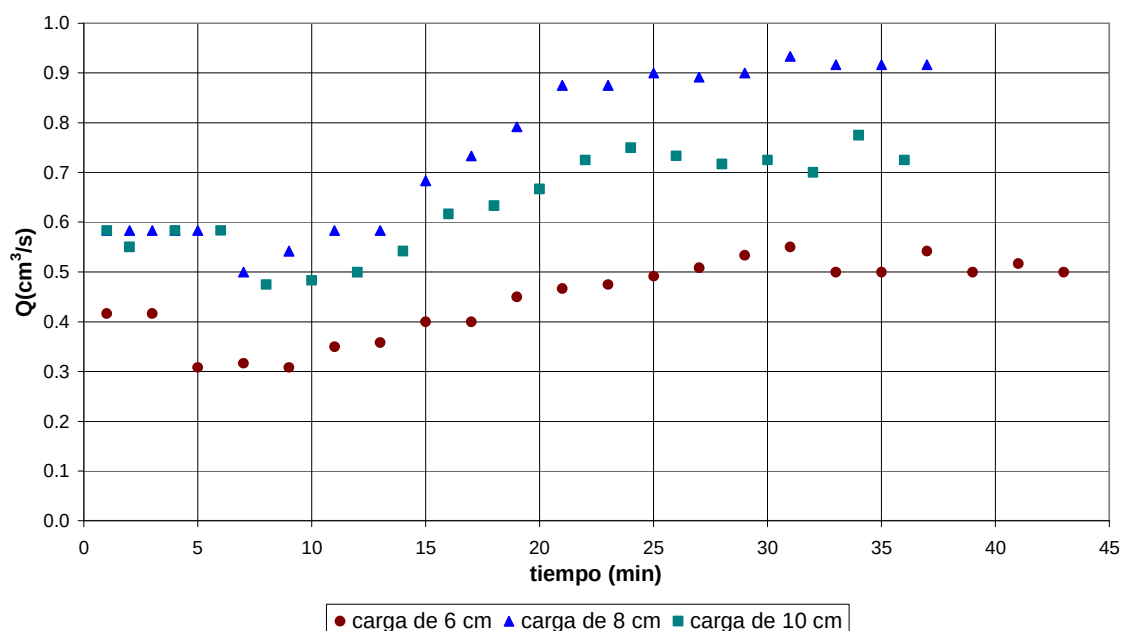
En primer lugar, se ha analizado el efecto de la disminución importante del caudal filtrado, como consecuencia de realizar el cambio de agua saturada a agua limpia para que comenzara el proceso de disolución en la muestra. Con este análisis, se ha justificado una corrección necesaria en los cálculos mediante DISOLUCIÓN2D, para los modelos correspondientes a los ensayos realizados con bicarbonato sódico.

Posteriormente, se realiza la comparación de los datos medidos en los ensayos, con los cálculos realizados para el modelo de elementos finitos correspondiente a cada ensayo. Finalmente, se analizan otros efectos que se producen en los ensayos de validación.

5.2.8.1. Análisis del efecto del cambio de agua en los ensayos con bicarbonato sódico

Primeramente, se analizó el efecto del cambio de agua (saturada con bicarbonato sódico a limpia) en muestras sin material soluble, sólo con arena, y se analizó este efecto para el rango de gradientes hidráulicos que se quería ensayar (por similitud con los que se dan en la cimentación de una presa) y así, poder realizar la corrección necesaria en los cálculos realizados mediante DISOLUCIÓN2D.

En la FIGURA N° 68 se puede observar el efecto que el cambio de agua saturada con bicarbonato sódico a agua limpia produce en una muestra únicamente de arena, para distintos gradientes hidráulicos (correspondientes a cargas de 6, 8 y 10 cm):



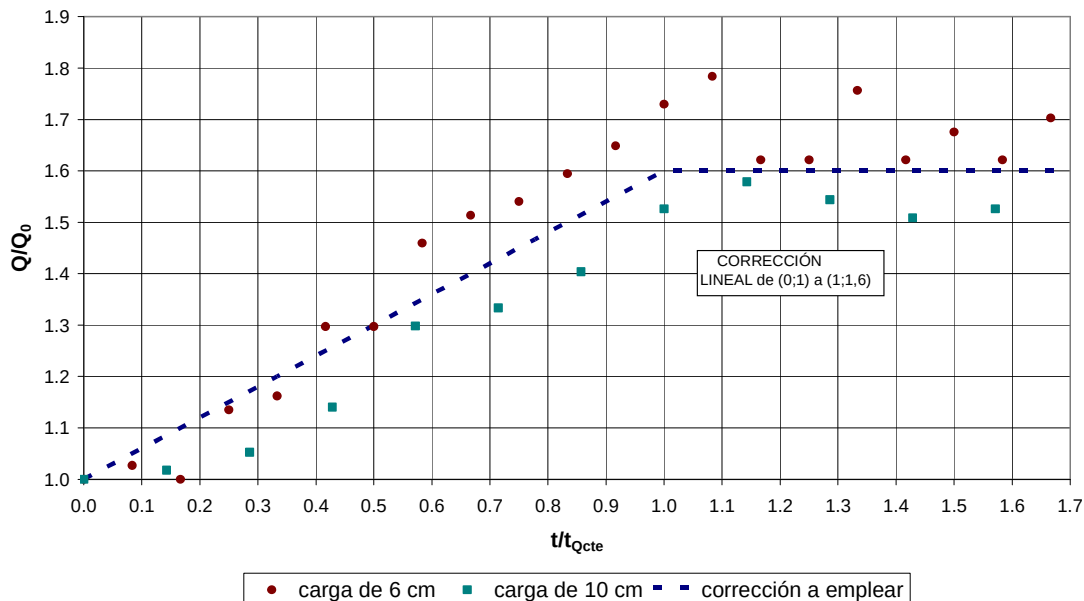
NOTA: la curva de carga de 8 cm estaba menos compactada inicialmente, por eso su K_0 es relativamente mayor que la del resto de ensayos

FIGURA N° 68 : Ensayo con arena – efecto del cambio de agua.

Mientras por la muestra se filtra el agua saturada, el caudal filtrado permanece constante (primera rama horizontal de las tres curvas). Al cambiar al depósito de agua limpia (simulando el efecto de entrada de agua desde el embalse a la cimentación) se produce una disminución de caudal. Dado que la entrada de agua a la muestra se realiza por la parte inferior de ésta y que el agua saturada pesa más que la limpia (10,56 frente a 9,8 N/l), al realizarse el cambio de agua, el agua limpia debe vencer ese incremento de peso para desplazar al agua saturada. Por consiguiente, cuanto menor sea el gradiente hidráulico, mayor es la disminución de caudal que se produce por este efecto.

Posteriormente, el agua limpia va avanzando por la muestra de arena y conforme va desplazando al agua saturada, el caudal va aumentando; hasta que llega un momento $t_{Q_{cte}}$ (función del gradiente hidráulico) en que ya se filtra agua limpia completamente y el caudal se hace constante.

Dado que este salto en los caudales filtrados no es debido a la disolución, es preciso hacer una corrección. Si se representan las curvas con los tiempos ($t/t_{Q_{cte}}$) y los caudales (Q/Q_0) adimensionales, se obtiene el gráfico de la FIGURA N° 69.



NOTA: la curva de carga de 8 cm no se ha utilizado para realizar el ajuste debido a que su K_0 es relativamente mayor que la del resto de ensayos

FIGURA N° 69 : Ensayo con arena – efecto del cambio de agua (adimensional).

Se observa que en el rango de gradientes hidráulicos analizado, el salto que se produce al final del cambio total de agua ($t/t_{Qcte} = 1$) es del orden de 1,6 el inicial (una vez realizado el cambio de agua). Por ello, la línea de puntos (con un primer tramo lineal y ascendente hasta que finaliza el proceso de cambio de agua, donde ya toma el valor constante de 1,6, que corresponde al valor medio de todos los puntos con $t/t_{Qcte} \geq 1$) permite adoptar un criterio acerca de la corrección que es preciso incorporar a los cálculos.

En el caso del yeso, este efecto es despreciable, porque la densidad del agua saturada es prácticamente la del agua limpia, dada su menor solubilidad; pero en los ensayos que se han realizado con bicarbonato sódico es preciso realizar una corrección tras el cálculo teórico para tener en cuenta este efecto, que se realiza a partir de la línea de puntos citada.

5.2.8.2. Comparación de los resultados medidos en los ensayos y los resultados calculados mediante DISOLUCIÓN2D

Desde la FIGURA N° 70 hasta la FIGURA N° 75, se muestran los resultados de ensayos realizados para distintos porcentajes de material soluble (9, 13, 18, 22 y 29%, respectivamente) y para el rango de gradientes hidráulicos previsto. La curva denominada “calculado DISOLUCIÓN2D” se ha obtenido mediante el programa desarrollado y “calculado DISOLUCIÓN2D-corr” incorpora la corrección realizada con el criterio antes definido para tener en cuenta el efecto del cambio de agua. La recta denominada “calculado u-cte” es el cálculo realizado a partir de las condiciones iniciales, sin considerar el aumento de permeabilidad debido a la disolución del bicarbonato.

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

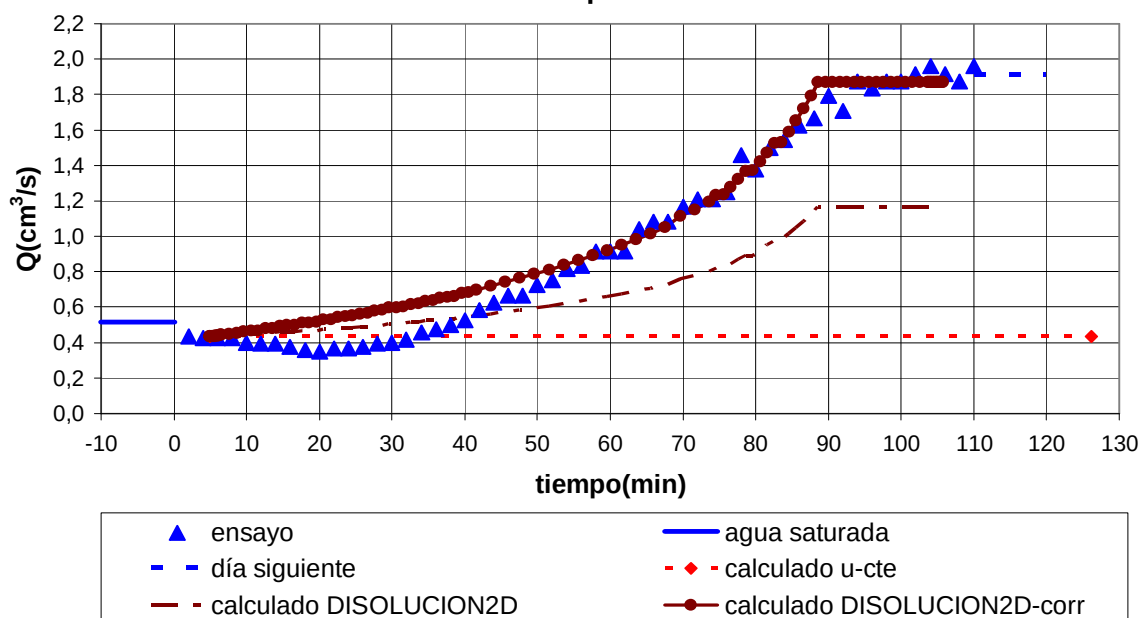


FIGURA N° 70 : Comparación de la relación $t-Q$ entre cálculo y ensayo, con porcentaje de bicarbonato de 9%.

ENSAYO 4: CON 13,1 % DE BICARBONATO Y CARGA DE 10 cm - dos capas

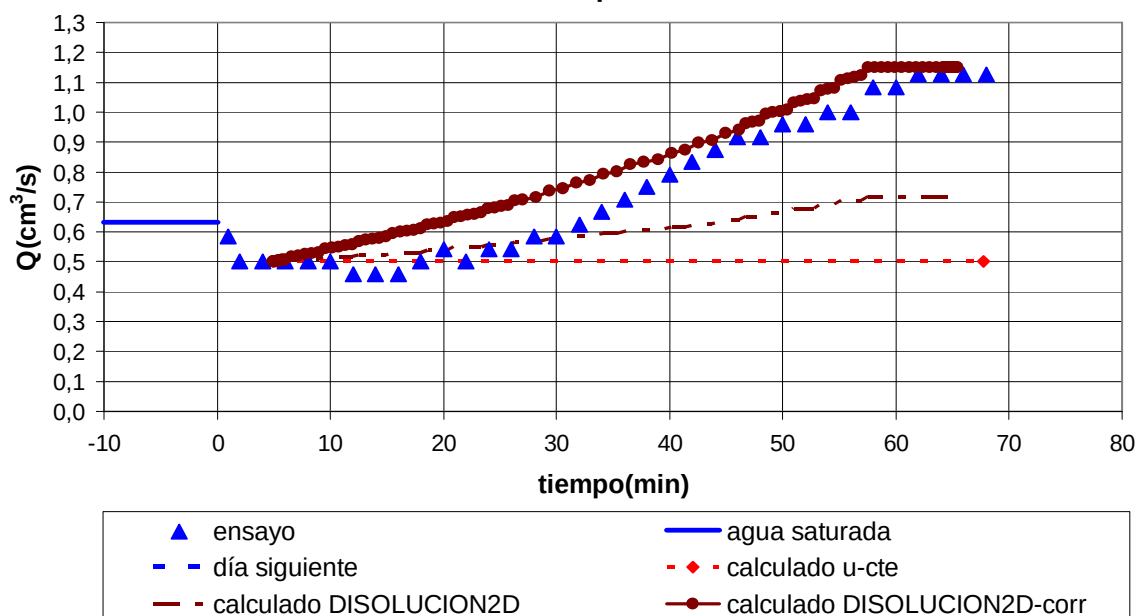


FIGURA N° 71 : Comparación de la relación $t-Q$ entre cálculo y ensayo, con porcentaje de bicarbonato de 13%.

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

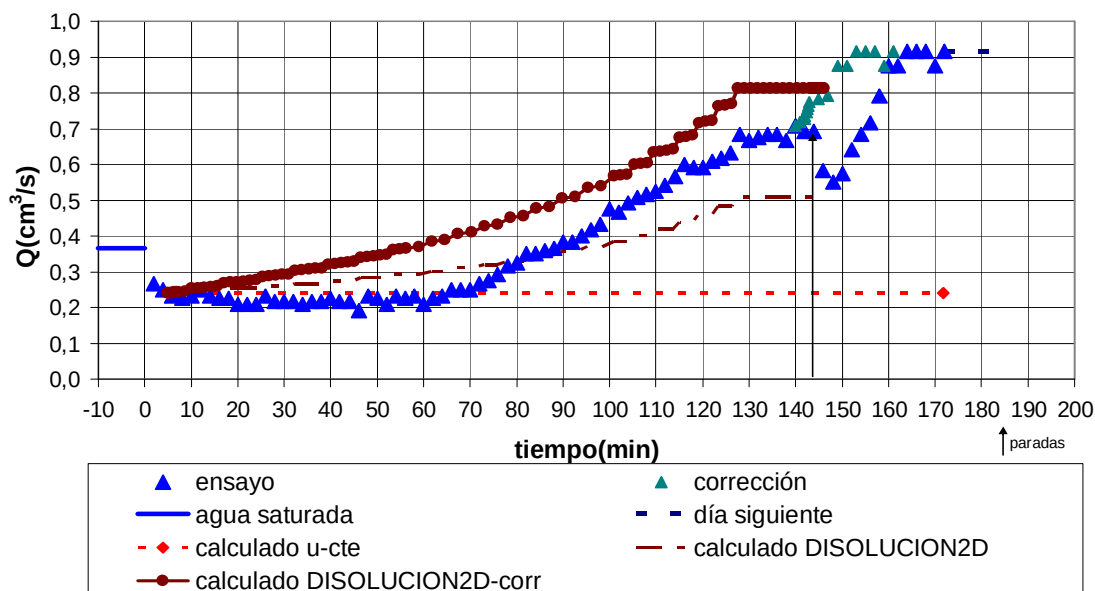


FIGURA N° 72 : Comparación de la relación $t-Q$ entre cálculo y ensayo, con porcentaje de bicarbonato de 18%.

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

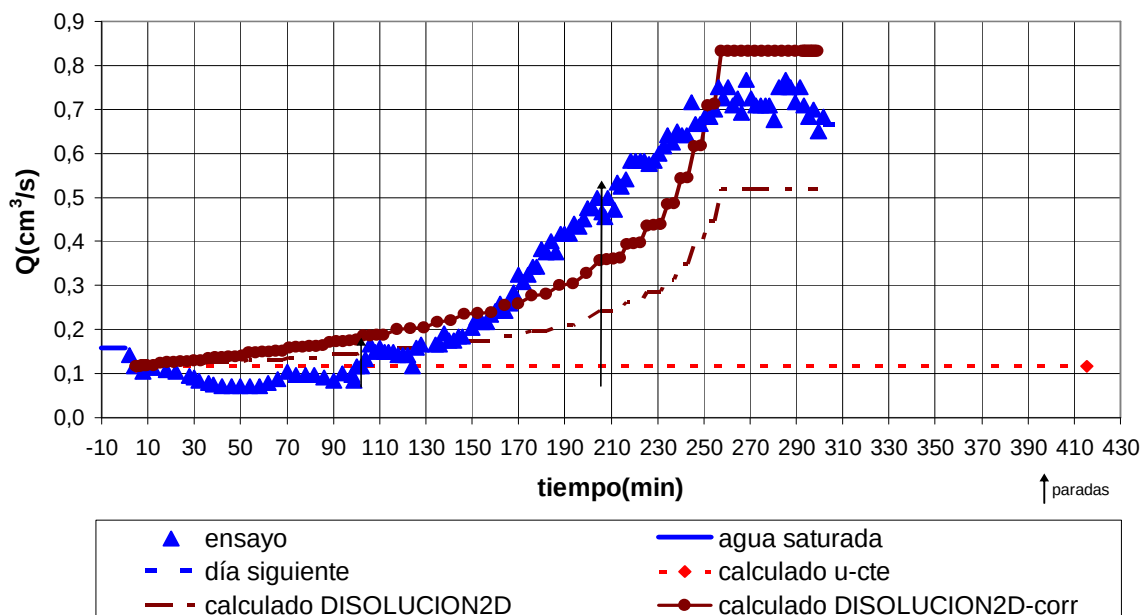


FIGURA N° 73 : Comparación de la relación $t-Q$ entre cálculo y ensayo, con porcentaje de bicarbonato de 22,5%.

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

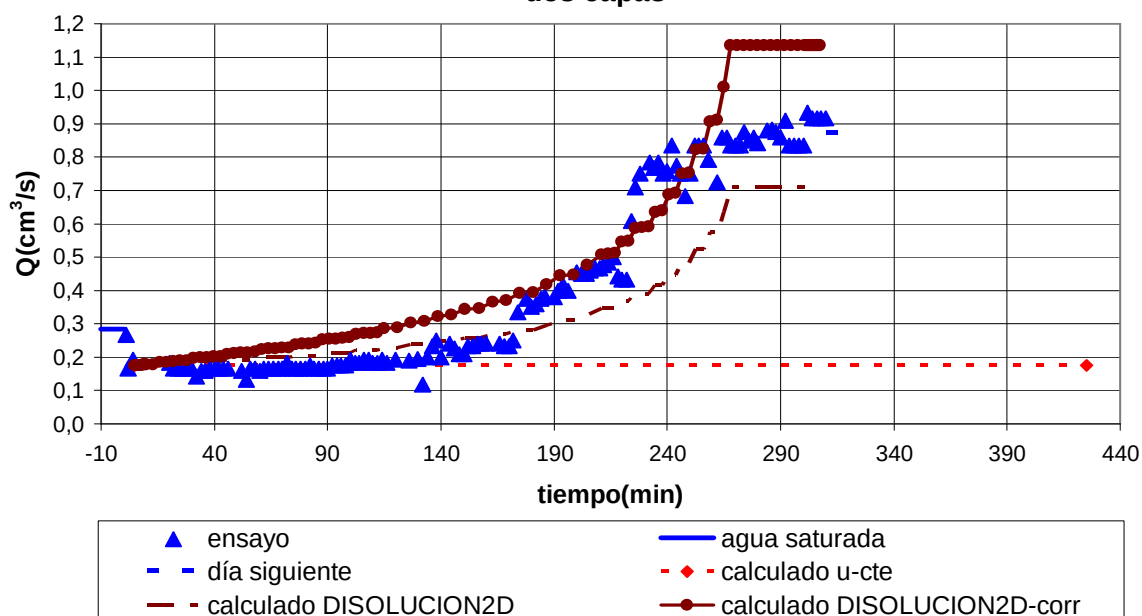


FIGURA N° 74 : Comparación de la relación $t-Q$ entre cálculo y ensayo, con porcentaje de bicarbonato de 29%.

En la FIGURA N° 75 se muestra, para el ensayo de yeso, la comparación entre la curva $t-Q$ experimental y la obtenida mediante el cálculo con DISOLUCIÓN2D.

ENSAYO CON 6,4 % DE YESO Y CARGA DE 82 cm - dos capas

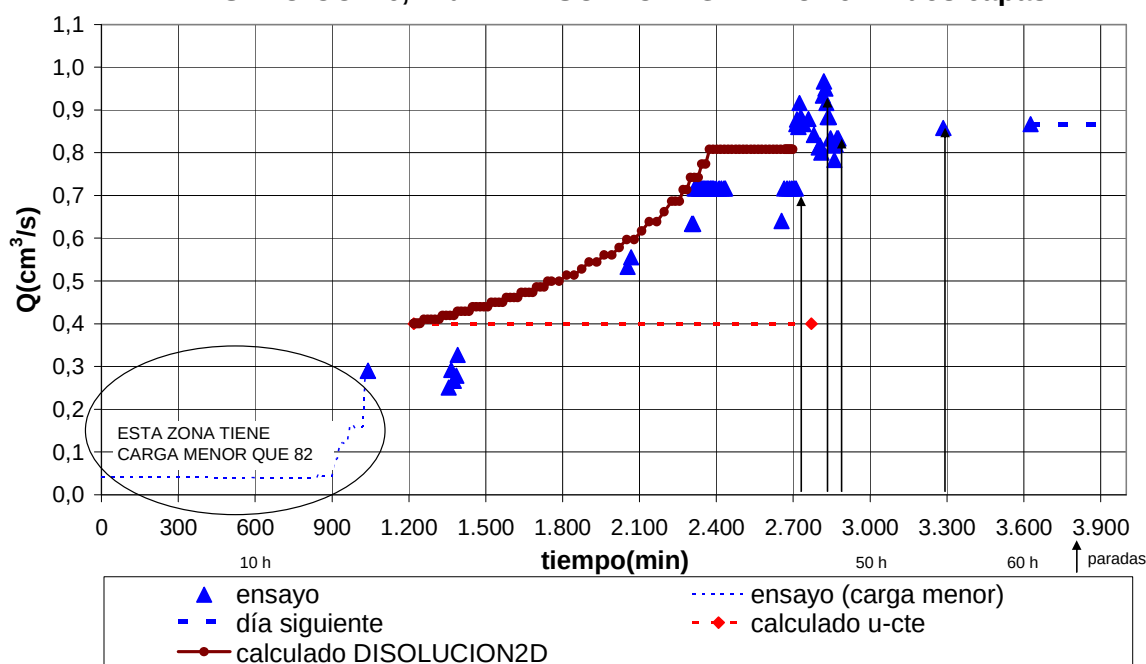


FIGURA N° 75 : Comparación de la relación $t-Q$ entre cálculo y ensayo, con porcentaje de yeso de 6,4%.

Los resultados para el resto de ensayos de validación se adjuntan en Baena, C.M., 2011.

5.2.8.3. Otros efectos que se producen en los ensayos

Existen otros factores, que una vez analizados, justifican las diferencias encontradas entre las curvas experimentales y las obtenidas mediante modelación numérica.

- Longitud del frente de disolución

Como se demostró en el apartado 4.4.2. “Modelo de disolución de partículas”, la velocidad de avance del frente de disolución “u” no depende del tamaño de las partículas del material soluble ni de K_d (constante de disolución), aunque sí de su solubilidad. Sin embargo, la longitud del frente de disolución depende de los tres factores. En el capítulo de Metodología, se hizo la simplificación de que la longitud del frente de disolución es despreciable en el caso de la cimentación de una presa (comprobándose en los diversos casos calculados), ya que el recorrido de la filtración es muy grande y las velocidades muy pequeñas (en la hipótesis de régimen laminar).

En los ensayos de bicarbonato sódico, esta longitud podría no ser despreciable (sobre todo si las velocidades de filtración son grandes) y la consecuencia inmediata es que la curva experimental debería estar por debajo de la obtenida por modelación numérica. Sin embargo, dado que es un fenómeno que se produce en el ensayo, no tiene consecuencias en la veracidad de los cálculos realizados para las presas. A pesar de ello, en las tablas de los ensayos se ha hecho una estimación de esta longitud (ya que depende de diversos factores):

Ejemplo de cálculo de t_{95} y ut_{95} para el bicarbonato (ENSAYO 7):

$$\text{Si } \gamma = 3, t_{95} = 2,76 \cdot T = 2,76 \cdot \frac{\sigma_{l_0}}{\gamma K_d C_s} = 56 \text{ minutos (considerando un diámetro medio } l_0 \text{ de}$$

las partículas de 0,18 mm en la capa mezcla de arena y bicarbonato)

La longitud del frente de disolución es $ut_{95} = 3,32 \text{ cm}$.

Además, el tiempo t_{95} calculado permite, al compararlo con el tiempo de duración del ensayo (teniendo en cuenta la masa de material soluble de la muestra), ratificar que el proceso de disolución se ha completado.

El análisis de los gráficos de la FIGURA N° 59 a la FIGURA N° 63, “volumen-masa disuelta” en 5 ensayos con distinto porcentaje de bicarbonato, permite observar que al principio los puntos medidos en el ensayo están

más cercanos a la curva teórica; esto es debido a que las velocidades son menores en el inicio del proceso. La diferencia entre ambas curvas puede ser debido a que a medida que aumenta la velocidad debido a la disolución, la longitud del frente de disolución va aumentando. Por ello, en las tablas de cálculo de los ensayos, aparece una estimación de esta longitud. Dado que no es despreciable respecto a la longitud de la muestra, por ello la curva teórica es ligeramente distinta que la experimental.

- Avance no uniforme

Se ha observado la existencia de caminos preferentes de flujo, principalmente en el contacto de la muestra con el cilindro del permémetro (ver FOTO N° 7). Esto hace que el agua no avance de forma uniforme en una sección vertical del cilindro. Esto se constata claramente en los ensayos, puesto que la mezcla de aguas es visible antes de que acabe el proceso de avance de todo el frente por el cilindro y por las mediciones que se han realizado del peso del agua filtrada. Este efecto aumentaría los valores de caudales de la curva experimental frente a los de la curva obtenida por modelación numérica, porque supondría que el frente de disolución alcanza el final de la muestra antes de lo previsto donde el avance del frente ha sido más rápido. Como en el caso anterior es un fenómeno que se produce en el ensayo, pero que no se producirá en la cimentación de una presa.



FOTO N° 7 : Avance no uniforme del frente de disolución en el ensayo.

- Efecto de la compactación de la muestra tras la disolución

El efecto de compactación que se podría producir por la pérdida de material soluble al disolverse (y que dependerá en gran medida de la estructura del cemento) no se ha detectado en los ensayos para el rango inferior de los porcentajes analizados. Lo que produciría este efecto es que el salto de caudales medido en el ensayo fuera algo menor que el obtenido por modelación numérica. Si bien es cierto, que tras finalizar un ensayo, al día siguiente se midieron de nuevo los caudales filtrados y, a veces, disminuían ligeramente posiblemente por este efecto.

En la FOTO N° 8 se observa este efecto para el porcentaje de bicarbonato sódico mayor (29,13%) que se ha utilizado en las muestras.

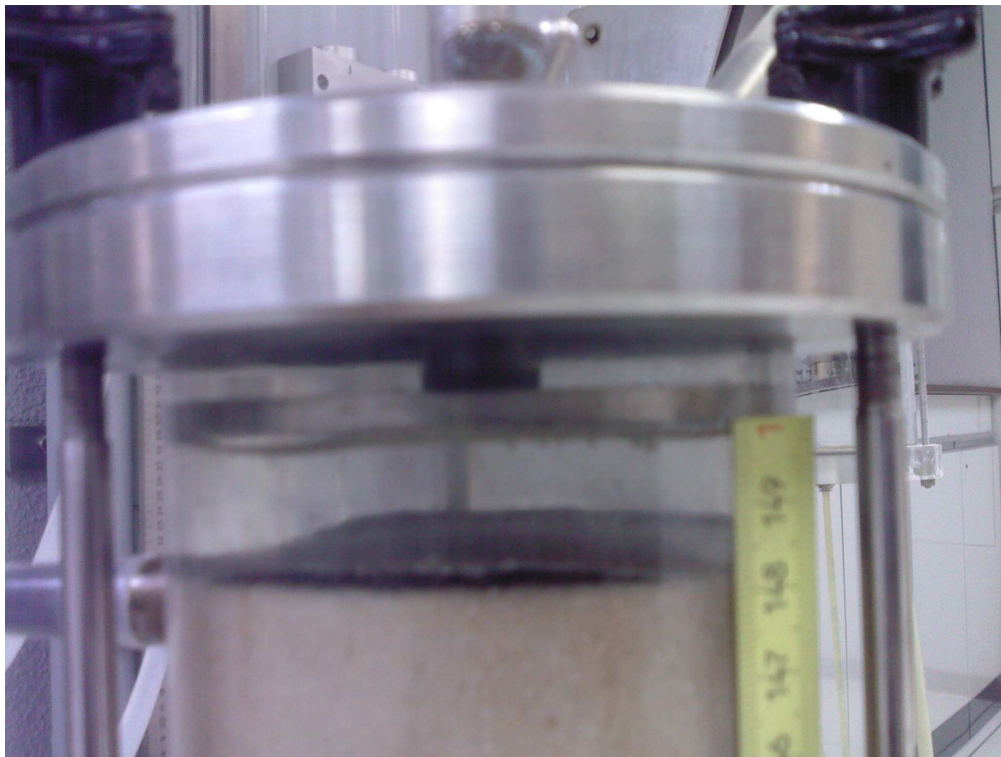


FOTO N° 8 : Efecto de compactación en ensayo con porcentaje de bicarbonato de 29%.

- Aire ocluido

Existe otro efecto que se produce tras el cambio de agua y en los primeros minutos del ensayo (concretamente, cuando pasan entre los 300 ml y los 700 ml primeros por la muestra), que es una salida de burbujas, bien por los piezómetros o hacia la parte superior de la muestra. Esto produce una disminución de caudal en la primera parte de la curva experimental.

Este efecto no se ha producido en los ensayos de cambio de agua realizados en las muestras configuradas sólo con arena.

5.2.9. Conclusiones finales de los ensayos

Los ensayos más concluyentes se han realizado considerando un material soluble (bicarbonato sódico) que no es el material objeto de este estudio (el yeso), si bien este cambio de material ha permitido disminuir el tiempo de duración de los ensayos y controlar el proceso de disolución, gracias a que el análisis del peso de los volúmenes filtrados permite comprobar la masa que se va disolviendo. No obstante, debe tenerse en cuenta que el modelo numérico desarrollado (DISOLUCIÓN2D) resulta válido para cualquier material soluble.

También se ha realizado un ensayo con yeso por ser el material objeto de estudio, si bien, dada la larga duración del ensayo y que las dificultades aumentan con la duración de éste, puede ser válido para verificar que se produce un aumento del caudal filtrado y que éste se produce aproximadamente en el tiempo calculado mediante el modelo numérico.

De los ensayos realizados con bicarbonato sódico se puede constatar que las hipótesis de partida son correctas, ya que la concordancia entre los resultados experimentales y los resultados de los cálculos realizados es alta (a pesar de las limitaciones de un ensayo como el permeámetro de carga constante). Para cuantificar esta concordancia, se ha definido una desviación en tiempos (diferencia porcentual entre el tiempo que tarda en disolverse el material soluble en el ensayo y en el modelo numérico) y una desviación en caudales (diferencia porcentual entre el caudal tras la disolución en el ensayo y en el modelo numérico), que se ha calculado para cada ensayo. Los promedios de estas desviaciones han sido de 9,5% y -2%, respectivamente.

Del análisis de los gráficos de la FIGURA N° 70 a la FIGURA N° 75 se concluye que:

1. La velocidad de avance del frente de disolución varía inversamente con el porcentaje de material soluble contenido en el suelo y directamente con la solubilidad del material y con la velocidad de filtración. Es decir, si el porcentaje de material soluble es mayor, la velocidad de avance del frente es más lenta (en el caso del ensayo con un 29,13% de bicarbonato, el tiempo en el que se produce la disolución es de 270 minutos y en el caso del ensayo con 13,1%, es de 60 minutos). En los ensayos con bicarbonato sódico, dado que su solubilidad es del orden de 40 veces mayor que el yeso, la velocidad de avance es mucho mayor.

Por tanto, se corrobora la hipótesis del avance del frente de disolución del modelo de disolución de partículas (James, A.N., 1992).

2. La disolución aumenta el coeficiente de permeabilidad del cimiento (y por lo tanto, el caudal filtrado a través de él). En todos los ensayos se ha producido un aumento del caudal filtrado. Este aumento es mayor, proporcionalmente al caudal inicial, si el porcentaje de material soluble es mayor, como cabía esperar.
3. Todo el material susceptible de disolverse ha pasado a incrementar la porosidad efectiva, para unos porcentajes de material soluble limitados. Esta conclusión es independiente del material soluble utilizado.

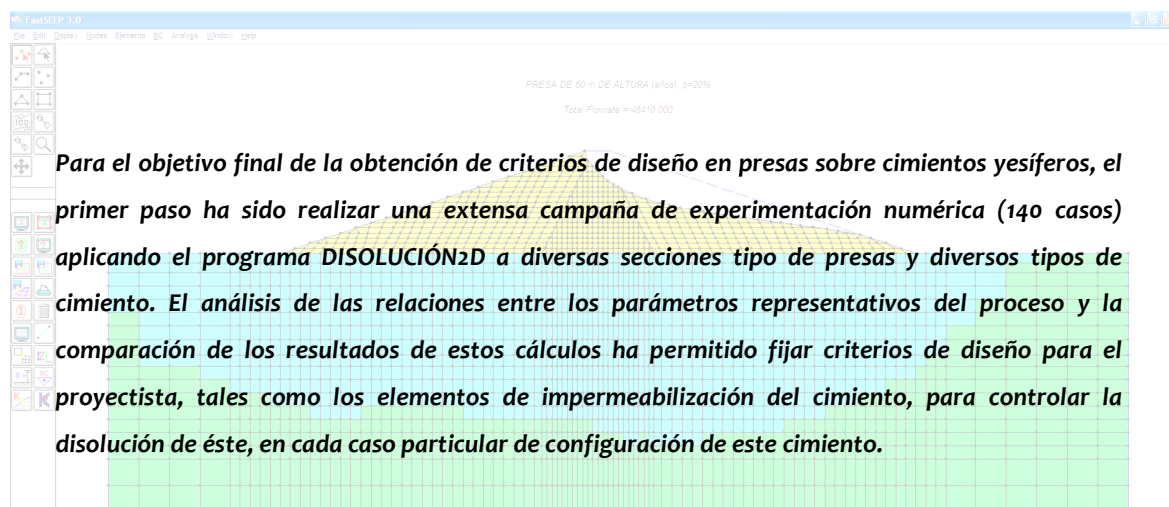
Para porcentajes elevados del material soluble respecto al volumen de suelo, esta porosidad efectiva se puede ver influenciada por la compactación de forma importante (disminuyéndose en este caso la permeabilidad), tanto más importante cuando la estructura del terreno sea menos competente. En el caso de los porcentajes analizados, este efecto se puede observar en la FIGURA N° 74, ya que por efecto de la compactación, la curva experimental está por encima de la curva obtenida mediante el cálculo numérico. En este caso, el cálculo numérico quedaría del lado de la seguridad.

4. Considerando que el material soluble que se ha disuelto aumenta la permeabilidad de la capa soluble, aumentará la velocidad del flujo progresivamente y por tanto la velocidad del frente de disolución. Esto se puede corroborar en los gráficos de cada ensayo, donde el tiempo en el que se ha producido la disolución (t_{ab}), medido y calculado mediante DISOLUCIÓN2D es similar y menor al calculado con velocidad de avance del frente constante (t_{ucte}). Esto supone que hacer un cálculo considerando la velocidad constante, deja del lado de la inseguridad, ya que el frente recorrería la muestra de forma más lenta de lo previsto de este modo.

Estas tres últimas conclusiones son hipótesis de partida del estudio, que se han visto confirmadas por los resultados de los ensayos de validación.

Dadas las dificultades del ensayo, aparentemente sencillo de realizar, **se puede afirmar que los resultados confirman las formulaciones empleadas** (ya que las desviaciones obtenidas en la mayor parte de los ensayos son menores que el 10%) **y validan el modelo numérico DISOLUCIÓN2D.**

CAPÍTULO 6. CRITERIOS DE DISEÑO DE PRESAS SOBRE CIMIENTOS YESÍFEROS



ÍNDICE

CAPÍTULO 6.	CRITERIOS DE DISEÑO DE PRESAS SOBRE CIMIENTOS YESÍFEROS	119
6.1.	CAMPAÑA DE EXPERIMENTACIÓN NUMÉRICA	120
6.1.1.	Parámetros analizados	120
6.1.1.1.	Parámetros relativos al terreno.....	120
6.1.1.2.	Parámetros relativos al modelo.....	121
6.1.1.3.	Parámetros relativos a la presa	122
6.1.1.4.	Parámetros relacionados con Kd	123
6.1.1.5.	Resumen de los parámetros analizados.....	124
6.1.2.	Definición de parámetros significativos.....	125
6.1.3.	Estudio adimensional de parámetros.....	128
6.1.4.	Casos calculados	129
6.1.5.	Resultados de la campaña de experimentación numérica	137
6.1.5.1.	Resultados de los cálculos de los modelos geométricos de presa y cimiento.....	137
6.1.5.2.	Resultados de comparación de secciones tipo de presa.....	152
6.2.	CONCLUSIONES DE LA CAMPAÑA DE EXPERIMENTACIÓN NUMÉRICA VÁLIDAS PARA EL DISEÑO.....	169
6.2.1.	Influencia de los parámetros de la cimentación.....	169
6.2.1.1.	Influencia del porcentaje de yeso.....	169
6.2.1.2.	Influencia del espesor de la capa yesífera	183
6.2.1.3.	Influencia de la relación de permeabilidades entre la capa yesífera y la capa no yesífera (casos 1H y 0,2H).....	186
6.2.2.	Influencia de los parámetros de diseño de la sección tipo	187
6.2.2.1.	Influencia de la tipología de presa. Caudal inicial.....	187
6.2.2.2.	Influencia de la pantalla de impermeabilización del cimiento	189
6.2.2.3.	Influencia del tapiz.....	199
6.2.2.4.	Tapiz versus pantalla parcial	201
6.2.3.	Influencia en la estabilidad de la presa.....	203
6.3.	FORMULACIONES PARA LOS PARÁMETROS REPRESENTATIVOS	204
6.4.	CRITERIOS DE DISEÑO DE PRESAS SOBRE CIMIENTOS YESÍFEROS.....	212
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	212
6.4.2.	Caso que cumple con las condiciones necesarias para utilizar el modelo y, además, se puede asimilar a uno de los calculados	214
6.4.3.	Ejemplos de aplicación.....	216
6.4.4.	Límites de aplicación	225

6.1. CAMPAÑA DE EXPERIMENTACIÓN NUMÉRICA

Con el modelo numérico debidamente validado, se acometió una campaña de experimentación numérica con objeto de extraer conclusiones respecto de los criterios de diseño de presas de materiales sueltos en terrenos yesíferos.

En primer lugar, se han analizado todos los parámetros que intervienen en los cálculos de una presa con cimiento yesífero, para ver su influencia en el proceso y así poder fijarlos o estudiar su variación. También se realiza un estudio adimensional de los parámetros para poder representar los gráficos de la forma más conveniente. Posteriormente, se enumeran los casos calculados.

6.1.1. Parámetros analizados

Se diferencian los parámetros relativos al terreno, los del modelo numérico, los de la presa y los relacionados con la constante de disolución K_d . Tras el análisis de los parámetros, se adjunta la TABLA N° 20, indicando cuáles de ellos se varían y cuáles se han fijado para los cálculos realizados en esta campaña.

6.1.1.1. Parámetros relativos al terreno

6.1.1.1.1. Permeabilidad inicial de la capa con yeso (K_o)

La permeabilidad inicial de la capa de cemento soluble se ha considerado de 10^{-5} m/s (315 m/año). Este valor lo considera James, A.N., 1992, para el conglomerado yesífero bajo la Presa de San Francisco y corresponde a un material no demasiado impermeable. Dado que el material impermeable de la presa es bastante más impermeable, prácticamente todo el caudal se filtra a través del cimiento.

La relación entre la permeabilidad inicial de la capa yesífera y el resto de capas de la presa o cimiento es lo más importante, porque como se verá más adelante, los gráficos adimensionales son válidos si el flujo preferentemente es por la capa yesífera. Se ha admitido que el caudal filtrado dado por el FastSEEP es, en su mayor parte, el filtrado por la capa yesífera.

6.1.1.1.2. Permeabilidad tras la disolución de la capa con yeso (K_{td})

Como ya se ha comentado, la permeabilidad tras la disolución de la capa de cemento soluble K_{td} se ha calculado a partir de la permeabilidad inicial, de la porosidad inicial y del porcentaje de material soluble en volumen (K_o , n_o y ϕ , respectivamente):

$$K_{td} = K_o \times \frac{(1-n_o)^2}{n_o^3} \times \frac{n^3}{(1-n)^2} = K_o \times \frac{(1-n_o)^2}{n_o^3} \times \frac{(n_o+\phi)^3}{(1-n_o-\phi)^2}$$

Se ha considerado que la porosidad inicial es de 0,2, ya que es la que produce mayor salto de permeabilidades y corresponde a un valor medio para los cimientos modelados, según el análisis realizado en el apartado 4.2.2.

6.1.1.1.3. Porcentaje de material soluble ($\emptyset$)

Este factor es fundamental en el proceso de disolución del yeso, en la velocidad de avance de su frente y en el aumento de la permeabilidad de un cimiento debido a la disolución. Las relaciones u/v y K_{td}/K_o se mostraron en la FIGURA N° 41 del apartado 5.1.2.1.: “Hipótesis Básicas”.

Como se observa en la figura citada, para estas dos relaciones fundamentales en el proceso de disolución (u/v y K_{td}/K_o) el efecto del porcentaje de material soluble del cimiento es contrapuesto.

Se han analizado 5 casos de porcentaje de yeso: 5, 10, 20, 30 y 40%. No se ha considerado un porcentaje mayor del 40% porque la pérdida del material soluble debida a la disolución, probablemente afectaría a la estructura de muchos cimientos.

6.1.1.1.4. Espesor de la capa yesífera (E)

Se han considerado 3 casos: 3H, 1H y 0,2H, siendo H la altura de la presa.

6.1.1.2. Parámetros relativos al modelo

6.1.1.2.1. Mallado de la cimentación

Se han realizado cálculos con distinto tamaño de la malla de elementos finitos de la cimentación, para ver la influencia de este parámetro (ver FIGURA N° 76 y FIGURA N° 77).

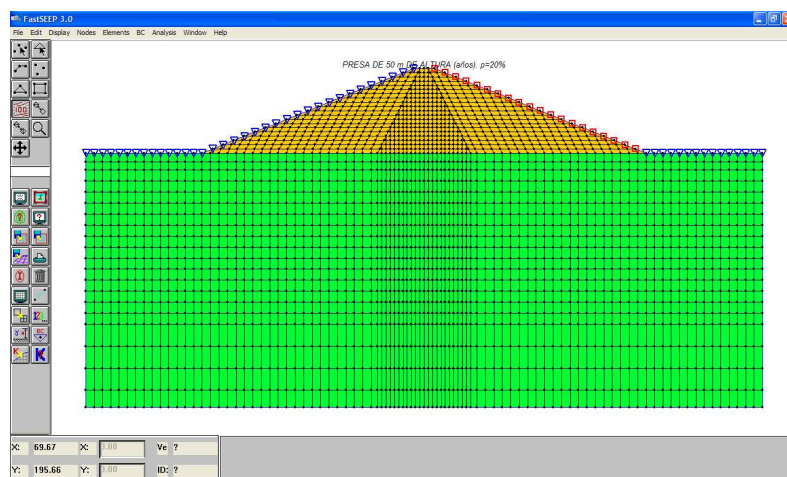
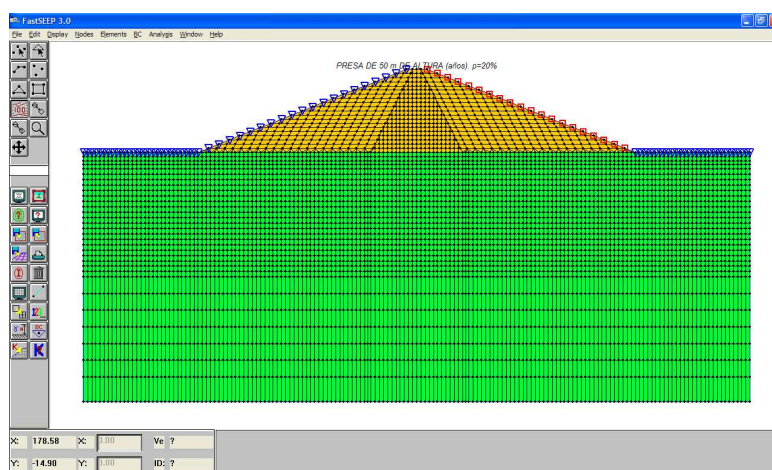


FIGURA N° 76 : Mallado con tamaño H/10.

FIGURA Nº 77 : Mallado con tamaño $H/20$.

La longitud mínima del mallado de la cimentación con el que se han realizado finalmente los cálculos ha sido de $H/10$ (primer modelo que se muestra), siendo H la altura de la presa. El segundo mallado, más tupido (de $H/20$), se ha desechado porque daba resultados similares y aumentaba el tiempo de cálculo de forma considerable.

6.1.1.2.2. Número de iteraciones

Se han realizado las comprobaciones necesarias para confirmar que los resultados fueran independientes de este factor. Finalmente se fijó en 100 iteraciones.

6.1.1.3. Parámetros relativos a la presa

6.1.1.3.1. Altura de la presa

La altura de la presa o más propiamente la carga de agua (ya que en todo el proceso se considera que el embalse está lleno) no influye, para un mismo diseño de presa, en la ley de velocidades que se establece en el cimiento. Es decir, dado que el gradiente hidráulico (incremento de carga hidráulica dividido por la longitud recorrida por la filtración) es el mismo para dos presas homotéticas de distinta altura, las velocidades de filtración son las mismas. Lo que varía es la longitud recorrida por la filtración y los caudales filtrados.

Sí una presa tiene el doble de altura que otra, a igualdad de condiciones, Q_0 es el doble y el camino que tiene que recorrer la disolución, también. Sin embargo, la relación Q/Q_0 es igual para ambas. El estudio adimensional realizado en el apartado 6.1.3 permite (al expresar de forma adimensional los parámetros analizados) que los resultados sean válidos para cualquier altura de presa.

Se han realizado todos los cálculos para una altura de presa de 50 m.

6.1.1.3.2. Sección tipo de la presa y coeficientes de permeabilidad de los materiales

El diseño de la presa influye, principalmente, en la red de velocidades que establece en el cimiento y en la longitud a recorrer por la filtración (y por consiguiente, por el frente de disolución).

Se han analizado ocho diseños básicos: presa homogénea con pantalla centrada y sin pantalla, presa zonificada con núcleo impermeable sin tapiz y sin pantalla, presa zonificada con núcleo impermeable sin tapiz y con pantalla, presa zonificada con tapiz impermeable (con dos longitudes de tapiz) y sin pantalla y presa zonificada con tapiz impermeable y con pantalla (centrada y aguas arriba).

Los valores iniciales de los coeficientes de permeabilidad considerados para cada material se adjuntan en la TABLA N° 19.

Se han considerado unos taludes 3H/1V para las presas homogéneas y 2H/1V para las zonificadas. En estas últimas, los taludes del núcleo se han fijado en 0,5H/1V.

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

TABLA N° 19 : Datos de permeabilidades de los materiales para las distintas secciones tipo

Es importante destacar que si las permeabilidades varían de modo considerable respecto a las fijadas en la tabla anterior, debería realizarse un cálculo concreto, según se detalla en el Apéndice N° 1. Sin embargo, la relación de permeabilidades más importante, entre la capa de cimiento yesífero antes de la disolución y la capa de cimiento impermeable bajo la capa yesífera (en los modelos 1H y 0,2H) se analiza en el apartado 6.2.1.3.

6.1.1.4. Parámetros relacionados con K_d

Se relacionan en este apartado los parámetros relacionados con la constante de disolución: la velocidad de flujo, la temperatura del agua en la cimentación, los iones presentes en el agua, la mineralogía,...

Estos parámetros influyen en el proceso de disolución del yeso, concretamente en la constante de disolución K_d de la ecuación de Nernst:

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

Que expresa la pérdida de masa en el tiempo (en kg/s) de un sólido con un área A (en m^2) expuesta a la disolución. K_d representa las propiedades de difusión combinadas de la capa límite y de las especies disolventes (en m/s). La diferencia de concentraciones se denomina potencial de disolución, siendo C_s la solubilidad y C la concentración en el instante considerado.

Tal y como se detalla en capítulos anteriores, este valor es necesario para obtener la longitud del frente de disolución, valor que se estima tras los cálculos y que se ha considerado despreciable frente al tamaño de los elementos finitos. Esta simplificación permite que en la cimentación, las únicas opciones posibles para el coeficiente de permeabilidad de un elemento es que esté sin disolver (K_o) o disuelto por completo (K_{td}).

6.1.1.5. Resumen de los parámetros analizados

Se muestra la TABLA N° 20, con los parámetros analizados y con un resumen en la última columna donde se indica si se han variado o no, en los diversos cálculos de la campaña de experimentación numérica.

	PARÁMETRO	VARIABLE
RELATIVOS A TERRENO	K_o	NO
	K_{td}	SÍ (función de $\emptyset$)
	$\emptyset$	SÍ
	E/H	SÍ
RELATIVOS A MODELO	Tamaño de la malla	NO
	Iteraciones	NO
RELATIVOS A PRESA	H	NO
	Sección tipo	SÍ
	Taludes, K de los materiales	NO
RELATIVOS A K_d	T^a , iones presentes, etc.	NO

TABLA N° 20: Tabla resumen de los parámetros analizados en los cálculos de las presas.

6.1.2. Definición de parámetros significativos

Primeramente se ha definido un factor de forma de la cimentación, FF, que permitirá, como se verá con detalle en el apartado 6.3, obtener formulaciones de los parámetros de caudales y tiempos representativos del proceso. Depende de la longitud media teórica de la filtración L_t y del espesor de la capa yesífera E de cada cimentación y de los correspondientes valores medios L_{med} y E_{med} :

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

Se han definido 3 caudales característicos, que pueden obtenerse tras el cálculo con el modelo numérico desarrollado.

Q_{ab}: Caudal de llegada aguas abajo, que corresponde a la llegada del frente de disolución al pie de aguas abajo del elemento impermeable de la presa. El tiempo correspondiente a este caudal se denomina t_{ab} . En la FIGURA N° 78 se muestra el resultado correspondiente al modelo numérico para un caso calculado (presa homogénea con capa yesífera de gran espesor comparado con la altura de la presa, denominada H3H, con un porcentaje de yeso del 20%).

Q_{máx}: Caudal de recinto completo, que corresponde a la formación de un recinto de disolución cerrado bajo la presa y que llega aguas abajo del elemento impermeable. El tiempo correspondiente a este caudal se denomina $t_{máx}$. En algunos casos, puede coincidir con Q_{ab}. En la FIGURA N° 79 se muestra para el mismo caso (H3H).

Q_{dt}: Caudal de disolución total, que correspondería a la disolución de todos los elementos solubles del cimiento (FIGURA N° 80).

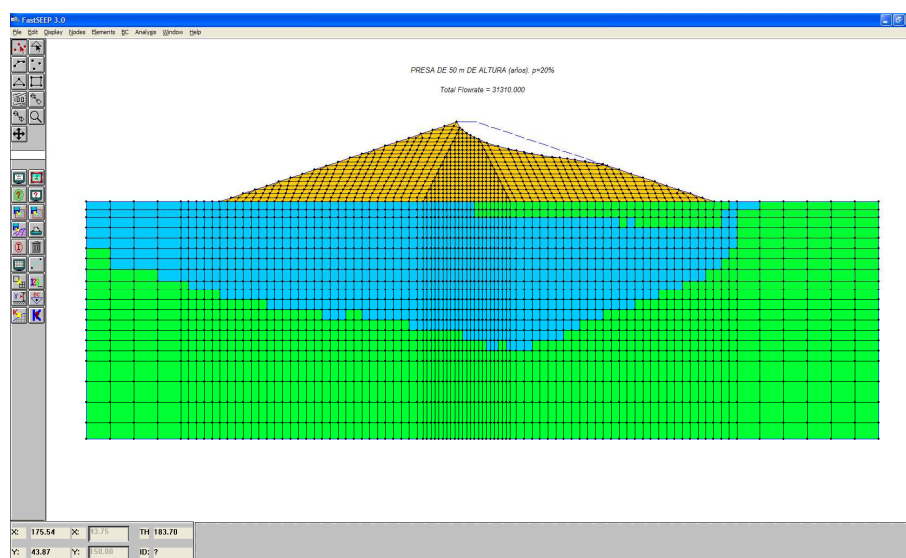
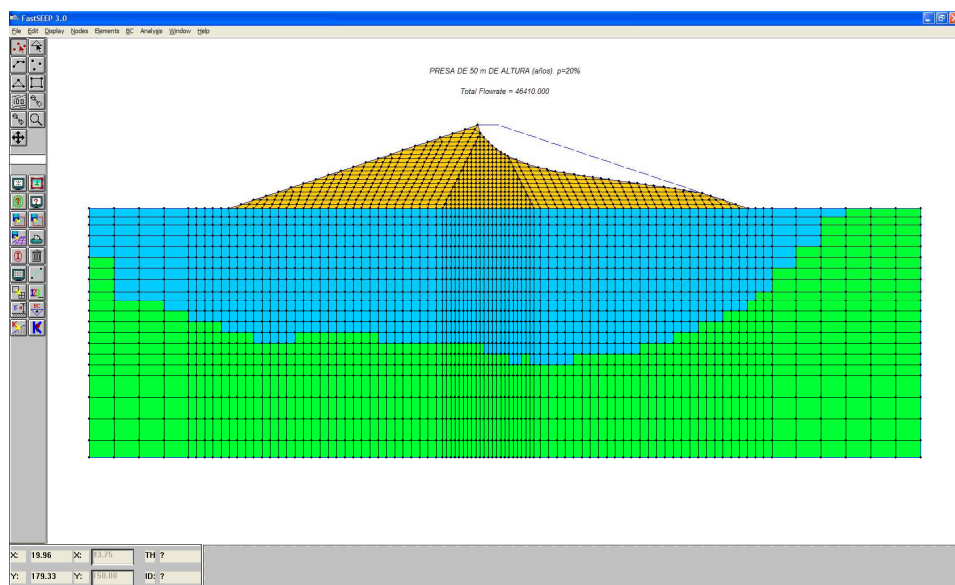
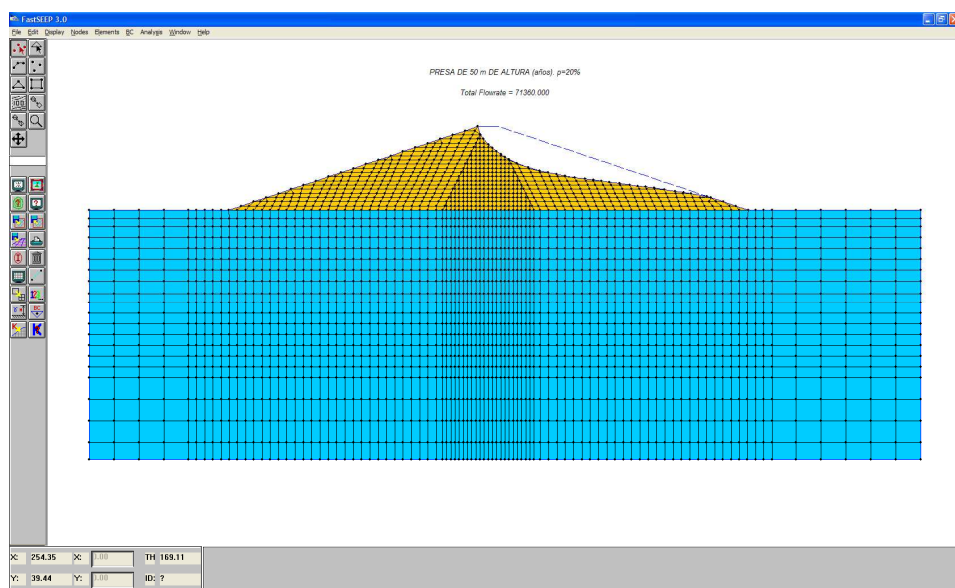


FIGURA N° 78 : Ejemplo de Q_{ab}.

FIGURA N° 79 : Ejemplo de $Q_{\text{máx}}$.FIGURA N° 80 : Ejemplo de Q_{dt} .

En la FIGURA N° 81, se adjunta el gráfico t-Q en el que pueden verse representados los parámetros definidos en el caso de presa homogénea sin pantalla y espesor de capa yesífera muy grande.

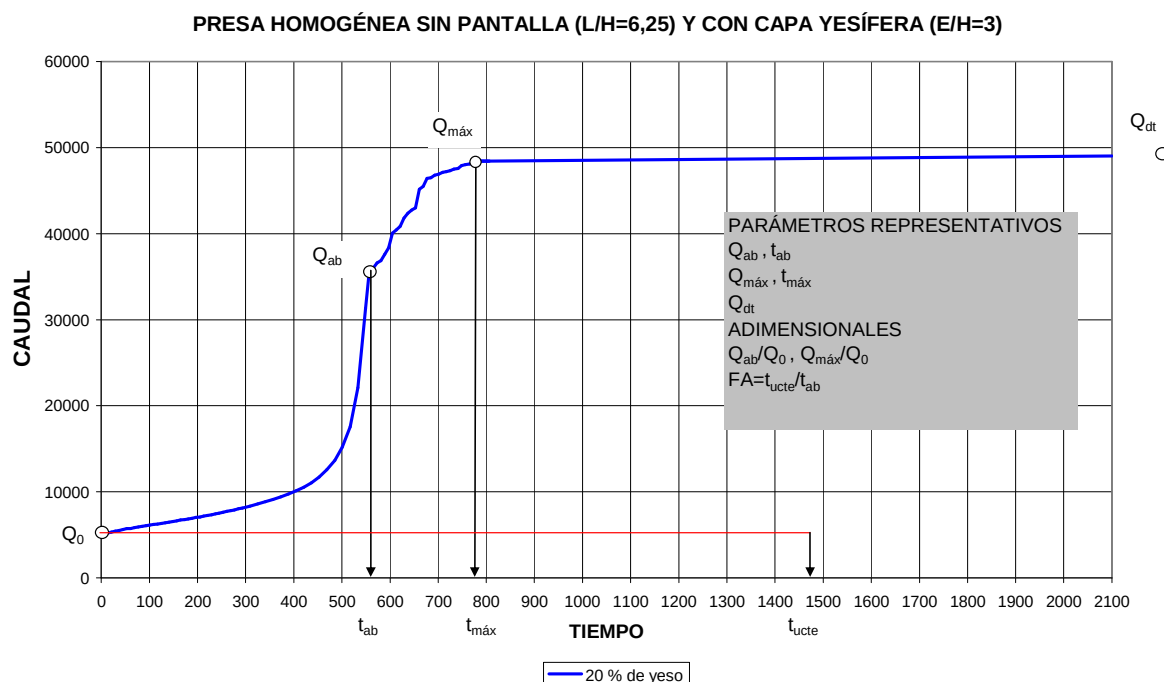


FIGURA N° 81 : Ejemplo de definición de parámetros temporales (t_{ab} , $t_{máx}$), de caudales (Q_{ab} , $Q_{máx}$, Q_{dt}) y adimensionales, durante el proceso de disolución del yeso.

Como en el caso de los ensayos, se ha definido **FA** (factor de aceleración) como la relación entre el tiempo que tardaría el frente en llegar al pie de aguas abajo del elemento impermeable con velocidad constante (t_{ucte}) y el tiempo que tarda en llegar aplicando el modelo numérico DISOLUCIÓN2D (t_{ab}):

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

Este factor cuantifica la aceleración del proceso que se produce como consecuencia del aumento de la permeabilidad a medida que avanza el frente de disolución.

Para poder obtener t_{ucte} es preciso realizar otro cálculo mediante DISOLUCIÓN2D con una permeabilidad tras la disolución, en la capa yesífera, igual a la inicial. Esto es debido a que, a pesar de calcular el caudal inicial Q_0 y el campo de velocidades, mediante FastSEEP, no se conoce la velocidad media ni la longitud media del recorrido de la filtración.

Tras el cálculo mediante DISOLUCIÓN2D, con las iteraciones correspondientes, se obtiene el tiempo que tarda el frente en llegar aguas abajo del elemento impermeable (t_{ucte}), en este caso sin aumento del caudal filtrado porque no se ha considerado aumento de permeabilidad.

6.1.3. Estudio adimensional de parámetros

Aplicando el teorema Π de Buckingham, y considerando como parámetros principales los siguientes:

H: altura de la presa (m)

K_0 : permeabilidad inicial de la capa soluble (m/año)

C_s : solubilidad del material soluble (kg/m³)

Dado que el determinante de la matriz formada por estos parámetros es 1, el resto de parámetros analizados P_i en los cálculos se pueden expresar de forma adimensional como:

$$\Pi_i = H^p K_0^q C_s^r P_i$$

Así, cualquier caudal representativo Q_i (m³/año) puede transformarse en adimensional dividiendo por $H^2 \cdot K_0$:

$$\Pi_Q = H^{-2} K_0^{-1} Q_i$$

Cualquier velocidad v (m/año), dividiendo por K_0 :

$$\Pi_v = K_0^{-1} v$$

Cualquier dimensión geométrica representativa L_i (m), dividiendo por H:

$$\Pi_L = H^{-1} L_i$$

Y cualquier tiempo representativo t_i (años), dividiendo por H y multiplicando por K_0 :

$$\Pi_t = H^{-1} K_0^{-1} t_i$$

El estudio adimensional de los parámetros permite que los gráficos con parámetros adimensionales sean válidos para cualquier altura de presa y para cualquier K_0 , con la salvedad de que se cumplan las relaciones de permeabilidades de los distintos materiales modelizados.

6.1.4. Casos calculados

Como se resume en la TABLA N° 20, los parámetros que se han variado en los cálculos han sido:

- Porcentaje de yeso en la capa yesífera (5, 10, 20, 30 y 40%).
- Espesor de la capa yesífera ($3H$, $1H$ y $0,2H$, siendo H la altura de la presa).
- Sección tipo de la presa (se han modelado 8 secciones tipo de presas de materiales sueltos, incluyendo elementos de impermeabilización como tapices o pantallas).

En total, se han calculado 140 **casos** que se consideran representativos de gran número de situaciones reales que pueden darse al analizar un cimiento yesífero de una presa y al proyectar una sección tipo para esa cerrada. Estos casos calculados son, por tanto, las distintas combinaciones de los 3 parámetros que se han citado anteriormente.

Los 140 casos calculados, se han agrupado, según el enfoque que se ha dado a los resultados en:

- ❖ 15 **tipos de cimentación** que corresponden a las combinaciones de los 3 espesores de capa yesífera con los 5 porcentajes de yeso. Al agruparse de este modo, se puede enfocar a un análisis comparativo de las secciones tipo de presas de materiales sueltos.
- ❖ 28 **modelos geométricos de presa y cimentación**, que corresponden a las combinaciones de los 3 espesores de capa yesífera con las distintas secciones tipo de presa. De este modo, se enfoca a un análisis de los parámetros que intervienen en el proceso.

La nomenclatura de los 28 modelos geométricos calculados es la siguiente: la primera letra es la tipología genérica (H es presa homogénea, Z zonificada); si la segunda letra es T , tiene un tapiz (de longitud igual a la base del espaldón de aguas arriba) y si es TT el tapiz tiene una longitud mayor (sumada a la longitud del núcleo es igual a la longitud de la presa homogénea).

Si contiene la letra P es que tiene pantalla (PR es pantalla aguas arriba y PC es pantalla centrada).

El número que antecede a la H final indica la relación entre el espesor de la capa yesífera y la altura de la presa y el número que sucede a la H es la relación entre la profundidad de la pantalla y la altura de la presa

(si no existe este número y tiene pantalla, la profundidad de la pantalla coincide con la de la capa yesífera).

En la FIGURA N° 82 se muestran los modelos de las presas homogéneas y en la FIGURA N° 83, los de las presas zonificadas, cada uno de ellos con su nomenclatura.

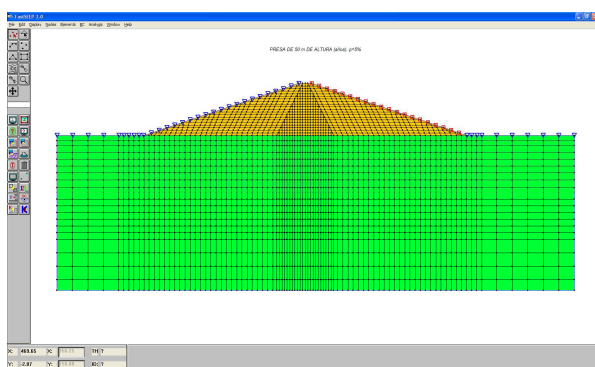
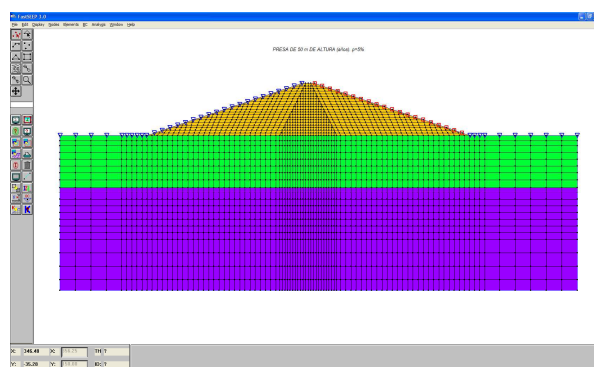
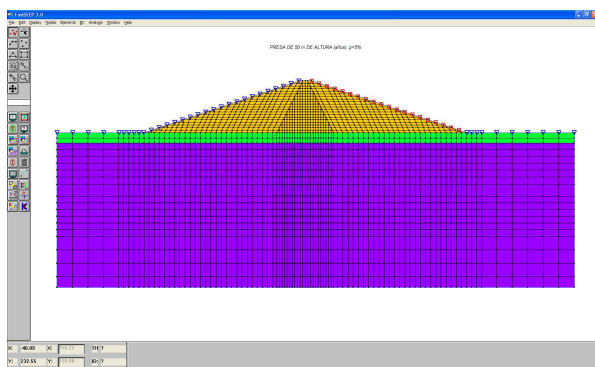
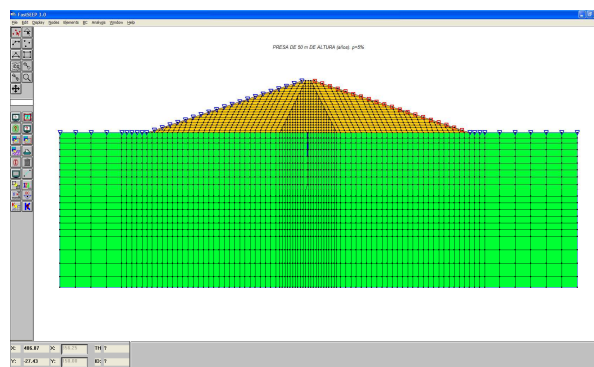
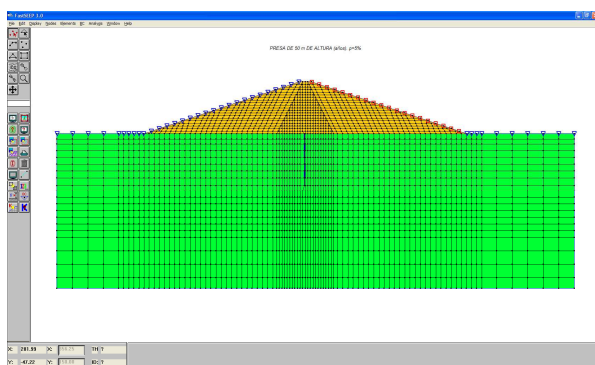
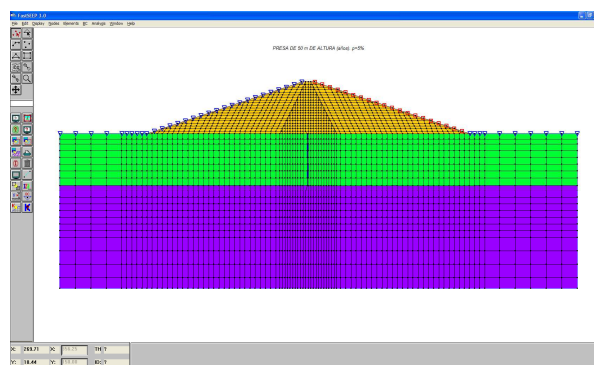
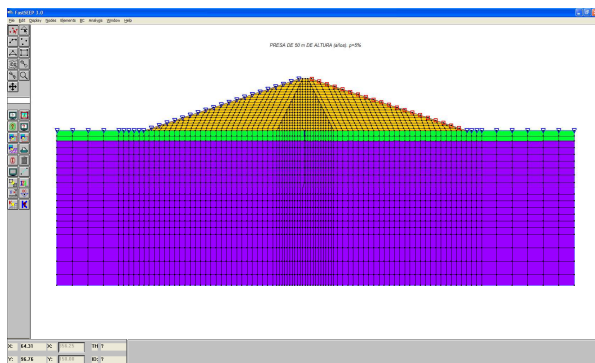
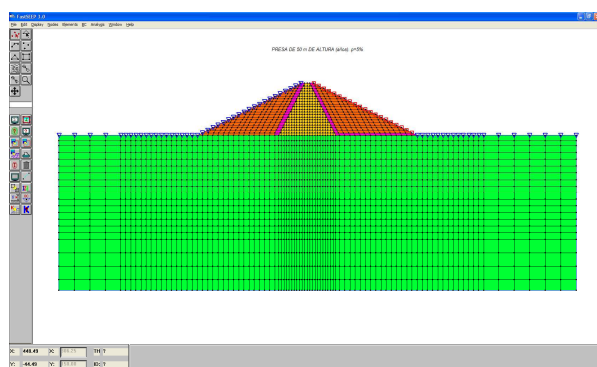
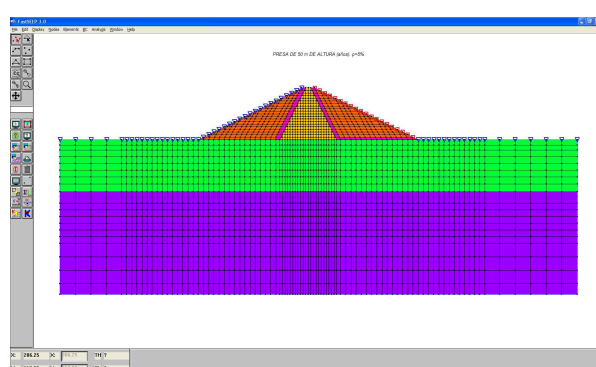
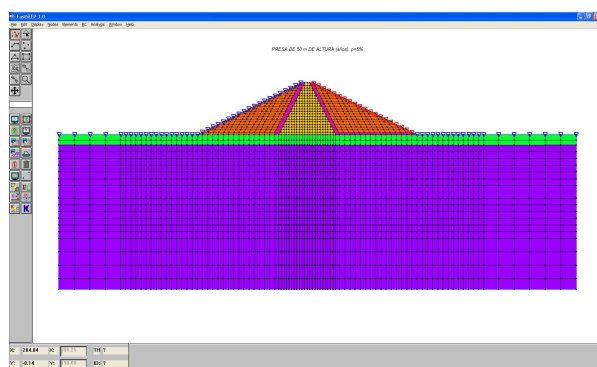
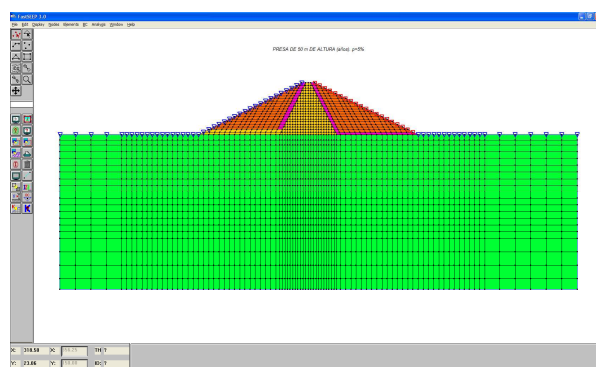
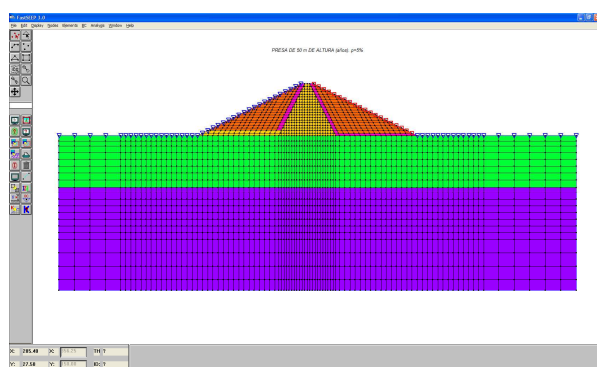
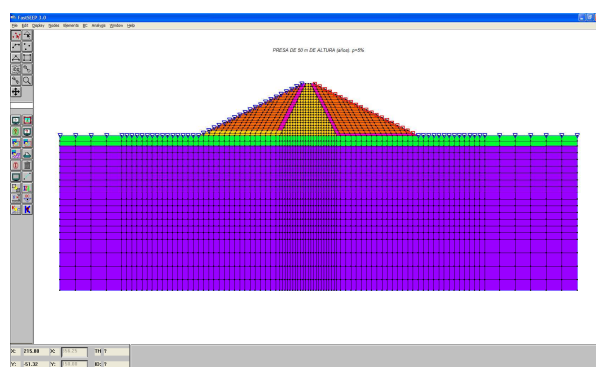
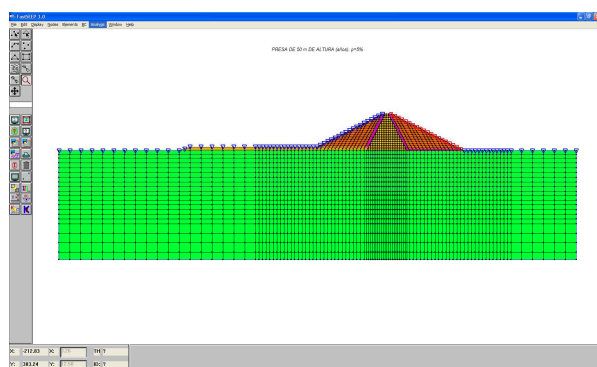
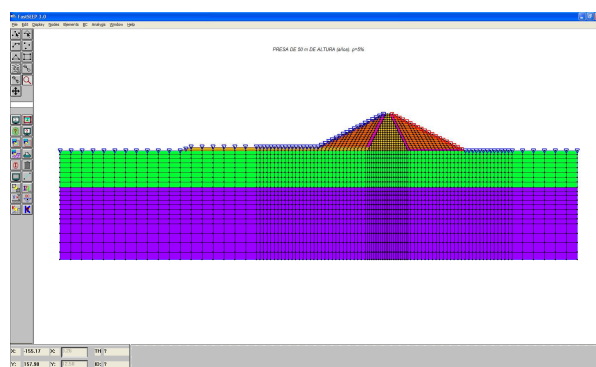
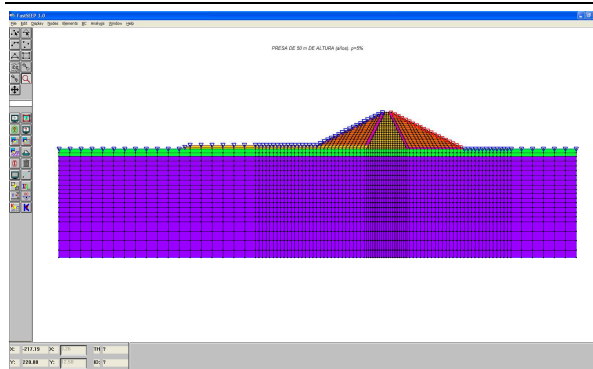
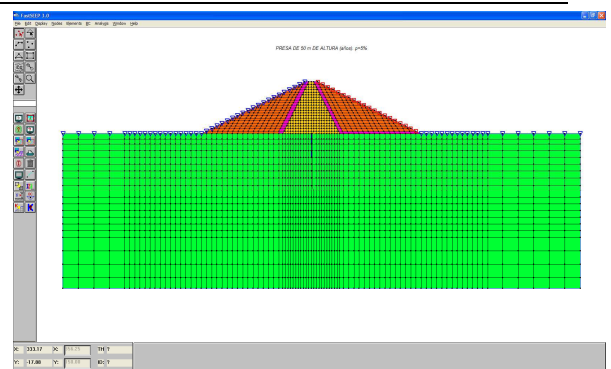
Modelo H₃HModelo H₁HModelo H_{0,2}HModelo HPC₃H_{0,5}Modelo HPC₃H₁Modelo HPC₁HModelo HPC_{0,2}H

FIGURA Nº 82 : Modelos geométricos de las presas homogéneas.

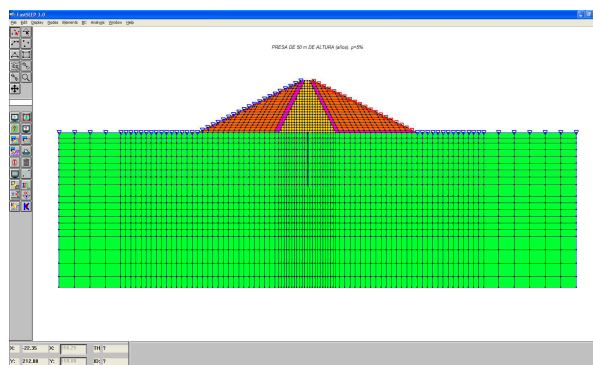
Modelo Z₃HModelo Z₁HModelo Z_{0,2}HModelo ZT₃HModelo ZT₁HModelo ZT_{0,2}HModelo ZTT₃HModelo ZTT₁H



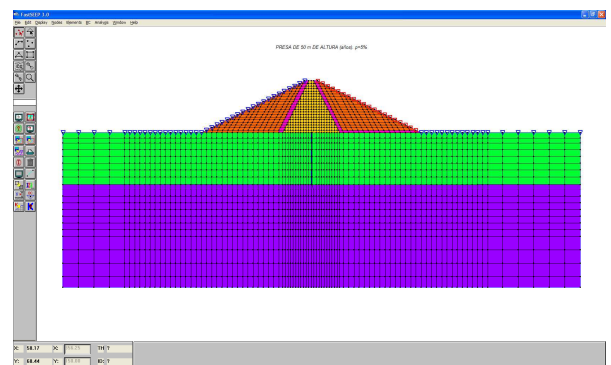
Modelo ZTTO,2H



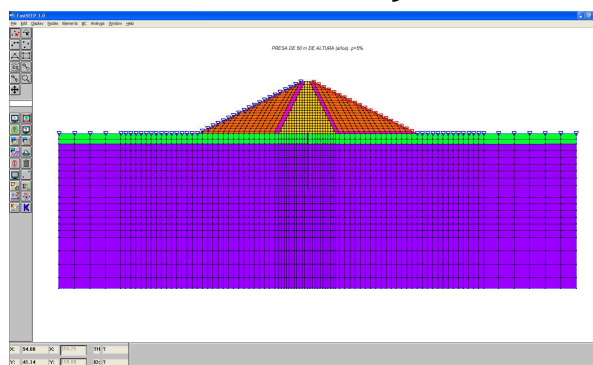
Modelo ZPC3H0,5



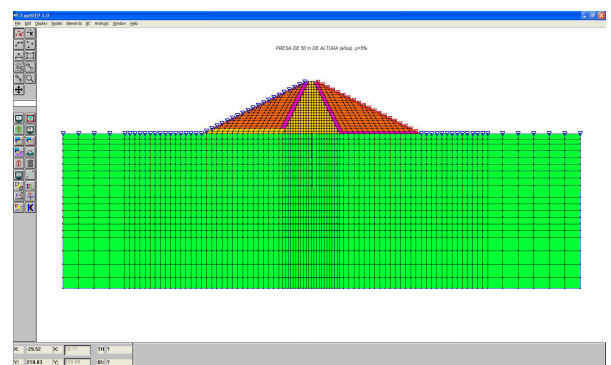
Modelo ZPC3H1



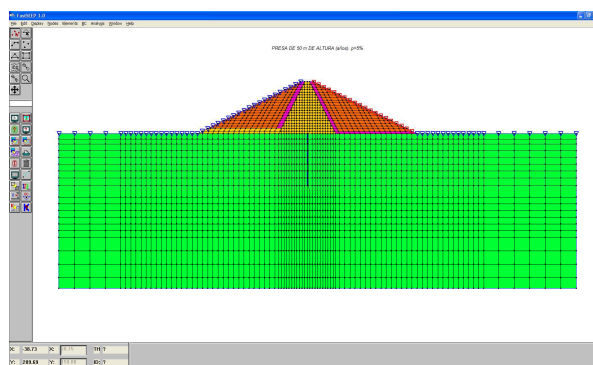
Modelo ZPC1H



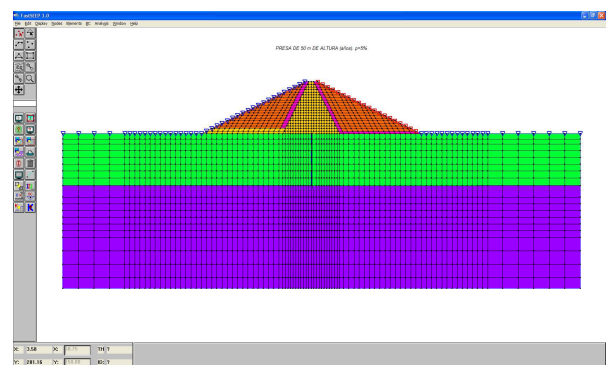
Modelo ZPC0,2H



Modelo ZTPC3H0,5



Modelo ZTPC3H1



Modelo ZTPC1H

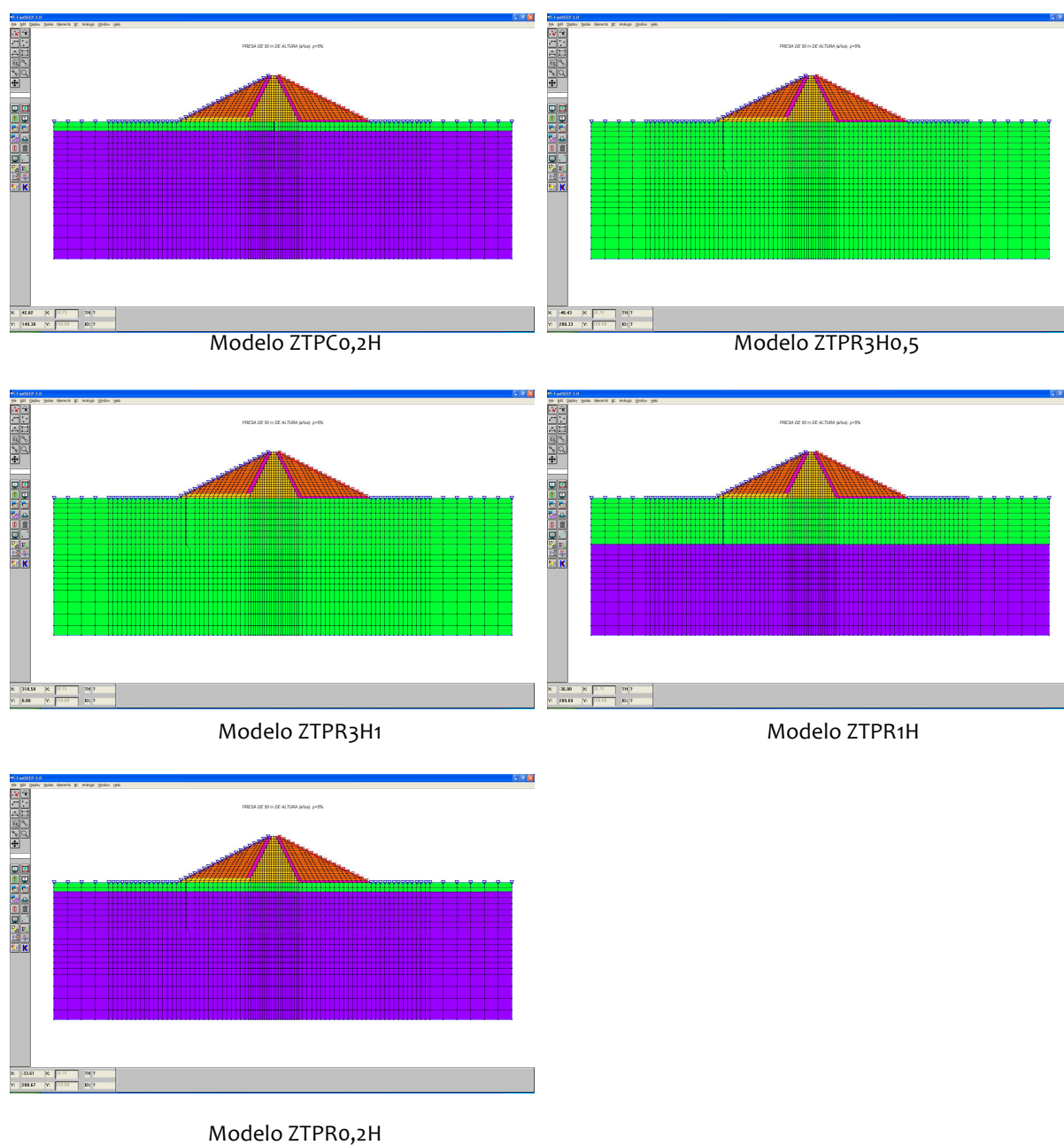


FIGURA N° 83 : Modelos geométricos de presas zonificadas.

En la TABLA N° 21 se muestran los modelos calculados, con las distintas relaciones E/H (espesor de la capa yesífera y altura de la presa), L_h/H (longitud del elemento horizontal impermeable y H), P/H (profundidad de la pantalla y H) y con Q_0 (caudal filtrado antes de la disolución, en $m^3/año$). La longitud mínima de la filtración en relación a la altura (penúltima columna) se ha estimado como la suma de L_h más la profundidad de la pantalla (modelos con pantalla).

Nótese que en los casos en que la capa yesífera tiene un espesor grande comparado con la altura de la presa ($3H$), se han realizado dos cálculos: uno con profundidad de la pantalla $1H$ y otro $0,5H$. Si la profundidad de la capa yesífera es H ó $0,2H$, la pantalla se ha considerado empotrada en la capa impermeable no yesífera, situada bajo la capa yesífera.

MODELOS	E/H	L_h/H	Pantalla	Tapiz	P/H	$(L_h+P)/H$	L_h+P	Q_0
H3H	3,0	6,25	NO	NO		6,250	312,50	5.023
H1H	1,0	6,25	NO	NO		6,250	312,50	2.234
H0.2H	0,2	6,25	NO	NO		6,250	312,50	507
HPC3H1	3,0	6,25	SI	NO	1,0	7,250	362,50	4.752
HPC3H0.5	3,0	6,25	SI	NO	0,5	6,750	337,50	4.963
HPC1H	1,0	6,25	SI, EMP	NO	1,0	7,250	362,50	725
HPC0.2H	0,2	6,25	SI, EMP	NO	0,2	6,450	322,50	189
Z3H	3,0	1,10	NO	NO		1,100	55,00	10.390
Z1H	1,0	1,10	NO	NO		1,100	55,00	5.836
Z0.2H	0,2	1,10	NO	NO		1,100	55,00	1.868
ZT3H	3,0	2,68	NO	SI		2,675	133,75	7.573
ZT1H	1,0	2,68	NO	SI		2,675	133,75	3.687
ZT0.2H	0,2	2,68	NO	SI		2,675	133,75	983
ZTT3H	3,0	6,25	NO	SI		6,250	312,50	4.737
ZTT1H	1,0	6,25	NO	SI		6,250	312,50	1.990
ZTT0.2H	0,2	6,25	NO	SI		6,250	312,50	463
ZTPR3H1	3,0	2,68	SI	SI	1,0	3,675	183,75	6.250
ZTPR3H0.5	3,0	2,68	SI	SI	0,5	3,175	158,75	7.020
ZTPR1H	1,0	2,68	SI, EMP	SI	1,0	3,675	183,75	799
ZTPR0.2H	0,2	2,68	SI, EMP	SI	0,2	2,875	143,75	217
ZPC3H1	3,0	1,10	SI	NO	1,0	2,100	105,00	8.345
ZPC3H0.5	3,0	1,10	SI	NO	0,5	1,600	80,00	9.674
ZPC1H	1,0	1,10	SI, EMP	NO	1,0	2,100	105,00	846
ZPC0.2H	0,2	1,10	SI, EMP	NO	0,2	1,300	65,00	220
ZTPC3H1	3,0	2,68	SI	SI	1,0	3,675	183,75	6.632
ZTPC3H0.5	3,0	2,68	SI	SI	0,5	3,175	158,75	7.250
ZTPC1H	1,0	2,68	SI, EMP	SI	1,0	3,675	183,75	792
ZTPC0.2H	0,2	2,68	SI, EMP	SI	0,2	2,875	143,75	206

*en azul se destacan los casos con pantalla total

TABLA N° 21 : Parámetros de los 28 modelos geométricos (combinación de distintas secciones tipo de presas y espesores de capa yesífera).

Dado que cada uno de los modelos geométricos de presa y cimentación se han calculado con 5 porcentajes de yeso distintos en la capa yesífera, todos los casos calculados (140) se muestran resumidos en la TABLA N° 22.

ALTURA	PORCENTAJE (FICHERO)	TIPOLOGÍA PRESA	E CAPA YESÍFERA	DIRECTORIO	PORCENTAJE (FICHERO)	TIPOLOGÍA PRESA	E CAPA YESÍFERA	DIRECTORIO
50	5% (h50p5)	HOMOGÉNEA	3H	H3H	10% (h50p10)	HOMOGÉNEA	3H	H3H
			1H	H1H			1H	H1H
			H/5	H0.2H			H/5	H0.2H
		HOMOGÉNEA CON PANTALLA CENTRADA	3H1	HPC3H1		HOMOGÉNEA CON PANTALLA CENTRADA	3H1	HPC3H1
			3H0.5	HPC3H0.5			3H0.5	HPC3H0.5
			1H	HPC1H			1H	HPC1H
		ZONIFICADA	H/5	HPC0.2H		ZONIFICADA	H/5	HPC0.2H
			3H	Z3H			3H	Z3H
			1H	Z1H			1H	Z1H
		ZONIFICADA CON TAPIZ	H/5	Z0.2H		ZONIFICADA CON TAPIZ	H/5	Z0.2H
			3H	ZT3H			3H	ZT3H
			1H	ZT1H			1H	ZT1H
		ZONIFICADA CON TAPIZ MÁS LARGO	H/5	ZT0.2H		ZONIFICADA CON TAPIZ MÁS LARGO	H/5	ZT0.2H
			3H1	ZTPR3H1			3H1	ZTPR3H1
			3H0.5	ZTPR3H0.5			3H0.5	ZTPR3H0.5
		ZONIFICADA CON TAPIZ Y CON PANTALLA ARRIBA	1H	ZTPR1H		ZONIFICADA CON TAPIZ Y CON PANTALLA ARRIBA	1H	ZTPR1H
			H/5	ZTPR0.2H			H/5	ZTPR0.2H
		ZONIFICADA CON PANTALLA CENTRADA	3H1	ZPC3H1		ZONIFICADA CON PANTALLA CENTRADA	3H1	ZPC3H1
			3H0.5	ZPC3H0.5			3H0.5	ZPC3H0.5
			1H	ZPC1H			1H	ZPC1H
		ZONIFICADA CON TAPIZ Y CON PANTALLA CENTRADA	H/5	ZPC0.2H		ZONIFICADA CON TAPIZ Y CON PANTALLA CENTRADA	H/5	ZPC0.2H
			3H1	ZTPC3H1			3H1	ZTPC3H1
			3H0.5	ZTPC3H0.5			3H0.5	ZTPC3H0.5
			1H	ZTPC1H			1H	ZTPC1H
			H/5	ZTPC0.2H			H/5	ZTPC0.2H
	20% (h50p20)	HOMOGÉNEA	3H	H3H	30% (h50p30)	HOMOGÉNEA	3H	H3H
			1H	H1H			1H	H1H
			H/5	H0.2H			H/5	H0.2H
		HOMOGÉNEA CON PANTALLA CENTRADA	3H1	HPC3H1		HOMOGÉNEA CON PANTALLA CENTRADA	3H1	HPC3H1
			3H0.5	HPC3H0.5			3H0.5	HPC3H0.5
			1H	HPC1H			1H	HPC1H
		ZONIFICADA	H/5	HPC0.2H		ZONIFICADA	H/5	HPC0.2H
			3H	Z3H			3H	Z3H
			1H	Z1H			1H	Z1H
		ZONIFICADA CON TAPIZ	H/5	Z0.2H		ZONIFICADA CON TAPIZ	H/5	Z0.2H
			3H	ZT3H			3H	ZT3H
			1H	ZT1H			1H	ZT1H
		ZONIFICADA CON TAPIZ MÁS LARGO	H/5	ZT0.2H		ZONIFICADA CON TAPIZ MÁS LARGO	H/5	ZT0.2H
			3H	ZTT3H			3H	ZTT3H
			1H	ZTT1H			1H	ZTT1H
		ZONIFICADA CON TAPIZ Y CON PANTALLA ARRIBA	H/5	ZTT0.2H		ZONIFICADA CON TAPIZ Y CON PANTALLA ARRIBA	H/5	ZTT0.2H
			3H1	ZTPR3H1			3H1	ZTPR3H1
			3H0.5	ZTPR3H0.5			3H0.5	ZTPR3H0.5
		ZONIFICADA CON PANTALLA CENTRADA	1H	ZTPR1H		ZONIFICADA CON PANTALLA CENTRADA	1H	ZTPR1H
			H/5	ZTPR0.2H			H/5	ZTPR0.2H
		ZONIFICADA CON TAPIZ Y CON PANTALLA CENTRADA	3H1	ZPC3H1		ZONIFICADA CON TAPIZ Y CON PANTALLA CENTRADA	3H1	ZPC3H1
			3H0.5	ZPC3H0.5			3H0.5	ZPC3H0.5
			1H	ZPC1H			1H	ZPC1H
	40% (h50p40)	HOMOGÉNEA	H/5	ZPC0.2H		HOMOGÉNEA	H/5	ZPC0.2H
			3H1	ZTPC3H1			3H1	ZTPC3H1
			3H0.5	ZTPC3H0.5			3H0.5	ZTPC3H0.5
		HOMOGÉNEA CON PANTALLA CENTRADA	1H	ZTPC1H		HOMOGÉNEA CON PANTALLA CENTRADA	1H	ZTPC1H
			H/5	ZTPC0.2H			H/5	ZTPC0.2H
		ZONIFICADA	3H1	ZTPC3H1		ZONIFICADA	3H1	ZTPC3H1
			3H0.5	ZTPC3H0.5			3H0.5	ZTPC3H0.5
			1H	ZTPC1H			1H	ZTPC1H
		ZONIFICADA CON TAPIZ	H/5	ZTPC0.2H		ZONIFICADA CON TAPIZ	H/5	ZTPC0.2H
			3H	ZT3H			3H	ZT3H
			1H	ZT1H			1H	ZT1H
		ZONIFICADA CON TAPIZ MÁS LARGO	H/5	ZT0.2H		ZONIFICADA CON TAPIZ MÁS LARGO	H/5	ZT0.2H
			3H	ZTT3H			3H	ZTT3H
			1H	ZTT1H			1H	ZTT1H
		ZONIFICADA CON TAPIZ Y CON PANTALLA ARRIBA	H/5	ZTT0.2H		ZONIFICADA CON TAPIZ Y CON PANTALLA ARRIBA	H/5	ZTT0.2H
			3H1	ZTPR3H1			3H1	ZTPR3H1
			3H0.5	ZTPR3H0.5			3H0.5	ZTPR3H0.5
		ZONIFICADA CON PANTALLA CENTRADA	1H	ZTPR1H		ZONIFICADA CON PANTALLA CENTRADA	1H	ZTPR1H
			H/5	ZTPR0.2H			H/5	ZTPR0.2H
		ZONIFICADA CON TAPIZ Y CON PANTALLA CENTRADA	3H1	ZPC3H1		ZONIFICADA CON TAPIZ Y CON PANTALLA CENTRADA	3H1	ZPC3H1
			3H0.5	ZPC3H0.5			3H0.5	ZPC3H0.5
			1H	ZPC1H			1H	ZPC1H
			H/5	ZPC0.2H			H/5	ZPC0.2H
			3H1	ZTPC3H1			3H1	ZTPC3H1
			3H0.5	ZTPC3H0.5			3H0.5	ZTPC3H0.5
			1H	ZTPC1H			1H	ZTPC1H
			H/5	ZTPC0.2H			H/5	ZTPC0.2H

TABLA N° 22 : Casos calculados (combinaciones de distintas secciones tipo de presa, espesores de capa yesífera y porcentajes de yeso).

6.1.5. Resultados de la campaña de experimentación numérica

En cuanto a la campaña de experimentación numérica se han diferenciado los resultados mediante el cálculo con *DISOLUCIÓN2D* para cada modelo geométrico (combinación de sección tipo de presa y cimiento), que permiten analizar la influencia de las distintas variables y los resultados para cada tipo de cimiento (combinación de espesor de capa yesífera con porcentaje de yeso), que permiten la comparación de secciones tipo de presas. El primer grupo lo constituyen 28 combinaciones y el segundo grupo, 15.

6.1.5.1. Resultados de los cálculos de los modelos geométricos de presa y cimiento

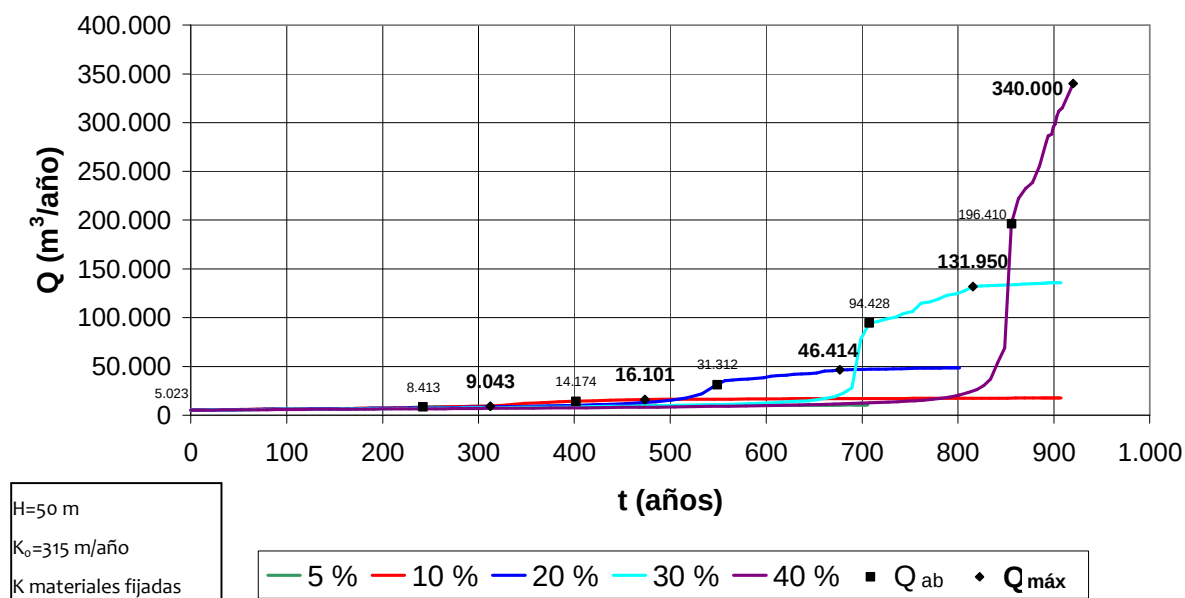
Primeramente, para los 28 modelos geométricos (combinación de sección tipo y espesor de capa soluble) se han obtenido los gráficos de caudales filtrados en función del tiempo para ver su evolución (para los distintos porcentajes de yeso analizados). También se han elaborado gráficos de los parámetros característicos obtenidos tras los cálculos (t_{ab} , $t_{m\acute{a}x}$, Q_{ab} , $Q_{m\acute{a}x}$ y FA) en función del porcentaje de yeso.

Se enumeran a continuación los diversos gráficos que se han obtenido para cada modelo geométrico (y que se adjuntan en el Apéndice N° 2. En negrita se destacan los gráficos adimensionales):

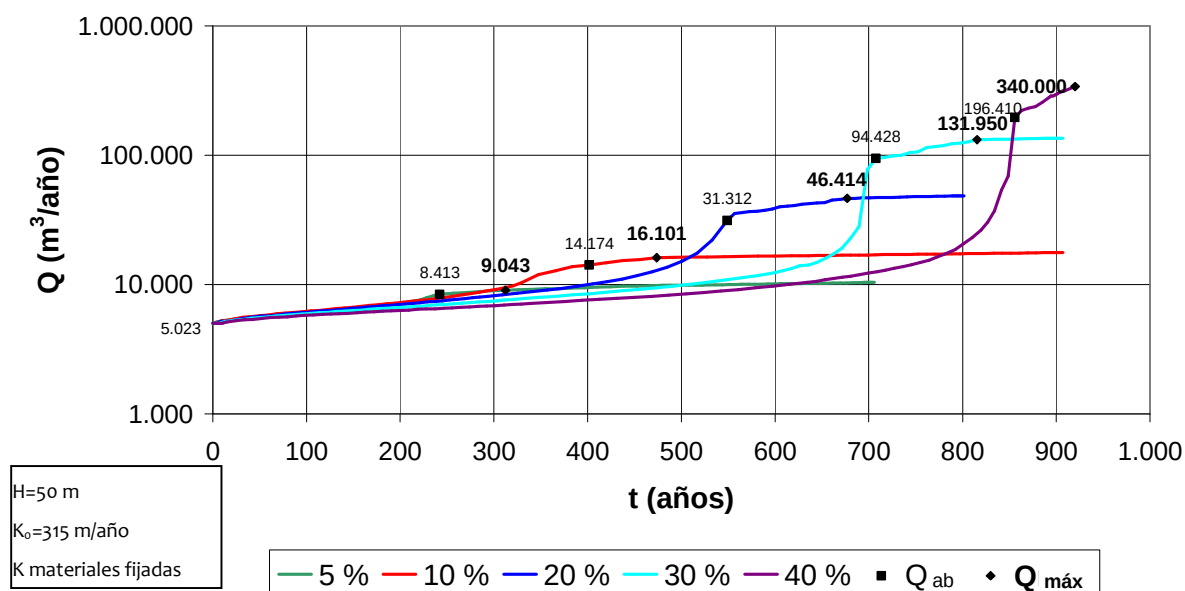
- tiempo-caudal filtrado ($t - Q$)
- tiempo-caudal filtrado/caudal inicial ($t - Q/Q_o$)
- **tiempo adimensional-caudal filtrado/caudal inicial (t adimensional - Q/Q_o)**
- **tiempo adimensional-caudal adimensional (t adimensional - Q adimensional)**
- porcentaje de yeso - t_{ucte} , t_{ab} y $t_{m\acute{a}x}$
- **porcentaje de yeso - t_{ab} adimensional**
- **porcentaje de yeso - $t_{m\acute{a}x}$ adimensional**
- porcentaje de yeso - Q_{ab} y $Q_{m\acute{a}x}$
- **porcentaje de yeso - Q_{ab} adimensional**
- **porcentaje de yeso - $Q_{m\acute{a}x}$ adimensional**
- porcentaje de yeso - K_{td}/K_o , Q_{ab}/Q_o y $Q_{m\acute{a}x}/Q_o$
- porcentaje de yeso - FA

Como ejemplo, se adjuntan los gráficos (desde la FIGURA N° 84 a la FIGURA N° 96) de resultados para el caso H3H (presa homogénea con capa yesífera de espesor 3 veces la altura de la presa).

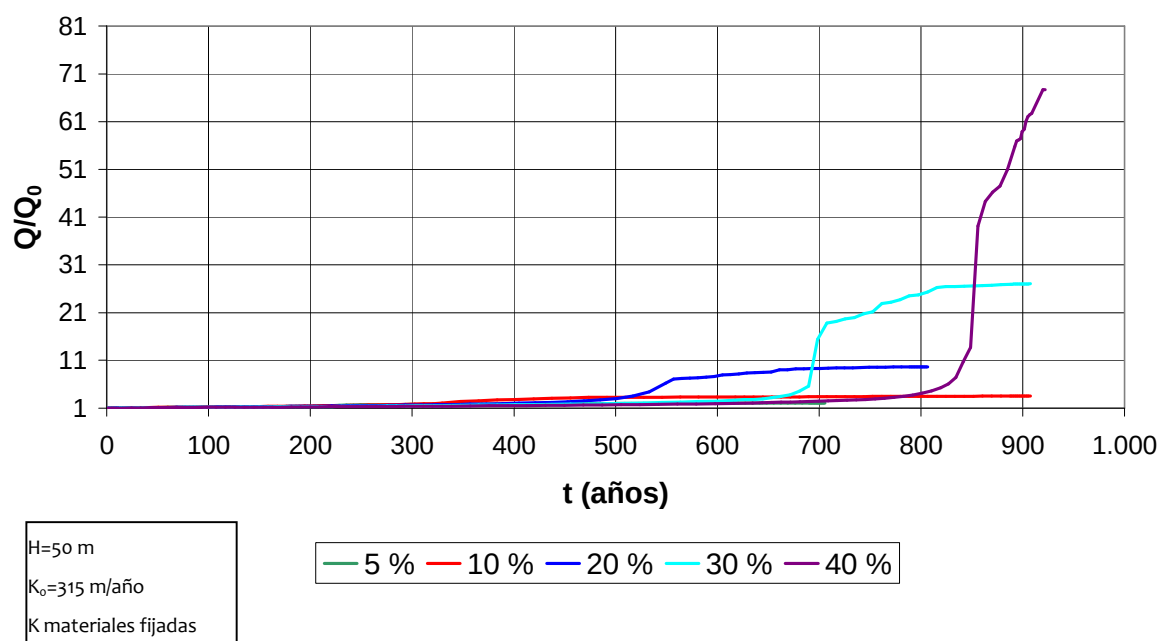
PRESA HOMOGÉNEA SIN PANTALLA (L/H=6,25) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)

FIGURA N° 84 : Gráfico t - Q, para H₃H.

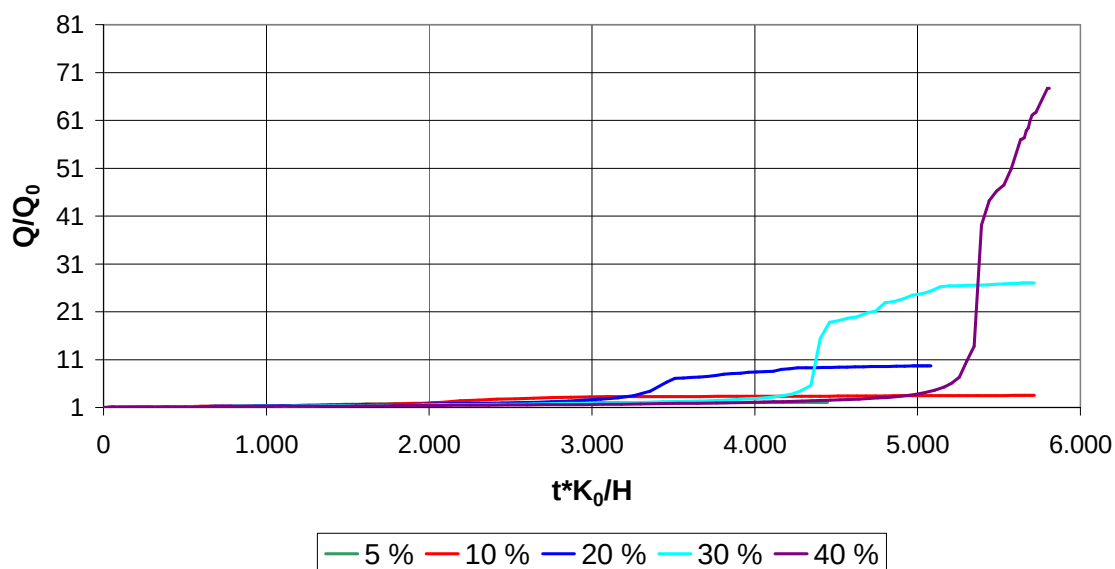
PRESA HOMOGÉNEA SIN PANTALLA (L/H=6,25) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)

FIGURA N° 85 : Gráfico t - Q (escala logarítmica), para H₃H.

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

FIGURA N° 86 : Gráfico t - Q/Q_0 , para H_3H .

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

FIGURA N° 87 : Gráfico t adimensional - Q/Q_0 , para H_3H .

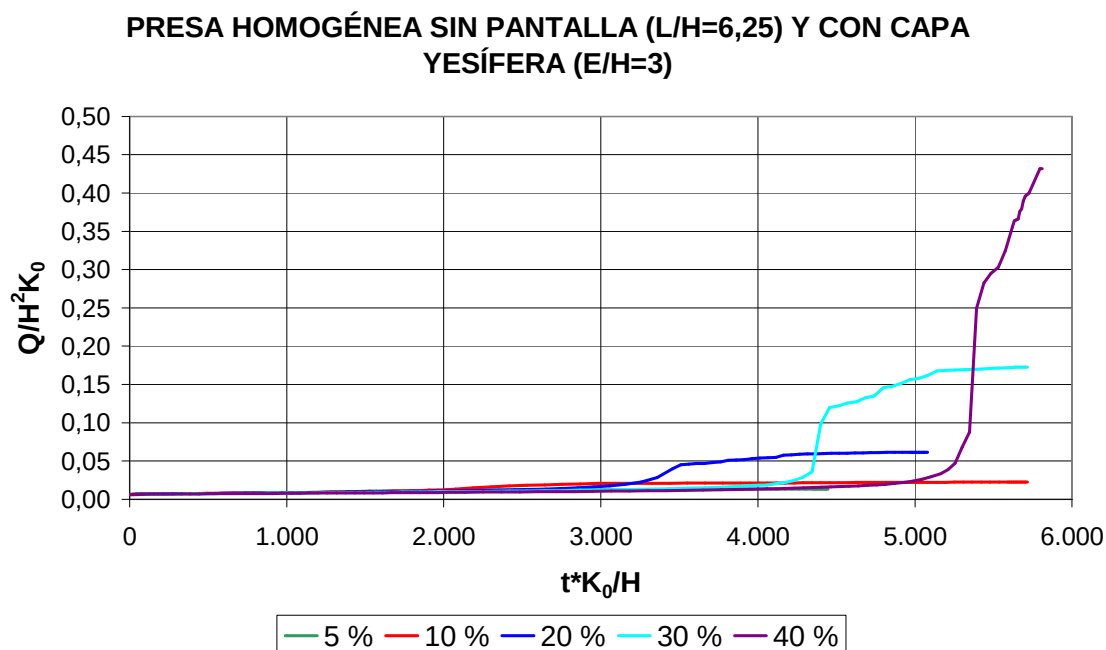
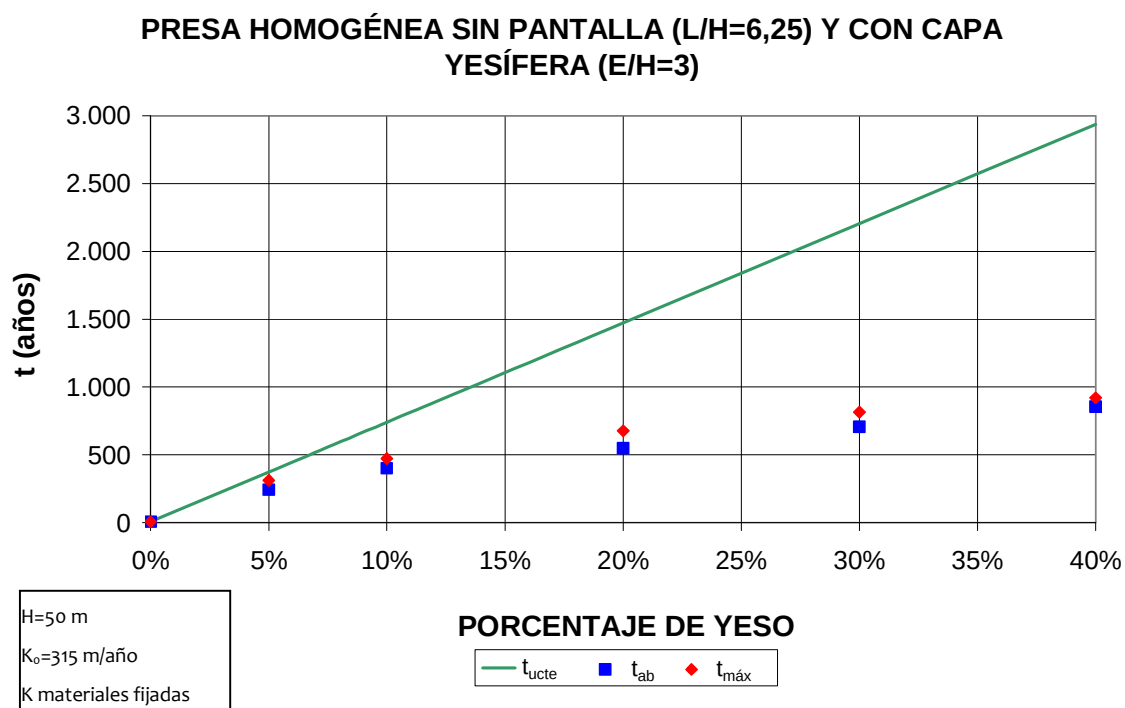


FIGURA Nº 88 : Gráfico t adimensional - Q adimensional, para H3H.

FIGURA Nº 89 : Gráfico porcentaje de yeso - t_{ab} y $t_{m\acute{a}x}$, para H3H.

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

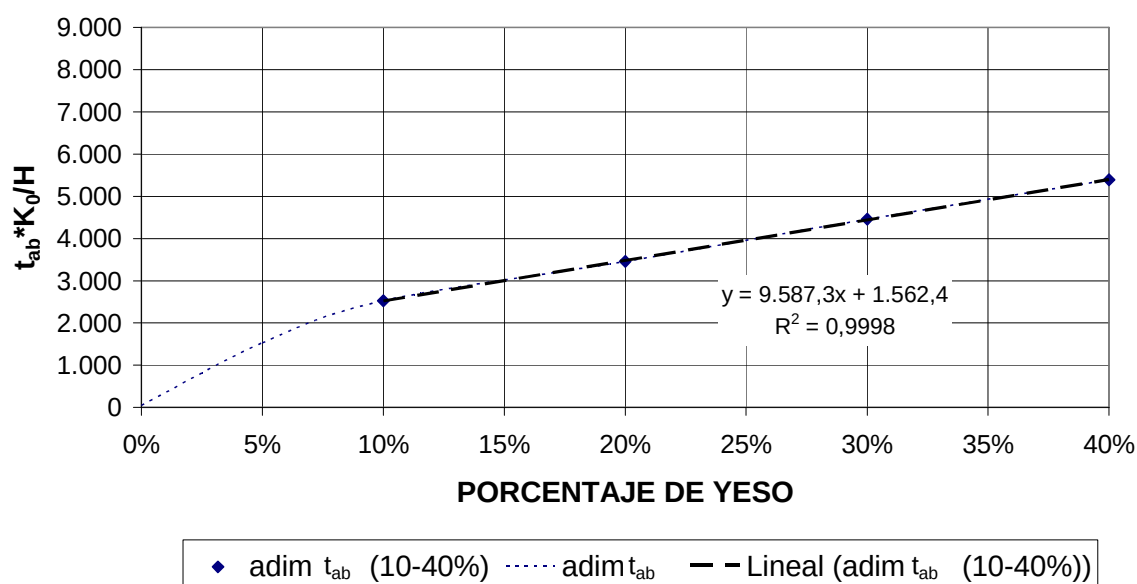


FIGURA N° 90 : Gráfico porcentaje de yeso - t_{ab} adimensional, para H₃H.

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

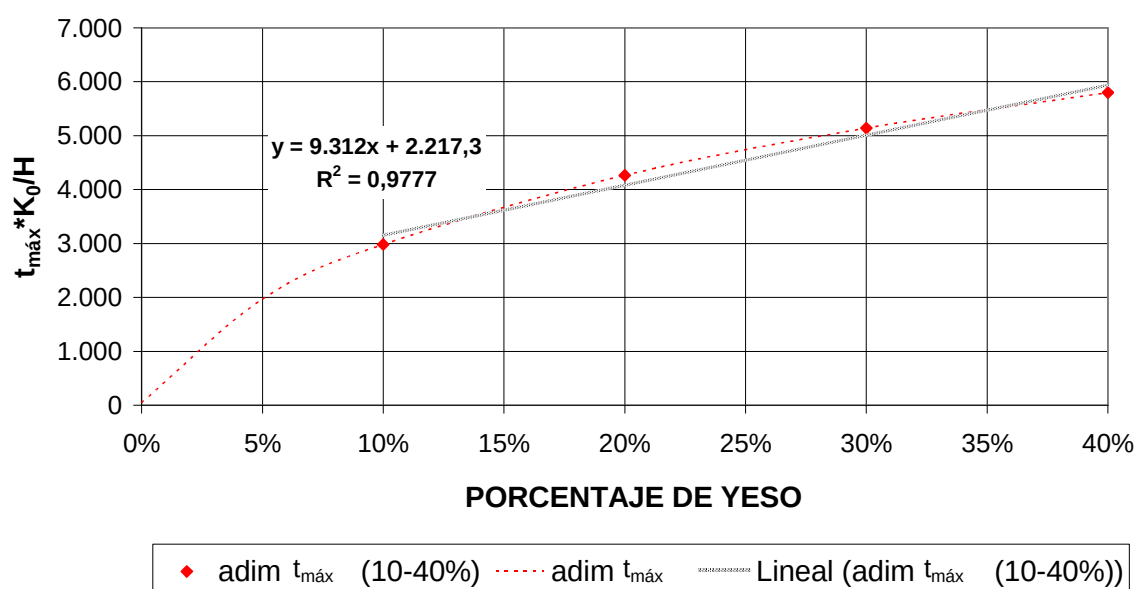


FIGURA N° 91 : Gráfico porcentaje de yeso - $t_{m\acute{a}x}$ adimensional, para H₃H.

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

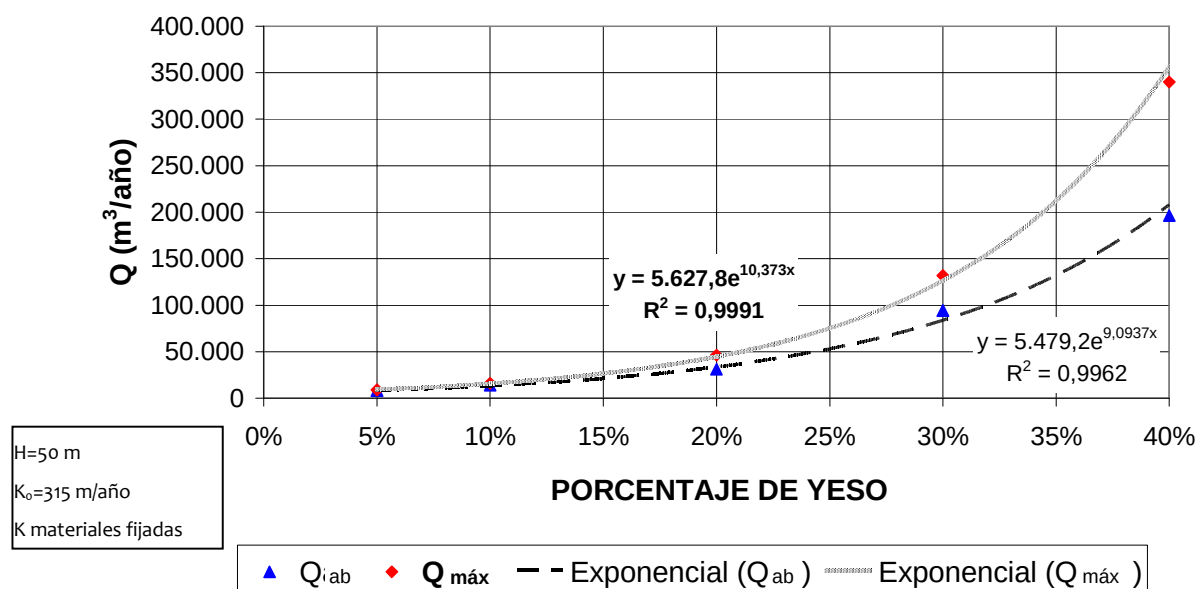
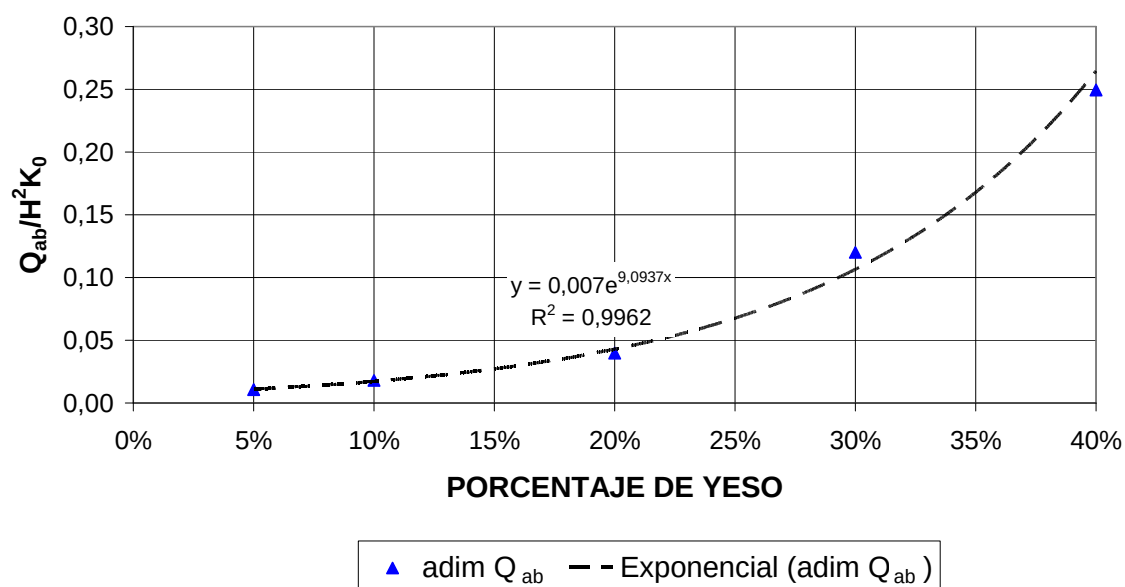


FIGURA N° 92 : Gráfico porcentaje de yeso - Q, para H3H.

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

FIGURA N° 93 : Gráfico porcentaje de yeso - Q_{ab} adimensional, para H3H.

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

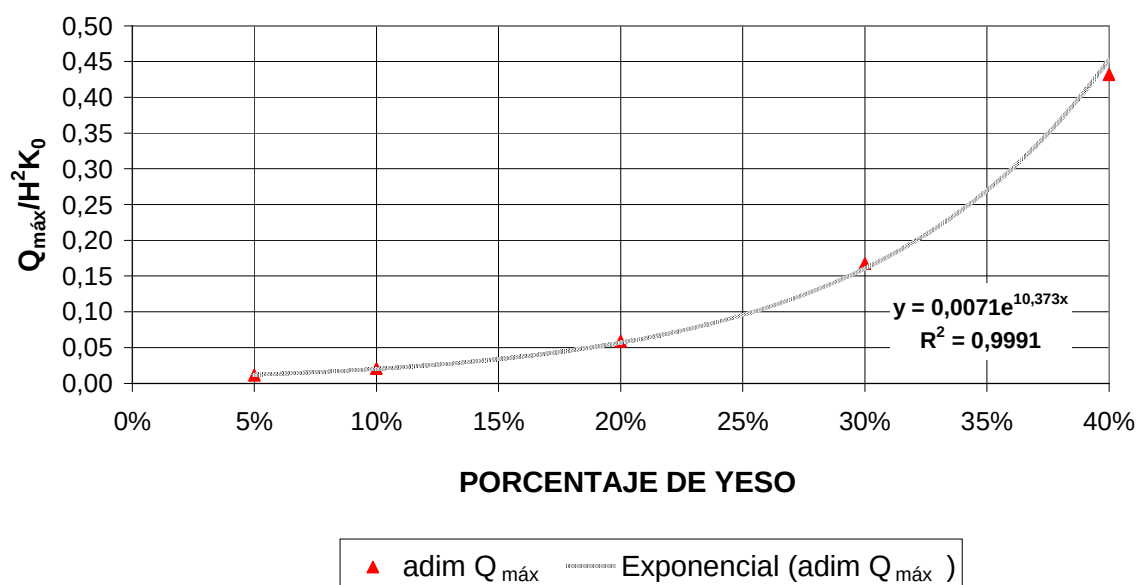


FIGURA Nº 94 : Gráfico porcentaje de yeso - $Q_{\text{máx}}$ adimensional, para H3H.

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

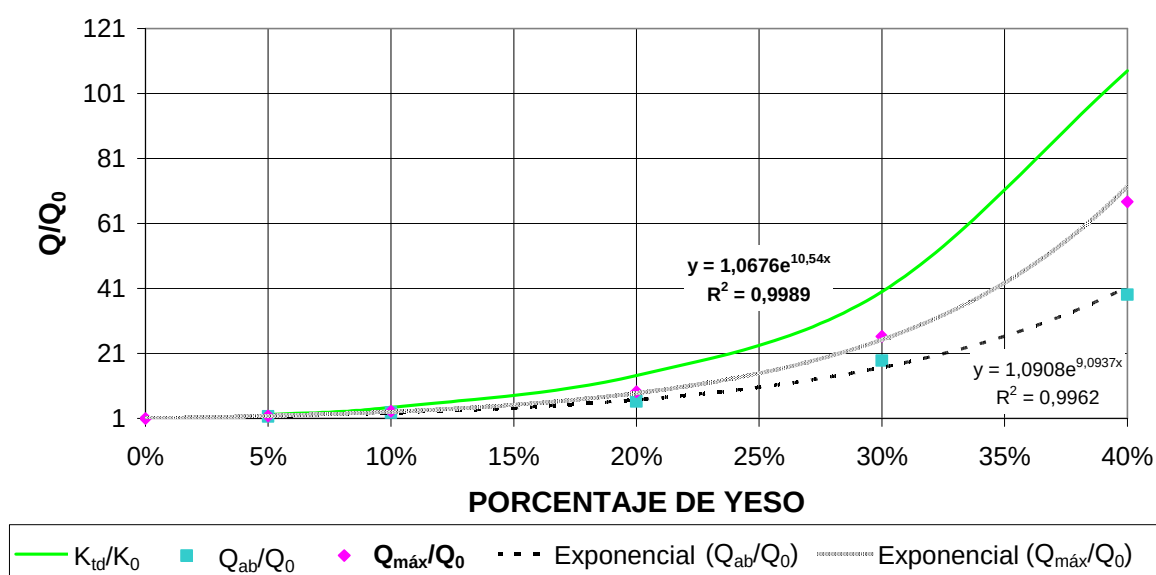


FIGURA Nº 95 : Gráfico porcentaje de yeso - Q_{ab}/Q_0 y $Q_{\text{máx}}/Q_0$, para H3H.

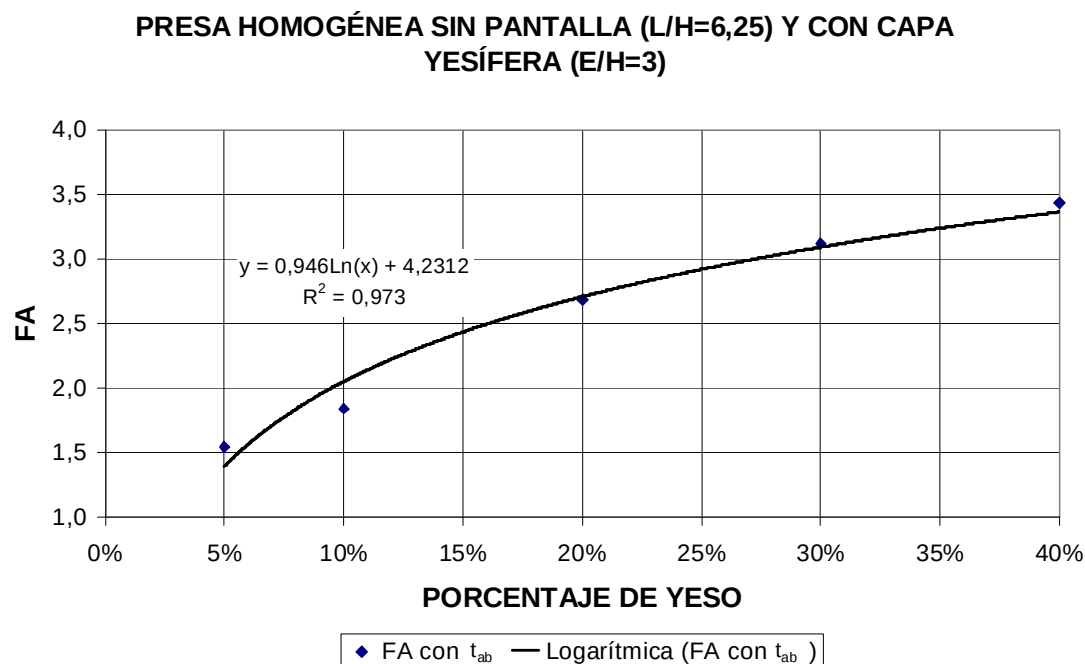


FIGURA N° 96 : Gráfico porcentaje de yeso - FA, para H3H.

En el Apéndice N° 2 se adjuntan los gráficos de resultados de los 27 modelos restantes.

También se ha querido resumir en forma de tabla (TABLA N° 23) los parámetros más importantes, para tener un orden de magnitud de estos resultados, para el caso de una presa de 50 m de altura, con unas permeabilidades iniciales en la capa yesífera de 10^{-5} m/s y en la capa no yesífera inferior a la capa citada (en los modelos en los que existe) de 10^{-8} m/s y con una relación de permeabilidades entre los materiales similar a la fijada en la TABLA N° 19:

PORCENTAJE (FICHERO)	TIPOLOGÍA PRESA H=50 m	E CAPA YESÍFERA	DIRECTORIO	Q ₀ (m³/año/m)	FF	t _{ab} (años)	Q _{ab} (m³/año/m)	Q _{ab} /Q ₀	t _{ucte} (años)	FA
5% (h50p5)	HOMOGÉNEA	3H	H3H	5023	0,67	242	8413	1,67	374	1,55
		1H	H1H	2234	0,89	233	4146	1,86	349	1,50
		H/5	H0.2H	507	1,00	286	983	1,94	328	1,15
	HOMOGÉNEA CON PANTALLA CENTRADA	3H1	HPC3H1	4752	0,73	316	8238	1,73	430	1,36
		3H0.5	HPC3H0.5	4963	0,71	244	8034	1,62	369	1,51
		1H	HPC1H	725	0,38	909	852	1,18	1028	1,13
	ZONIFICADA	H/5	HPC0.2H	189	0,40	978	227	1,20	1149	1,17
		3H	Z3H	10390	0,24	18	13041	1,26	25	1,39
		1H	Z1H	5836	0,41	18	8108	1,39	22	1,22
	ZONIFICADA CON TAPIZ	H/5	Z0.2H	1868	0,65	15	3003	1,61	20	1,33
		3H	ZT3H	7480	0,43	65	10375	1,39	95	1,46
		1H	ZT1H	3687	0,63	62	5571	1,51	89	1,44
	ZONIFICADA CON TAPIZ MÁS LARGO	H/5	ZT0.2H	983	0,83	74	1800	1,83	85	1,15
		3H	ZTT3H	4737	0,63	291	7200	1,52	438	1,51
		1H	ZTT1H	1990	0,79	305	3454	1,74	416	1,36
	ZONIFICADA CON TAPIZ Y CON PANTALLA ARRIBA	H/5	ZTT0.2H	463	0,91	373	850	1,84	402	1,08
		3H1	ZTPR3H1	6250	0,49	133	9579	1,53	180	1,35
		3H0.5	ZTPR3H0.5	7020	0,47	85	9985	1,42	125	1,47
	ZONIFICADA CON PANTALLA CENTRADA	1H	ZTPR1H	799	0,24	399	862	1,08	451	1,13
		H/5	ZTPR0.2H	217	0,22	399	237	1,09	477	1,20
		3H1	ZPC3H1	8345	0,37	67	11872	1,42	97	1,45
	ZONIFICADA CON TAPIZ Y CON PANTALLA CENTRADA	3H0.5	ZPC3H0.5	9674	0,33	27	12583	1,30	44	1,63
		1H	ZPC1H	846	0,17	176	878	1,04	180	1,02
		H/5	ZPC0.2H	220	0,11	199	229	1,04	202	1,02
	ZONIFICADA CON TAPIZ Y CON PANTALLA CENTRADA	3H1	ZTPC3H1	6632	0,52	122	10271	1,55	175	1,43
		3H0.5	ZTPC3H0.5	7250	0,49	80	10416	1,44	116	1,45
		1H	ZTPC1H	792	0,23	369	850	1,07	462	1,25
		H/5	ZTPC0.2H	206	0,20	415	223	1,09	555	1,34

PORCENTAJE (FICHERO)	TIPOLOGÍA PRESA H=50 m	E CAPA YESÍFERA	DIRECTORIO	Q ₀ (m³/año/m)	FF	t _{ab} (años)	Q _{ab} (m³/año/m)	Q _{ab} /Q ₀	t _{ucte} (años)	FA
10% (h50p10)	HOMOGÉNEA	3H	H3H	5023	0,67	402	14174	2,82	740	1,84
		1H	H1H	2234	0,89	396	7451	3,34	690	1,74
		H/5	H0.2H	507	1,00	487	1720	3,39	649	1,33
	HOMOGÉNEA CON PANTALLA CENTRADA	3H1	HPC3H1	4752	0,73	421	12832	2,70	850	2,02
		3H0.5	HPC3H0.5	4963	0,71	368	13227	2,67	729	1,98
		1H	HPC1H	725	0,38	1615	931	1,28	2036	1,26
	ZONIFICADA	H/5	HPC0.2H	189	0,40	1784	253	1,34	2274	1,27
		3H	Z3H	10390	0,24	26	15677	1,51	49	1,88
		1H	Z1H	5836	0,41	26	10631	1,82	44	1,69
	ZONIFICADA CON TAPIZ	H/5	Z0.2H	1868	0,65	25	4249	2,27	39	1,56
		3H	ZT3H	7480	0,43	112	15162	2,03	189	1,69
		1H	ZT1H	3687	0,63	103	8686	2,36	176	1,71
	ZONIFICADA CON TAPIZ MÁS LARGO	H/5	ZT0.2H	983	0,83	107	2669	2,72	167	1,56
		3H	ZTT3H	4737	0,63	485	11640	2,46	866	1,79
		1H	ZTT1H	1990	0,79	500	5814	2,92	823	1,65
	ZONIFICADA CON TAPIZ Y CON PANTALLA ARRIBA	H/5	ZTT0.2H	463	0,91	618	1379	2,98	796	1,29
		3H1	ZTPR3H1	6250	0,49	201	13772	2,20	357	1,78
		3H0.5	ZTPR3H0.5	7020	0,47	129	14164	2,02	247	1,91
	ZONIFICADA CON PANTALLA CENTRADA	1H	ZTPR1H	799	0,24	652	897	1,12	893	1,37
		H/5	ZTPR0.2H	217	0,22	732	246	1,14	943	1,29
		3H1	ZPC3H1	8345	0,37	94	15964	1,91	192	2,04
	ZONIFICADA CON TAPIZ Y CON PANTALLA CENTRADA	3H0.5	ZPC3H0.5	9674	0,33	44	16399	1,70	87	1,98
		1H	ZPC1H	846	0,17	294	893	1,05	356	1,21
		H/5	ZPC0.2H	220	0,11	332	233	1,06	400	1,20
	ZONIFICADA CON TAPIZ Y CON PANTALLA CENTRADA	3H1	ZTPC3H1	6632	0,52	184	15171	2,29	347	1,89
		3H0.5	ZTPC3H0.5	7250	0,49	110	13606	1,88	230	2,09
		1H	ZTPC1H	792	0,23	715	888	1,12	914	1,28
		H/5	ZTPC0.2H	206	0,20	738	234	1,14	1098	1,49

TABLA N° 23 : Parámetros de los casos calculados (presa de 50 m de altura, con permeabilidad inicial de la capa yesífera de 10⁻⁵ m/s y relaciones de permeabilidades fijadas).

PORCENTAJE (FICHERO)	TIPOLOGÍA PRESA H=50 m	E CAPA YESÍFERA	DIRECTORIO	Q ₀ (m³/año/m)	FF	t _{ab} (años)	Q _{ab} (m³/año/m)	Q _{ab} /Q ₀	t _{ucte} (años)	FA
20% (h50p20)	HOMOGÉNEA	3H	H3H	5023	0,67	549	31312	6,23	1473	2,68
		1H	H1H	2234	0,89	583	18969	8,49	1373	2,36
		H/5	H0.2H	507	1,00	765	4261	8,41	1293	1,69
	HOMOGÉNEA CON PANTALLA CENTRADA	3H1	HPC3H1	4752	0,73	609	37347	7,86	1692	2,78
		3H0.5	HPC3H0.5	4963	0,71	550	36340	7,32	1451	2,64
		1H	HPC1H	725	0,38	2744	1010	1,39	4050	1,48
	ZONIFICADA	H/5	HPC0.2H	189	0,40	3780	282	1,49	4525	1,20
		3H	Z3H	10390	0,24	42	20491	1,97	97	2,31
		1H	Z1H	5836	0,41	41	15529	2,66	89	2,17
	ZONIFICADA CON TAPIZ	H/5	Z0.2H	1868	0,65	42	7956	4,26	78	1,86
		3H	ZT3H	7480	0,43	158	25710	3,44	375	2,37
		1H	ZT1H	3687	0,63	158	15161	4,11	350	2,22
	ZONIFICADA CON TAPIZ MÁS LARGO	H/5	ZT0.2H	983	0,83	183	5256	5,35	333	1,82
		3H	ZTT3H	4737	0,63	657	19894	4,20	1724	2,62
		1H	ZTT1H	1990	0,79	652	10538	5,30	1638	2,51
	ZONIFICADA CON TAPIZ Y CON PANTALLA ARRIBA	H/5	ZTT0.2H	463	0,91	969	3510	7,59	1585	1,64
		3H1	ZTPR3H1	6250	0,49	282	25695	4,11	710	2,52
		3H0.5	ZTPR3H0.5	7020	0,47	184	23297	3,32	491	2,67
	ZONIFICADA CON PANTALLA CENTRADA	1H	ZTPR1H	799	0,24	1415	956	1,20	1777	1,26
		H/5	ZTPR0.2H	217	0,22	1338	256	1,18	1877	1,40
		3H1	ZPC3H1	8345	0,37	152	30203	3,62	383	2,52
	ZONIFICADA CON TAPIZ Y CON PANTALLA CENTRADA	3H0.5	ZPC3H0.5	9674	0,33	65	23168	2,39	173	2,66
		1H	ZPC1H	846	0,17	515	915	1,08	709	1,38
		H/5	ZPC0.2H	220	0,11	565	236	1,07	796	1,41
	ZONIFICADA CON TAPIZ Y CON PANTALLA CENTRADA	3H1	ZTPC3H1	6632	0,52	258	30810	4,65	690	2,67
		3H0.5	ZTPC3H0.5	7250	0,49	157	21156	2,92	458	2,92
		1H	ZTPC1H	792	0,23	1211	931	1,18	1818	1,50
	ZONIFICADA CON TAPIZ Y CON PANTALLA CENTRADA	H/5	ZTPC0.2H	206	0,20	1421	245	1,19	2185	1,54

PORCENTAJE (FICHERO)	TIPOLOGÍA PRESA H=50 m	E CAPA YESÍFERA	DIRECTORIO	Q ₀ (m³/año/m)	FF	t _{ab} (años)	Q _{ab} (m³/año/m)	Q _{ab} /Q ₀	t _{ucte} (años)	FA
30% (h50p30)	HOMOGÉNEA	3H	H3H	5023	0,67	699	77375	15,40	2203	3,15
		1H	H1H	2234	0,89	746	44581	19,96	2053	2,75
		H/5	H0.2H	507	1,00	1044	11362	22,42	1933	1,85
	HOMOGÉNEA CON PANTALLA CENTRADA	3H1	HPC3H1	4752	0,73	742	71984	15,15	2531	3,41
		3H0.5	HPC3H0.5	4963	0,71	753	74950	15,10	2171	2,88
		1H	HPC1H	725	0,38	3993	1041	1,44	6064	1,52
	ZONIFICADA	H/5	HPC0.2H	189	0,40	4836	284	1,50	6775	1,40
		3H	Z3H	10390	0,24	52	24104	2,32	145	2,79
		1H	Z1H	5836	0,41	57	24267	4,16	132	2,32
	ZONIFICADA CON TAPIZ	H/5	Z0.2H	1868	0,65	57	11933	6,39	117	2,05
		3H	ZT3H	7480	0,43	204	32366	4,33	562	2,75
		1H	ZT1H	3687	0,63	206	23463	6,36	523	2,54
	ZONIFICADA CON TAPIZ MÁS LARGO	H/5	ZT0.2H	983	0,83	263	9928	10,10	498	1,89
		3H	ZTT3H	4737	0,63	872	29135	6,15	2579	2,96
		1H	ZTT1H	1990	0,79	889	18833	9,46	2450	2,76
	ZONIFICADA CON TAPIZ Y CON PANTALLA ARRIBA	H/5	ZTT0.2H	463	0,91	1342	5939	12,84	2370	1,77
		3H1	ZTPR3H1	6250	0,49	355	30730	4,92	1062	2,99
		3H0.5	ZTPR3H0.5	7020	0,47	248	33584	4,78	735	2,96
	ZONIFICADA CON PANTALLA CENTRADA	1H	ZTPR1H	799	0,24	2024	992	1,24	2660	1,31
		H/5	ZTPR0.2H	217	0,22	1944	255	1,17	2810	1,45
		3H1	ZPC3H1	8345	0,37	189	43892	5,26	573	3,03
	ZONIFICADA CON TAPIZ Y CON PANTALLA CENTRADA	3H0.5	ZPC3H0.5	9674	0,33	88	28834	2,98	259	2,94
		1H	ZPC1H	846	0,17	812	926	1,09	1062	1,31
		H/5	ZPC0.2H	220	0,11	799	240	1,09	1192	1,49
	ZONIFICADA CON TAPIZ Y CON PANTALLA CENTRADA	3H1	ZTPC3H1	6632	0,52	299	38963	5,88	1032	3,45
		3H0.5	ZTPC3H0.5	7250	0,49	227	35270	4,86	685	3,02
		1H	ZTPC1H	792	0,23	1415	965	1,22	2722	1,92
	ZONIFICADA CON TAPIZ Y CON PANTALLA CENTRADA	H/5	ZTPC0.2H	206	0,20	2187	251	1,22	3271	1,50

TABLA N° 23 : Parámetros de los casos calculados (presa de 50 m de altura, con permeabilidad inicial de la capa yesífera de 10^{-5} m/s y relaciones de permeabilidades fijadas).

PORCENTAJE (FICHERO)	TIPOLOGÍA PRESA H=50 m	E CAPA YESÍFERA	DIRECTORIO	Q ₀ (m ³ /año/m)	FF	t _{ab} (años)	Q _{ab} (m ³ /año/m)	Q _{ab} /Q ₀	t _{ucte} (años)	FA
40% (h50p40)	HOMOGÉNEA	3H	H3H	5023	0,67	856	196410	39,10	2940	3,43
		1H	H1H	2234	0,89	990	94537	42,32	2740	2,77
		H/5	H0.2H	507	1,00	1389	31376	61,92	2580	1,86
	HOMOGÉNEA CON PANTALLA CENTRADA	3H1	HPC3H1	4752	0,73	1001	187610	39,48	3378	3,37
		3H0.5	HPC3H0.5	4963	0,71	915	208300	41,97	2897	3,17
		1H	HPC1H	725	0,38	5292	1080	1,49	8079	1,53
	ZONIFICADA	H/5	HPC0.2H	189	0,40	7042	287	1,52	9026	1,28
		3H	Z3H	10390	0,24	74	29565	2,85	193	2,61
		1H	Z1H	5836	0,41	79	32179	5,51	177	2,24
	ZONIFICADA CON TAPIZ	H/5	Z0.2H	1868	0,65	77	15122	8,09	156	2,03
		3H	ZT3H	7480	0,43	269	42919	5,74	749	2,78
		1H	ZT1H	3687	0,63	275	30703	8,33	698	2,54
	ZONIFICADA CON TAPIZ MÁS LARGO	H/5	ZT0.2H	983	0,83	343	21455	21,83	665	1,94
		3H	ZTT3H	4737	0,63	1278	48932	10,33	3442	2,69
		1H	ZTT1H	1990	0,79	1190	29917	15,03	3270	2,75
	ZONIFICADA CON TAPIZ Y CON PANTALLA ARRIBA	H/5	ZTT0.2H	463	0,91	1760	11167	24,14	3163	1,80
		3H1	ZTPR3H1	6250	0,49	443	39551	6,33	1418	3,20
		3H0.5	ZTPR3H0.5	7020	0,47	310	43558	6,20	981	3,16
	ZONIFICADA CON PANTALLA CENTRADA	1H	ZTPR1H	799	0,24	2547	914	1,14	3544	1,39
		H/5	ZTPR0.2H	217	0,22	2727	252	1,16	3744	1,37
		3H1	ZPC3H1	8345	0,37	237	51415	6,16	764	3,22
	ZONIFICADA CON TAPIZ Y CON PANTALLA CENTRADA	3H0.5	ZPC3H0.5	9674	0,33	110	36369	3,76	345	3,14
		1H	ZPC1H	846	0,17	980	944	1,12	1414	1,44
		H/5	ZPC0.2H	220	0,11	1098	237	1,08	1588	1,45
	ZONIFICADA CON TAPIZ Y CON PANTALLA CENTRADA	3H1	ZTPC3H1	6632	0,52	375	52346	7,89	1377	3,67
		3H0.5	ZTPC3H0.5	7250	0,49	299	50239	6,93	914	3,06
		1H	ZTPC1H	792	0,23	3130	1087	1,37	3627	1,16
		H/5	ZTPC0.2H	206	0,20	2848	267	1,30	4358	1,53

TABLA N° 23 : Parámetros de los casos calculados (presa de 50 m de altura, con permeabilidad inicial de la capa yesífera de 10^{-5} m/s y relaciones de permeabilidades fijadas).

Estas mismas tablas, con los parámetros adimensionales (con *) correspondientes (válidos, por lo tanto, para cualquier altura de presa y para cualquier permeabilidad inicial de la capa yesífera, pero sólo en los casos que la relación de permeabilidades entre los materiales es similar a la fijada en la TABLA N° 19) se adjuntan a continuación:

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
10%	HOMOGÉNEA	3H	H3H	0,00638	2529	0,01800	2,82	4662	1,84
		1H	H1H	0,00284	2497	0,00946	3,34	4345	1,74
		H/5	H0.2H	0,00064	3070	0,00218	3,39	5357	1,75
	HOMOGÉNEA CON PANTALLA CENTRADA	3H1	HPC3H1	0,00603	2652	0,01629	2,70	5357	2,02
		3H0.5	HPC3H0.5	0,00630	2318	0,01680	2,67	4971	2,14
		1H	HPC1H	0,00092	10175	0,00118	1,28	12824	1,26
		H/5	HPC0.2H	0,00024	11240	0,00032	1,34	14326	1,27
	ZONIFICADA	3H	Z3H	0,01319	165	0,01991	1,51	307	1,86
		1H	Z1H	0,00741	165	0,01350	1,82	281	1,70
		H/5	Z0.2H	0,00237	156	0,00539	2,27	358	2,29
	ZONIFICADA CON TAPIZ	3H	ZT3H	0,00950	703	0,01925	2,03	1176	1,67
		1H	ZT1H	0,00468	647	0,01103	2,36	1108	1,71
		H/5	ZT0.2H	0,00125	675	0,00339	2,72	1424	2,11
	ZONIFICADA CON TAPIZ MÁS LARGO	3H	ZTT3H	0,00602	3055	0,01478	2,46	5456	1,79
		1H	ZTT1H	0,00253	3149	0,00738	2,92	5185	1,65
		H/5	ZTT0.2H	0,00059	3892	0,00175	2,98	6589	1,69
	ZONIFICADA CON TAPIZ Y CON PANTALLA ARRIBA	3H1	ZTPR3H1	0,00794	1269	0,01749	2,20	2248	1,77
		3H0.5	ZTPR3H0.5	0,00891	815	0,01799	2,02	1554	1,91
		1H	ZTPR1H	0,00101	4108	0,00114	1,12	5626	1,37
		H/5	ZTPR0.2H	0,00028	4612	0,00031	1,14	5943	1,29
	ZONIFICADA CON PANTALLA CENTRADA	3H1	ZPC3H1	0,01060	591	0,02027	1,91	1021	1,73
		3H0.5	ZPC3H0.5	0,01228	280	0,02082	1,70	546	1,95
		1H	ZPC1H	0,00107	1852	0,00113	1,05	2245	1,21
		H/5	ZPC0.2H	0,00028	2092	0,00030	1,06	2520	1,20
	ZONIFICADA CON TAPIZ Y CON PANTALLA CENTRADA	3H1	ZTPC3H1	0,00842	1160	0,01926	2,29	2183	1,88
		3H0.5	ZTPC3H0.5	0,00921	692	0,01728	1,88	1449	2,09
		1H	ZTPC1H	0,00101	4505	0,00113	1,12	5756	1,28
		H/5	ZTPC0.2H	0,00026	4650	0,00030	1,14	6917	1,49

TABLA N° 24 : Parámetros adimensionales de los casos calculados (presa de cualquier altura, con cualquier permeabilidad inicial de la capa yesífera, pero con relaciones de permeabilidades fijadas).

PORCENTAJE (FICHERO)	TIPOLOGÍA PRESA	E CAPA YESÍFERA	DIRECTORIO	Q ₀ *	t _{ab} *	Q _{ab} *	Q _{ab} /Q ₀	t _{ucte}	FA
20%	HOMOGÉNEA	3H	H3H	0,00638	3458	0,03976	6,23	9275	2,68
		1H	H1H	0,00284	3674	0,02409	8,49	8644	2,35
		H/5	H0.2H	0,00064	4816	0,00541	8,41	10660	2,21
	HOMOGÉNEA CON PANTALLA CENTRADA	3H1	HPC3H1	0,00603	3835	0,04742	7,86	10660	2,78
		3H0.5	HPC3H0.5	0,00630	3467	0,04615	7,32	9890	2,85
		1H	HPC1H	0,00092	17288	0,00128	1,39	25515	1,48
		H/5	HPC0.2H	0,00024	23815	0,00036	1,49	28504	1,20
		H/5	HPC0.2H	0,00024	23815	0,00036	1,49	28504	1,20
	ZONIFICADA	3H	Z3H	0,01319	262	0,02602	1,97	610	2,33
		1H	Z1H	0,00741	260	0,01972	2,66	559	2,15
		H/5	Z0.2H	0,00237	262	0,01010	4,26	712	2,72
	ZONIFICADA CON TAPIZ	3H	ZT3H	0,00950	997	0,03265	3,44	2339	2,35
		1H	ZT1H	0,00468	997	0,01925	4,11	2205	2,21
		H/5	ZT0.2H	0,00125	1152	0,00667	5,35	2833	2,46
	ZONIFICADA CON TAPIZ MÁS LARGO	3H	ZTT3H	0,00602	4140	0,02526	4,20	10855	2,62
		1H	ZTT1H	0,00253	4111	0,01338	5,30	10316	2,51
		H/5	ZTT0.2H	0,00059	6105	0,00446	7,59	13110	2,15
	ZONIFICADA CON TAPIZ Y CON PANTALLA ARRIBA	3H1	ZTPR3H1	0,00794	1775	0,03263	4,11	4473	2,52
		3H0.5	ZTPR3H0.5	0,00891	1160	0,02958	3,32	3091	2,66
		1H	ZTPR1H	0,00101	8915	0,00121	1,20	11193	1,26
		H/5	ZTPR0.2H	0,00028	8430	0,00033	1,18	11824	1,40
	ZONIFICADA CON PANTALLA CENTRADA	3H1	ZPC3H1	0,01060	955	0,03835	3,62	2032	2,13
		3H0.5	ZPC3H0.5	0,01228	410	0,02942	2,39	1087	2,65
		1H	ZPC1H	0,00107	3244	0,00116	1,08	4466	1,38
		H/5	ZPC0.2H	0,00028	3560	0,00030	1,07	5014	1,41
	ZONIFICADA CON TAPIZ Y CON PANTALLA CENTRADA	3H1	ZTPC3H1	0,00842	1623	0,03912	4,65	4344	2,68
		3H0.5	ZTPC3H0.5	0,00921	987	0,02686	2,92	2883	2,92
		1H	ZTPC1H	0,00101	7630	0,00118	1,18	11453	1,50
		H/5	ZTPC0.2H	0,00026	8953	0,00031	1,19	13763	1,54

PORCENTAJE (FICHERO)	TIPOLOGÍA PRESA	E CAPA YESÍFERA	DIRECTORIO	Q ₀ *	t _{ab} *	Q _{ab} *	Q _{ab} /Q ₀	t _{ucte}	FA
30%	HOMOGÉNEA	3H	H3H	0,00638	4401	0,09825	15,40	13889	3,16
		1H	H1H	0,00284	4700	0,05661	19,96	12944	2,75
		H/5	H0.2H	0,00064	6578	0,01443	22,42	15962	2,43
	HOMOGÉNEA CON PANTALLA CENTRADA	3H1	HPC3H1	0,00603	4672	0,09141	15,15	15962	3,42
		3H0.5	HPC3H0.5	0,00630	4741	0,09517	15,10	14809	3,12
		1H	HPC1H	0,00092	25157	0,00132	1,44	38206	1,52
		H/5	HPC0.2H	0,00024	30467	0,00036	1,50	42683	1,40
		H/5	HPC0.2H	0,00024	30467	0,00036	1,50	42683	1,40
	ZONIFICADA	3H	Z3H	0,01319	328	0,03061	2,32	914	2,79
		1H	Z1H	0,00741	359	0,03082	4,16	837	2,33
		H/5	Z0.2H	0,00237	357	0,01515	6,39	1066	2,99
	ZONIFICADA CON TAPIZ	3H	ZT3H	0,00950	1288	0,04110	4,33	3503	2,72
		1H	ZT1H	0,00468	1297	0,02979	6,36	3302	2,55
		H/5	ZT0.2H	0,00125	1658	0,01261	10,10	4242	2,56
	ZONIFICADA CON TAPIZ MÁS LARGO	3H	ZTT3H	0,00602	5494	0,03700	6,15	16255	2,96
		1H	ZTT1H	0,00253	5603	0,02391	9,46	15448	2,76
		H/5	ZTT0.2H	0,00059	8451	0,00754	12,84	19631	2,32
	ZONIFICADA CON TAPIZ Y CON PANTALLA ARRIBA	3H1	ZTPR3H1	0,00794	2239	0,03902	4,92	6698	2,99
		3H0.5	ZTPR3H0.5	0,00891	1565	0,04265	4,78	4629	2,96
		1H	ZTPR1H	0,00101	12752	0,00126	1,24	16761	1,31
		H/5	ZTPR0.2H	0,00028	12248	0,00032	1,17	17706	1,45
	ZONIFICADA CON PANTALLA CENTRADA	3H1	ZPC3H1	0,01060	1189	0,05574	5,26	3042	2,56
		3H0.5	ZPC3H0.5	0,01228	552	0,03661	2,98	1627	2,95
		1H	ZPC1H	0,00107	5116	0,00118	1,09	6688	1,31
		H/5	ZPC0.2H	0,00028	5036	0,00030	1,09	7508	1,49
	ZONIFICADA CON TAPIZ Y CON PANTALLA CENTRADA	3H1	ZTPC3H1	0,00842	1882	0,04948	5,88	6504	3,46
		3H0.5	ZTPC3H0.5	0,00921	1429	0,04479	4,86	4317	3,02
		1H	ZTPC1H	0,00101	8915	0,00122	1,22	17150	1,92
		H/5	ZTPC0.2H	0,00026	13779	0,00032	1,22	20609	1,50

TABLA N° 24 : Parámetros adimensionales de los casos calculados (presa de cualquier altura, con cualquier permeabilidad inicial de la capa yesífera, pero con relaciones de permeabilidades fijadas).

PORCENTAJE (FICHERO)	TIPOLOGÍA PRESA	E CAPA YESÍFERA	DIRECTORIO	Q_0^*	t_{ab}^*	Q_{ab}^*	Q_{ab}/Q_0	t_{ucte}^*	FA
40%	HOMOGÉNEA	3H	H3H	0,00638	5392	0,24941	39,10	18503	3,43
		1H	H1H	0,00284	6238	0,12005	42,32	17244	2,76
		H/5	H0.2H	0,00064	8751	0,03984	61,92	21264	2,43
	HOMOGÉNEA CON PANTALLA CENTRADA	3H1	HPC3H1	0,00603	6307	0,23823	39,48	21264	3,37
		3H0.5	HPC3H0.5	0,00630	5761	0,26451	41,97	19729	3,42
		1H	HPC1H	0,00092	33340	0,00137	1,49	50898	1,53
	ZONIFICADA	H/5	HPC0.2H	0,00024	44365	0,00036	1,52	56861	1,28
		3H	Z3H	0,01319	464	0,03754	2,85	1218	2,62
		1H	Z1H	0,00741	497	0,04086	5,51	1115	2,24
	ZONIFICADA CON TAPIZ	H/5	Z0.2H	0,00237	485	0,01920	8,09	1420	2,93
		3H	ZT3H	0,00950	1692	0,05450	5,74	4666	2,76
		1H	ZT1H	0,00468	1731	0,03899	8,33	4399	2,54
	ZONIFICADA CON TAPIZ MÁS LARGO	H/5	ZT0.2H	0,00125	2162	0,02724	21,83	5651	2,61
		3H	ZTT3H	0,00602	8053	0,06214	10,33	21654	2,69
		1H	ZTT1H	0,00253	7494	0,03799	15,03	20579	2,75
	ZONIFICADA CON TAPIZ Y CON PANTALLA ARRIBA	H/5	ZTT0.2H	0,00059	11085	0,01418	24,14	26153	2,36
		3H1	ZTPR3H1	0,00794	2792	0,05022	6,33	8923	3,20
		3H0.5	ZTPR3H0.5	0,00891	1954	0,05531	6,20	6166	3,16
	ZONIFICADA CON PANTALLA CENTRADA	1H	ZTPR1H	0,00101	16047	0,00116	1,14	22328	1,39
		H/5	ZTPR0.2H	0,00028	17181	0,00032	1,16	23587	1,37
		3H1	ZPC3H1	0,01060	1491	0,06529	6,16	4053	2,72
	ZONIFICADA CON TAPIZ Y CON PANTALLA CENTRADA	3H0.5	ZPC3H0.5	0,01228	692	0,04618	3,76	2168	3,13
		1H	ZPC1H	0,00107	6173	0,00120	1,12	8909	1,44
		H/5	ZPC0.2H	0,00028	6918	0,00030	1,08	10002	1,45
	ZONIFICADA CON TAPIZ Y CON PANTALLA CENTRADA	3H1	ZTPC3H1	0,00842	2361	0,06647	7,89	8665	3,67
		3H0.5	ZTPC3H0.5	0,00921	1884	0,06380	6,93	5751	3,05
		1H	ZTPC1H	0,00101	19721	0,00138	1,37	22847	1,16
		H/5	ZTPC0.2H	0,00026	17944	0,00034	1,30	27455	1,53

TABLA N° 24: Parámetros adimensionales de los casos calculados (presa de cualquier altura, con cualquier permeabilidad inicial de la capa yesífera, pero con relaciones de permeabilidades fijadas).

Se pueden obtener, para un caso no calculado, *por ejemplo, presa homogénea de 100 m de altura, con capa yesífera de espesor $E/H=1$, 20% de yeso y permeabilidad inicial $200 \text{ m}^3/\text{año}$, los parámetros representativos del proceso:*

$$Q_0^* = 0,00284; Q_0 = 0,00284 \cdot 100^2 \cdot 200 = 5.680 \text{ m}^3 / \text{año}$$

$$Q_{ab}^* = 0,02409; Q_{ab} = 0,02409 \cdot 100^2 \cdot 200 = 48.180 \text{ m}^3 / \text{año}, \text{ es decir, } \frac{Q_{ab}}{Q_0} = 8,49$$

$$t_{ucte}^* = 8.644; t_{ucte} = \frac{8.644 \cdot 100}{200} = 4.322 \text{ años}$$

$$t_{ab}^* = 3.674; t_{ab} = \frac{3.674 \cdot 100}{200} = 1.837 \text{ años}, \text{ es decir, } FA = 2,35$$

También es importante analizar cómo es la forma del frente de disolución en su avance desde el embalse (zona izquierda de las imágenes que se muestran en la FIGURA N° 97) hacia aguas abajo de la presa. Por ello, se presenta un ejemplo de los resultados de cálculo mediante DISOLUCIÓN2D (con gráficos de FastSEEP), donde se observa, para distintas iteraciones, cómo se produce el avance del frente de disolución (los elementos disueltos se muestran en azul). Corresponden a un cimiento con un porcentaje de yeso de un 10%.

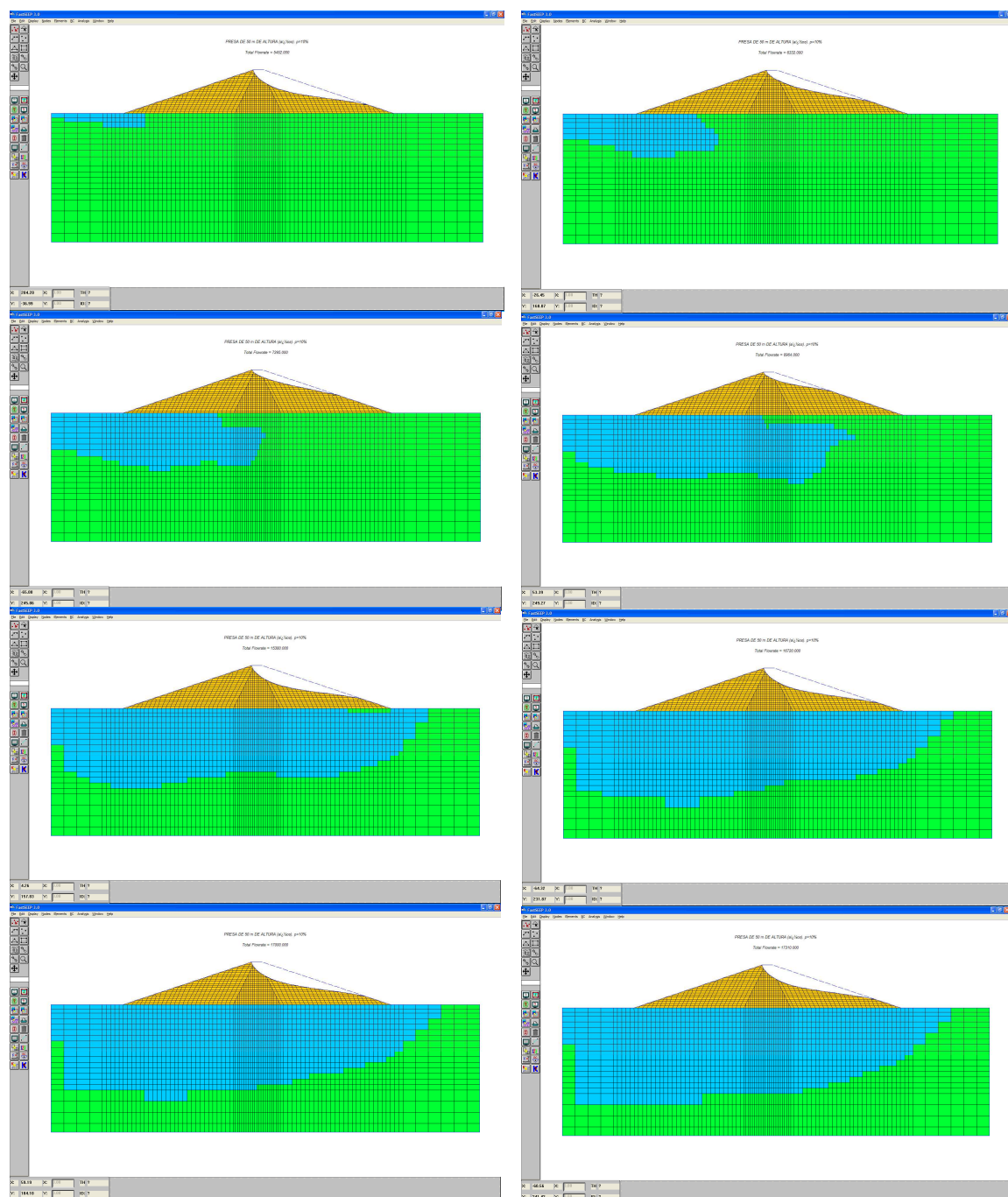


FIGURA N° 97 : Avance del frente de disolución (8 iteraciones) para H3H con un porcentaje del 10%.
Cálculo mediante DISOLUCIÓN2D.

En este caso, el espesor de cemento afectado por la disolución es del orden de la altura de la presa, pero no siempre es así, dependiendo de todos los factores implicados, como se puede observar en el resto de gráficos de los 140 casos calculados, que se adjuntan en Baena, C.M., 2011.

6.1.5.2. Resultados de comparación de secciones tipo de presa

Posteriormente, para cada combinación de porcentaje de yeso y relación E/H (15 en total), que correspondería a unos datos de partida que podrían presentarse al estudiar una cerrada con cemento yesífero, se han representado los siguientes gráficos en función de la sección tipo:

- tiempo adimensional-caudal adimensional ($t_{adim} - Q_{adim}$)
- tiempo adimensional-caudal filtrado/caudal inicial ($t_{adim} - Q/Q_0$)

Se adjuntan, desde la FIGURA N° 98 hasta la FIGURA N° 127, los gráficos correspondientes a porcentajes de yeso del 5, 10, 20, 30 y 40%, para los tres espesores considerados, 3H, 1H y 0,2H.

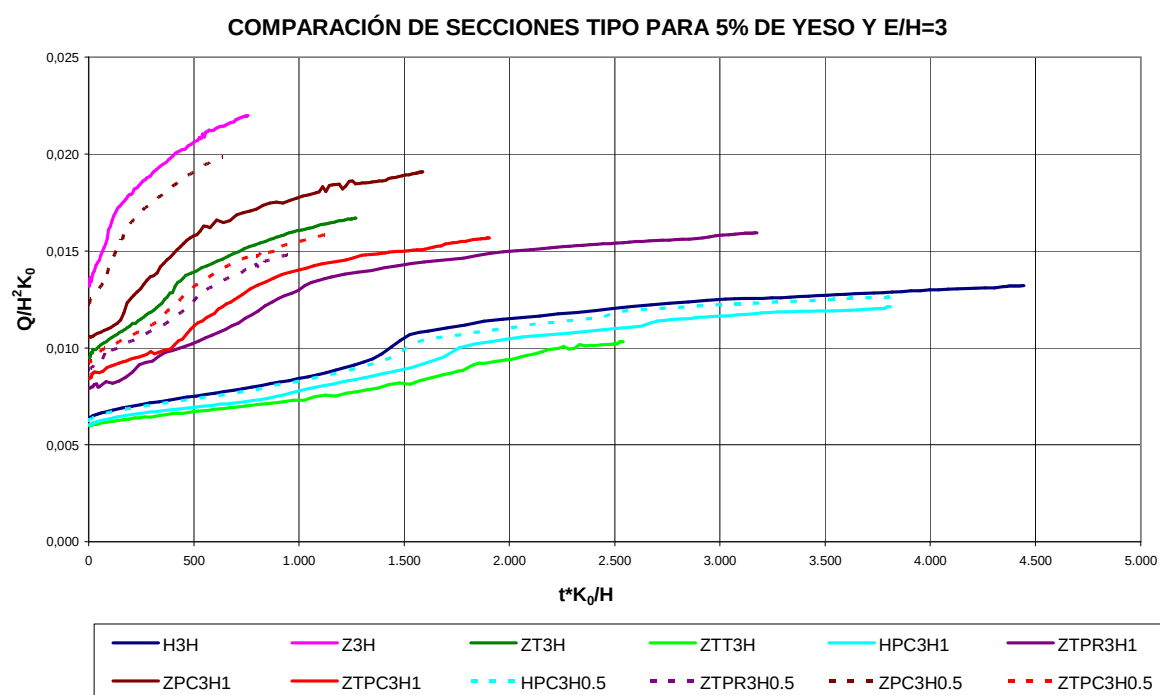
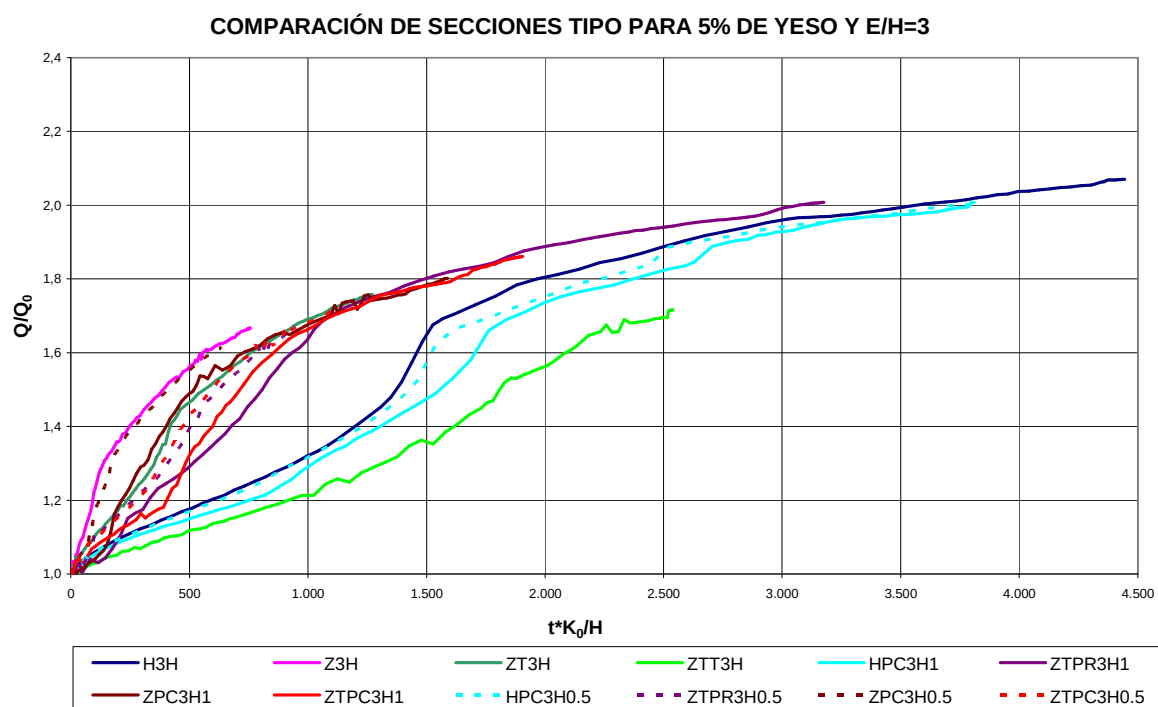
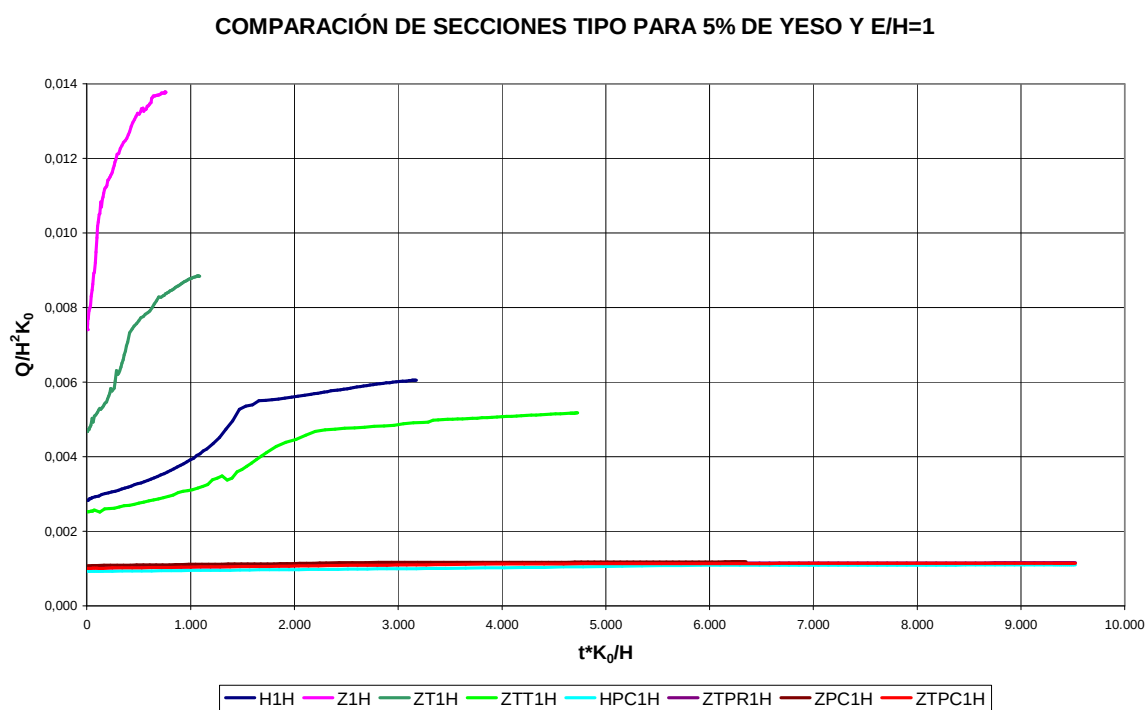
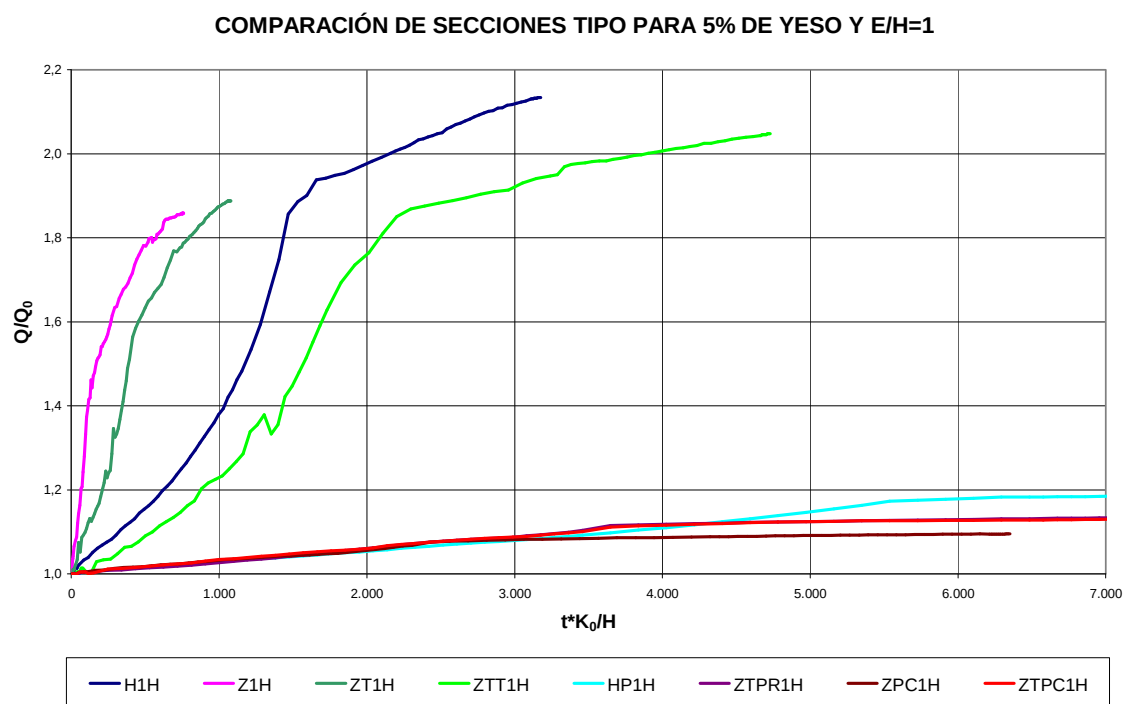
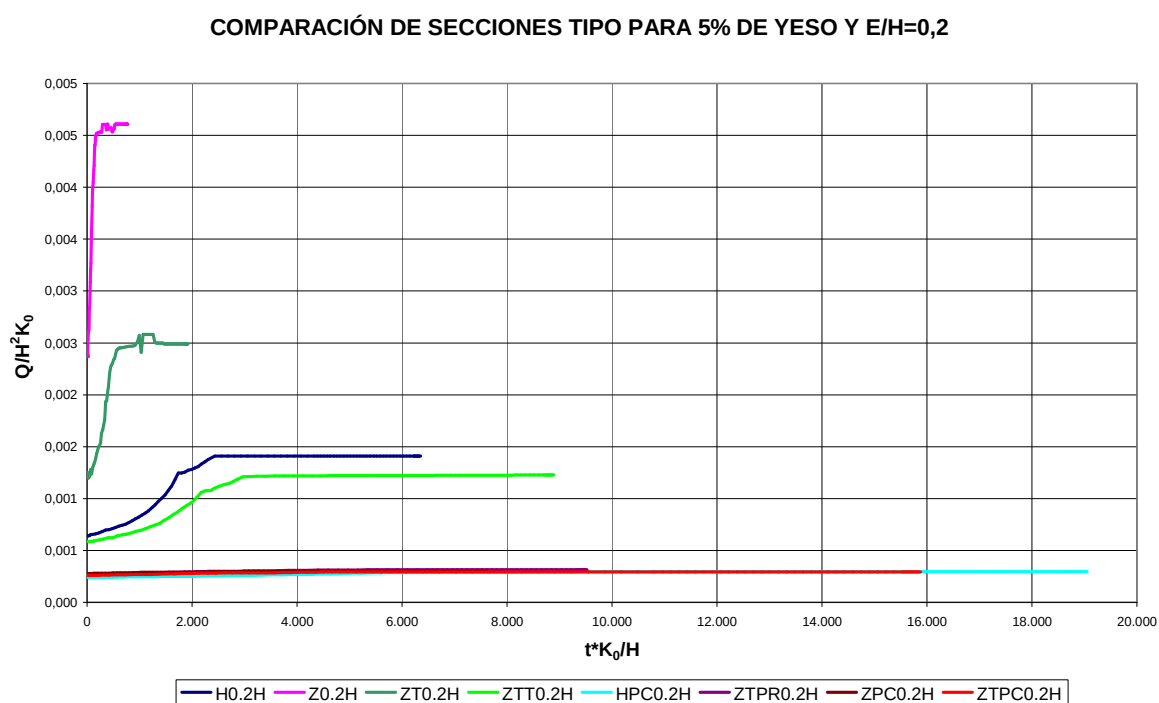
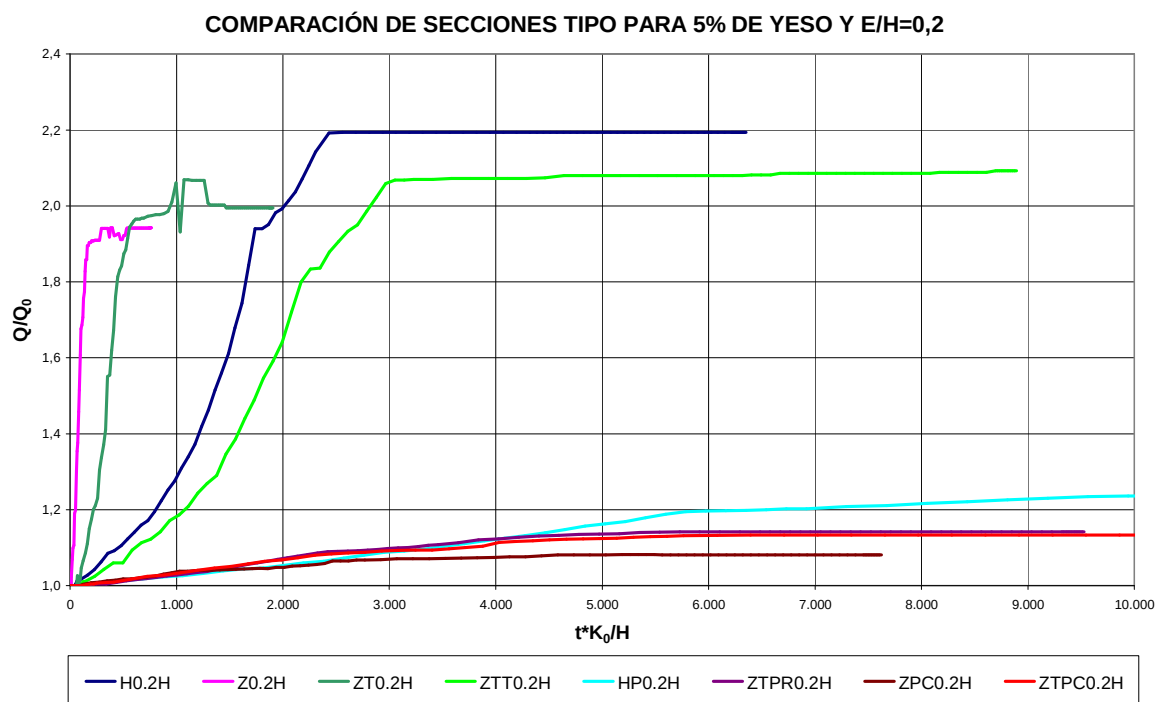
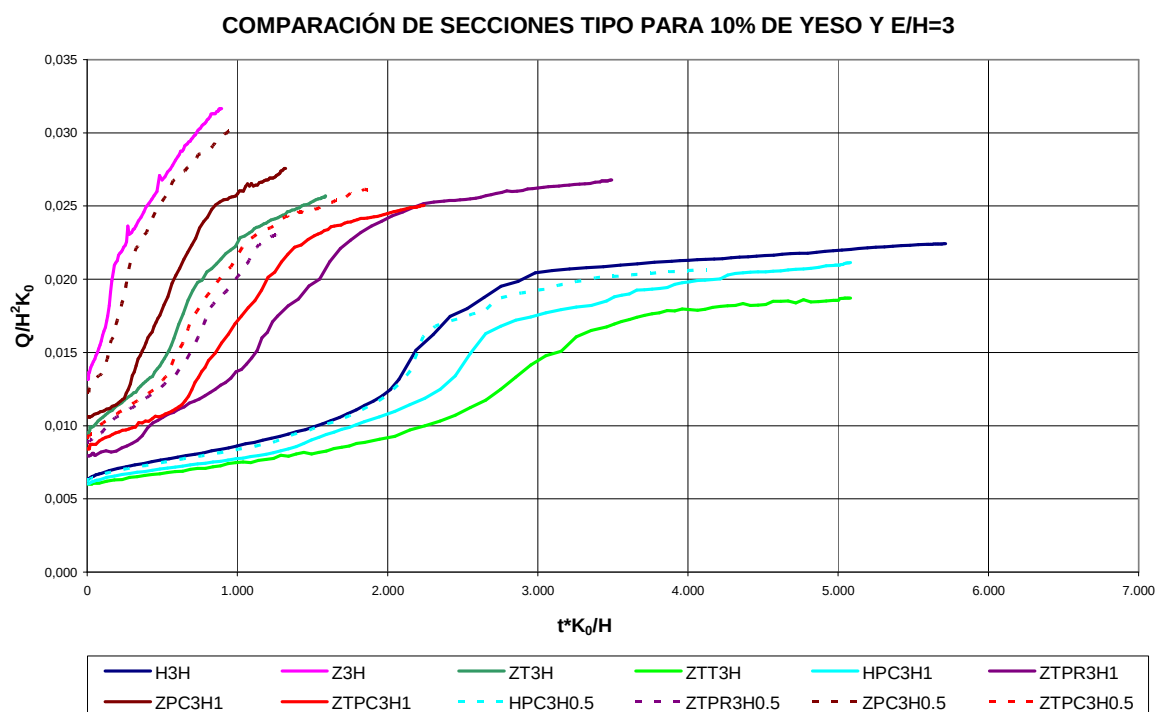
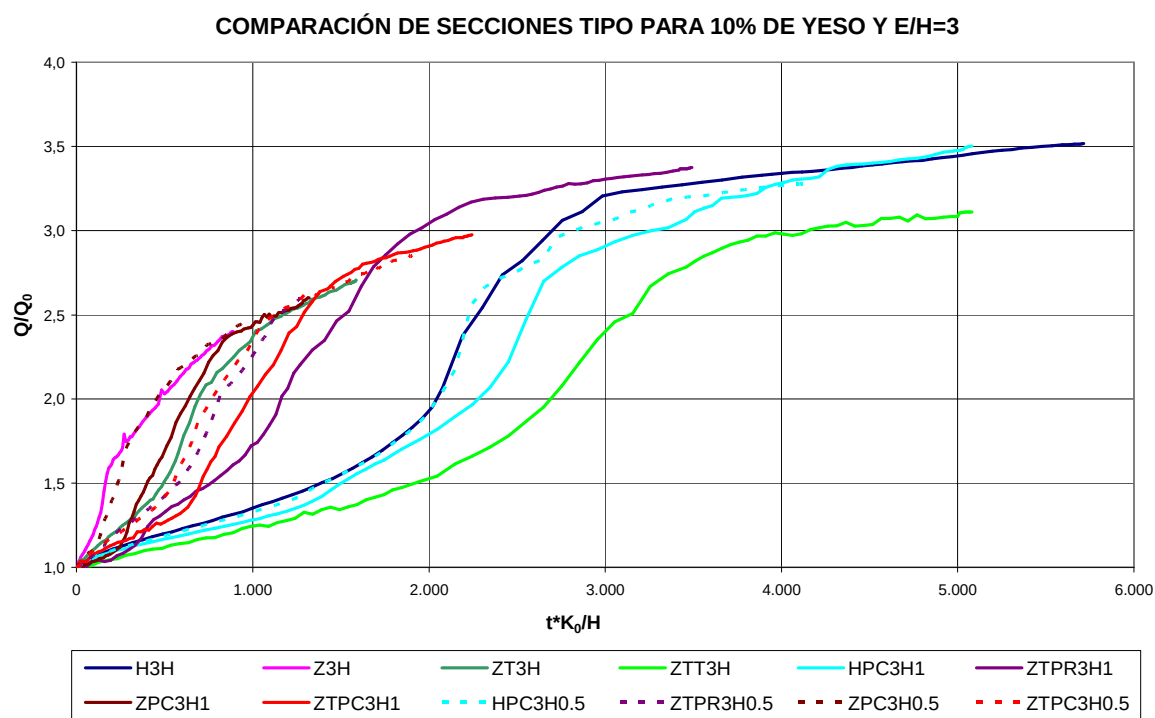
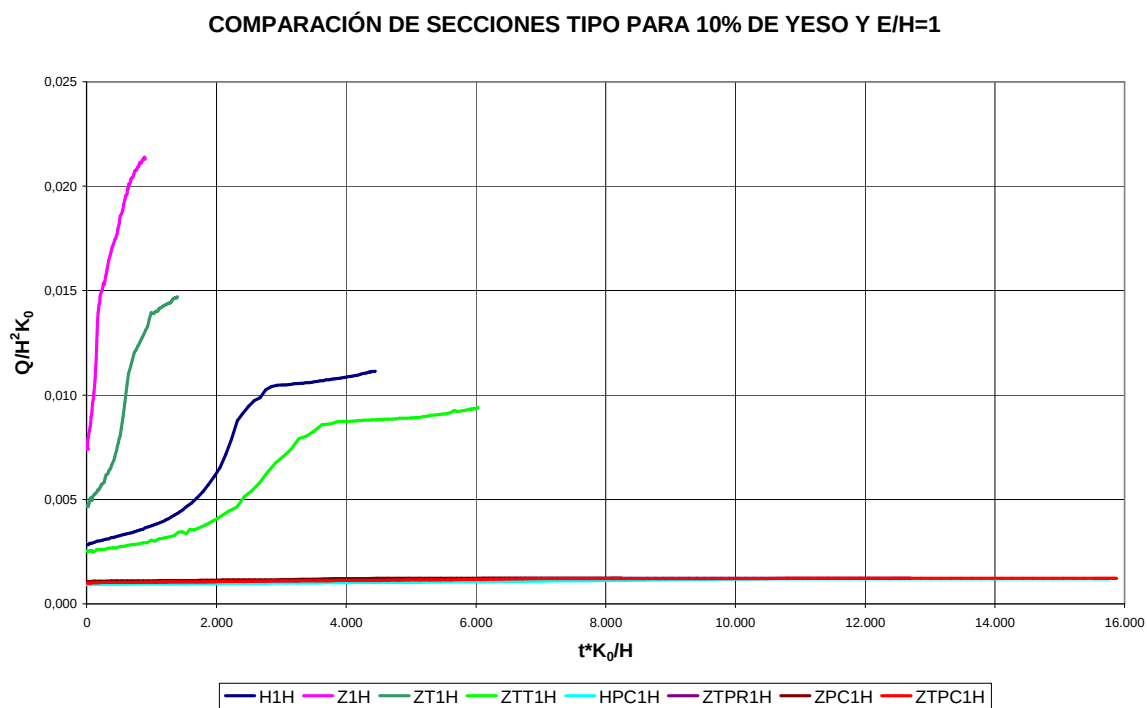


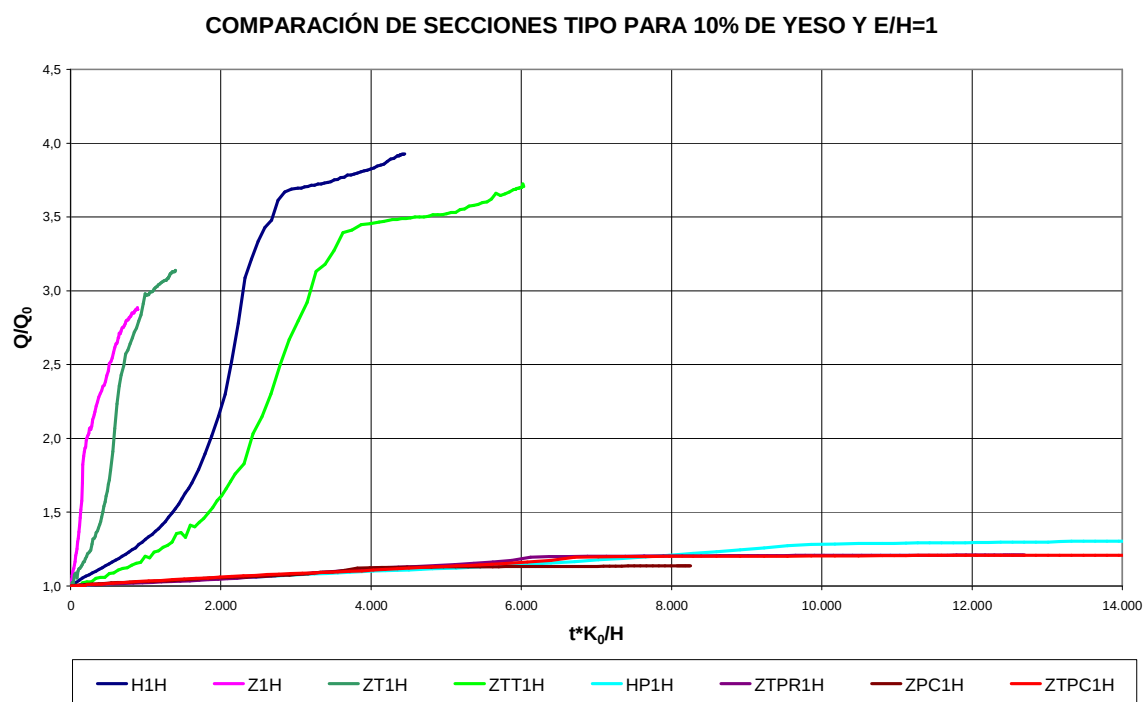
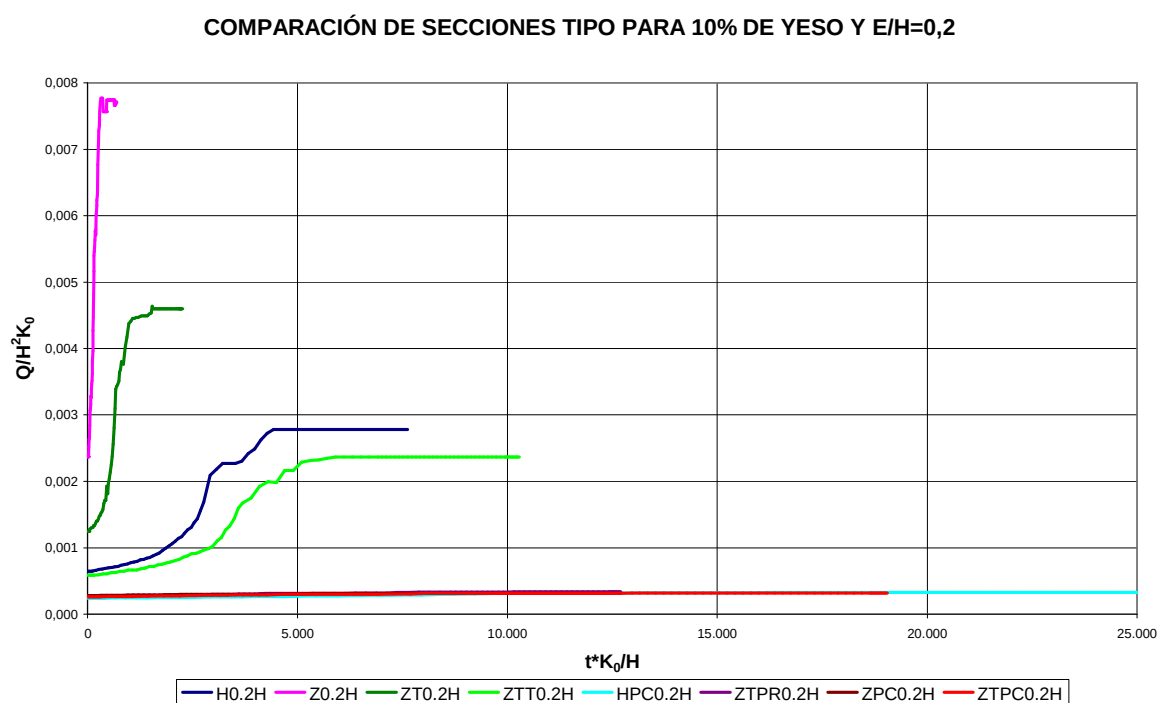
FIGURA N° 98 : Relación $t_{adim}-Q_{adim}$ con porcentaje de yeso de 5% y E/H=3.

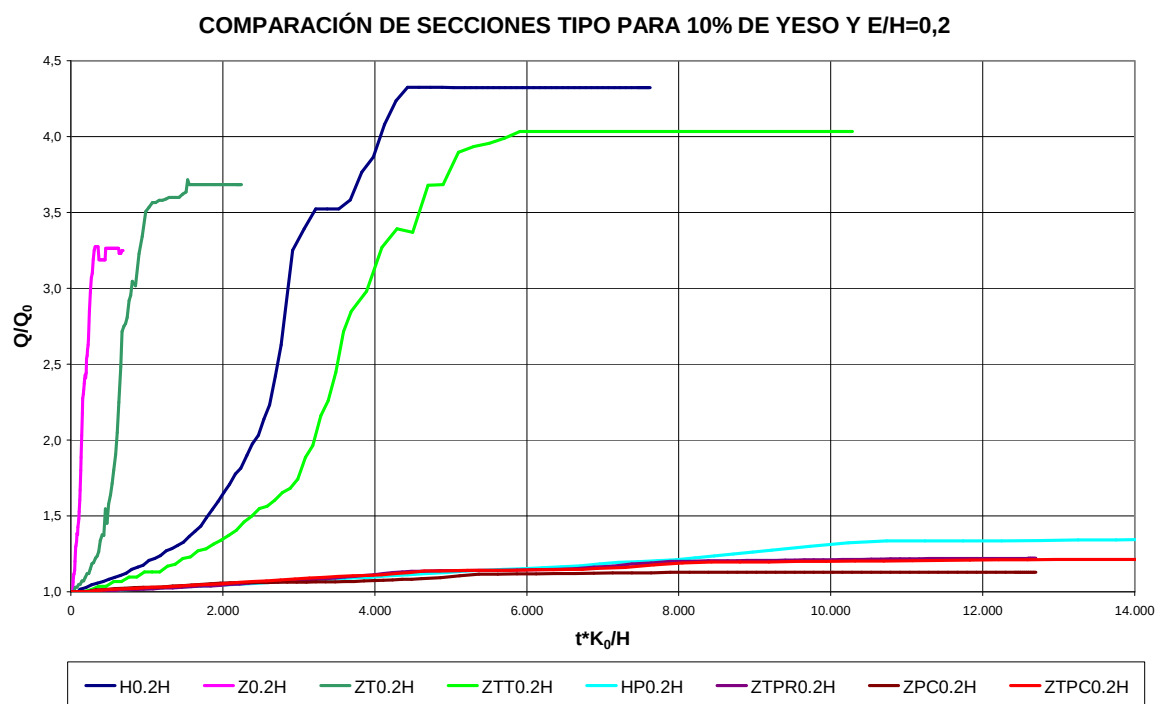
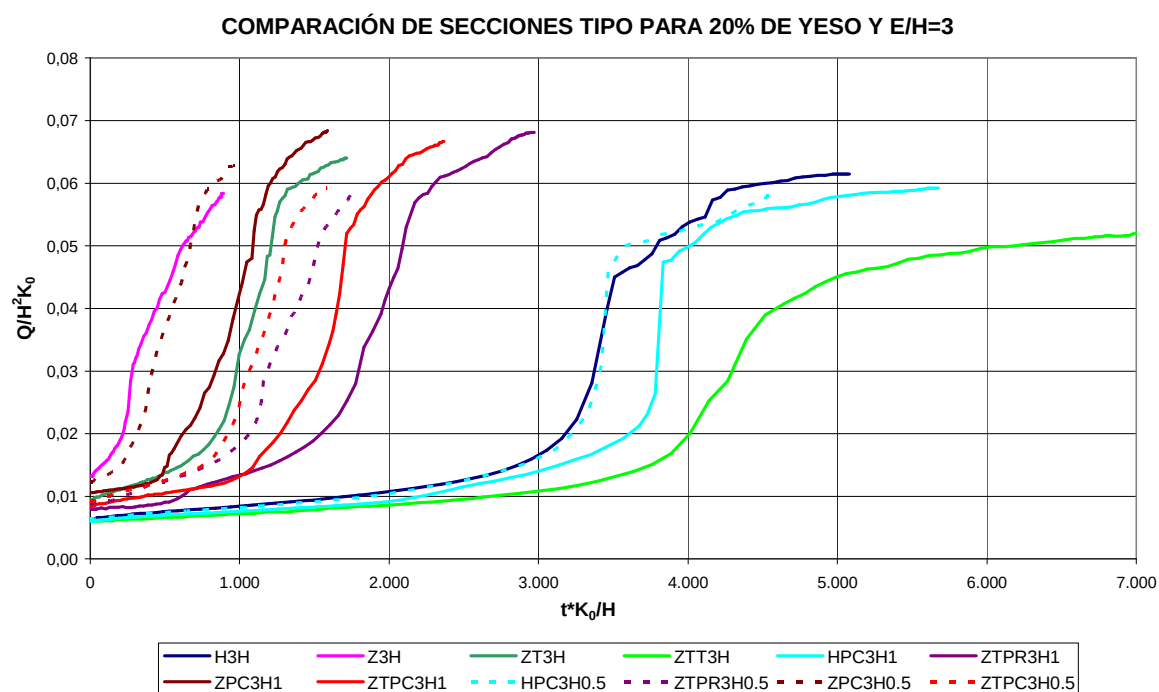
FIGURA N° 99 : Relación $t_{adim} \cdot Q/Q_0$ con porcentaje de yeso de 5% y E/H=3.FIGURA N° 100: Relación $t_{adim} \cdot Q_{adim}$ con porcentaje de yeso de 5% y E/H=1.

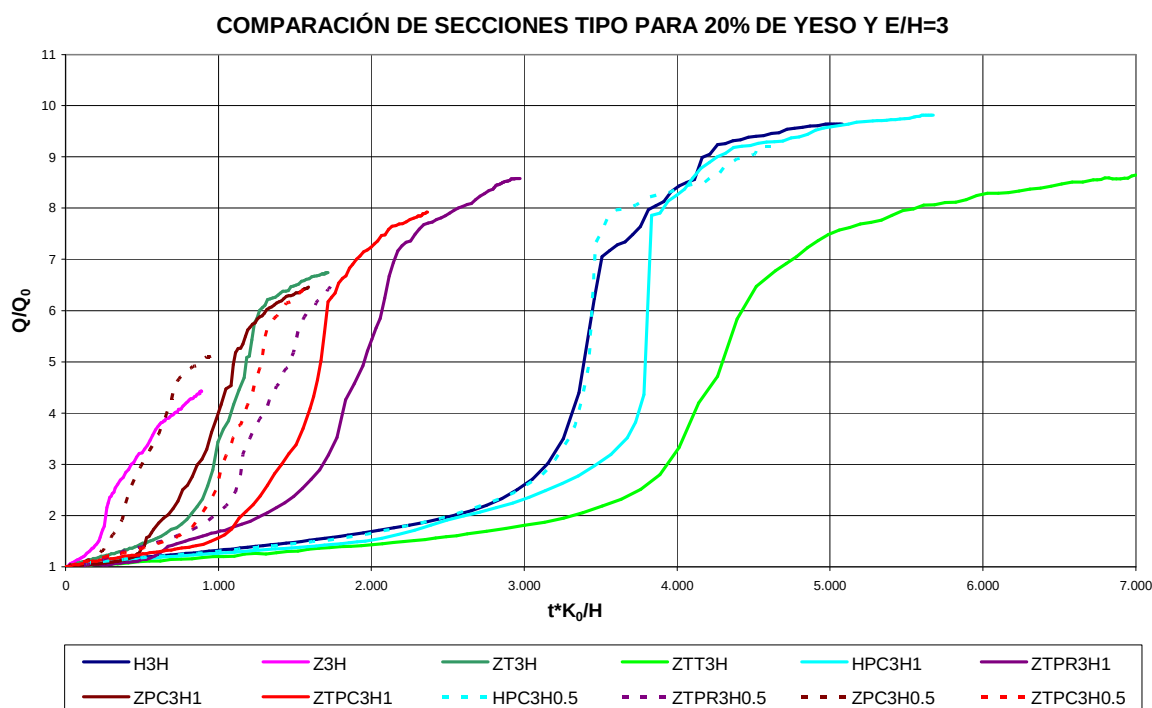
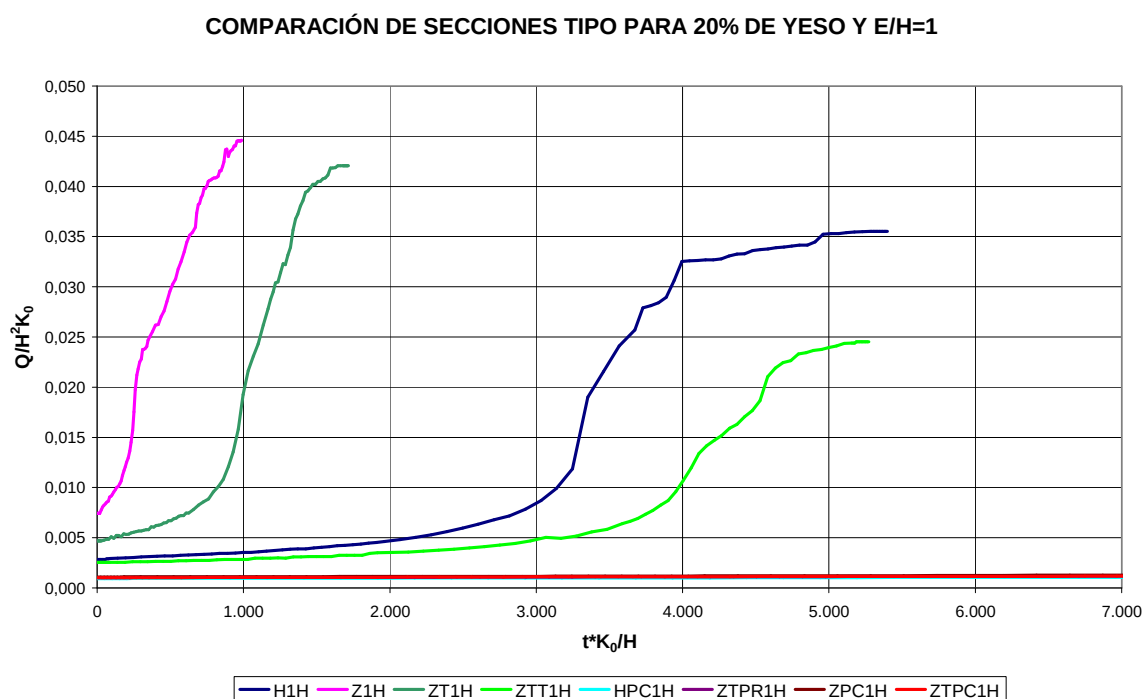
FIGURA N° 101: Relación $t_{adim}-Q/Q_0$ con porcentaje de yeso de 5% y E/H=1.FIGURA N° 102: Relación $t_{adim}-Q_{adim}$ con porcentaje de yeso de 5% y E/H=0,2.

FIGURA N° 103: Relación $t_{adim}-Q/Q_0$ con porcentaje de yeso de 5% y E/H=0,2.FIGURA N° 104: Relación $t_{adim}-Q_{adim}$ con porcentaje de yeso de 10% y E/H=3.

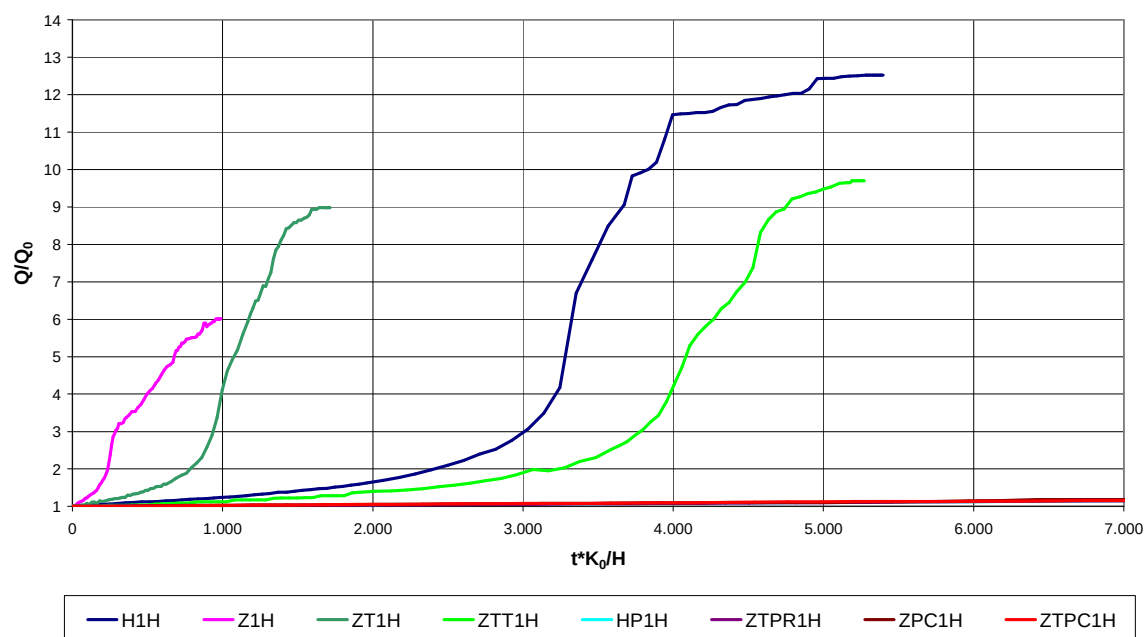
FIGURA Nº 105: Relación $t_{adim}-Q/Q_0$ con porcentaje de yeso de 10% y E/H=3.FIGURA Nº 106: Relación $t_{adim}-Q_{adim}$ con porcentaje de yeso de 10% y E/H=1.

FIGURA N° 107: Relación $t_{adim}-Q/Q_0$ con porcentaje de yeso de 10% y E/H=1.FIGURA N° 108: Relación $t_{adim}-Q_{adim}$ con porcentaje de yeso de 10% y E/H=0,2.

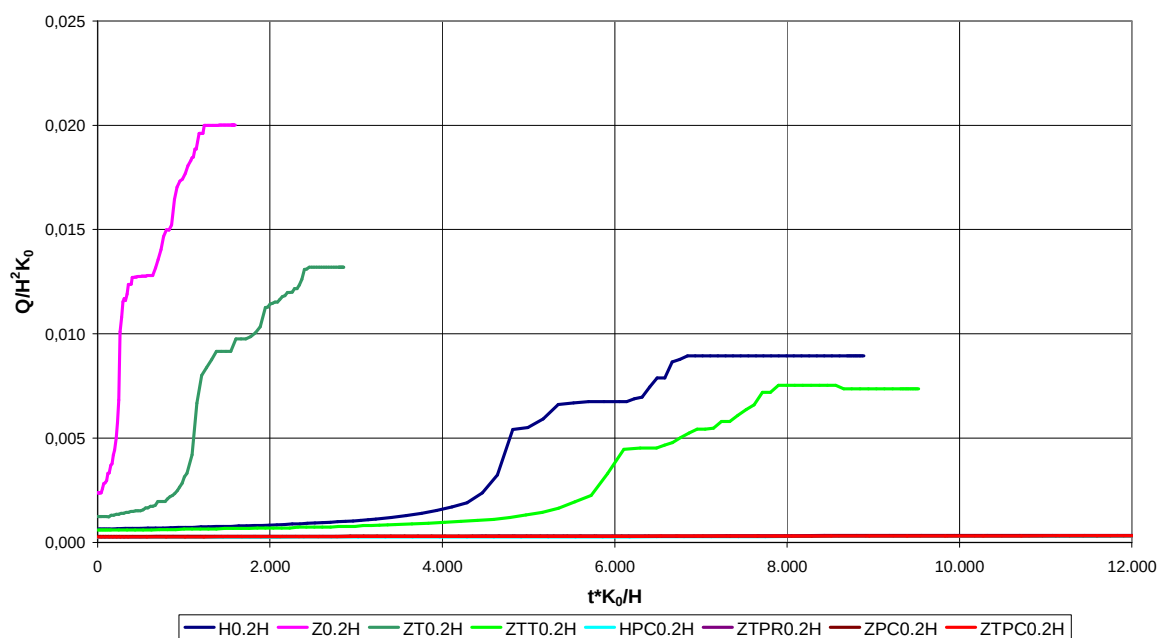
FIGURA N° 109: Relación $t_{adim}-Q/Q_0$ con porcentaje de yeso de 10% y E/H=0,2.FIGURA N° 110: Relación $t_{adim}-Q_{adim}$ con porcentaje de yeso de 20% y E/H=3.

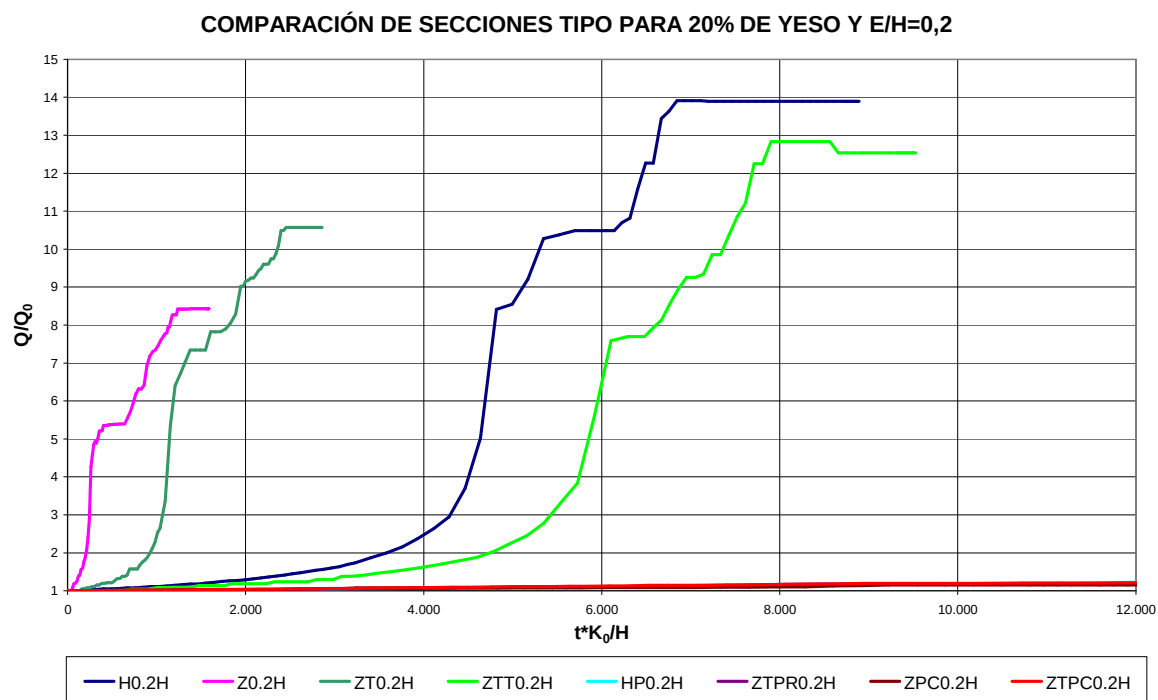
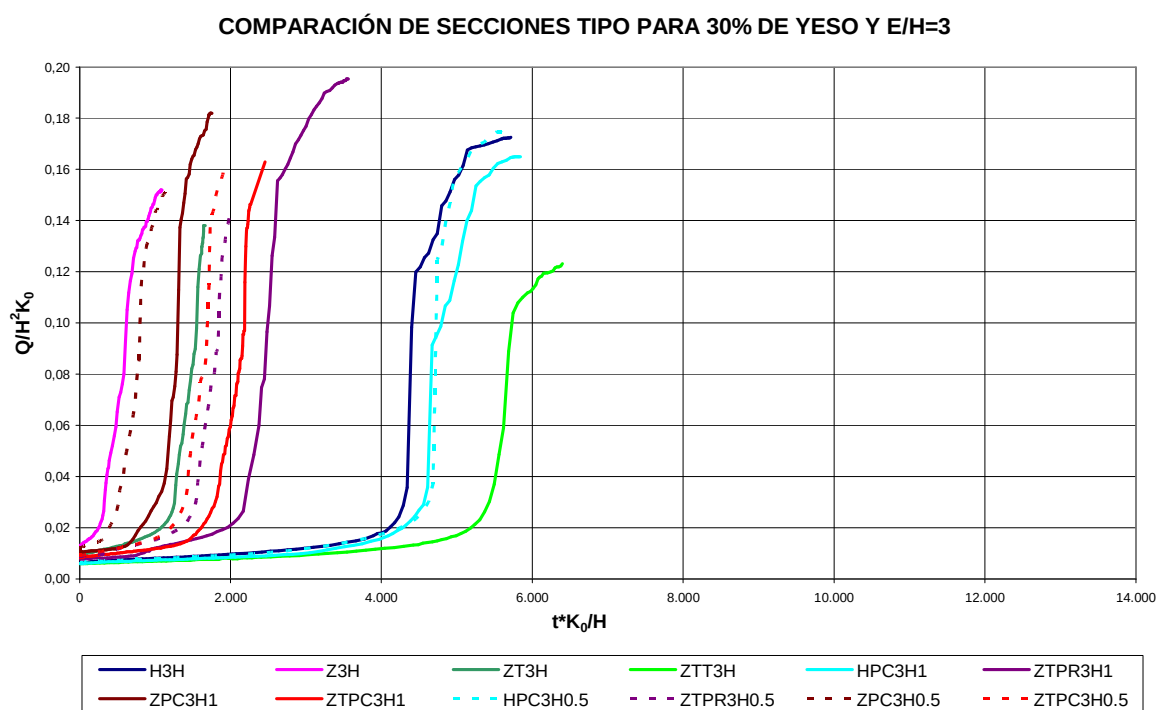
FIGURA N° 111: Relación $t_{adim}-Q/Q_0$ con porcentaje de yeso de 20% y E/H=3.FIGURA N° 112: Relación $t_{adim}-Q_{adim}$ con porcentaje de yeso de 20% y E/H=1.

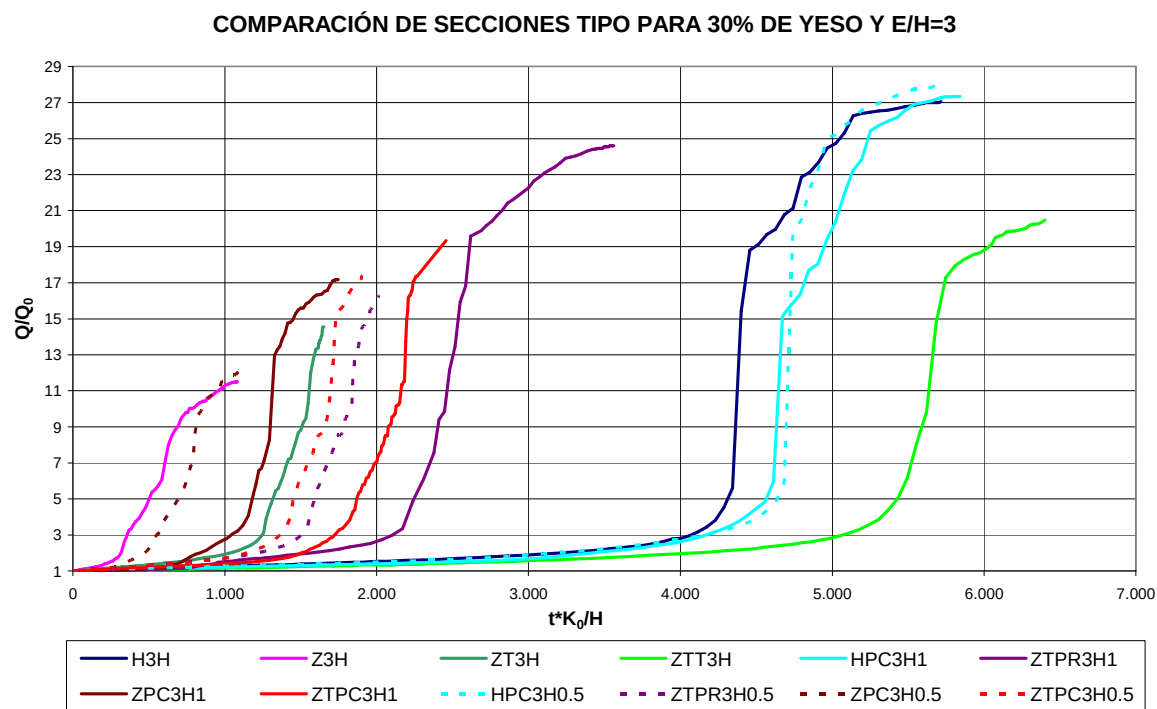
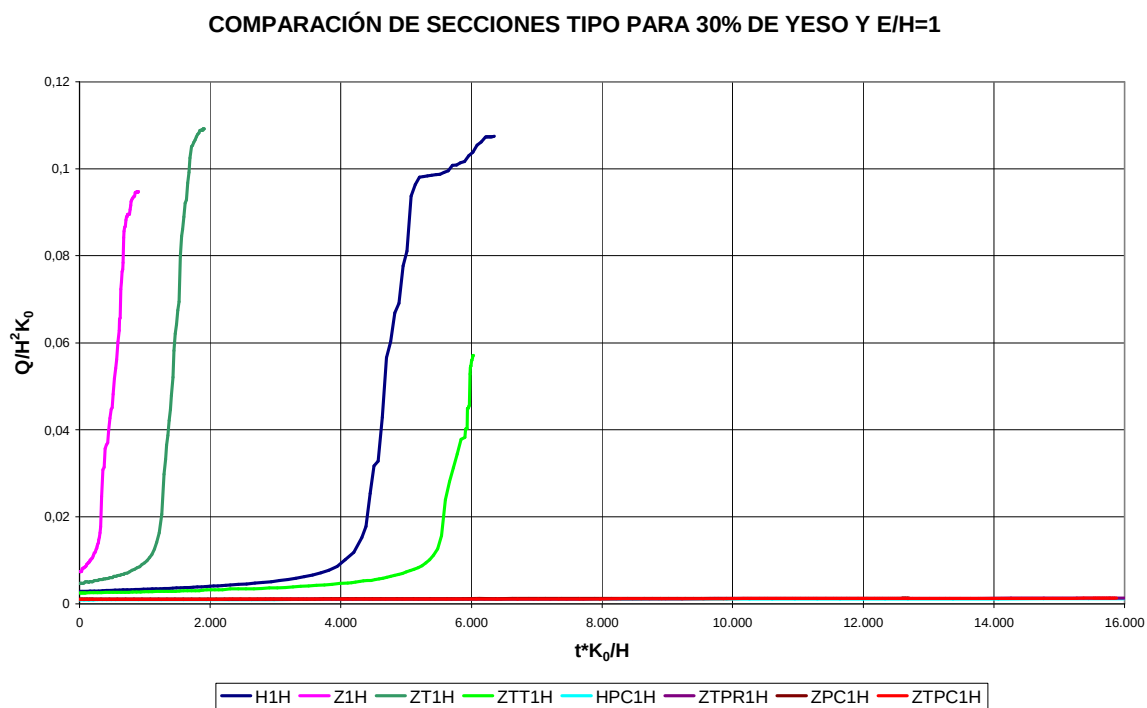
COMPARACIÓN DE SECCIONES TIPO PARA 20% DE YESO Y E/H=1

FIGURA N° 113: Relación $t_{adim} \cdot Q/Q_0$ con porcentaje de yeso de 20% y E/H=1.

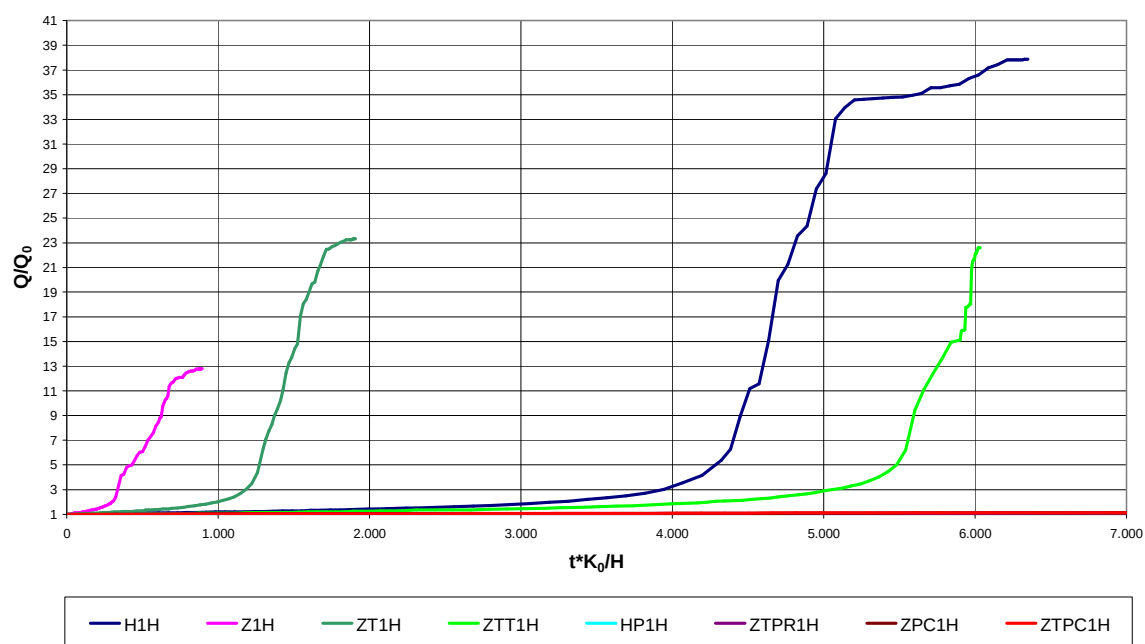
COMPARACIÓN DE SECCIONES TIPO PARA 20% DE YESO Y E/H=0,2

FIGURA N° 114: Relación $t_{adim} \cdot Q_{adim}$ con porcentaje de yeso de 20% y E/H=0,2.

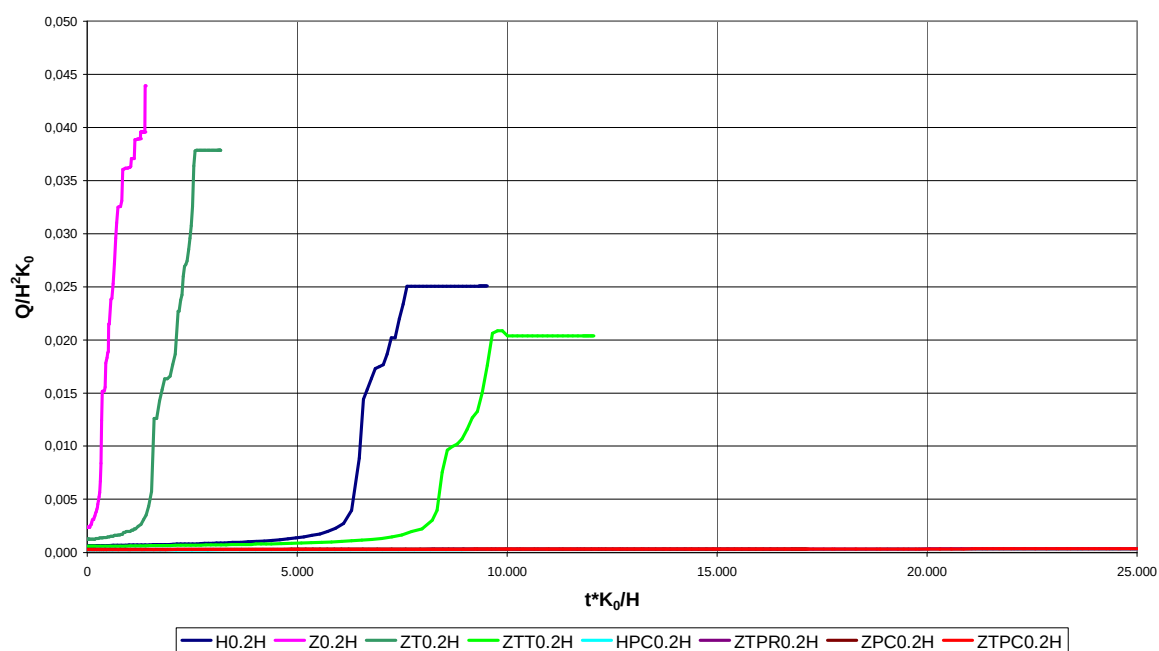
FIGURA N° 115: Relación $t_{adim}-Q/Q_0$ con porcentaje de yeso de 20% y E/H=0,2.FIGURA N° 116: Relación $t_{adim}-Q_{adim}$ con porcentaje de yeso de 30% y E/H=3.

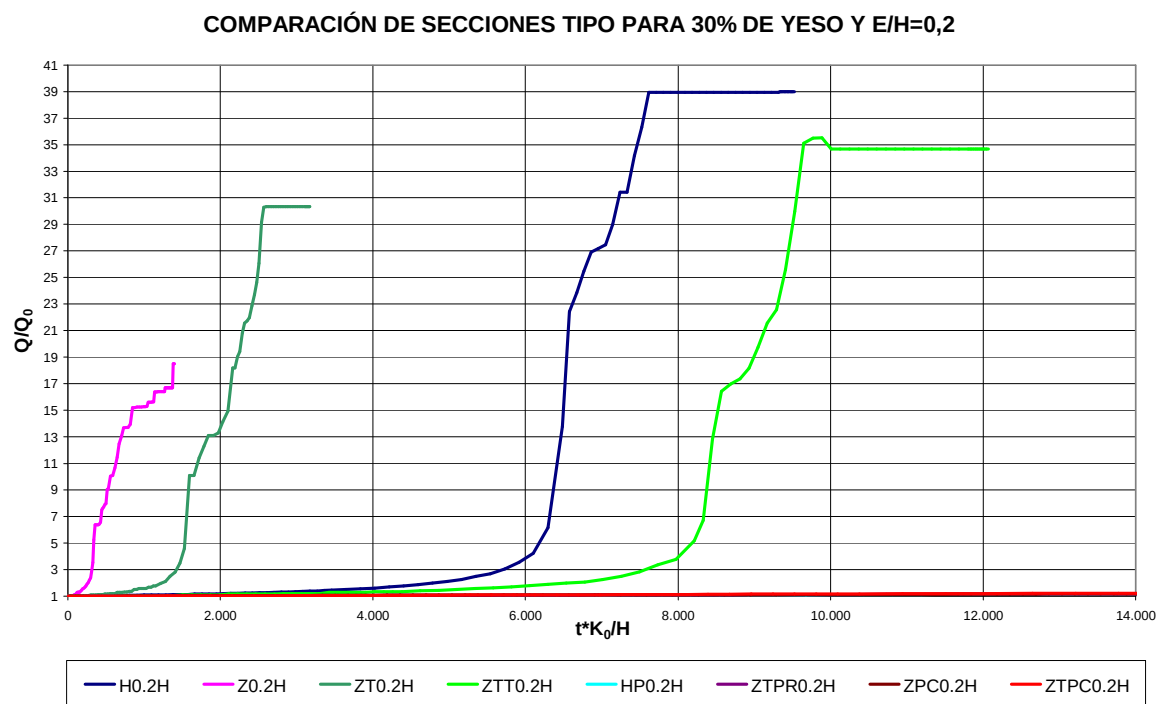
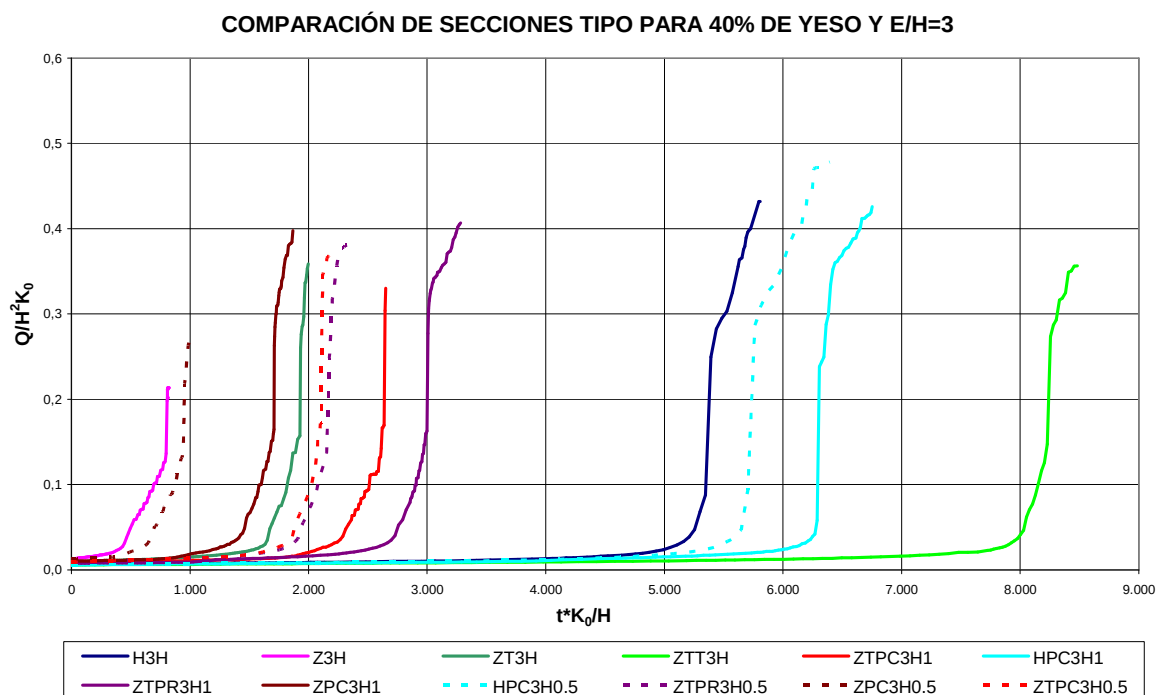
FIGURA N° 117: Relación $t_{adim}-Q/Q_0$ con porcentaje de yeso de 30% y E/H=3.FIGURA N° 118: Relación $t_{adim}-Q_{adim}$ con porcentaje de yeso de 30% y E/H=1.

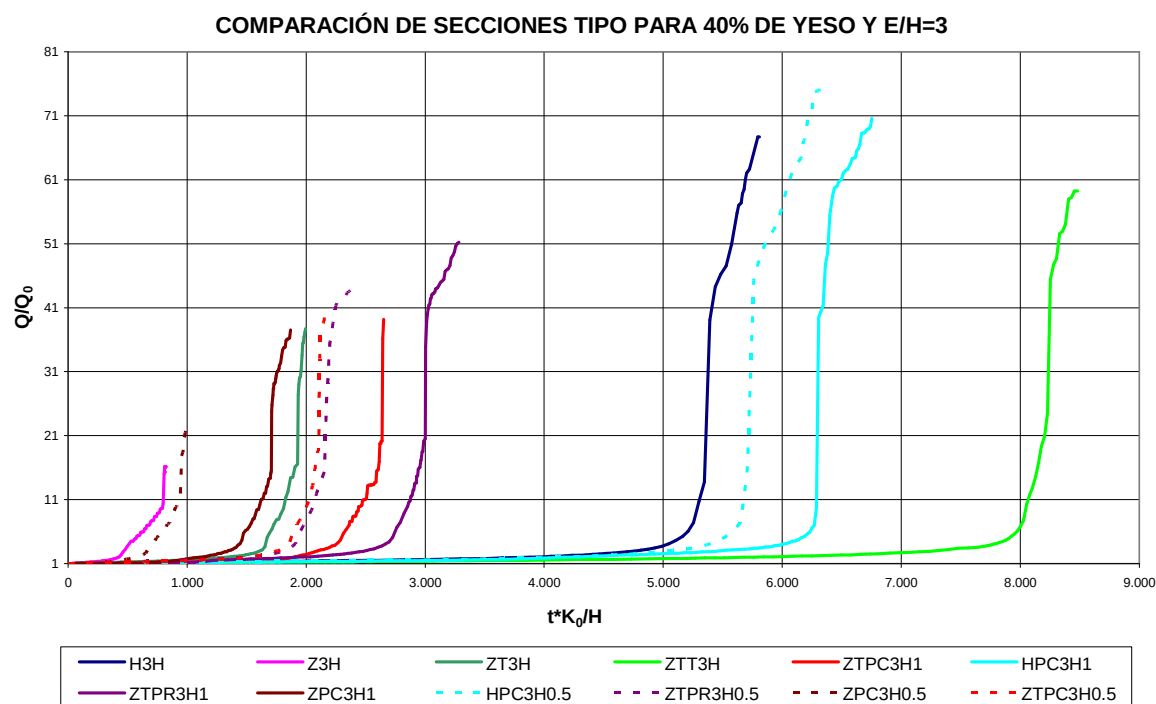
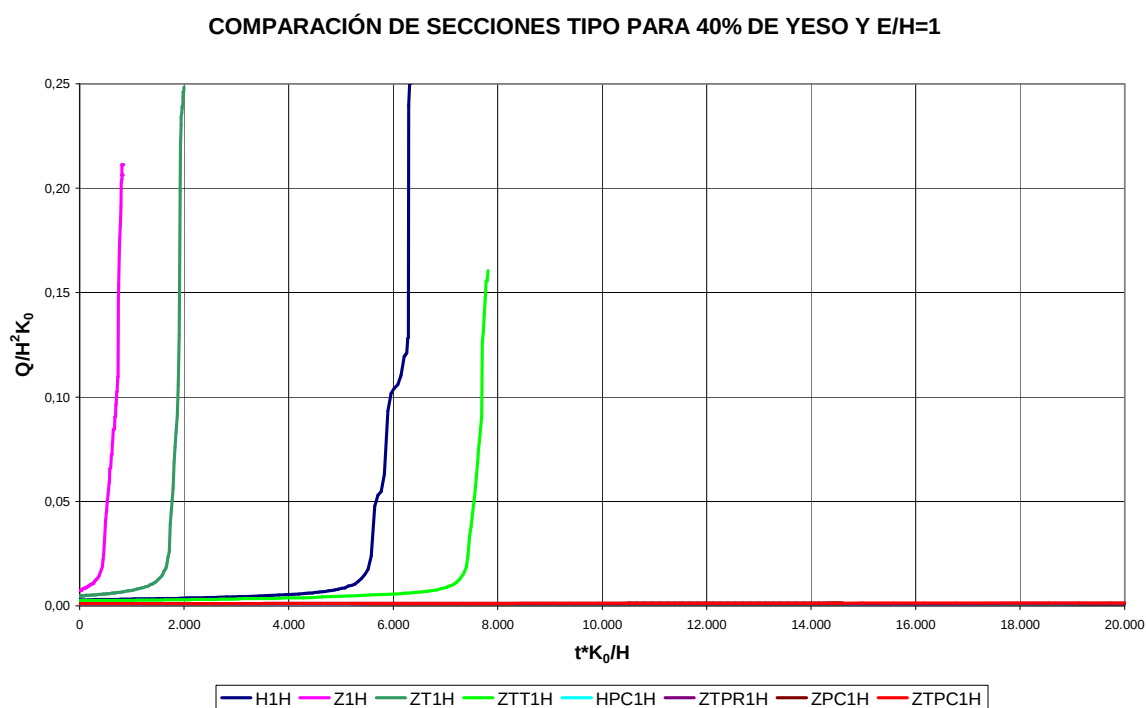
COMPARACIÓN DE SECCIONES TIPO PARA 30% DE YESO Y E/H=1

FIGURA N° 119: Relación $t_{adim} \cdot Q/Q_0$ con porcentaje de yeso de 30% y E/H=1.

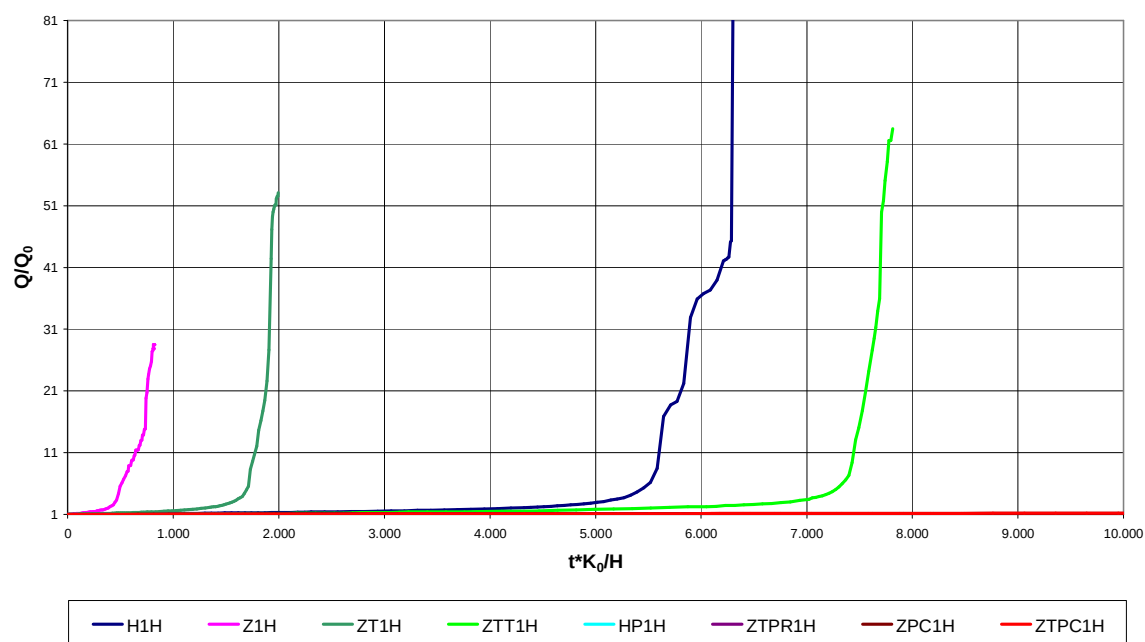
COMPARACIÓN DE SECCIONES TIPO PARA 30% DE YESO Y E/H=0,2

FIGURA N° 120: Relación $t_{adim} \cdot Q_{adim}$ con porcentaje de yeso de 30% y E/H=0,2.

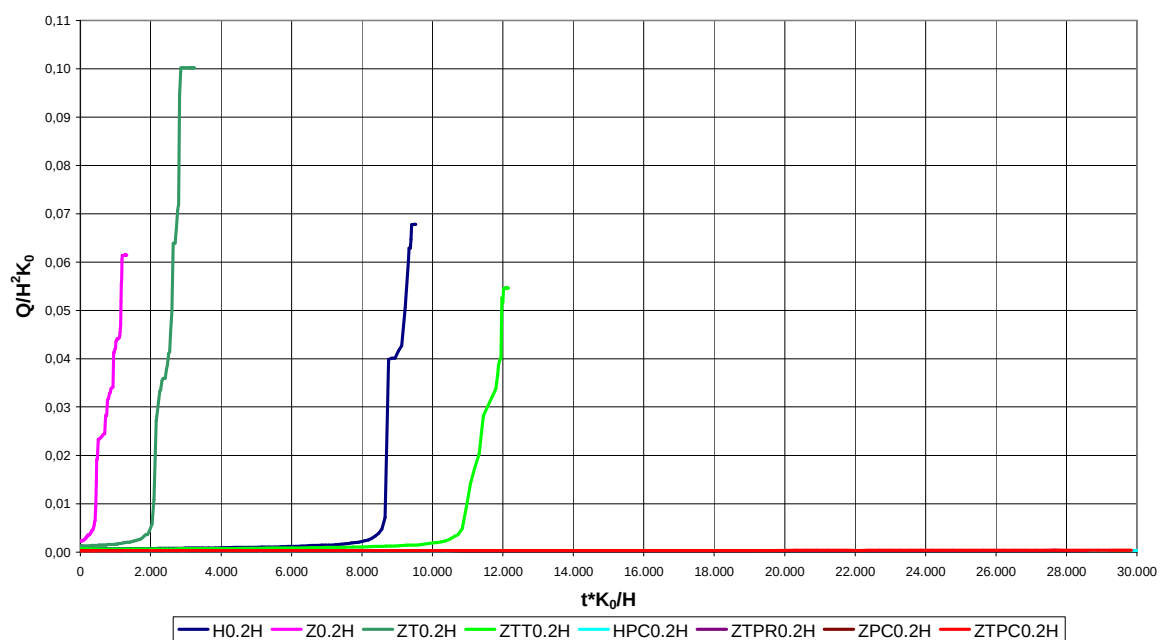
FIGURA N° 121: Relación $t_{adim}-Q/Q_0$ con porcentaje de yeso de 30% y E/H=0,2.FIGURA N° 122: Relación $t_{adim}-Q_{adim}$ con porcentaje de yeso de 40% y E/H=3.

FIGURA N° 123: Relación t_{adim} - Q/Q_0 con porcentaje de yeso de 40% y E/H=3.FIGURA N° 124: Relación t_{adim} - Q_{adim} con porcentaje de yeso de 40% y E/H=1.

COMPARACIÓN DE SECCIONES TIPO PARA 40% DE YESO Y E/H=1

FIGURA N° 125: Relación $t_{adim} \cdot Q/Q_0$ con porcentaje de yeso de 40% y $E/H=1$.

COMPARACIÓN DE SECCIONES TIPO PARA 40% DE YESO Y E/H=0,2

FIGURA N° 126: Relación $t_{adim} \cdot Q_{adim}$ con porcentaje de yeso de 40% y $E/H=0,2$.

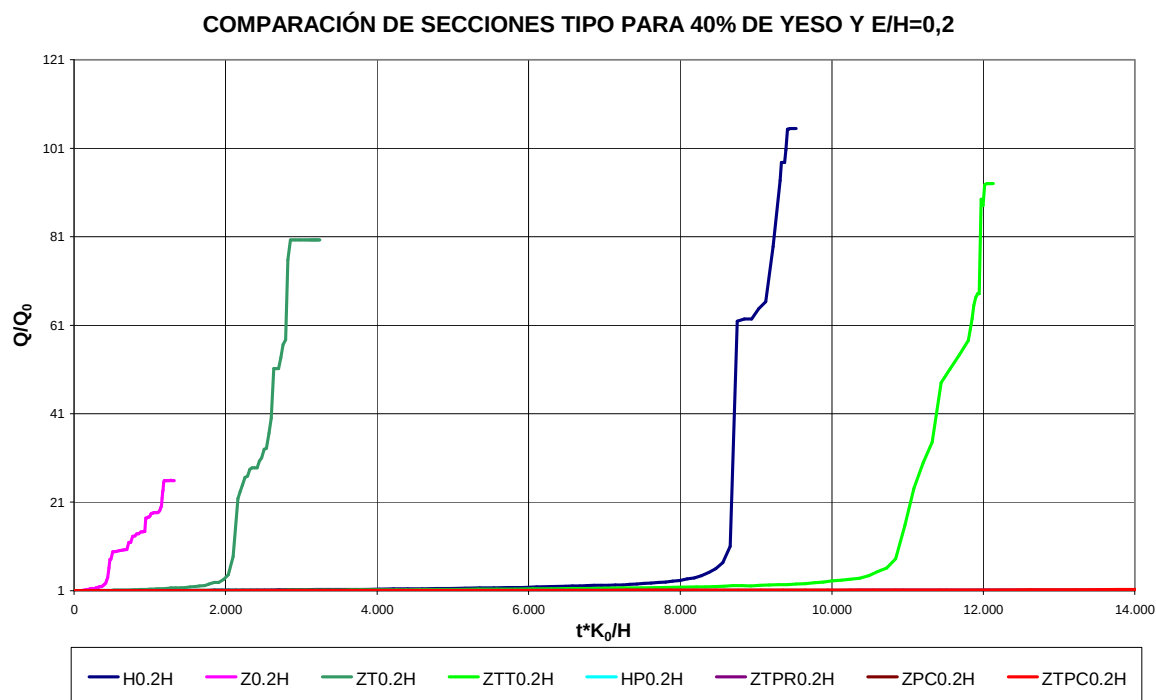


FIGURA N° 127: Relación $t_{\text{adim}} \cdot Q/Q_0$ con porcentaje de yeso de 40% y E/H=0,2.

Se pueden extraer conclusiones importantes sólo comparando en los gráficos anteriores tipologías, porcentajes, espesores, etc. y se irán detallando en el próximo apartado, pero algunas son muy claras: los casos de pantalla empotrada en la capa inferior impermeable se diferencian totalmente del resto, ya que los aumentos de caudal que se producen como consecuencia de la disolución son muy pequeños comparados con el resto de tipologías.

Asimismo, la forma de las curvas de aumento de caudal también muestran conclusiones: por ejemplo, comparando los gráficos de las FIGURA N° 99 y FIGURA N° 123, se ve cómo el porcentaje de yeso del 5% supone un aumento progresivo del caudal a lo largo del tiempo, mientras que en la segunda figura citada, con un 40% de yeso el aumento del caudal es, comparativamente a lo que será al final, muy pequeño, para todas las tipologías y no es hasta el final del proceso, cuando el aumento es casi instantáneo.

Por otra parte las ordenadas en los gráficos Q/Q_0 dan órdenes de magnitud de lo que supone el aumento de caudal según los porcentajes de yeso de la capa, por ejemplo.

Gracias a los gráficos adimensionales anteriores (y dado que podría asimilarse cada uno de ellos a una nueva cerrada a analizar, con un porcentaje de yeso determinado en una capa de espesor en relación a la altura de la presa determinada) y fijando el proyectista unos criterios básicos de idoneidad del diseño en

cuanto a caudales o aumento de caudales en la vida útil de la presa a proyectar, se puede hacer una comparación muy rápida entre tipologías del tipo de las analizadas en el presente estudio.

Si bien este análisis no tiene una generalidad completa, ya que se ha fijado el valor de algunos de los parámetros, sí que permite obtener conclusiones de orden práctico respecto del efecto y eficacia de las diversas opciones de diseño.

Si se cumplen las hipótesis de partida (que el caudal principalmente se filtre por la capa yesífera y que las relaciones de permeabilidades de los materiales sean del orden de las utilizadas en los cálculos), se puede fijar un tiempo en el que se deba cumplir una limitación del caudal (ambos calculados de forma adimensional) o una limitación de la relación Q/Q_0 (aumento de caudal).

Esta limitación en valor absoluto, se puede fijar a partir de los datos dados por De Cea Azañedo, J.C., 2002, en la publicación “Control de comportamiento de presas durante su fase de puesta en carga”, donde en función del tipo de cimentación se establecen unos valores límite para el caudal filtrado por la cimentación (TABLA N° 25), o bien pueden utilizarse otros criterios a determinar por parte del proyectista:

	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

TABLA N° 25 : Caudales máximos filtrados por la cimentación (adaptado de De Cea Azañedo, J.C., 2002).

En el caso del aumento del caudal, y según las particularidades de la cerrada a analizar, el proyectista debería fijar el valor Q/Q_0 .

También el proyectista podría fijar un límite al avance del frente de disolución durante una vida útil o periodo fijado a priori, con la finalidad de que una determinada parte del cimiento de la presa no se viera afectada por la disolución en ese periodo.

En el apartado 6.4 “Criterios de diseño” se profundiza en estos criterios y se sientan las bases para poder aplicarlos en casos concretos.

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

Como se ha detallado en el apartado anterior, la campaña de experimentación numérica ha consistido en el cálculo mediante DISOLUCIÓN2D de 140 casos, agrupados en 28 modelos geométricos de presa y cimiento (combinación de sección tipo y espesor de capa yesífera) o en 15 tipos de cimiento (combinaciones de 3 espesores de capa yesífera y 5 porcentajes de yeso).

Los 13 gráficos de resultados de cada uno de los 28 modelos geométricos han permitido analizar de modo gráfico la relación entre uno de los principales parámetros que influyen en la disolución del cimiento (porcentaje de yeso) y los parámetros característicos del proceso (t_{ab} , $t_{máx}$, Q_{ab} , $Q_{máx}$ y FA).

Mientras que los ábacos de los resultados de los 15 tipos de cimiento van a permitir conclusiones relevantes sobre los criterios de diseño de presas, ya que suponen una comparativa entre secciones tipo para una cimentación dada (caracterizada por su porcentaje de yeso y su espesor en relación a la altura de la presa).

Es preciso recordar que el coeficiente de permeabilidad inicial de la capa yesífera y la altura de la presa (carga de agua en el embalse), aunque no se han variado en la campaña de experimentación, intervienen al usar los ábacos con los parámetros adimensionales de tiempos y caudales.

A continuación se profundiza en la influencia que tienen los parámetros en el complejo proceso acoplado de disolución-filtración, en primer lugar los impuestos en la cerrada, denominados parámetros de la cimentación y en segundo lugar, los parámetros en los que puede actuar el ingeniero proyectista (tales como tapices, pantallas de impermeabilización parciales o totales), denominados parámetros de diseño de la sección tipo.

6.2.1. Influencia de los parámetros de la cimentación

Se ha analizado la influencia de los tres factores que se han variado en los cálculos (ver TABLA N° 20): porcentaje de yeso en la capa yesífera, espesor de la capa yesífera y relación de permeabilidades entre las capas del cimiento.

6.2.1.1. Influencia del porcentaje de yeso

Como se detalla en este apartado, la influencia de este dato (impuesto en la cerrada en cuestión) se observa en la mayoría de los parámetros representativos del proceso: en el aumento de los caudales

filtrados respecto al caudal inicial, en el tiempo y el caudal de llegada aguas abajo de la presa del frente de disolución, en el factor de aceleración y en la forma de avance del frente de disolución.

En la evolución de caudales filtrados

La evolución del caudal filtrado a través del cemento con respecto al tiempo, para cualquier modelo geométrico, es más rápida, pero menos adversa (el incremento en el caudal filtrado respecto al inicial es menor) si el porcentaje de yeso es menor. Cuanto menor es el porcentaje, la masa de yeso tarda menos en disolverse, pero también deja un hueco menor, lo que implica que el aumento de permeabilidad es menor.

Este efecto contrapuesto pudo anticiparse, sin necesidad de aplicar ningún modelo, en las relaciones del avance del frente de disolución u (ajuste potencial) con la velocidad de filtración v y del aumento de permeabilidad respecto al inicial (ajuste exponencial) con el porcentaje de yeso, y se detalló en el apartado 5.1.1.

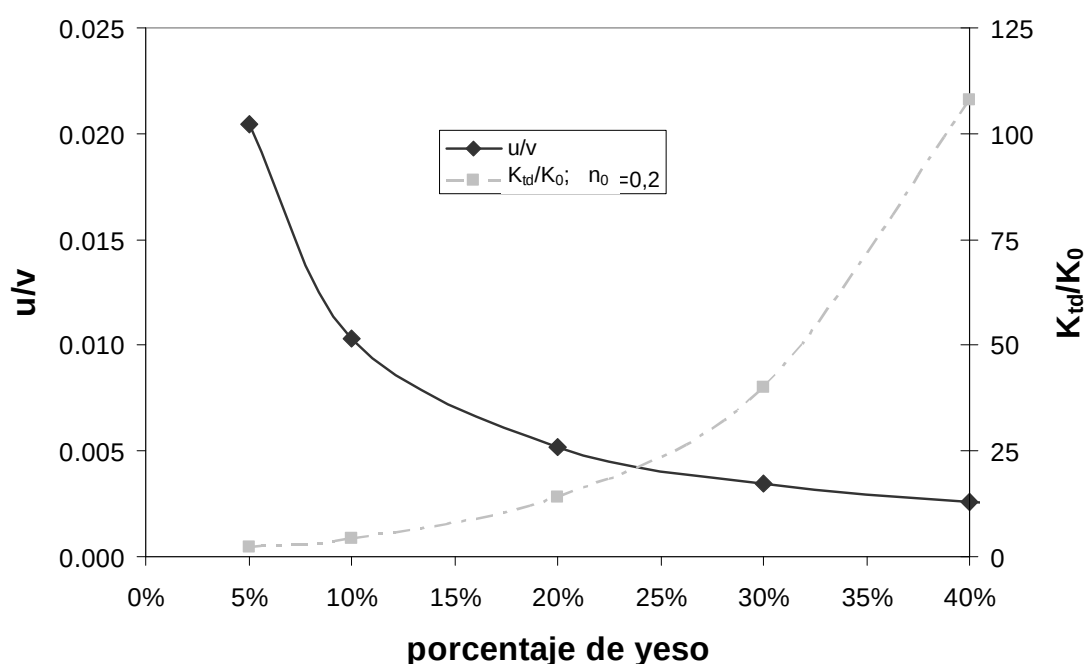
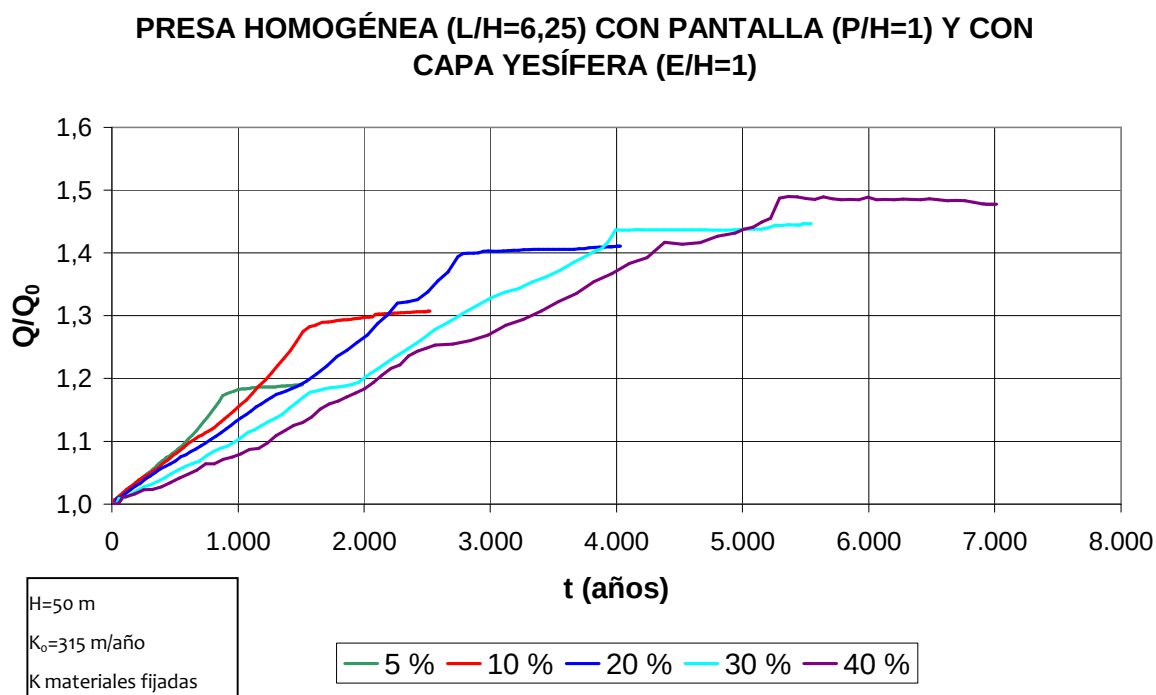


FIGURA N° 128: Relación u/v y K_{td}/K_0 en función del porcentaje de yeso.

Se observaba en la FIGURA N° 86, para el modelo H3H, pero también para cualquiera de los otros modelos geométricos, por ejemplo, el HPC1H en la FIGURA N° 129.

FIGURA N° 129: Gráfico $t - Q/Q_0$, para HPC1H.

En el caso del modelo geométrico HPC1H, se puede ver que el aumento del caudal filtrado respecto al inicial, es del orden de 1,4 para el caso de un porcentaje de 20%. En el caso del H3H, este valor era del orden de 10. Es decir, este aumento también depende de la tipología de la presa, lo cual es muy importante desde el punto de vista del proyectista.

Para este aumento de caudal en función del inicialmente filtrado, se analiza un caso especial, $H_0,2H$ (presa homogénea con capa yesífera de pequeño espesor en relación con la altura de la presa).

Para ello, en la FIGURA N° 130, se han representado los resultados de $Q_{m\acute{a}x}/Q_0$ (siendo $Q_{m\acute{a}x}$ el caudal correspondiente a la formación de un recinto de disolución cerrado bajo la presa, que llega aguas abajo del elemento impermeable y Q_0 el caudal filtrado al inicio) en función del porcentaje de yeso, para los 28 modelos geométricos de presa y cimiento analizados.

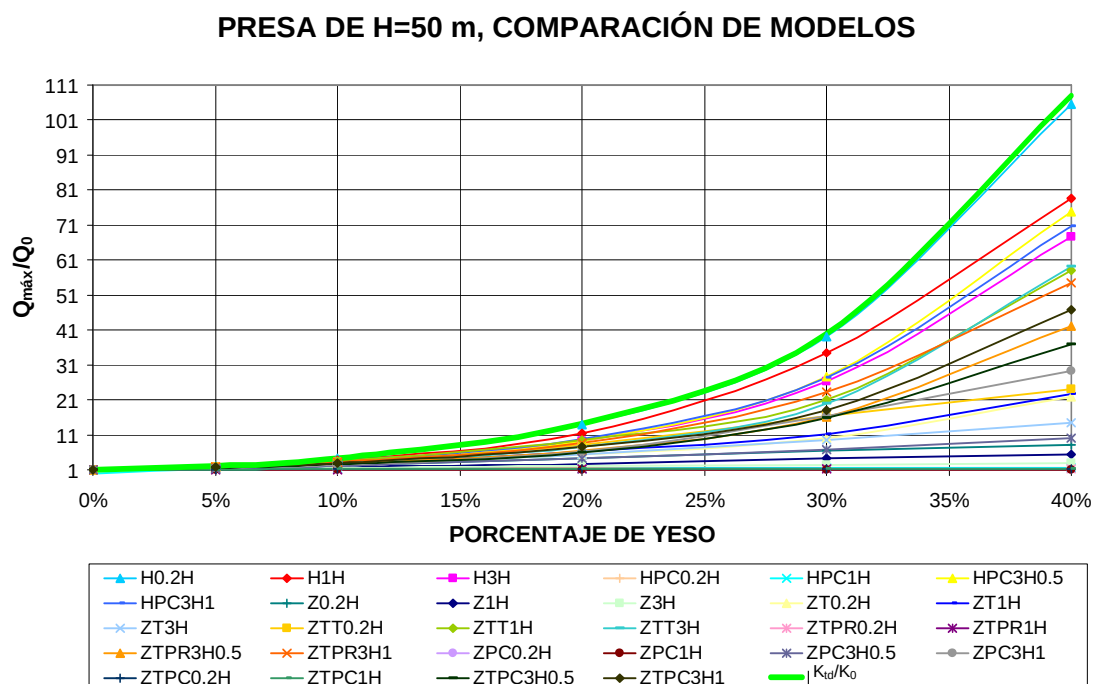


FIGURA N° 130: Gráfico porcentaje de yeso – $Q_{máx}/Q_0$ para todos los modelos geométricos.

Como se observa, existe un límite superior para todos los modelos geométricos y es la relación entre la permeabilidad tras la disolución y la permeabilidad inicial (K_{td}/K_0) dada por la formulación teórica, detallada en el apartado 5.1.2.1:

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

Esto es lógico, porque, como consecuencia de la disolución, aumenta la porosidad efectiva y por tanto, aumenta la permeabilidad del cemento yesífero y el caudal filtrado respecto al inicial también va creciendo progresivamente a lo largo del tiempo.

Este límite superior se corresponde con el caso H0,2H, que debido a esta singularidad, se analiza a continuación. De hecho, si se observa la FIGURA N° 131 se comprueba que la relación $Q_{máx}/Q_0$ en función del porcentaje de yeso, para este caso, es prácticamente igual que la relación de permeabilidades obtenida con la fórmula anterior, que puede ajustarse mediante una ley exponencial.

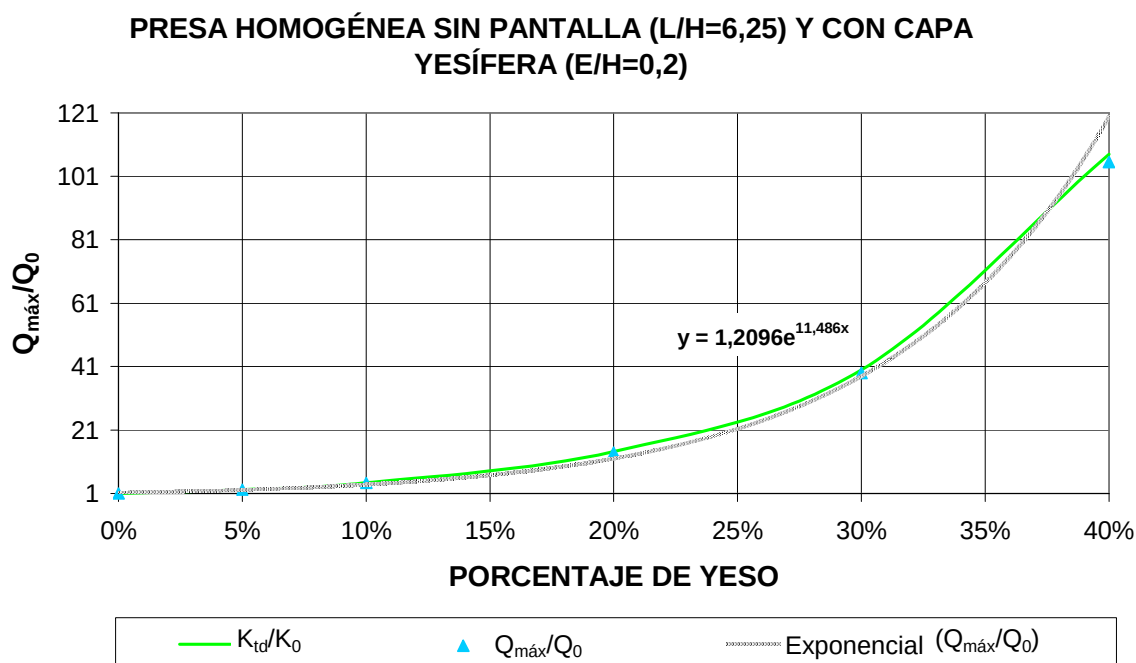


FIGURA N° 131: Gráfico porcentaje de yeso – $Q_{máx}/Q_0$ para sección tipo de presa homogénea y $E/H=0,2$.

Esto puede ser debido a que, dado el pequeño espesor de la capa yesífera, la longitud de la filtración no cambia prácticamente en todo el proceso de disolución y el gradiente hidráulico es prácticamente constante. El área perpendicular al flujo es coincidente prácticamente con $0,2H$. Es decir, es un caso muy similar al modelo teórico de la disolución de partículas en un cilindro de suelo (ver FIGURA N° 27).

Para analizar la similitud con este modelo teórico, se definió el factor de forma FF , a partir de L_t y E teóricos definidos para cada cimentación y de L_{med}/E_{med} (que se puede calcular a partir de K_0H dividido por Q_0 , este último obtenido del cálculo en el instante inicial de la red de filtración):

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

En el caso $H_0,2H$, este factor de forma es prácticamente 1.

En el tiempo que tarda en llegar el frente de disolución aguas abajo del elemento impermeable de la presa:

t_{ab}

La relación puede ajustarse prácticamente a una recta, para porcentajes de yeso entre 10 y 40%, para cualquier modelo geométrico. Que el ajuste sea lineal se debe a que el tiempo que tarda en llegar aguas abajo el frente, supuesto que la velocidad de avance de éste es constante, es directamente proporcional

al porcentaje de yeso (FIGURA N° 37). Para cada altura de presa, este ajuste lineal tiene una expresión, función de dicha altura.

Se puede comprobar en la FIGURA N° 90, para el caso H3H y en la FIGURA N° 132, para el caso HPC1H.

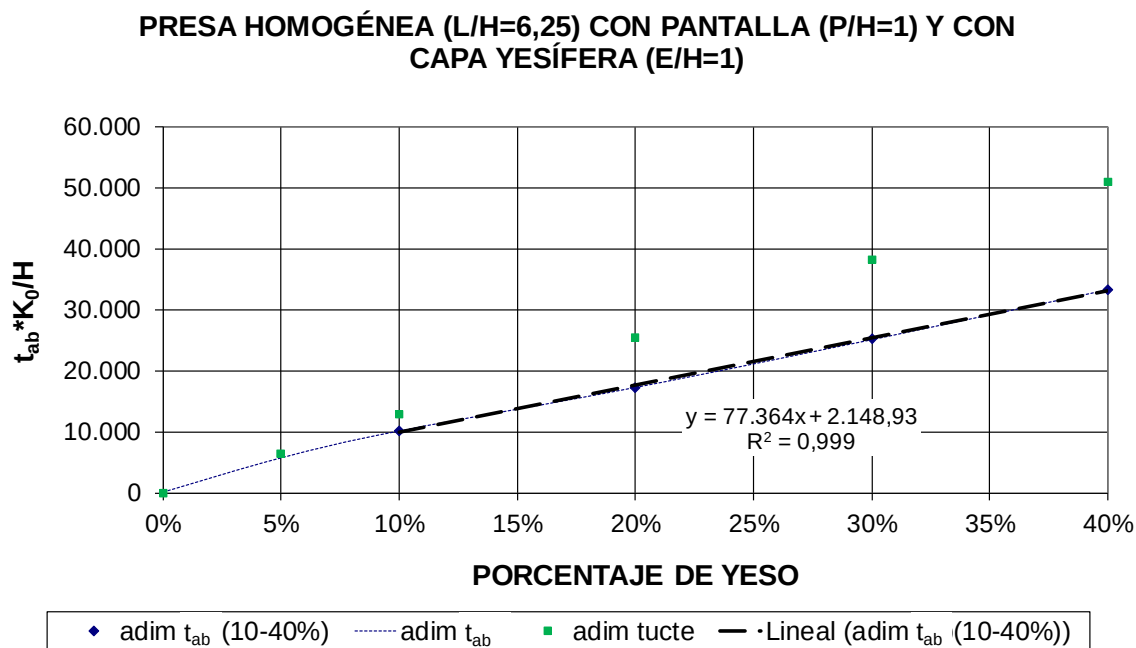


FIGURA N° 132: Gráfico porcentaje de yeso - t_{ab} adimensional, para HPC1H.

El tiempo que tarda en llegar el frente aguas abajo del elemento impermeable, supuesta la velocidad de avance del frente constante (t_{ucte}), también se ajusta a una relación lineal, siendo en este caso la pendiente $\frac{\sigma_0}{C_s} \times \frac{L_{med}^2}{K_0 H}$, ya que:

$$tucte = \frac{\sigma_0}{C_s} \times \frac{L_{med}^2}{K_0 H} \%$$

También se ajusta a una relación prácticamente lineal t_{máx} (tiempo correspondiente a la formación de un recinto de disolución cerrado bajo la presa y que llega aguas abajo del elemento impermeable).

En el caudal de llegada aguas abajo, correspondiente a t_{ab}: Q_{ab}

En este caso, el tipo de ajuste depende de la sección tipo de la presa:

- Para las secciones tipo sin pantalla el ajuste es de tipo exponencial.

Se puede comprobar en la FIGURA N° 93, para el caso H3H y en la FIGURA N° 133, para el caso Z1H.

PRESA ZONIFICADA SIN PANTALLA (L/H=1,1) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=1)

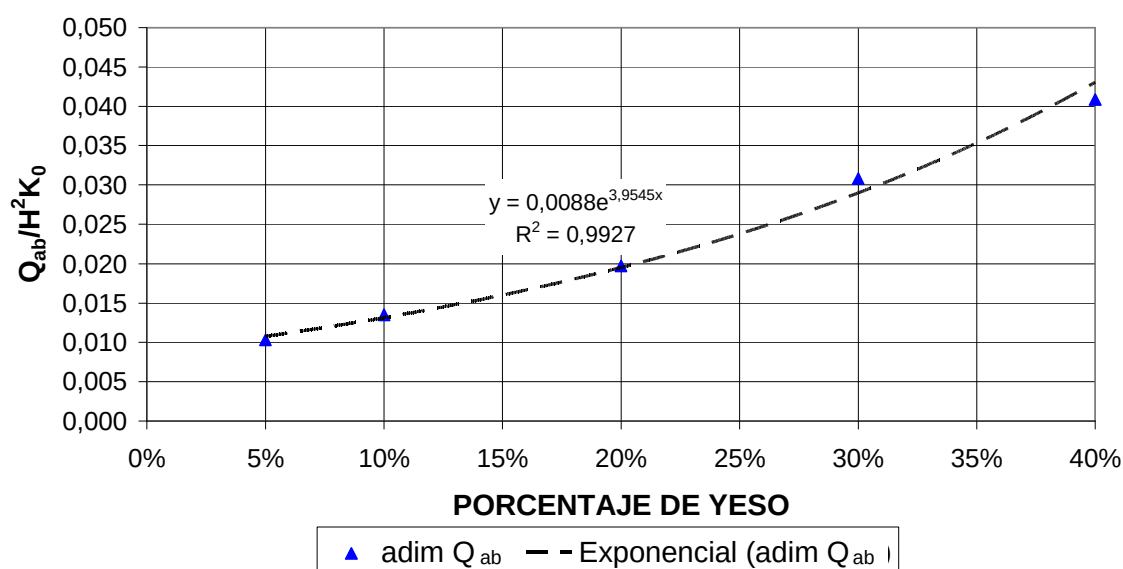


FIGURA N° 133: Gráfico porcentaje de yeso - Q_{ab} adimensional, para Z1H.

- Para las secciones tipo con pantalla en la capa yesífera, pero sin empotrar en una capa inferior impermeable no yesífera, el ajuste también es exponencial, como se observa en la FIGURA N° 134, para el modelo geométrico HPC3H1.

PRESA HOMOGÉNEA (L/H=6,25) CON PANTALLA (P/H=1) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)

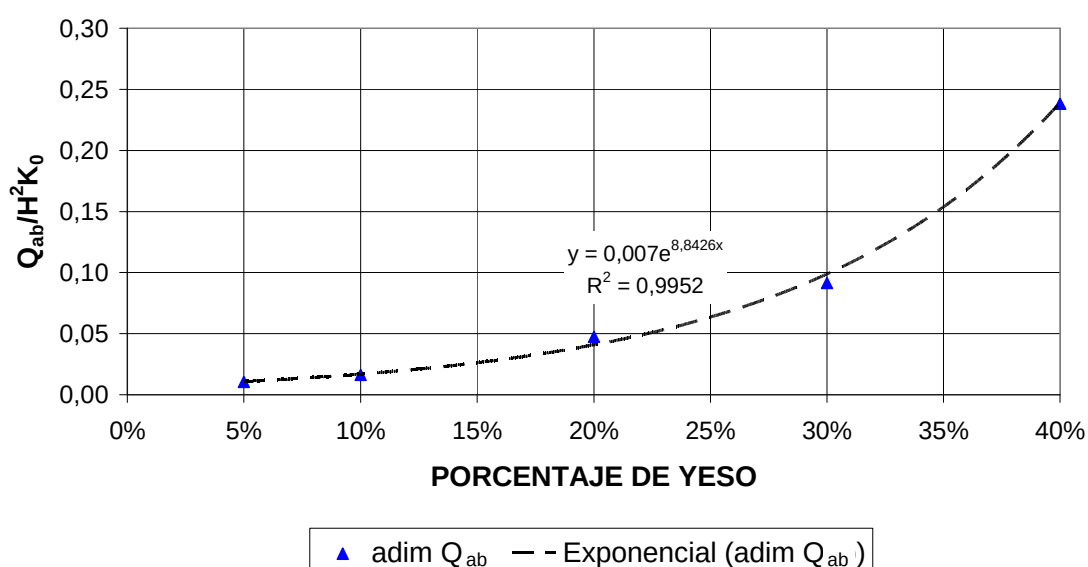


FIGURA N° 134: Gráfico porcentaje de yeso - Q_{ab} adimensional, para HPC3H1.

- Para las secciones tipo con pantalla empotrada en una capa inferior no yesífera y más impermeable, el ajuste es logarítmico. Se adjunta el gráfico para el modelo geométrico HPC1H en la FIGURA N° 135.

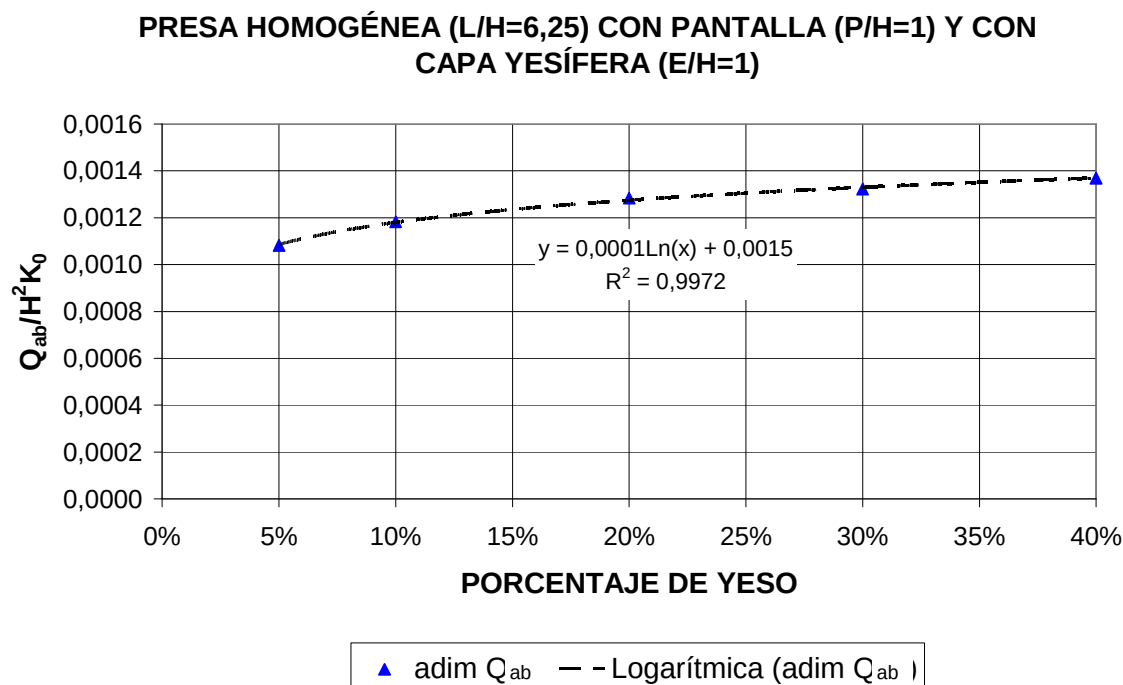


FIGURA N° 135: Gráfico porcentaje de yeso - Q_{ab} adimensional, para HPC1H.

También se ajusta del mismo modo $Q_{m\acute{a}x}$ (Caudal de recinto completo).

Este análisis es sumamente importante, porque quiere decir que el efecto de la pantalla empotrada en una capa no yesífera y más impermeable por debajo de la capa yesífera, frena de forma muy efectiva el caudal filtrado (ver órdenes de magnitud de los ejes de ordenadas) y además, no existe un aumento mucho mayor si el porcentaje de yeso es mayor.

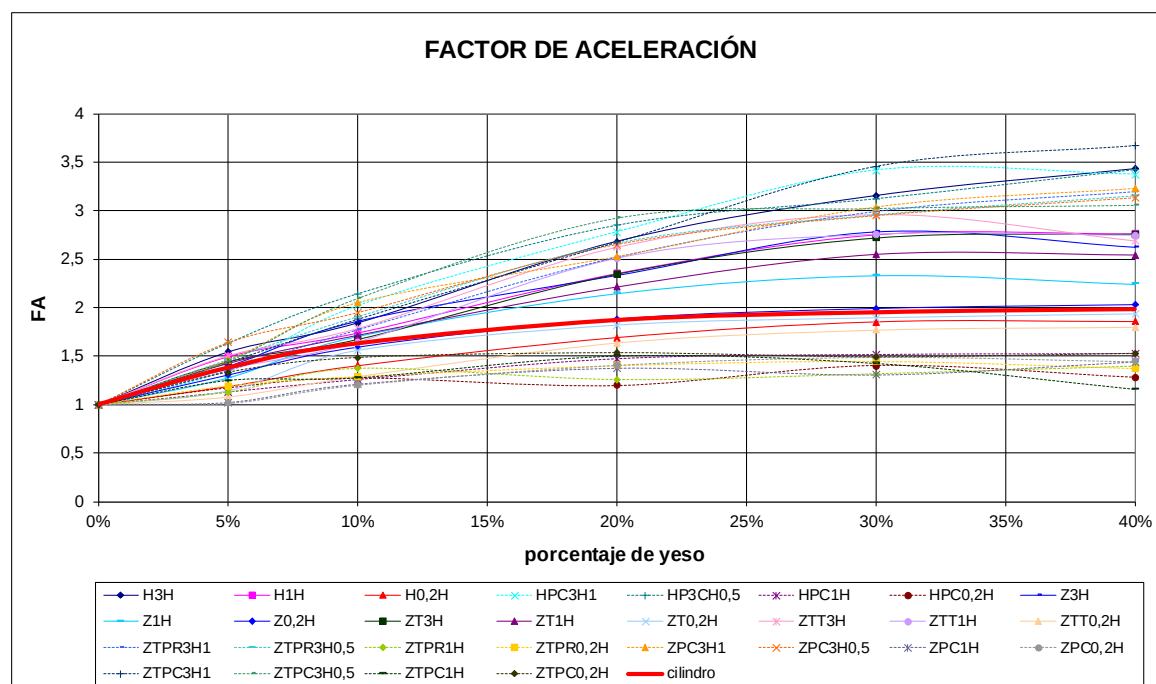
En el Factor de aceleración FA

Recordemos que el factor de aceleración se definía como la relación entre el tiempo que tardaría en llegar el frente de disolución al pie del elemento impermeable de la presa con velocidad constante (t_{ucte}) y el tiempo que tarda en recorrerlo aplicando el modelo numérico DISOLUCIÓN2D (t_{ab}).

Este factor 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.

Igualmente que para los casos de los ensayos de validación (apartado 5.2.7), se ha obtenido el factor de aceleración para los 28 modelos geométricos de presa y cimiento, en función del porcentaje de yeso (FIGURA N° 136).



*en línea discontinua se muestran los casos con pantalla total o parcial

FIGURA N° 136: Gráfico porcentaje de yeso - FA para los distintos modelos geométricos de presa y cimiento.

La línea continua roja corresponde al cálculo para el cilindro de suelo con la misma porosidad inicial (FIGURA N° 66).

Se observa que, como cabe esperar, a mayor porcentaje de material soluble, el factor de aceleración es mayor, si bien a partir del 25% casi no se produce aumento. Según el gráfico de la FIGURA N° 136, para un porcentaje del 10% oscila entre 1,20 y 2,30; para un porcentaje del 30% oscila entre 1,26 y 3,40, dependiendo del modelo geométrico de presa y cimiento.

También ocurre que, en los casos en los que la pantalla empotra en una capa más impermeable que la capa yesífera (casos 1H y 0,2H con pantalla), el factor de aceleración siempre es menor que el que correspondería al modelo de disolución de un cilindro de suelo (línea roja continua de los gráficos). Es

decir, este factor depende de la sección tipo de la presa, y los casos en los que se produce un mayor control de la disolución, se corresponden con factores de aceleración más bajos.

Si eliminamos los casos con pantalla total, el FA en el caso teórico de un cilindro de suelo sería un límite inferior de todas las tipologías de presa analizadas (de hecho, para el caso Ho,2H sería muy similar si se considerara el $t_{máx}$, mayor que t_{ab} y donde la disolución de la capa yesífera se asimila también al caso teórico de un cilindro de suelo). A diferencia de lo que ocurre si consideramos el límite superior de Q_{ab}/Q_o , que dejaría del lado de la seguridad en cualquier caso, considerar el límite inferior para cualquier cálculo de FA supondría un mayor t_{ab} que el calculado, lo cual quedaría del lado de la inseguridad. Es decir, para estar del lado de la seguridad al calcular t_{ab} , necesitaríamos un límite superior para FA.

Otra conclusión importante respecto a este factor, como se demostró en el apartado 5.2.7, es que NO depende del tipo de material soluble. Se ha deducido y comprobado realizando los cálculos de diversos modelos, con diversos porcentajes, para yeso y para bicarbonato sódico.

Además, como consecuencia del cálculo de t_{ucte} , se ha podido calcular el gradiente hidráulico medio inicial de cada modelo geométrico de presa y cimiento y la longitud media del recorrido de la filtración, valor este último que se verá de gran importancia para poder establecer una formulación de los parámetros representativos (ver apartado 6.3).

Cálculo del gradiente hidráulico medio inicial y de la longitud media a partir de la definición de FA

El gradiente hidráulico medio inicial es difícil de calcular porque se desconoce la velocidad media inicial (a pesar de que por el cálculo mediante FastSEEP se tenga el campo de velocidades en el cimiento) y la longitud media del recorrido de la filtración.

Para obtener el factor de aceleración es preciso realizar, para cada modelo geométrico de presa y cimiento, dos cálculos mediante DISOLUCIÓN2D: el explicado en el Apéndice N° 1, que permite obtener el denominador de la expresión (t_{ab}) y otro cálculo, sin aumentar la permeabilidad de los elementos con material soluble, que permite obtener el numerador, t_{ucte} .

Por tanto, obtenido el tiempo que tarda en llegar el frente aguas abajo del elemento impermeable, supuesta la velocidad de avance del frente constante (t_{ucte}), se puede obtener la longitud media del recorrido de la filtración:

$$L_{media} = t_{ucte} u_{media} = t_{ucte} \frac{u}{v} v_{media} = t_{ucte} \frac{u}{v} \frac{KH}{L_{media}}; L_{media} = \sqrt{t_{ucte} \frac{u}{v} KH}$$

A partir de ella, se puede calcular la velocidad media inicial y el gradiente hidráulico medio inicial.

En la TABLA N° 26 se muestra un resumen de todos estos parámetros para los 28 modelos geométricos de presa y cimiento calculados.

MODELOS	E/H	L ₁ /H	Pantalla	Tapiz	P/H	(L ₁ +P)/H	L ₁ +P	Q ₀	L _{media}	L _{media} /(L ₁ +P)	L _{media} /H	i ₀
H3H	3,0	6,3	NO	NO		6,250	312,50	5023	346,92	1,11	6,94	0,14
H1H	1,0	6,3	NO	NO		6,250	312,50	2234	334,91	1,07	6,70	0,15
H0.2H	0,2	6,3	NO	NO		6,250	312,50	507	325,00	1,04	6,50	0,15
HPC3H1	3,0	6,3	SI	NO	1,0	7,250	362,50	4752	371,91	1,03	7,44	0,13
HPC3H0.5	3,0	6,3	SI	NO	0,5	6,750	337,50	4963	344,37	1,02	6,89	0,15
HPC1H	1,0	6,3	SI, EMP	NO	1,0	7,250	362,50	725	575,39	1,59	11,51	0,09
HPC0.2H	0,2	6,3	SI, EMP	NO	0,2	6,450	322,50	189	608,17	1,89	12,16	0,08
Z3H	3,0	1,1	NO	NO		1,100	55,00	10390	89,00	1,62	1,78	0,56
Z1H	1,0	1,1	NO	NO		1,100	55,00	5836	85,15	1,55	1,70	0,59
Z0.2H	0,2	1,1	NO	NO		1,100	55,00	1868	80,00	1,45	1,60	0,63
ZT3H	3,0	2,7	NO	SI		2,675	133,75	7573	174,22	1,30	3,48	0,29
ZT1H	1,0	2,7	NO	SI		2,675	133,75	3687	169,15	1,26	3,38	0,30
ZT0.2H	0,2	2,7	NO	SI		2,675	133,75	983	165,00	1,23	3,30	0,30
ZTT3H	3,0	6,3	NO	SI		6,250	312,50	4737	375,31	1,20	7,51	0,13
ZTT1H	1,0	6,3	NO	SI		6,250	312,50	1990	365,87	1,17	7,32	0,14
ZTT0.2H	0,2	6,3	NO	SI		6,250	312,50	463	360,00	1,15	7,20	0,14
ZTPR3H1	3,0	2,7	SI	SI	1,0	3,675	183,75	6250	240,92	1,31	4,82	0,21
ZTPR3H0.5	3,0	2,7	SI	SI	0,5	3,175	158,75	7020	200,27	1,26	4,01	0,25
ZTPR1H	1,0	2,7	SI, EMP	SI	1,0	3,675	183,75	799	381,10	2,07	7,62	0,13
ZTPR0.2H	0,2	2,7	SI, EMP	SI	0,2	2,875	143,75	217	391,70	2,72	7,83	0,13
ZPC3H1	3,0	1,1	SI	NO	1,0	2,100	105,00	8345	176,83	1,68	3,54	0,28
ZPC3H0.5	3,0	1,1	SI	NO	0,5	1,600	80,00	9674	118,75	1,48	2,38	0,42
ZPC1H	1,0	1,1	SI, EMP	NO	1,0	2,100	105,00	846	240,73	2,29	4,81	0,21
ZPC0.2H	0,2	1,1	SI, EMP	NO	0,2	1,300	65,00	220	255,07	3,92	5,10	0,20
ZTPC3H1	3,0	2,7	SI	SI	1,0	3,675	183,75	6632	237,41	1,29	4,75	0,21
ZTPC3H0.5	3,0	2,7	SI	SI	0,5	3,175	158,75	7250	193,42	1,22	3,87	0,26
ZTPC1H	1,0	2,7	SI, EMP	SI	1,0	3,675	183,75	792	385,51	2,10	7,71	0,13
ZTPC0.2H	0,2	2,7	SI, EMP	SI	0,2	2,875	143,75	206	422,60	2,94	8,45	0,12

TABLA N° 26: Longitud media y gradiente inicial medio para las distintas secciones tipo de presas y espesores de capa yesífera.

En la forma del avance del frente

El efecto del porcentaje de yeso, se puede observar en los gráficos de la FIGURA N° 137 a la FIGURA N° 142. En el primero, se muestra el modelo al inicio, una vez que se establece la red de filtración.

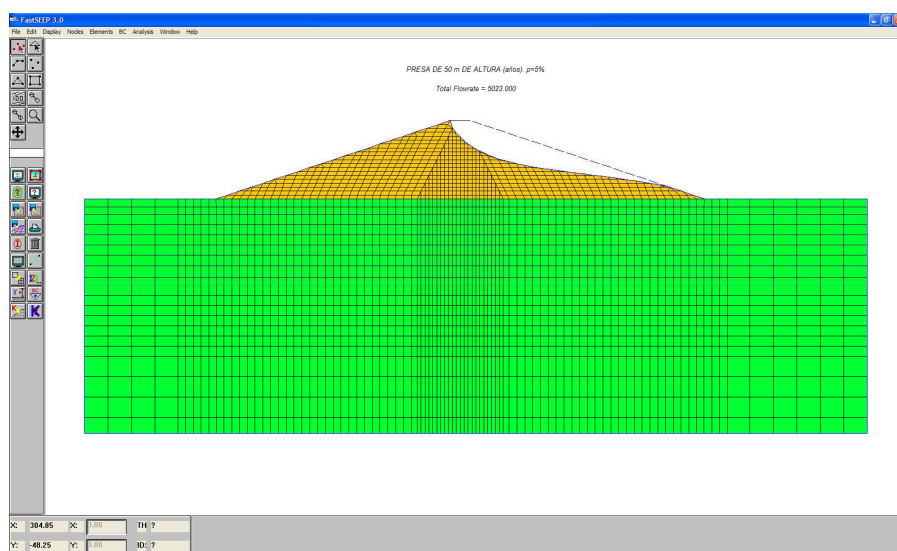


FIGURA N° 137: Modelo H3H al inicio.

En la FIGURA N° 138, con un 5% de yeso, se observa que al cabo de unos 240 años el frente ha llegado aguas abajo y el caudal se ha multiplicado por 1,6.

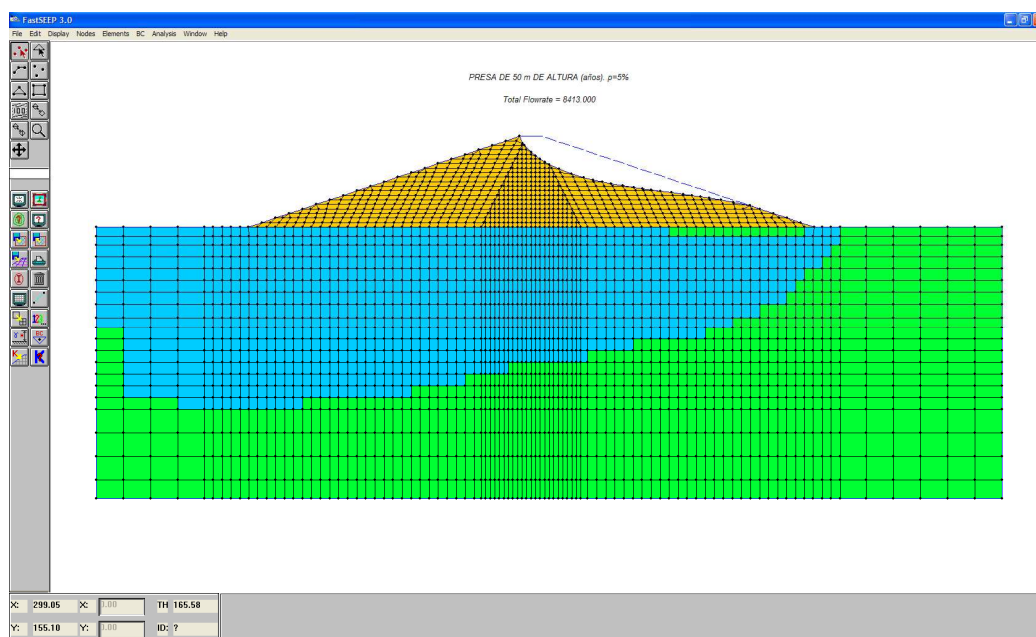


FIGURA N° 138: Modelo H3H con 5% de yeso tras la disolución.

En la FIGURA N° 139, con un 10% de yeso, el frente ha llegado aguas abajo después de unos 400 años y el caudal casi se ha triplicado.

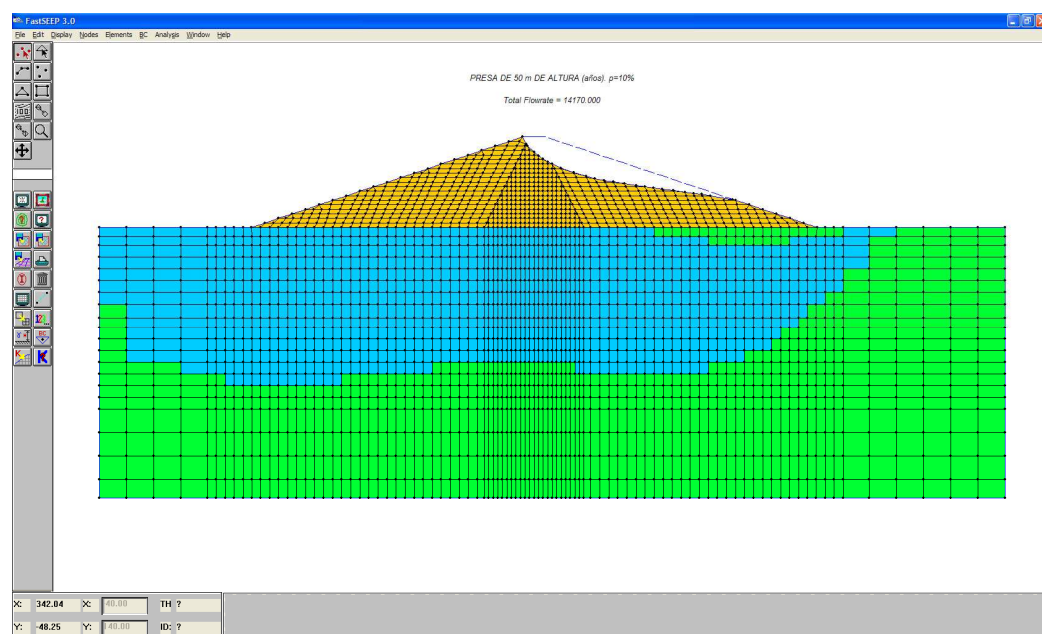


FIGURA N° 139: Modelo H3H con 10% de yeso tras la disolución.

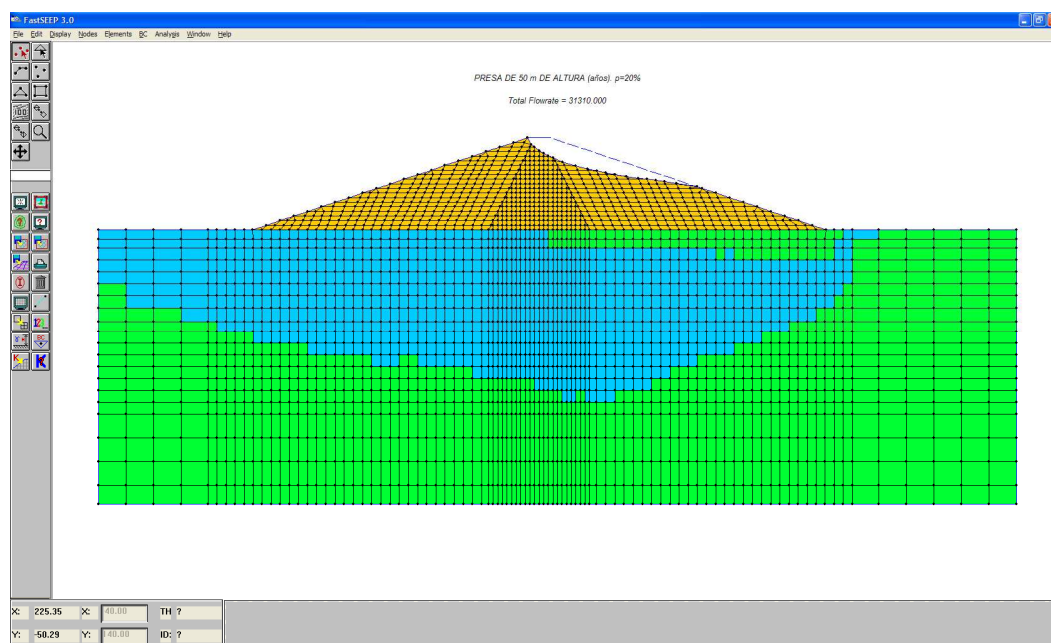


FIGURA N° 140: Modelo H3H con 20% de yeso tras la disolución.

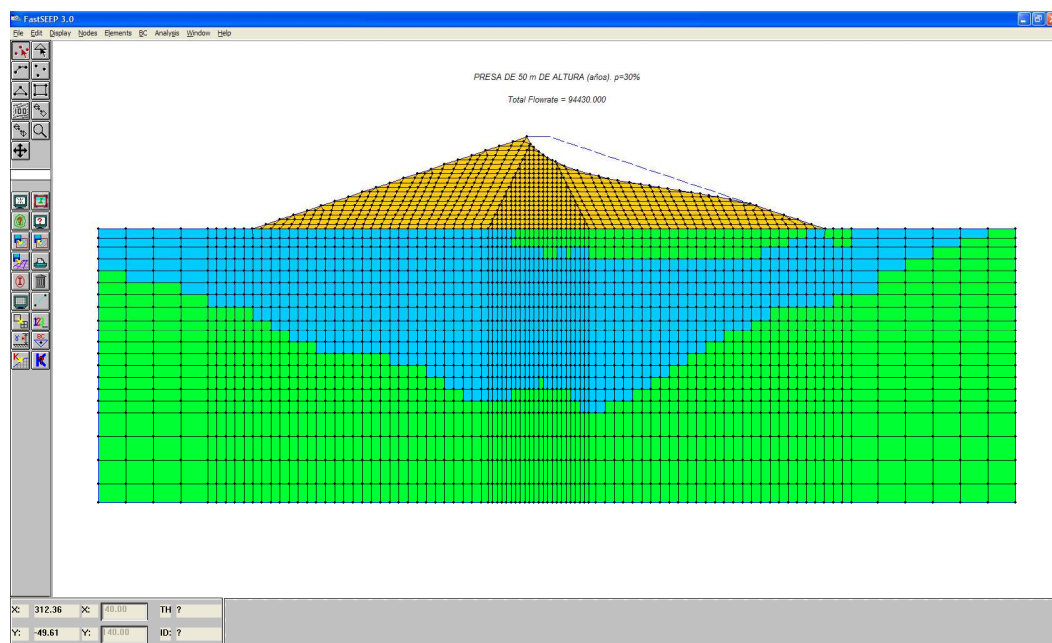


FIGURA N° 141: Modelo H3H con 30% de yeso tras la disolución.

En la FIGURA N° 142, con un 40% de yeso, al cabo de unos 860 años alcanza el pie de aguas abajo y el caudal se ha multiplicado por 39 respecto al inicial.

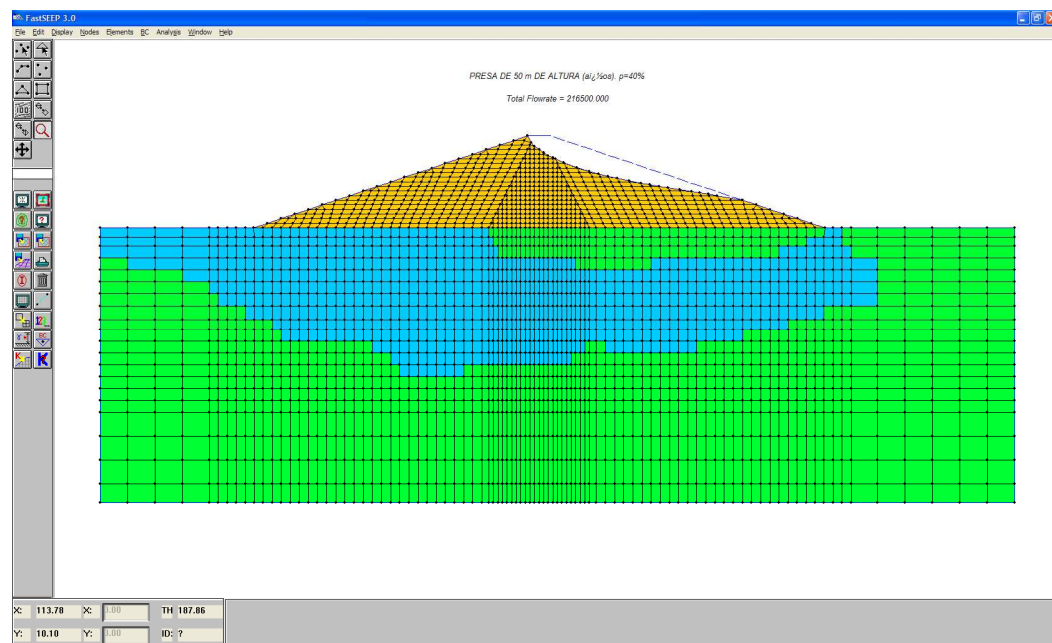


FIGURA N° 142: Modelo H3H con 40% de yeso tras la disolución.

Se observa que si el porcentaje de yeso es menor, la forma de avance del frente es más extendida. En todos los casos H_3H , el frente de disolución afecta a un espesor de cemento mayor que la altura de la presa.

6.2.1.2. Influencia del espesor de la capa yesífera

A igualdad de otros factores, si el espesor de la capa yesífera es mayor, el incremento del caudal filtrado respecto al inicial es menor, pero el avance es más rápido.

En el caudal inicial Q_0

Si comparamos, para cada tipología, el caudal inicialmente filtrado, es mayor si el espesor de la capa yesífera es mayor, dado que la hipótesis de partida es que la capa situada bajo la capa yesífera es más impermeable que ésta (3 órdenes de magnitud).

En la evolución de caudales filtrados

Comparemos las gráficas $t-Q/Q_0$ de la FIGURA N° 143, para el caso de presa homogénea con espesor de la capa yesífera de $3H$ y $0,2H$.

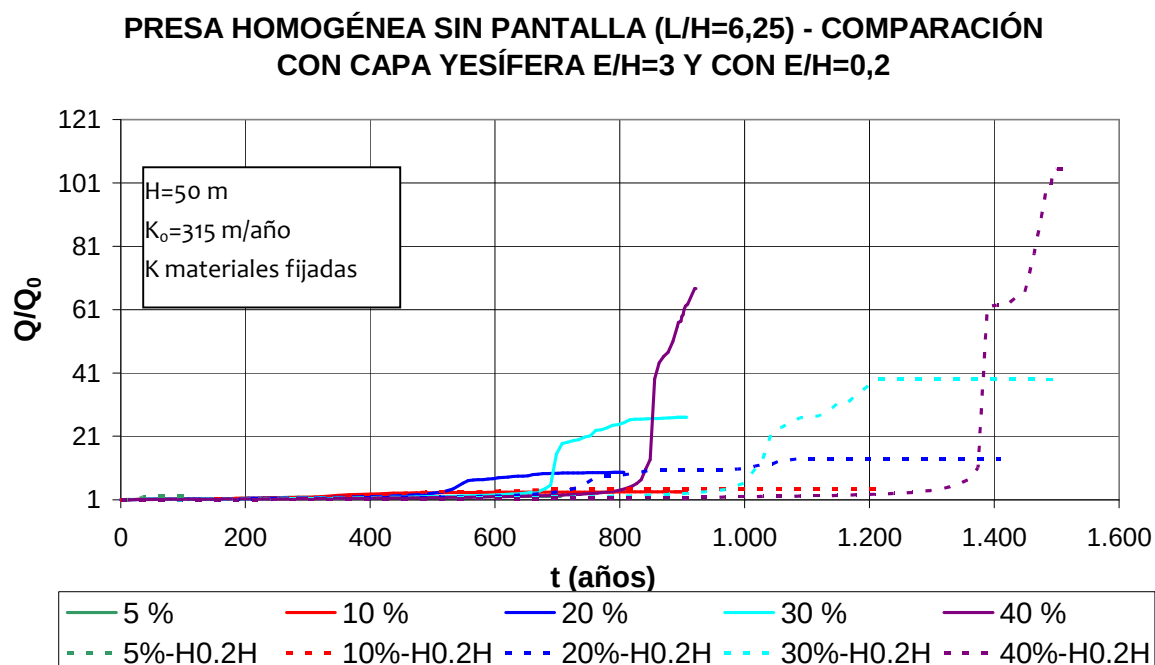


FIGURA N° 143: Gráfico $t-Q/Q_0$ para una presa homogénea sin pantalla – Comparación con $E/H=3$ y $E/H=0,2$ (discontinua).

En el caso de un porcentaje de yeso de 30%, si la capa yesífera tiene un espesor 3H, el caudal tras la disolución es de 27 veces el inicial, mientras que para un espesor de 0,2 la relación de caudales es 39.

Esto puede deberse a que, si el espesor de la capa es pequeño (comparado con la altura de la presa) los elementos del cemento que se disuelven, una vez completado el proceso, son un número mayor comparativamente a los no disueltos en la capa. A pesar de esto, como se ha analizado anteriormente, si la capa de yeso tiene mayor espesor, el caudal filtrado inicialmente es mayor.

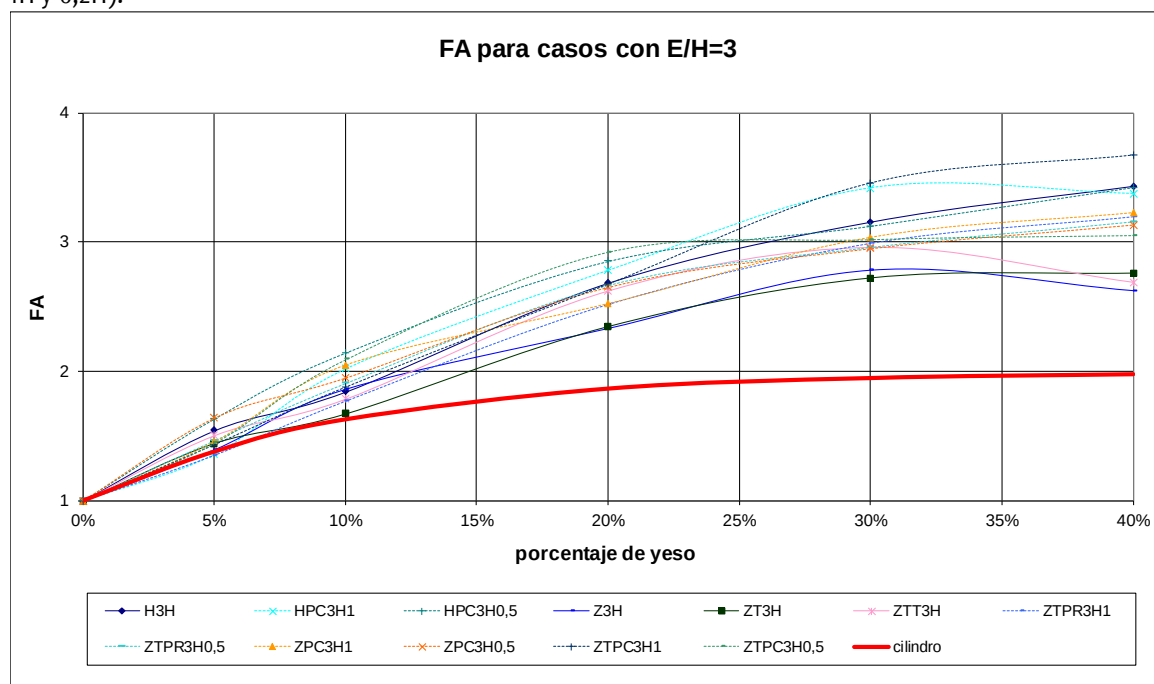
En el tiempo que tarda en llegar el frente de disolución aguas abajo del elemento impermeable de la presa:

t_{ab}

Sin embargo, en el ejemplo anterior, con un porcentaje del 30%, el tiempo en el que se alcanza aumento de caudales es de 820 años en el primer caso (3H), frente a 1.210 años en el segundo (0,2H), con menor espesor de la capa yesífera. Es decir, el avance es más rápido en el caso de mayor espesor.

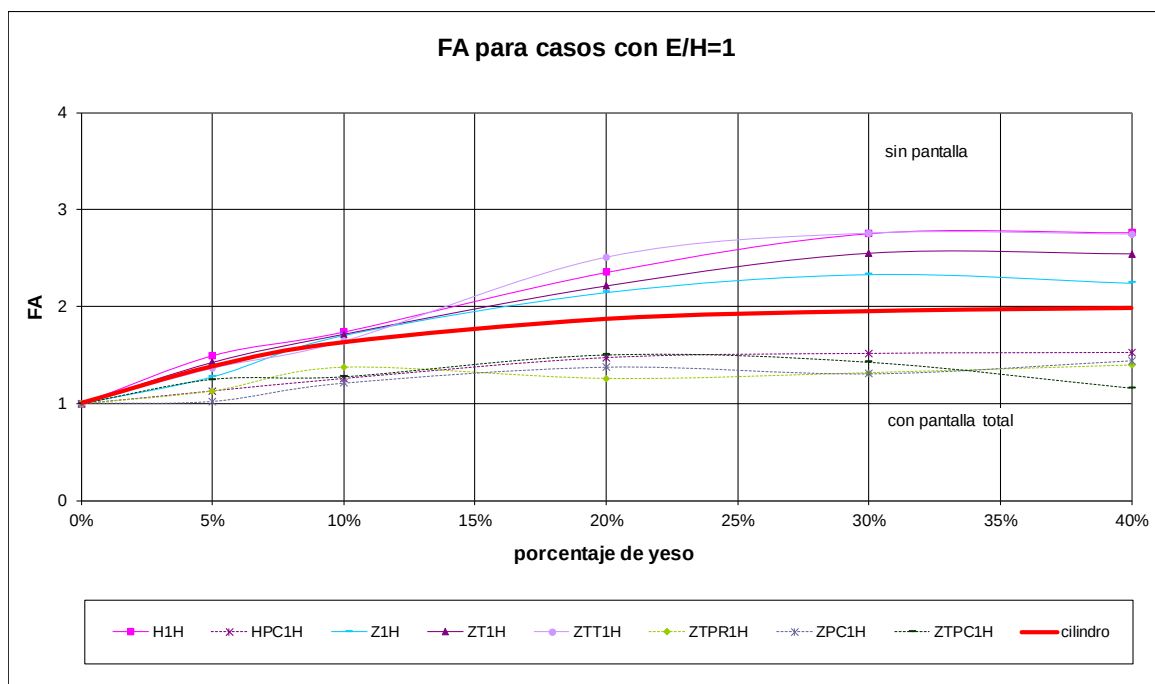
En el Factor de aceleración FA

En los gráficos de la FIGURA N° 144 a la FIGURA N° 146, se adjuntan los resultados del FA para cada porcentaje de yeso, en función de la sección tipo y para los tres espesores de capa yesífera analizados (3H, 1H y 0,2H).



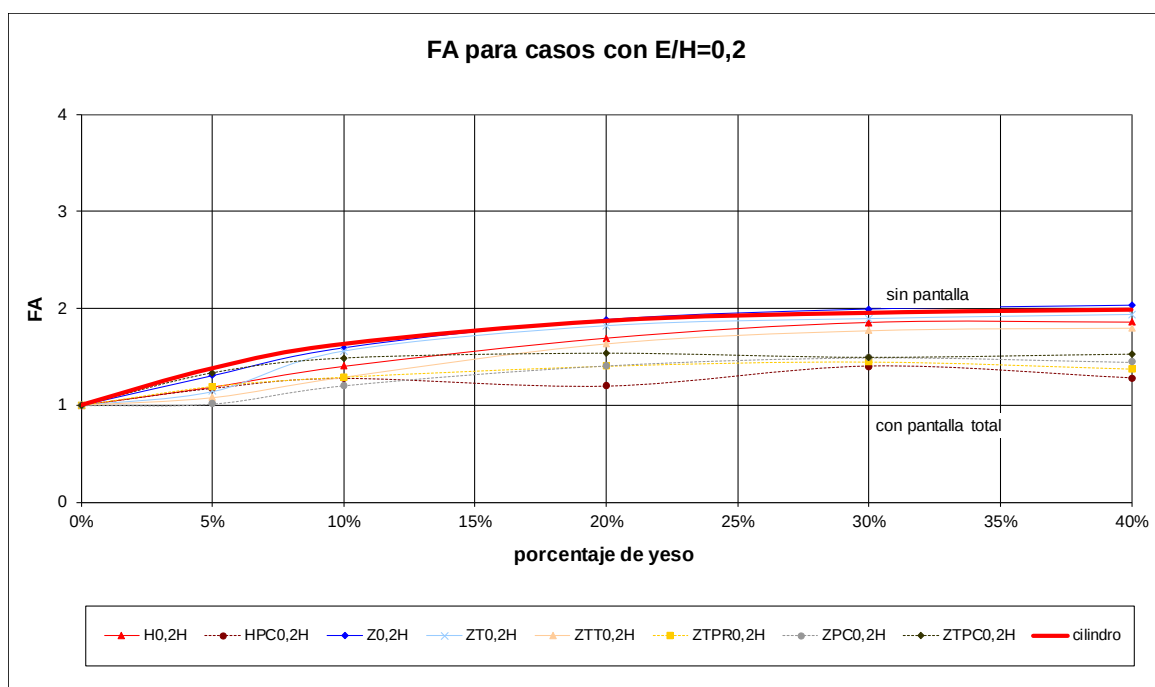
*en línea discontinua se muestran los casos con pantalla (parcial)

FIGURA N° 144: Gráfico porcentaje de yeso - FA para distintas secciones tipo de presa en el caso de capa yesífera de espesor 3H.



*en línea discontinua se muestran los casos con pantalla (total)

FIGURA Nº 145: Gráfico porcentaje de yeso - FA para distintas secciones tipo de presa en el caso de capa yesífera de espesor 1H.



*en línea discontinua se muestran los casos con pantalla (total)

FIGURA Nº 146: Gráfico porcentaje de yeso - FA para distintas secciones tipo de presa en el caso de capa yesífera de espesor 0,2H.

6.2.1.3. Influencia de la relación de permeabilidades entre la capa yesífera y la capa no yesífera (casos 1H y 0,2H)

Anteriormente, se ha especificado que si la relación de permeabilidades no es la estipulada para los cálculos realizados en la campaña de experimentación numérica, es preciso hacer un cálculo específico del caso a analizar.

A continuación, se analiza la influencia de este factor, a partir de los cálculos realizados para el modelo geométrico HPC1H, con un 20% de yeso en la capa yesífera, pero variando la relación entre las permeabilidades de las capas de cemento, desde los tres órdenes de magnitud en el caso tipo, a dos, uno y mismo orden. En la FIGURA N° 147 se ve la influencia en los resultados t-Q, para los 4 casos analizados.

Se observa que en el caso de que la capa situada por debajo de la capa yesífera, en la que se empotra la pantalla, sea muy impermeable respecto a la capa yesífera (3 órdenes de magnitud), prácticamente no hay aumento del caudal filtrado. Sin embargo, si la capa yesífera es 10 veces más permeable que la capa inferior no yesífera, el caudal aumenta de unos 1.800 m³/año, a unos 4.500 m³/año (2,5 veces). Si son de la misma permeabilidad, el aumento es del orden de 4 veces.

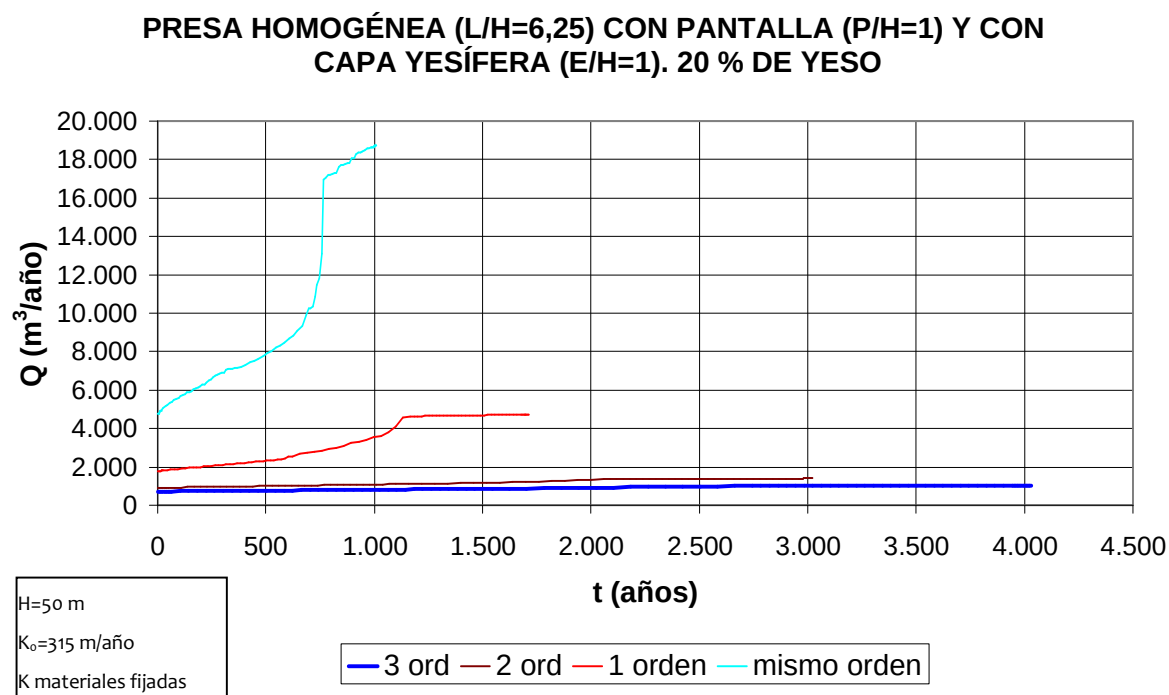


FIGURA N° 147: Relación t-Q en modelo HPC1H con porcentaje de yeso de 20%, según la relación de permeabilidades entre las capas de cemento.

Además, los tiempos que definen el fenómeno de disolución (t_{ab} y $t_{m\acute{a}x}$), cambian significativamente, disminuyendo si la relación entre permeabilidades disminuye desde los dos órdenes de magnitud.

La conclusión más importante de este análisis es que la relación de permeabilidades entre las capas de cimiento influye en los resultados de forma notable, por lo que la interpretación de los gráficos debe hacerse teniendo en cuenta que las relaciones de permeabilidad son las dadas en la TABLA N° 19. Sin embargo, el aumento del caudal filtrado para el caso de una diferencia de tres órdenes de magnitud no es muy distinto al caso con una diferencia de dos órdenes de magnitud (Ver FIGURA N° 147).

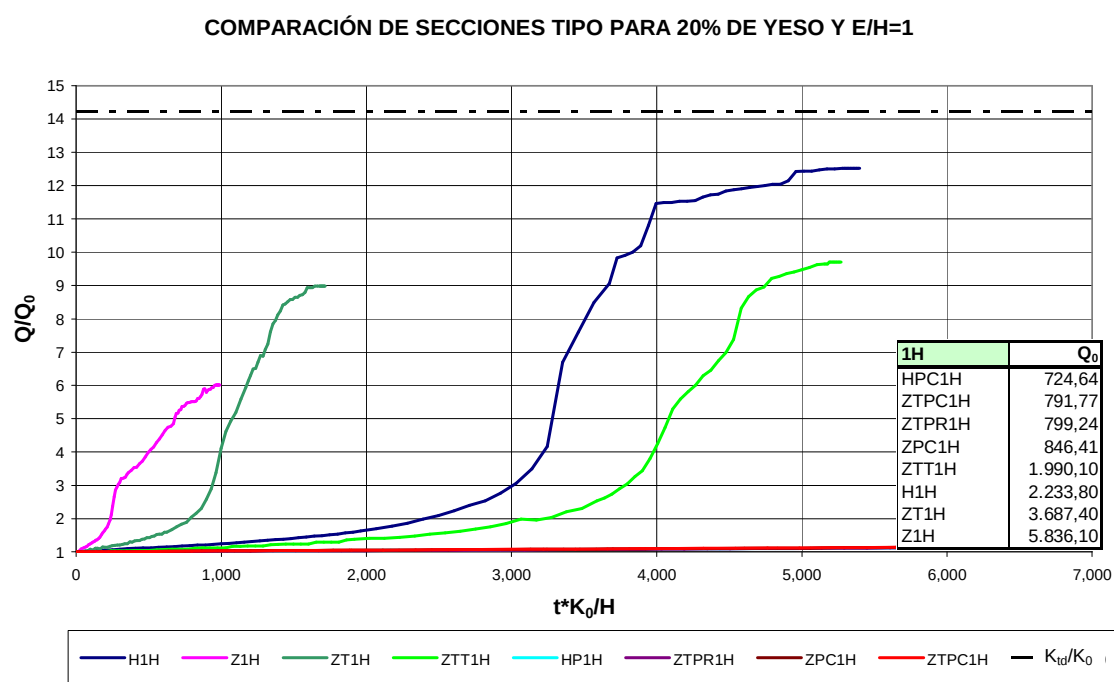
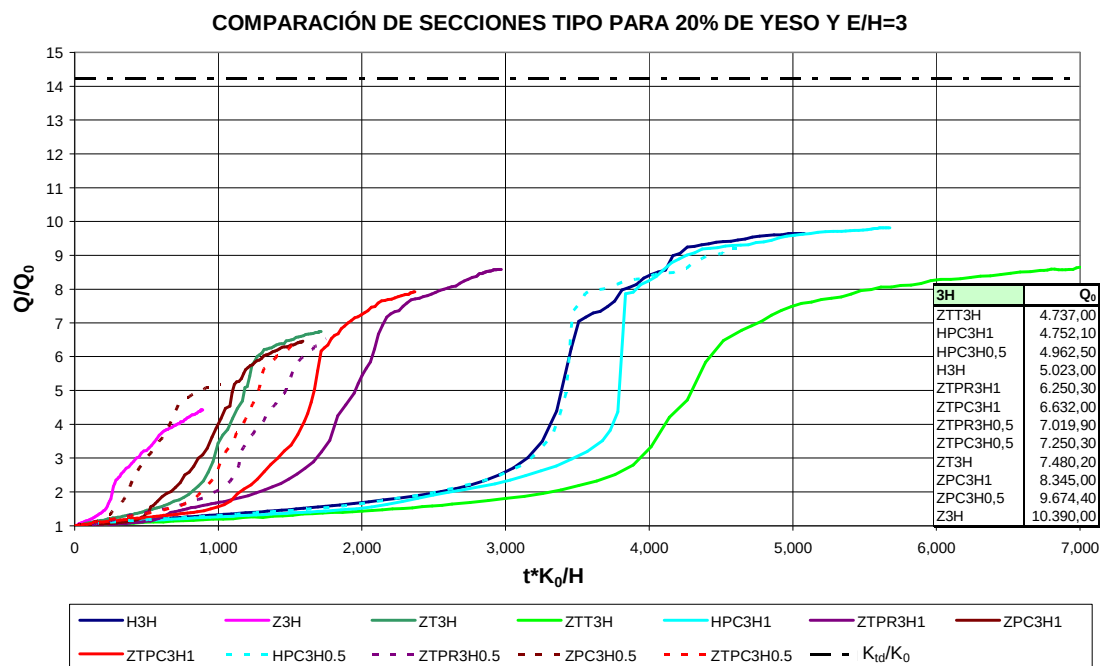
6.2.2. Influencia de los parámetros de diseño de la sección tipo

La importancia de estos parámetros es que no son impuestos por la cerrada, sino que son fijados por el proyectista.

El análisis de los resultados para los 15 tipos de cimiento (combinación de porcentaje de yeso con espesor de capa yesífera, cuyos resultados se adjuntan en el Apartado 6.1.5.2) permite la comparación entre secciones tipo con el objeto de definir unos criterios de diseño o de elección de la sección tipo más adecuada según las condiciones que se fijen en fase de proyecto.

6.2.2.1. Influencia de la tipología de presa. Caudal inicial

Analicemos los mismos casos del apartado 6.1.5.2 (20% de yeso para los tres espesores de capa yesífera), mediante los gráficos de la FIGURA N° 148 a la FIGURA N° 150, donde se han representado el tiempo adimensional en abscisas y el aumento del caudal respecto al inicial en ordenadas, junto con una tabla con los caudales iniciales Q_0 ordenados de mayor a menor (consultar nomenclatura de los modelos geométricos en “Relación de símbolos”, al inicio del documento).



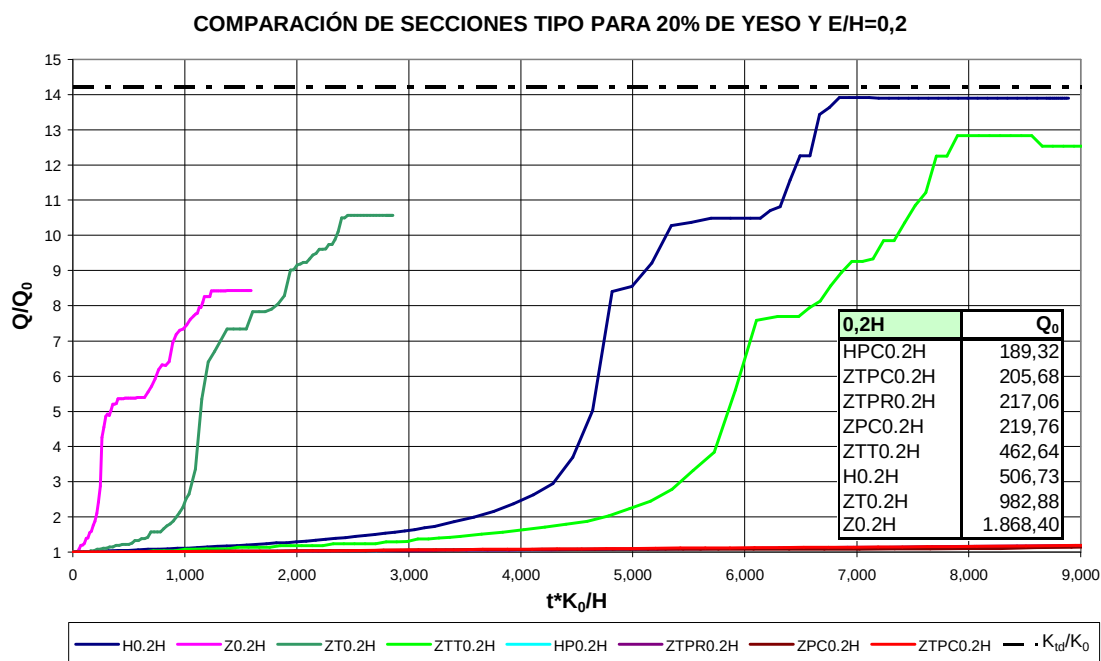


FIGURA N° 150: Relación $t_{adim} \cdot Q/Q_0$ con porcentaje de yeso de 20% y E/H=0,2.

Se puede observar que las curvas de cada sección tipo están ordenadas por los caudales iniciales filtrados, en el sentido de que para cada instante, a menor caudal inicial (Q_0), también es menor la relación del caudal filtrado en ese instante con el inicial (Q/Q_0). Por lo tanto, el caudal inicial es un parámetro significativo en la comparación de secciones tipo.

Al comparar las secciones tipo de presa, que el caudal al inicio del proceso sea mayor no implica que el caudal tras la disolución del yeso sea mayor. Por ejemplo, para un porcentaje de yeso del 20% y una capa yesífera de altura igual a la de la presa, en una presa homogénea se filtra un Q_0 de 2.234 m³/año y el valor de $Q_{máx}$ es 25.603 m³/año. En el caso de una presa zonificada, Q_0 es 5.836 m³/año y $Q_{máx}$ es 15.529 m³/año. Esto es debido, en este caso, a que la superficie afectada por la disolución bajo la presa es mucho mayor en el primer caso y a que $Q_{máx}$ en el primer caso, prácticamente no aumenta, y en el segundo caso sigue aumentando hasta que llega el frente al pie de aguas abajo de la presa.

6.2.2.2. Influencia de la pantalla de impermeabilización del cimiento

Para analizar la influencia de la pantalla se han analizado los gráficos de “Comparación de secciones tipo” para los 15 tipos de cimiento, similares a los mostrados en el apartado anterior y se han elaborado nuevos gráficos para comparar los Q_{ab} y los t_{ab} adimensionales entre distintas tipologías que se muestran en abscisas y en ordenadas. Se representa en ellos la línea denominada “ajuste” donde se igualarían los parámetros correspondientes de ambas tipologías. Los puntos por encima de la línea “ajuste” suponen

valores del parámetro adimensional mayores para la tipología del eje de ordenadas (en el caso de Q_{ab} significará que es peor que la del eje de abscisas, puesto que tiene, comparativamente, valores más elevados del caudal de llegada aguas abajo de la presa; pero en el caso de t_{ab} significará que es mejor, comparativamente, puesto que tarda más en llegar a esta situación).

Se ha denominado pantalla parcial cuando la pantalla no empotra en una capa inferior más impermeable y pantalla total o empotrada en el caso contrario. Hay que destacar que en los casos $E/H=3$ no existe esta capa no yesífera por debajo de la capa yesífera que constituye el cimiento de la presa.

- Comparación sin pantalla-con pantalla total o parcial

Para ver el efecto de la pantalla de impermeabilización, se adjuntan los nuevos gráficos elaborados al efecto, para presas homogéneas y zonificadas:

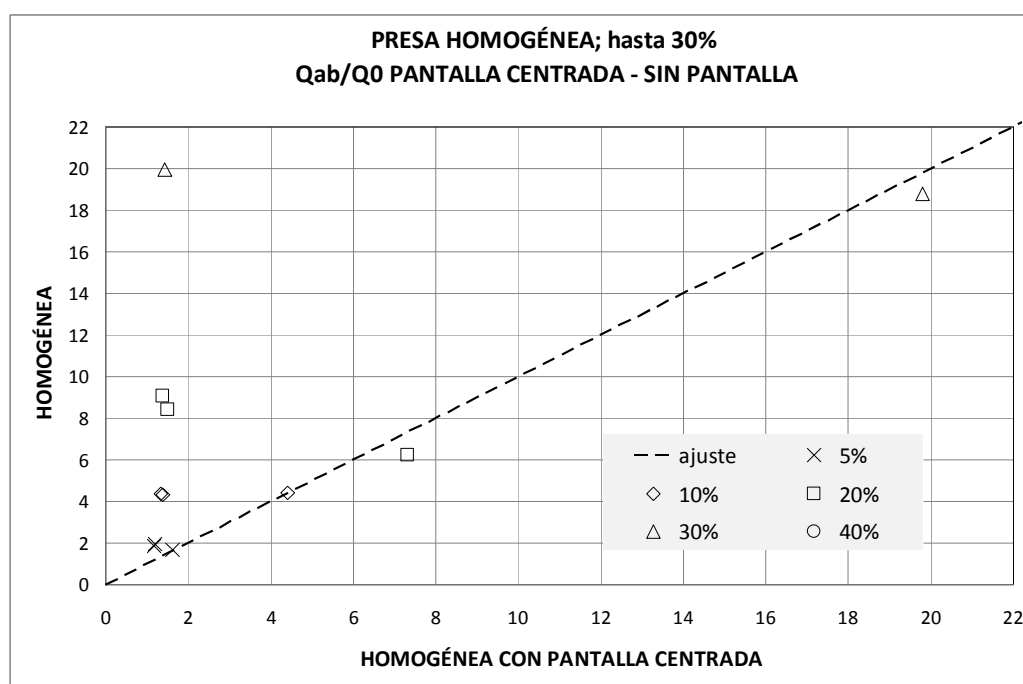


FIGURA N° 151: Comparativa entre el aumento de caudales Q_{ab}/Q_0 para presas homogéneas con pantalla centrada versus sin pantalla.

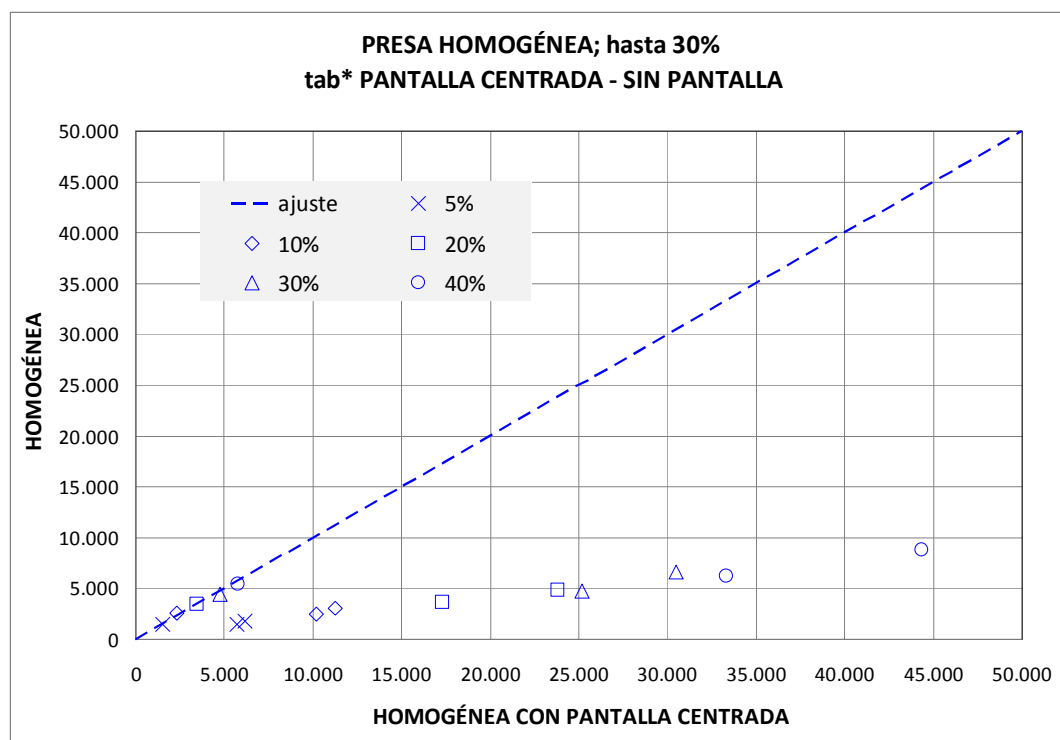


FIGURA N° 152: Comparativa entre el t_{ab} adimensional para presas homogéneas con pantalla centrada versus sin pantalla.

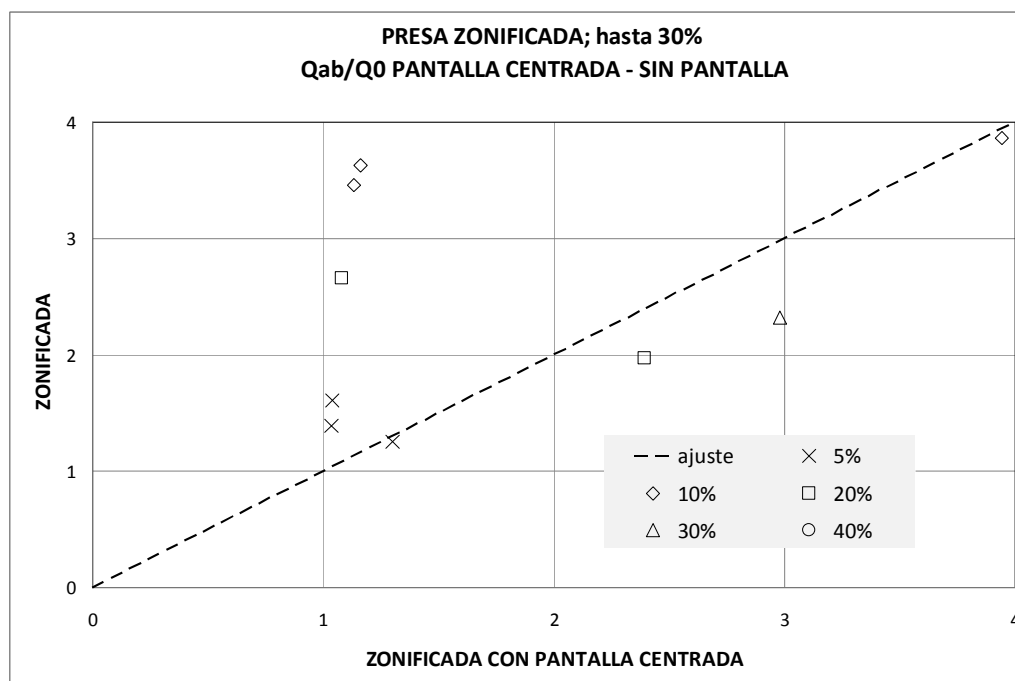


FIGURA N° 153: Comparativa entre el aumento de caudales Q_{ab}/Q_0 para presas zonificadas con pantalla centrada versus sin pantalla.

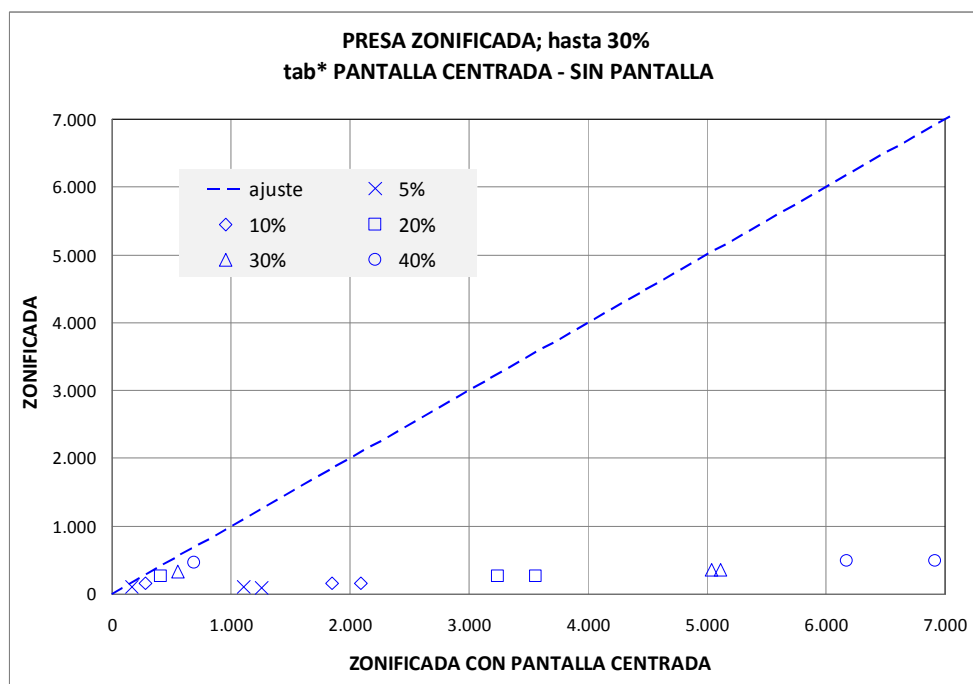


FIGURA N° 154: Comparativa entre el t_{ab} adimensional para presas zonificadas con pantalla centrada versus sin pantalla.

Se observa que hay un conjunto de puntos que se sitúan cerca de la línea de ajuste y otros que se alejan de manera muy evidente. El primer conjunto corresponde a pantallas parciales y el segundo, a pantallas totales o empotradas. Se analizan a continuación de forma separada:

- Comparación sin pantalla-con pantalla total

En la FIGURA N° 149 y en la FIGURA N° 150, se podía observar que existe mucha diferencia en los casos con pantalla si la pantalla empotra en una capa más impermeable que la yesífera (3 órdenes de magnitud en los casos analizados) o no empotra. Si la pantalla empotra, la efectividad de la pantalla es casi total para controlar la disolución, porque los caudales filtrados no aumentan de forma apreciable (ver líneas de la parte inferior de los dos gráficos últimos adjuntos). Además, en el último gráfico citado, el valor máximo de Q/Q_0 , en los casos con pantalla total está muy alejado del ajuste de K_{td}/K_0 , (relación de permeabilidades tras la disolución e inicial) que era el límite superior.

Es fácil deducir esta conclusión de los nuevos gráficos elaborados al efecto, para presas homogéneas y zonificadas:

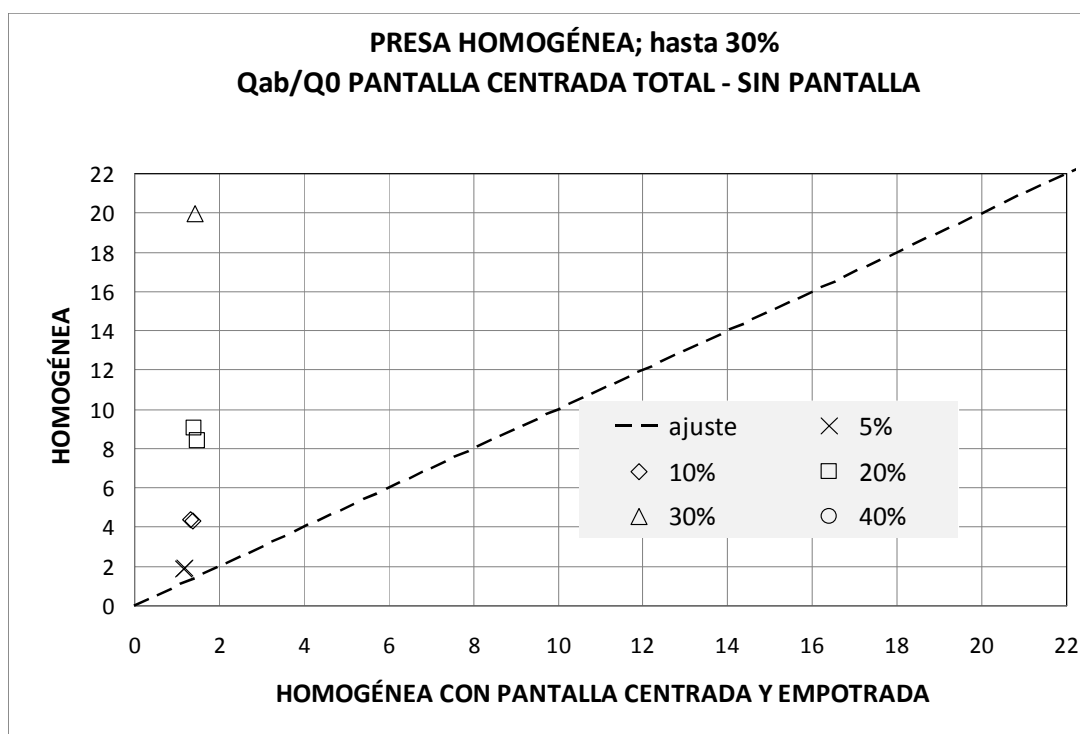


FIGURA N° 155: Comparativa entre el aumento de caudales Q_{ab}/Q_0 para presas homogéneas con pantalla centrada total versus sin pantalla.

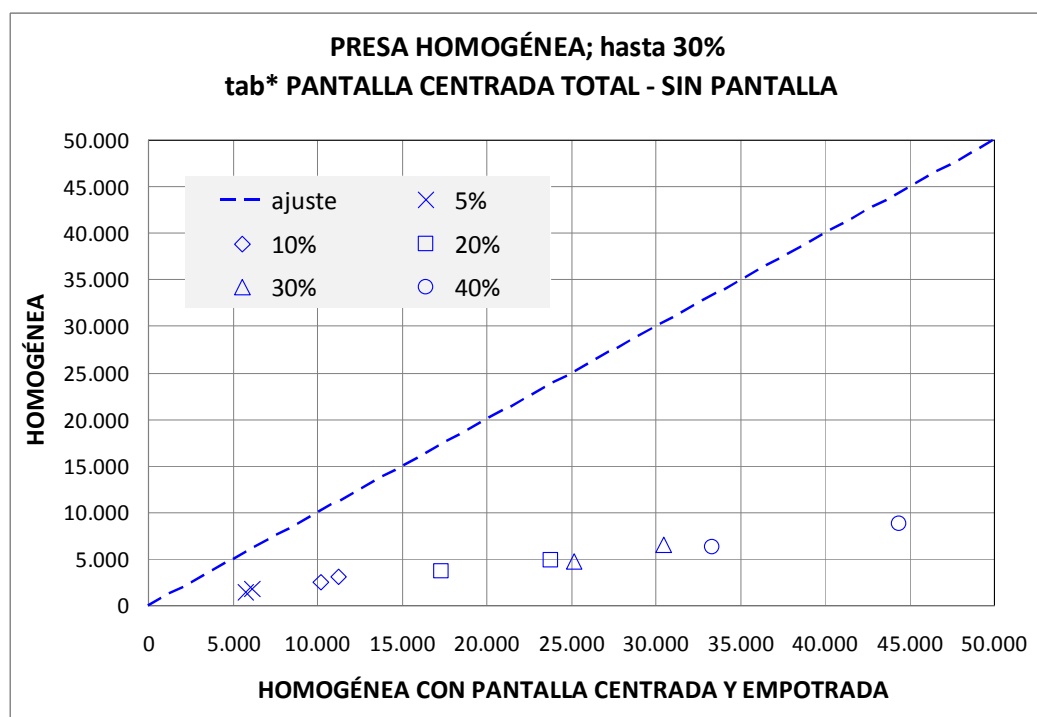


FIGURA N° 156: Comparativa entre el t_{ab} adimensional para presas homogéneas con pantalla centrada total versus sin pantalla.

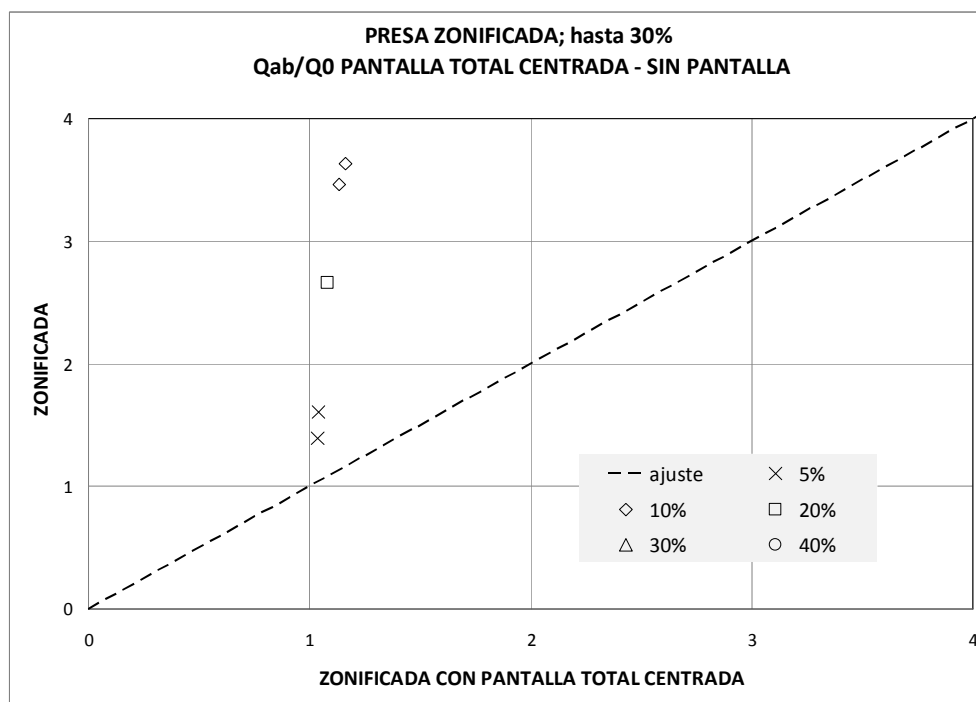


FIGURA N° 157: Comparativa entre el aumento de caudales Q_{ab}/Q_0 para presas zonificadas con pantalla centrada total versus sin pantalla.

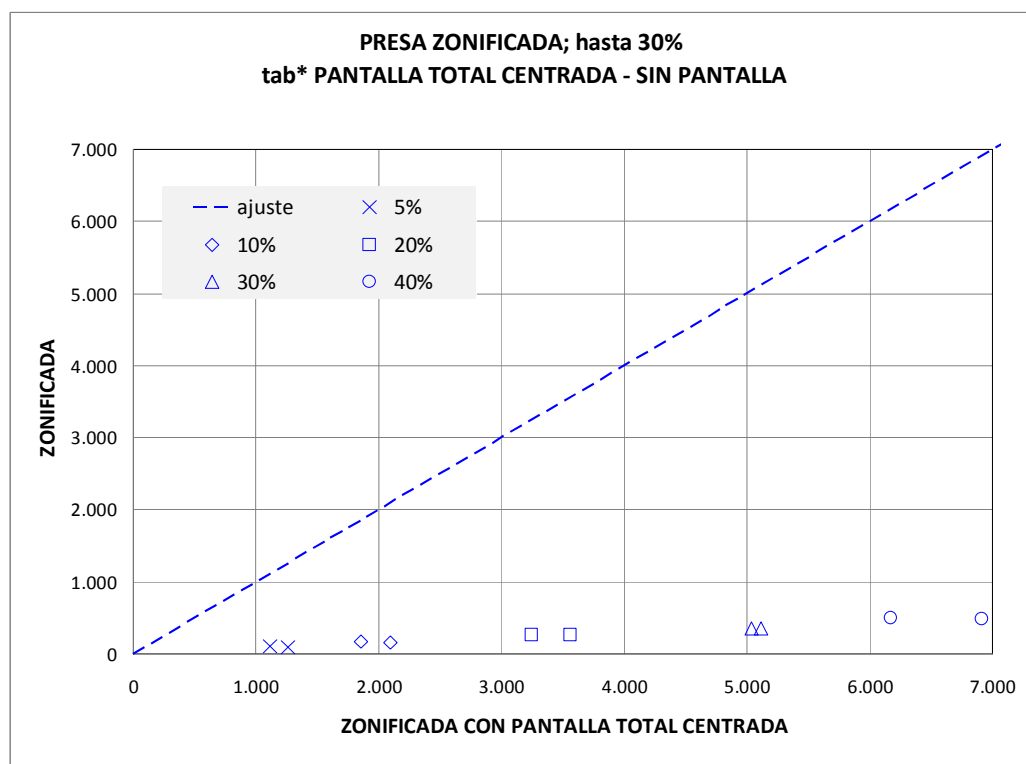


FIGURA N° 158: Comparativa entre el t_{ab} adimensional para presas zonificadas con pantalla centrada total versus sin pantalla.

Efectivamente, los caudales se alejan de la línea de ajuste por arriba y los tiempos por abajo, lo cual indica que, frente al control de la disolución, la pantalla total es muy efectiva.

- Comparación sin pantalla-con pantalla parcial (sin empotrar en una capa más impermeable no yesífera):

Sin embargo, como se observaba en la FIGURA N° 148, cuando la pantalla no empotra en otra capa más impermeable, los caudales aumentan con el tiempo de forma semejante al resto de secciones tipo, aunque con diferencias importantes entre todas ellas.

En los nuevos gráficos, para las presas homogéneas, que se adjuntan se puede verificar esta afirmación:

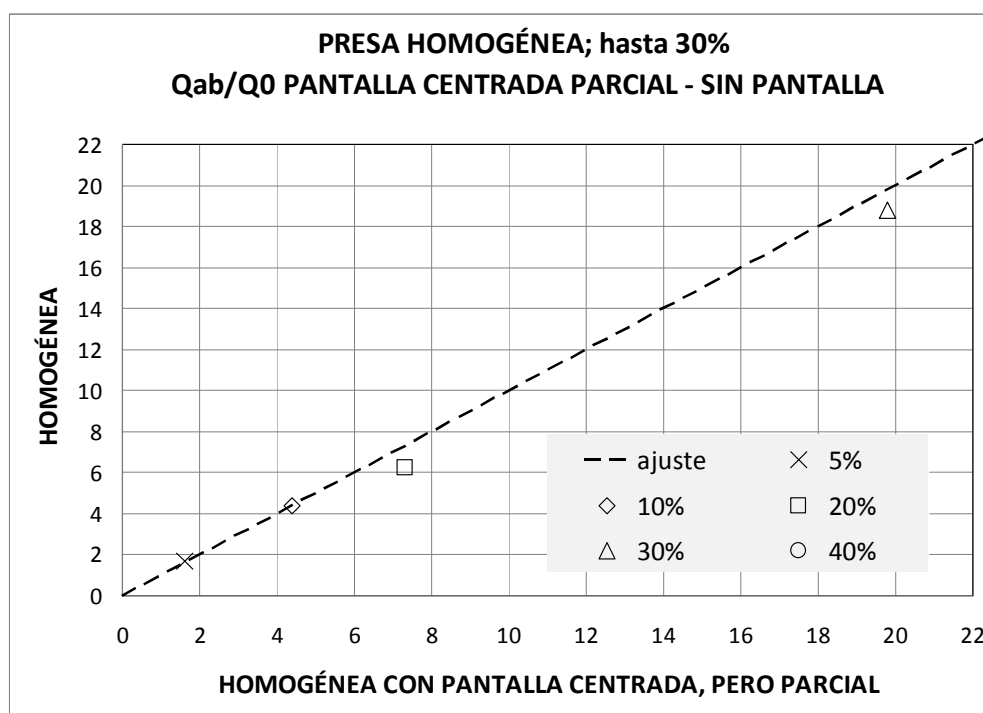


FIGURA N° 159: Comparativa entre el aumento de caudales Q_{ab}/Q_0 para presas homogéneas con pantalla centrada parcial versus sin pantalla.

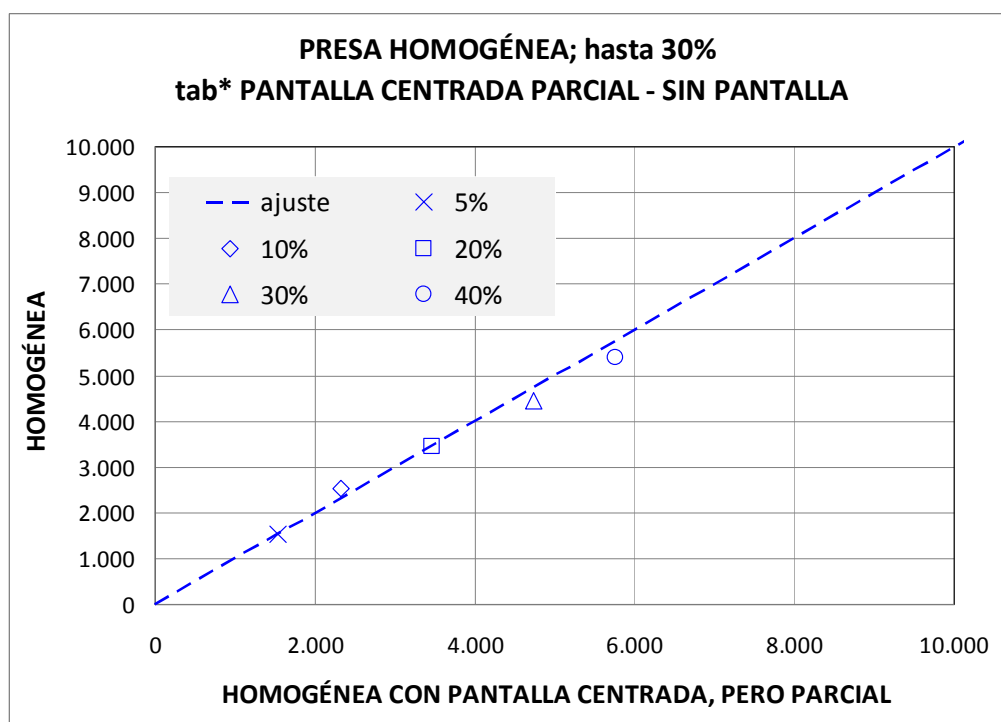


FIGURA Nº 160: Comparativa entre el t_{ab} adimensional para presas homogéneas con pantalla centrada parcial versus sin pantalla.

- Comparación de la profundidad de la pantalla parcial: $1H$ ó de $0,5H$ dentro de la capa $E/H=3$.

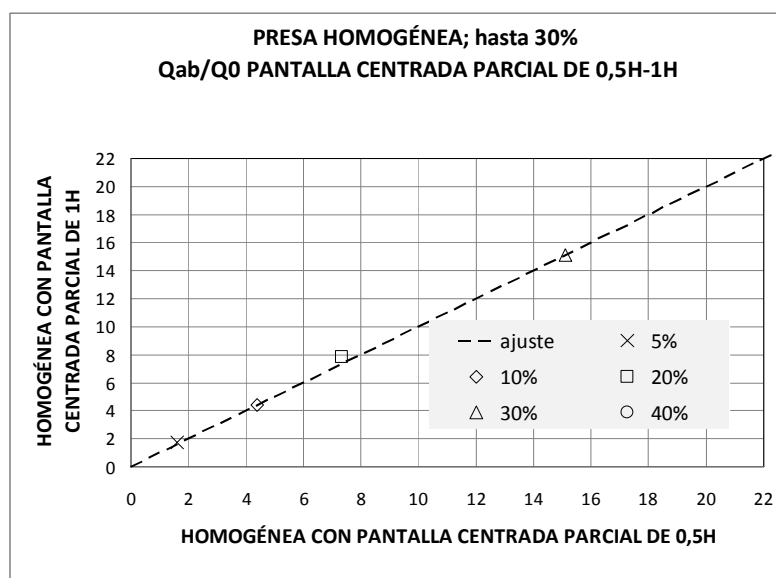


FIGURA Nº 161: Comparativa entre el aumento de caudales Q_{ab}/Q_0 para presas homogéneas con pantalla centrada parcial de profundidad $1H$ versus $0,5H$.

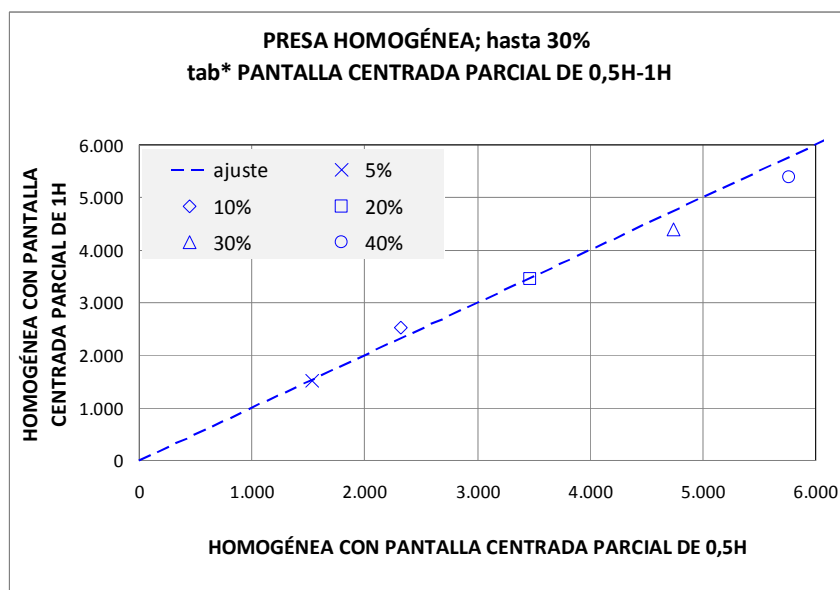


FIGURA N° 162: Comparativa entre el t_{ab} adimensional para presas homogéneas con pantalla centrada parcial de profundidad 1H versus 0,5H.

Como demuestran los gráficos anteriores, no hay diferencias apreciables.

- Comparación posición pantalla: en los casos de pantalla empotrada en una capa inferior más impermeable, prácticamente no hay diferencia entre colocar la pantalla centrada o aguas arriba. Sin embargo, en los casos donde la capa yesífera es de gran espesor comparado con la altura de la presa y no es posible empotrarla en otra capa más impermeable, los casos de pantalla aguas arriba (ZTPR) controlan mejor el proceso de disolución que los casos con pantalla centrada (ZTPC).

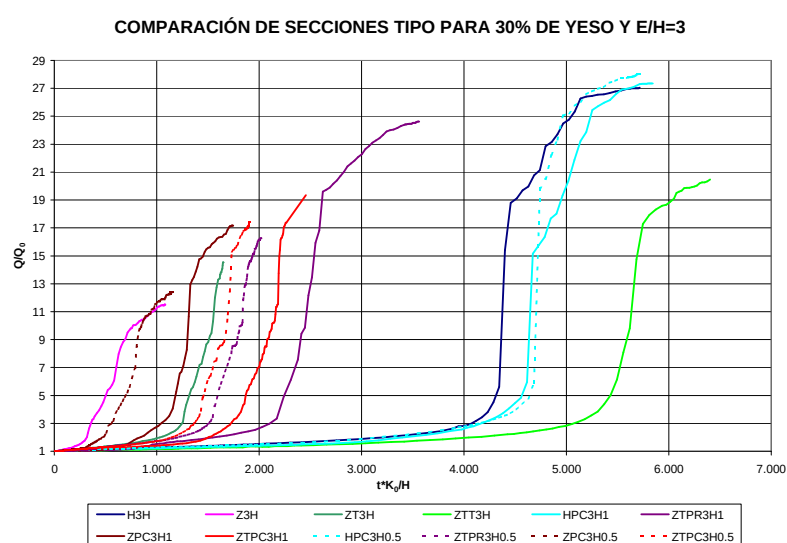


FIGURA N° 163: Relación $t_{adim}-Q/Q_0$ con porcentaje de yeso de 30% y $E/H=3$.

Y mostrándolo según los nuevos gráficos de ajuste:

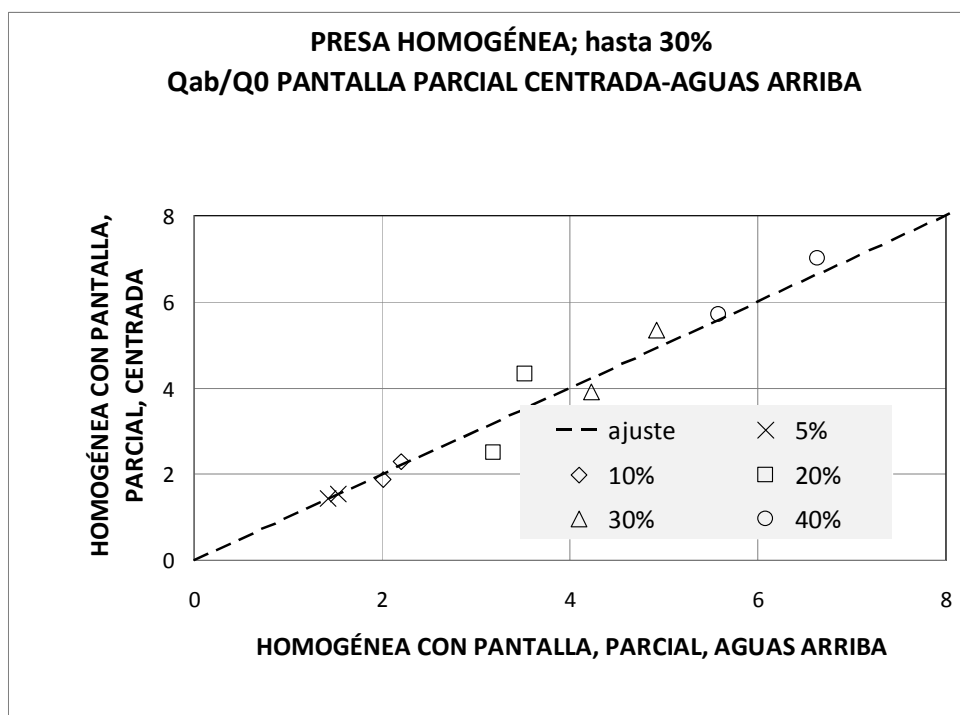


FIGURA N° 164: Comparativa entre el aumento de caudales Q_{ab}/Q_0 para presas homogéneas con pantalla centrada parcial aguas arriba - aguas abajo.

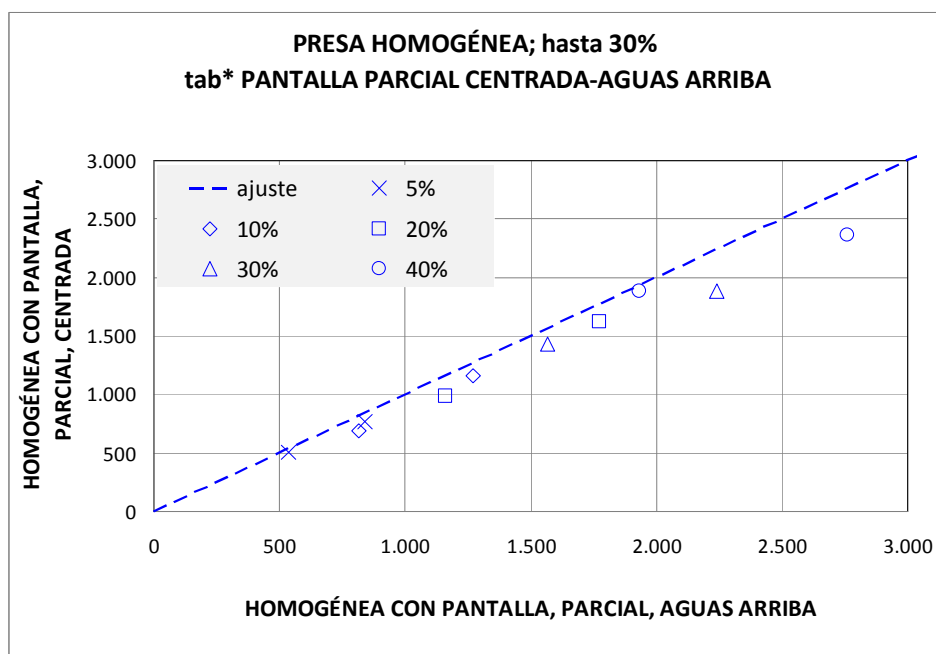


FIGURA N° 165: Comparativa entre el t_{ab} adimensional para presas homogéneas con pantalla centrada parcial aguas arriba - aguas abajo.

Se observa que los tiempos de llegada aguas abajo son menores en todos los casos para la pantalla ubicada aguas arriba y el aumento de caudales es menor es menor, en la mayoría de los casos.

6.2.2.3. Influencia del tapiz

- Comparación sin tapiz-con tapiz: comparemos el caso H1H con ZTT1H de la FIGURA N° 166, ambos con igual longitud del elemento impermeable (el ancho de cimentación de una presa homogénea del primer caso y la longitud del tapiz más el ancho del núcleo de una presa zonificada, del segundo caso). A igualdad de otros factores, es más efectiva la segunda disposición.

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

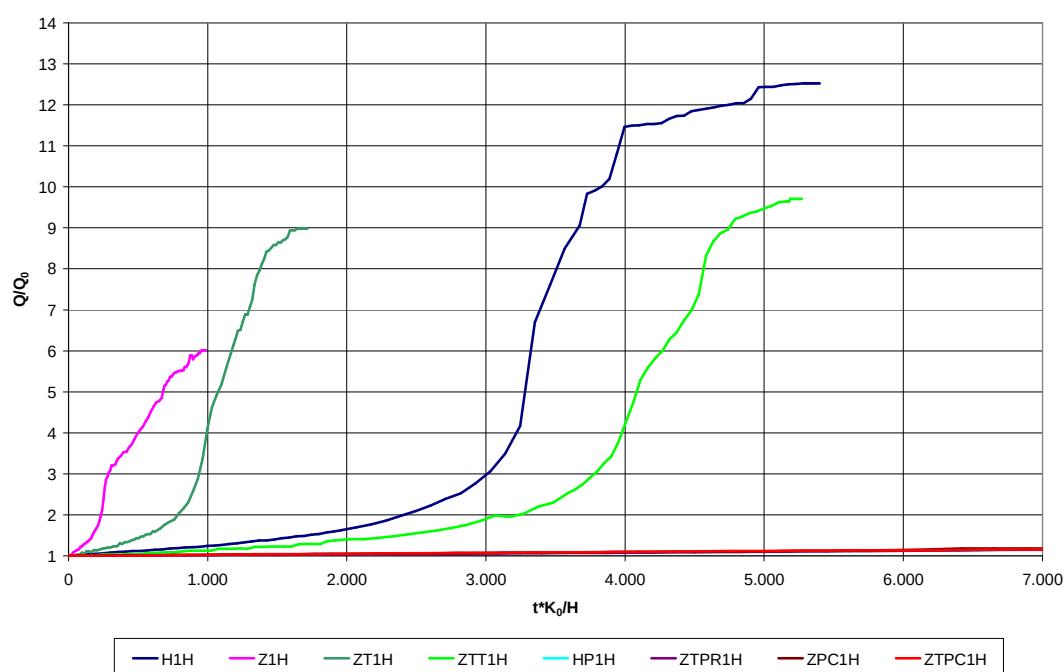


FIGURA N° 166: Relación $t_{adim}-Q/Q_0$ con porcentaje de yeso de 20% y E/H=1.

La diferencia entre ambas disposiciones es debida a la distinta permeabilidad de los materiales del cuerpo de presa (el material del tapiz es 10 veces más impermeable que el del cuerpo de la presa homogénea), a pesar de que la longitud del elemento impermeable es similar (6,25H). Esto significa que, a pesar del intento de cubrir todos los casos que se puedan presentar con los 140 casos calculados, todos los factores (en este caso la relación de permeabilidades) influyen en el resultado final de la ley de aumento de caudales filtrados a lo largo del tiempo.

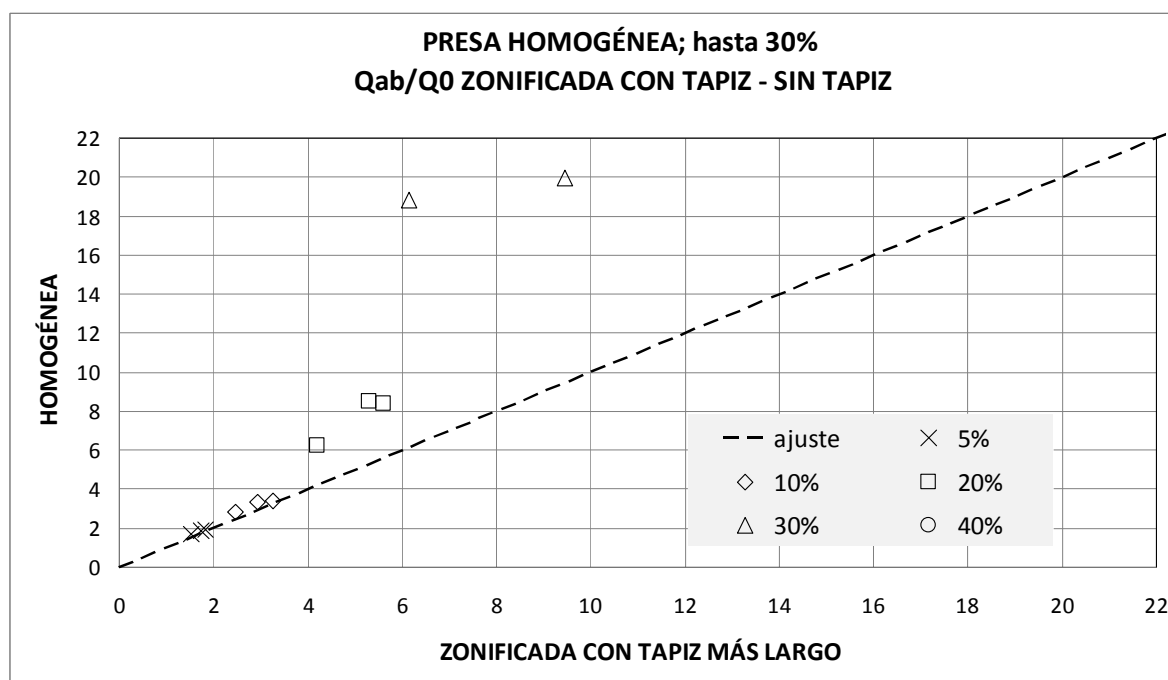


FIGURA N° 167: Comparativa entre el aumento de caudales Q_{ab}/Q_0 para presa zonificada con tapiz y presa homogénea.

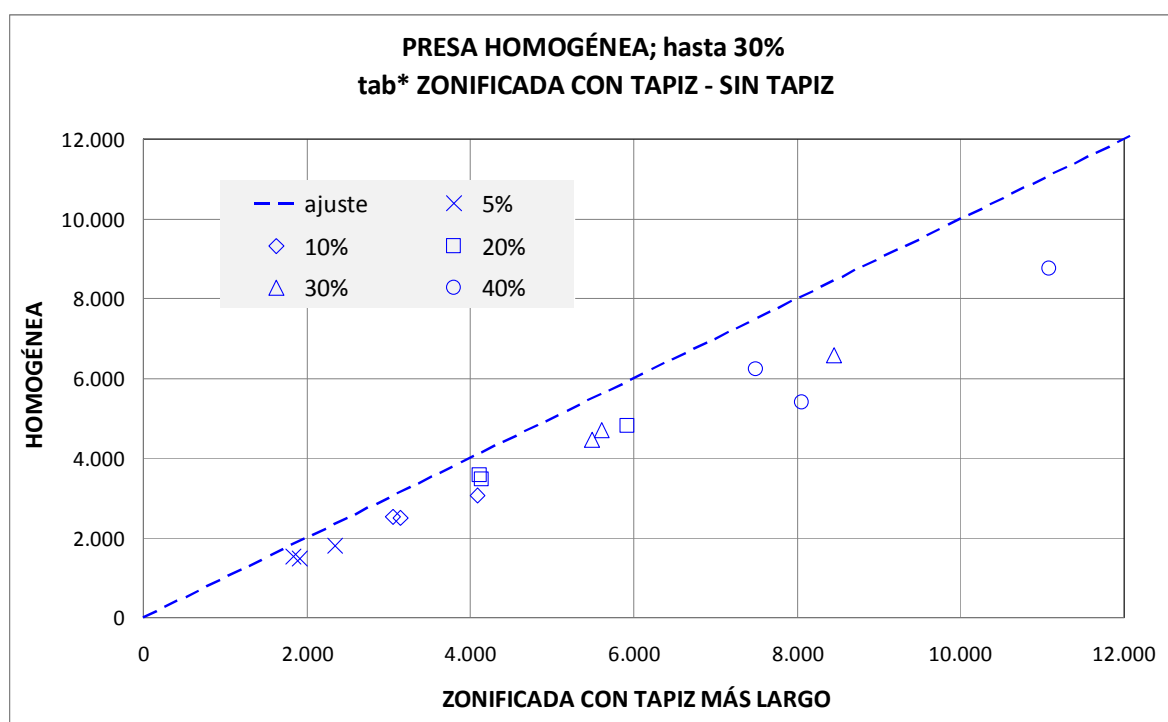


FIGURA N° 168: Comparativa entre el t_{ab} adimensional para presa zonificada con tapiz y presa homogénea.

- Comparación de la longitud del tapiz: en cuanto a la longitud del tapiz, se pueden comparar los casos ZT y ZTT. Según el caso a estudiar, si se plantea la necesidad de un tapiz, será preciso realizar cálculos con varias longitudes, para ver cuál cumple el criterio de diseño, con menor coste.

6.2.2.4. Tapiz versus pantalla parcial

- 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 (comparar casos ZT₃H con un caso intermedio entre ZPC₃H₁ y ZPC₃H_{0,5} de la FIGURA N° 163).

O también se puede verificar en los siguientes gráficos de ajuste:

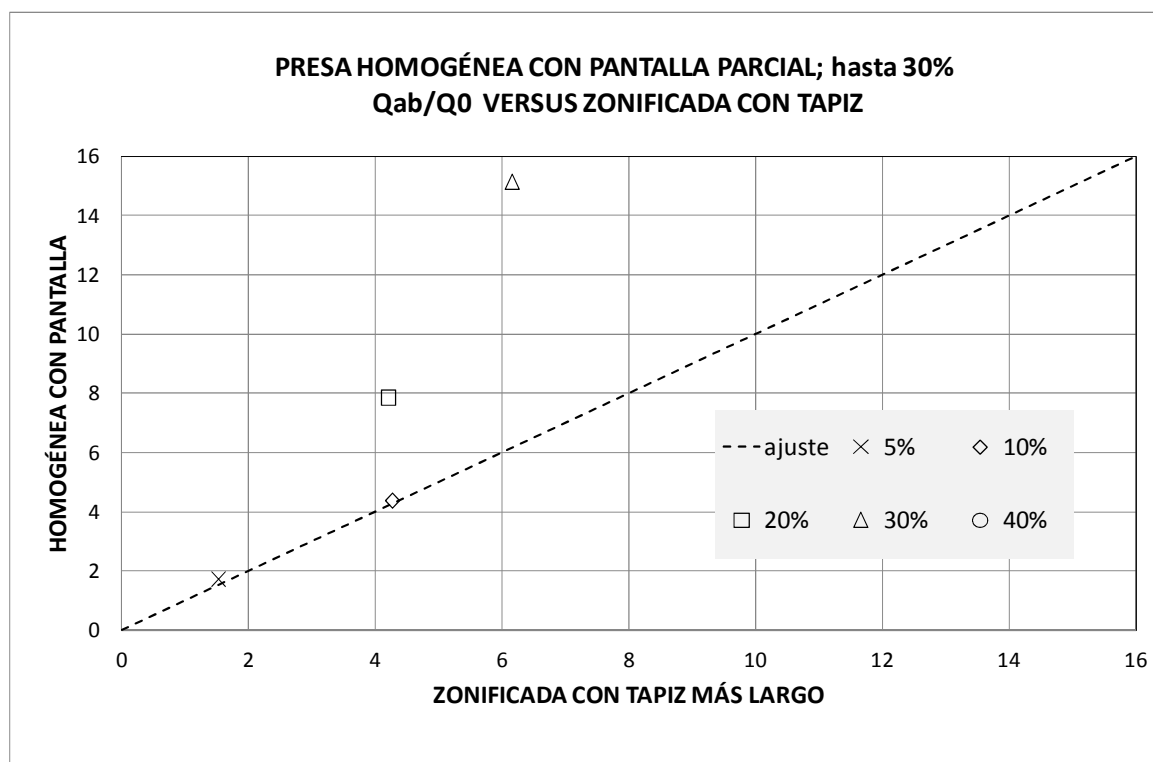


FIGURA N° 169: Comparativa entre el aumento de caudales Q_{ab}/Q_0 para presa zonificada con tapiz y presa homogénea con pantalla.

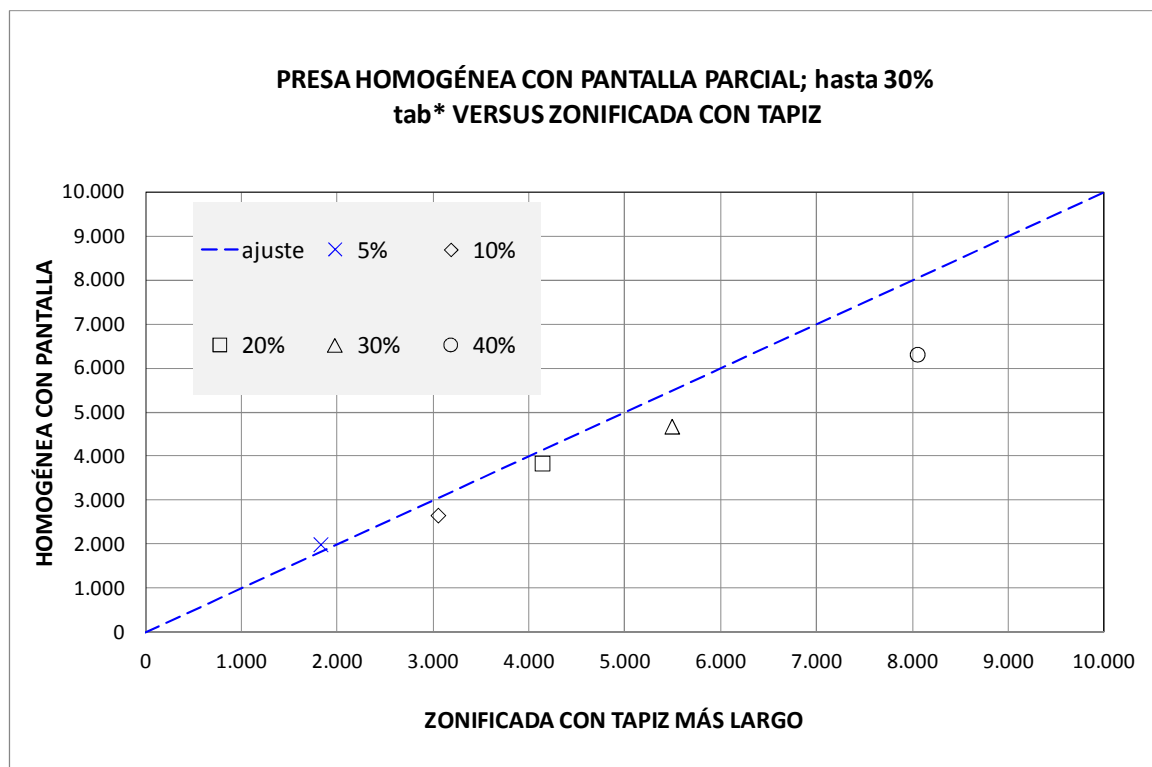


FIGURA Nº 170: Comparativa entre el t_{ab} adimensional para presa zonificada con tapiz y presa homogénea con pantalla.

Si la pantalla empotra en una capa inferior impermeable, será más efectivo que cualquier tapiz.

6.2.3. Influencia en la estabilidad de la presa

Finalmente, se quiere hacer una consideración respecto a la influencia de la disolución del cemento en la estabilidad de la presa. En los gráficos de resultados del modelo numérico, se observa que cuando el frente de disolución está avanzando por la zona central de la cimentación, la línea de saturación en el paramento de aguas abajo está más elevada que al inicio del proceso, por lo que podría producirse, según los casos, una disminución del coeficiente de seguridad de la estabilidad al deslizamiento (ver gráficos de la FIGURA N° 171 para ZT1H o para el resto de modelos, en Baena, C.M., 2011).

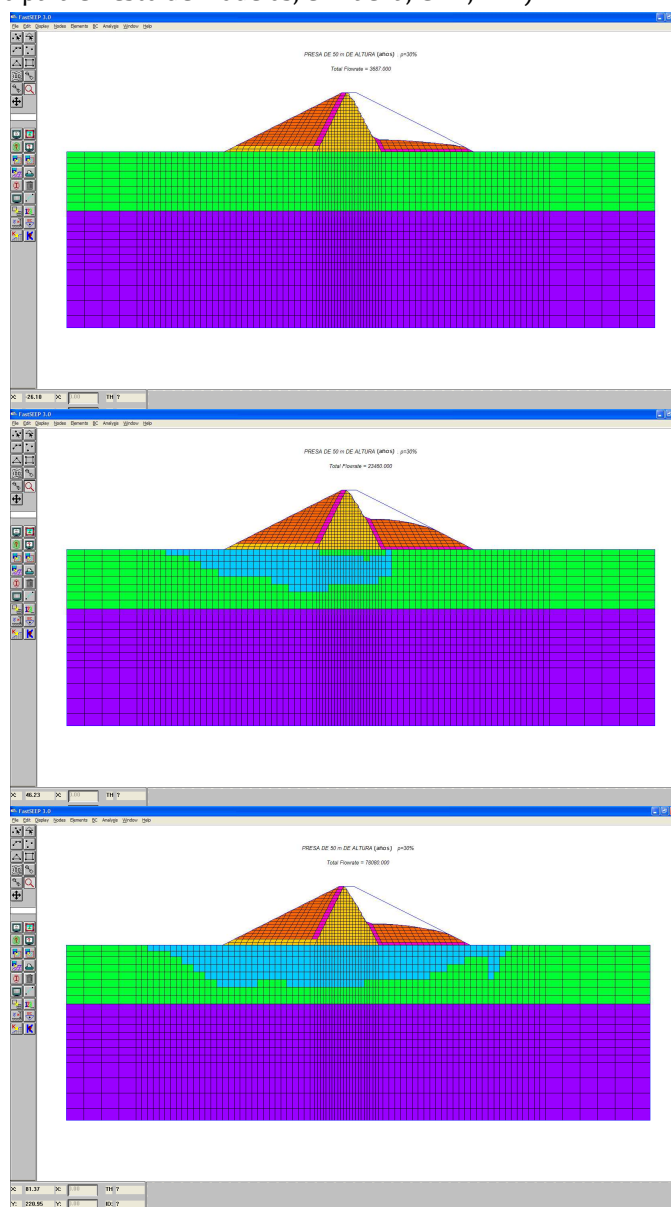


FIGURA N° 171: Cambio en la línea de saturación para caso ZT1H con un porcentaje del 30% (inicio – medio – final). Cálculo mediante DISOLUCIÓN2D.

6.3. FORMULACIONES PARA LOS PARÁMETROS REPRESENTATIVOS

Una vez realizados los cálculos para 140 modelizaciones de presa+cimiento, se han podido sacar conclusiones respecto a las variaciones de los parámetros representativos, principalmente en función del porcentaje de yeso de la capa yesífera.

También se han elaborado ábacos adimensionales para poder obtener resultados sin necesidad de aplicar el programa informático DISOLUCIÓN2D, como primera aproximación a un caso particular de una cerrada.

Sin embargo, el avance más importante, ha sido la obtención de fórmulas que permitan obtener estos parámetros representativos (siempre que se cumplan las relaciones de permeabilidad fijadas entre materiales), calculando únicamente el estado inicial y el Q_0 correspondiente con cualquier programa de cálculo de redes de filtración.

En este sentido, ha sido muy útil el análisis del caso $H_{0,2H}$ (ver FIGURA N° 130), puesto que en él se cumple que el recinto de filtración es muy parecido al caso teórico: el espesor es constante y la longitud de las líneas de filtración también. Por este motivo el caudal inicial Q_0 es muy parecido a un caudal teórico (obtenido a partir la longitud media teórica de la filtración L_t y del espesor $E=0,2H$) y también $Q_{máx}/Q_0$ es prácticamente igual al aumento de permeabilidad debido a la disolución K_{td}/K_0 , función del porcentaje de yeso de la capa y de la porosidad inicial.

A partir de L_t y E teóricos definidos para cada cimentación y obteniendo L_{med}/E_{med} a partir de $K_0 \cdot H$ dividido por Q_0 , se puede calcular un factor de forma FF, de valor menor o igual que 1, de modo que:

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

En el caso $H_{0,2H}$, este factor de forma es prácticamente 1.

Si dejamos aparte los casos de pantalla total, donde se observó que los aumentos de caudales respecto al inicial eran muy limitados por la gran efectividad de la pantalla (1,5 en el peor de los casos y para 40% de yeso), la ley de predicción de caudales para el resto de tipologías se ha establecido en la siguiente expresión, dependiente del factor de forma FF:

$$\frac{Q_{ab}}{Q_0} = 1,191e^{9,839 \cdot FF \cdot \%} \quad Q_{ab} = 1,191Q_0e^{9,839 \cdot FF \cdot \%}$$

Esta fórmula se basa en la ley exponencial de ajuste para Q_{ab}/Q_0 para el caso $H_{0,2H}$ (ver FIGURA N° 172):

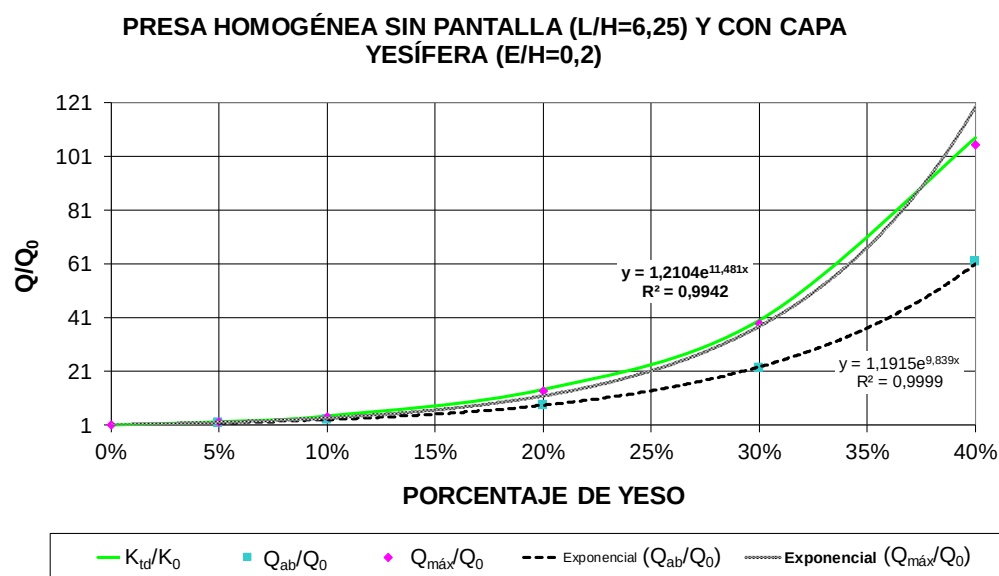


FIGURA N° 172: Gráfico porcentaje de yeso – Q_{ab}/Q_0 para sección tipo de presa homogénea y $E/H=0,2$.

Como se observa en los gráficos de la FIGURA N° 173 a la FIGURA N° 175, el ajuste es bastante bueno para todas las tipologías y para distintos % de yeso. Se representa en abscisas el valor calculado mediante DISOLUCIÓN2D y en ordenadas el dado por la formulación:

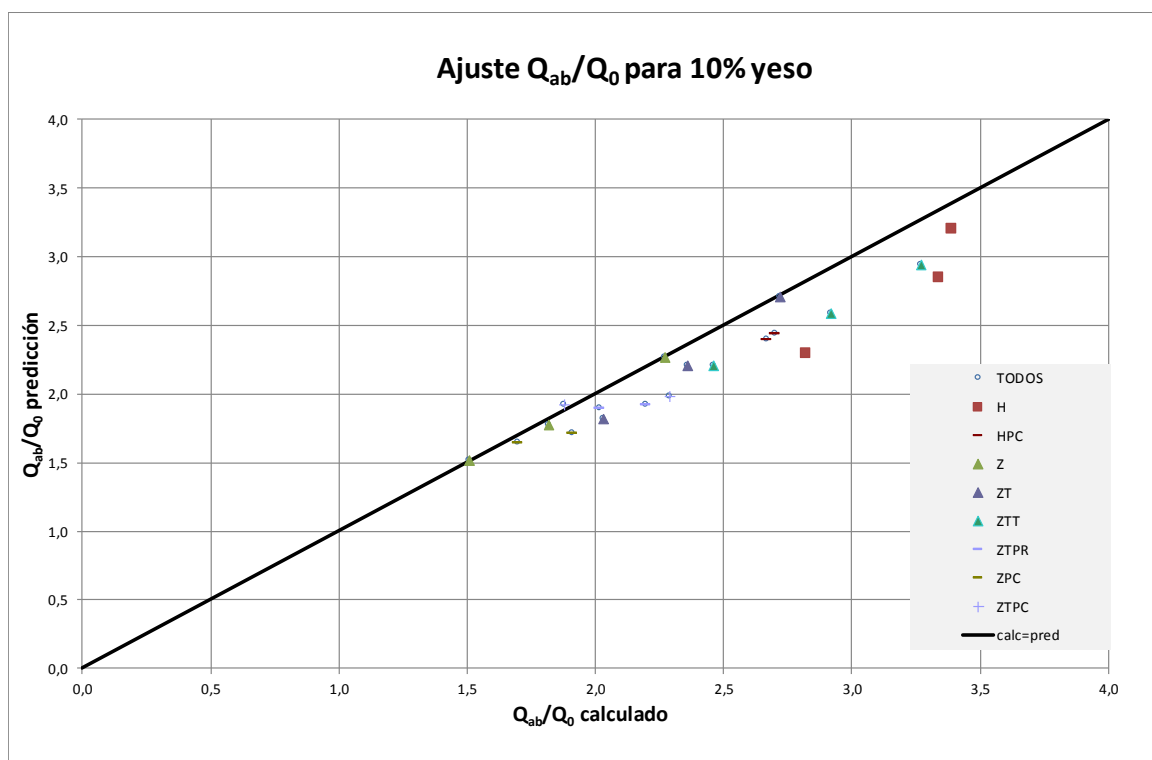


FIGURA N° 173: Ajuste de la formulación para el aumento de caudal Q_{ab}/Q_0 (10% yeso).

Quedaría del lado de la seguridad para casi todos los casos y para todos los porcentajes (ya que los puntos quedan por encima de la línea de ajuste):

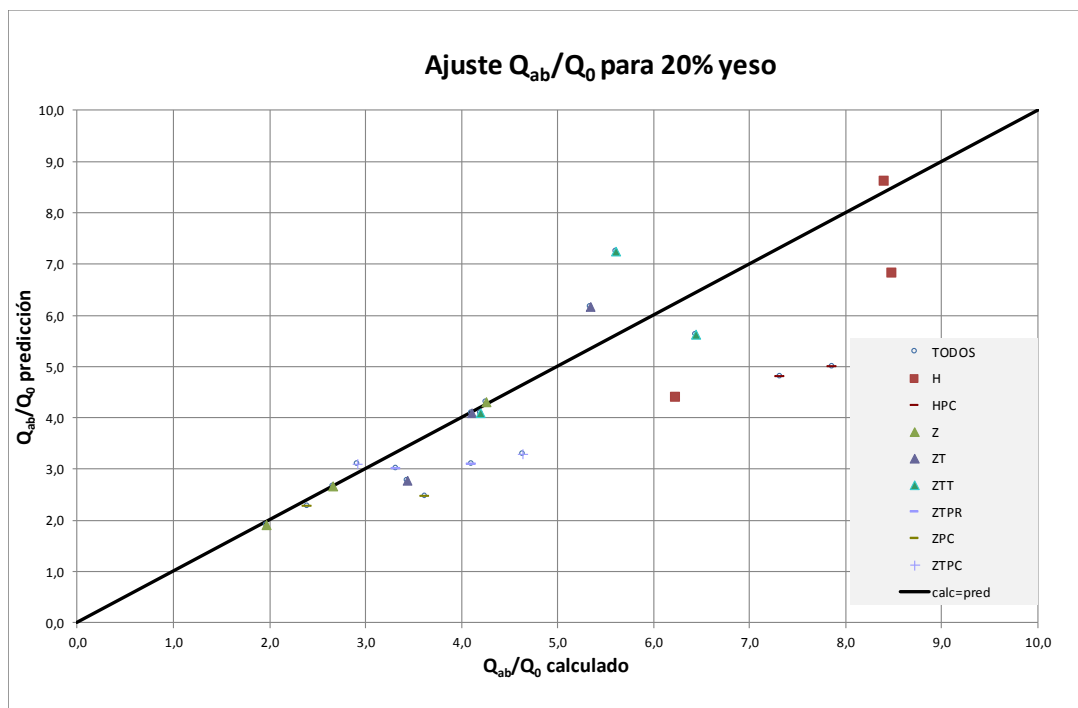


FIGURA N° 174: Ajuste de la formulación para el aumento de caudal Q_{ab}/Q_0 (20% yeso).

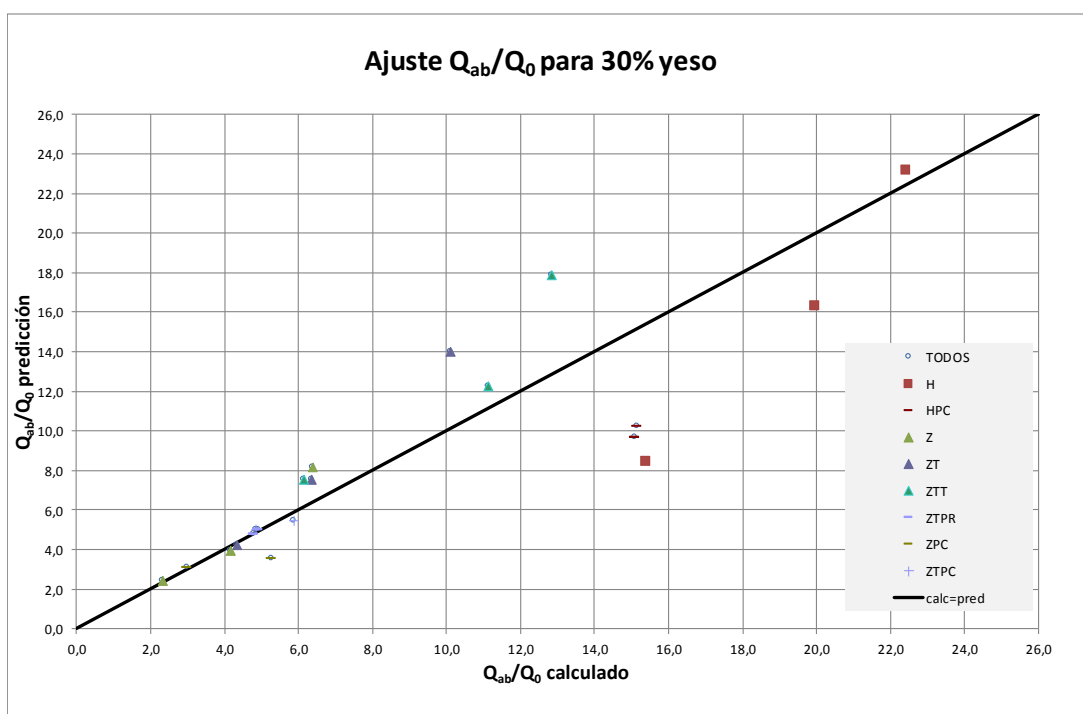


FIGURA N° 175: Ajuste de la formulación para el aumento de caudal Q_{ab}/Q_0 (30% yeso).

El ajuste obtenido con la fórmula deducida, caso a caso es el siguiente, en este cimiento con un porcentaje del 20% de yeso:

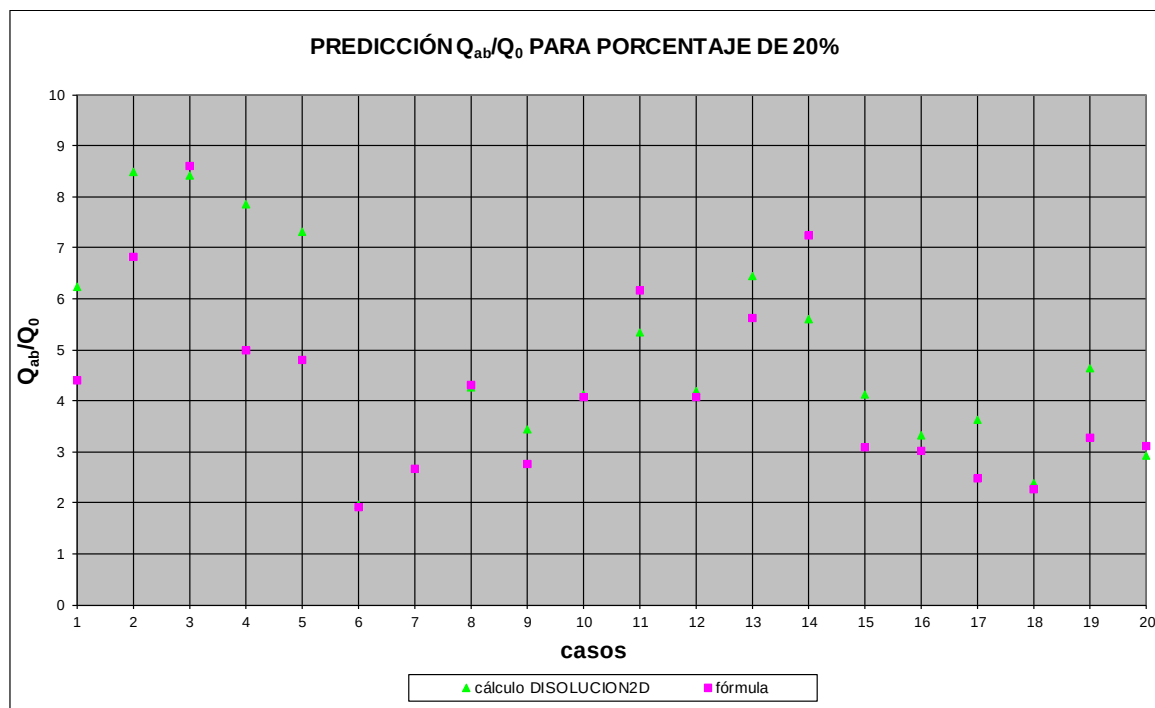


FIGURA Nº 176: Ajuste de los casos para el aumento de caudal Q_{ab}/Q_0 (20% yeso).

Para la definición del FF (factor de forma) que representa la diferencia en cuanto a la red de filtración que se establece en un cimiento yesífero determinado de una presa determinada en relación a un caso teórico de un cilindro de suelo se utilizaba la relación L_{med}/E_{med} , obtenida fácilmente a partir del caudal inicial Q_0 , y sin necesidad ningún análisis iterativo en el tiempo.

Sin embargo, para formular el otro parámetro representativo, t_{ab} , se precisa calcular previamente t_{ucte} , por medio del programa DISOLUCIÓN2D, porque es preciso calcular el avance del frente de disolución en el tiempo aunque no se varíe la permeabilidad (recordemos que era así como se definía este parámetro). También se necesita FA para calcular t_{ab} , pero en este caso, se puede predecir la fórmula general a partir de la deducción que se hizo en el apartado 5.2.7 para un cilindro de suelo donde se obtuvo la siguiente expresión del factor de aceleración independiente del tipo de material soluble:

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

Recordemos que t_{ucte} se puede expresar función de L_{med} o de $L_{med} \cdot E_{med}$:

$$t_{ucte} = \frac{L_{media}^2}{\frac{u}{v} K_0 H} = \frac{L_{media} E_{media}}{\frac{u}{v} Q_0}$$

Como se decía anteriormente, no se puede estimar L_{med} o $L_{med} \cdot E_{med}$ sin realizar los cálculos para obtener t_{ucte} de cada modelo. Como se han realizado estos cálculos, se ha podido obtener un factor I para calcular L_{med} en función de la longitud mínima del elemento impermeable y se muestra en la TABLA N° 27:

	$L_{med}/L_{mín}$
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

TABLA N° 27 : Tabla de factor I para obtener L_{med} en los casos calculados.

Este ajuste, distinto para cada tipología, demuestra que el proceso de filtración depende de toda la geometría del modelo presa+cimiento (espesor capa yesífera, longitud elemento impermeable, existencia de pantalla parcial, etc.). Por este motivo es tan complicado estimarlo a priori. Entonces, estamos en disposición de poder calcular t_{ucte} a partir de la siguiente expresión:

$$t_{ucte} = \frac{L_{media}^2}{\frac{u}{v} K_0 H} = \frac{(\text{factor } I \cdot L_{mín})^2}{\frac{u}{v} K_0 H}$$

En cuanto a la ley de predicción de t_{ab} , para cualquier tipología que no tenga pantalla total (dado que, en esos casos, el FA de aceleración es como máximo 1,5 para 40% de yeso), se ha formulado como:

$$t_{ab} = \frac{t_{ucte}}{FA} = \frac{t_{ucte}}{\frac{Q_{ab}/Q_0}{0,5 \cdot (1 + FF \cdot Q_{ab}/Q_0)}}$$

Como se observa en los gráficos de la FIGURA N° 177 a la FIGURA N° 179 el ajuste es relativamente bueno para todas las tipologías y para distintos % de yeso. Se representa en abscisas el valor calculado mediante DISOLUCIÓN2D y en ordenadas el dado por la formulación:

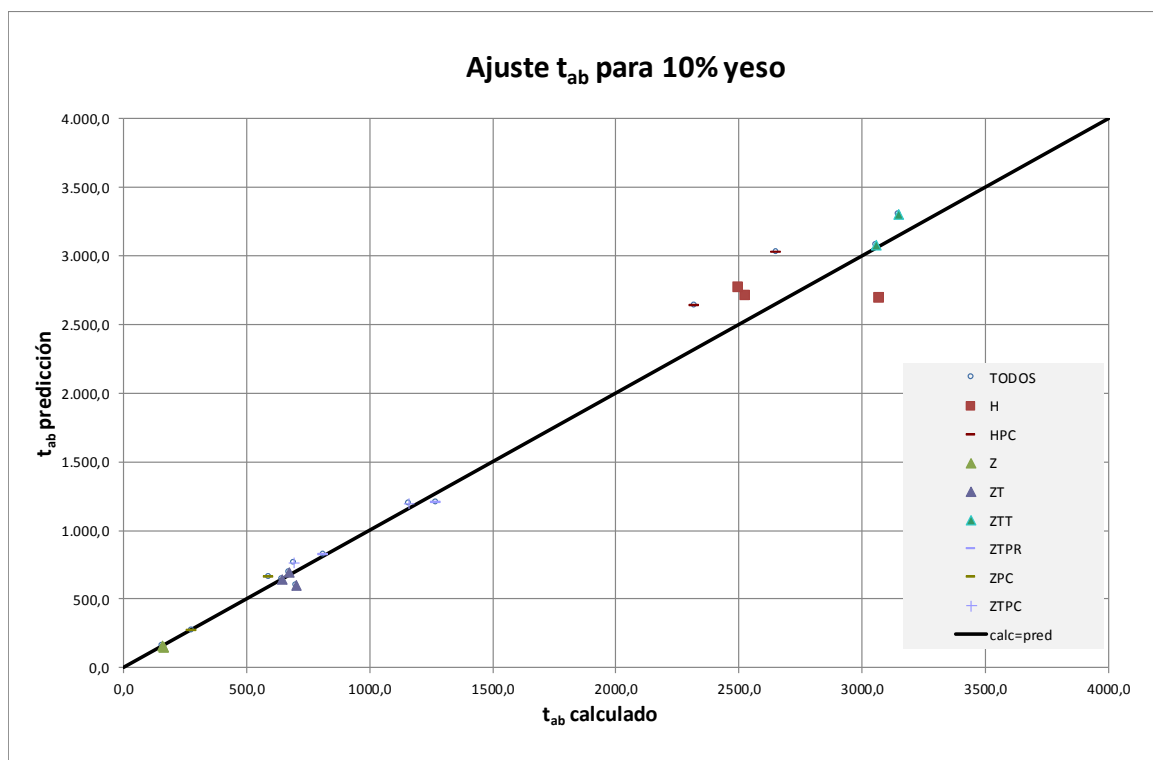
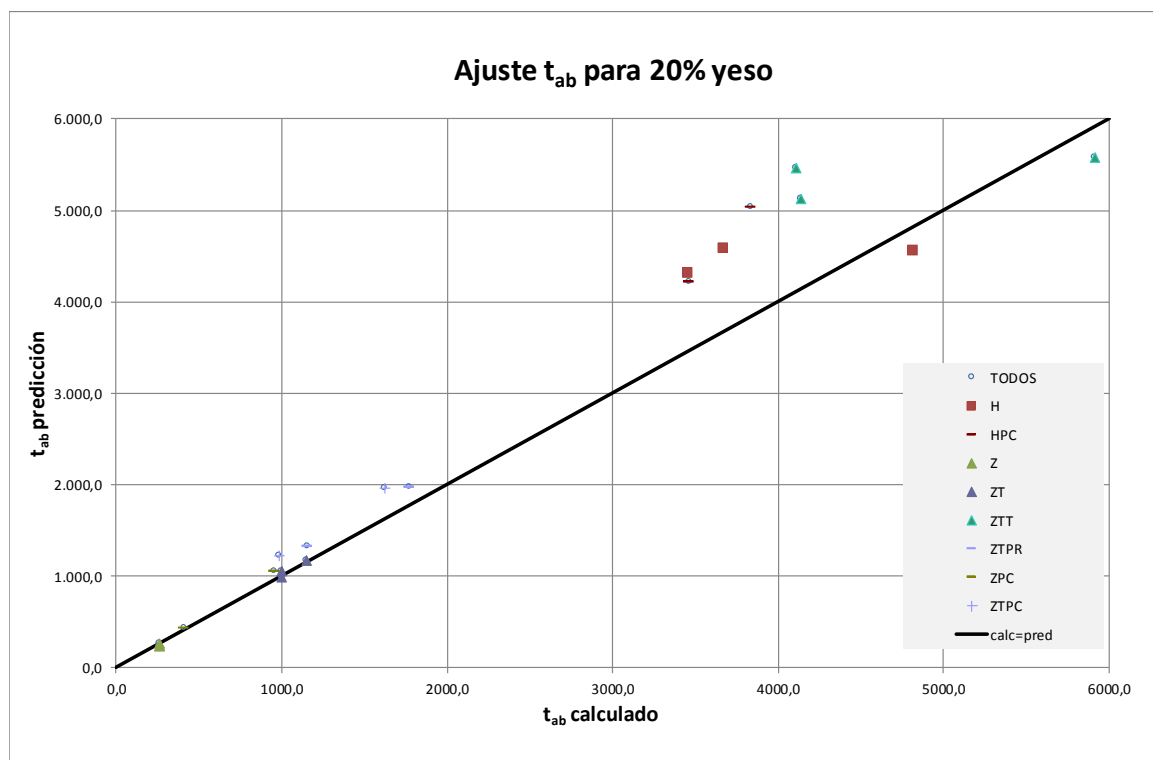
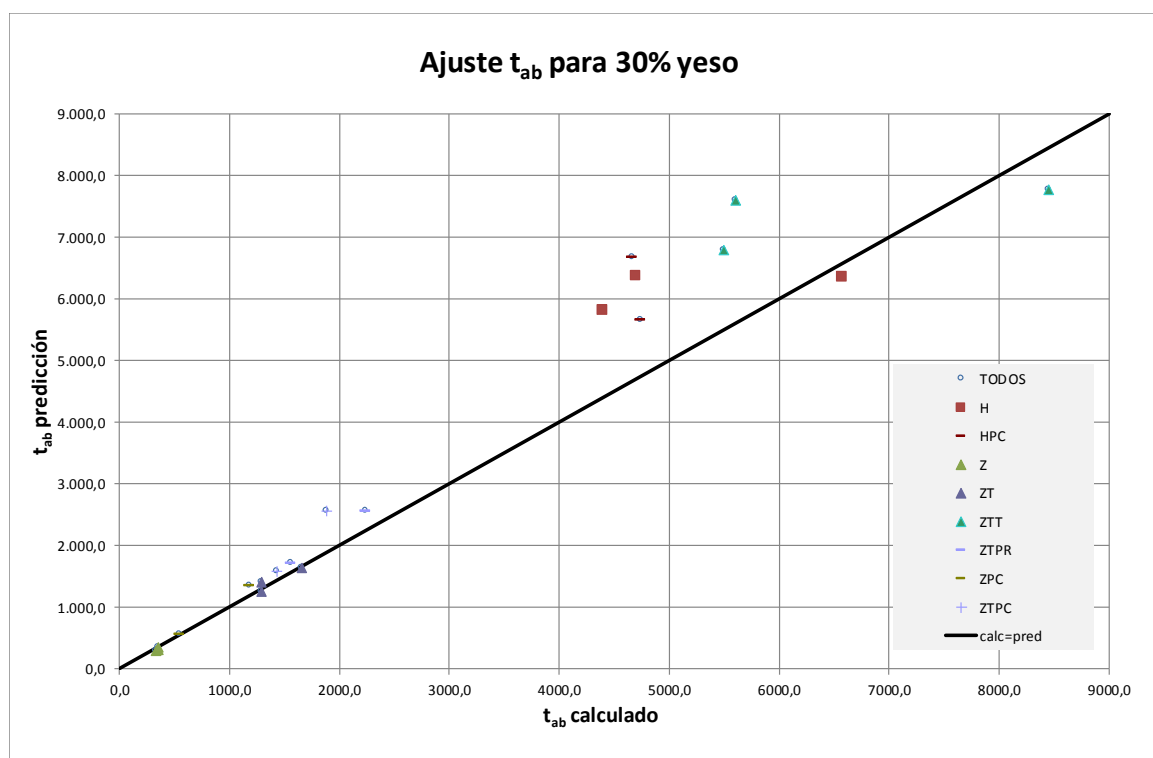


FIGURA N° 177: Ajuste de la formulación para el tiempo de llegada aguas abajo t_{ab} (10% yeso).

Quedaría del lado de la seguridad para casi todos los casos y para todos los porcentajes (ya que la mayor parte de los puntos quedan por debajo de la línea de ajuste, en este caso; si t_{ab} obtenido con la formulación es menor que el calculado). En cualquier caso, siempre se pueden imponer los coeficientes de seguridad necesarios, tanto para el aumento de caudal de llegada aguas abajo respecto al inicial y para el tiempo de llegada aguas abajo del frente de disolución.

FIGURA N° 178: Ajuste de la formulación para el tiempo de llegada aguas abajo t_{ab} (20% yeso).FIGURA N° 179: Ajuste de la formulación para el tiempo de llegada aguas abajo t_{ab} (30% yeso).

Se muestra a continuación el ajuste obtenido para FA, para todas las tipologías, y todos los porcentajes:

6. CRITERIOS DE DISEÑO DE PRESAS SOBRE CIMIENTOS YESÍFEROS

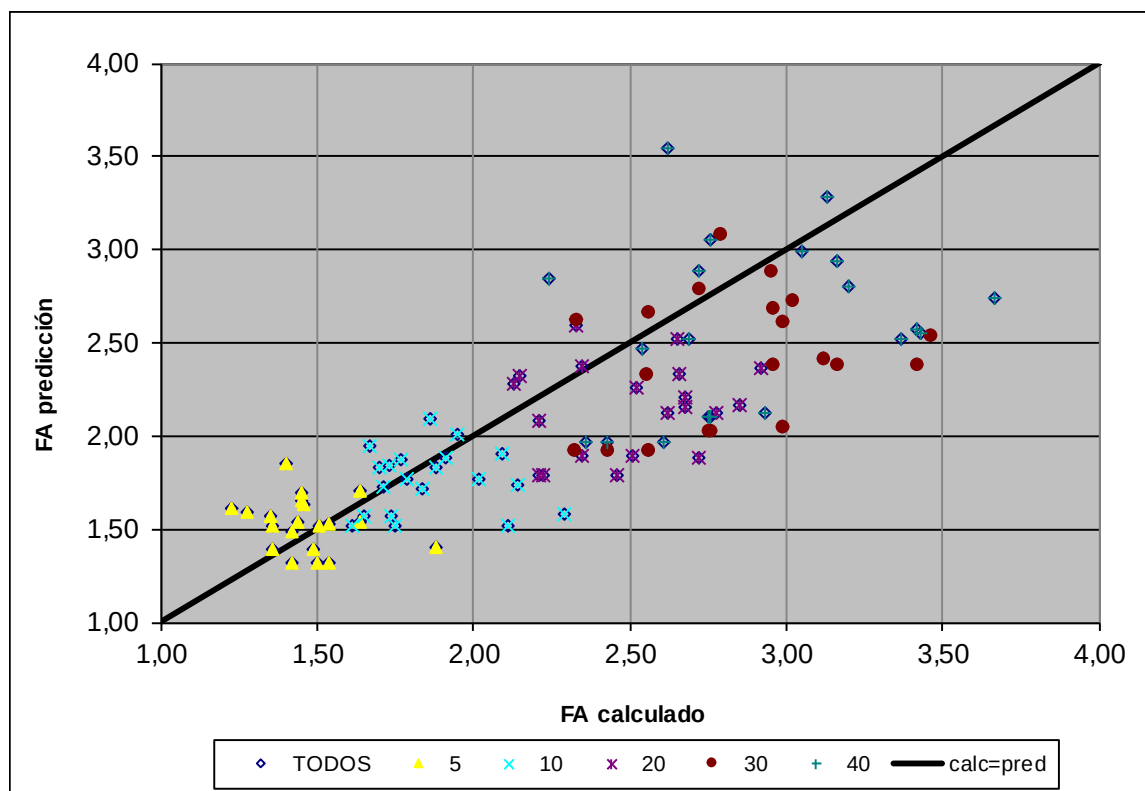


FIGURA N° 180: Ajuste de FA.

Efectivamente, las formulaciones anteriores de los parámetros representativos (caudal de llegada aguas abajo o aumento de caudal respecto al inicial, si se prefiere, y tiempo de llegada aguas abajo), son de gran utilidad para hacer una estimación previa, de manera muy rápida, además de constituir relaciones matemáticas simples entre los parámetros fundamentales.

Si bien, obtener los gráficos de la evolución en el tiempo de estos parámetros por medio de un cálculo mediante DISOLUCIÓN2D o simplemente, predecir cómo puede ser la evolución por semejanza con otros cálculos ya realizados y mostrados a lo largo del estudio, permite una visión más global de cómo se ha llegado al punto no deseable de “llegada aguas abajo del frente de disolución”; donde como se ha visto para las diferentes tipologías, el aumento de caudales, por lo general, es muy rápido.

6.4. CRITERIOS DE DISEÑO DE PRESAS SOBRE CIMIENTOS YESÍFEROS

Tras analizar los resultados de la campaña de experimentación numérica, se está en disposición de fijar unos criterios básicos que permitan al proyectista enfrentarse al problema que supone un cimiento yesífero en la cerrada donde ubicar una presa.

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

En general, si se plantea estudiar la tipología de una presa en una cerrada donde existan yesos, y no se cumplen las características de las secciones tipo, espesores de capa yesífera, porcentajes de yeso o permeabilidades de partida establecidos en los casos calculados, se tendrá que aplicar el procedimiento general de cálculo, utilizando el programa elaborado al efecto DISOLUCIÓN2D. Se procederá del siguiente modo (se adjunta mayor detalle con un ejemplo en el Apéndice N° 1):

- Se modelizará la presa mediante el código de elementos finitos FastSEEP, con las características geométricas de presa y cimiento, la carga de agua en el embalse y las permeabilidades de los materiales correspondientes al caso planteado.
- Del cálculo mediante FastSEEP se obtendrá la red de filtración, el campo de velocidades, y el caudal filtrado inicial.

A partir del caudal filtrado inicial, y de la longitud mínima de recorrido de la filtración (longitud del cimiento de la presa más dos veces la altura de la pantalla, si existe) se podrá obtener un gradiente hidráulico inicial aproximado ($i_0 = H/L$) y una velocidad media inicial aproximada ($v_0 = K_0 i_0$) de la filtración.

Efectivamente, la velocidad media de la filtración en la capa yesífera se puede comprobar en el cálculo mediante FastSEEP.

- A partir del porcentaje de yeso en la capa yesífera, de la porosidad inicial y de la permeabilidad inicial de la capa yesífera se calcula la permeabilidad tras la disolución:

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

- A partir del porcentaje de yeso y de la concentración de saturación se obtiene la relación u/v .

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

- Se calcula, en un primer tanteo, el tiempo que tardaría en llegar el frente de disolución aguas abajo del elemento impermeable de la presa, considerando que la velocidad de avance del frente es constante.

$$t_{ucte} = \frac{L_{teórica}}{u_{media}} = \frac{L_{teórica}}{\frac{u}{v} v_0}$$

- Se procede al cálculo con DISOLUCIÓN2D, con 100 iteraciones y considerando como límite superior el tiempo calculado en el epígrafe anterior. Tras este primer cálculo, se ajusta el tiempo de cálculo. Se recalcula y se obtienen los gráficos que relacionan t-Q y t-Q/Q₀.
- Entrando en estos gráficos con la vida útil fijada para la presa, se puede obtener el caudal filtrado en ese momento y decidir si es aceptable para la presa en cuestión. Si fuera inaceptable, se debería recalculer una sección tipo más segura y en el caso de que quedara muy del lado de la seguridad, probar con una sección tipo con menos elementos de reducción del gradiente hidráulico inicial, por ejemplo, eliminando la pantalla si estuviera en el diseño inicial.

El siguiente paso sería ajustar el modelo y recalculer, para comprobar si con el mismo criterio se considera aceptable la nueva sección tipo.

- Para calcular el Factor de Aceleración se realizaría otro cálculo mediante DISOLUCIÓN2D con una permeabilidad tras la disolución igual a la inicial. Se obtendría el tiempo que tarda en llegar el frente aguas abajo del elemento impermeable (t_{ucte}), en este caso sin aumento del caudal filtrado, y a partir de t_{ab} , tendríamos el FA.

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

Si comparamos este valor con el del modelo de referencia correspondiente a la sección tipo y al cimiento de partida, puede diferir apreciablemente. Esto es debido a que el FA es un valor que depende de todo el proceso de disolución y de filtración, y por lo tanto, de todos los parámetros que influyen en el proceso: espesor de capa yesífera, sección tipo, pero también de la relación de permeabilidades entre las capas del cimiento y de la forma que ha adoptado el frente de disolución.

Posteriormente, se puede obtener la longitud media y el gradiente hidráulico inicial medio:

$$L_{media} = \sqrt{t_{ucte} \frac{u}{v} KH; i_0} = \frac{H}{L_{media}}$$

Estos valores también pueden diferir bastante con los correspondientes del modelo de referencia por el mismo motivo antes citado.

- Finalmente, hay que comprobar que en todo el proceso el régimen ha sido laminar, como se detalla en el apartado 5.1.2.3. A partir del campo de velocidades tras la disolución del cemento, se obtiene la $v_{máx}$, que debe ser un valor pequeño comparado con los valores límite de velocidad en régimen laminar obtenidos en la TABLA N° 3.

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

Para un estudio de soluciones de presa quizá no sea necesario tanto detalle como en el caso anterior, si se cumplen las condiciones requeridas en cuanto a la modelización y a los rangos de los parámetros, se pueden comparar tipologías similares a las de la campaña de experimentación. Dado que se han calculado 140 casos en total se ha intentado fijar unos criterios de diseño a partir del análisis de todos los resultados obtenidos, teniendo en cuenta que al utilizar los gráficos adimensionales, son válidos para cualquier altura de presa y para cualquier permeabilidad inicial de la capa yesífera.

Si se cumplen las hipótesis de partida (que el caudal principalmente se filtre por la capa yesífera y que las relaciones de permeabilidades entre los materiales sean del orden de las utilizadas en los cálculos), se puede proceder de cuatro maneras:

- a) *Fijando una vida útil para la presa o un tiempo en el que se deba cumplir una limitación de la relación Q/Q_0 .*

Cumpliendo las hipótesis de partida (que el caudal principalmente se filtre por la capa yesífera y que las relaciones de permeabilidades entre los materiales sean del orden de las utilizadas en los cálculos), se podrían utilizar los gráficos adimensionales. Se seleccionaría el gráfico que tiene las condiciones del cemento de nuestra cerrada (% y E/H) y se calcularía el tiempo adimensional correspondiente a esa vida útil (multiplicando por K_0 de la capa yesífera y dividiendo por H).

Entrando en abscisas en el gráfico $t_{adim}-Q/Q_0$ con este valor de tiempo adimensional, y en ordenadas con la limitación del aumento de caudal, se tendría un punto que representa el criterio fijado. Todas las secciones tipo que queden por debajo de este punto cumplirán las condiciones impuestas y podría elegirse cualquiera de ellas como sección tipo previa a estudiar, según las características de los materiales disponibles para configurar la sección tipo de presa.

- b) *Fijando una vida útil para la presa o un tiempo en el que se deba cumplir una limitación del caudal Q .*

En este caso, cumpliendo las hipótesis, se elegiría igualmente el gráfico correspondiente a las características de la cerrada y se calcularía el tiempo adimensional correspondiente a esa vida útil (multiplicando por K_o de la capa yesífera y dividiendo por H) y el caudal adimensional (dividiendo por K_o de la capa yesífera y por H^2). Se procedería de forma similar a la anterior, con los gráficos $t_{adim}-Q_{adim}$.

- c) *Con la formulación de los parámetros representativos.*

Gracias a la formulación se puede calcular la predicción para Q_{ab} y t_{ab} . Para ello, es preciso calcular, para la cerrada de estudio y para una tipología de presa inicial, el caudal filtrado al inicio, antes del comienzo de la disolución (por medio de cualquier programa de elementos finitos que calcule redes de filtración de presa+cimiento). Con el caudal inicial y los parámetros E y L teóricos se calcula el Factor de forma FF (ver apartado 6.3). Y por medio de la formulación, se estiman Q_{ab} y t_{ab} , que permite la comparación entre tipologías o comprobar si se cumplen criterios del tipo a) o b) para el tiempo igual a t_{ab} .

- d) *Fijando un límite concreto al avance del frente de disolución durante la vida útil o periodo fijado a priori.*

Para aplicar este criterio no es posible la comparación mediante gráficos como en los criterios anteriores, ya que el avance del frente en un tiempo determinado se analiza a partir de los ficheros de resultados obtenidos el caso calculado, por lo que es preciso desarrollar un modelo y calcularlo mediante DISOLUCIÓN2D (ver Apéndice N° 1).

La forma de proceder será la siguiente: con los datos de partida de un cimiento, se modela una sección tipo de presa determinada y el cimiento, y se calcula según el procedimiento 6.4.1. Tras el cálculo, se analiza cómo ha sido el avance del frente (con los gráficos similares a los de la FIGURA N° 97, visualizando el tiempo transcurrido tras cada iteración). A continuación, deben compararse los resultados de este primer tanteo con el criterio fijado (por ejemplo, que en un periodo de 100 años, el frente de disolución no sobrepase la mitad de la longitud de cimentación la presa). Finalmente, se modificaría la sección tipo de la presa (teniendo en cuenta la influencia de parámetros detallada en 6.2.1) para cumplir el criterio fijado.

6.4.3. Ejemplos de aplicación

Se muestran varios ejemplos a continuación de cada criterio.

EJEMPLO 1.A

DATOS DE PARTIDA: *cimiento con capa yesífera de gran espesor en comparación de la altura de la presa y porcentaje de yeso del 10%. La permeabilidad inicial estimada para la capa yesífera es 200 m/año y la altura de la presa es 30 m.*

Admitiremos que se cumple la relación de permeabilidades de los cálculos realizados en la campaña de experimentación numérica.

Criterio a) *En 200 años imponemos que no se duplique el caudal filtrado respecto al caudal inicial.*

Se calcula el tiempo adimensional correspondiente:

$$t_{a \text{ dim}} = t \times \frac{K_0}{H} = \frac{200 \times 200}{30} = 1.333,33$$

Se escogerá el gráfico de aumento de caudal para 10% de yeso y $E/H=3$ y se entrará con este valor en abscisas y con el valor de 2 fijado para la relación de caudales en ordenadas. Tenemos un punto marcado en el gráfico con los valores correspondientes y que separa las secciones tipo que cumplen la condición de las que no. Las secciones tipo que cumplen esta condición son: H3H, HPC3H0,5 (por lo tanto también HPC3H1) y ZTT3H.

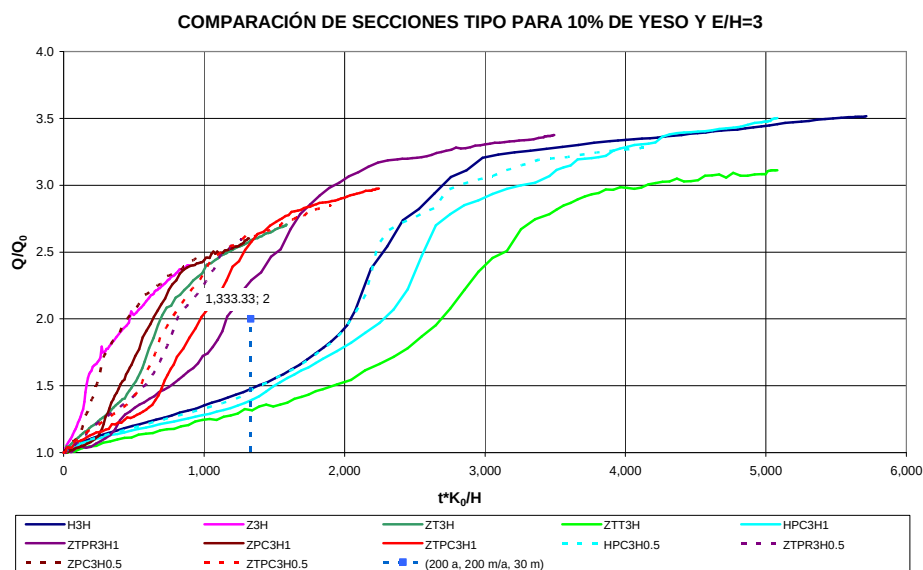


FIGURA N° 181: Relación $t_{a \text{ dim}}-Q/Q_0$ con porcentaje de yeso de 10% y $E/H=3$. Criterio a), altura de presa de 30 m y permeabilidad inicial de 200 m/año. Ejemplo 1

Se calcula el tiempo adimensional correspondiente:

$$t_{adim} = t \times \frac{K_0}{H} = \frac{200 \times 400}{30} = 2.666,7$$

Se entra en el mismo gráfico con este valor en abscisas y la misma ordenada:

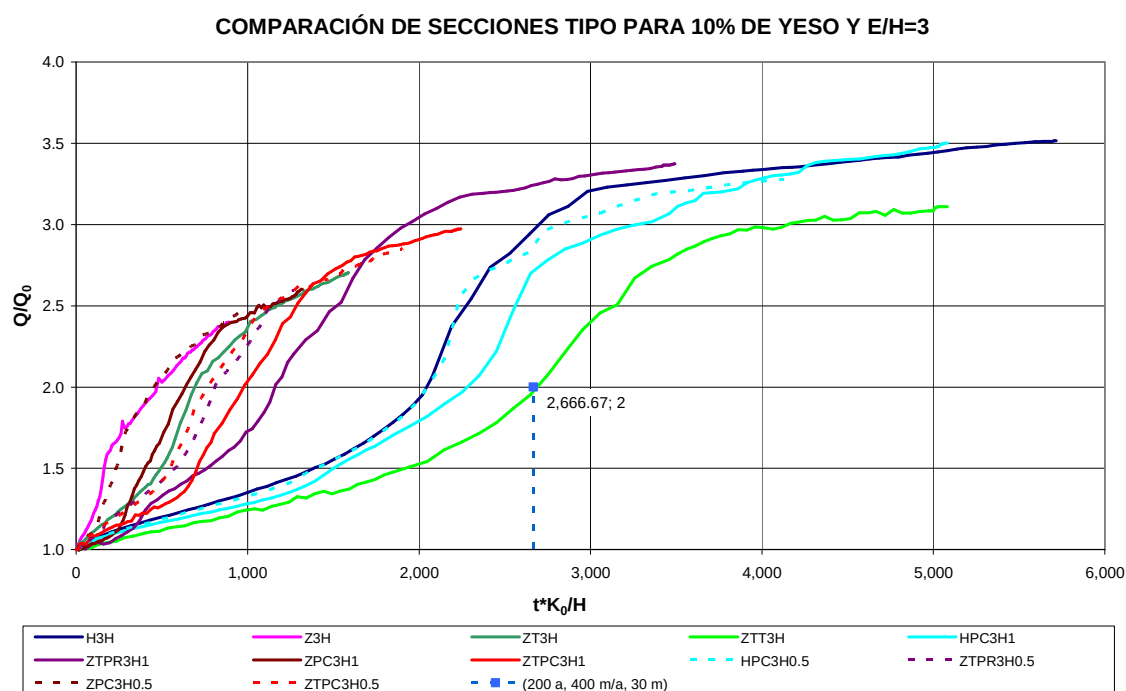


FIGURA N° 183: Relación $t_{adim}-Q/Q_0$ con porcentaje de yeso de 10% y E/H=3. Criterio a), altura de presa de 30 m y permeabilidad inicial de 400 m/año. Ejemplo 3

El modelo geométrico que cumple esta condición es ZTT3H (presa zonificada con tapiz de longitud 5,15 H. La longitud del tapiz sumada a la del núcleo es igual a la longitud de la presa homogénea).

EJEMPLO 4.B

DATOS DE PARTIDA: cemento con capa yesífera de gran espesor en comparación de la altura de la presa y porcentaje de yeso del 10%. Consideramos la presa de 30 m de altura y la permeabilidad inicial de la capa yesífera de 200 m/año.

Criterio b) En 200 años no queremos que el caudal supere los 3.000 m³/año, independientemente del caudal inicial.

Se calcula el tiempo adimensional correspondiente:

$$t_{adim} = t \times \frac{K_0}{H} = \frac{200 \times 200}{30} = 1.333,33$$

Y el caudal adimensional correspondiente:

$$Q_{adim} = \frac{Q}{H^2 K_0} = \frac{3.000}{30^2 \times 200} = 0,0167$$

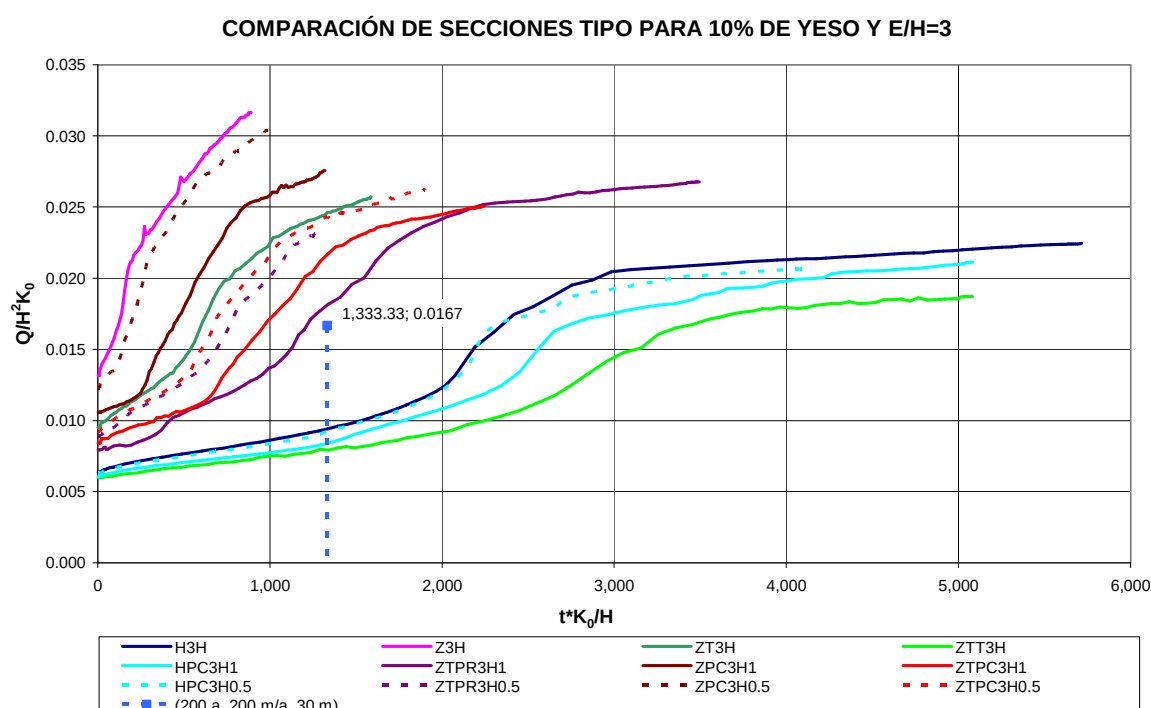


FIGURA N° 184: Relación t_{adim} - Q_{adim} con porcentaje de yeso de 10% y $E/H=3$. Criterio b), altura de presa de 30 m y permeabilidad inicial de 200 m/año. Ejemplo 4

Entrando con estos valores en la gráfica anterior, nos daría el punto marcado con los valores correspondientes.

Las secciones tipo que cumplen esta condición son: H3H (presa homogénea), HPC3H0,5 (presa homogénea con pantalla centrada, de profundidad igual a la mitad de la altura de la presa), HPC3H1 (presa homogénea con pantalla centrada, de profundidad igual a la altura de la presa) y ZTT3H (presa zonificada con tapiz de longitud 5,15 H).

EJEMPLO 5.B

DATOS DE PARTIDA: Supongamos el mismo cemento y criterio que caso 4, pero con una altura de la presa de 80 m.

Veremos cómo influye cambiar la altura de la presa (FIGURA N° 185).

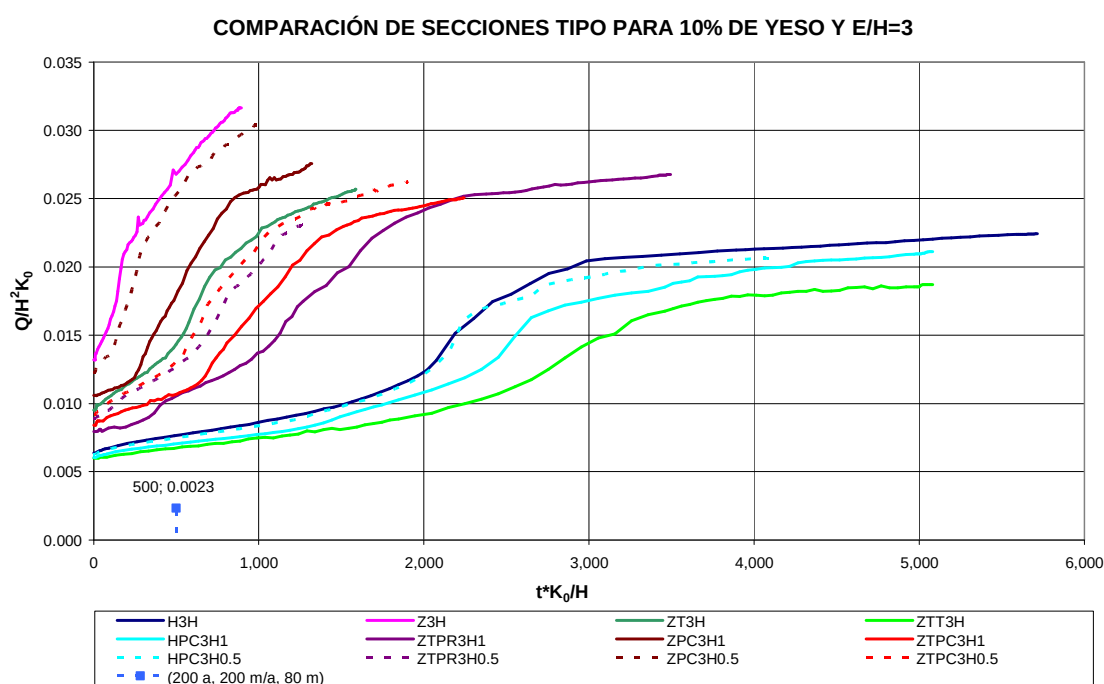


FIGURA N° 185: Relación $t_{adim}-Q_{adim}$ con porcentaje de yeso de 10% y E/H=3. Criterio b), altura de presa de 80 m y permeabilidad inicial de 200 m/año. Ejemplo 5

Ninguna sección tipo cumple la condición impuesta.

EJEMPLO 6.B

DATOS DE PARTIDA: Supongamos el mismo cemento y criterio que caso 4, pero con una permeabilidad inicial de 300 m/año.

Veremos cómo influye cambiar la permeabilidad inicial de la capa yesífera (FIGURA N° 186).

En este caso, cumplen las secciones tipo: HPC3H1 y ZTT3H.

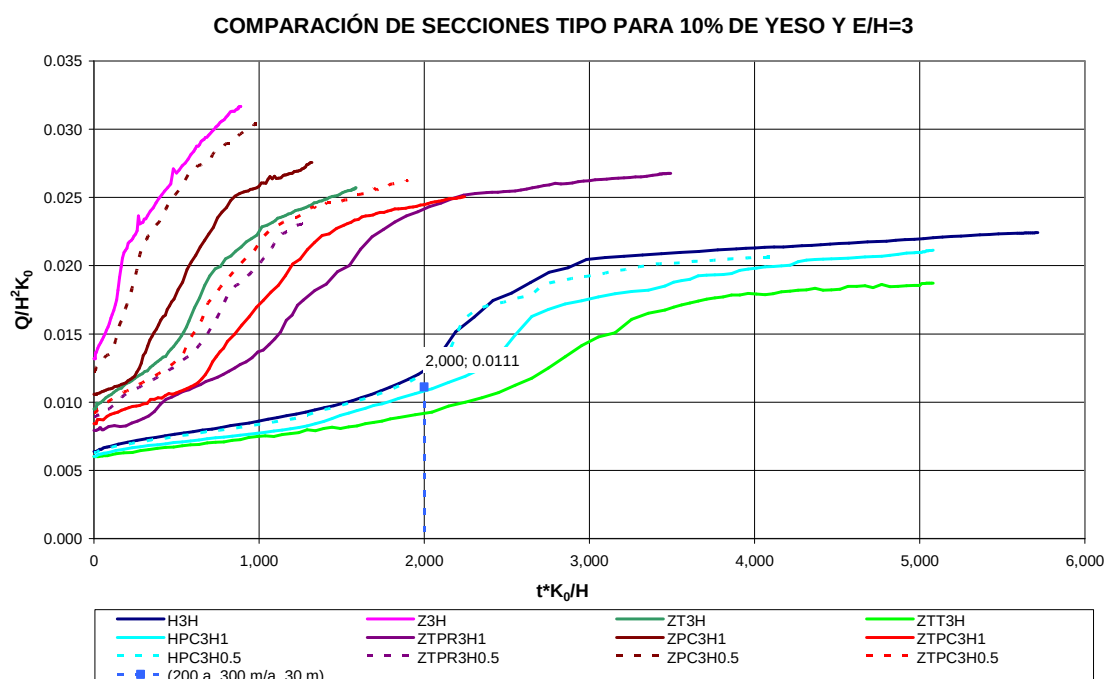


FIGURA N° 186: Relación t_{adim} - Q_{adim} con porcentaje de yeso de 10% y E/H=3. Criterio b), altura de presa de 30 m y permeabilidad inicial de 300 m/año. Ejemplo 6

EJEMPLO 7.C

DATOS DE PARTIDA: cemento con capa yesífera de gran espesor en comparación de la altura de la presa y porcentaje de yeso del 20%. Altura de la presa: 50 m y permeabilidad inicial de la capa yesífera 630 m/año. Comparativa entre presa homogénea y zonificada.

c) Con la formulación de los parámetros representativos.

Calculamos, mediante Seep2D o cualquier programa similar, el caudal inicialmente filtrado para la presa homogénea:

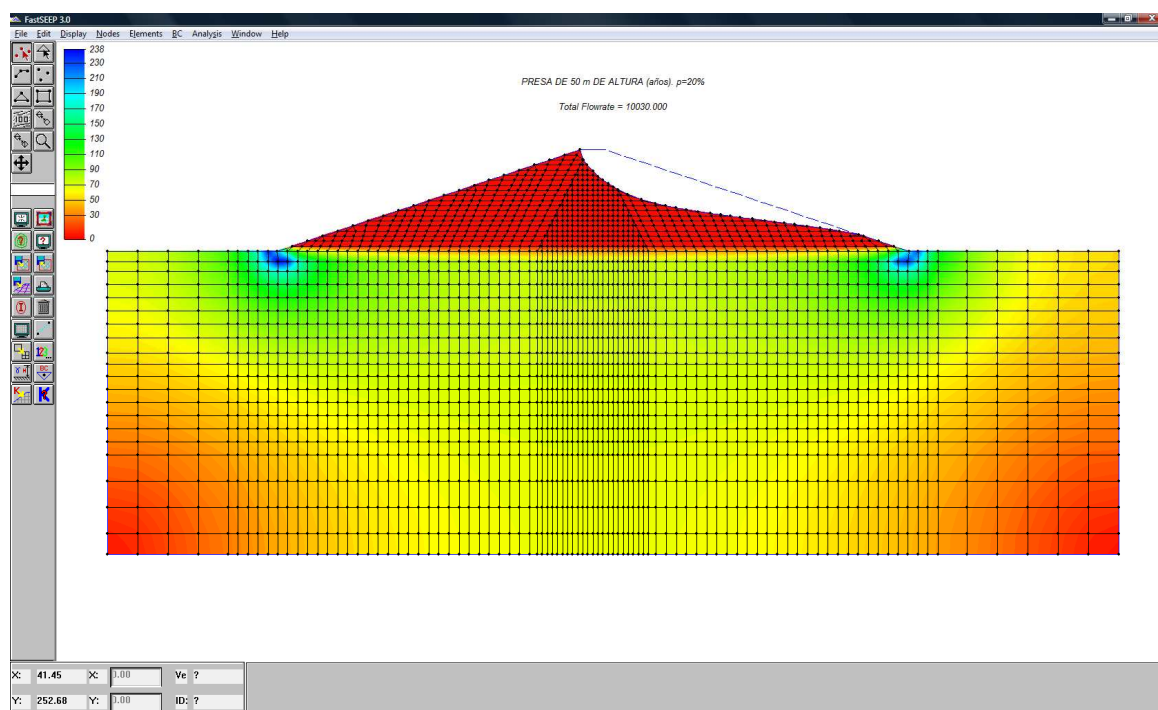


FIGURA N° 187: Caudal inicialmente filtrado para la presa homogénea del ejemplo 7 (porcentaje de yeso de 20%, $E/H=3$, altura de presa de 50 m y permeabilidad inicial de 630 m/año).

Resultando ser, $Q_0 = 10.030 \text{ m}^3/\text{año}$. A partir de él, se obtiene el Factor de forma mediante la siguiente expresión teniendo en cuenta que $E=150 \text{ m}$ y $L=312,5 \text{ m}$.

$$FF = \frac{L/E}{L_{med}/E_{med}} = \frac{LQ_0/E}{K_0H} = \frac{312,5 \cdot 10.030/150}{630 \cdot 50} = 0,66$$

Calculamos Q_{ab} , L_{med} , t_{ucte} , FA y t_{ab} , mediante la formulación:

$$Q_{ab} = 1,191Q_0 e^{9,839 \cdot FF \cdot \%} = 1,191 \cdot 10.030 \cdot e^{9,839 \cdot 0,66 \cdot 0,2} = 43.778 \text{ m}^3/\text{año}, \text{ es decir, } \frac{Q_{ab}}{Q_0} = 4,36$$

$$L_{media} = 1,11 \cdot L = 346,88 \text{ m}$$

$$t_{ucte} = \frac{L_{med}^2}{\frac{u}{v} K_0 H} = \frac{346,88^2}{0,00519 \cdot 630 \cdot 50} = 736,0 \text{ años}$$

$$t_{ab} = \frac{t_{ucte}}{FA} = \frac{t_{ucte}}{\frac{Q_{ab}/Q_0}{0,5 \cdot (1 + FF \cdot Q_{ab}/Q_0)}} = \frac{736,0}{\frac{4,36}{0,5 \cdot (1 + 0,66 \cdot 4,36)}} = \frac{736,0}{2,25} = 327,3 \text{ años}$$

Para la misma cerrada, pero con una tipología zonificada, se obtendría un caudal inicial $Q_0 = 20.780 \text{ m}^3/\text{año}$; y el factor de forma correspondiente, con $L=55 \text{ m}$:

$$FF = \frac{L/E}{L_{med}/E_{med}} = \frac{LQ_0/E}{K_0H} = \frac{55 \cdot 20.780/150}{630 \cdot 50} = 0,24$$

Calculamos Q_{ab} , L_{med} , t_{ucte} , FA y t_{ab} , mediante la formulación:

$$Q_{ab} = 1,191Q_0 e^{9,839 \cdot FF \cdot \%} = 1,191 \cdot 20.780 \cdot e^{9,839 \cdot 0,24 \cdot 0,2} = 39.688,3 \text{ m}^3/\text{año}, \text{ es decir, } \frac{Q_{ab}}{Q_0} = 1,91$$

$$L_{media} = 1,62 \cdot L = 89,1 \text{ m}$$

$$t_{ucte} = \frac{L_{med}^2}{\frac{u}{v} K_0 H} = \frac{89,1^2}{0,00519 \cdot 630 \cdot 50} = 48,6 \text{ años}$$

$$t_{ab} = \frac{t_{ucte}}{FA} = \frac{t_{ucte}}{\frac{Q_{ab}/Q_0}{0,5 \cdot (1 + FF \cdot Q_{ab}/Q_0)}} = \frac{48,6}{\frac{1,91}{0,5 \cdot (1 + 0,24 \cdot 1,91)}} = \frac{48,6}{2,62} = 18,6 \text{ años}$$

Si se fija en 100 años la vida útil de la presa, se observa que en la tipología zonificada, el frente de disolución habría llegado aguas abajo en unos 20 años, y el aumento de caudal respecto al inicial sería de 2,0 veces (FIGURA N° 188).

Sin embargo, con la tipología homogénea, el frente de disolución tardaría 330 años en recorrer la cimentación y aunque aplicar la formulación no permite saber cómo es el aumento de caudal hasta llegar a ese punto, si se puede ver, en los gráficos similares al de FIGURA N° 186, que los primeros 2/3 del tiempo, el aumento de caudal es muy suave y que es, en el tercio final, cuando realmente se empieza a producir un aumento significativo de los caudales. Sin embargo, en los casos de presas zonificadas el aumento de caudal es mucho más importante desde el principio del proceso.

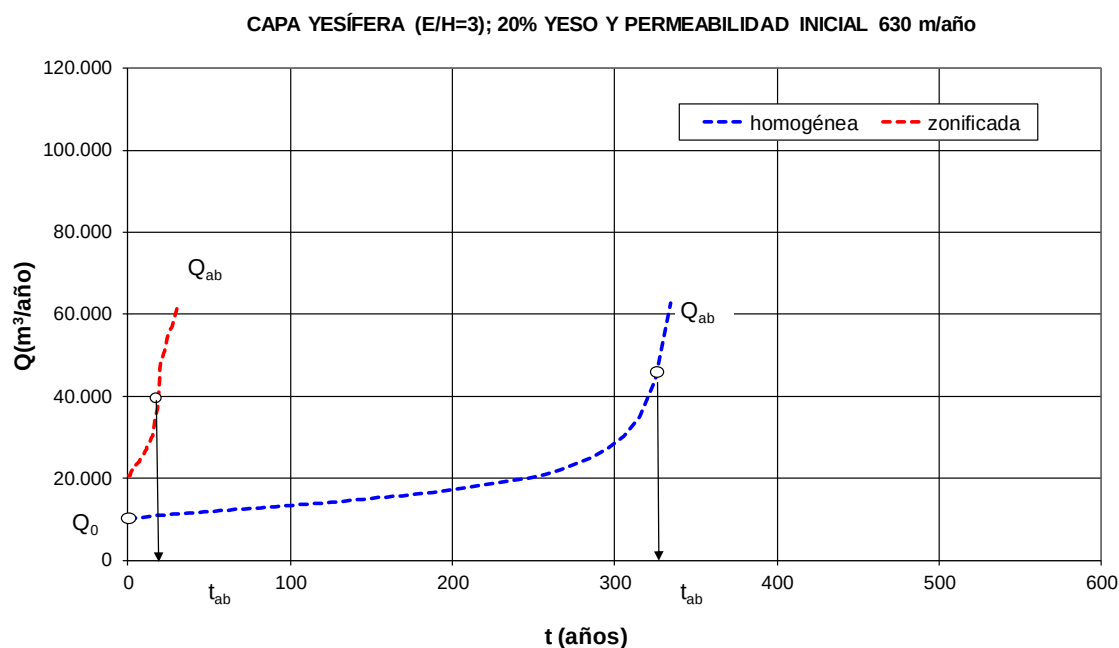


FIGURA N° 188: Estimativa del aumento de caudales en las presas homogénea y zonificada del ejemplo 7 (porcentaje de yeso de 20%, $E/H=3$, altura de presa de 50 m y permeabilidad inicial de 630 m/año).

Es decir, por medio de la obtención mediante fórmulas de los parámetros representativos Q_{ab} y t_{ab} , se pueden comparar tipologías de forma muy sencilla, una vez fijado un criterio por parte del proyectista. Sin embargo, la referencia de cómo es el aumento de caudal (representado en el gráfico con líneas discontinuas, ya que no se incluye en la formulación), que depende de todos los parámetros del proceso, ofrece una visión mucho más concreta de cómo se ha llegado a ese caudal o aumento de caudal filtrado.

EJEMPLO 8.D

DATOS DE PARTIDA: cemento con capa yesífera de espesor similar a la altura de la presa, porcentaje de yeso del 5% y permeabilidad inicial de 315 m/año. Presa de 50 m de altura, tipología primera a analizar: zonificada, con tapiz y pantalla centrada.

Criterio d) Fijando un límite al avance del frente de disolución durante un periodo fijado a priori.

Como se ha comentado, para aplicar este criterio no es posible la comparación mediante gráficos, ya que el avance del frente en un tiempo determinado se analiza a partir de los ficheros de resultados obtenidos para cada tiempo. Se ha fijado que el avance del frente de disolución no llegue al núcleo de la presa en 150 años.

Con los datos de partida de un cimiento (espesor, porcentaje y permeabilidad inicial de la capa yesífera de esta cerrada concreta) se ha modelado una sección tipo de presa determinada (tipología ZTPC1H) y el cimiento, y se ha calculado según el procedimiento 6.4.1.

Tras el cálculo, se analiza cómo ha sido el avance del frente. En este caso, en la iteración 21 (tiempo 189 años), el frente de disolución todavía no ha llegado a la zona bajo el núcleo:

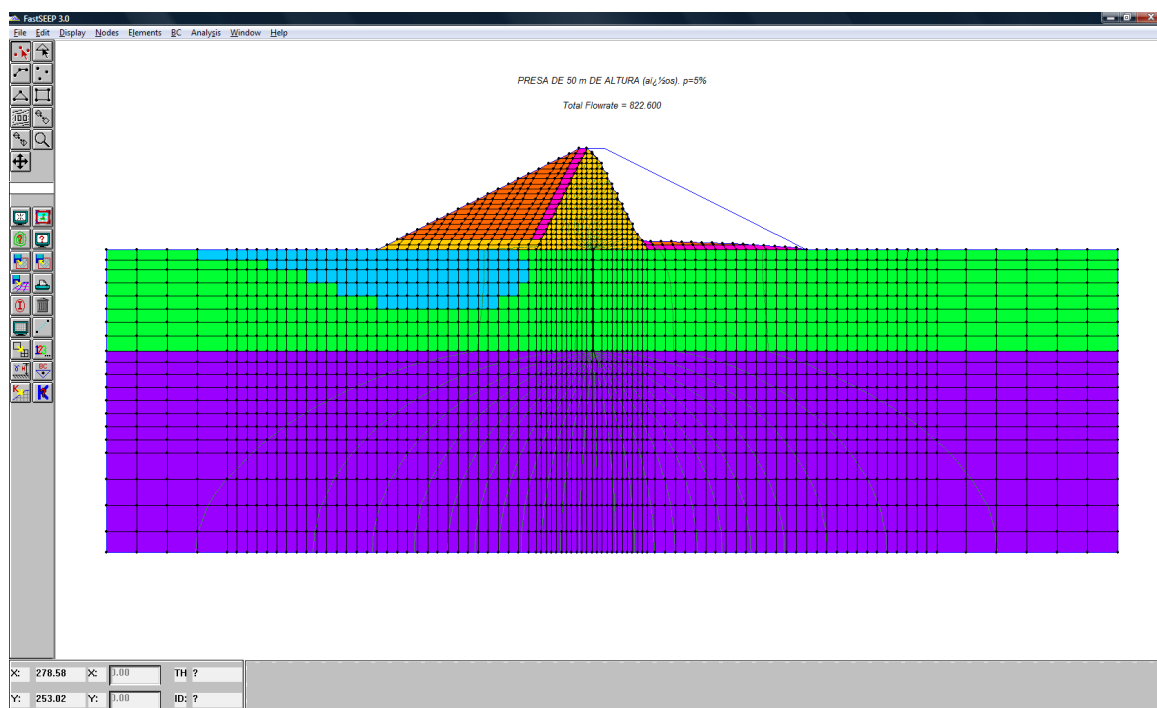


FIGURA Nº 189: Gráfico para el modelo del ejemplo 8: presa de 50 m de altura, con porcentaje de yeso de 5% y $E/H=1$. Criterio c), y permeabilidad inicial de 315 m/año.

Finalmente, si se quisiera ajustar más al criterio, se modificaría la sección tipo de la presa (teniendo en cuenta la influencia de parámetros detallada en 6.2.1). Sin embargo, se cree aconsejable disponer de un coeficiente de seguridad elevado en estos casos, por lo que se considera aceptable la tipología elegida para esta cerrada y con el criterio dado.

6.4.4. Límites de aplicación

El modelo desarrollado es aplicable a cimientos yesíferos donde el régimen es laminar (incluso tras la disolución, dado que las velocidades aumentan respecto a las iniciales) y el modelo de disolución es el de partículas, es decir, el yeso está diseminado dentro de materiales no solubles. La primera comprobación es preciso hacerla tras el cálculo y la segunda cuestión es preciso corroborarla con expertos geotécnicos y con los ensayos necesarios.

No se ha tenido en cuenta el efecto mecánico de la disolución, por lo que el modelo desarrollado es aplicable únicamente cuando el porcentaje de yeso es moderado, resultando difícil establecer un límite exacto. Sin embargo, no considerar este efecto, queda del lado de la seguridad porque los hundimientos reducen la porosidad y por tanto, el coeficiente de permeabilidad y también el caudal filtrado y se ralentizaría el proceso. A efectos de asentamientos de la presa, podría suponer un problema, sobre todo para porcentajes elevados.

En cuanto a la geometría de los modelos, dado el amplio rango cubierto para ciertos parámetros, como por ejemplo longitudes del elemento impermeable, profundidades de pantalla, etc. muchos casos se podrían asimilar a los calculados usando interpolaciones si es preciso (o por ejemplo, una presa de hormigón, podría asimilarse a una presa zonificada ya que el ancho del núcleo en la base es del orden de lo que puede ser la base de una presa de hormigón). En cuanto a las relaciones de los coeficientes de permeabilidad entre los distintos materiales, es importante ver la influencia analizada para los de las capas de cimiento en el apartado 6.2.1.3; ya que diferencias de un orden de magnitud entre los coeficientes de permeabilidad pueden no influir en los resultados de forma apreciable, pero si las diferencias son mayores debe realizarse un modelo de cálculo y aplicar DISOLUCIÓN2D.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES FINALES



En este apartado se resumen las conclusiones más importantes del estudio, enfocado principalmente a proporcionar herramientas al proyectista de presas cuando la cerrada contiene yesos diseminados en proporciones inferiores al 40% y el régimen es laminar.

Este estudio comenzó en el año 1995, con el Proyecto y posterior construcción de la presa de la Loteta (Zaragoza). Esta presa, de materiales sueltos y 34 m de altura, cimentada sobre margas con abundantes niveles de yesos y argilitas con escasa presencia de yeso, supuso un reto técnico importante para los geotécnicos y para los ingenieros de presas españoles.

La principal experiencia obtenida en este Proyecto es que había mucho por estudiar en el campo de la disolución de cimientos yesíferos de presas y, que cualquier nueva aportación, podría ser de utilidad para este campo, sobre todo, si se podría traducir en algún criterio para la elección del diseño de una nueva presa.

El proceso parecía muy complejo, pero el efecto de la disolución en el aumento de las filtraciones por el cimiento a lo largo del tiempo pasaba por caracterizar el cimiento mediante un único parámetro, el coeficiente de permeabilidad; parámetro con un rango de variabilidad muy importante en el mundo de la ingeniería civil.

Tras el estudio de las presas en el mundo con yesos en la cerrada, fue preciso caracterizar el yeso que se podría presentar como cimiento de una nueva presa.

El paso siguiente consistió en modelar de forma conjunta el proceso disolución-filtración, para poder analizar la evolución del cimiento a lo largo del tiempo, una vez el frente de disolución (zona donde se está produciendo la disolución, y por tanto, aumentando el coeficiente de permeabilidad) avanza desde el pie de aguas arriba hacia aguas abajo. Esta modelización se implementó en un nuevo programa DISOLUCIÓN2D que, utilizando de manera iterativa un modelo comercial de cálculo de redes de filtración, conseguía calcular el proceso acoplado de ambos fenómenos a lo largo del tiempo.

Fue preciso validar este modelo matemático mediante ensayos, que se materializaron mediante un permeámetro de carga constante con arena y bicarbonato sódico en distintas proporciones y se modelizaron con el programa, para comparar los resultados.

Validado el programa, se realizaron numerosos cálculos de presas de materiales sueltos, con variaciones de los parámetros más influyentes en el proceso, tales como: porcentaje de partículas yesíferas, espesor de la capa, permeabilidades iniciales, etc.

Se crearon nuevos parámetros representativos del proceso, tales como el tiempo de llegada aguas abajo del elemento impermeable del frente de disolución (y su caudal correspondiente), el factor de aceleración, etc. que permitiera la comparación entre distintos diseños de presas, en cuanto a su bondad para limitar la disolución del cimiento en los términos que el proyectista fije. También se elaboraron gráficos adimensionales que permiten la comparación entre secciones tipo de presa, fijados los parámetros que caracterizan al cimiento: % yeso y E/H (se adjuntan en el apartado 6.1.5.2).

A su vez, se han podido formular los parámetros representativos a partir del factor de forma de la cimentación, sin más que calcular la situación inicial por medio de cualquier programa de redes de filtración, y con un grado de ajuste que se considera suficiente para un proceso tan complejo y desde el punto de vista comparativo para un estudio de soluciones.

Y finalmente, se pudo conseguir el objetivo principal: **fijar criterios de diseño para presas en terrenos yesíferos**, con flujo preferentemente intergranular y donde el régimen es laminar.

Básicamente se puede proceder de cuatro maneras:

- a) *Fijando un tiempo en el que se deba cumplir una limitación de la relación Q/Q_0 .*

Cumpliendo las hipótesis de partida (que el caudal principalmente se filtre por la capa yesífera y que las relaciones de permeabilidades entre los materiales sean del orden de las utilizadas en los cálculos), se podrían utilizar los gráficos adimensionales. Se seleccionaría el gráfico que tiene las

condiciones del cimiento de nuestra cerrada (% y E/H) y se calcularía el tiempo adimensional correspondiente a esa vida útil (multiplicando por K_o de la capa yesífera y dividiendo por H).

Entrando en abscisas en el gráfico $t_{adim} \cdot Q/Q_o$ con este valor de tiempo adimensional, y en ordenadas con la limitación del aumento de caudal, se tendría un punto que representa el criterio fijado. Todas las secciones tipo que queden por debajo de este punto cumplirán las condiciones impuestas y podría elegirse cualquiera de ellas como sección tipo previa a estudiar, según las características de los materiales disponibles para configurar la sección tipo de presa.

b) *Fijando un tiempo en el que se deba cumplir una limitación del caudal Q .*

En este caso, cumpliendo las hipótesis, se elegiría igualmente el gráfico correspondiente a las características de la cerrada y se calcularía el tiempo adimensional correspondiente a esa vida útil (multiplicando por K_o de la capa yesífera y dividiendo por H) y el caudal adimensional (dividiendo por K_o de la capa yesífera y por H^2). Se procedería de forma similar a la anterior, con el gráfico $t_{adim} \cdot Q_{adim}$.

c) *Con la formulación de los parámetros representativos.*

Para ello, es preciso calcular, para la cerrada de estudio y para una tipología de presa inicial, el caudal filtrado al inicio, antes del comienzo de la disolución y el factor de forma. Y por medio de la formulación, se estiman Q_{ab} y t_{ab} , que permite la comparación entre tipologías o comprobar si se cumplen criterios del tipo a) o b) para el tiempo igual a t_{ab} . Además, estas formulaciones, sencillas y con un ajuste suficiente para un proceso tan complejo, suponen un avance muy importante, porque permiten comprender las relaciones entre todos los parámetros.

d) *Fijando un límite concreto al avance del frente de disolución durante la vida útil o periodo fijado a priori.*

En este caso, es preciso desarrollar un modelo, por tanto, no es preciso cumplir las hipótesis de partida y calcularlo mediante DISOLUCIÓN2D (ver Apéndice N° 1).

Estos procedimientos pretenden proporcionar al proyectista una herramienta para comparar entre tipologías de presas de materiales sueltos en un caso concreto de un cimiento yesífero de determinado espesor y con determinado porcentaje de yeso (siempre que el flujo sea laminar y que el modelo de disolución pueda asimilarse al modelo de partículas de James, A.N.); si bien, la solución final debería calcularse por el procedimiento general debido a que los porcentajes, los espesores o las relaciones de permeabilidades no serán exactamente las utilizadas en los cálculos realizados en el presente trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- Abad, G.; Torcal, R., 2002, "Geología y sondeos para la presa de Carrizosa (Ciudad Real)". Estudio de la Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas.
- Abduljawwad, S.N.; Al-amoudi, O.S.B., 1995, "Geotechnical behaviour of saline sabkha soils". *Geotechnique* 45, N° 3, pp. 425-445.
- Adar, E. M.; Nativ, R., 2000, "Use of hydrochemistry and isotopes in a mixing-cell model to quantify the relative contribution of multiple-source contaminants to seepage from a fractured chalk aquitard". IAHS Publication (International Association of Hydrological Sciences), N° 262, pp. 315-320.
- Aisiks, E.G.; Giuliani, F.L.; Tipping, E.D.; Varde, O.A., 1991, "Remedial works at El Chocón Dam". XVII Congreso del ICOLD (Viena) Q.65 R.67, pp. 1211-1230.
- Aisiks, E.G.; Pallarés, J.L.; Tipping, E.D.; Varde, O.A., 1991, "Special Techniques for corrective treatment of right abutment at El Chocón dam". XVII Congreso del ICOLD (Viena) Q.65 R.65, pp. 1169-1190.
- Ajalloeian, R.; Moein, F., 2009, "Evaluation of Damsites Groutability Using Secondary Permeability Index, Rock Classification (Case Studies)". *American Journal of Applied Sciences* 6: pp. 1235-1241.
- Alberto, F.; Navas, A., 1988, "Incidencia de la textura en la velocidad de disolución de rocas yesíferas". *Revista de la Academia de Ciencias de Zaragoza*, 43, pp. 233-241.
- Alonso Franco, M., 1993, "Patología de presas españolas de materiales sueltos". Simposio sobre Geotecnia de Presas de Materiales Suelos (Zaragoza). Conferencia especial, pp. 501-544.
- Alonso Franco, M., 2003, "El cimiento y la seguridad de la presa". AETESS, Jornadas Técnicas CNEGP-AETESS: Tratamiento del Terreno en la Cimentación de Presas, pp. 1-15.
- Alpaslan, A.H., 1982, "An approach to karst hydrology using the relationships between reservoir water level and spring discharge". *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, N° 25, pp. 111-116.
- Altug, S.; Oymagrout, J.V., 1982, "Study of leakage on the east side of the Oymapinar reservoir, Turkey". *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, N° 25, pp. 117-124.
- Amorós, J.L.; García-Abbad, F.J.; Ramírez, E.; Simancas, R., 1979, "Geología". Editorial Anaya.
- Anagnosti, P.; Adamo, N.N., 1991, "Unusual Foundation Conditions at Badush Dam". XVII Congreso del ICOLD (Viena) Q.66 R.86, pp. 1613-1622.
- Angelone, S; Garibay, M.T.; Casaux M.C., 2006, "Permeabilidad de suelos". Universidad Nacional de Rosario. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agromensura. pp. 1-39.
- Araoz Sánchez-Albornoz, A., 1992, "Cimentación de presas en terrenos terciarios con disolución de evaporitas y erosión interna en la Cuenca del Ebro". *Revista de Obras Públicas* N° 139 (3309) pp. 265-290.
- Araoz Sánchez-Albornoz, A., 1993, "Incidencias en el primer llenado de la presa de Caspe (1989-1993)". IV Jornadas Españolas de Presas (Murcia). pp. 639-654.
- Araoz Sánchez-Albornoz, A., 1993, "Incidencias en el segundo llenado de la presa de Caspe (1989-1993)". IV Jornadas Españolas de Presas (Murcia). pp. 655-674.

Baena Berrendero, C.M.; 2011, "Análisis de la filtración en presas con cimientos yesíferos". Tesis doctoral. UPM. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid.

Baena C.M., Toledo M.A., 2014, "An experimentally verified model of the seepage progress due to dissolution of soluble particles in foundations subject to intergranular flow". *Environ Earth Sci* DOI 10.1007/s12665-014-3243-4.

Bascones, M. et al., 1986, "Geología, Geomorfología, Hidrogeología y Geotecnia de Madrid". Ayuntamiento de Madrid. ISBN: 84-505-3043-1.

Barrera Serrano, J., 1991, "Presa de Riansares (Cuenca)". Informe del SGOP. 02696 (09/91).

Bartels, J.; Kühn, M.; Pape, H.; Clauser, C., 2000, "A new aquifer simulation tool for coupled flow, heat transfer, Multi-species transport and chemical water-rock interaction". *Proceedings World Geothermal Congress 2000*, pp. 3997-4002.

Bashford, H.H., 1984, "A study of the effect of soluble minerals in hydraulic structures constructed from soil". Tesis Doctoral. Brigham Young University.

Bauer, S.; Liedl, R.; Sauter, M., 2003, "Modeling of karst aquifer genesis: influence of exchange flow". *Water Resources Research* V 39 N° 10, 1285, pp. 6.1-6.12.

Bear, J., 1972, "Dynamics of fluids in porous media". Editorial Dover Publications, Inc. New York. ISBN: 0486656756.

Bell, F.G., 1994, "Engineering properties of soils and rocks". Editorial Blackwell Science. ISBN: 0-632-05205-8.

Beschkov, V.; Boayadjiew, C.; Peev, G., 1978, "On the mass transfer into a falling laminar film with dissolution". *Chemical Engineering Science*, Vol. 33, pp. 65-69.

Biek, R.F., 1999, "The geology of Quail Creek State Park". Utah Geological Survey.

Birk, S.; Liedl, R.; Sauter, M., 2000, "Characterization of gypsum aquifers using a coupled continuum-pipe flow model". *IAHS, Publ. N° 265 (Proceedings of the ModelCARE99 Conference*, pp. 16-21).

Birk, S.; Liedl, R.; Sauter, M.; Teutsch, G., 2003, "Hydraulic boundary conditions as a controlling factor in karst genesis: a numerical modeling study on artesian conduit development in gypsum". *Water Resources research*, Vol. 39, N° 1, pp. 2.1-2.14.

Calaforra, J.M., 1995, "Karstología de yesos". Universidad de Almería. ISBN: 848240122X.

Calaforra, J.M.; Pulido Bosch, A., 1998, "Gypsum karst features as evidence of diapiric processes in the Betic Cordillera, Southern Spain". *Geomorphology* 29, pp. 251-264.

Calaforra, J.M.; Pulido-Bosch, A., 1998, "Genesis and evolution of gypsum tumuli". *Earth Surface Processes and Landforms*, 24, pp. 919-930.

Calvino, F.; Costantino, F.; Mirri, F., 1981, "Design criteria for a dam, reservoir and irrigation system on a Middle East evaporite formation". *Bulletin of the Int. Assoc. of Eng. Geology* N° 24, pp. 53-54.

Cambeftort, H., 1967, "Lutte Contre Les Effets Des Ecoulements Sous Les Barrages". VIII Congreso del ICOLD (Istamboul) Q.32 R.6. pp. 81-99.

Carman, P.C., 1937, "Fluid flow through granular beds". Transactions, Institution of Chemical Engineers, London, 15: 150-166.

Carman, P.C., 1956, "Flow of gases through porous media". Butterworths Scientific Publications.

Carrier, W.D., 2003, "Goodbye, Hazen; Hello, Kozeny-Carman". Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, pp. 1054-1056.

Casagrande, A., 1961, "Control of seepage through foundations and abutments of dams". Géotechnique 11, Issue 3, pp. 161-182.

Catalán Lafuente, J., 1969, "Química del agua". Editorial Blume. ISBN: 8430051325.

Catanach, R.B.; Hall, R.B.; James; O'Neill; Von Thun, 1991, "Quail Creek dike failure, failure mechanisms, redesign and construction". XVII Congreso del ICOLD (Viena) Q.66 R.58, pp. 1063-1085.

Cedergren, H.R., 1968, "Seepage, drainage and flow nets". Editorial Wiley. ISBN: 0471141798.

Cerepi, A., 2004, "Geological control of electrical behaviour and prediction key of transport properties in sedimentary porous systems". Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects 241, pp. 281-298.

Chernyshev, S.N.; Dearman, W.R., 1991, "Rock Fractures". Editorial Butterworth-Heinemann. ISBN: 0750610174.

Christoffersen, J.; Christoffersen, M.R., 1976, "The kinetics of dissolution of calcium sulphate dihydrate in water". Journal of Crystal Growth 35, pp. 79-85.

Civan, F., 2001, "Scale effects on porosity and permeability: kinetics, model and correlation". AIChE Journal, Vol. 47, N° 2, pp. 271-287.

Civan, F., 2000, "Reservoir formation damage". Editorial Gulf Professional Publishing. ISBN: 9780750677387.

Claassen, H.C., 1981, "Estimation of calcium sulfate solution rate and effective aquifer surface area in a ground-water system near Carlsbad, New Mexico". Groundwater Vol. 19, N° 3, pp. 287-297.

Clemens, T.; Liedl, R.; Sauter, M.; Hückinghaus, D.; Teutsch, G., 1996, "A combined continuum and discrete network reactive transport model for the simulation of karst development". IAHS N° 237 (Proceedings of the ModelCARE99 Conference, pp. 309-318).

Cooper, A. H., 1999, "Subsidence caused by gypsum dissolution at Ripon, North Yorkshire". Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol. 32, N° 4, pp. 305-310.

Cooper, A.H.; Calow, R.C., 1998, "Avoiding gypsum geohazards: guidance for planning and construction". British Geological Survey Technical Report WC/98/5. On the web at: http://www.bgs.ac.uk/research/international/dfid-kar/WC98005_col.pdf. Punto 3.4. Dam Construction and gypsum geohazards, pp. 20-22.

Craft, C. D.; Pearson, R. M.; Hurcomb, D., 2007, "Mineral dissolution and dam seepage chemistry - The Bureau of Reclamation experience ". U.S. Department of the Interior - Bureau of Reclamation - Technical Service Center. ASDSO Meeting.

Cuesta, P.L.; Fernández, R., 1970, "El dique de Razzaza en Irak". Revista de Obras Públicas N° 117, tomo I (3061), pp. 563-571.

Custodio, E; Llamas, M.R., 1976, "Hidrología Subterránea". Editorial Omega. ISBN: 8428202818.

Da Cunha, P., 1990, "Scale effects in rock masses: proceedings of the first International Workshop on Scale Effects in Rock Masses". Editorial Balkema. ISBN: 9061911265.

Dahan, O.; Nativ, R.; Adar, E.M.; Berkowitz, B.; Weisbrod, N., 2000, "On fracture structure and preferential flow in unsaturated chalk". Groundwater Vol. 38, N° 3, pp. 444-451.

Dasgupta, R.; Roy, S.; Tarafdar, S., 1999, "Correlation between porosity, conductivity and permeability of sedimentary rocks - a ballistic deposition model". Physica A 275, pp. 22-32.

Dayal, Z.; Bechai, K., 1990, "Bedrock gypsum dissolution studies at Ontario Hydro's R.H. Saunders G.S.". Proceeding of the 43rd Canadian Geotechnical Conference, Part 2, pp. 585-592.

De Cea Azañedo, J.C., 2002, "Control del comportamiento de presas durante su fase de puesta en carga". VII Jornadas Españolas de Presas (Zaragoza). pp. 487-495.

De Pedro, J.M., 1962, "El problema de la ubicación de las obras en yesos, resuelto". I Coloquio Internacional sobre las Obras Públicas en los terrenos yesíferos. Tema 2, C.2-16, pp. 345-368.

Del Campo y Francés, A., 1992, "José Torán, un ingeniero insólito". CICCIP, Colección de Ciencia, Humanidades e Ingeniería N° 44. ISBN: 84 380 0067 3.

Delgado Ramos, F.; Uriel Romero, S.; Bravo Guillén, G., 2002, "Análisis de seguridad de la presa frente al riesgo de erosión interna". VII Jornadas Españolas de Presas (Zaragoza). pp. 171-180.

Donado, L.D., 2004, "Modelo de conductividad hidráulica en suelos". Tesis de Magíster en Ingeniería-Recursos hídricos. Universidad Nacional de Colombia.

Dreybrodt, W., 1992, "Dynamics of karstification: a model applied to hydraulic structures in karst terranes". Applied Hydrogeology 3, pp. 20-32.

Dreybrodt, W.; Gabrovsek, F., 2003, "Basic processes and mechanisms governing the evolution of karst". Speleogenesis and evolution of karst aquifers, pp. 1-26.

Dreybrodt, W.; Romanov, D.; Gabrovsek, F., 2001, "Dam sites in soluble rocks: a model of increasing leakage by dissolutional widening of fractures beneath a dam". Engineering Geology 70, pp. 17-35.

Dreybrodt, W.; Romanov, D.; Gabrovsek, F., 2002, "Karstification below dam sites: a mode of increasing leakage from reservoirs". Environmental Geology 45, pp. 518-524.

Durán Valsero, J.J. et al., 1998, "Karst en Andalucía". IGME. ISBN: 84-7840-362-0.

Eckhart, R.A., 1953, "Gypsiferous deposits on sheep mountain Alaska". Geological Survey Bulletin 989-C.

Edinger, S. E., 1970, "An investigation of the topochemical reactions of gypsum". Tesis Doctoral. New York University.

El Naqa, A.; Al Kuisi, M., 2004, "Hydrogeochemical modeling of the water seepages through Tannur Dam, southern Jordan". Environmental Geology N° 45: pp. 1087-1100.

- Escario, V., 1967, "La presa del Argos". Revista de Obras Públicas N° 115, tomo I (3028), pp. 839-844.
- Esmiol, E.E., 1957, "Seepage through foundations containing discontinuities". Proceedings of the Journal of the Soil Mechanics and foundation Division, American Society of Civil Engineers, Paper N° 1143, pp. 1-19.
- Estaire Gepp, J., 2004, "Comportamiento de cimentaciones superficiales sobre suelos granulares sometidas a solicitaciones dinámicas". Tesis Doctoral. UPM. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid.
- Fabre, D.; Dayre, M., 1982, "Geotechnical properties of gypsum and anhydrite (Trias of the Northern Alps in France)". Bulletin of the Int. Assoc. of Eng. Geology N° 25, pp. 91-98.
- Faraco, C., 1972, "Estudio del colapso de la estructura de los limos yesíferos". Tesis Doctoral. UPM. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid.
- Farid, A.M.; Habibagahi, G., 2007, "Dissolution-Seepage coupled analysis through formations containing soluble materials". Journal of Engineering Mechanics Vol. 133, N° 6, pp. 713-722.
- Fell, R.; MacGregor, P.; Stapledon, D., 1992, "Geotechnical Engineering of Dams". Editorial Balkema. ISBN: 978-9054101284.
- Fengxiang, Ch.; Mingjiang, W., 1983, "Investigation of the engineering properties of a dam foundation containing gypsum seams". Rock Mechanics and Rock Engineering 16, pp. 275-280.
- Fernández, M.; Gascón, J.L.; Fraga, F.; Esteras, L.; Escolar, I., 2001, "Presa de Alloz: Estudios sobre el Aprovechamiento, Construcción y Evolución de la Obra". Revista de Obras Públicas N° 148 (3.413) pp. 39-45.
- Flores Calcaño, C.E.; Rodríguez Alzuru P., 1967, "Problemas de disolución de yesos en algunos sitios de presas". Bulletin of Venezuela Engineering Society of Soil Mechanics and foundation, pp. 3-14.
- Ford, D.C.; Williams, P.W., 1989, "Karst Geomorphology and hydrology". Editorial Unwin Hyman. ISBN: 0-04-551106-3.
- Ford, D.C.; Williams, P.W., 2007, "Karst Hydrogeology and Geomorphology ". Editorial Wiley-Blackwell. ISBN: 0470849975.
- Fourar, M.; Lenormand, R., 2001, "A new model for two-phase flows at high velocities through porous media and fractures". Journal of petroleum Science and Engineering 30, pp. 121-127.
- Foyo, A.; Sánchez, M.A.; Tomillo, C.; Suárez, J.L., 2002, "Propuesta para la obtención de un índice o coeficiente de permeabilidad a partir de los ensayos de permeabilidad Lugeon". VII Jornadas Españolas de Presas (Zaragoza). pp. 275-285.
- Foyo, A.; Tomillo, C., 1995, "Dam foundation on soluble rocks. Analysis of the permeability". Dam Engineering Vol. VI, Issue 2, pp. 81-102.
- Foyo Marcos, A., 1980, "Estudio de la fracturación hidráulica como consecuencia de los ensayos de permeabilidad en cimentaciones de presas españolas. Intento de definición de un Parámetro Geológico-Geotécnico a partir de las características de ensayo". Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Santander.
- Freeze, R. A.; Cherry J.A., 1979, "Groundwater". Editorial Prentice-Hall. ISBN: 0133653129.

Frenkel, H.; Gerstl, Z.; Alperovitch, N., 1989, "Exchange-induced dissolution of gypsum and the reclamation of sodic soils". *Journal of Soil Science* 40 (3), pp. 599-611.

Gabrovsek, F.; Romanov, D.; Dreybrodt, W., 2004, "Early karstification in a dual-fracture aquifer: the role of exchange flow between prominent fractures and a dense net of fissures". *Journal of Hydrology* 299, pp. 45-66.

Gárate Rojas, I., 1994, "Artes de la cal". Ministerio de Cultura, Dirección General de Bellas Artes y Archivos, Instituto de Conservación y restauración de bienes culturales. Editorial Munilla-Lería. ISBN: 978-84-89150-50-8.

García Yagüe, A., 1963, "Informe geológico sobre disposición del yeso en zona del collado de "Jardinico" en la margen izquierda del embalse del Cenajo (Albacete)". Informe del SGOP. 00663 (04/63).

García Yagüe, A., 1971, "Informe geológico sobre los trabajos realizados en el embalse de Alloz en el río Salado (Navarra)". Informe del SGOP. 01060.

García Yagüe, A., 1985, "Estudio Geológico del Embalse de Giribaile (Jaén)". Informe del SGOP. Estudio 03/85.

García Yagüe, A., 1988, "Embalse de Úbeda la Vieja (Jaén)". Informe del Servicio de Estudios Geológicos.

García Yagüe, A., 1988, "Incidencias en la Mina Ciega del Embalse de Caspe (Zaragoza)". Informe del SGOP. (10/88).

García Yagüe, A., 2003, "Temas de Geología Aplicada a las Obras Públicas". CICCIP. ISBN: 84-380-0255-2.

Ghobadi, M.H.; Khanlari, G.R.; Djalaly, H., 2005, "Seepage problems in the right abutment of the Shahid Abbaspour dam, southern Iran". *Engineering Geology* N° 82, pp. 119- 126.

Giuliani, F.L., 2004, "Erosión interna de presas y sus fundaciones". Organismo regulador de presas y embalses (Argentina). Tema 5: Seguridad de presas y embalses, pp. 1-9.

Glas, T.K.; Klute, A.; McWhorter, D.B., 1979, "Dissolution and transport of gypsum in soils: theory". *Soil Sci. Soc. Am. J. Vol. 43*, pp. 265-268.

Glas, T.K.; Klute, A.; McWhorter, D.B., 1979, "Dissolution and transport of gypsum in soils: Experimental". *Soil Sci. Soc. Am. J. Vol. 43*, pp. 268-273.

Gómez Laá, G.; Foyo Marcos, A.; Tomillo, M.C., 1982, "Verification and treatment of the permeability of foundations collected observations on a number of spanish dams". XIV Congreso del ICOLD (Río de Janeiro) Q.53 R.62, pp. 1001-1015.

Gómez López de Munain, R., 2008, "Geocondicionantes de presas y embalses". VIII Jornadas Españolas de Presas (Córdoba).

González de Vallejo, L.I.; Ferrer, M.; Ortuño, L.; Oteo, C., 2002, "Ingeniería Geológica". Editorial Prentice Hall. Madrid. ISBN: 84-205-3104-9.

Gorbunova, K.A., 1977, "Karst in gypsum of the USSR". Perm: Perm university. 83 p. (in Russian).

Gouze, P.; Coudrain Ribstein, A., 2000, "Modeling permeability changes caused by hydrothermal circulation". Natural Resources Research, Vol. 9, N° 2, pp. 157-166.

González del Tánago, M., 2010, "Hidrología de superficies y conservación de suelos". Programa de la asignatura. E.T.S. Ingenieros de Montes, UPM.

Gregory, K.J.; Walling, D.E., 1973, "Drainage Basin Form and process: a geomorphology approach". Editorial Edward Arnold London.

Guardia Cortina, A.; Sola Casado, P.R., 1994, "Recalce y levantamiento de un edificio de 8 plantas mediante la técnica de las inyecciones de compactación". Revista de Obras Públicas N° 142 (3339), pp. 49-59.

Guinea, A.; Playa, E.; Rivero, L.; Himi, M.; Bosch, R., 2010, "Geoelectrical Classification of Gypsum Rocks". Surv Geophys N° 31: pp. 557-580.

Gumusoglu, M.C.; Ulker, R., 1982, "The investigation of the effect of gypsum on foundation design". Bulletin of the International Association of Engineering Geology, N° 25, pp. 99-105.

Gutiérrez F.; Desir, G.; Gutiérrez M., 2003, "Causes of the catastrophic failure of an earth dam built on gypsiferous alluvium and dispersive clays (Altorricón, Huesca, NE Spain)". Environmental Geology 43, pp. 842-851.

Gutiérrez, F.; Ortí, F.; Gutiérrez, M.; Pérez-González, A.; Benito, G.; Gracia, J.; Durán, J.J., 2001, "The stratigraphical record and activity of evaporite dissolution subsidence in Spain". Carbonate and evaporites, Vol. 16, N° 1, pp. 46-70.

Gutiérrez, M., 2003, "Geomorfología climática". Editorial Omega. ISBN: 8428212090.

Guzina, B.J.; Saric, M.; Petrovic, N., 1991, "Seepage and dissolution at foundations of a dam during the first impounding of the reservoir". XVII Congreso del ICOLD (Viena) Q.66 R.78 pp. 1459-1475.

Guzina, B.J.; Nikolovski, T.J., 1982, "Surveillance of water seepage at King Talal Dam left bank (Jordan)". XIV Congreso del ICOLD (Río de Janeiro) Q.52 R.57. pp. 971-983.

Hansen, M., 2002, "Seepage evaluation of Quail Creek South Dam in southwest Utah". The evaporite karst and engineering and environmental problems in the United States. Denver Annual Meeting, Sesión N° 93. Geological Society of America.

Heitfeld, K.H.; Krapp, L., 1991, "Problems associated with sulphate karst - flood control reservoir Salzderhelden / Germany". XVII Congreso del ICOLD (Viena), Q.66 R.16, pp. 261-280.

Hernández López, F.; Martín Sanz, A., 1997, "Introducción a la Química de materiales". CICCIP. ISBN: 84-380-0129-7.

Hiller, T.; Kaufmann, G.; Romanov, D., 2010, "Karstification beneath dam sites: From conceptual models to realistic scenarios". Journal of Hydrology, Vol. 398, Issues 3-4, pp. 202-211.

Horta, J.C.; De, O.S., 1989, "Carbonate and gypsum soils properties and classification". Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, pp. 53-56.

Howerton, R.D.; Boyd, C.E., 1992, "Measurement of water circulation in ponds with gypsum blocks". Aquacultural Engineering 11, pp. 141-155.

- Hung, Y.C.; Snyder, M.D., 1976, "Gypsum layer in soil-structure systems". Proceedings of the International Symposium on Earthquake Structural Engineering, St Louis, MO, USA, pp. 215-232.
- Indelman, P.; Moltyaner, G.; Dagan, G., 1999, "Determining the hydraulic conductivity spatial structure at the Twin Lake Site by Grain-size Distribution". Groundwater Vol. 37, N° 2, pp. 223-227.
- Izhar-UI-Haq, 1991, "Foundation problems of Tarbela Dam Project". XVII Congreso del ICOLD (Viena) Q.66 R.72, pp. 1353-1369.
- James, A.N., 1982, "Engineering properties of evaporitic rock". Bulletin of the International Association of Engineering Geology, N° 25, pp. 125-126.
- James, A.N., 1992, "Soluble materials in civil engineering". Editorial Ellis Horwood. ISBN: 0138262640.
- James, A.N., 1977, "Calcium sulphate in the foundations of major embankment dams". Quart. Journal of Engineering Geology, Vol. 11, pp. 332-333. Summaries of papers read at the Engineering Regional Meeting-Cardiff.
- James, A.N.; Cooper, A.H.; Holliday, D.W., 1981, "Solution of the Gypsum Cliff (Permian, Middle Marl) by the River Ure at Ripon Parks, North Yorkshire". Proceedings of Yorkshire Geol. Soc., Vol. 43, part 4, N° 24, pp. 433-450.
- James, A.N.; Edworthy, K.J., 1985, "The effects of water interactions on engineering structures". Hydrological Sciences Journal Vol. 30, Issue 3, pp. 395-406.
- James, A.N.; Kirkpatrick, I.M., 1980, "Design of foundations of dams containing soluble rocks and soils". Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, v. 13; issue. 3; pp. 189-198.
- James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1978, "Gypsum and anhydrite in foundations of hydraulic structures". Géotechnique 28, N° 3, pp. 249-272.
- James, A.N.; Lupton, A.R.R., 1985, "Further studies of the dissolution of soluble rocks". Géotechnique 35, N° 2, pp. 205-210.
- Jassim, S.Z.; Jibril, A.S.; Numan, N.M.S., 1995, "Gypsum karstification in the Middle Miocene Fatha Formation, Mosul area, northern Iraq". Geomorphology 18, pp. 137-149.
- Jeschke, A.A.; Vosbeck, K.; Dreybrodt, W., 2001, "Surface controlled dissolution rates in aqueous solutions exhibit nonlinear dissolution kinetics". Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 65, N° 1, pp. 27-34.
- Jiménez Salas, J.A.; et al., 1980, "Geotecnia y Cimientos III". Editorial Rueda. ISBN: 84-7207-017-4.
- Jiménez Salas, J.A.; Justo Alpañes, J.L., 1971, "Geotecnia y Cimientos I". Editorial Rueda. ISBN: 84-7207-008-5.
- Jiménez Salas, J.A.; Justo Alpañes, J.L.; Serrano González, A., 1976, "Geotecnia y Cimientos II". Editorial Rueda. ISBN: 84-7207-021-2.
- Johnson, K. S., 2001, "Gypsum karst leads to abandonment of a proposed damsite in Oklahoma". Resumen de Jornadas de Geological Society of America.
- Johnson, K. S., 2008, "Gypsum-karst problems in constructing dams in the USA". Environ. Geol. N° 53: pp. 945-950.

Jové C.F.; Oelkers E.H.; Schott J., 1999, "Experimental quantification of permeability change of the Fontainebleau sandstone during mineral dissolution". Mineral/water interactions close to equilibrium-Workshop of the Forchungszenrum Karlsruhe held at Speyer. pp. 73-76.

Kaufmann, G., 2003, "A model comparison of karst aquifer evolution for different matrix-flow formulation". Journal of Hydrology Vol. 283, Issue 1-4, pp. 281-289.

Kayabahi, K.; Beyaz, T.; Kolay, E., 2006, "The effect of the ph of the testing liquid on the slake durability of gypsum". Bull. Eng. Geol. Env. 65, pp. 65-71.

Keisling, T.C.; Rao, P.S.C.; Jessup, R.E., 1978, "Pertinent criteria for describing the dissolution of gypsum beds in flowing water". Soil Science Society of America Journal, Vol. 42, pp. 234-236.

Kemper, W.D.; Olsen, J.; Demooy, C.J., 1975, "Dissolution rate of gypsum in flowing water". Soil Science Society of America Proceedings 39, pp. 458-464.

Keren, R.; O'Connor, G.A., 1982, "Gypsum dissolution and sodic soil reclamation as affected by water flow velocity". Soil Sci. Soc. Am. J. Vol. 46, pp. 726-732.

Kieslinger, A., 1962, "Galerías de agua en terrenos yesíferos". I Coloquio Internacional sobre las Obras Públicas en los terrenos yesíferos, pp. 57-66.

Klimchouk, A., 1996, "Speleogenesis in gypsum". International Journal of Speleology, Vol. 25 (3-4), pp. 61-82.

Klimchouk, A.; Andrejchuk, V., 1996, "Environmental problems in gypsum karst terrains". International Journal of Speleology, Vol. 25 (3-4), pp. 145-156.

Kohlrausch, F.W., 1894, "Zeitschrift für physikalische Chemie". Z. Phys. Chem. 14, 317.

Kozary, M.T.; Dunlap, J.C.; Humphrey, W.E., 1968, "Incidence of saline deposits in geologic time". Geological Society of America, Special Paper 88, pp. 43-57.

Kozeny, J., 1927, "Ueber kapillare Leitung des Wassers im Boden". Sitzungsber Akad. Wiss., Wien, 136(2a), 271-306.

Kushlin, V.V.; Shestopal, A.O.; Sinyauskaya, A.A., 1990, "Investigation of the seepage in the foundation of the Kama Hydroelectric Station on a Three-dimensional model". Hydrotechnical Construction, Vol. 24, N° 7, pp. 518-524.

Lafuente Dios, R. J.; Gómez López de Munain, R.; Alonso Franco, M.; Martínez Parrondo, J.M., 2002, "La pantalla de impermeabilización de la presa de la Loteta (Zaragoza)". VII Jornadas Españolas de Presas (Zaragoza). pp. 313-323.

Lafuente Dios, R. J.; Gómez López de Munain, R.; Gesti Canuto, J.A.; Martínez Parrondo, J.M., 2002, "Reconocimiento geológico-geotécnico de la cimentación de la presa de la Loteta". VII Jornadas Españolas de Presas (Zaragoza). pp. 347-357.

Lafuente Dios, R. J.; Gómez López de Munain, R.; Soriano Peña, A.; Sánchez Caro, F.J.; Martínez Parrondo, J.M., 2002, "La presa de la Loteta (Gallur, Zaragoza)". VII Jornadas Españolas de Presas (Zaragoza). pp. 287-294.

Lebedev, A.L., 1997, "Gypsum dissolution and leaching processes: the influence on permeability and porosity of fractured-porous rock massif". Engineering geology and the Environment. Proceedings symposium Athens, Vol. 1, pp. 823-827. Editorial Balkema. ISBN: 90 5410 877 0.

Lebedev, A.L.; Lekhov, A.V., 1989, "Dissolution kinetics of natural-gypsum in water at 5-25°C". Translated for Geokhimiya, N° 6, pp. 865-874.

Lebedev, A.L.; Lekhov, A.V., 1999, "Interaction between gypsum-containing fractured rocks and groundwater". Water Resources, Vol. 26, N° 3, pp. 277-285.

Liedl, R.; Sauter, M.; Hückinghaus, D.; Clemens, T.; Teutsch, G., 2003, "Simulation of the development of karst aquifers using a coupled continuum pipe flow model". Water Resources Research V 39 N° 3, 1057, pp. 6.1-6.11.

Liu, S.; Nancollas, G.H., 1970, "The kinetics of dissolution of calcium sulfate dihydrate". J. Inorg. Nucl. Chem. Vol. 23, pp. 2311-2316.

Llamas, M.R., 1962, "Estudio geológico-técnico de los terrenos yesíferos de la cuenca del Ebro y de los problemas que plantean en los canales". Tesis Doctoral. Geología Aplicada de la Universidad de Madrid. Boletín del Servicio Geológico de Obras Públicas, N° 12.

Llamas, M.R., 1965, "Los terrenos yesíferos como elemento de fundación de presas (I parte)". Boletín del Servicio Geológico de Obras Públicas, N° 21, pp. 27-55.

López Marinas, J.M., 2000, "Geología Aplicada a la Ingeniería Civil". Editorial Dossat 2000. ISBN: 84-95312-96-4.

Macau, F.; Riba, O., 1962, "Situación, características y extensión de los terrenos yesíferos en España". I Coloquio Internacional sobre las Obras Públicas en terrenos yesíferos, Vol. V, C. 0-1, pp. 157-184.

Magnico, P., 2000, "Impact of dynamic processes on the coupling between fluid transport and precipitate deposition". Chemical Engineering Science Vol. 55, Issue 19, pp. 4323-4338.

Maksimovich, G.A., 1964, "Principles of karstology". Vol. 1. Perm: Permskoe knizhnoe izdatelstvo. 444 pp. (in Russian).

Maksimovich, N. G.; Sergeev, V. I., 1983, "Effect of chemical injection stabilization of gypsum stability in the foundation of hydraulic structures". Hydrotechnical Construction (English translation of Gidrotekhnicheskoe Stroitel'Stvo), Vol. 17, N° 7, pp. 380-384.

Marsal, R.; Resendiz, D., 1976, "Presas de tierra y enrocamiento". Editorial Limusa.

McKay, L.D., 2002, "Principles of hydrogeology". Course notes. Geology 485 / Civil Engineering 485. University of Tennessee. Fall.

McNeal, B.L.; Coleman, N.T., 1966, "Effect of solution composition on soil Hydraulic conductivity". Soil Science Society of America Proceedings 30, pp. 308-312.

McNeal, B.L.; Norvell, W.A.; Coleman, N.T., 1966, "Effect of solution composition on the swelling of extracted soil clays". Soil Science Society of America Proceedings 30, pp. 313-317.

Meinzer, O. E., 1923, "Occurrence of ground water in the United States, with a discussion of principles". U.S. Geol. Survey Water-Supply Paper 489, p. 1-321, fig. 1-110, pl. 1-31.

Menéndez Cornejo, A.; López Palancar, J.J., 1992, "Filtraciones y piezometrías en la margen izquierda de la presa de Caspe (Zaragoza)". Informe del SGOP. 02705 (02/92).

Merritt, A.H., 1996, "Geotechnical aspects of the design and construction of dams and pressure tunnels in soluble rocks". Karst GeoHazards, pp. 3-7. Editorial Balkema. ISBN: 9054105356.

Mezquita, B.; Escuer, J., 2010, "Obtención de parámetros para el aprovechamiento geotérmicos a partir de datos hidrogeológicos". Comunicación del II Congreso de Energía Geotérmica en la edificación y la industria (GeoEner).

Milanovic, P.T., 2004, "Water resources engineering in karst". Editorial CRC. ISBN: 1-56670-671-8.

Milanovic, P.T., 2000, "Geological Engineering in karst". Editorial Zebra. ISBN: 86-7489-125-X.

Miodrag, P.; Srdic, R.; Bubalo, K., 1970, "Determination of natural possibilities and providing of impermeability of the Rama Storage, constructed in karst region". X Congreso del ICOLD (Montreal) Q.37 R.47, pp. 899-915.

Mohammadi, Z.; Raeisi, E.; Bakalowicz, M., 2007, "Method of leakage study at the karst dam site. A case study: Khersan 3 Dam, Iran". Environ. Geol. N° 52: pp.1053-1065.

Morlans Martín, H.J.; Cid Rodríguez-Zúñiga, V., 1993, "Impermeabilización de la cimentación mediante pantalla plástica ejecutada con hidrofresa". Simposio sobre Geotecnia de Presas de Materiales Suelos (Zaragoza). 3.06, pp. 355-362.

Nativ, R.; Adar, E.; Assaf, L.; Nygaard, E., 2003, "Characterization of the hydraulic properties of fractures in chalk". Groundwater Vol. 41, N° 4, pp. 532-543.

Navas, A., 1990, "Effect of hydrochemical factors on the dissolution rate of gypsiferous rocks in flowing water". Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 15, pp. 709-715.

Nedriga, V.P.; Dem'yanova, É.A., 1986, "Construction of dams on soils containing soluble salts".

Nelson, R.A.; Handin, J., 1977, "Experimental study of fracture permeability in porous rock". The American Association of petroleum Geologist Bulletin, Vol. 61, N° 2, pp. 227-236.

Nernst, W.Z., 1904, "Theorie der Reaktionsgeschwindigkeit in heterogenen Systemen". Phys. Chem., 47, 52-55.

Oteo, C., 1996, "La patología de las presas de tierra y la auscultación para su detección". V Jornadas Españolas de Presas (Valencia). pp. 590-604.

Oteo, C.; Santos Moreno, A., 1993, "Problemas de cimentación de presas en áreas tectonizadas, carstificadas y deformables". Simposio sobre Geotecnia de Presas de Materiales Suelos (Zaragoza). Comunicación 3.02., pp. 315-333.

Paine, M.; Escobar, E.; Hallows, G.R.; Sodha, V.G.; Anagnosti, P., 1982, "Surveillance and re-evaluation of Poechos dam, right wing embankment, Perú". XIV Congreso del ICOLD (Río de Janeiro) Q.52 R.19. pp. 333-343.

- Pape, H.; Clauser, C.; Iffland, J., 1999, "Permeability prediction based on fractal pore-space geometry". *Geophysics*, Vol. 64, N° 5, pp. 1447-1460.
- Pecherkin, I.A.; Pecherkin, A.I., 1979, "Theoretical aspects and engineering-geological forecast on the shores of karst reservoirs". *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.*, N° 20, pp. 187-189.
- Petrukhin, V. P.; Al'perovich, S. V., 1982, "Deformability of bases under gypsum lixiviation". *Soil Mechanics and Foundation Engineering (English translation of Osnovaniya, Fundamenty i Mekhanika Gruntov)*, Vol. 19, N° 4, pp. 155-158.
- Plata Bedmar, A., 1999, "Manual de fugas en embalses". Monografía CEDEX, Serie Manuales y Recomendaciones, R-12. Madrid.
- Ponsjak, E., 1938, "The system $\text{CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$ ". *Am. J. Sci. Ser 5*, 35A. pp. 247-272.
- Prasad, M., 2003, "Velocity-permeability relations within hydraulic units". *Geophysics*, Vol. 68, N° 1, pp. 108-117.
- Raines, A.M.; Dewers, T.A., 1999, "Mixed transport/reaction control of gypsum dissolution kinetics in aqueous solutions and initiation of gypsum karst". *Chemical Geology* 140, pp. 29-48.
- Romanov, D.; Gabrovsek, F.; Dreybrodt, W., 2003, "The impact of hydrochemical boundary conditions on the evolution of limestone karst aquifers". *Journal of Hydrology* 276, Issues 1-4, pp. 240-253.
- Romanov, D.; Kaufmann, G.; Hiller, T., 2010, "Karstification of aquifers interspersed with non-soluble rocks: From basic principles towards case studies". *Engineering Geology* N° 116, pp. 261-273.
- Sadrekarami, J.; Kiyani, M.; Fakhri, B.; Vahdatirad, M.J.; Barari, A., 2010, "Seepage analysis of Upper Gotvand Dam concerning gypsum karstification (2D and 3D approaches)". *Front. Archit. Civ. Eng. China*.
- Saénz Ridruejo, C., 1969, "Circulaciones subterráneas en relación a la geología con aplicación a España y sus obras ingenieriles". *Col. Soc. Esp. Mecán. Rocas*, pp. 13-40.
- Sáenz, C.; Valdés, J.M., 1952, "Informe acerca de las filtraciones que se acusan en la ladera derecha del Pantano de Alloz (Navarra)". *Informe de la Asesoría Geológica de Obras Públicas* N° 2A.
- Samarasinghe, A.M.; Huang, Y.H.; Drnevich, V.P., 1982, "Permeability and consolidation of normally consolidated soils". *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 108(GT6), pp. 835-850.
- Samman Pepprah, E., 2004, "Void evolution in soluble rocks beneath dams under limited flow condition". Tesis Doctoral. Universidad Tübingen.
- Sánchez Caro, F.J., 2005, "Aproximación histórica y estadística a los incidentes en presas". Trabajo tutelado. UPM.
- Sharaf, M.A.M., 2001, "Review of the hydrogeological and hydrochemical aspects of groundwater in the Umm-Er-Radhuma aquifer system, Arabian Peninsula". *Journal of African Earth Sciences* Vol. 33, N° 2, pp. 349-362.
- Shearman, D.J., 1979, "A field test for identification of gypsum in soils and sediments". *Quarterly Journal of Engineering Geology*, Vol. 12, p. 51.

- Sherard, J.L.; Woodward; Gizienski; Clevenger, 1963, "Earth And Earth-Rock Dam". Editorial Wiley.
- Shihab, R.M.; Al-Ani, A.N.; Fahad, A.A., 2002, "Dissolution and transport of gypsum in gypsiferous soil treated with fuel oil and bentonite". Emir. J. Agric. Sci. 14, pp. 1-7.
- Singurindy, O.; Berkowitz, B., 2003, "Evolution of hydraulic conductivity by precipitation and dissolution in carbonate rock". Water Resources research, Vol. 39, N° 1, 1016, pp. 8.1-8.14.
- Soriano Peña, A., 1993, "El comportamiento de las presas de materiales sueltos y su auscultación". Simposio sobre Geotecnia de Presas de Materiales Suelos (Zaragoza). 4.2, pp. 389-409.
- Soriano, A.; Sánchez Caro, F.J., 1997, "Sobre la evaluación de la seguridad de las presas de materiales sueltos". Revista de Obras Públicas N° 144 (3371), pp. 97-133.
- Soriano, M.A.; Simón, J.L.; Salvador, T., 1992, "Estructura interna y mecanismos de colapsos en yeso. Ejemplos del área de Calatayud (Zaragoza)". Estudios de Geomorfología de España, pp. 619-629 (II Reunión Nacional de Geomorfología).
- Steeffel, C.I.; Lasaga, A.C., 1990, "Evolution of dissolution patterns. Permeability change due to coupled flow and reaction". Cap. 16 de Chemical Modeling of aqueous systems II, p. 212-223. American Chemical Society.
- Tarafdar, S.; Roy, S., 1998, "A growth model for porous sedimentary rocks". Physica B 254, pp. 28-36.
- Tariq, S.M., 2003, "Control of seepages through deep alluvium foundation of Tarbela Dam Project - Pakistan". Dam maintenance and rehabilitation, pp. 899-904. Editado por Llanos et al. ISBN: 90 5809 534 7.
- Taylor, D.W., 1948, "Fundamentals of soil mechanics". Editorial J. Wiley and Sons, Inc., New York.
- Torán, A., 1970, "Razzaza saga". X Congreso del ICOLD (Montreal) Q.37 R.53, pp. 999-1021.
- Torcal, R., 2003, "Geología y sondeos para la presa el embalse de Pareja (Guadalajara)". Estudio de la Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas.
- US Army Corps of Engineers, 1986, "Seepage analysis and control for dams". Department of the Army Corps of Engineers. On the web at: <http://140.194.76.129/publications/eng-manuals/em1110-2-1901/entire.pdf>.
- Valdés y Díaz-Caneja, J.M., 1958, "Los yesos en el terreno y su relación con las obras públicas". Boletín de la Jefatura de Sondeos, Cimentaciones e Informes Geológicos, N° 4, pp. 9-31.
- Vallarino, E., 1970, "Ponencia del tema "Permeabilidad". II Coloquio Nacional de Mecánica de Rocas "Tratamiento de los macizos rocosos"". Boletín SGOP N° 31.
- Verhoef, P.N.W., 2009, "Dam and canal design on soluble rock (West Gode Irrigation Project, Ethiopia)". Geointernational.
- Vidal Pardal, M., 1962, "Estudio acerca de la permeabilidad del terreno". Boletín N° 15 del Servicio Geológico de Obras Públicas, pp. 1-66.
- Vidal, M., 1958, "Algunas consideraciones de los yesos en el terreno y su relación con las obras públicas". Boletín de la Jefatura de Sondeos, Cimentaciones e Informes Geológicos, N° 4, pp. 35-47.
- Vural Selcen, C.E., 1970, "Karstic studies for Oymapinar Dam". X Congreso del ICOLD (Montreal) Q.37 R.42, pp. 793-809.

Walsh, J.B., 1981, "Effect of pore pressure and confining pressure on fracture permeability". International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, Volume 18, pp. 429-435.

Willmann, M., 2001, "A modeling study on void evolution beneath a dam in a gypsum environment with the example of Horsetooth dam, Colorado". Tesis de máster. Universidad Tübingen.

Wittke, W.; Hermening, H., 1997, "Grouting of cavernous gypsum rock underneath the foundation of the weir, locks and powerhouse at Helligheim on the river Neckar". XIX Congreso del ICOLD (Florence). Q.75 R.44 pp. 613-626.

Worthington, S.R.H.; Ford, D.C.; Beddows, P.A., 2000, "Porosity and permeability enhancement in unconfined carbonate aquifers as a result of solution". Apartado 8.1. de Speleogenesis: evolution of karst aquifers, pp. 463-742.

Wuzhou, H., 1988, "A study on the formation of Triassic "gypsum-dissolved-strata" in Ghizhou province and the seepage prevention for reservoirs". International Association of Hydrogeologists. 21st Congress. IAHS-AISH-publication, (part.2), pp. 1117-1126.

Yagüe Córdova, J., 1992, "Presas en cimentaciones difíciles". Revista de Obras Públicas N° 139 (3309), pp. 134-151.

Yagüe Córdova, J.; Alonso Franco, M., 1999, "Control de filtraciones en cimientos erosionables de presas de materiales sueltos". VI Jornadas Españolas de Presas (Málaga). N° 53, pp. 75-83.

Yilmaz, I., 2001, "Gypsum/anhydrite: Some engineering problems". Bulletin of Engineering Geology and the Environment, N° 59, pp. 227-230.

Yuzer, E., 1981, "Engineering properties of evaporites and evaporitic formations of Turkey". Bulletin of the International Association of Engineering Geology, N° 25, pp. 107-110.

APÉNDICE N° 1

EJEMPLO DE UN CÁLCULO CONCRETO

Para calcular un **caso concreto**, que no cumpla con las características de las secciones tipo, espesores de capa yesífera, porcentajes de yeso o permeabilidades de partida establecidos en los casos calculados, se procederá del siguiente modo:

- Se modelizará la presa mediante el código de elementos finitos FastSEEP, con las características geométricas de presa y cimiento, la carga de agua en el embalse y las permeabilidades de los materiales correspondientes al caso planteado. Supongamos como ejemplo la misma presa que H1H, pero con K_0 de la capa yesífera 10 veces mayor que el caso de partida y un 20% de yeso.
- Del cálculo mediante FastSEEP se obtendrá la red de filtración (FIGURA N° 1), el campo de velocidades (FIGURA N° 2), y el caudal filtrado inicial. Dado que K_0 es mayor, el caudal inicial ha pasado de $2.234^{\circ}\text{m}^3/\text{año}$ a $22.230 \text{ m}^3/\text{año}$.

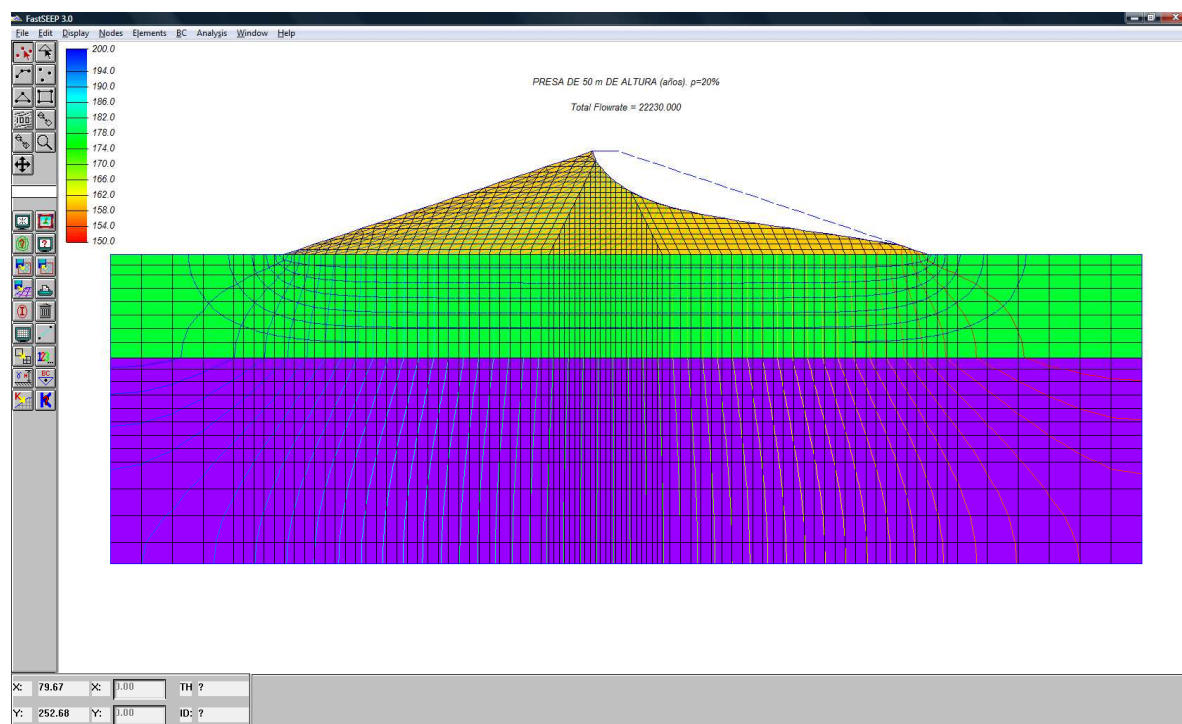


FIGURA N° 1: Red de filtración al inicio (Cálculo mediante FastSEEP).

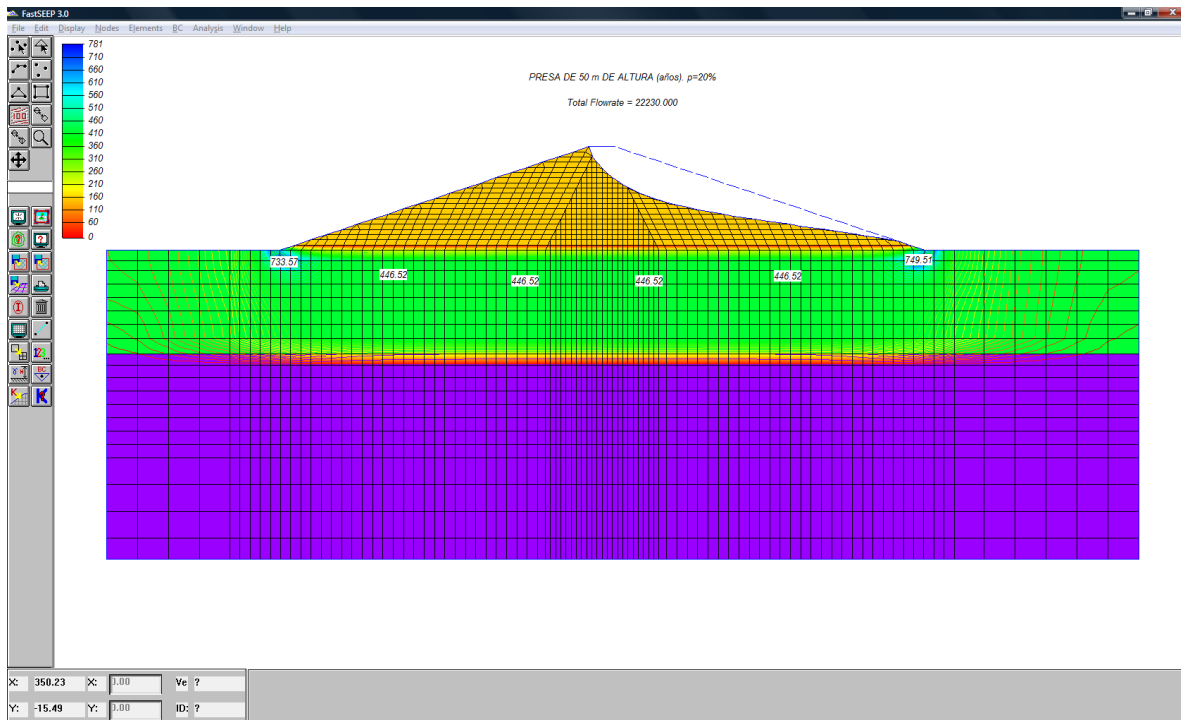


FIGURA N° 2: Campo de velocidades al inicio (Cálculo mediante FastSEEP).

A partir del caudal filtrado inicial, y de la longitud media de recorrido de la filtración (longitud del cimiento de la presa más el espesor de la capa yesífera, 362,5 m) se podrá obtener un gradiente hidráulico inicial aproximado ($i_0 = H/L = 50/362,5 = 0,14$) y una velocidad media inicial aproximada ($v_0 = K_0 i_0 = 3.150 \times 0,14 = 441$ m/año) de la filtración.

Efectivamente, la velocidad media de la filtración en la capa yesífera que se obtiene del cálculo mediante FastSEEP es del orden de 450 m/año.

También se puede calcular el factor de forma (FF) de este modelo:

$$FF = \frac{L_t / E}{L_{med} / E_{med}} = \frac{L_t / E}{K_0 \cdot H / Q_0} = \frac{362,5 / 50}{3.150 \cdot 50 / 22.230} \approx 1$$

- A partir del porcentaje de yeso en la capa yesífera, de la porosidad inicial y de la permeabilidad inicial de la capa yesífera se calcula la permeabilidad tras la disolución:

$$K_{td} = K_0 \times \frac{(1-n_0)^2}{n_0^3} \times \frac{(n_0+\phi)^3}{(1-n_0-\phi)^2} = 3.150 \times \frac{(0,8)^2}{0,2^3} \times \frac{(0,2+0,2)^3}{(1-0,2-0,2)^2} = 44.850 \text{ m/año}$$

- A partir del porcentaje de yeso y de la concentración de saturación se obtiene la relación u/v.

$$\frac{u}{v} = \frac{C_s}{C_s + \sigma_0} = \frac{2,4}{2,4 + 0,2 \times 2.300} = 0,00519$$

- Se calcula, en un primer tanteo, el tiempo que tardaría en llegar el frente de disolución aguas abajo del elemento impermeable de la presa, considerando que la velocidad de avance del frente es constante.

$$t_{ucte} = \frac{L_{teórica}}{u_{media}} = \frac{L_{teórica}}{\frac{u}{v} v_0} = \frac{362,5}{0,00519 \times 441} = 158,4 \text{ años}$$

- Se procede al cálculo con DISOLUCIÓN2D, con 100 iteraciones y considerando como límite superior el tiempo calculado en el epígrafe anterior. Tras este primer cálculo, se ajusta el tiempo de cálculo a 80 años. En la FIGURA N° 3 y en la FIGURA N° 4, se adjuntan los gráficos que relacionan t-Q y t-Q/Q₀ obtenidos tras el cálculo, respectivamente.

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

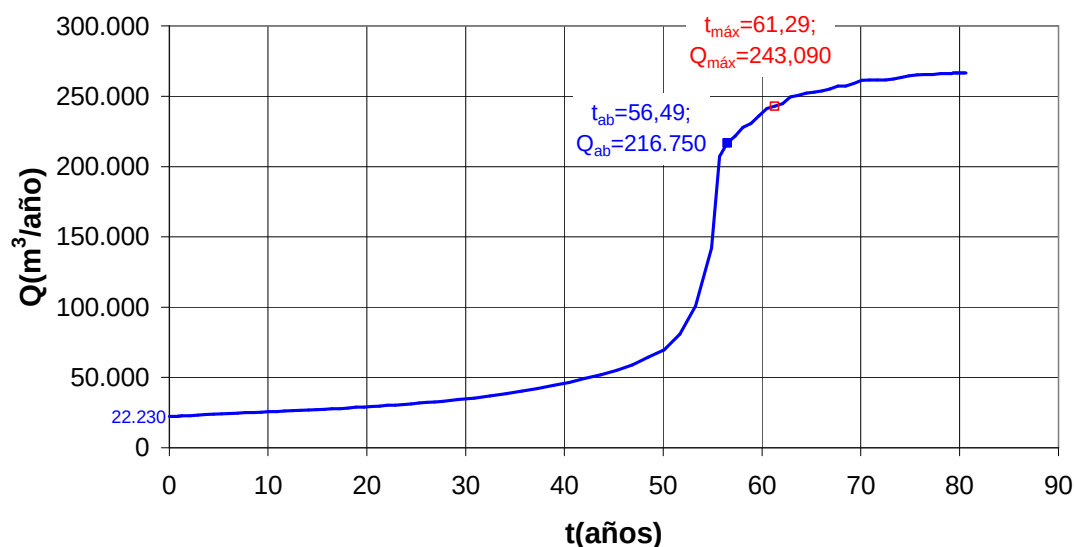


FIGURA N° 3: Gráfico t-Q tras el cálculo del caso de ejemplo mediante DISOLUCIÓN2D.

El caudal de llegada aguas abajo es de 216.750, correspondiente a 56,5 años y el de recinto completo es 243.090, correspondiente a 61,3 años.

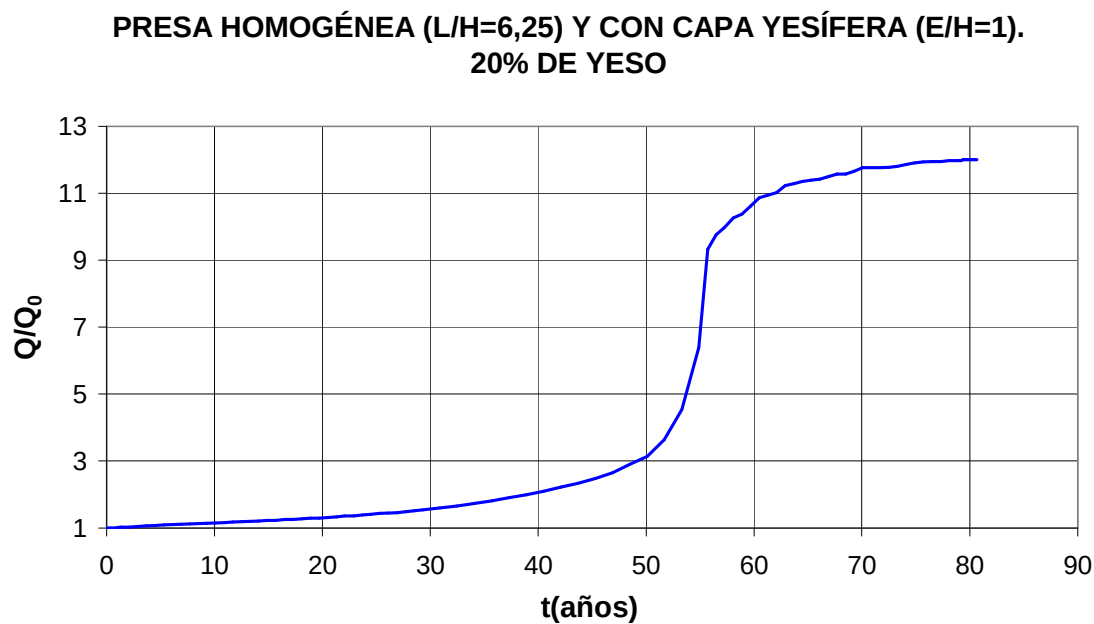


FIGURA N° 4: Gráfico t-Q/Q₀ tras el cálculo del caso de ejemplo mediante DISOLUCIÓN2D.

- Entrando en la gráfica de la FIGURA N° 4 con la vida útil fijada para la presa, se puede obtener el caudal filtrado en ese momento y decidir si es aceptable para la presa en cuestión. Si fuera inaceptable, se debería recalcular una sección tipo más segura y en el caso de que quedara muy del lado de la seguridad, probar con una sección tipo con menos elementos de reducción del gradiente hidráulico inicial, por ejemplo, en el caso de existir pantalla, eliminando la pantalla.

Por ejemplo, si consideramos que en 50 años no se admite que, por disolución, se multiplique por dos el caudal inicialmente filtrado, claramente, este diseño no lo cumple, porque en unos 35 años se duplica el caudal. El siguiente paso sería ajustar el modelo, por ejemplo, proyectando una pantalla total y recalcular, para comprobar si con el mismo criterio se considera aceptable la nueva sección tipo.

- Para calcular el Factor de Aceleración se realizaría otro cálculo mediante DISOLUCIÓN2D con una permeabilidad tras la disolución igual a la inicial. Se obtendría el tiempo que tarda en llegar el frente aguas abajo del elemento impermeable (t_{ucte}), en este caso sin aumento del caudal filtrado, y a partir de t_{ab} , tendríamos el FA. En la FIGURA N° 5 se adjuntan los resultados, para comparar ambos cálculos.

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

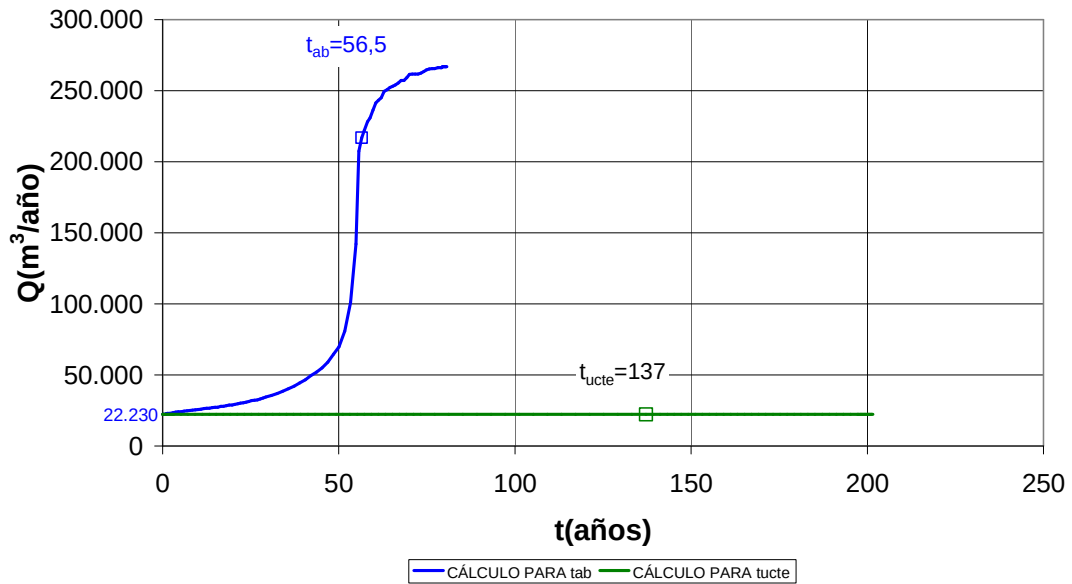


FIGURA N° 5: Gráfico t-Q para los 2 cálculos necesarios para obtener FA para el caso de ejemplo.

$$\text{Resultando que } FA = \frac{t_{ucte}}{t_{ab}} = \frac{137}{56,5} = 2,42$$

Si comparamos este valor con el correspondiente del modelo de referencia H1H, 2,35, se observa que difieren mínimamente. En otros modelos puede diferir más, debido a que el FA es un valor que depende de todo el proceso de disolución y de filtración, y por lo tanto, de todos los parámetros que influyen en el proceso: espesor de capa yesífera, sección tipo, pero también de la relación de permeabilidades entre las capas del cemento y de la forma que ha adoptado el frente de disolución.

Posteriormente, se puede obtener la longitud media y el gradiente hidráulico inicial medio:

$$L_{media} = \sqrt{t_{ucte} \frac{u}{v} KH} = \sqrt{137 \cdot 0,00519 \cdot 3.150 \cdot 50} = 334,65$$

$$i_0 = \frac{H}{L_{media}} = \frac{50}{334,65} = 0,149$$

Si comparamos este valor con los correspondientes del modelo de referencia H1H, resultan muy similares, dado que la relación de permeabilidades entre los materiales está dentro del rango considerado.

- Finalmente, hay que comprobar que en todo el proceso el régimen ha sido laminar y que la longitud del frente de disolución es pequeña comparada con el tamaño de los elementos finitos de la modelización, como se detalla en el apartado 5.1.2.3. A partir del campo de velocidades tras la disolución del cemento (FIGURA N° 6), se obtiene que $v_{\text{máx}} = 10.320 \text{ m/año}$. Este valor es pequeño comparado con los valores límite de velocidad en régimen laminar obtenidos en la TABLA N° 3.

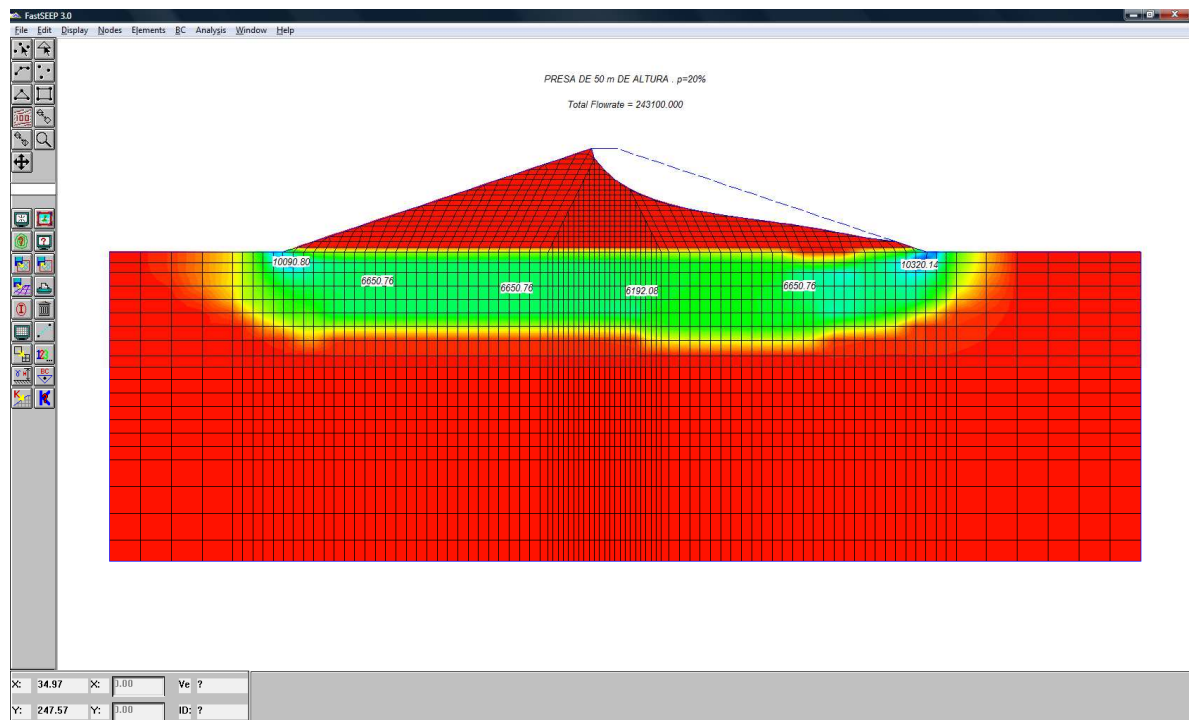
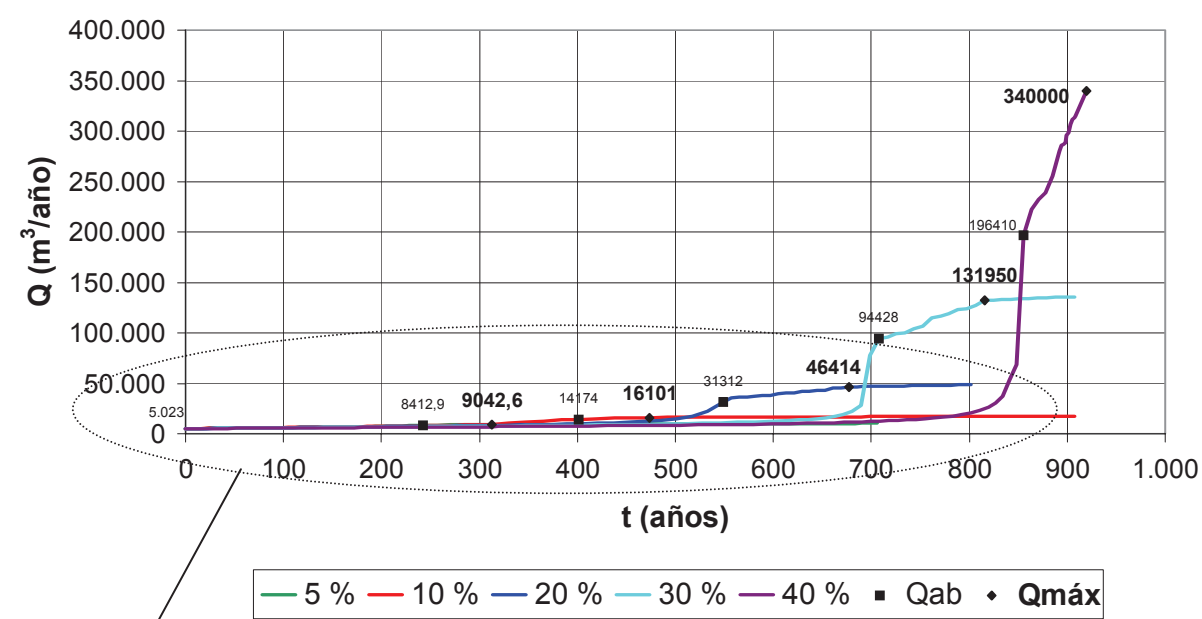


FIGURA N° 6: Campo de velocidades tras la disolución (Cálculo mediante DISOLUCIÓN2D).

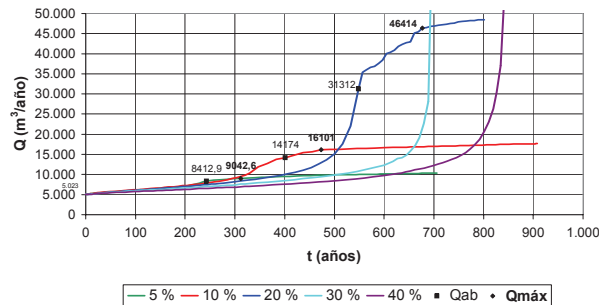
APÉNDICE N° 2

GRÁFICOS DEL ANÁLISIS DE PARÁMETROS PARA LOS 28 MODELOS GEOMÉTRICOS DE PRESA Y CIMENTACIÓN.

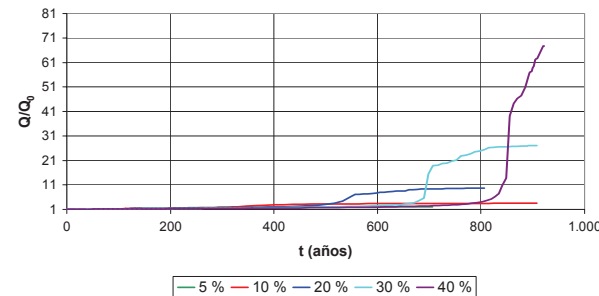
PRESA HOMOGÉNEA SIN PANTALLA (L/H=6,25) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)



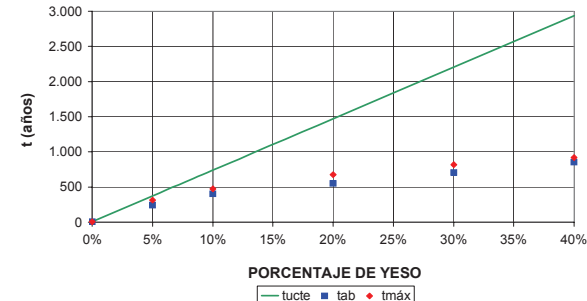
PRESA HOMOGÉNEA SIN PANTALLA (L/H=6,25) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)



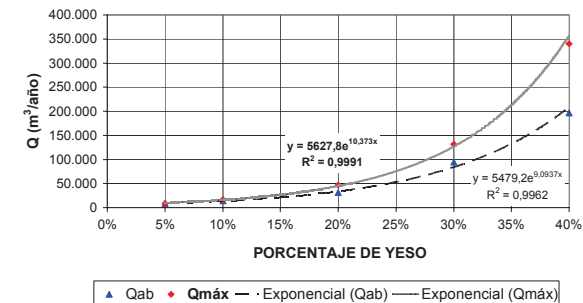
PRESA HOMOGÉNEA SIN PANTALLA (L/H=6,25) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)



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



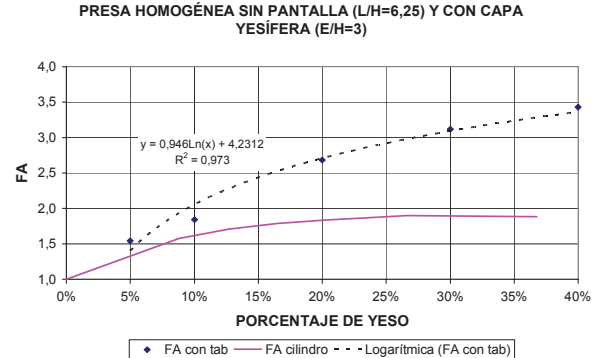
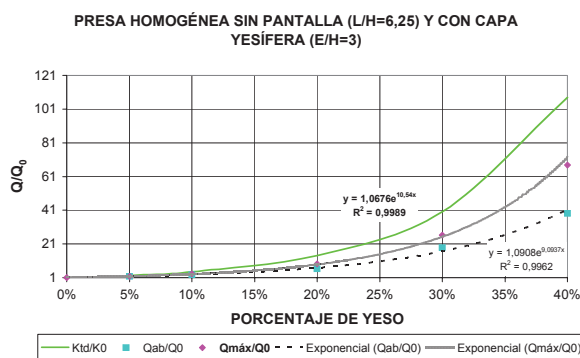
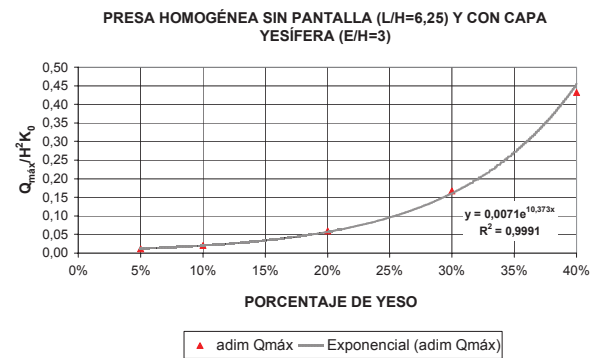
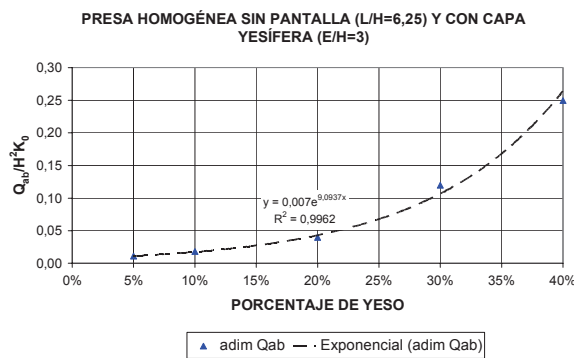
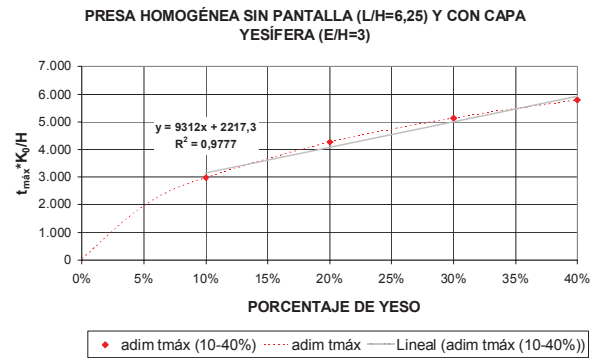
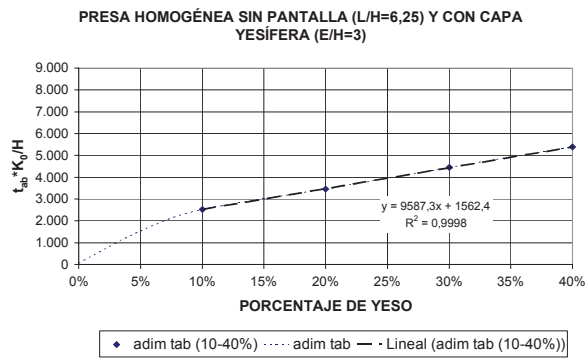
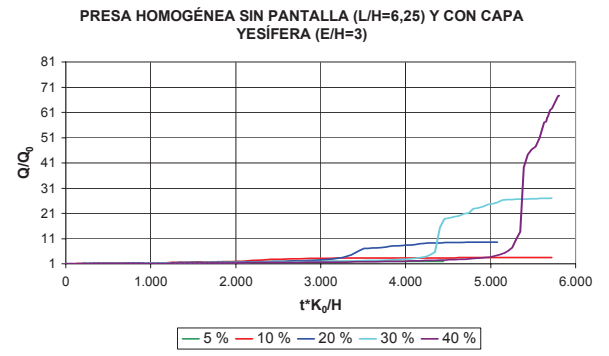
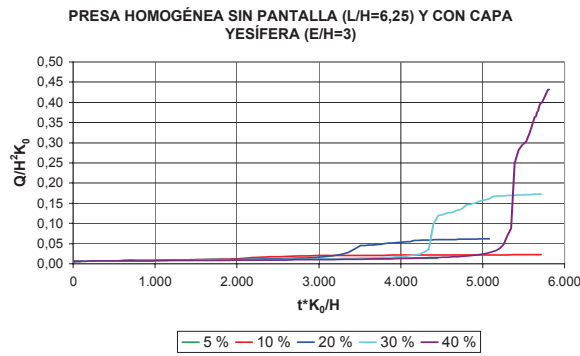
PRESA HOMOGÉNEA SIN PANTALLA (L/H=6,25) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)



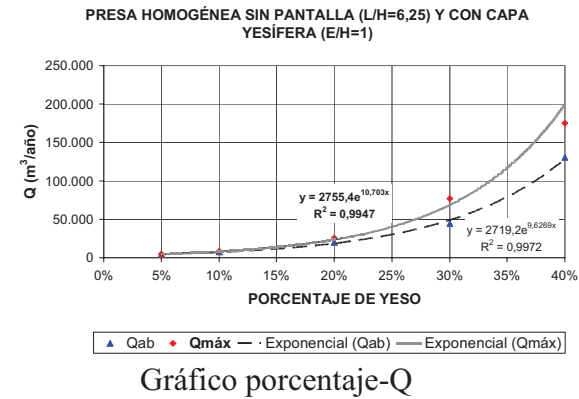
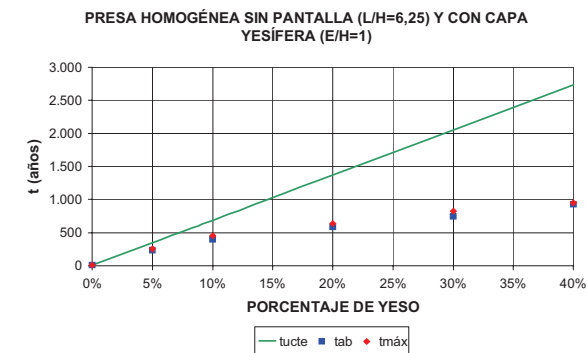
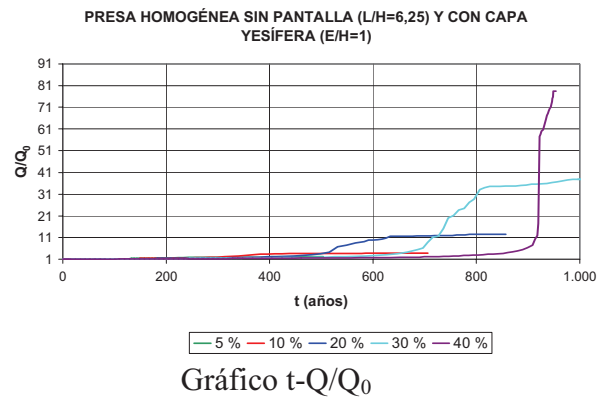
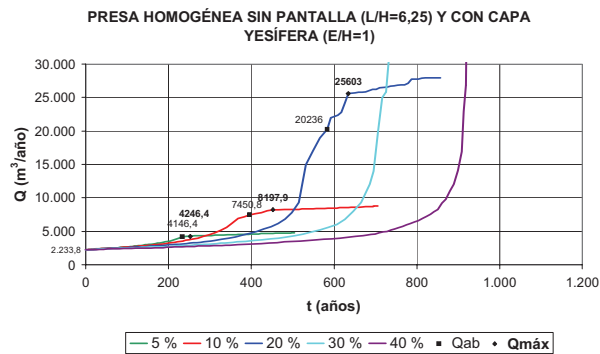
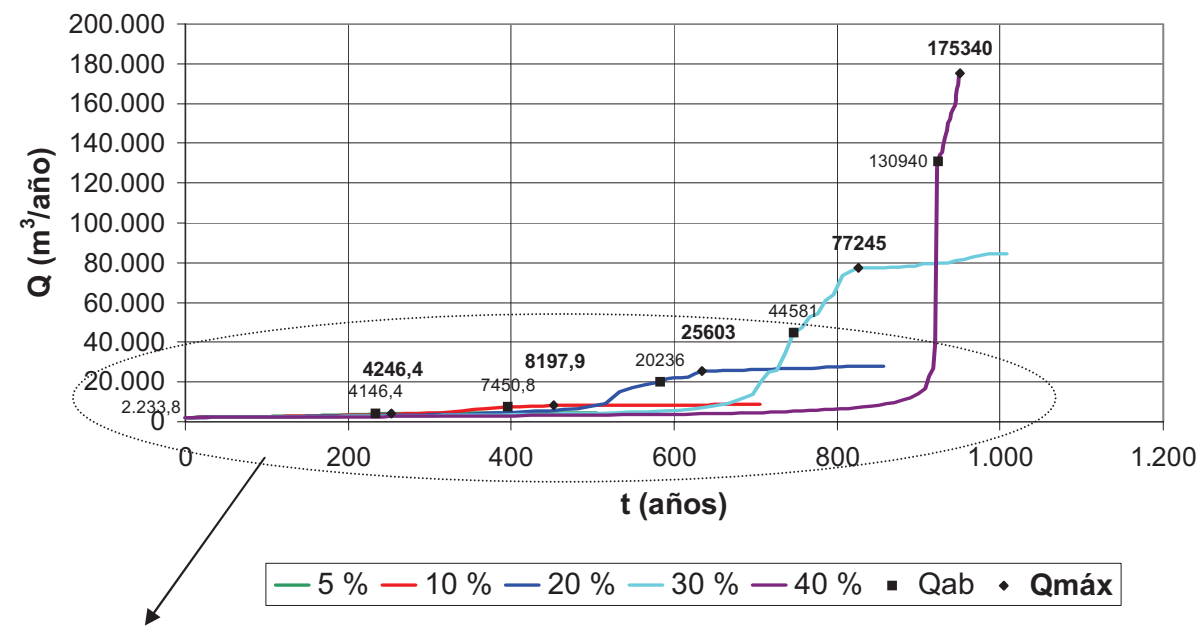
H=50 m
K₀=315 m/año
K materiales fijadas

GRÁFICOS H3H

GRÁFICOS ADIMENSIONALES



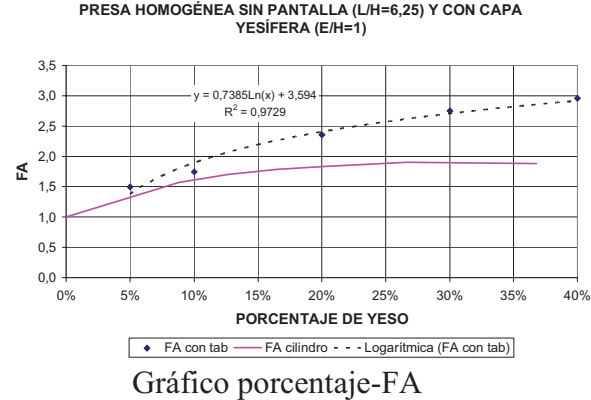
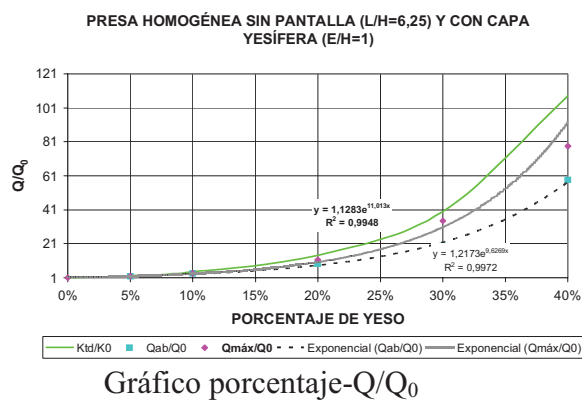
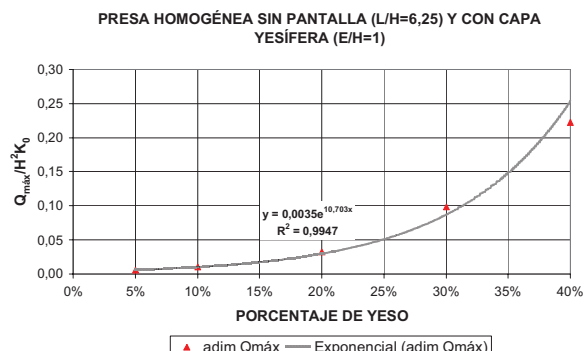
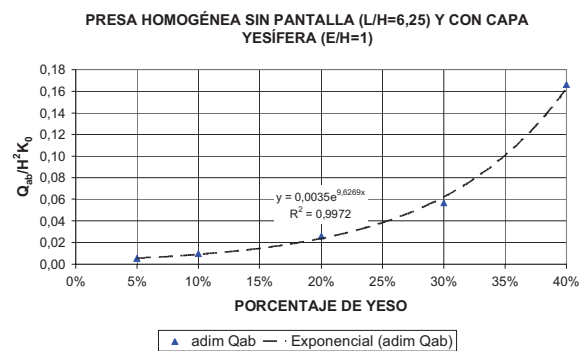
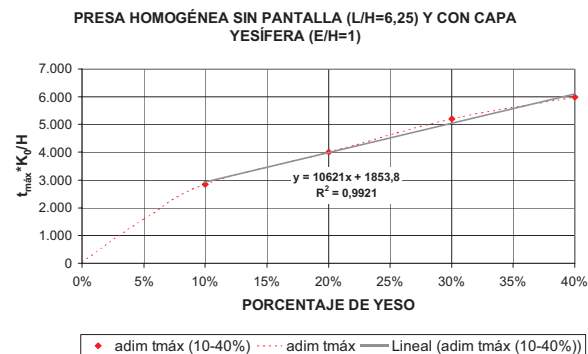
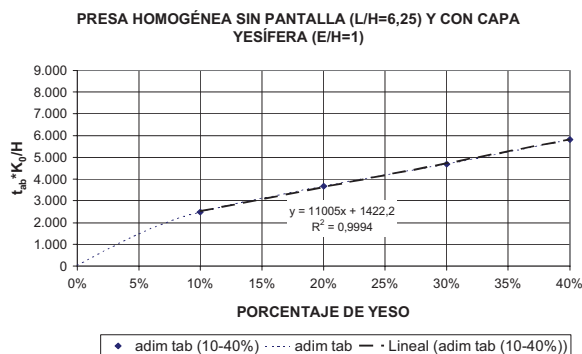
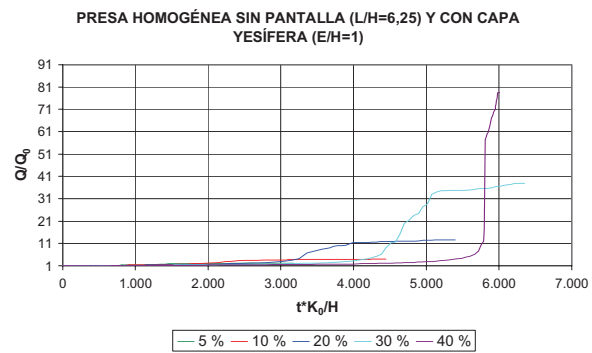
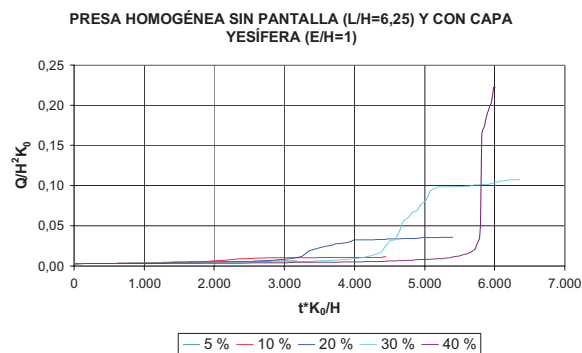
PRESA HOMOGÉNEA SIN PANTALLA (L/H=6,25) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=1)



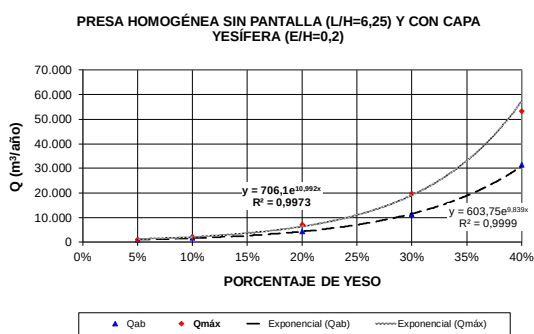
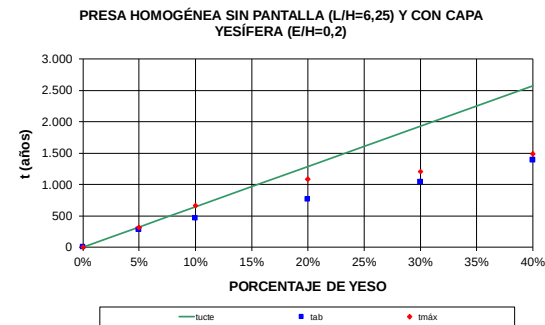
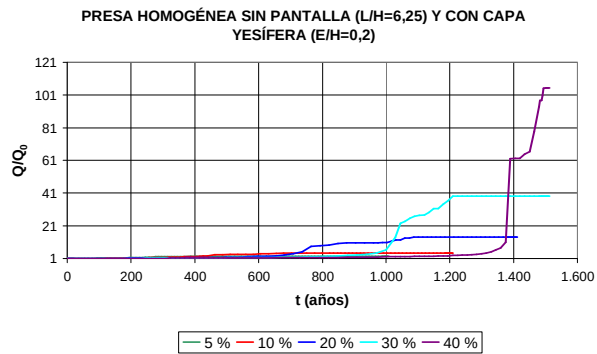
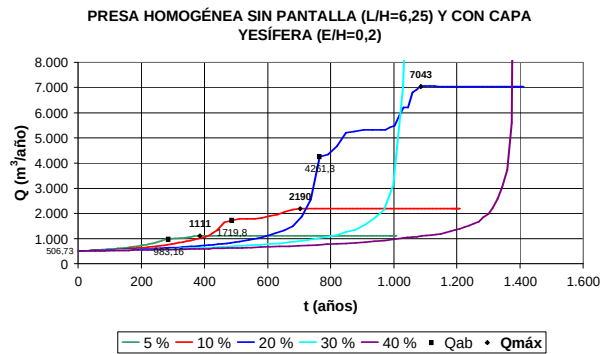
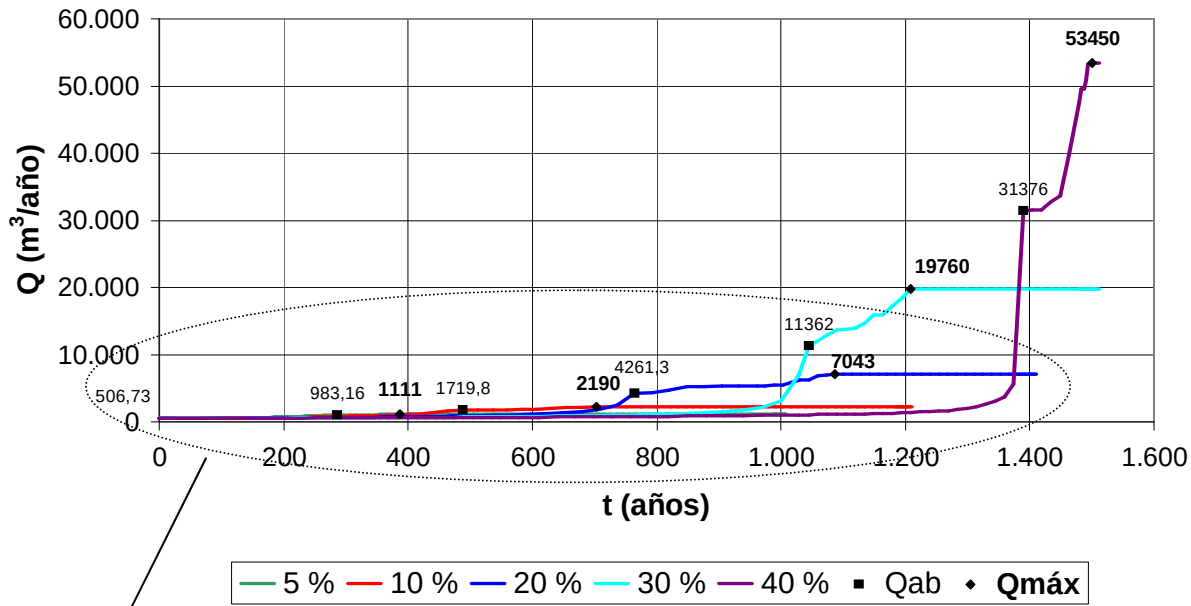
H=50 m
K₀=315 m/año
K materiales fijadas

GRÁFICOS H1H

GRÁFICOS ADIMENSIONALES



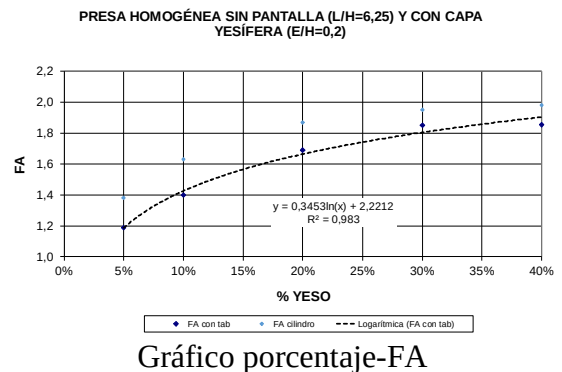
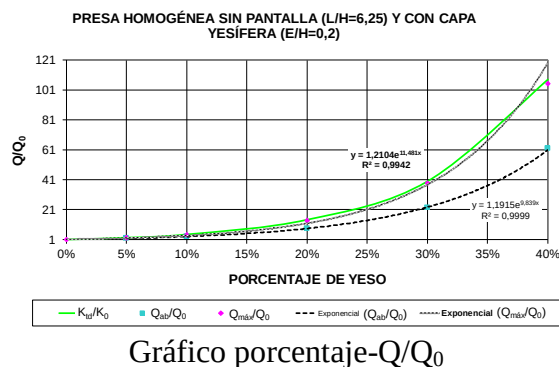
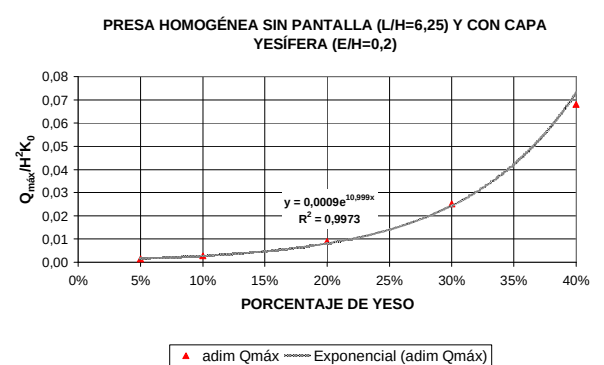
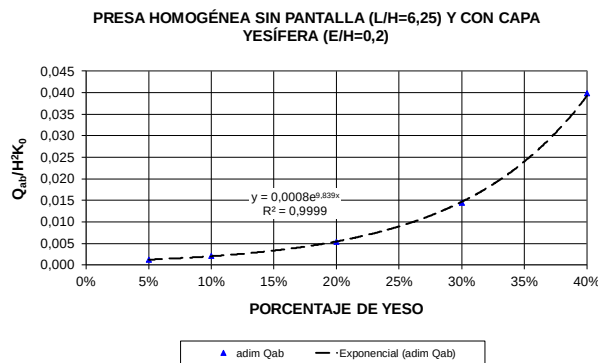
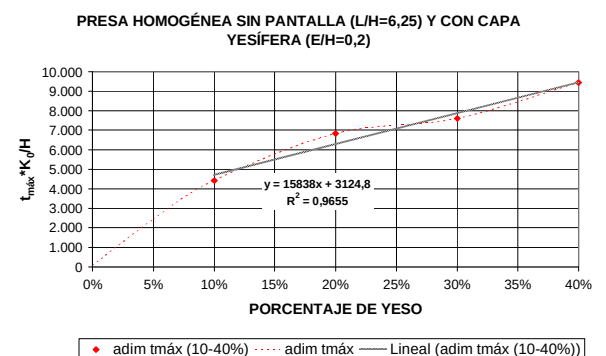
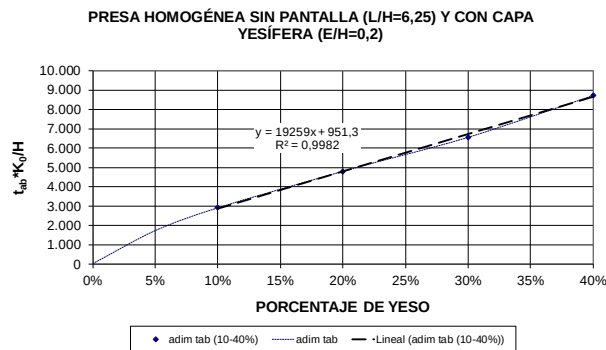
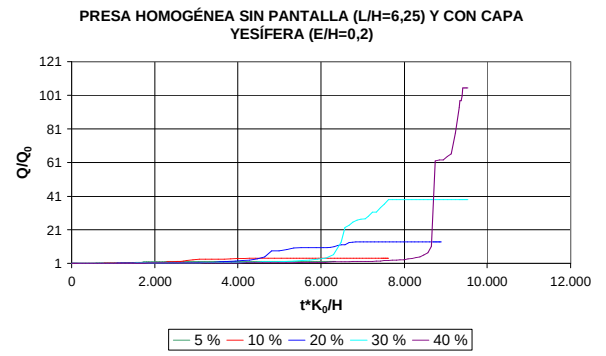
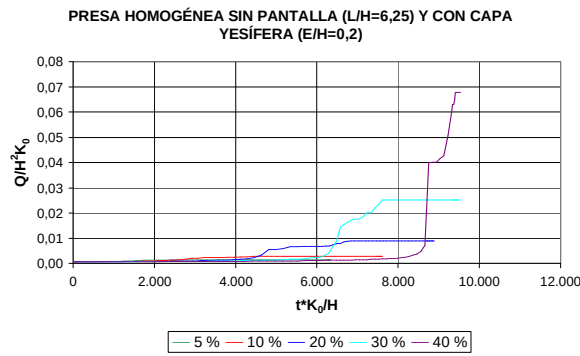
PRESA HOMOGÉNEA SIN PANTALLA (L/H=6,25) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=0,2)



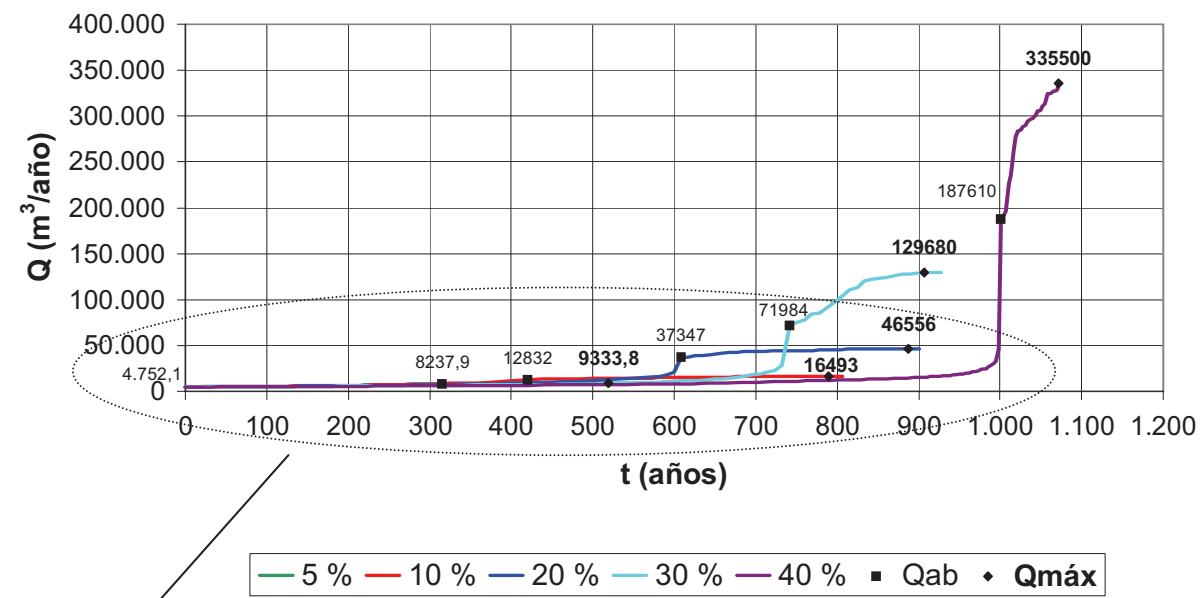
H=50 m
K₀=315 m/año
K materiales fijadas

GRÁFICOS H0.2H

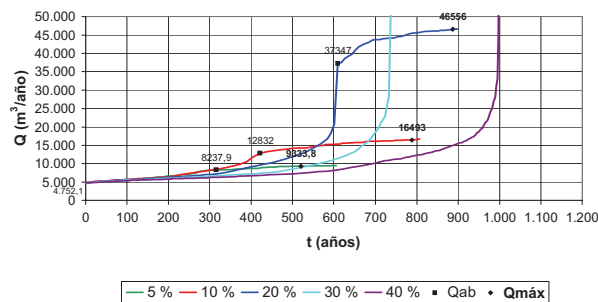
GRÁFICOS ADIMENSIONALES



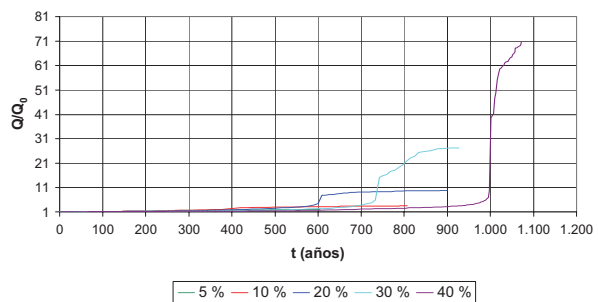
PRESA HOMOGÉNEA (L/H=5,25) CON PANTALLA (p/H=1) Y CON
CAPA YESÍFERA (e/H=3)



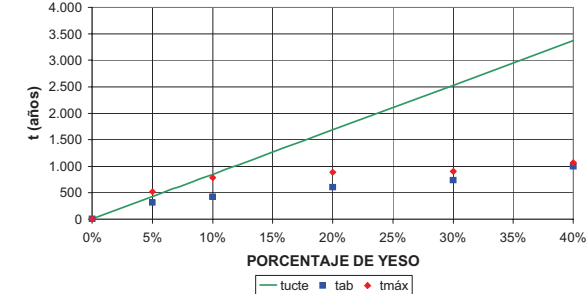
PRESA HOMOGÉNEA (L/H=5,25) CON PANTALLA (p/H=1) Y CON
CAPA YESÍFERA (e/H=3)



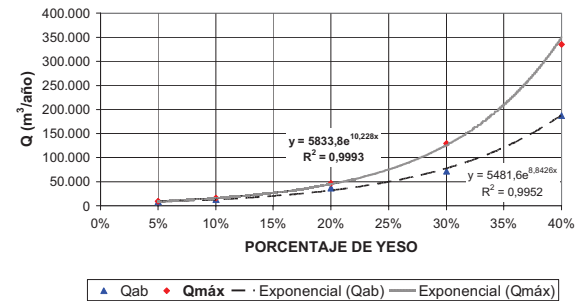
PRESA HOMOGÉNEA (L/H=6,25) CON PANTALLA (P/H=1) Y CON
CAPA YESÍFERA (E/H=3)



PRESA HOMOGÉNEA (L/H=6,25) CON PANTALLA (P/H=1) Y CON
CAPA YESÍFERA (E/H=3)



PRESA HOMOGÉNEA (L/H=6,25) CON PANTALLA (P/H=1) Y CON
CAPA YESÍFERA (E/H=3)



H=50 m
K₀=315 m/año
K materiales fijadas

GRÁFICOS HPC3H1

GRÁFICOS ADIMENSIONALES

PRESA HOMOGÉNEA (L/H=6,25) CON PANTALLA (P/H=1) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)

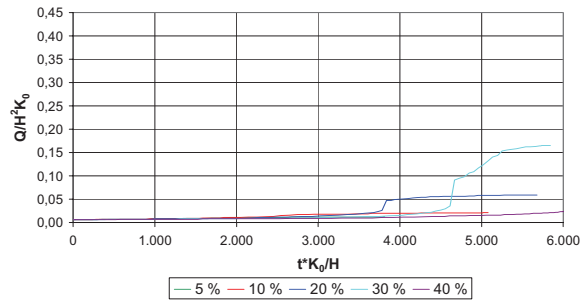


Gráfico tadim-Qadim

PRESA HOMOGÉNEA (L/H=6,25) CON PANTALLA (P/H=1) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)

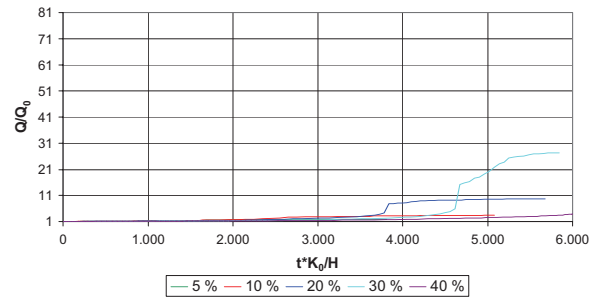


Gráfico tadim-Q/Q₀

PRESA HOMOGÉNEA (L/H=6,25) CON PANTALLA (P/H=1) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)

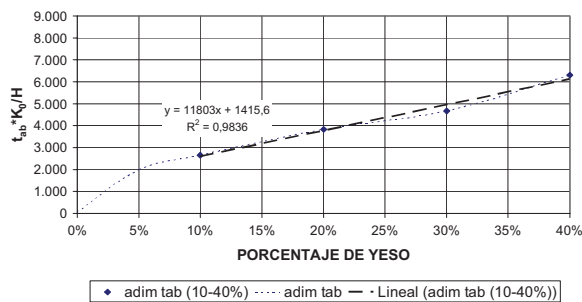


Gráfico porcentaje- t_{ab} adim

PRESA HOMOGÉNEA (L/H=6,25) CON PANTALLA (P/H=1) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)

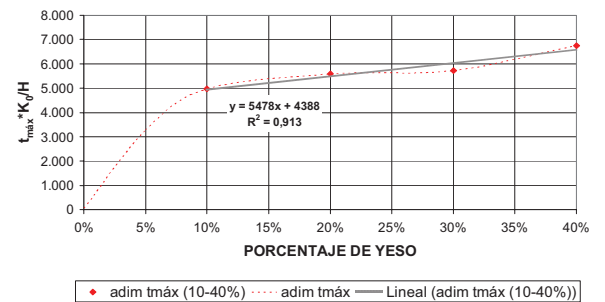


Gráfico porcentaje- $t_{máx}$ adim

PRESA HOMOGÉNEA (L/H=6,25) CON PANTALLA (P/H=1) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)

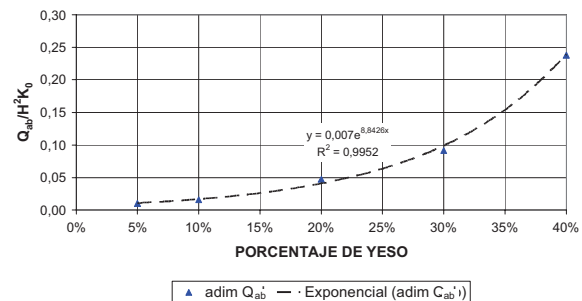


Gráfico porcentaje- Q_{ab} adim

PRESA HOMOGÉNEA (L/H=6,25) CON PANTALLA (P/H=1) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)

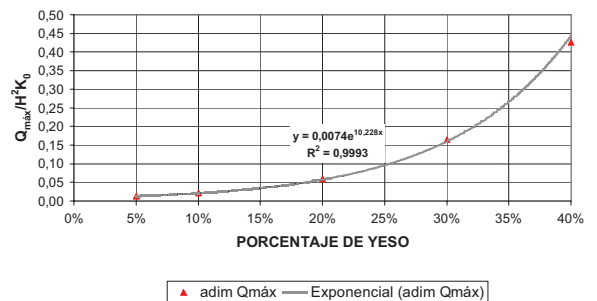


Gráfico porcentaje- $Q_{máx}$ adim

PRESA HOMOGÉNEA (L/H=6,25) CON PANTALLA (P/H=1) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)

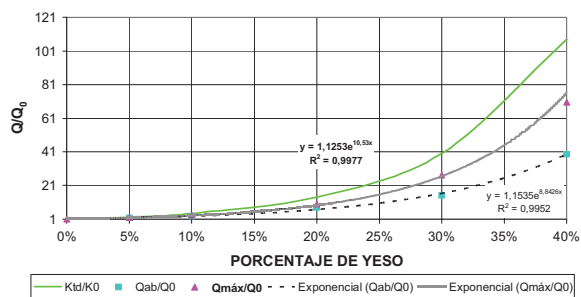


Gráfico porcentaje- Q/Q_0

PRESA HOMOGÉNEA (L/H=6,25) CON PANTALLA (P/H=1) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)

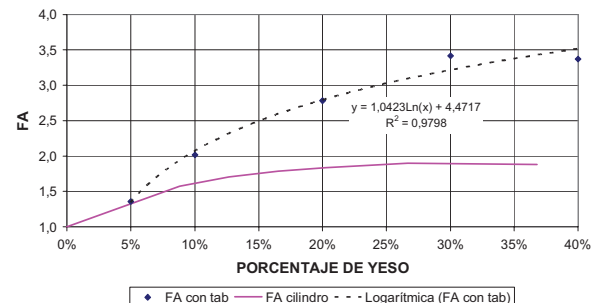
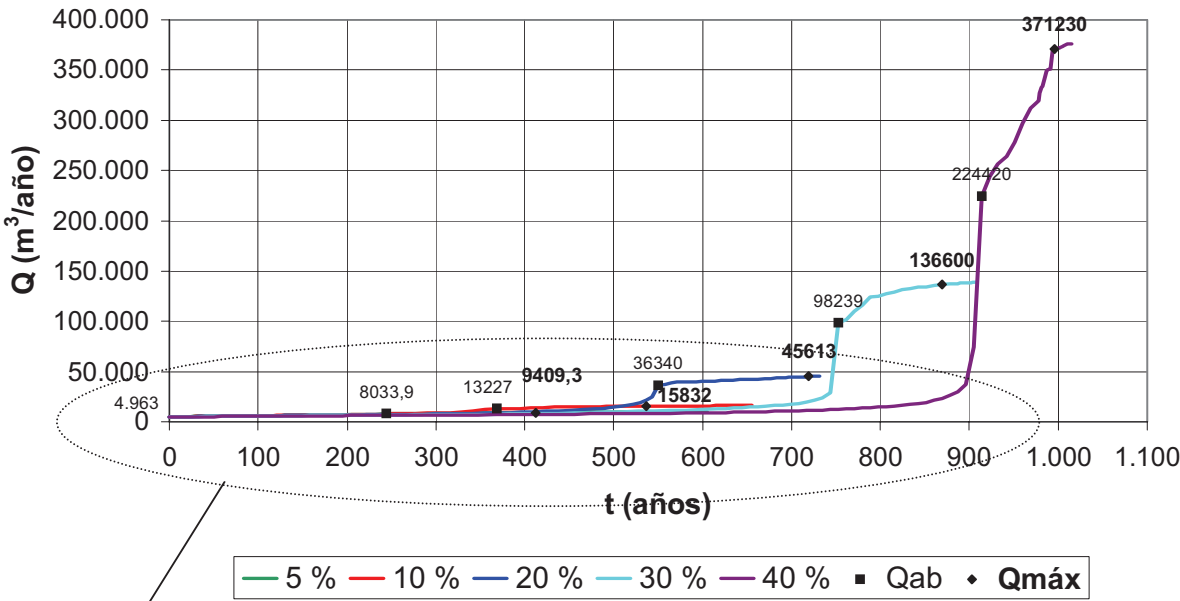
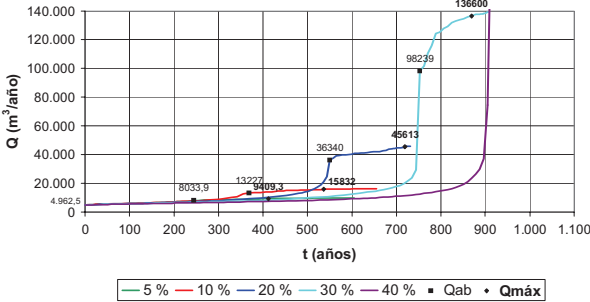


Gráfico porcentaje-FA

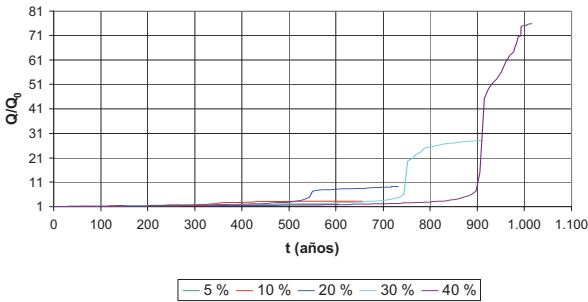
PRESA HOMOGÉNEA (L/H=6,25) CON PANTALLA (P/H=0,5) Y
CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)



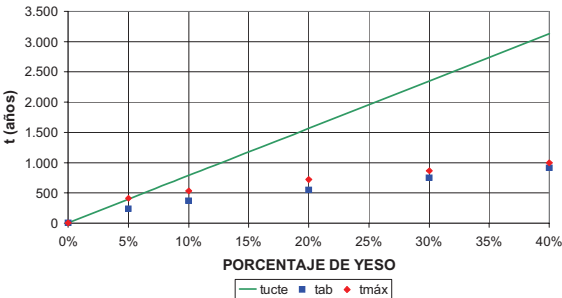
PRESA HOMOGÉNEA (L/H=6,25) CON PANTALLA (P/H=0,5) Y
CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)



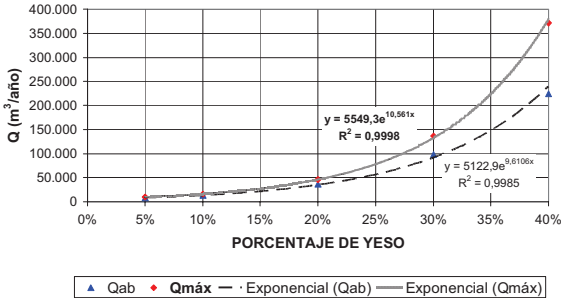
PRESA HOMOGÉNEA (L/H=6,25) CON PANTALLA (P/H=0,5) Y
CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)



PRESA HOMOGÉNEA (L/H=6,25) CON PANTALLA (P/H=0,5) Y
CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)



PRESA HOMOGÉNEA (L/H=6,25) CON PANTALLA (P/H=0,5) Y
CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)



H=50 m
K₀=315 m/año
K materiales fijadas

GRÁFICOS ADIMENSIONALES

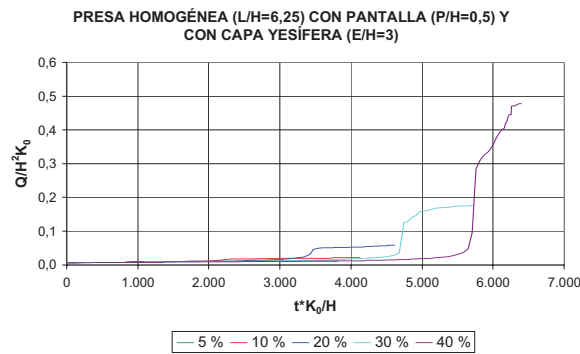


Gráfico tadim-Qadim

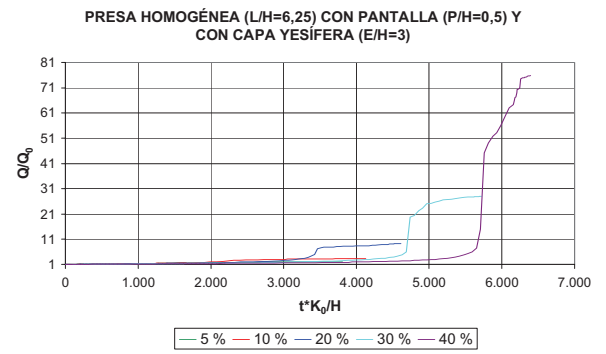


Gráfico tadim-Q/Q₀

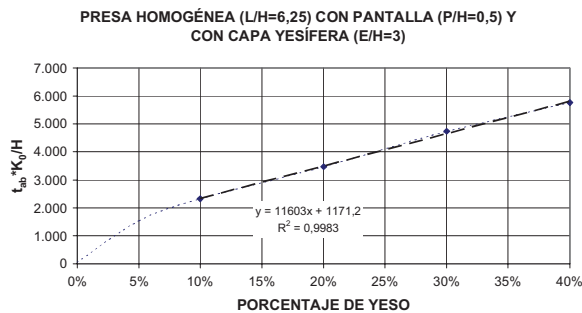
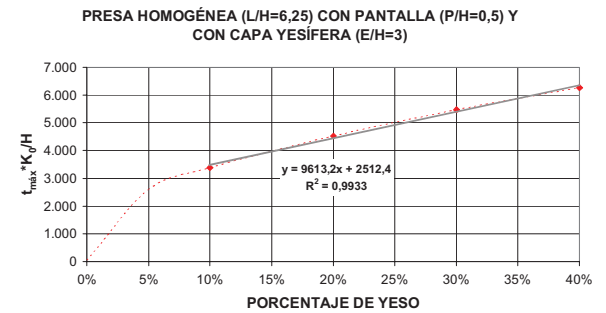
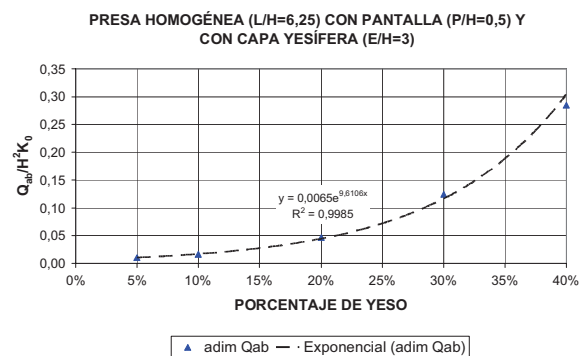
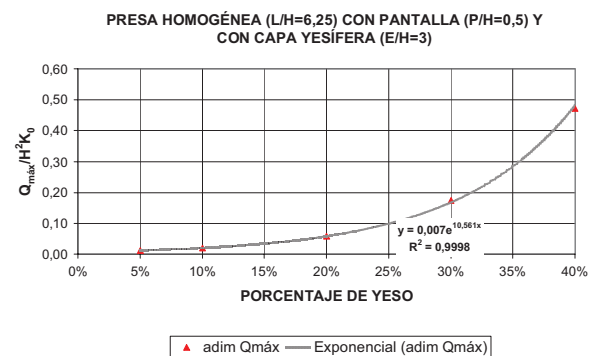
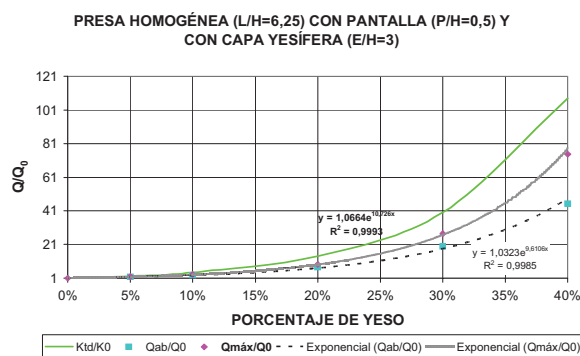
Gráfico porcentaje- t_{ab} adimGráfico porcentaje- $t_{máx}$ adimGráfico porcentaje- Q_{ab} adimGráfico porcentaje- $Q_{máx}$ adim

Gráfico porcentaje-Q/Q₀

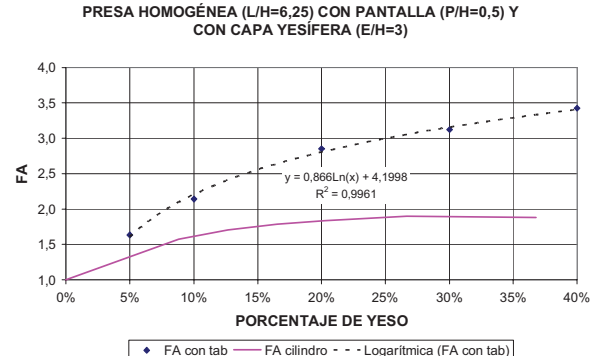
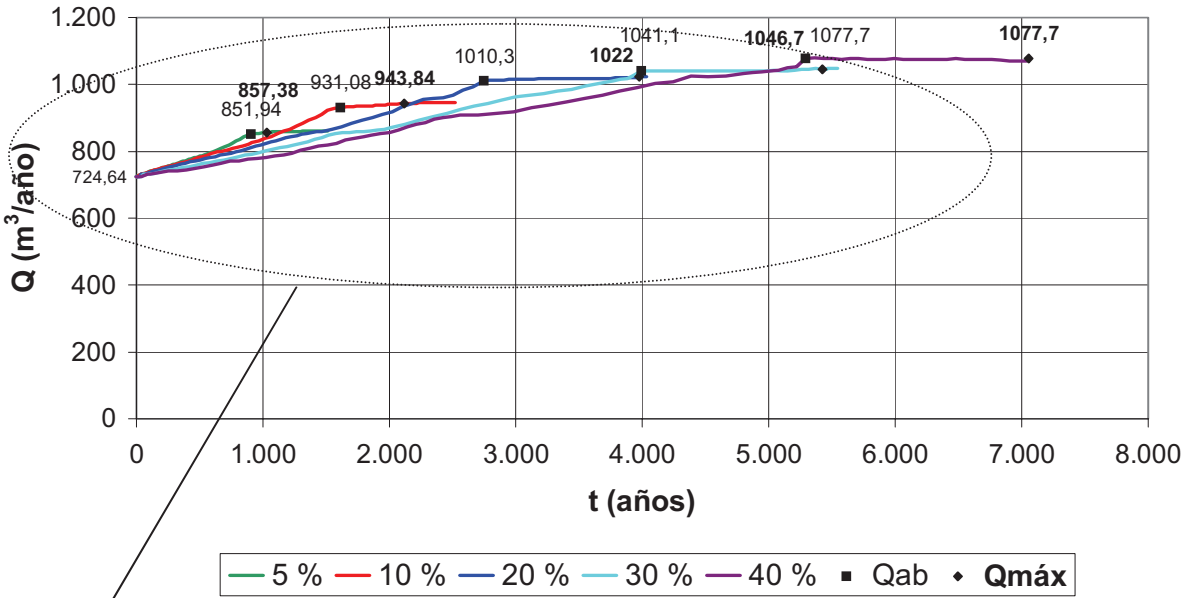


Gráfico porcentaje-FA

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



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

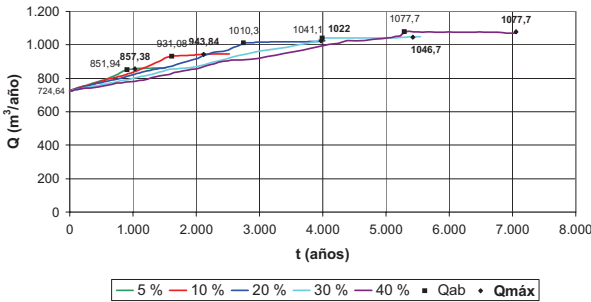


Gráfico t-Q (zoom)

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

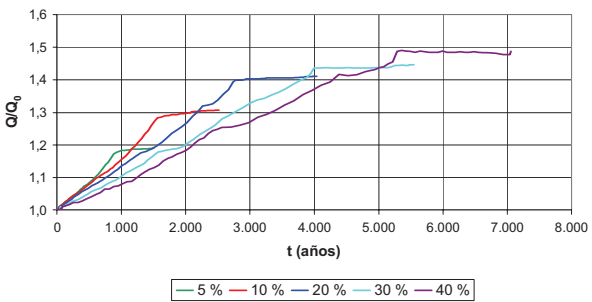


Gráfico t-Q/Q₀

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

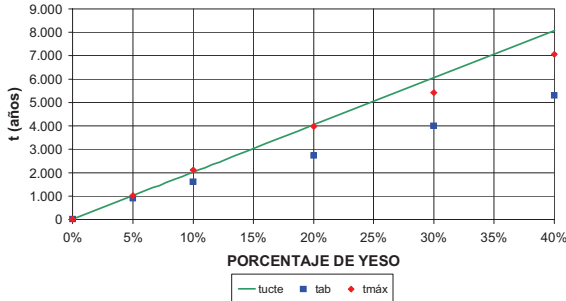


Gráfico porcentaje-t

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

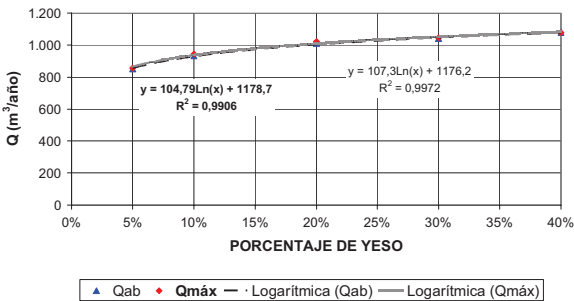


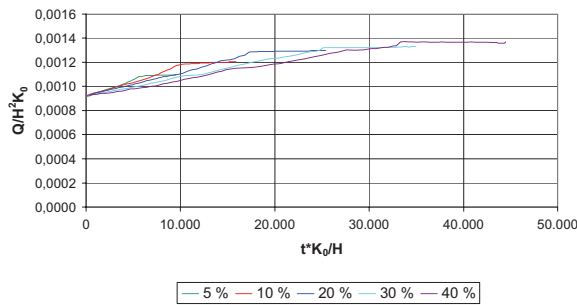
Gráfico porcentaje-Q

H=50 m
K₀=315 m/año
K materiales fijadas

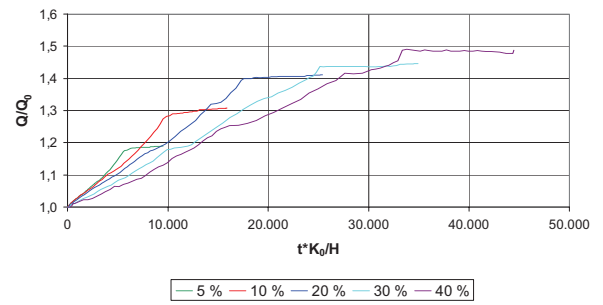
GRÁFICOS HPC1H

GRÁFICOS ADIMENSIONALES

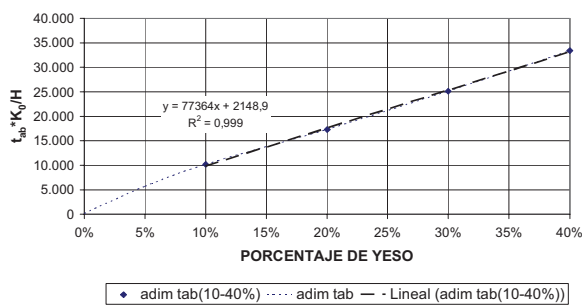
PRESA HOMOGÉNEA (L/H=6,25) CON PANTALLA (P/H=1) Y CON
CAPA YESÍFERA (E/H=1)



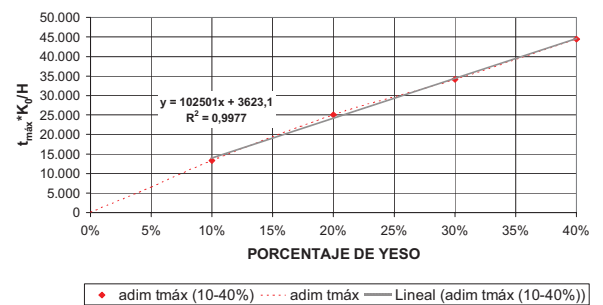
PRESA HOMOGÉNEA (L/H=6,25) CON PANTALLA (P/H=1) Y CON
CAPA YESÍFERA (E/H=1)



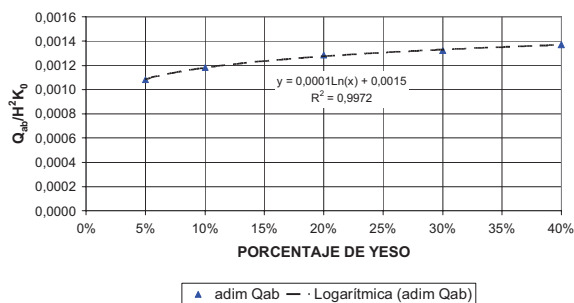
PRESA HOMOGÉNEA (L/H=6,25) CON PANTALLA (P/H=1) Y CON
CAPA YESÍFERA (E/H=1)



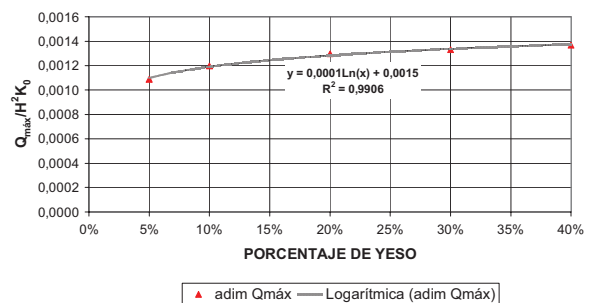
PRESA HOMOGÉNEA (L/H=6,25) CON PANTALLA (P/H=1) Y CON
CAPA YESÍFERA (E/H=1)



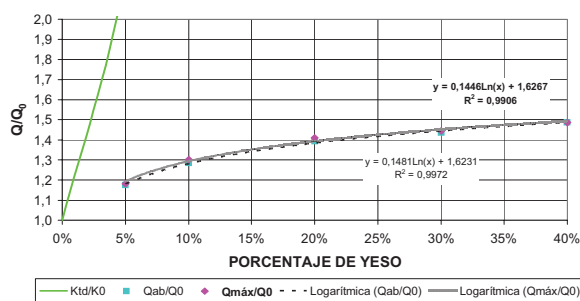
PRESA HOMOGÉNEA (L/H=6,25) CON PANTALLA (P/H=1) Y CON
CAPA YESÍFERA (E/H=1)



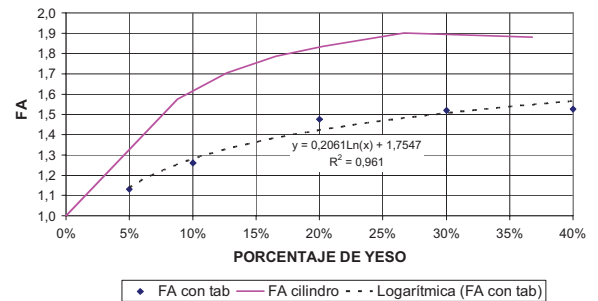
PRESA HOMOGÉNEA (L/H=6,25) CON PANTALLA (P/H=1) Y CON
CAPA YESÍFERA (E/H=1)



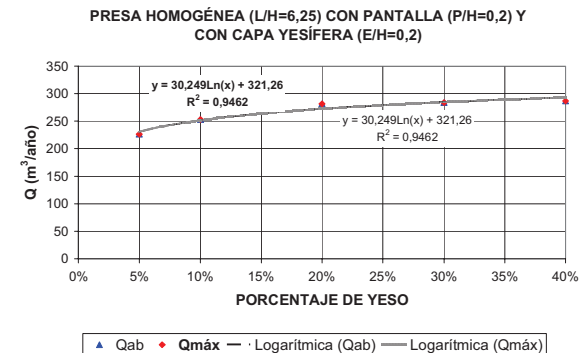
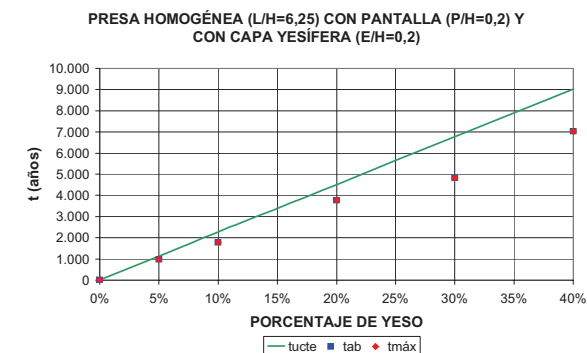
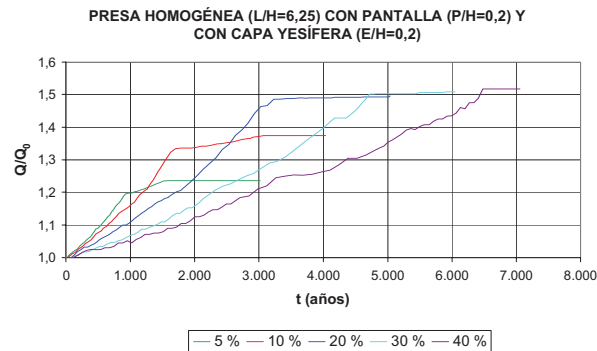
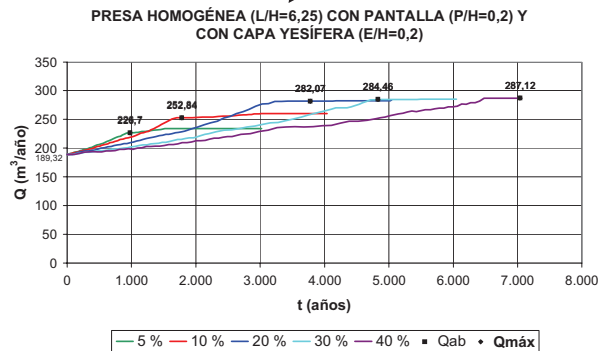
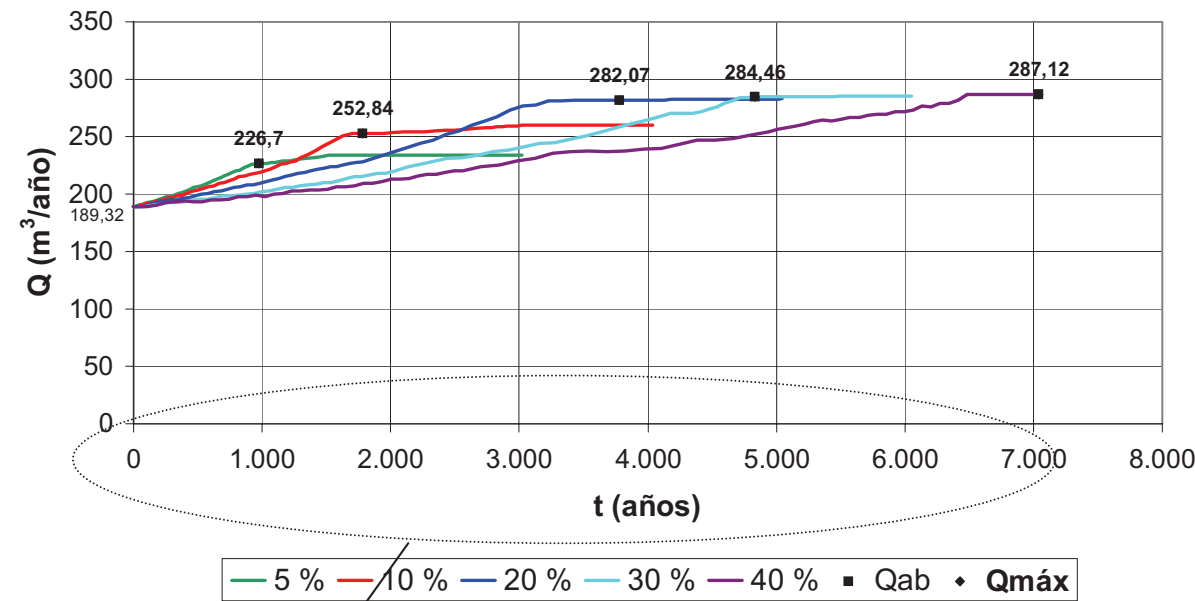
PRESA HOMOGÉNEA (L/H=6,25) CON PANTALLA (P/H=1) Y CON
CAPA YESÍFERA (E/H=1)



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



PRESA HOMOGÉNEA (L/H=6,25) CON PANTALLA (P/H=0,2) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=0,2)



H=50 m
K₀=315 m/año
K materiales fijadas

GRÁFICOS HPC0.2H

GRÁFICOS ADIMENSIONALES

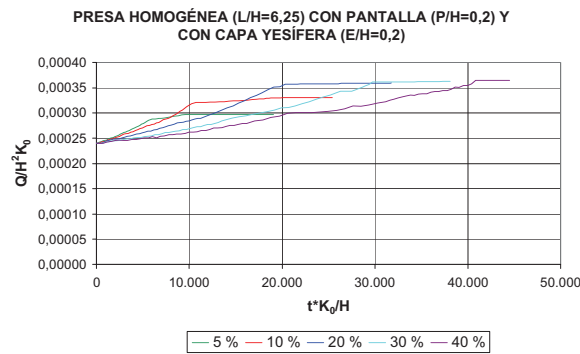


Gráfico tadim-Qadim

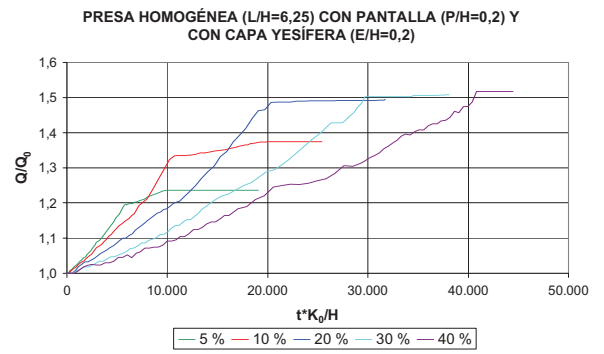


Gráfico tadim-Q/Q₀

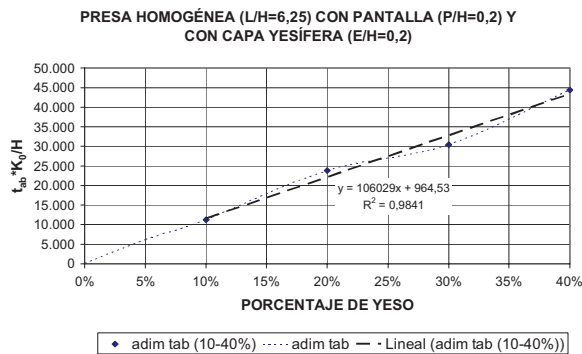


Gráfico porcentaje- t_{ab} adim

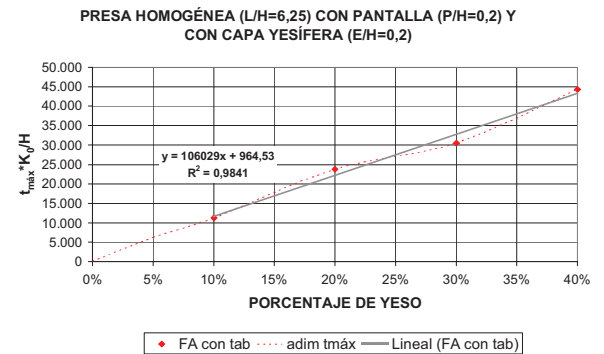


Gráfico porcentaje- $t_{máx}$ adim

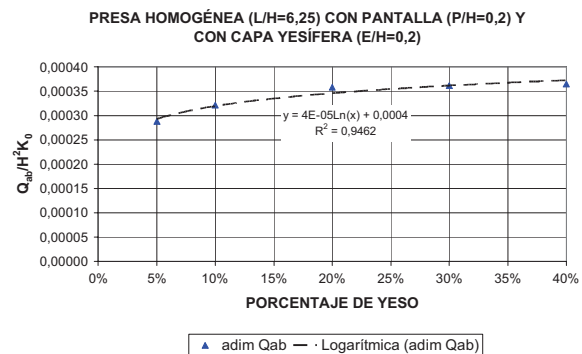


Gráfico porcentaje- Q_{ab} adim

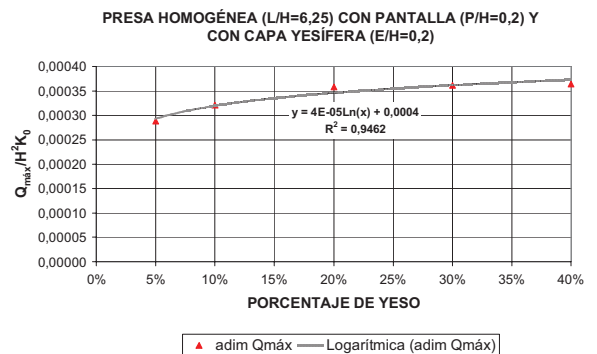


Gráfico porcentaje- $Q_{máx}$ adim

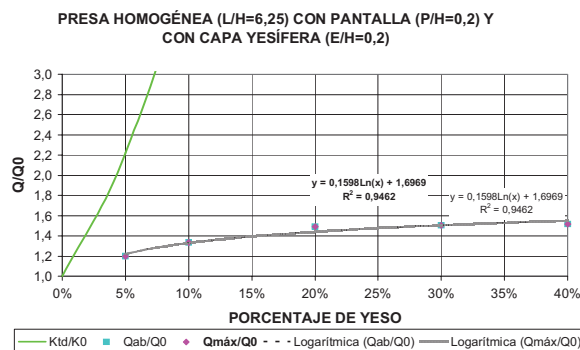


Gráfico porcentaje-Q/Q₀

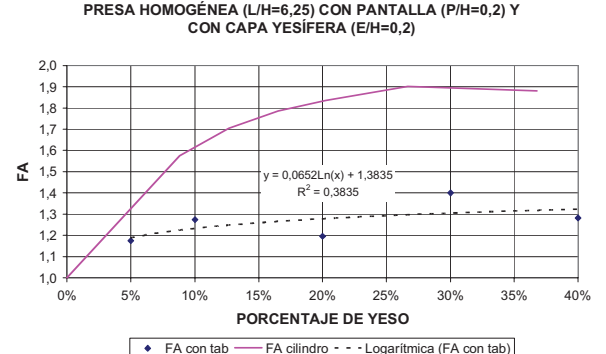
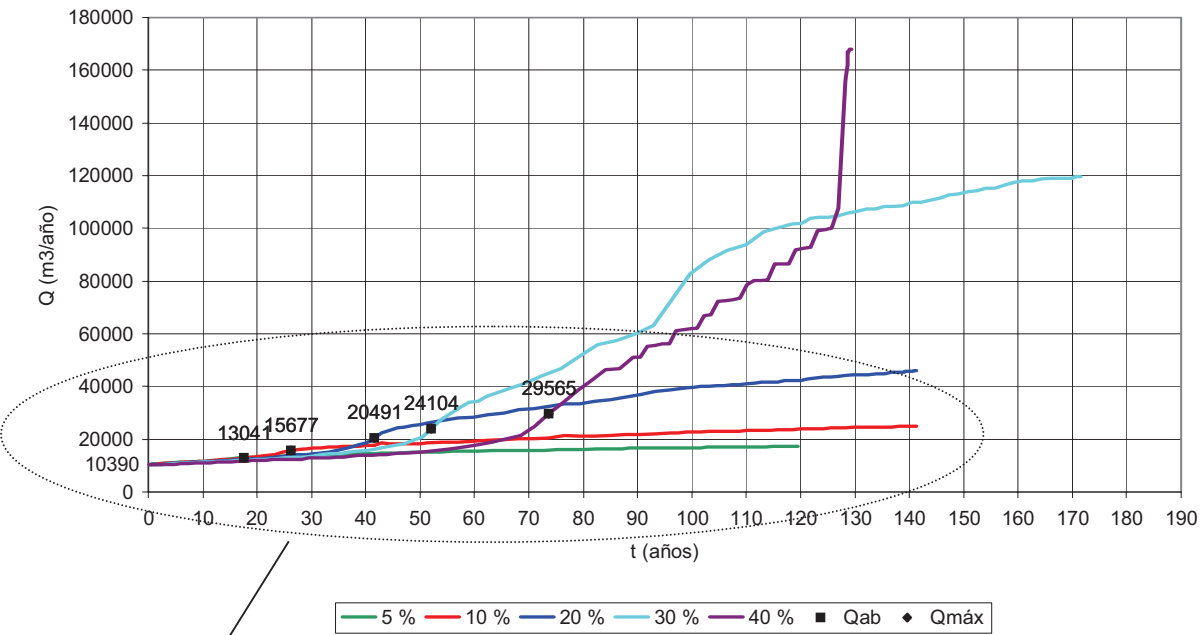


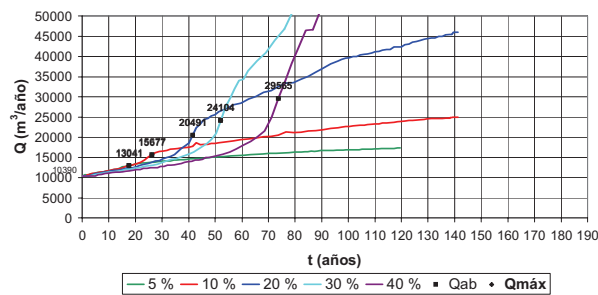
Gráfico porcentaje-FA

GRÁFICOS Z3H

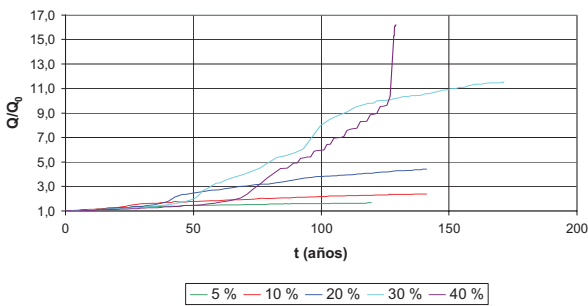
PRESA ZONIFICADA SIN PANTALLA (L/H=1,1) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)



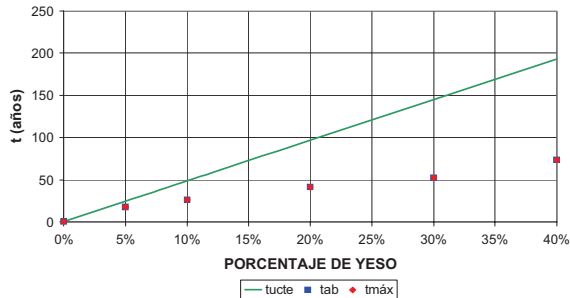
PRESA ZONIFICADA SIN PANTALLA (L/H=1,1) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)



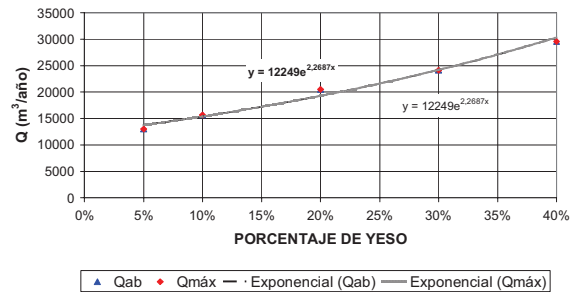
PRESA ZONIFICADA SIN PANTALLA (L/H=1,1) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)



PRESA ZONIFICADA SIN PANTALLA (L/H=1,1) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)



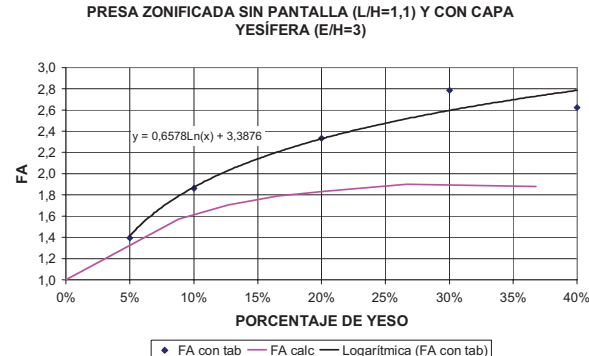
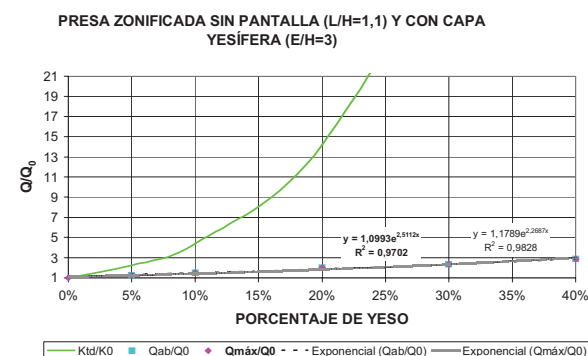
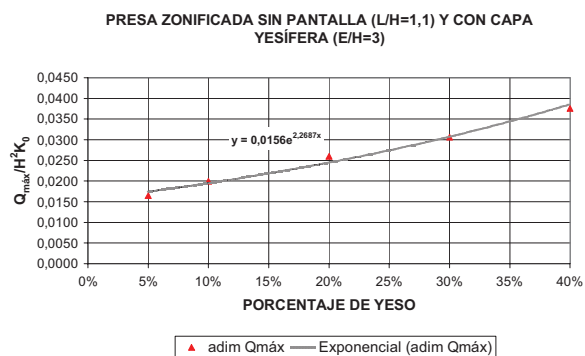
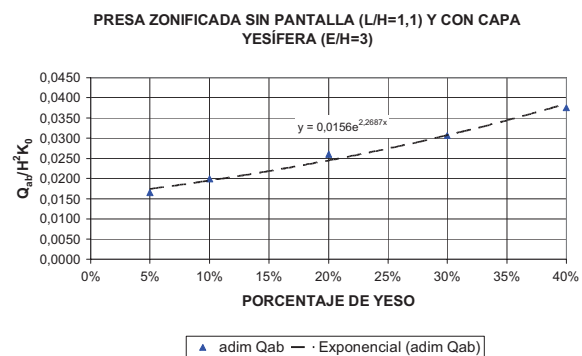
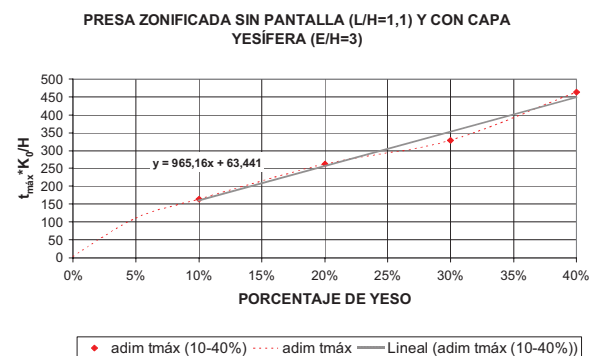
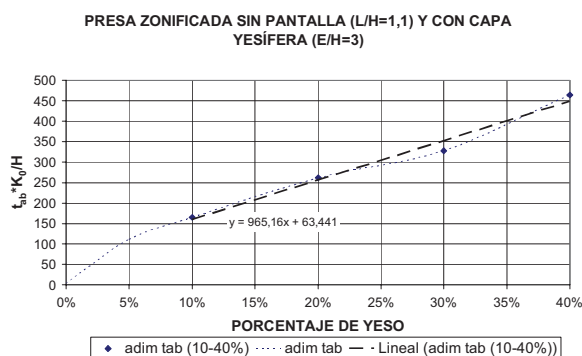
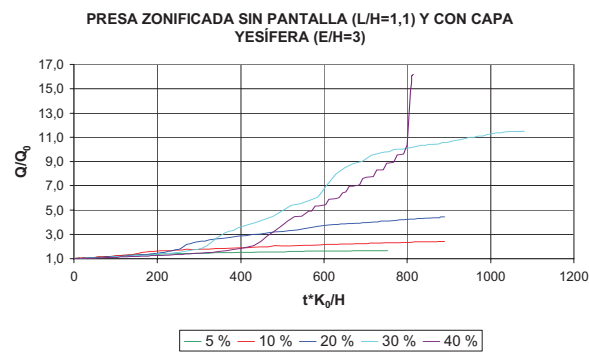
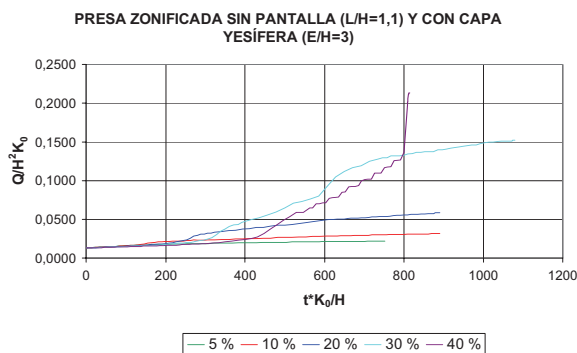
PRESA ZONIFICADA SIN PANTALLA (L/H=1,1) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)



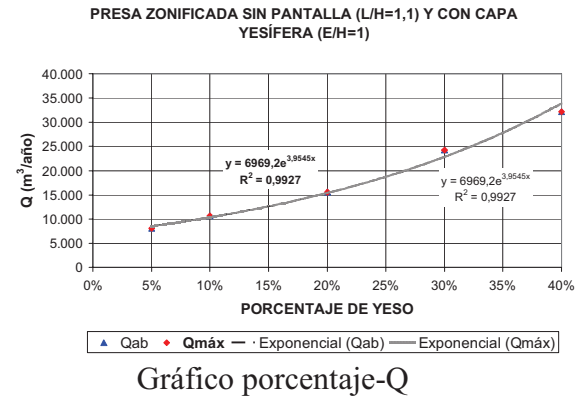
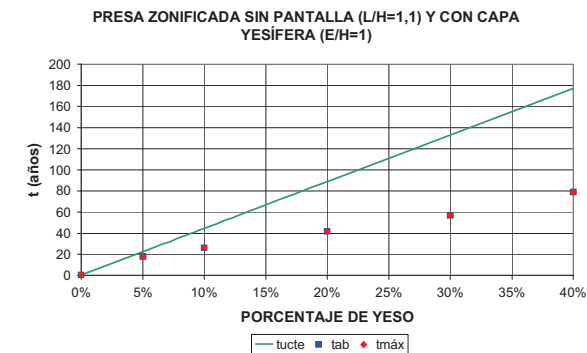
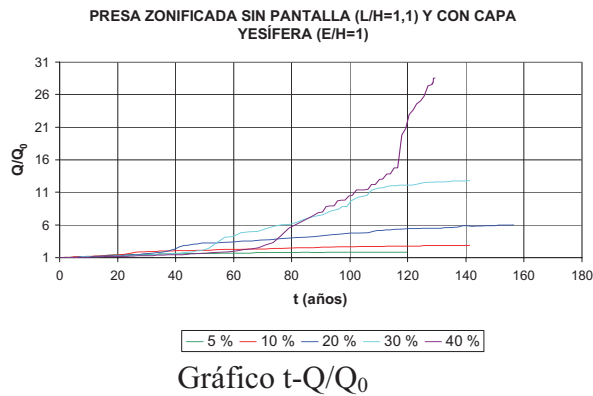
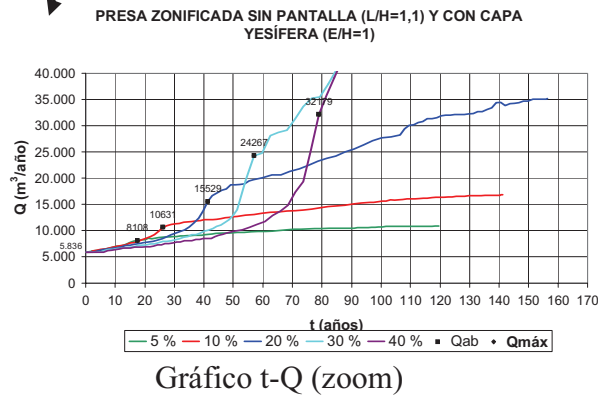
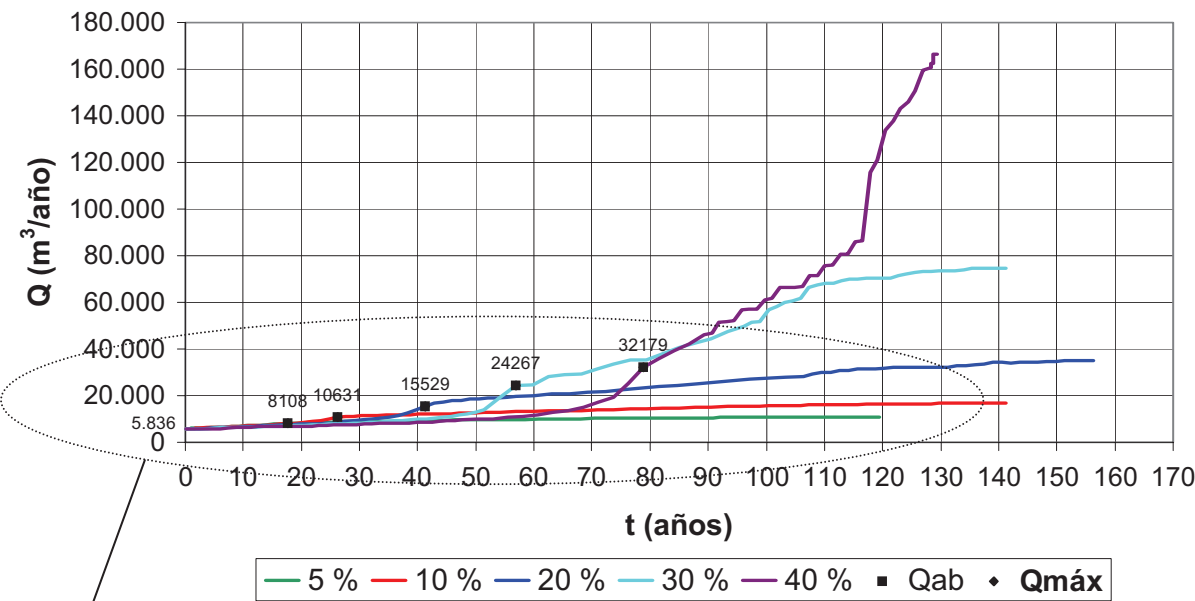
H=50 m
K₀=315 m/año
K materiales fijadas

GRÁFICOS Z3H

GRÁFICOS ADIMENSIONALES



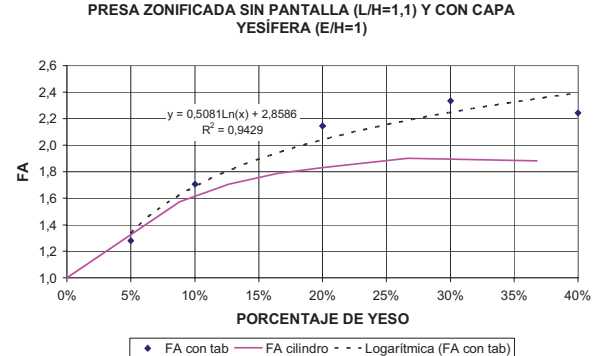
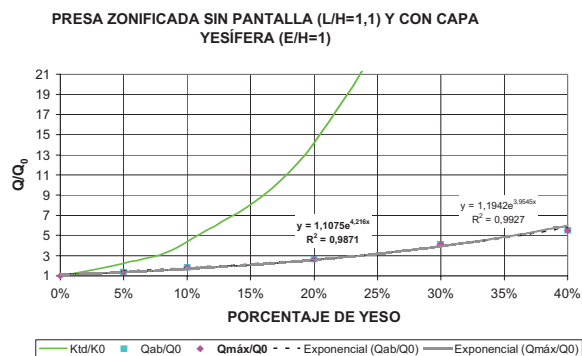
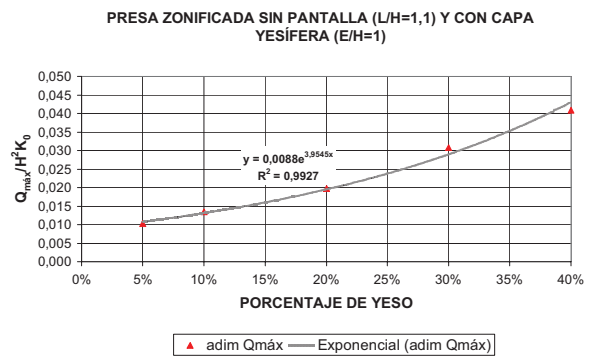
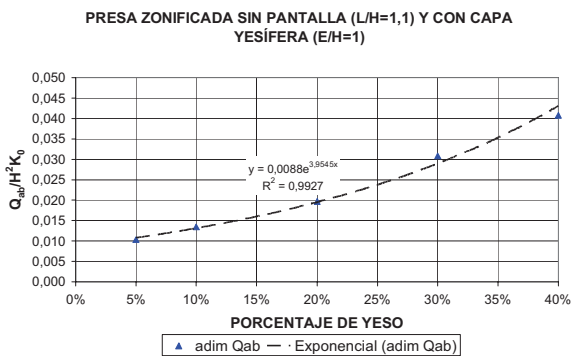
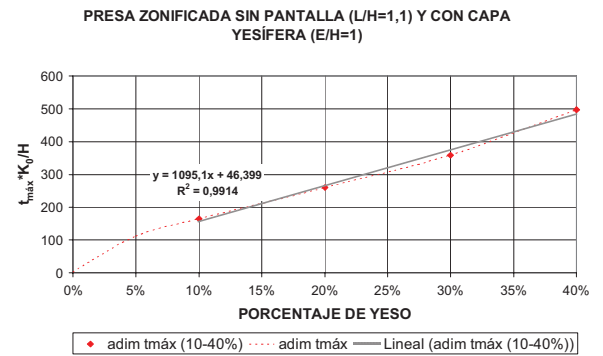
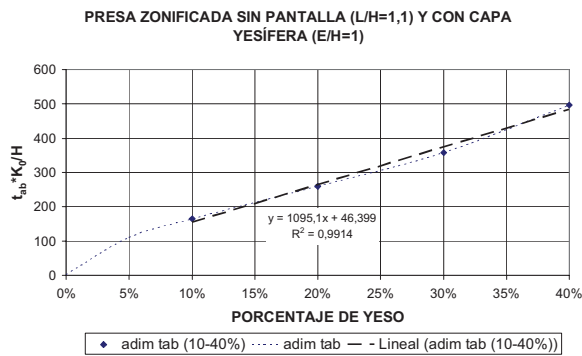
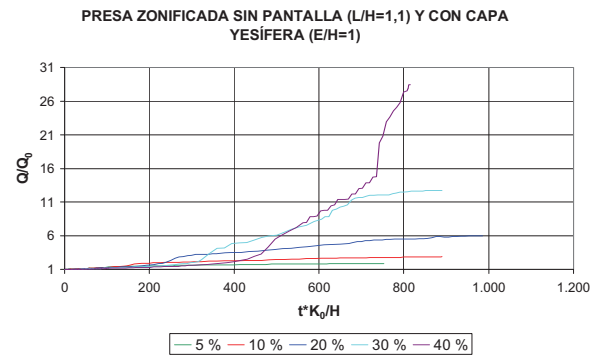
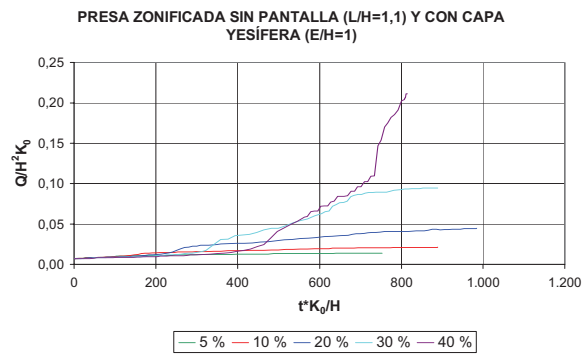
PRESA ZONIFICADA SIN PANTALLA (L/H=1,1) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=1)



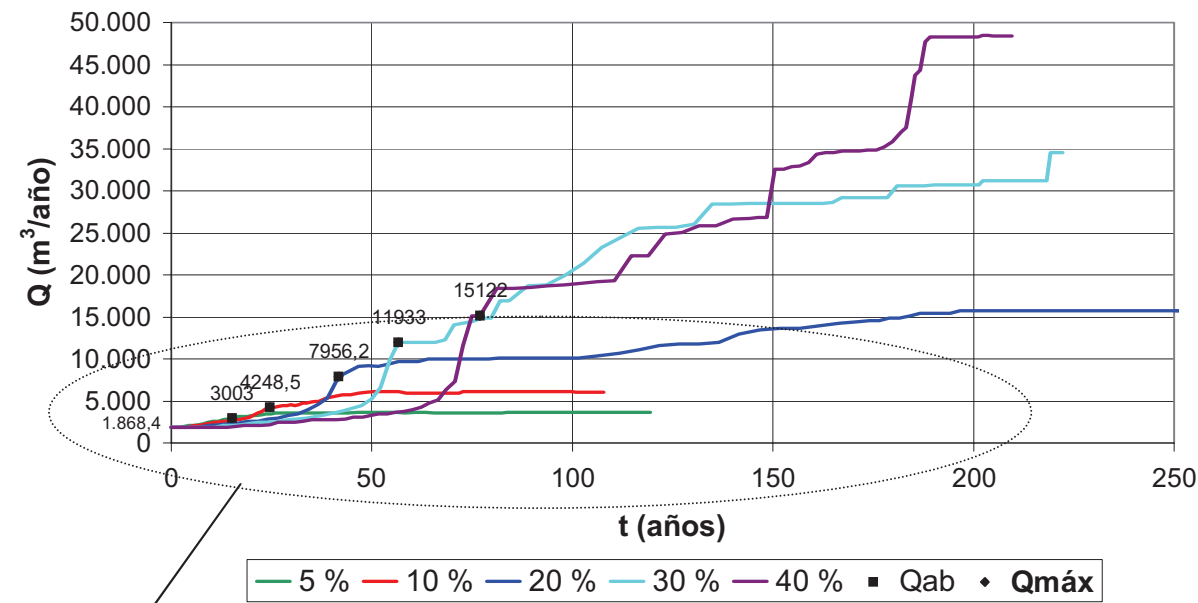
H=50 m
K₀=315 m/año
K materiales fijadas

GRÁFICOS Z1H

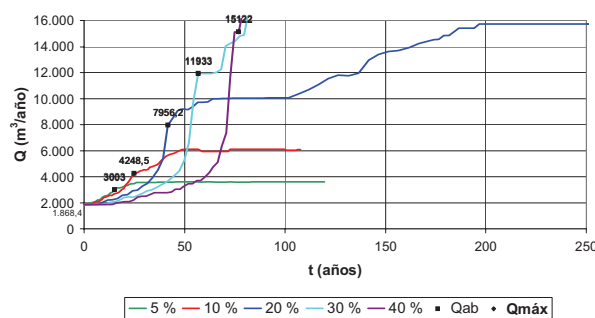
GRÁFICOS ADIMENSIONALES



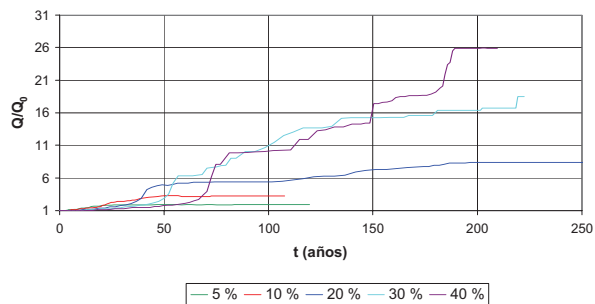
PRESA ZONIFICADA SIN PANTALLA (L/H=1,1) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=0,2)



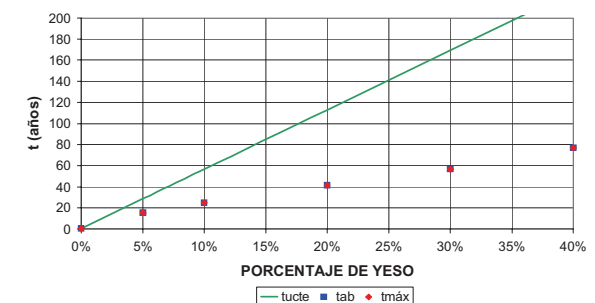
PRESA ZONIFICADA SIN PANTALLA (L/H=1,1) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=0,2)



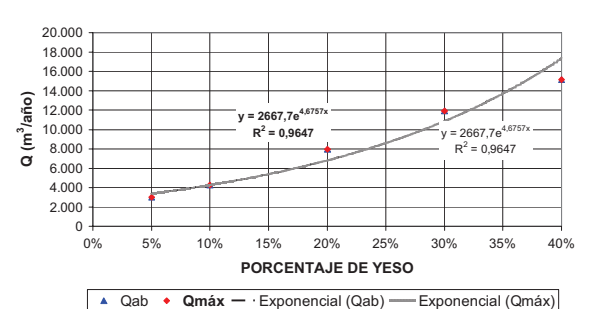
PRESA ZONIFICADA SIN PANTALLA (L/H=1,1) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=0,2)



PRESA ZONIFICADA SIN PANTALLA (L/H=1,1) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=0,2)



PRESA ZONIFICADA SIN PANTALLA (L/H=1,1) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=0,2)



H=50 m
K₀=315 m/año
K materiales fijadas

GRÁFICOS Z0.2H

GRÁFICOS ADIMENSIONALES

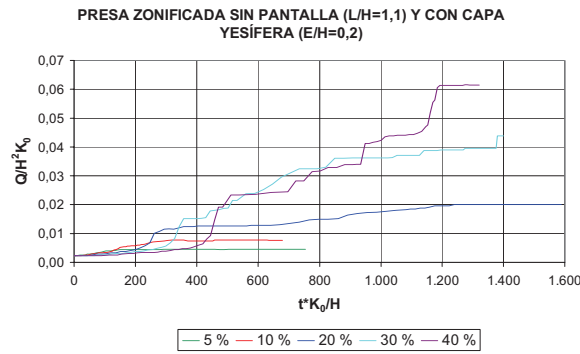


Gráfico tadim-Qadim

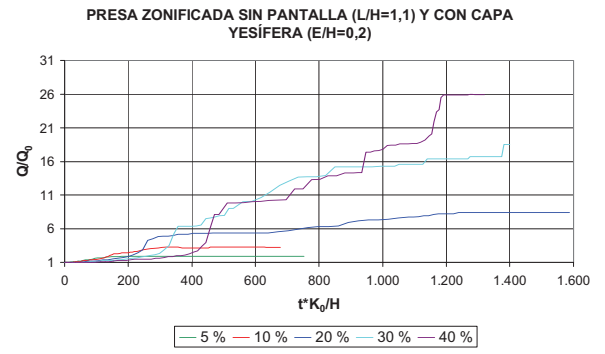


Gráfico tadim-Q/Q₀

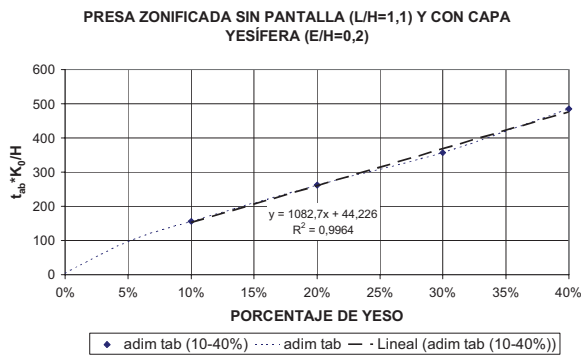


Gráfico porcentaje- t_{ab} adim

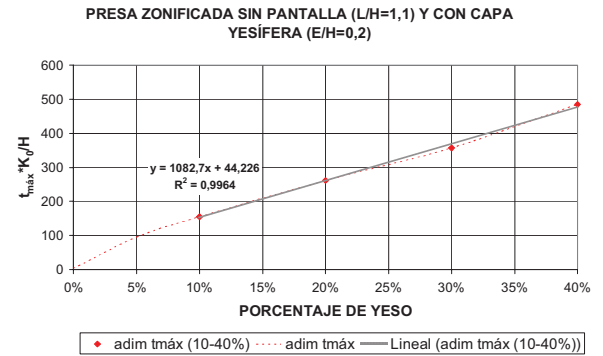


Gráfico porcentaje- $t_{m\acute{a}x}$ adim

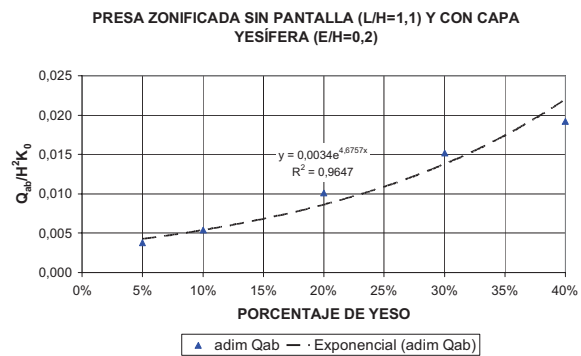


Gráfico porcentaje- Q_{ab} adim

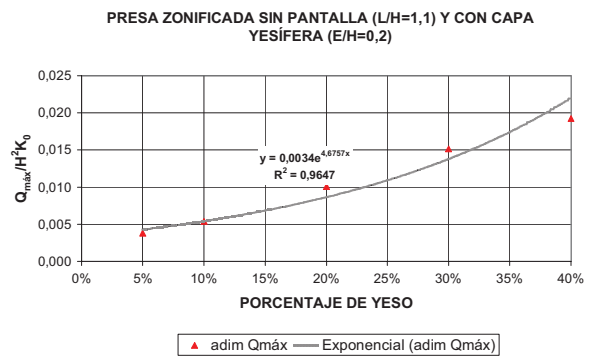


Gráfico porcentaje- $Q_{m\acute{a}x}$ adim

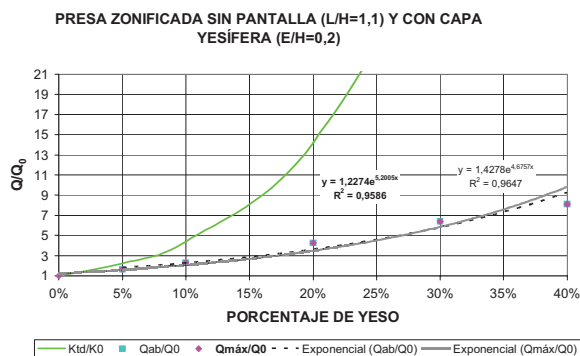


Gráfico porcentaje-Q/Q₀

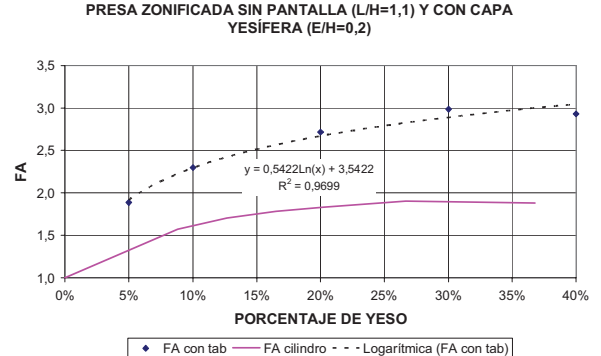
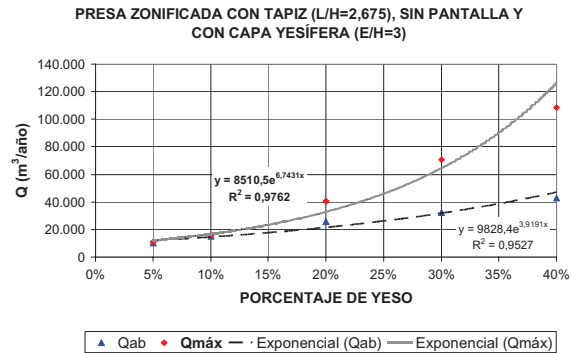
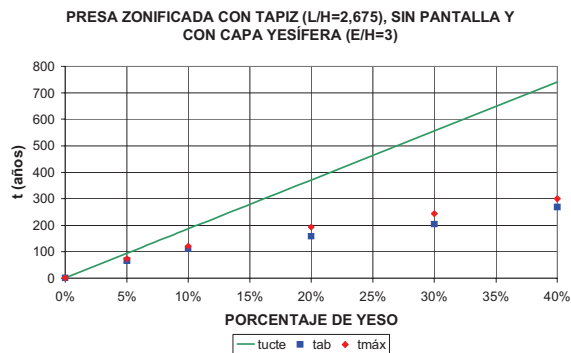
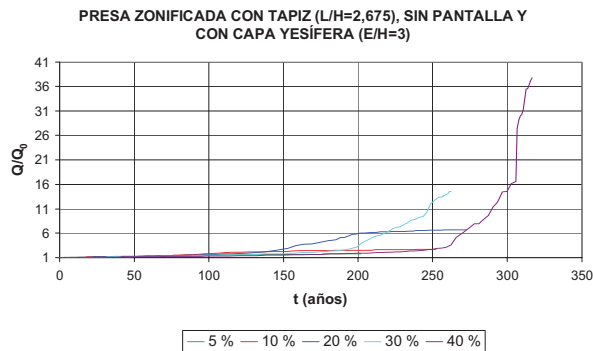
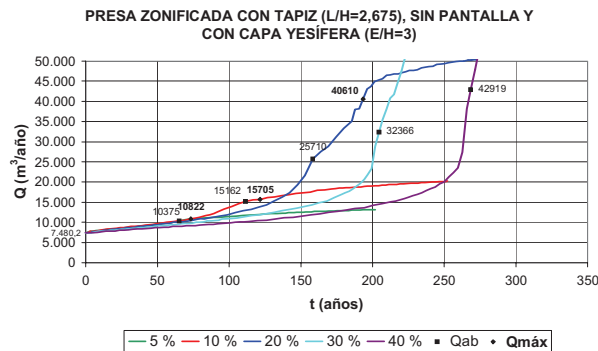
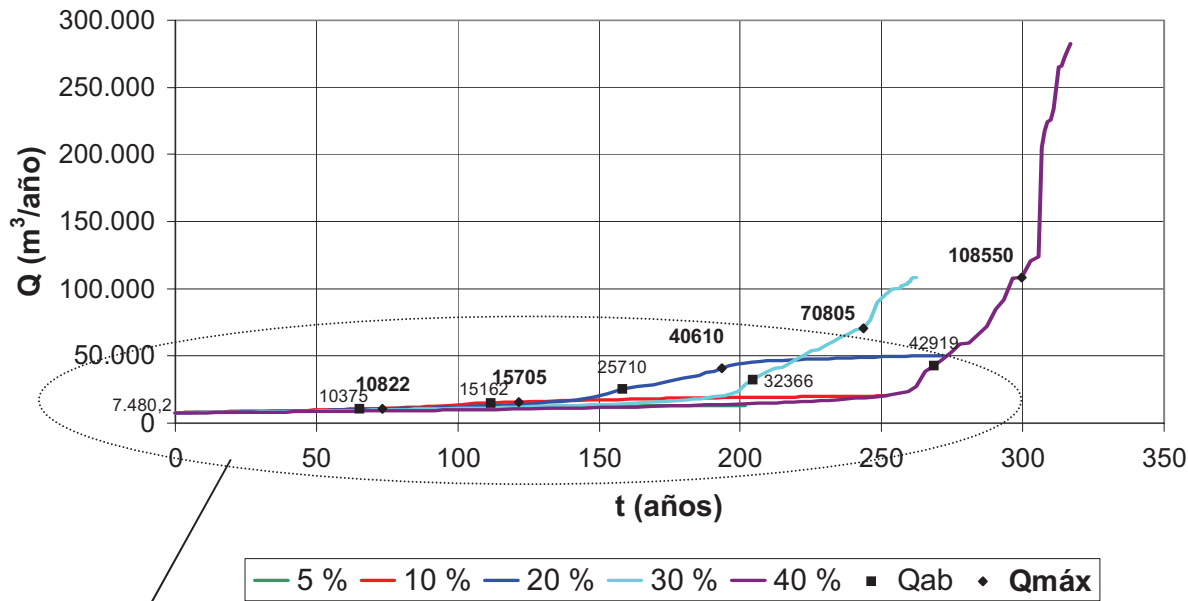


Gráfico porcentaje-FA

PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675), SIN PANTALLA Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)

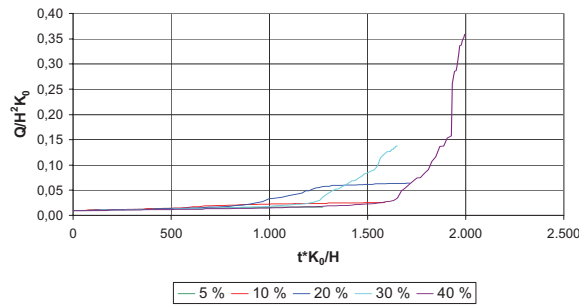


H=50 m
K₀=315 m/año
K materiales fijadas

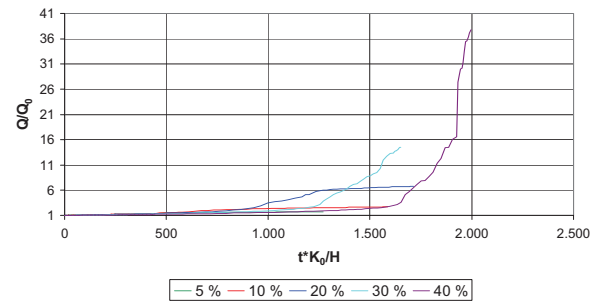
GRÁFICOS ZT3H

GRÁFICOS ADIMENSIONALES

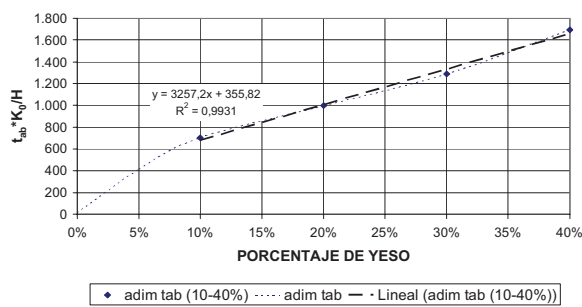
PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675), SIN PANTALLA Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)



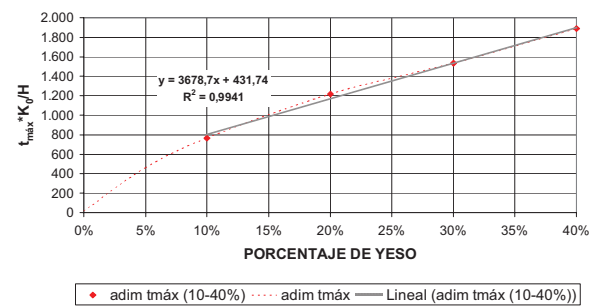
PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675), SIN PANTALLA Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)



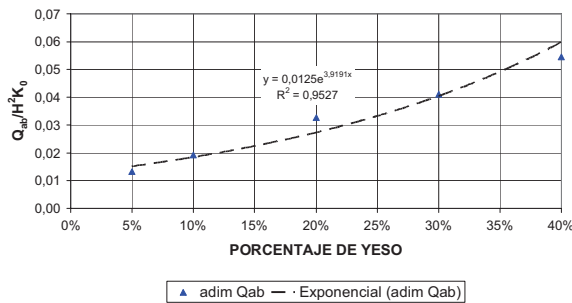
PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675), SIN PANTALLA Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)



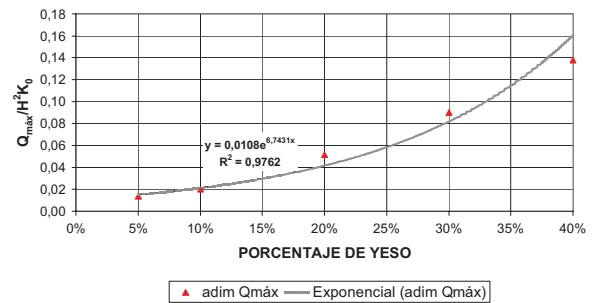
PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675), SIN PANTALLA Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)



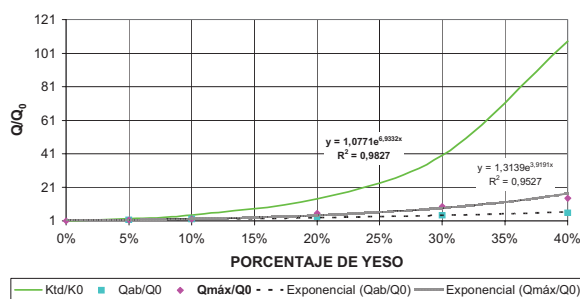
PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675), SIN PANTALLA Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)



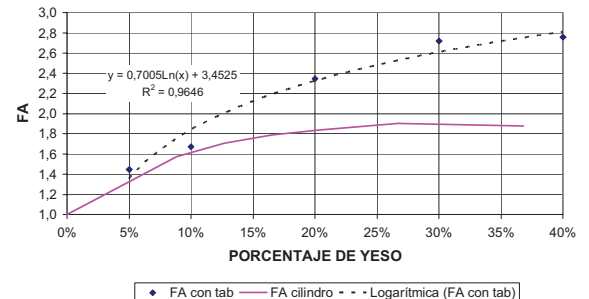
PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675), SIN PANTALLA Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)



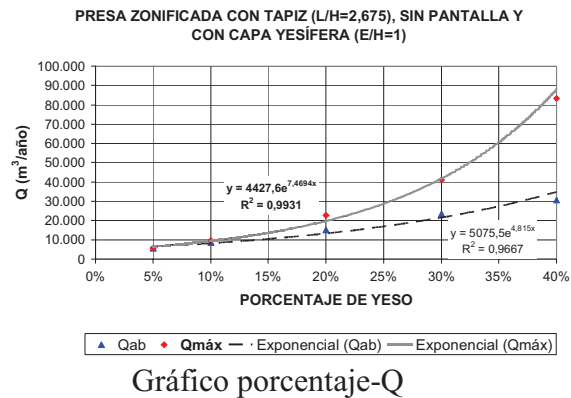
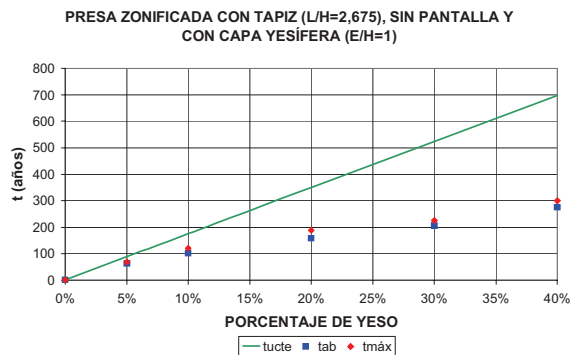
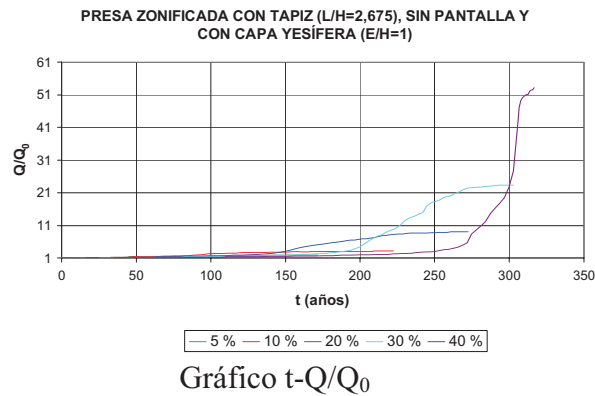
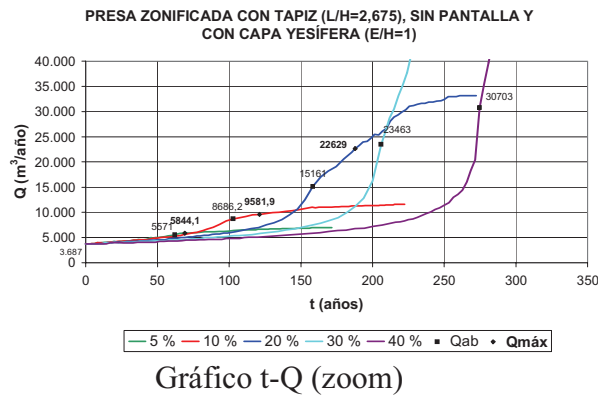
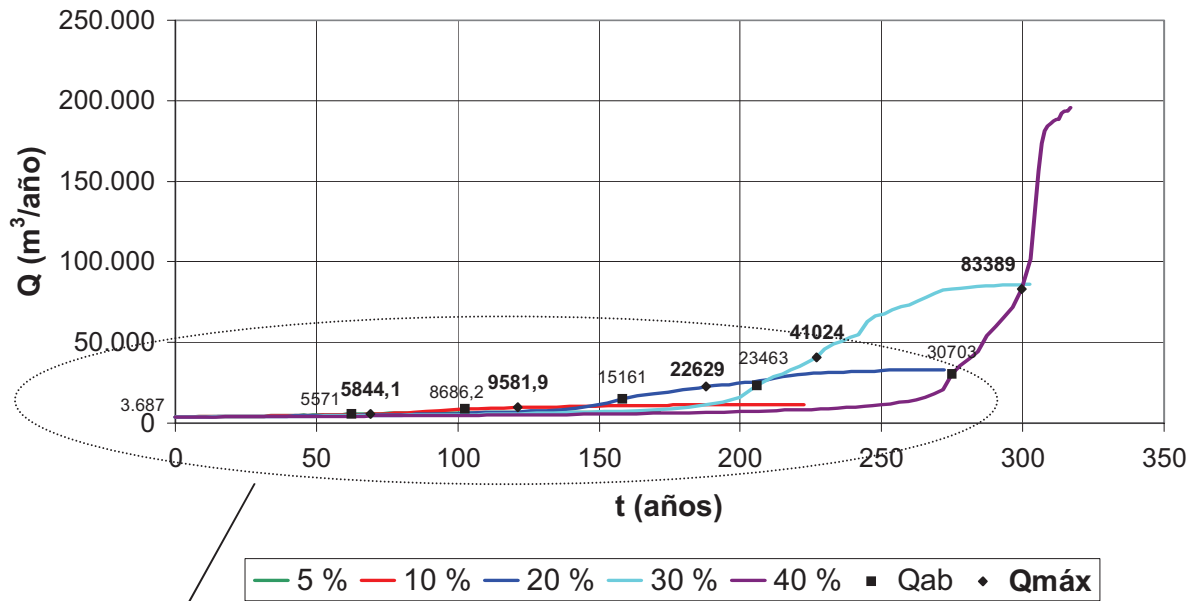
PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675), SIN PANTALLA Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)



PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675), SIN PANTALLA Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)



PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675), SIN PANTALLA Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=1)



H=50 m
K₀=315 m/año
K materiales fijadas

GRÁFICOS ZT1H

GRÁFICOS ADIMENSIONALES

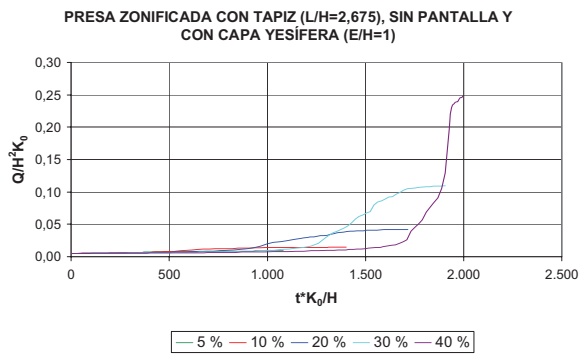


Gráfico tadim-Qadim

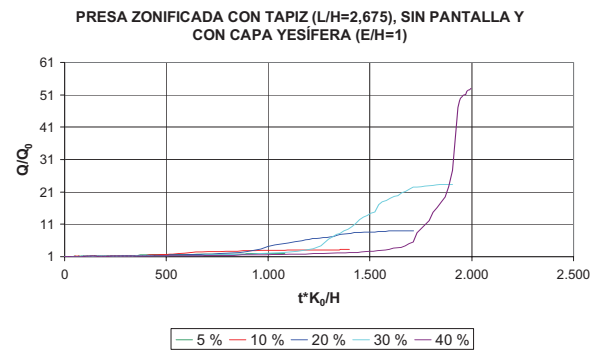


Gráfico tadim-Q/Q0

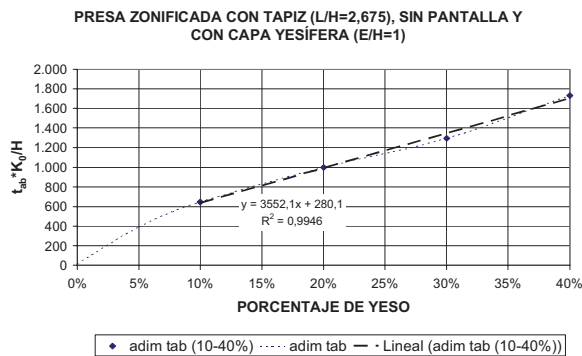


Gráfico porcentaje- t_{ab} adim

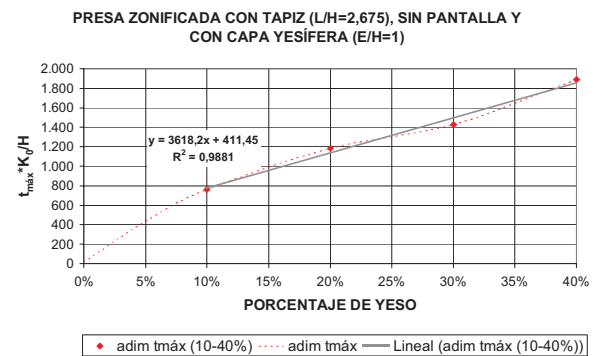


Gráfico porcentaje- $t_{máx}$ adim

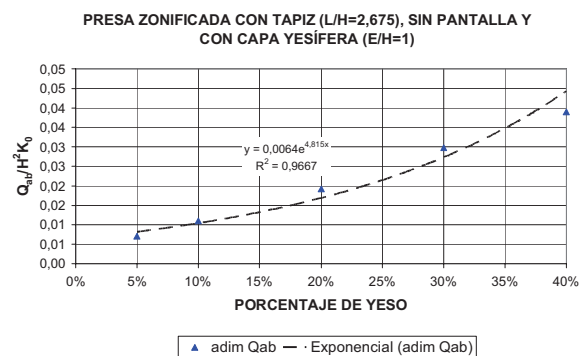


Gráfico porcentaje- Q_{ab} adim

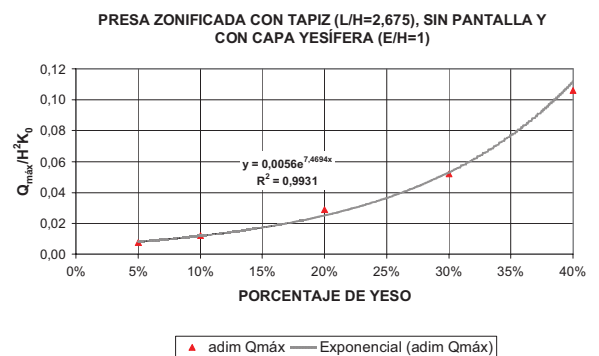


Gráfico porcentaje- $Q_{máx}$ adim

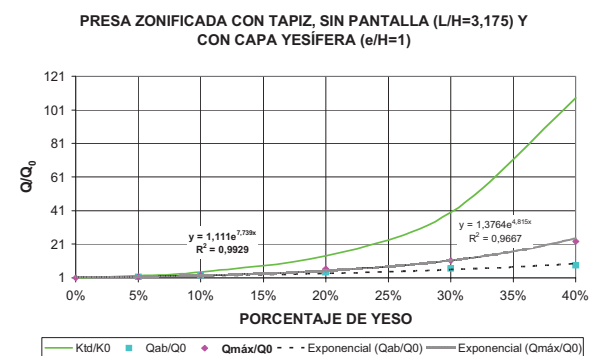


Gráfico porcentaje-Q/Q0

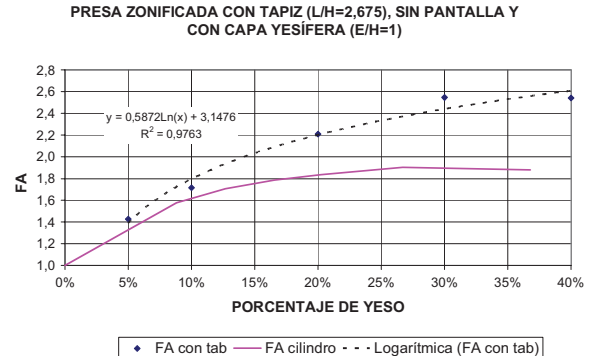
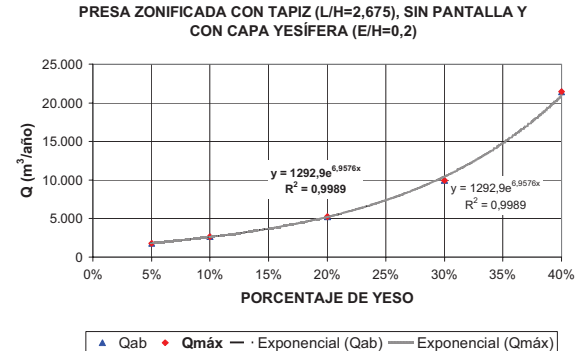
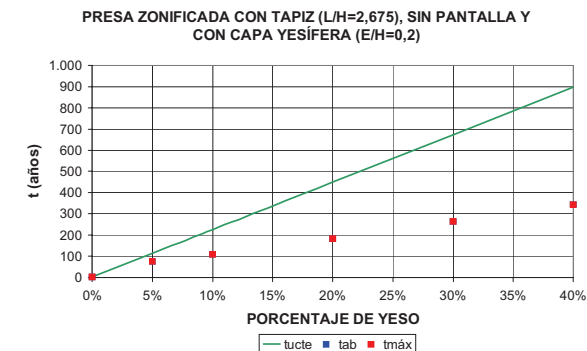
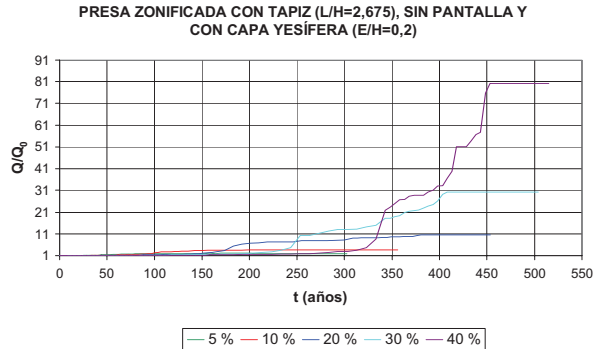
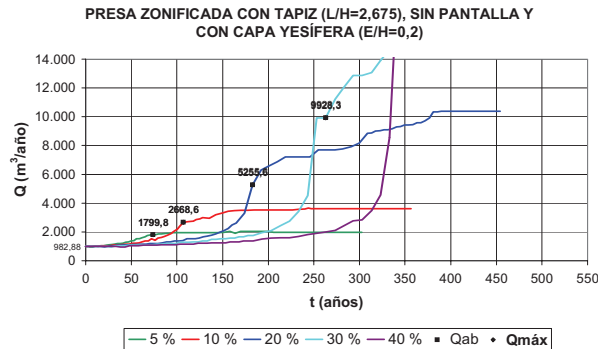
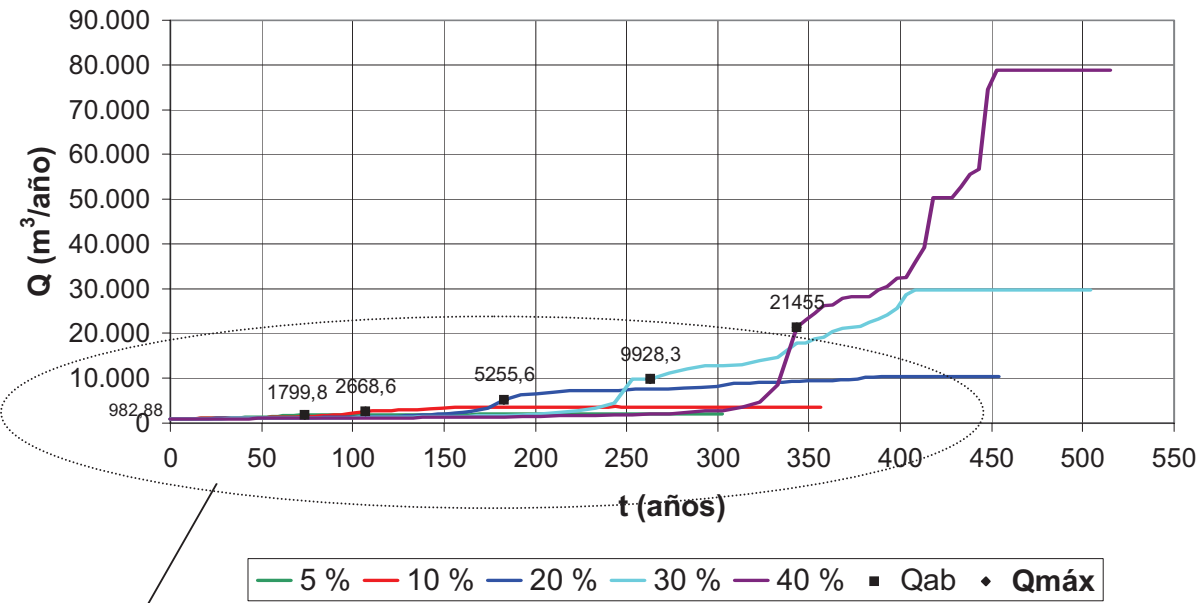


Gráfico porcentaje-FA

PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675), SIN PANTALLA Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=0,2)



H=50 m
K₀=315 m/año
K materiales fijadas

GRÁFICOS ZT0.2H

GRÁFICOS ADIMENSIONALES

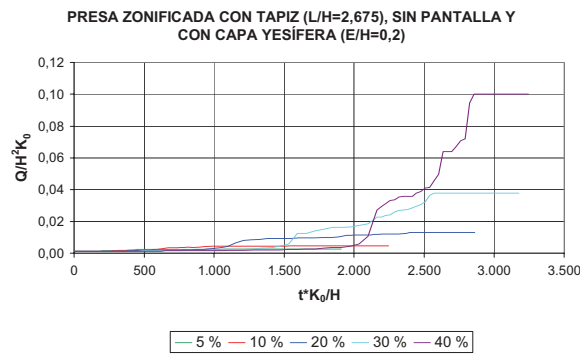


Gráfico tadim-Qadim

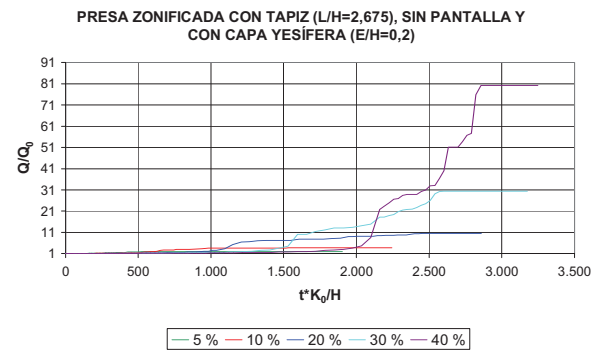


Gráfico tadim-Q/Q₀

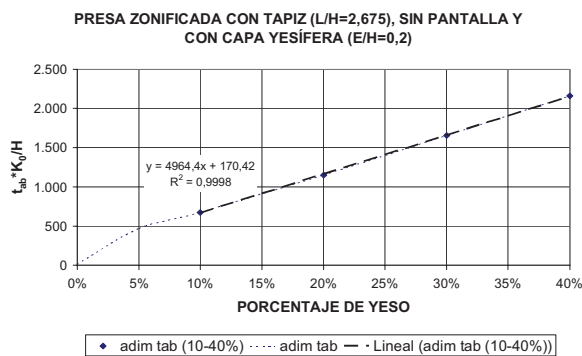


Gráfico porcentaje- t_{ab} adim

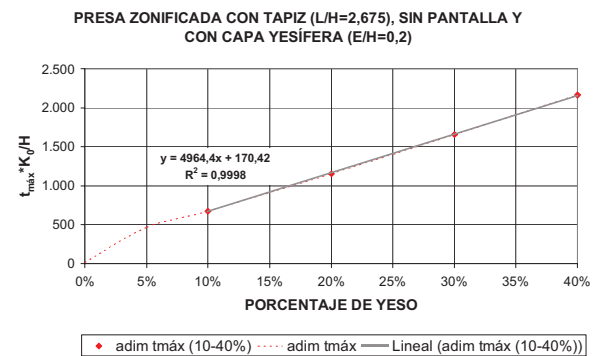


Gráfico porcentaje- $t_{máx}$ adim

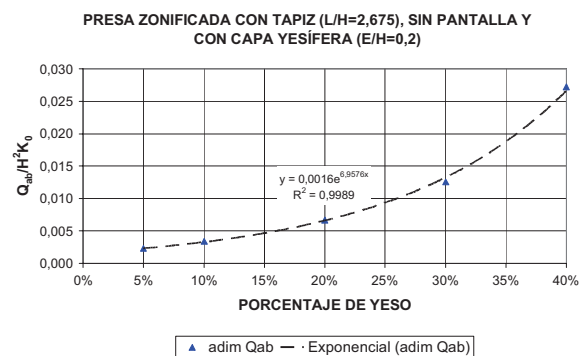


Gráfico porcentaje-Q_{ab}adim

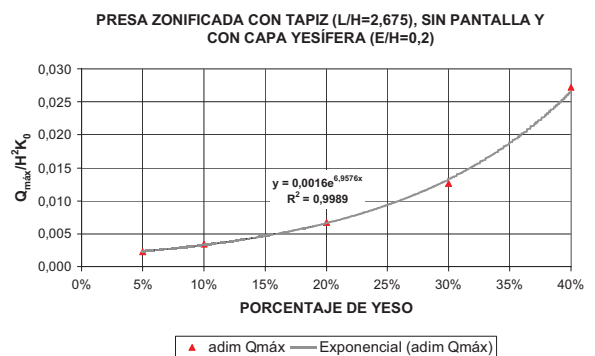


Gráfico porcentaje-Q_{máx}adim

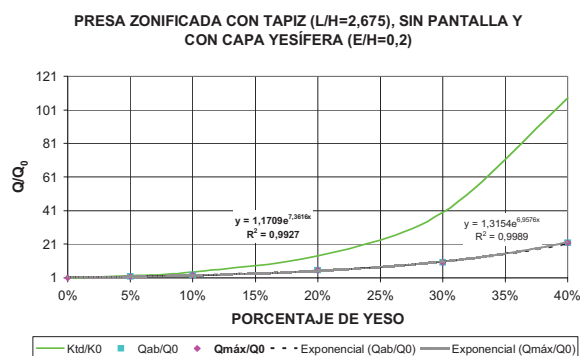


Gráfico porcentaje-Q/Q₀

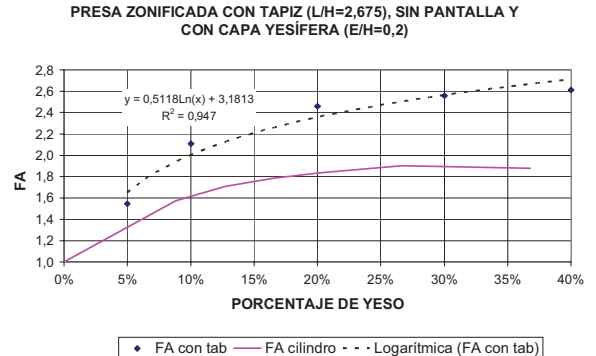
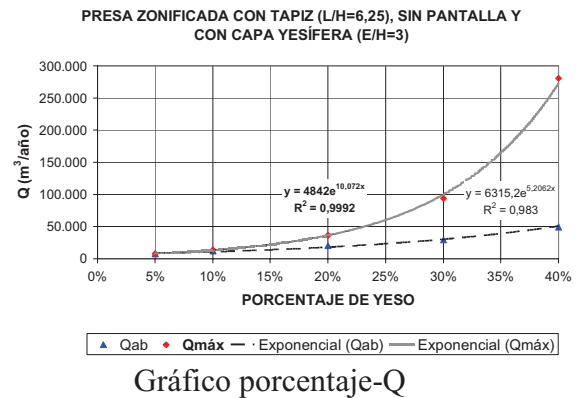
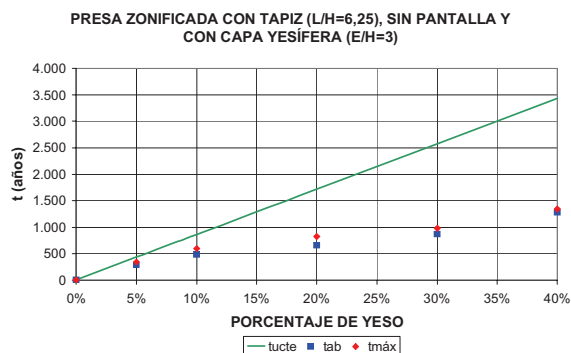
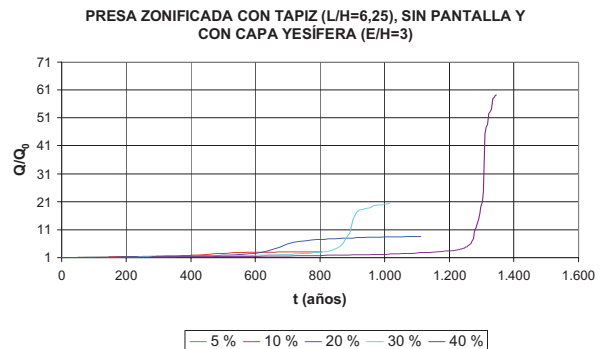
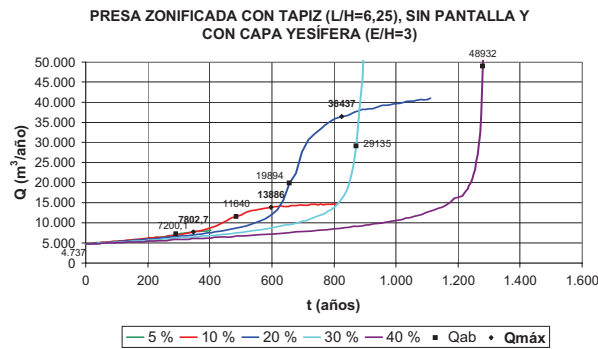
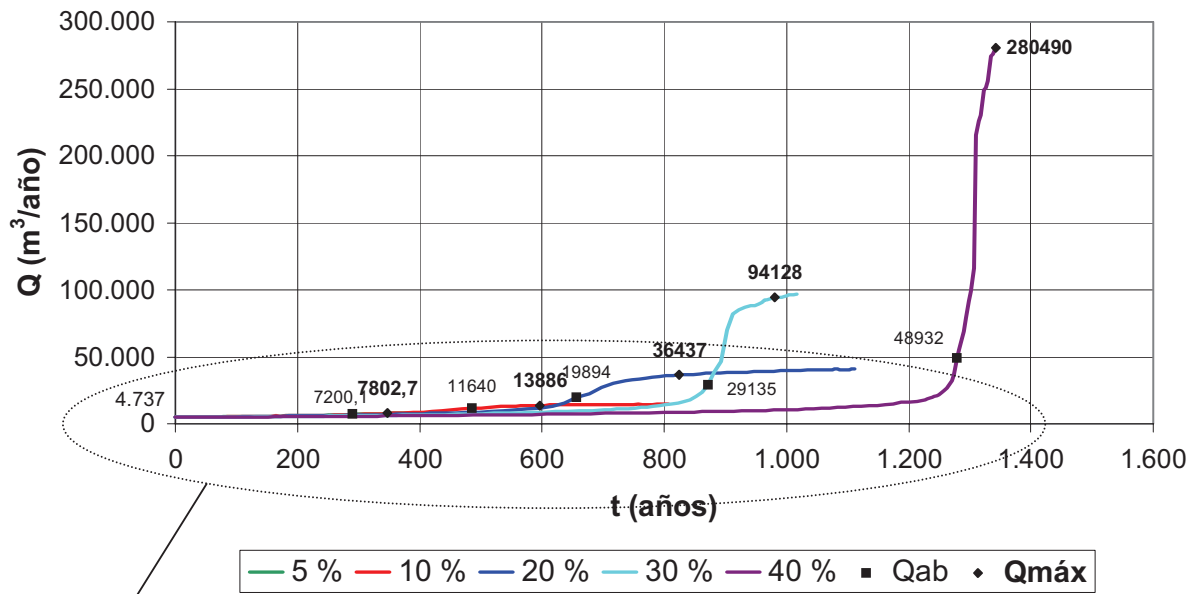


Gráfico porcentaje-FA

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



H=50 m
K₀=315 m/año
K materiales fijadas

GRÁFICOS ZTT3H

GRÁFICOS ADIMENSIONALES

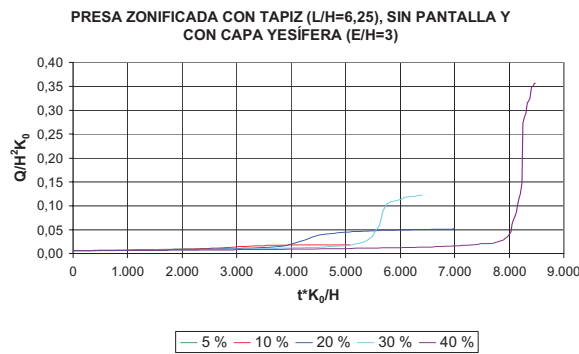


Gráfico tadim-Qadim

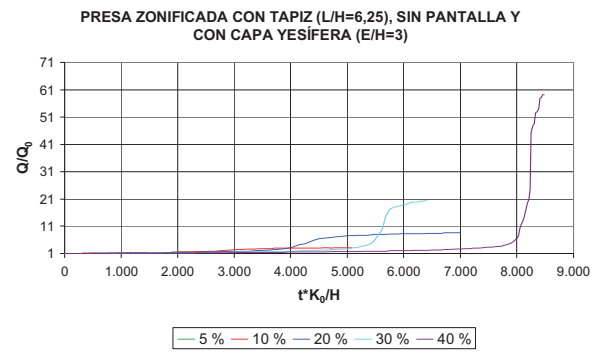


Gráfico tadim-Q/Q0

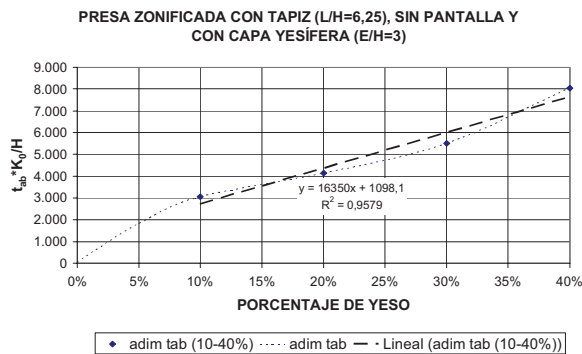


Gráfico porcentaje-t_{ab}adim

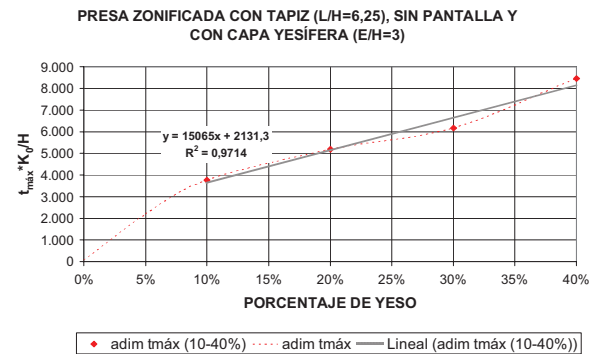


Gráfico porcentaje-t_{máx}adim

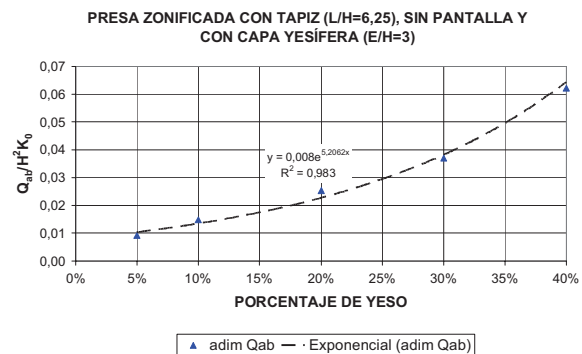


Gráfico porcentaje-Q_{ab}adim

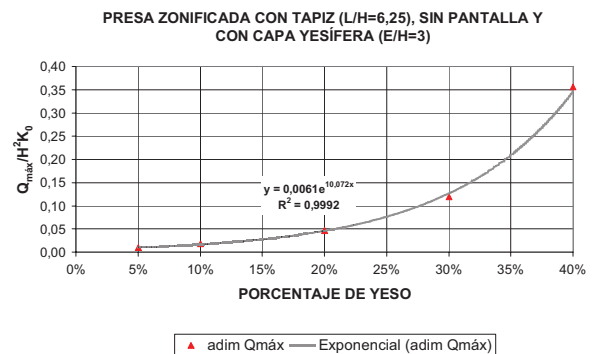


Gráfico porcentaje-Q_{máx}adim

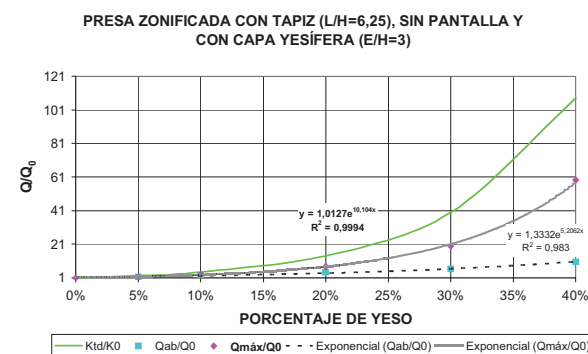


Gráfico porcentaje-Q/Q0

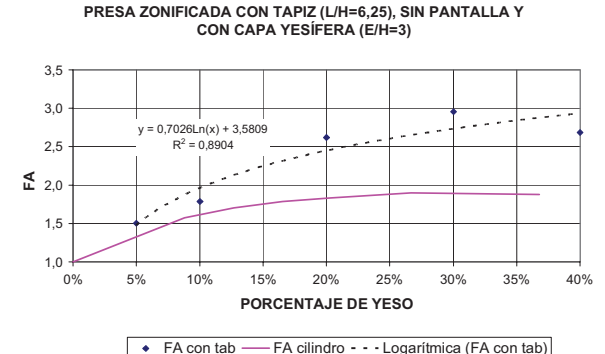
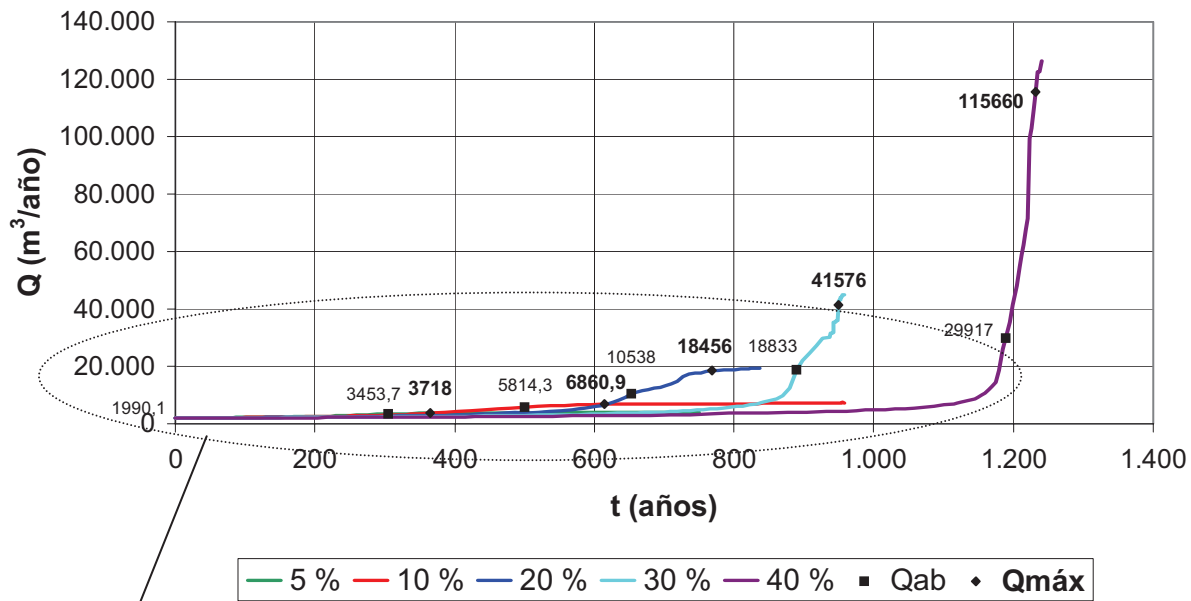


Gráfico porcentaje-FA

PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=6,25), SIN PANTALLA Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=1)



PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=6,25), SIN PANTALLA Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=1)

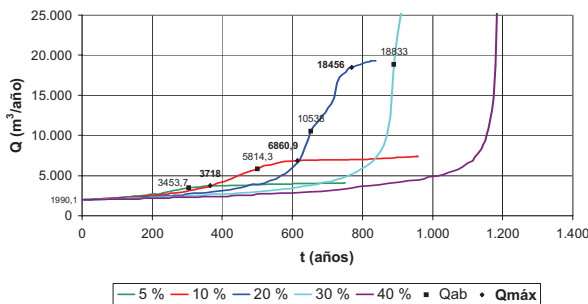


Gráfico t-Q (zoom)

PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=6,25), SIN PANTALLA Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=1)

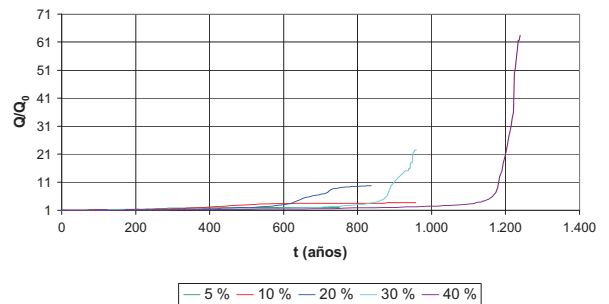


Gráfico t-Q/Q₀

PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=6,25), SIN PANTALLA Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=1)

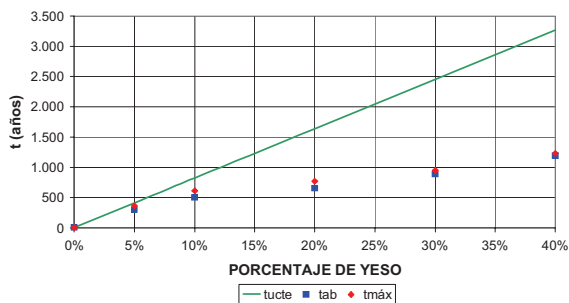


Gráfico porcentaje-t

PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=6,25), SIN PANTALLA Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=1)

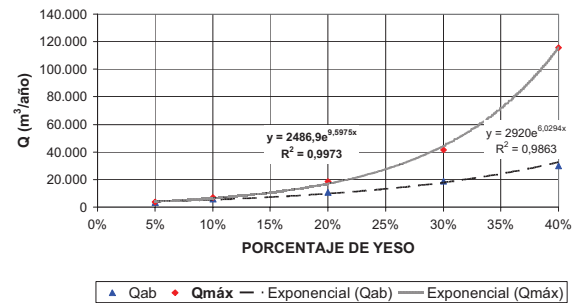


Gráfico porcentaje-Q

H=50 m
K₀=315 m/año
K materiales fijadas

GRÁFICOS ZTTIH

GRÁFICOS ADIMENSIONALES

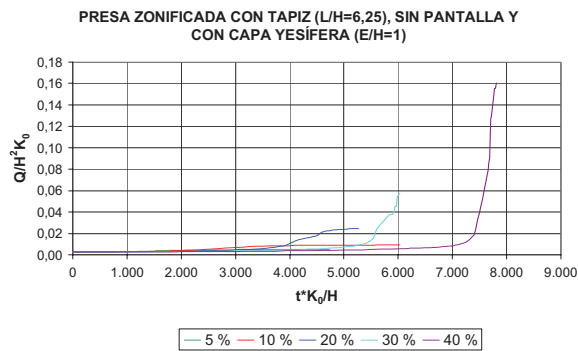


Gráfico tadim-Qadim

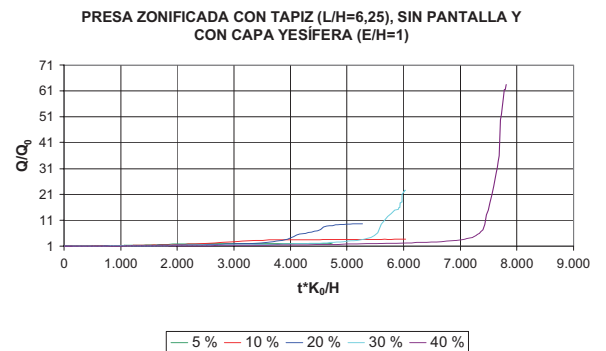


Gráfico tadim-Q/Q₀

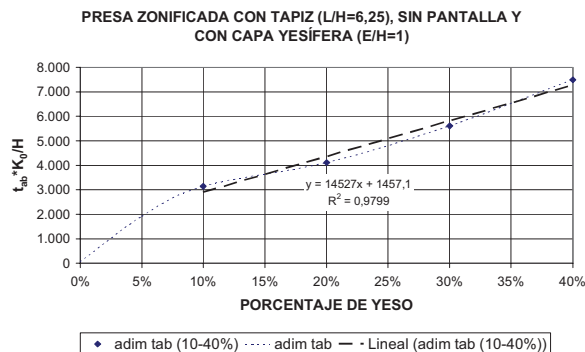


Gráfico porcentaje- t_{ab} adim

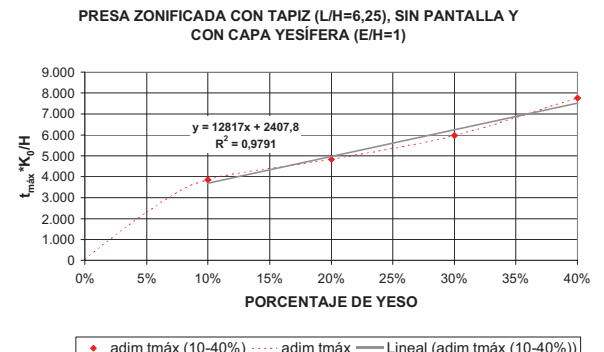


Gráfico porcentaje- $t_{máx}$ adim

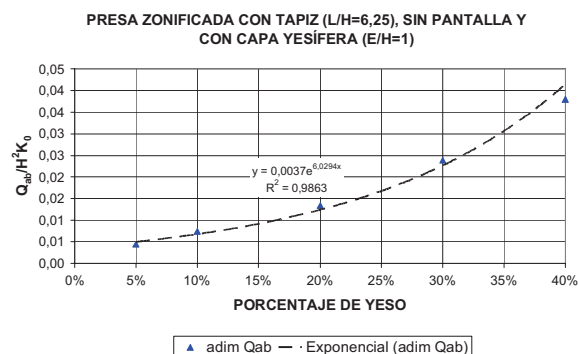


Gráfico porcentaje- Q_{ab} adim

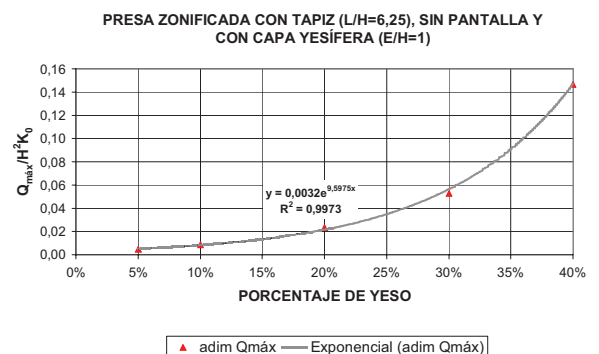


Gráfico porcentaje- $Q_{máx}$ adim

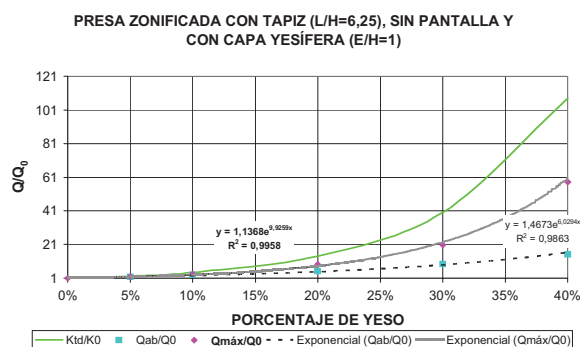
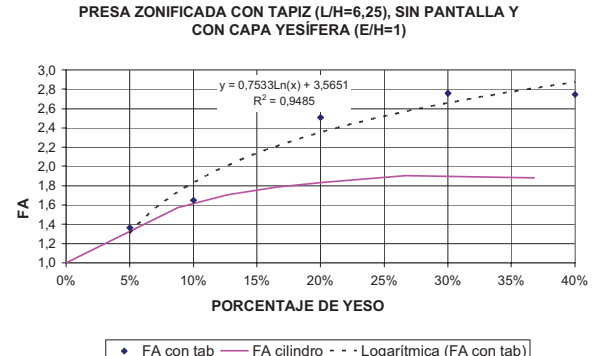
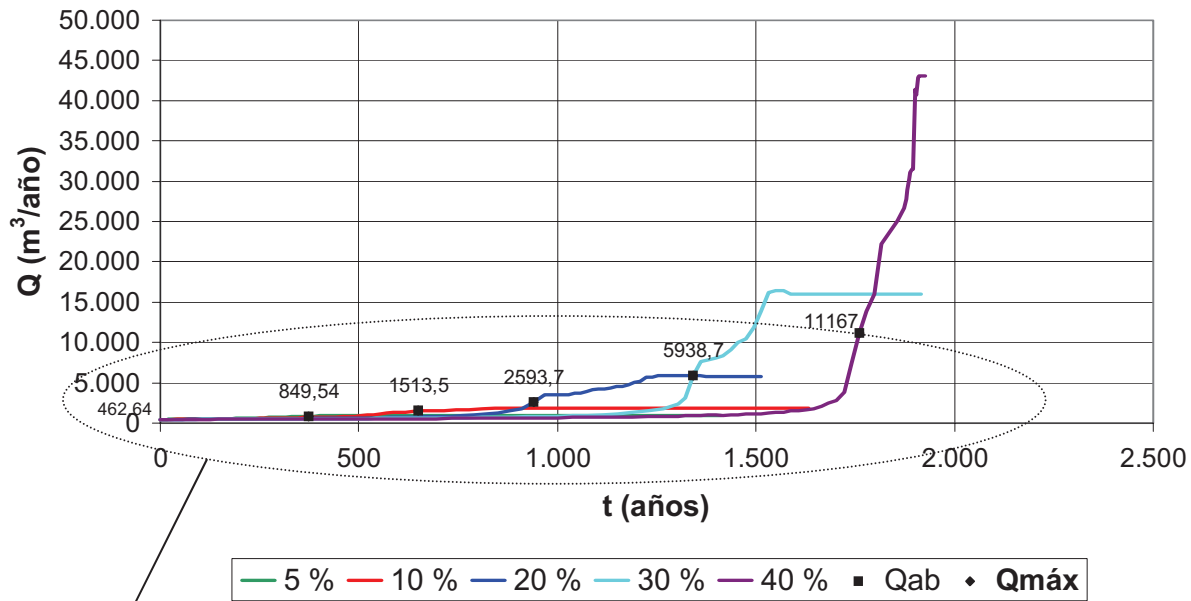


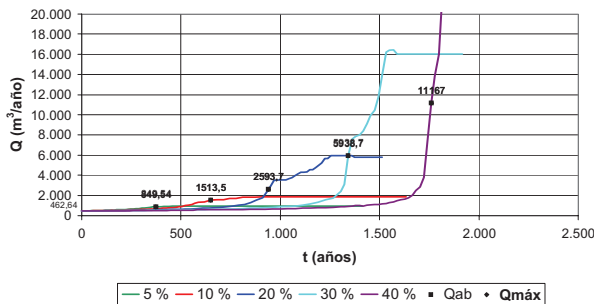
Gráfico porcentaje-Q/Q₀



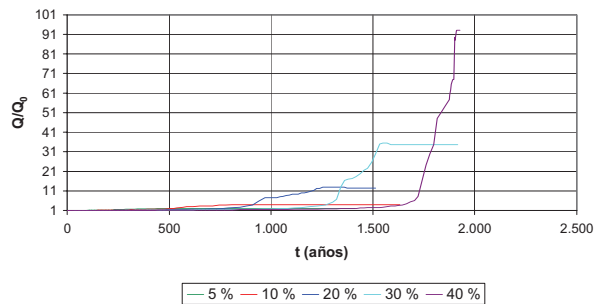
PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=6,25), SIN PANTALLA Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=0,2)



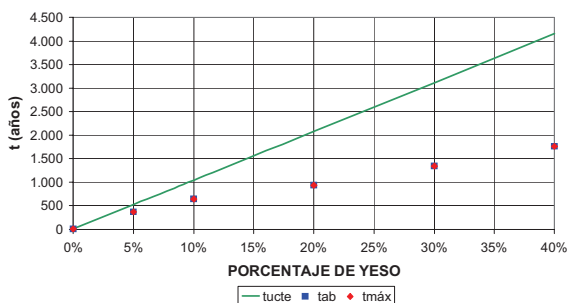
PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=6,25), SIN PANTALLA Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=0,2)



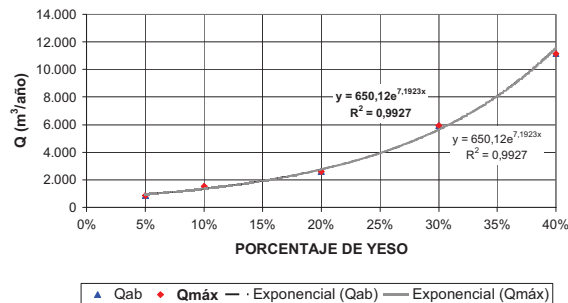
PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=6,25), SIN PANTALLA Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=0,2)



PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=6,25), SIN PANTALLA Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=0,2)



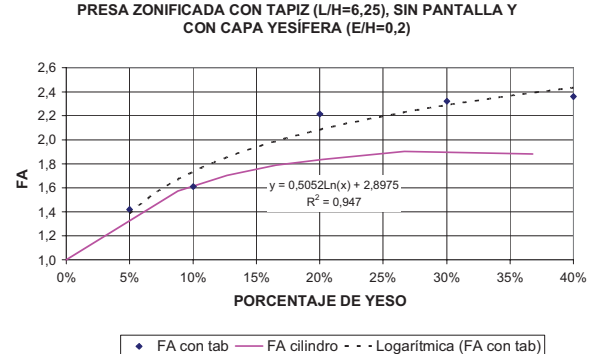
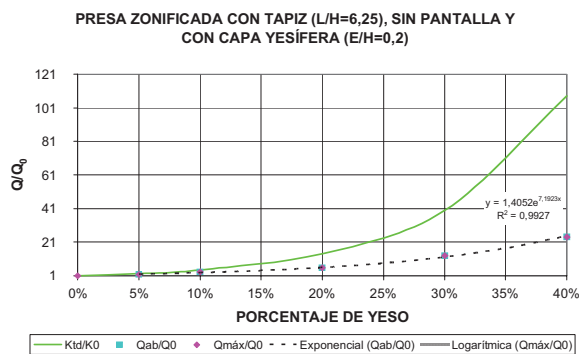
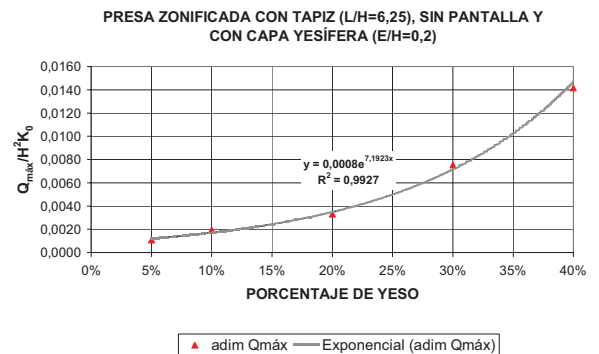
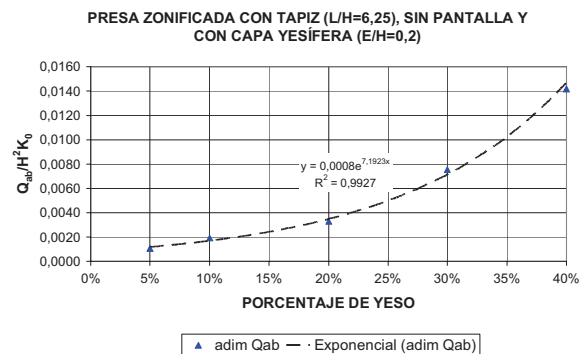
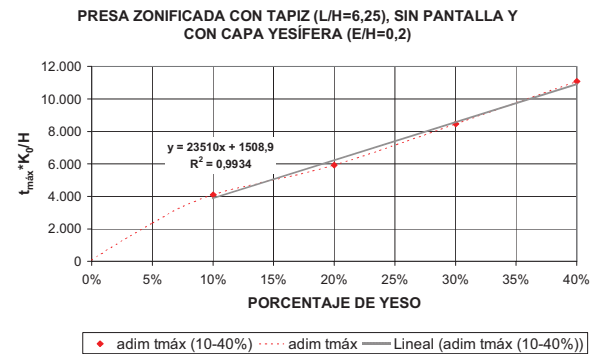
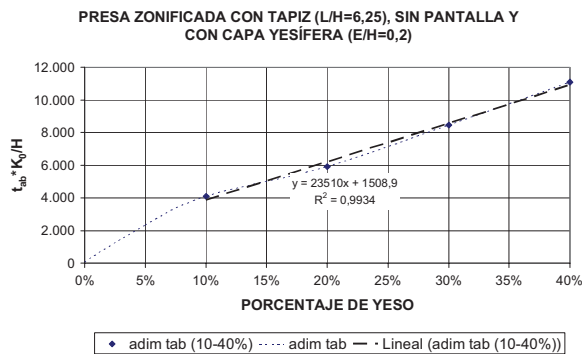
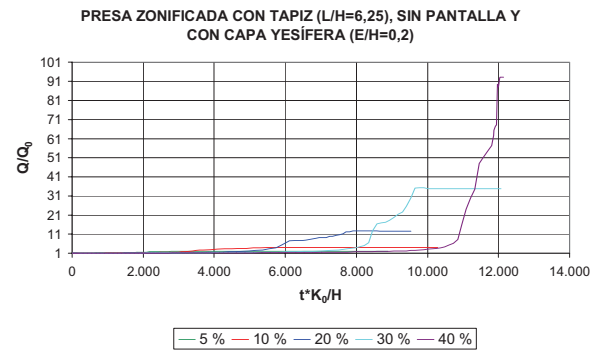
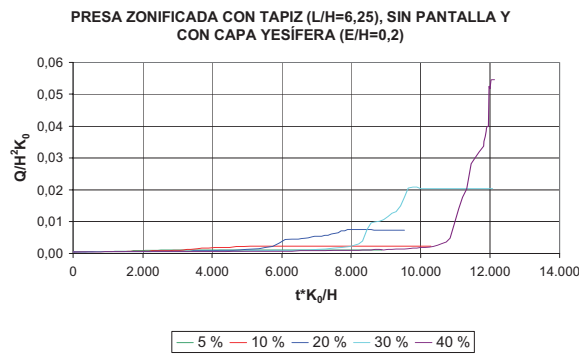
PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=6,25), SIN PANTALLA Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=0,2)



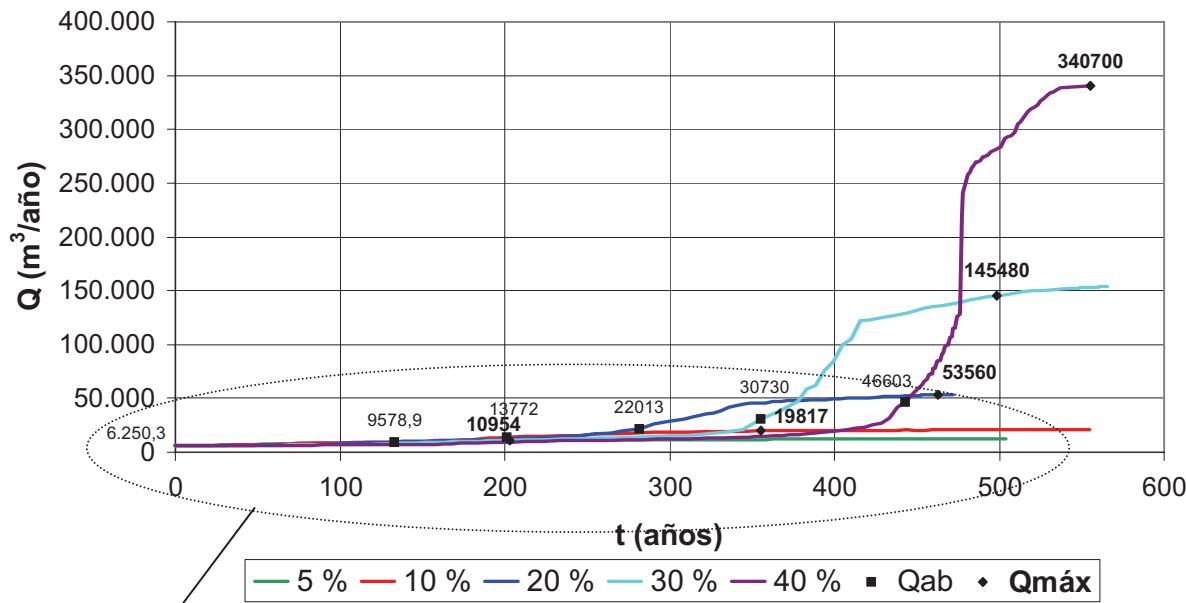
H=50 m
K₀=315 m/año
K materiales fijadas

GRÁFICOS ZTT0.2H

GRÁFICOS ADIMENSIONALES



PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675) Y PANTALLA
ARRIBA (P/H=1) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)



PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675) Y PANTALLA
ARRIBA (P/H=1) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)

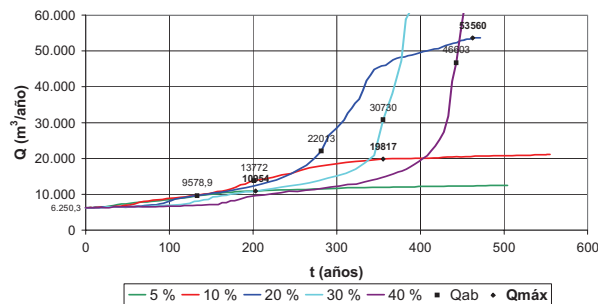


Gráfico t-Q (zoom)

PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675) Y PANTALLA
ARRIBA (P/H=1) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)

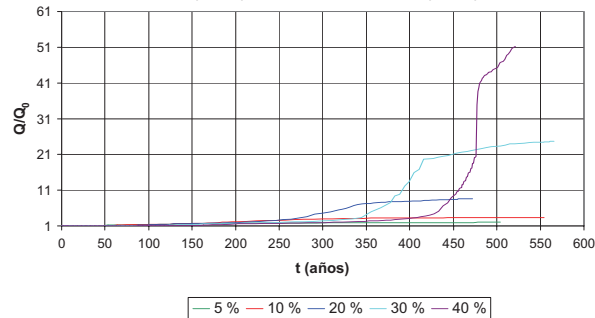


Gráfico t-Q/Q₀

PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675) Y PANTALLA
ARRIBA (P/H=1) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)

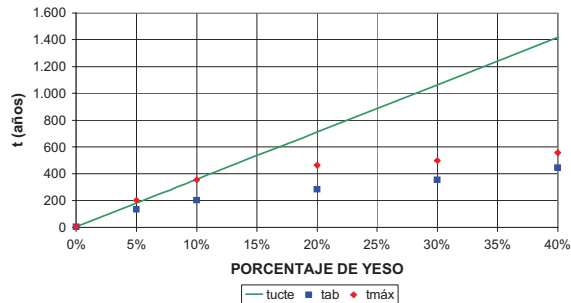


Gráfico porcentaje-t

PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675) Y PANTALLA
ARRIBA (P/H=1) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)

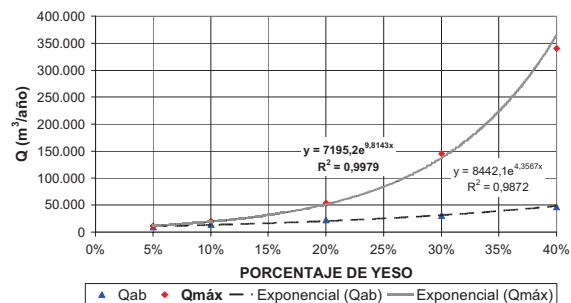


Gráfico porcentaje-Q

H=50 m
K₀=315 m/año
K materiales fijadas

GRÁFICOS ZTPR3H1

GRÁFICOS ADIMENSIONALES

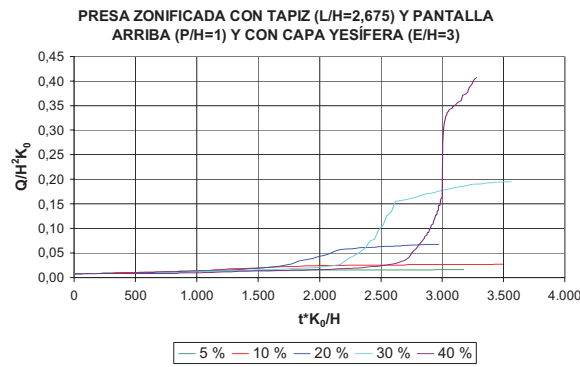


Gráfico tadim-Qadim

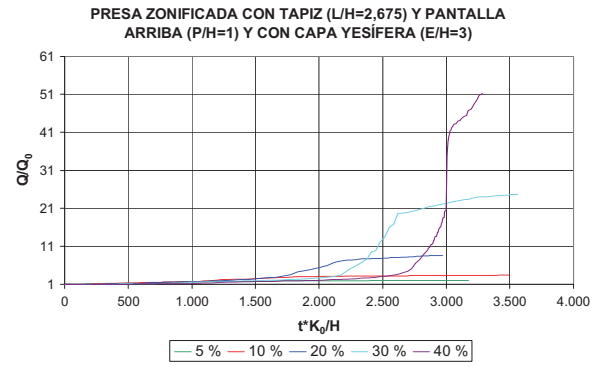


Gráfico tadim-Q/Q₀

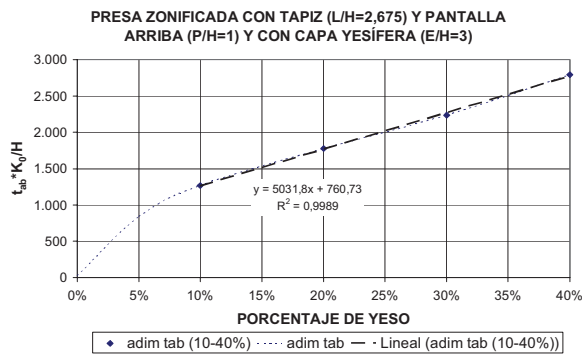


Gráfico porcentaje- t_{adim}

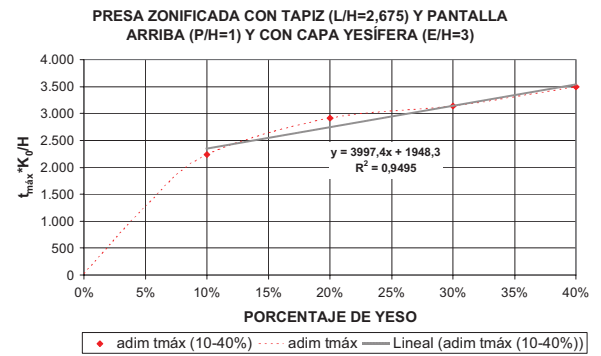


Gráfico porcentaje- $t_{máx}$ adim

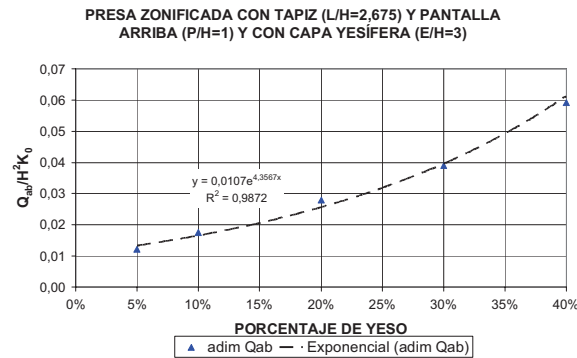


Gráfico porcentaje- Q_{ab} adim

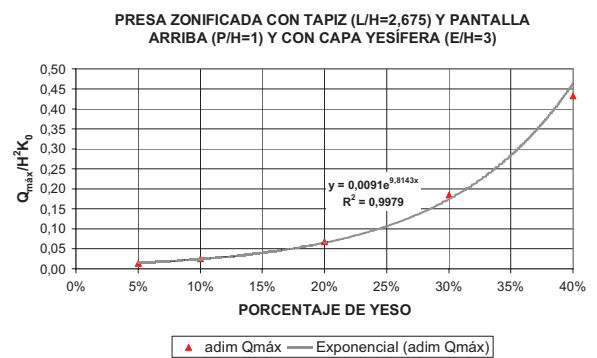


Gráfico porcentaje- $Q_{máx}$ adim

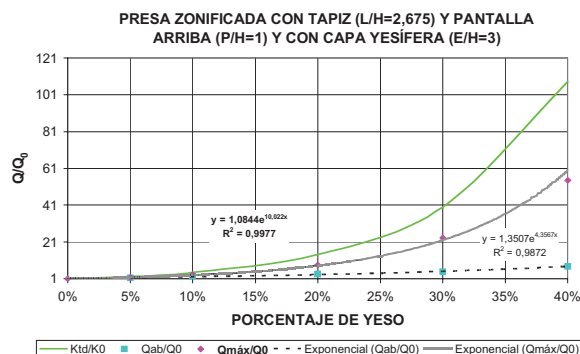


Gráfico porcentaje-Q/Q₀

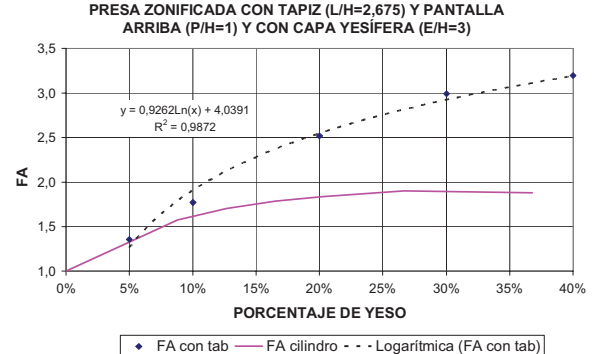
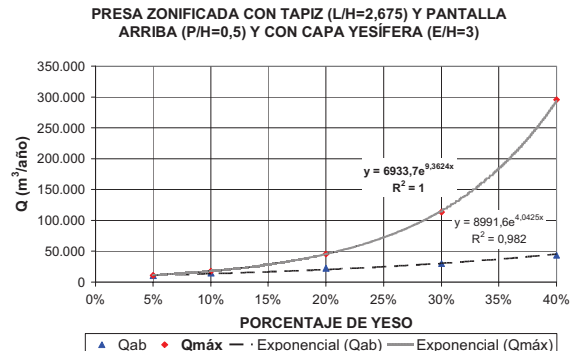
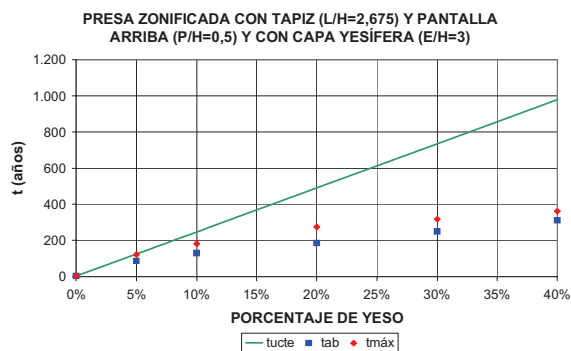
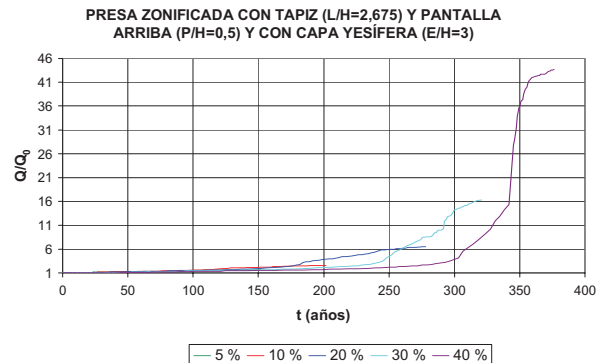
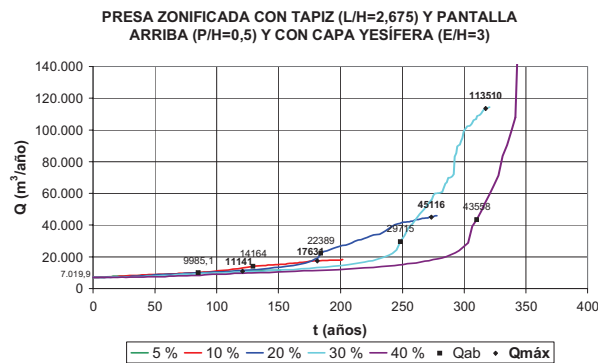
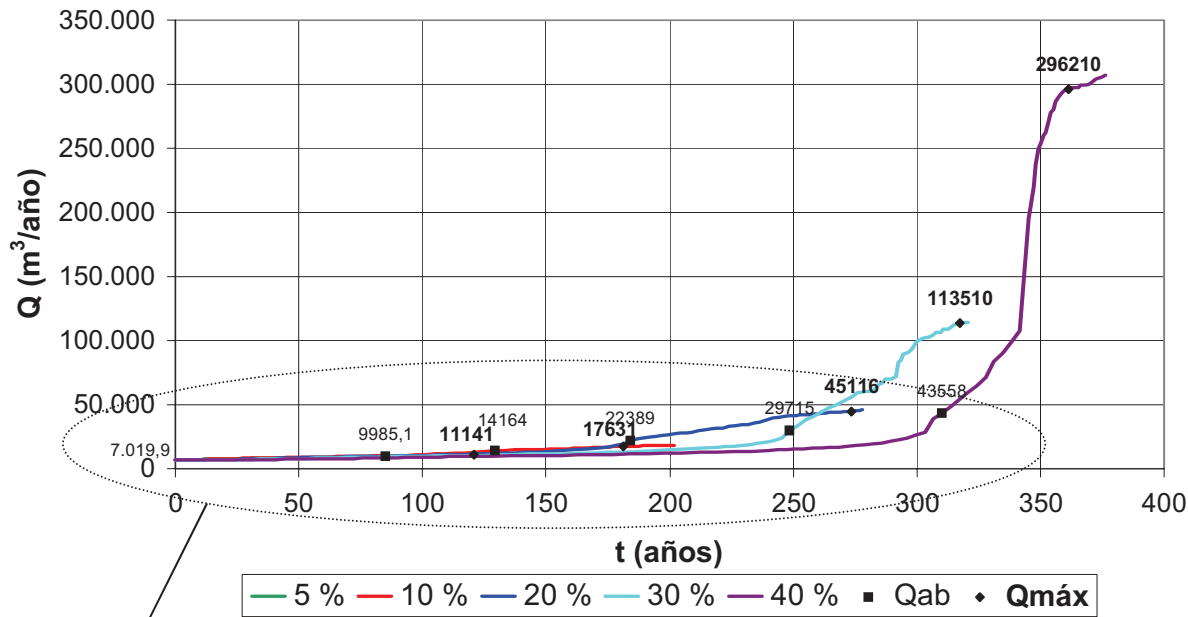


Gráfico porcentaje-FA

PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675) Y PANTALLA ARRIBA (P/H=0,5) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)



H=50 m
K₀=315 m/año
K materiales fijadas

GRÁFICOS ADIMENSIONALES

PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675) Y PANTALLA ARRIBA (P/H=0,5) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)

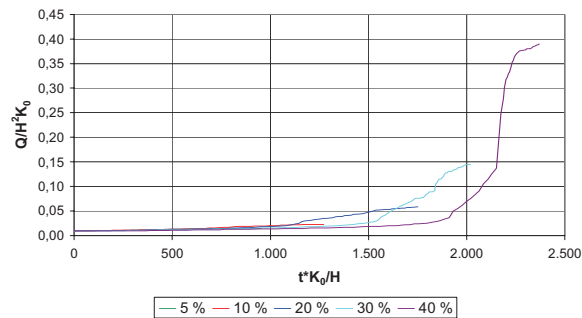


Gráfico tadim-Qadim

PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675) Y PANTALLA ARRIBA (P/H=0,5) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)

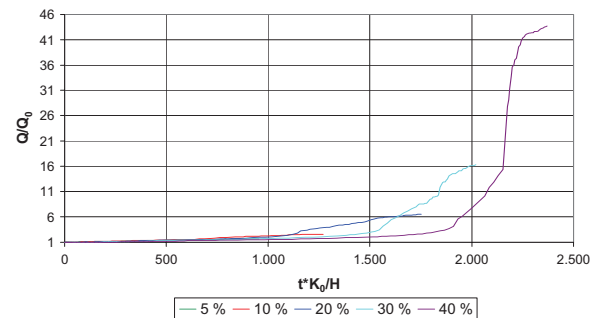


Gráfico tadim-Q/Q₀

PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675) Y PANTALLA ARRIBA (P/H=0,5) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)

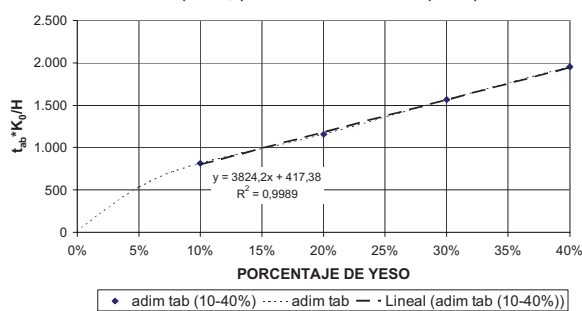


Gráfico porcentaje-t_{adim}

PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675) Y PANTALLA ARRIBA (P/H=0,5) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)

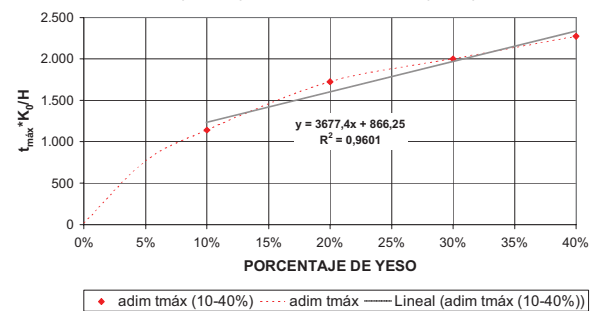


Gráfico porcentaje-t_{máx} adim

PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675) Y PANTALLA ARRIBA (P/H=0,5) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)

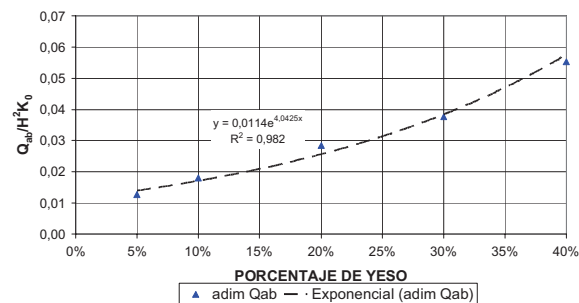


Gráfico porcentaje-Q_{ab} adim

PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675) Y PANTALLA ARRIBA (P/H=0,5) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)

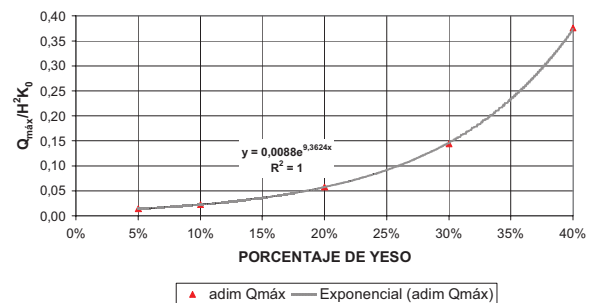


Gráfico porcentaje-Q_{máx} adim

PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675) Y PANTALLA ARRIBA (P/H=0,5) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)

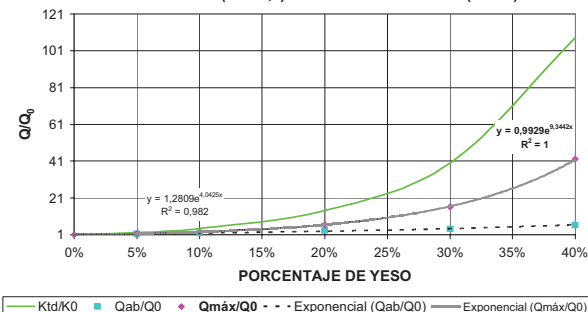


Gráfico porcentaje-Q/Q₀

PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675) Y PANTALLA ARRIBA (P/H=0,5) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)

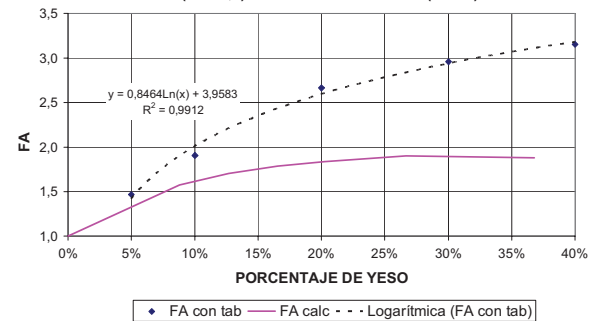
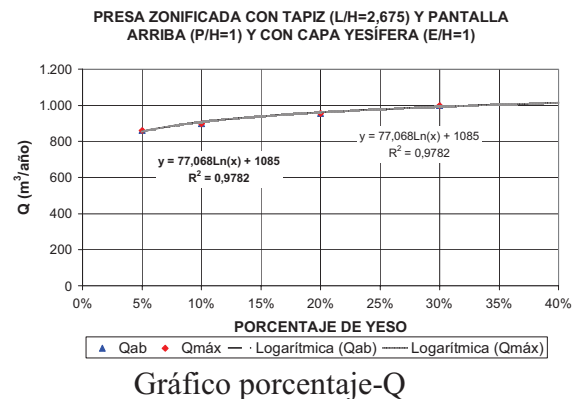
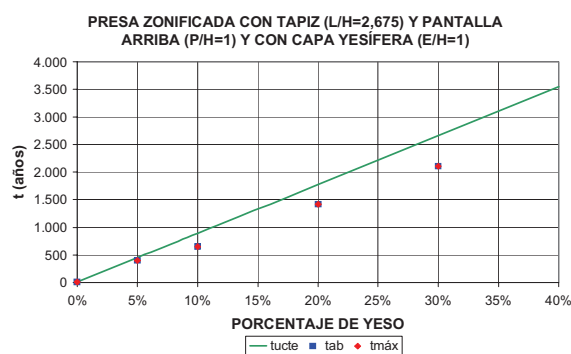
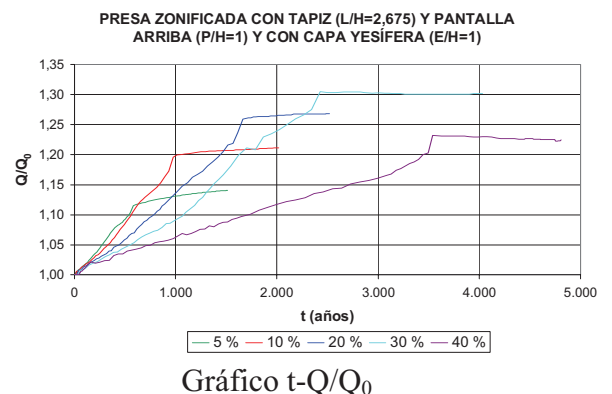
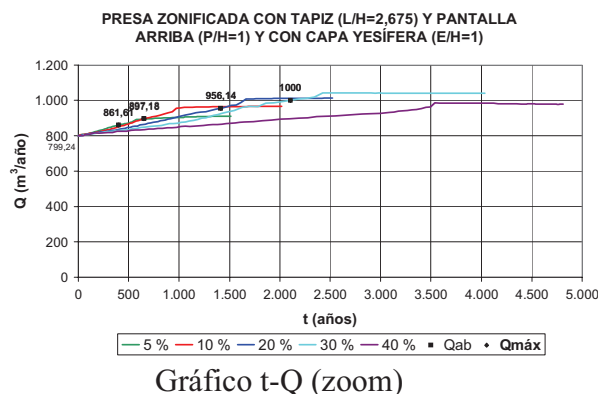
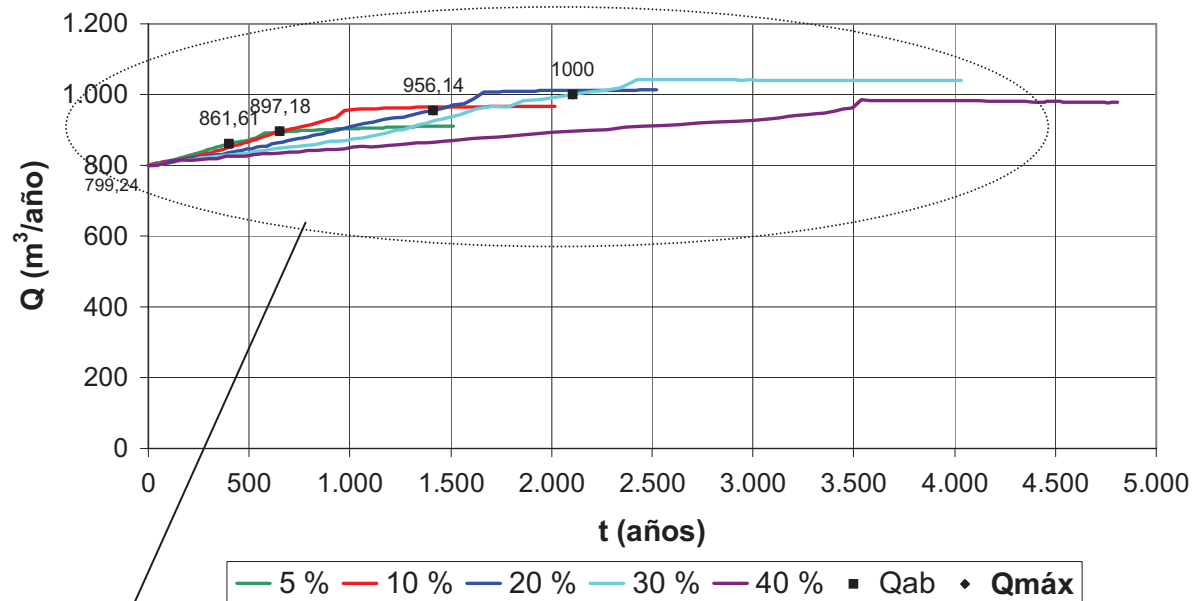


Gráfico porcentaje-FA

PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675) Y PANTALLA ARRIBA (P/H=1) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=1)

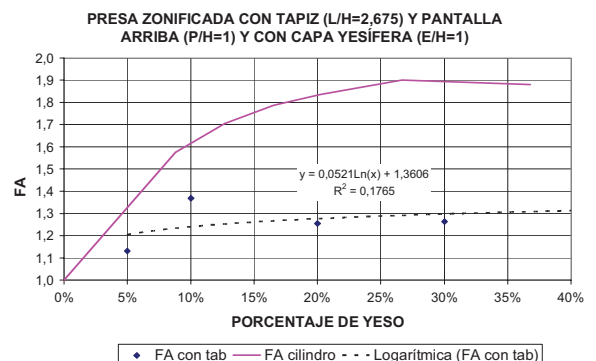
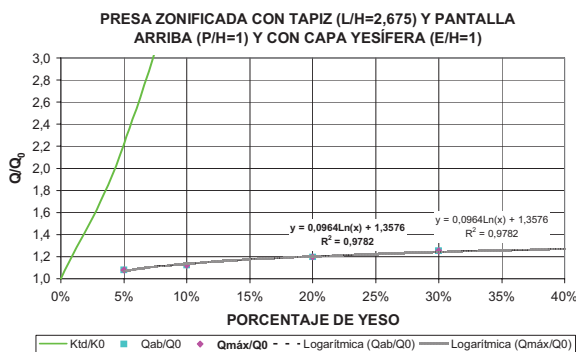
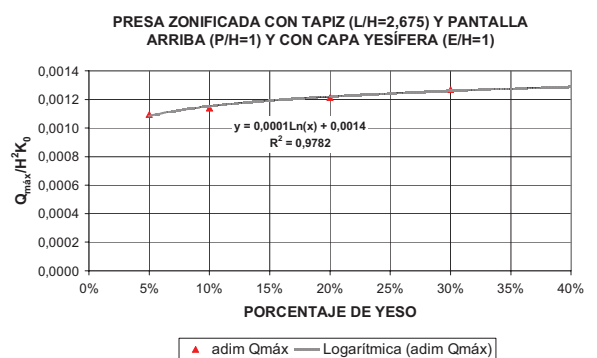
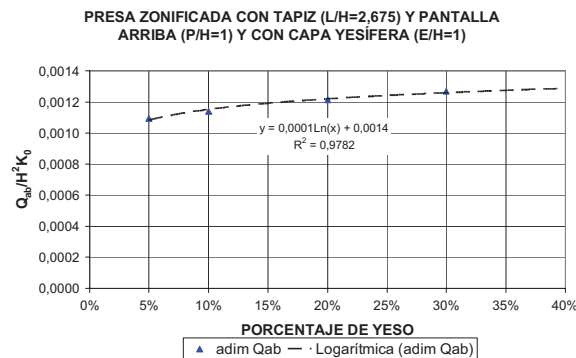
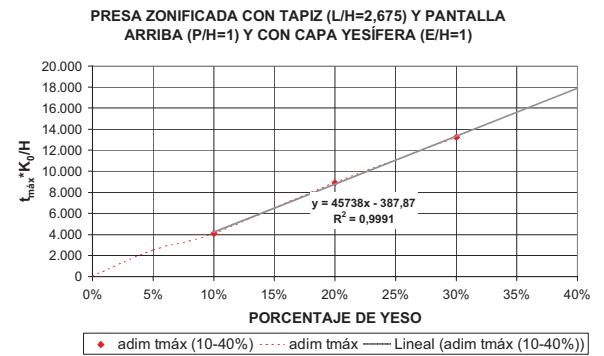
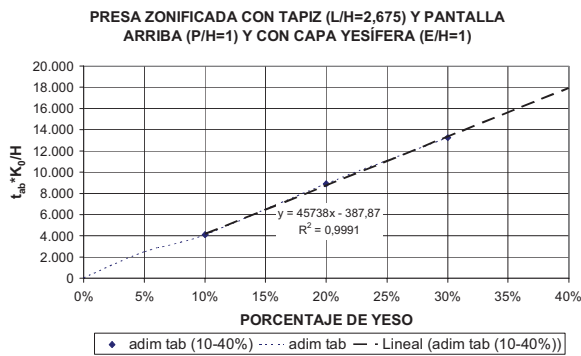
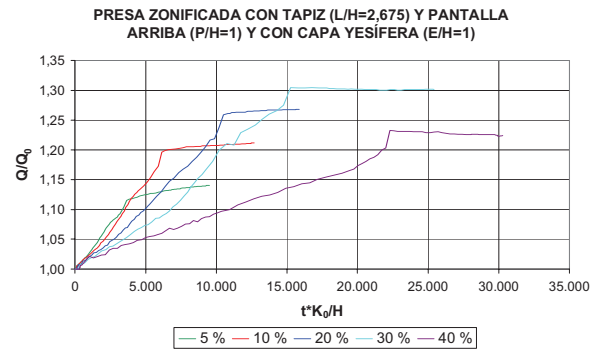
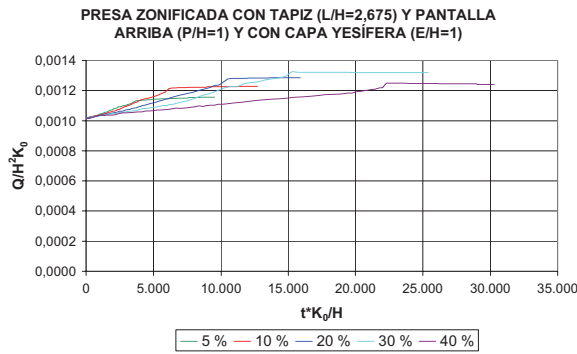


H=50 m
K₀=315 m/año
K materiales fijadas

Nota: el 40% no lo considero en los ajustes, porque al secarse el espaldón de aguas abajo le cuesta rellenar y no es representativo

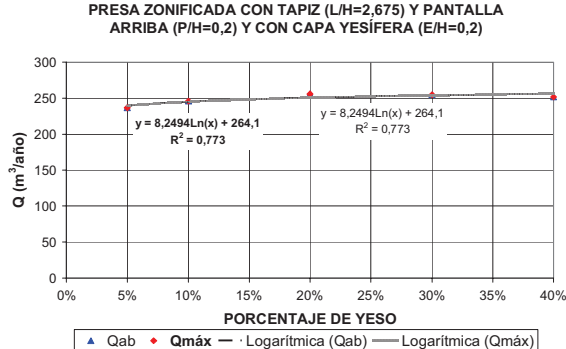
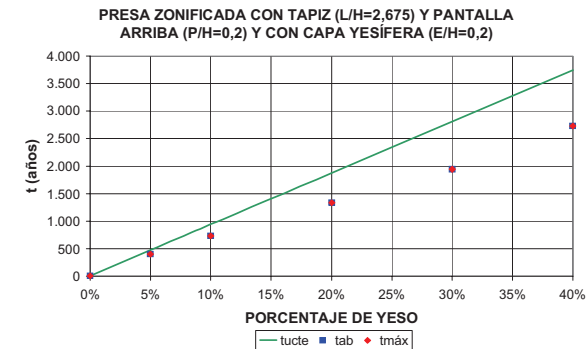
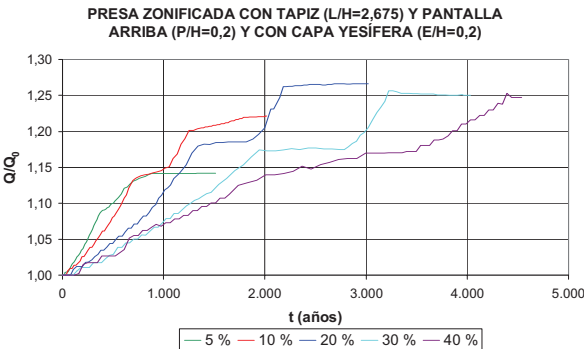
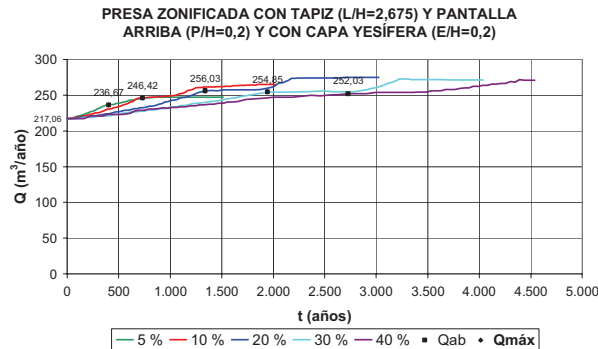
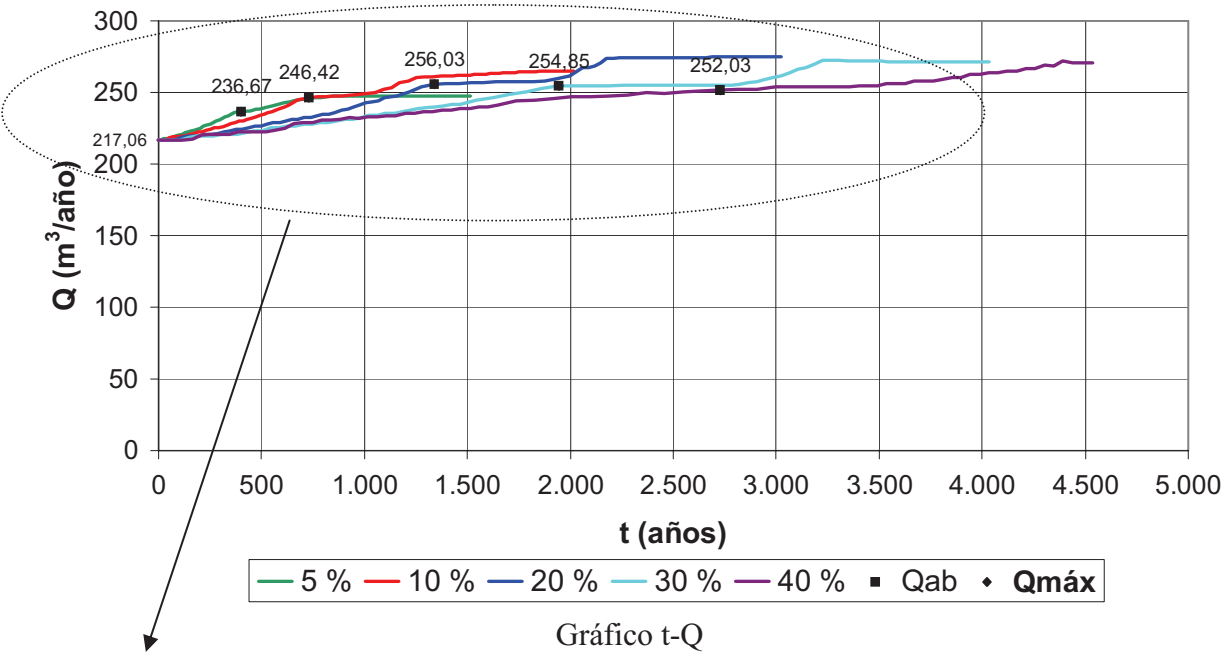
GRÁFICOS ZTPR1H

GRÁFICOS ADIMENSIONALES



Nota: el 40% no lo considero en los ajustes, porque al secarse el espaldón de aguas abajo le cuesta rellenar y no es representativo

PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675) Y PANTALLA ARRIBA (P/H=0,2) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=0,2)



H=50 m
K₀=315 m/año
K materiales fijadas

GRÁFICOS ZTPR0.2H

GRÁFICOS ADIMENSIONALES

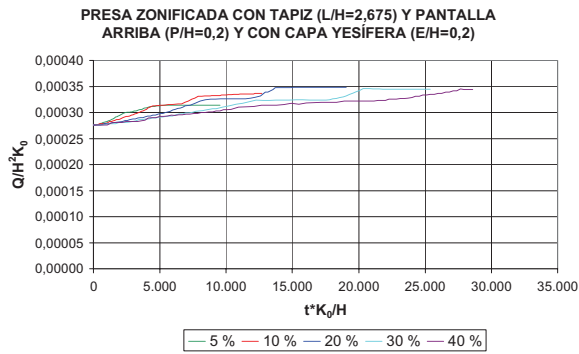


Gráfico tadim-Qadim

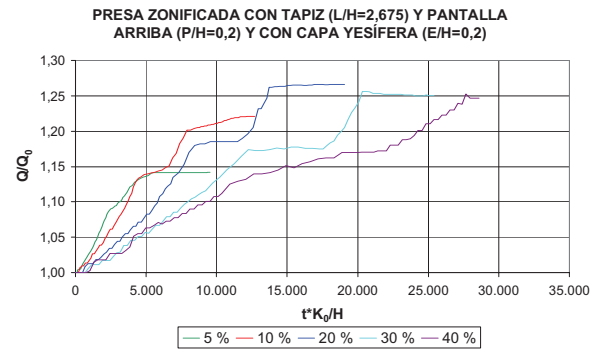


Gráfico tadim-Q/Q₀

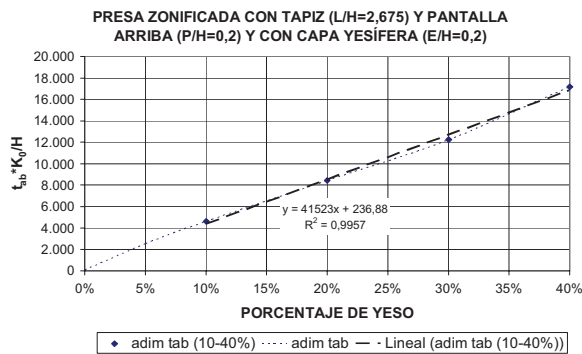


Gráfico porcentaje-t_{ab}adim

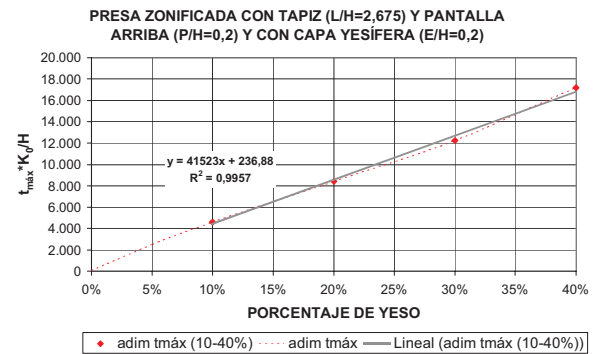


Gráfico porcentaje-t_{máx}adim

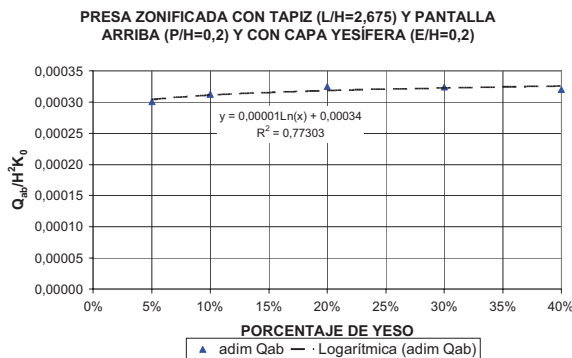


Gráfico porcentaje-Q_{ab}adim

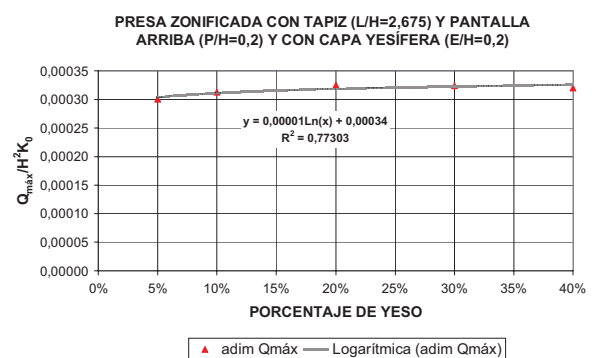


Gráfico porcentaje-Q_{máx}adim

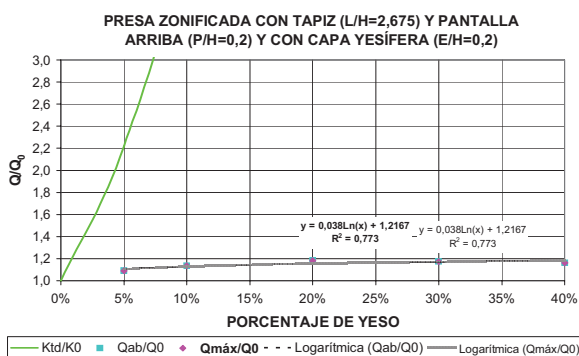


Gráfico porcentaje-Q/Q₀

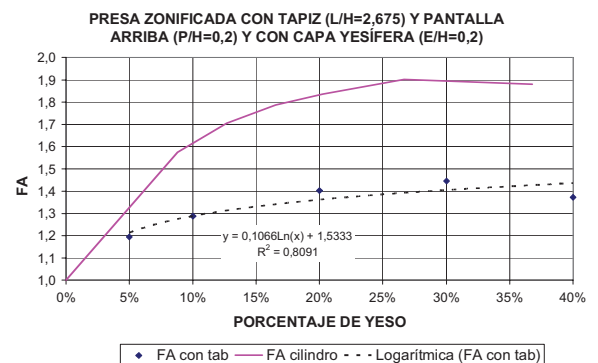
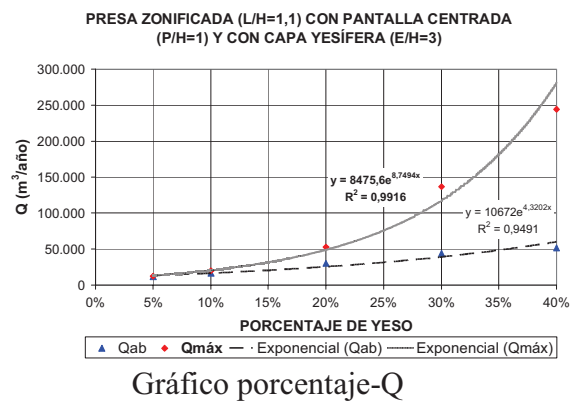
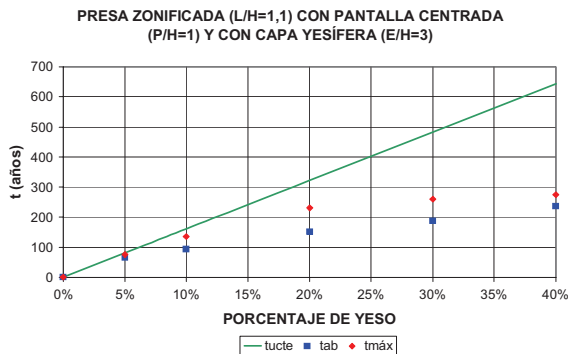
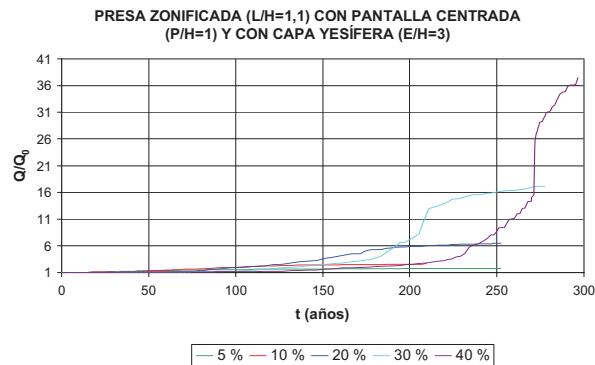
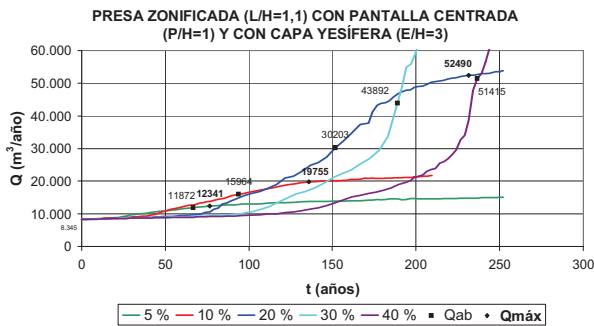
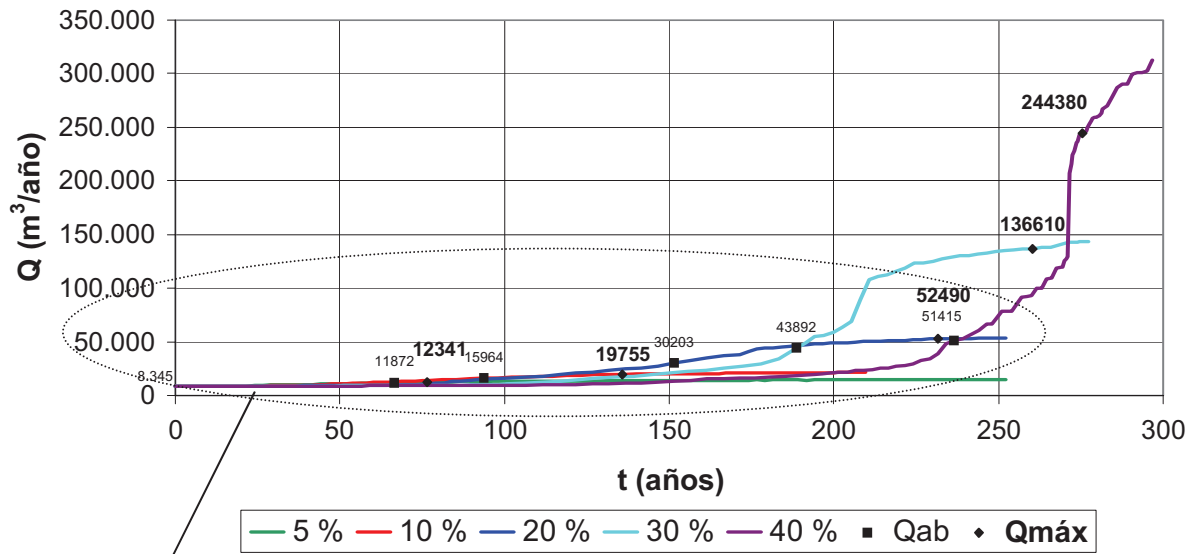


Gráfico porcentaje-FA

PRESA ZONIFICADA (L/H=1,1) CON PANTALLA CENTRADA (P/H=1) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)



H=50 m
K₀=315 m/año
K materiales fijadas

GRÁFICOS ZPC3H1

GRÁFICOS ADIMENSIONALES

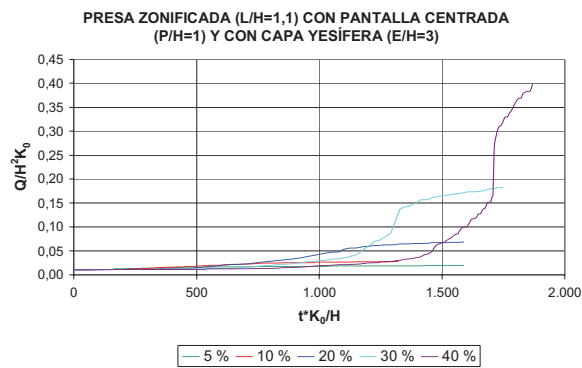


Gráfico tadim-Qadim

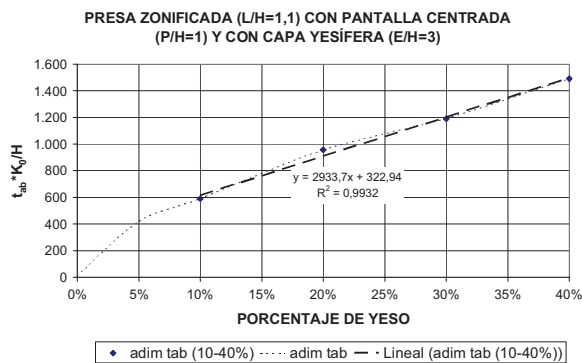


Gráfico porcentaje-t_{ab}adim

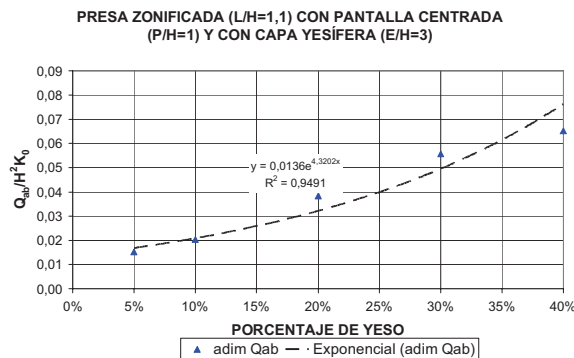


Gráfico porcentaje-Q_{ab}adim

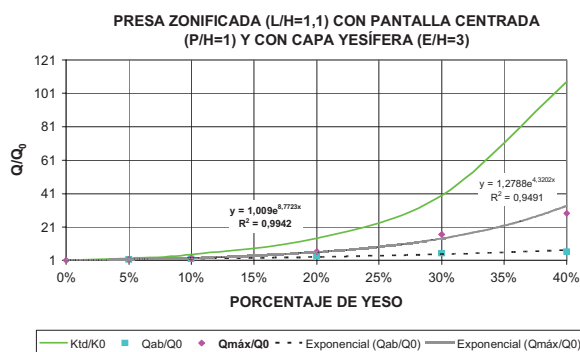


Gráfico porcentaje-Q/Q₀

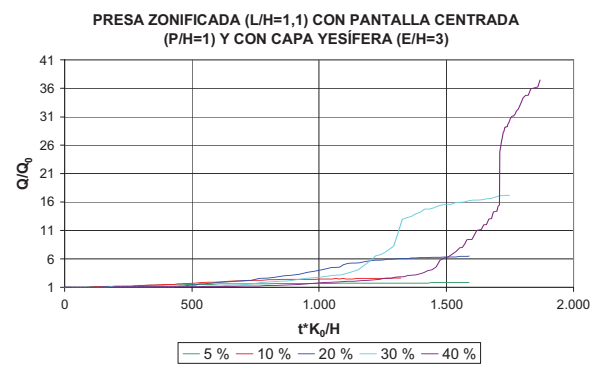


Gráfico tadim-Q/Q₀

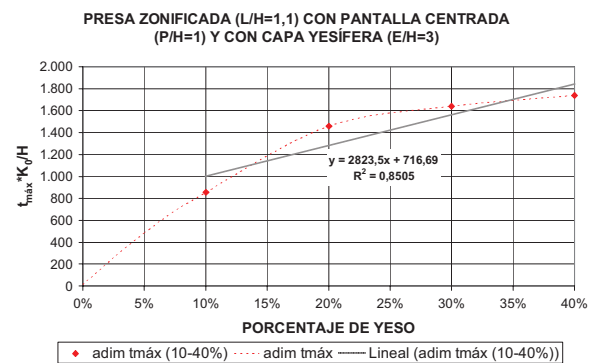


Gráfico porcentaje-t_{máx}adim

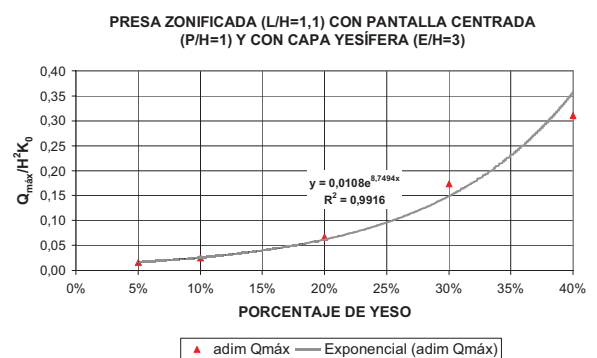


Gráfico porcentaje-Q_{máx}adim

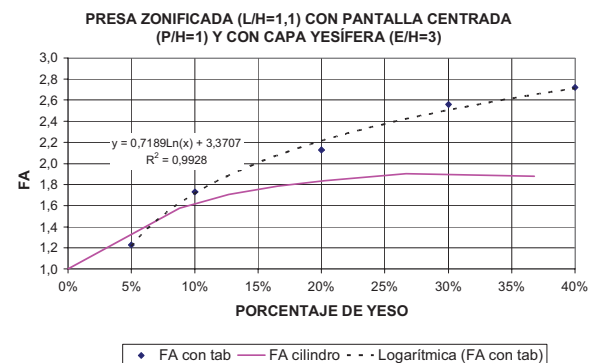
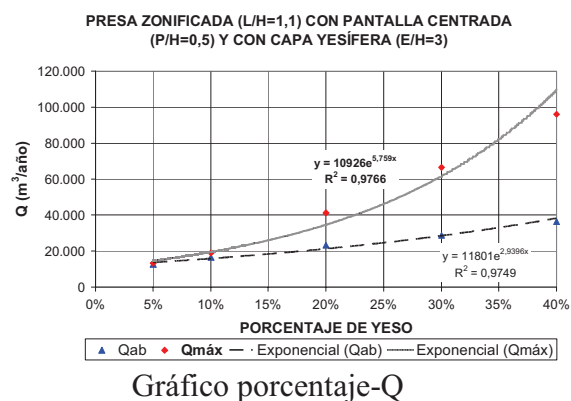
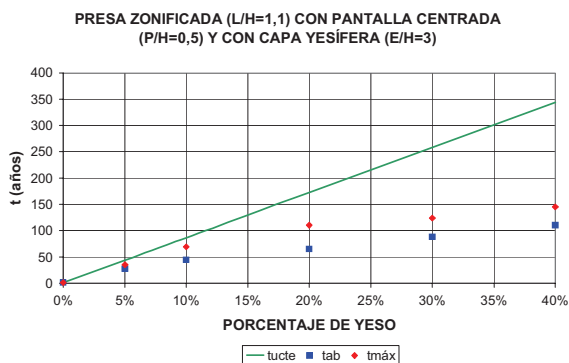
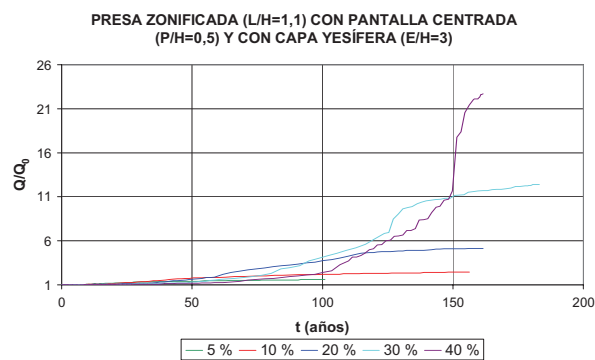
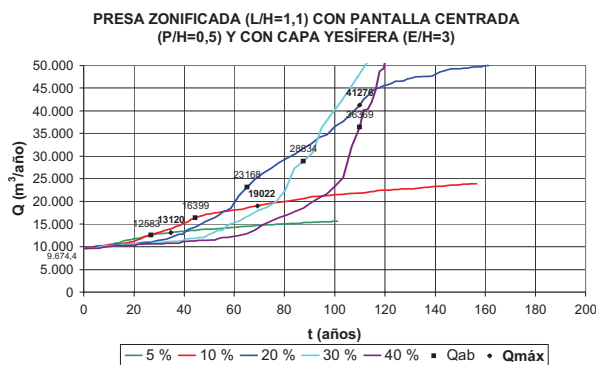
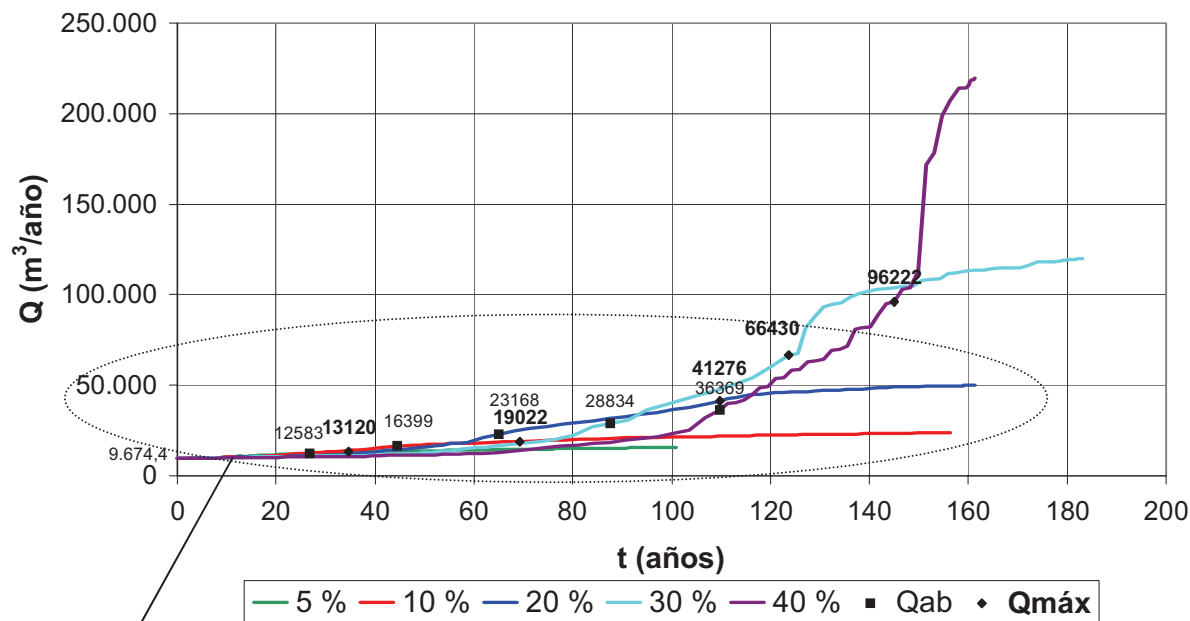


Gráfico porcentaje-FA

PRESA ZONIFICADA (L/H=1,1) CON PANTALLA CENTRADA (P/H=0,5) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)



H=50 m
K₀=315 m/año
K materiales fijadas

GRÁFICOS ZPC3H0.5

GRÁFICOS ADIMENSIONALES

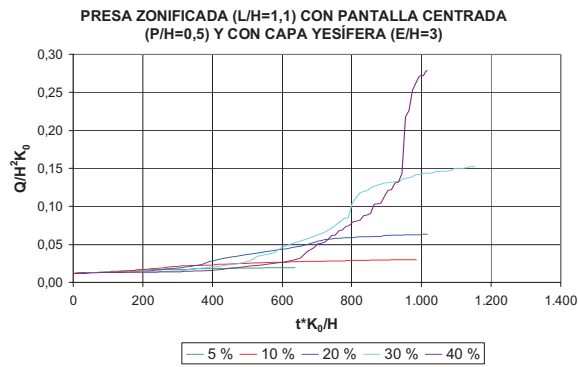


Gráfico tadim-Qadim

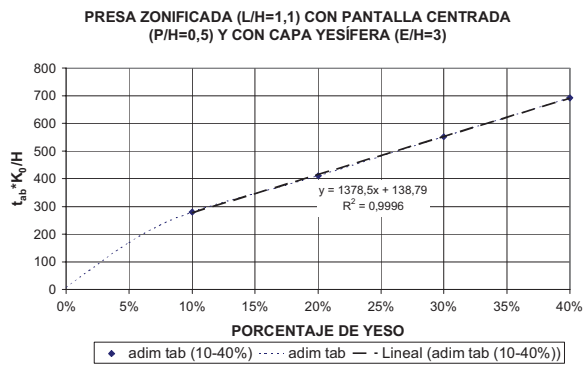


Gráfico porcentaje- t_{adim}

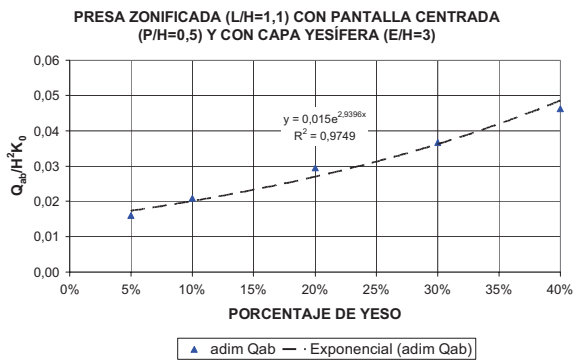


Gráfico porcentaje- Q_{adim}

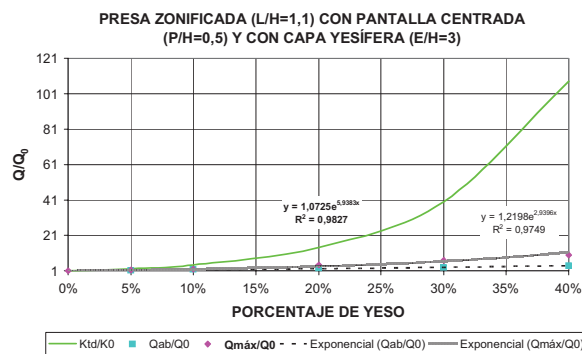


Gráfico porcentaje- Q/Q_0

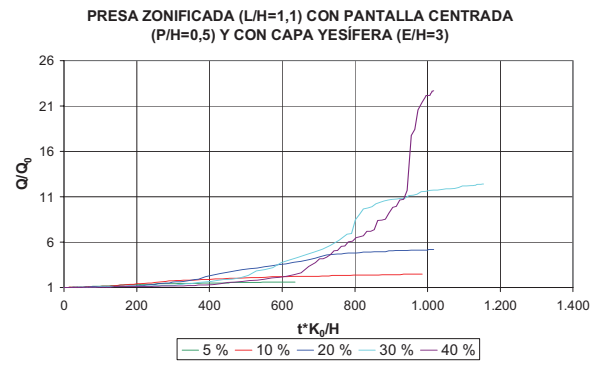


Gráfico tadim- Q/Q_0

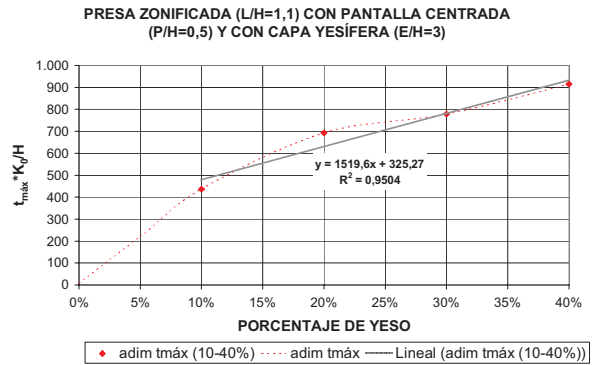


Gráfico porcentaje- $t_{máx}$ adim

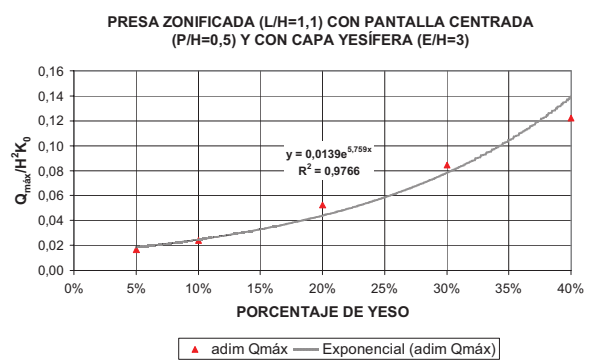


Gráfico porcentaje- $Q_{máx}$ adim

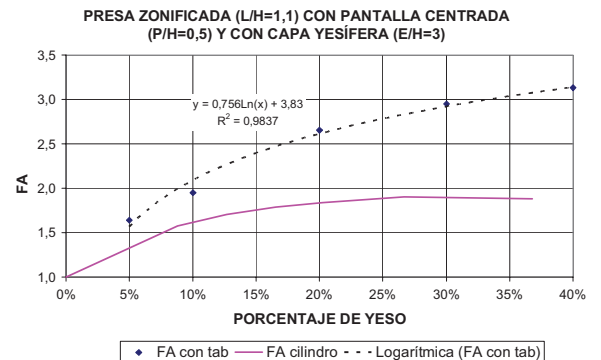
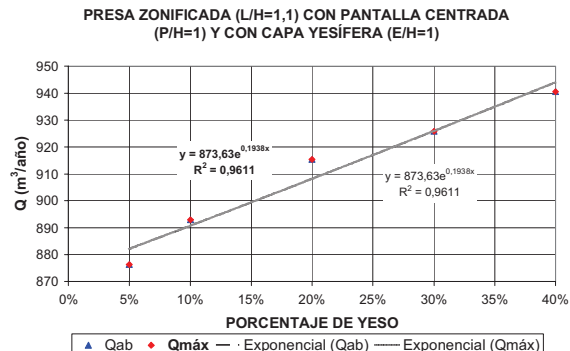
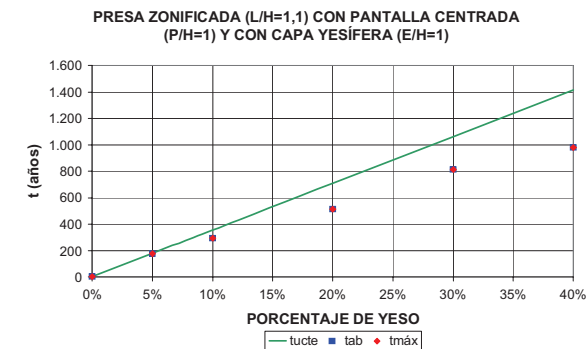
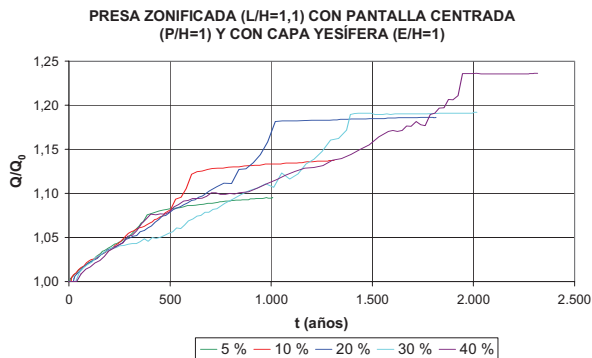
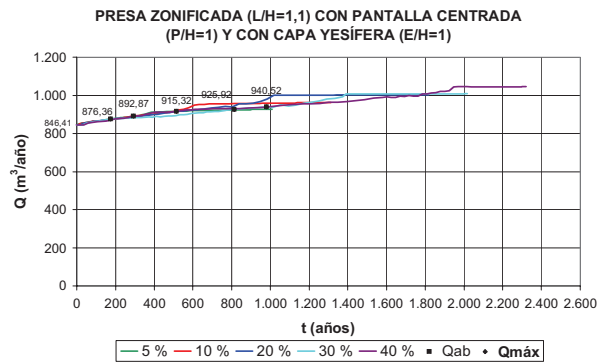
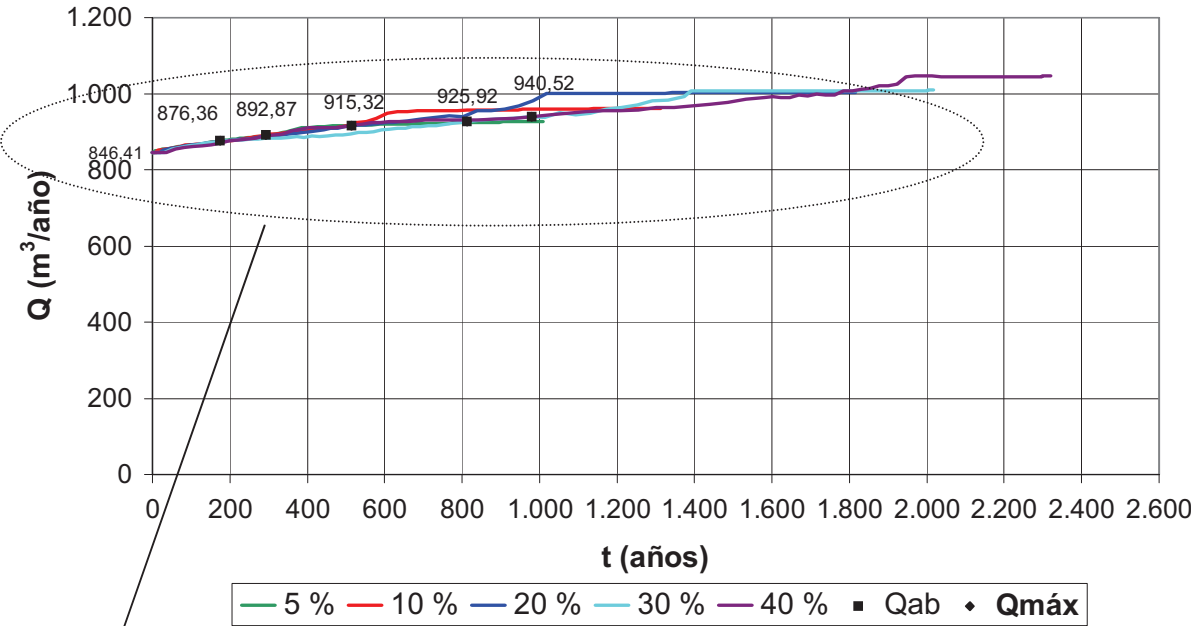


Gráfico porcentaje-FA

PRESA ZONIFICADA (L/H=1,1) CON PANTALLA CENTRADA (P/H=1) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=1)



H=50 m
K₀=315 m/año
K materiales fijadas

GRÁFICOS ZPC1H

GRÁFICOS ADIMENSIONALES

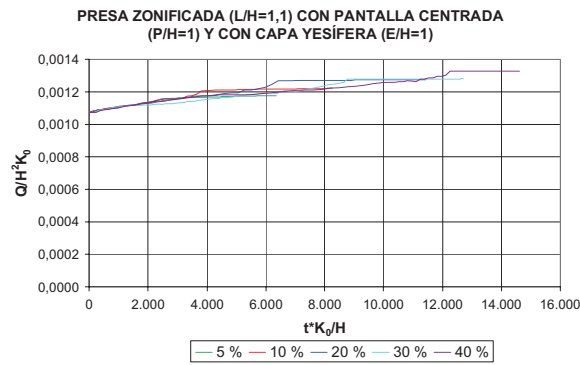


Gráfico tadim-Qadim

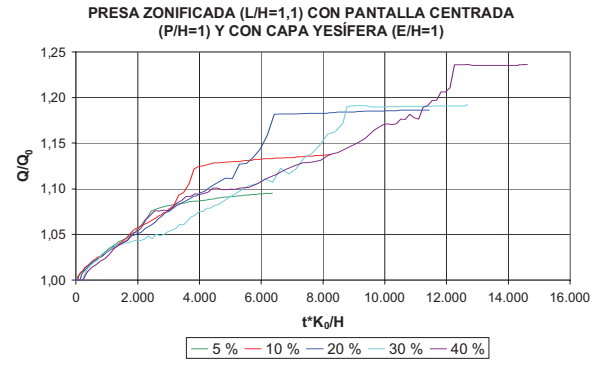


Gráfico tadim-Q/Q₀

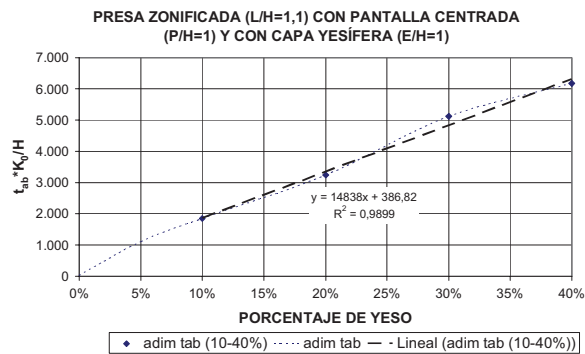


Gráfico porcentaje- t_{adim}

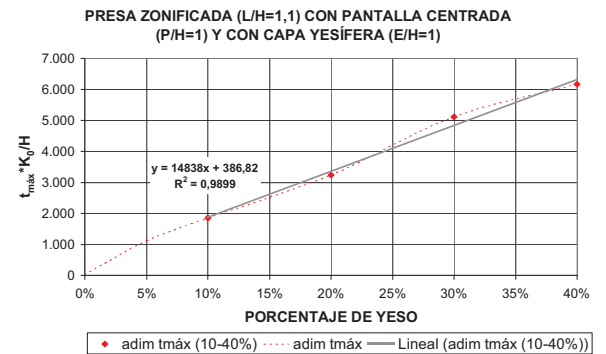


Gráfico porcentaje- $t_{máx} adim$

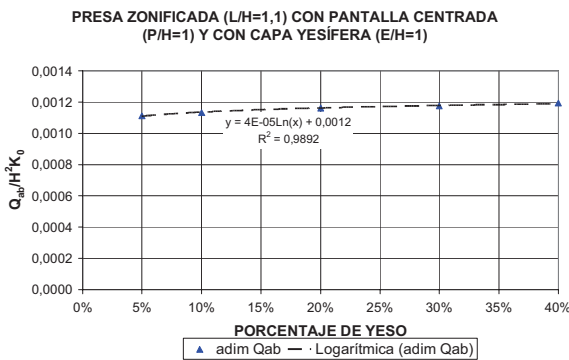


Gráfico porcentaje- $Q_{ab}adim$

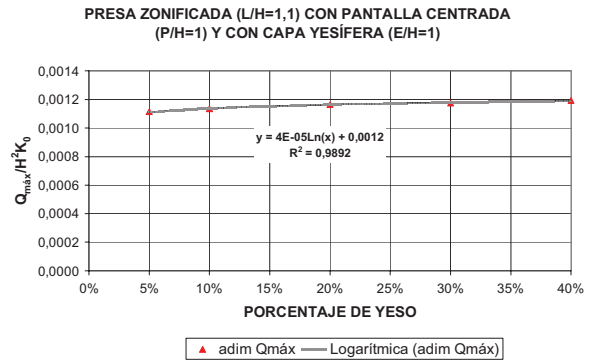


Gráfico porcentaje- $Q_{máx}adim$

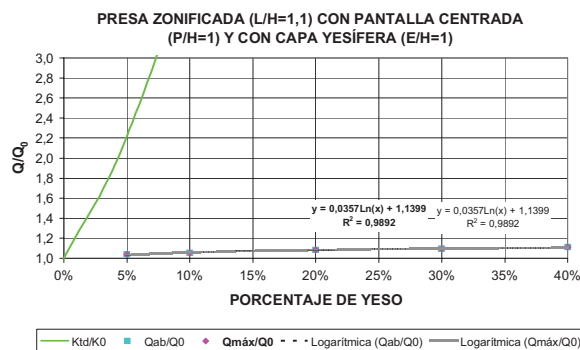


Gráfico porcentaje-Q/Q₀

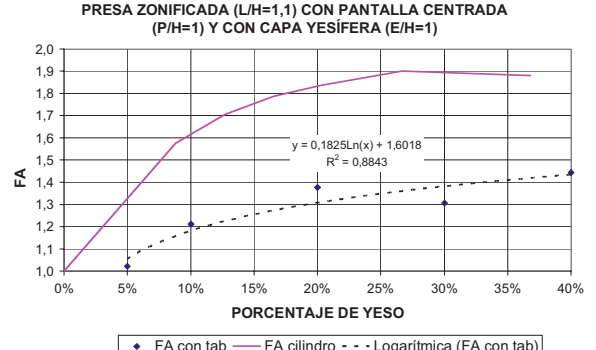
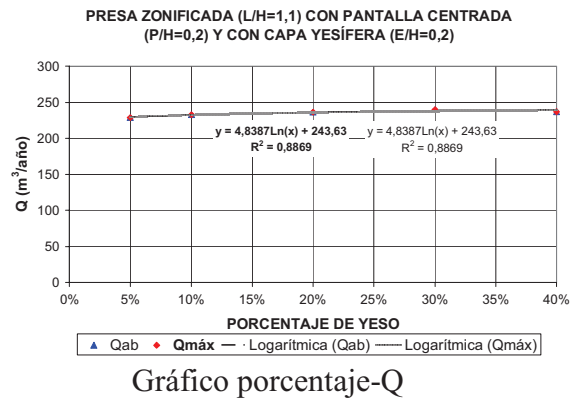
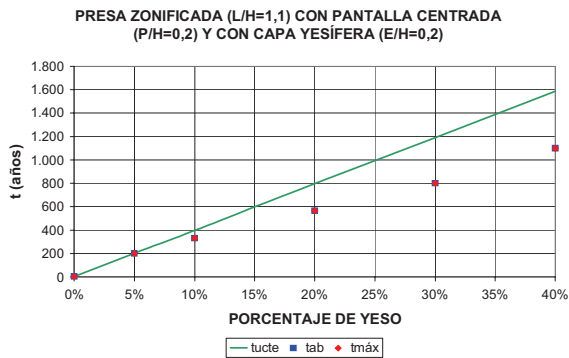
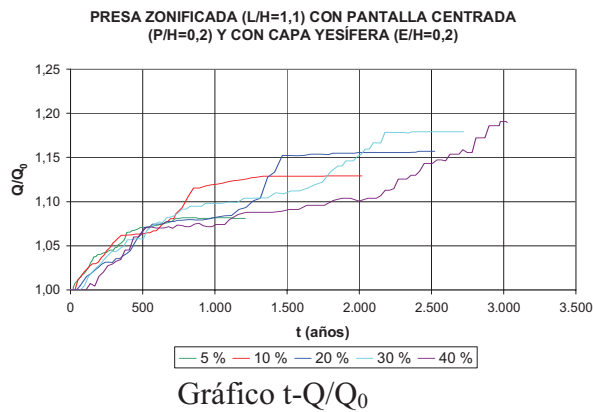
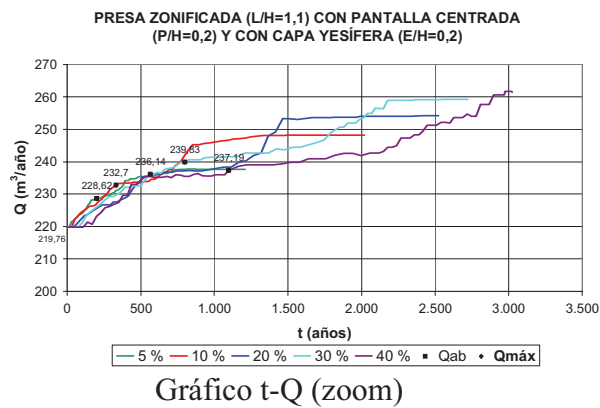
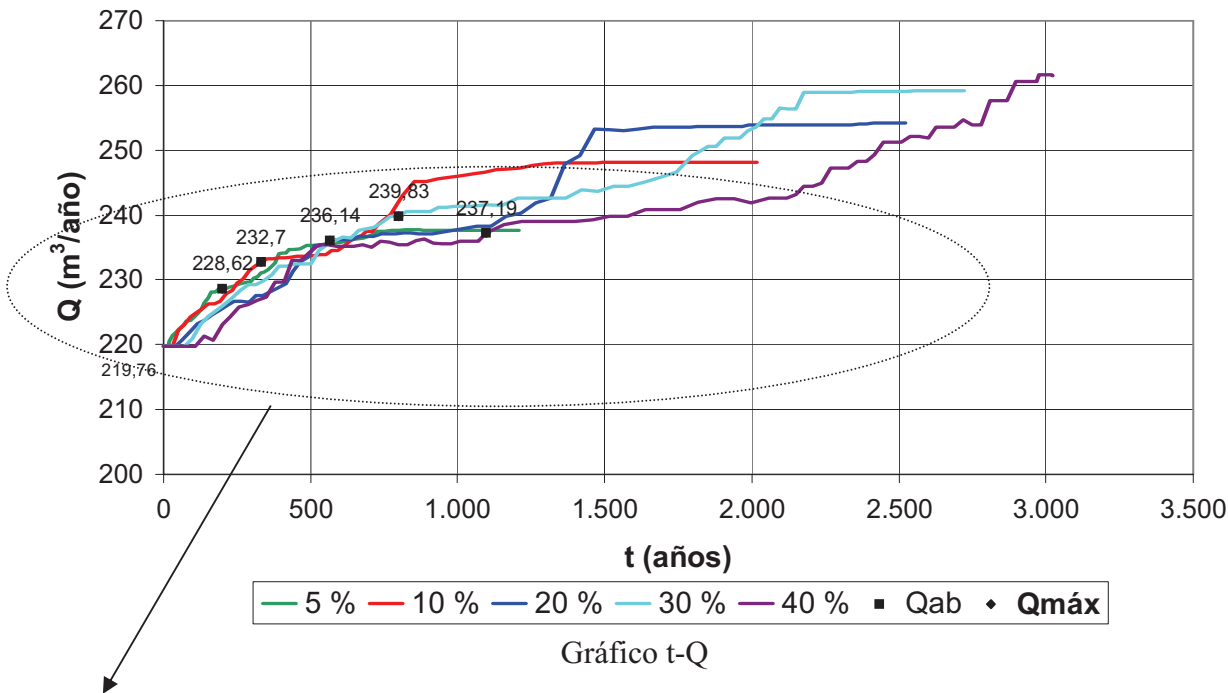


Gráfico porcentaje-FA

PRESA ZONIFICADA (L/H=1,1) CON PANTALLA CENTRADA (P/H=0,2) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=0,2)



H=50 m
K₀=315 m/año
K materiales fijadas

GRÁFICOS ZPC0.2H

GRÁFICOS ADIMENSIONALES

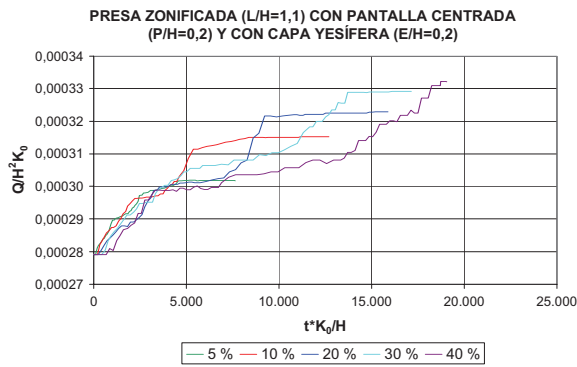


Gráfico tadim-Qadim

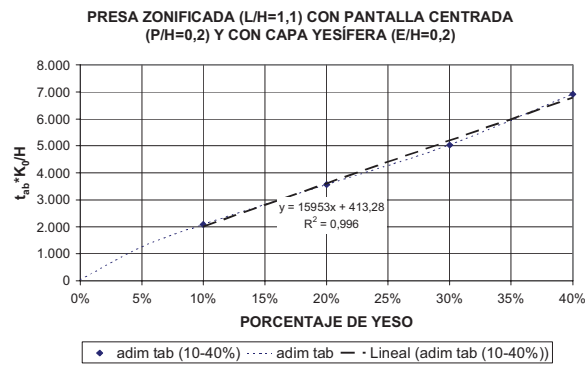


Gráfico porcentaje- t_{ab} adim

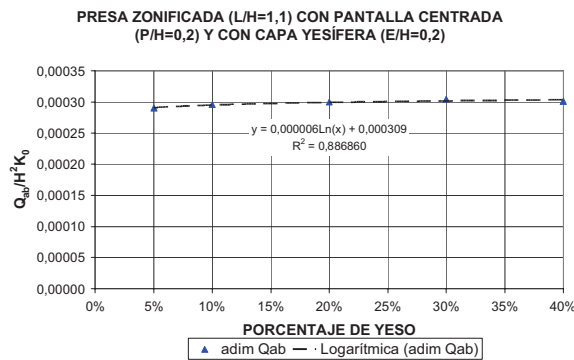


Gráfico porcentaje- Q_{ab} adim

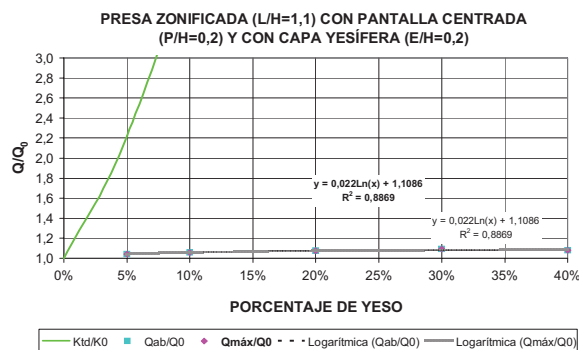


Gráfico porcentaje- Q/Q_0

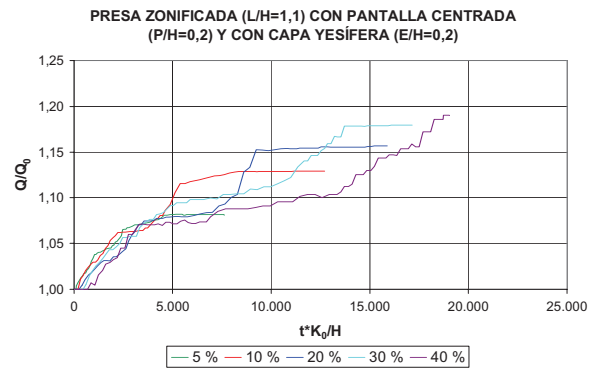


Gráfico tadim- Q/Q_0

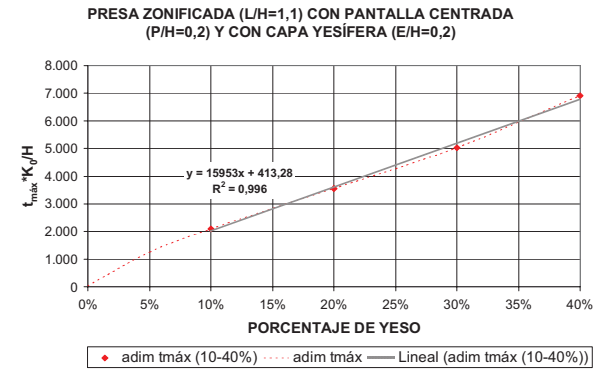


Gráfico porcentaje- $t_{máx}$ adim

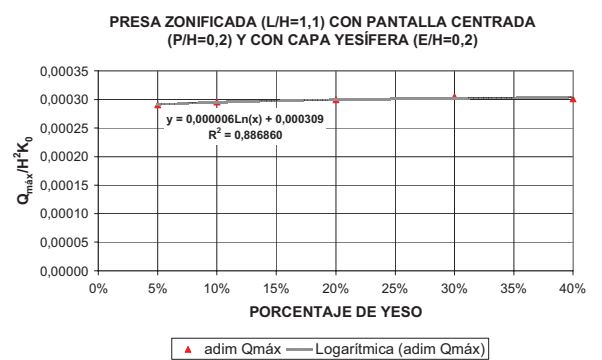


Gráfico porcentaje- $Q_{máx}$ adim

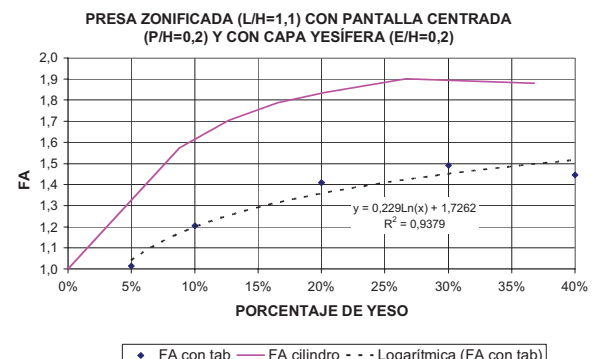
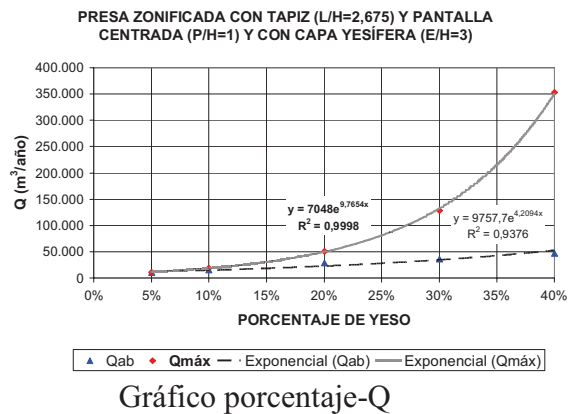
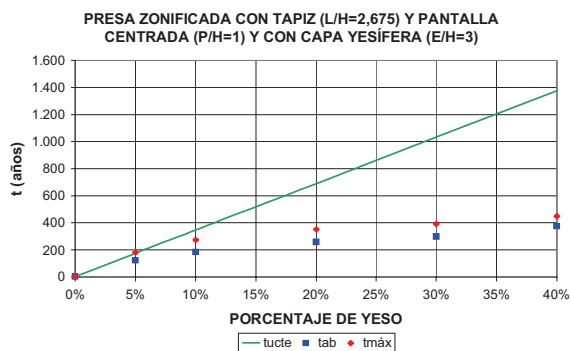
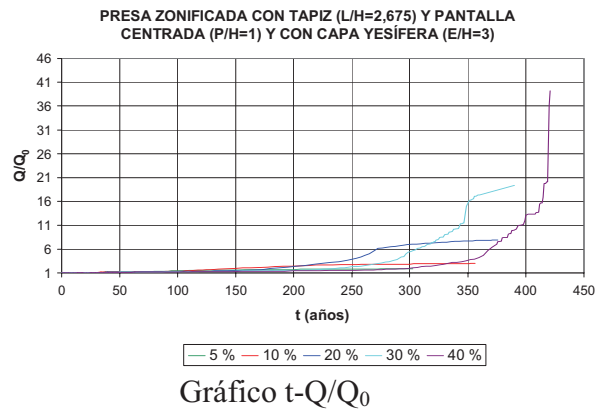
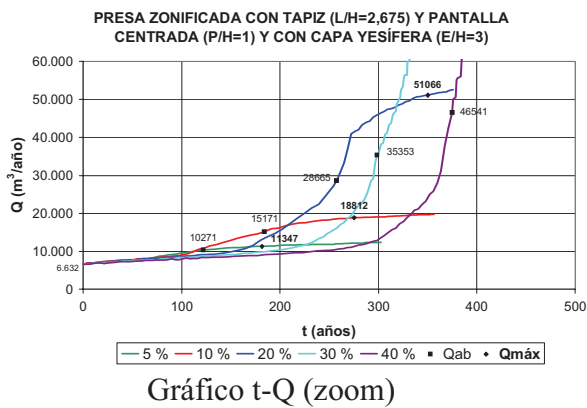
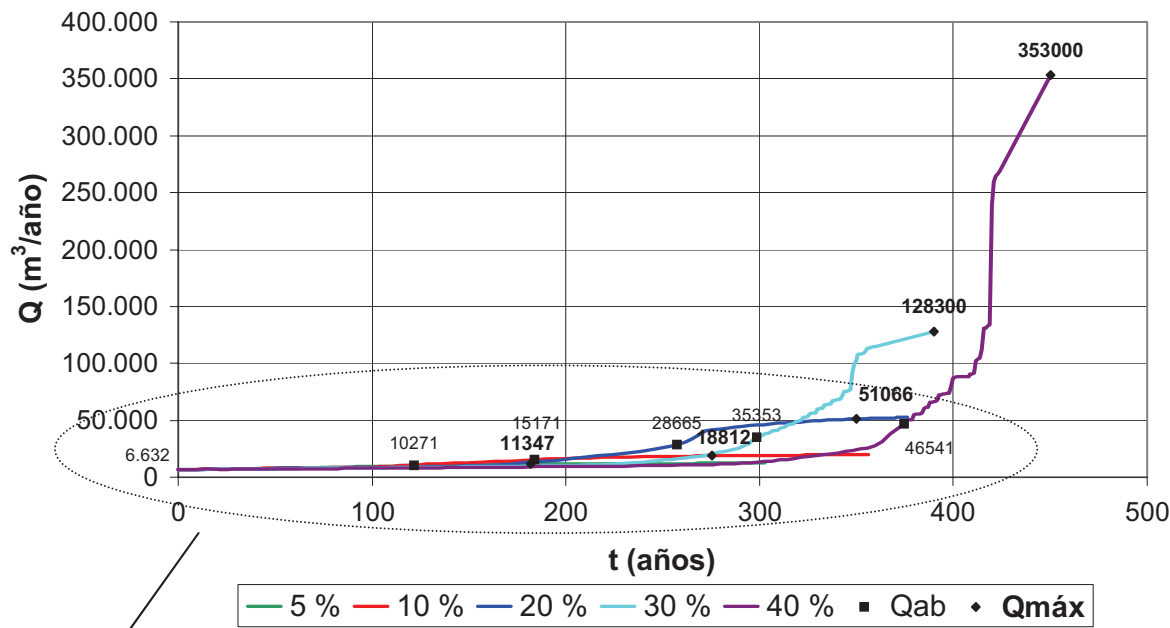


Gráfico porcentaje-FA

PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675) Y PANTALLA CENTRADA (P/H=1) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)



H=50 m
K₀=315 m/año
K materiales fijadas

GRÁFICOS ZTPC3H1

GRÁFICOS ADIMENSIONALES

PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675) Y PANTALLA CENTRADA (P/H=1) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)

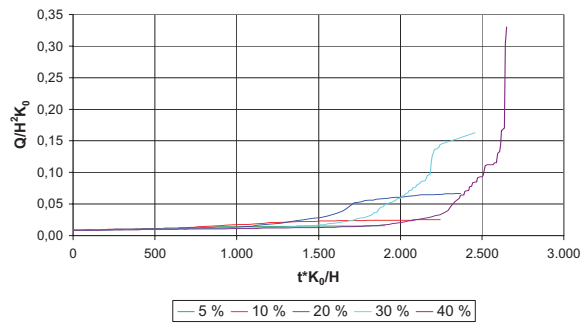


Gráfico tadim-Qadim

PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675) Y PANTALLA CENTRADA (P/H=1) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)

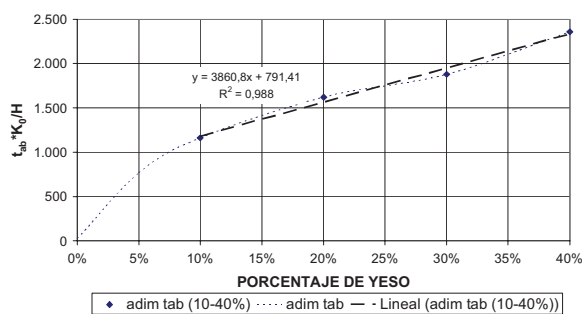


Gráfico porcentaje- t_{adim}

PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675) Y PANTALLA CENTRADA (P/H=1) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)

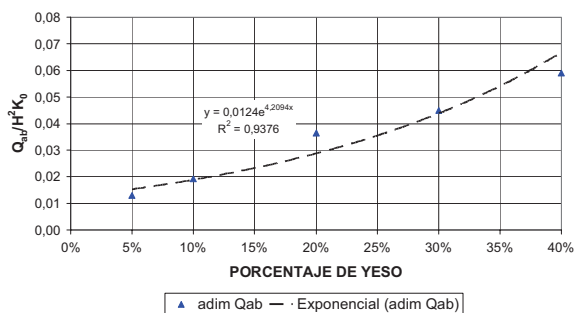


Gráfico porcentaje- Q_{adim}

PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675) Y PANTALLA CENTRADA (P/H=1) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)

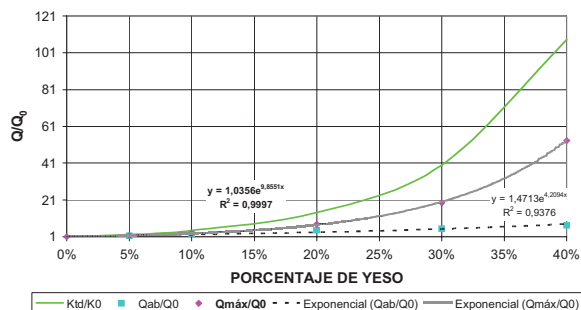


Gráfico porcentaje- Q/Q_0

PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675) Y PANTALLA CENTRADA (P/H=1) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)

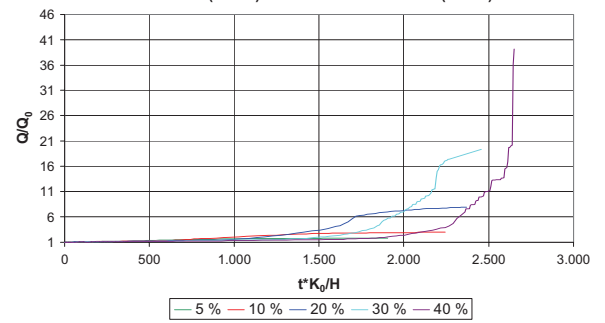


Gráfico tadim-Q/Q₀

PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675) Y PANTALLA CENTRADA (P/H=1) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)

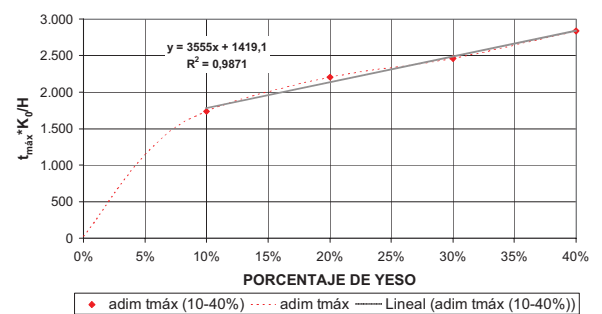


Gráfico porcentaje- $t_{máx}$

PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675) Y PANTALLA CENTRADA (P/H=1) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)

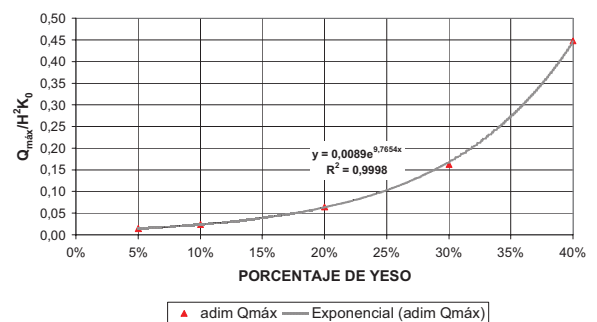


Gráfico porcentaje- $Q_{máx}$

PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675) Y PANTALLA CENTRADA (P/H=1) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)

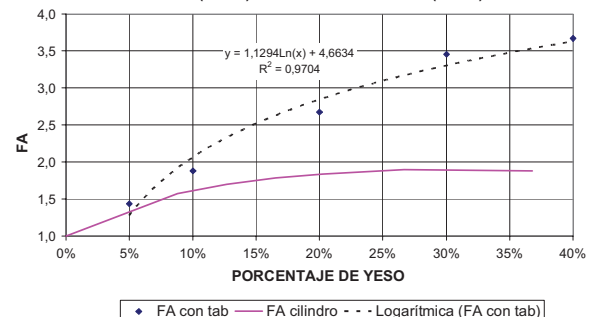
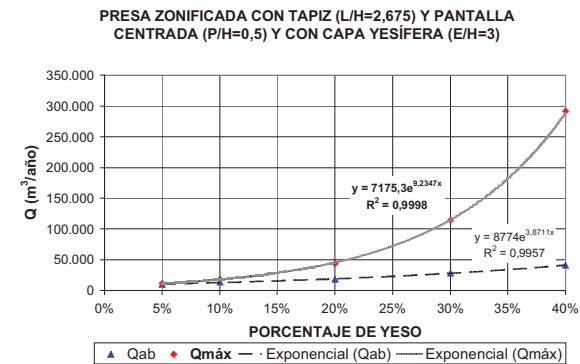
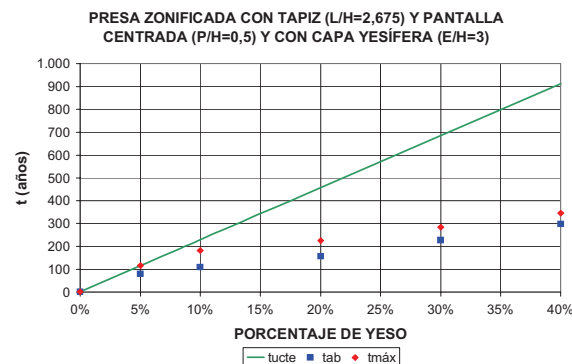
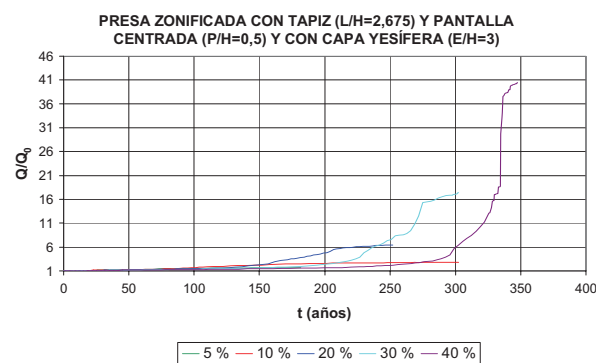
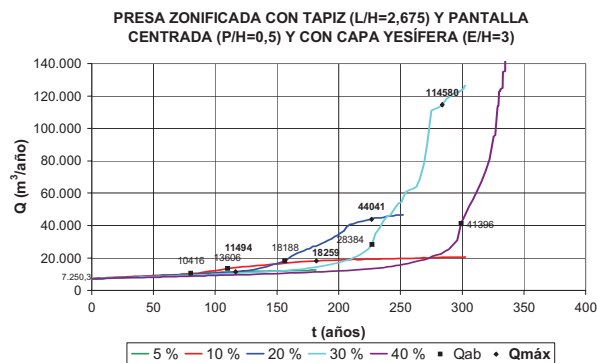
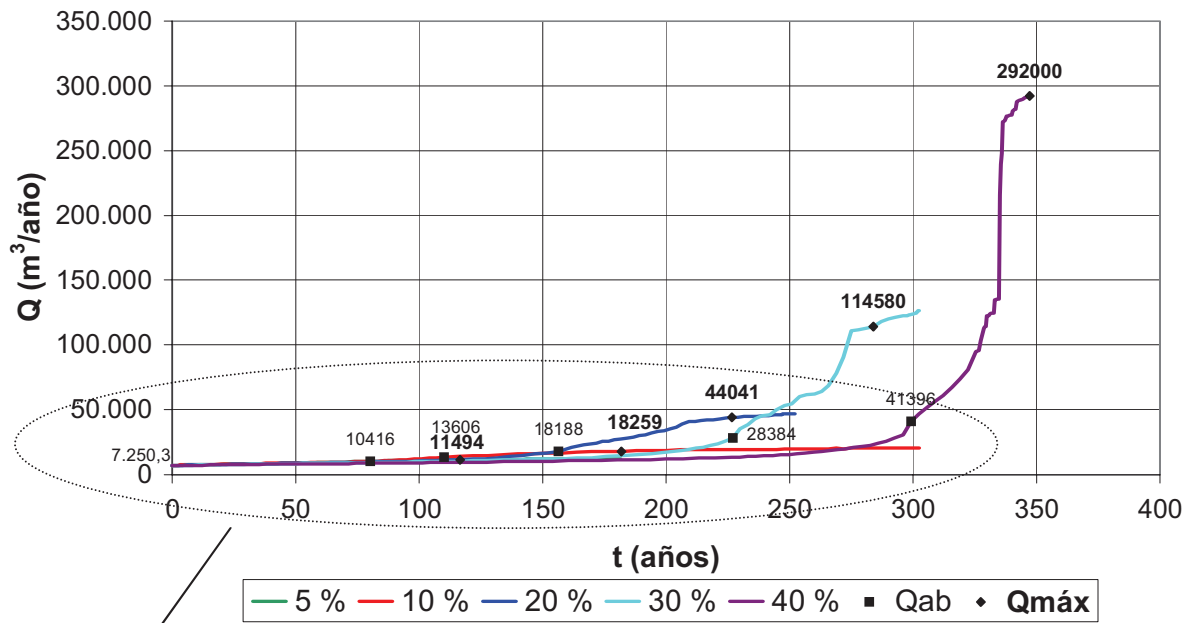


Gráfico porcentaje- FA

PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675) Y PANTALLA CENTRADA (P/H=0,5) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=3)



H=50 m
K₀=315 m/año
K materiales fijadas

GRÁFICOS ZTPC3H0.5

GRÁFICOS ADIMENSIONALES

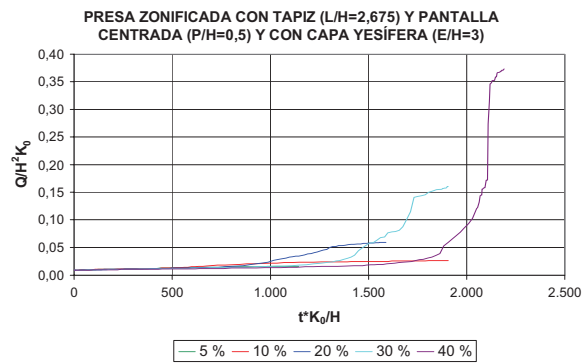


Gráfico tadim-Qadim

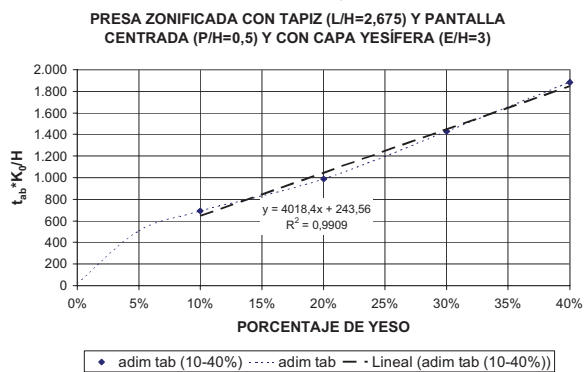


Gráfico porcentaje-t_{adim}

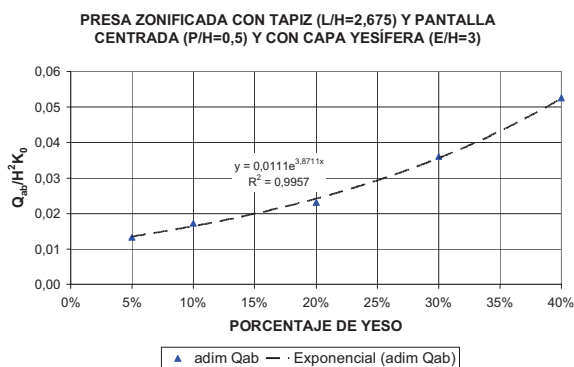


Gráfico porcentaje-Q_{ab}adim

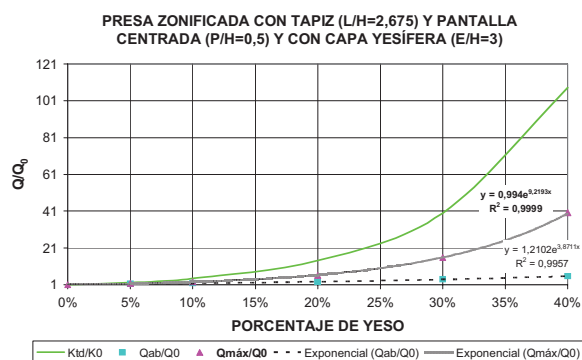


Gráfico porcentaje-Q/Q₀

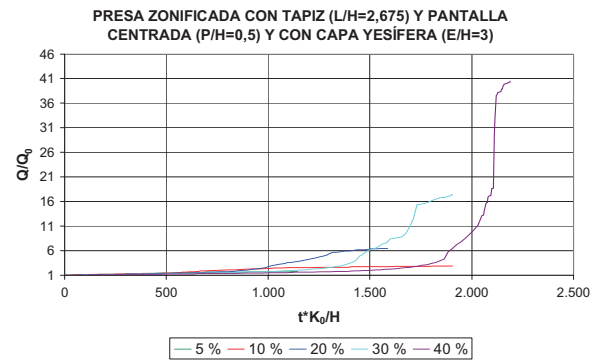


Gráfico tadim-Q/Q₀

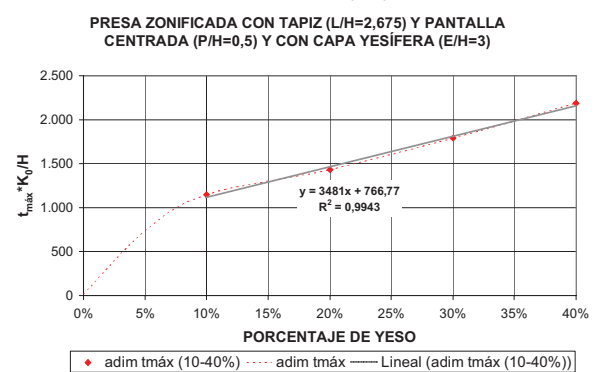


Gráfico porcentaje-t_{máx}adim

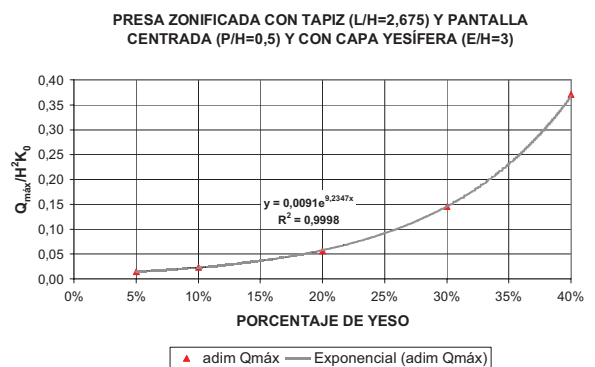


Gráfico porcentaje-Q_{máx}adim

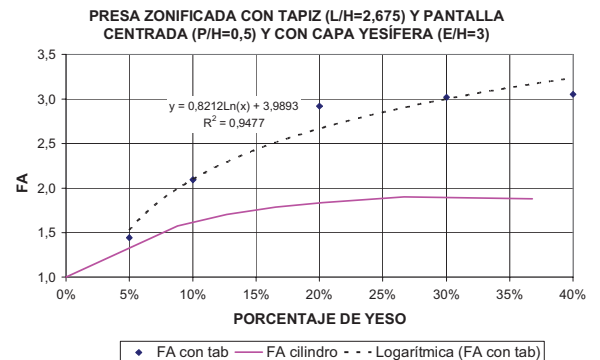
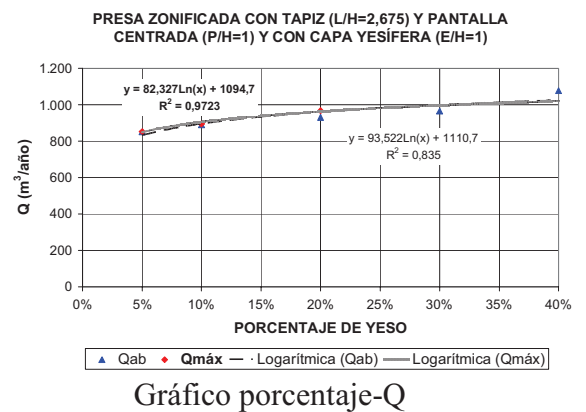
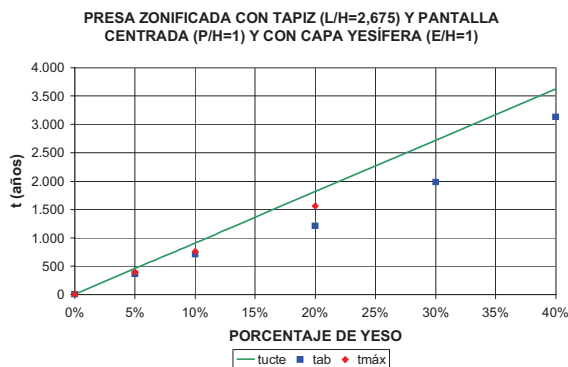
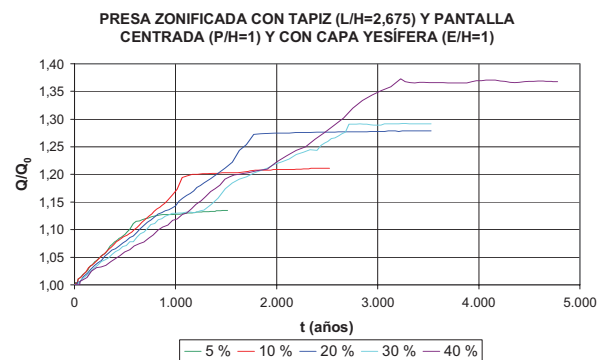
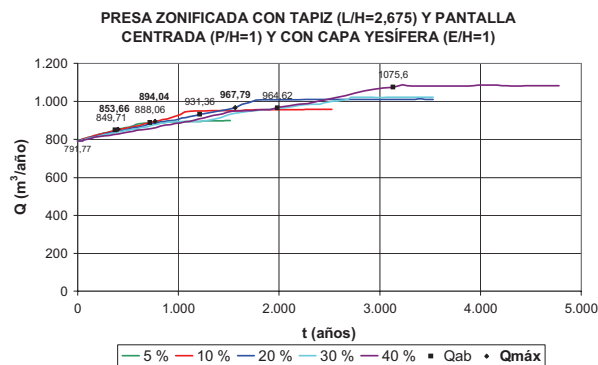
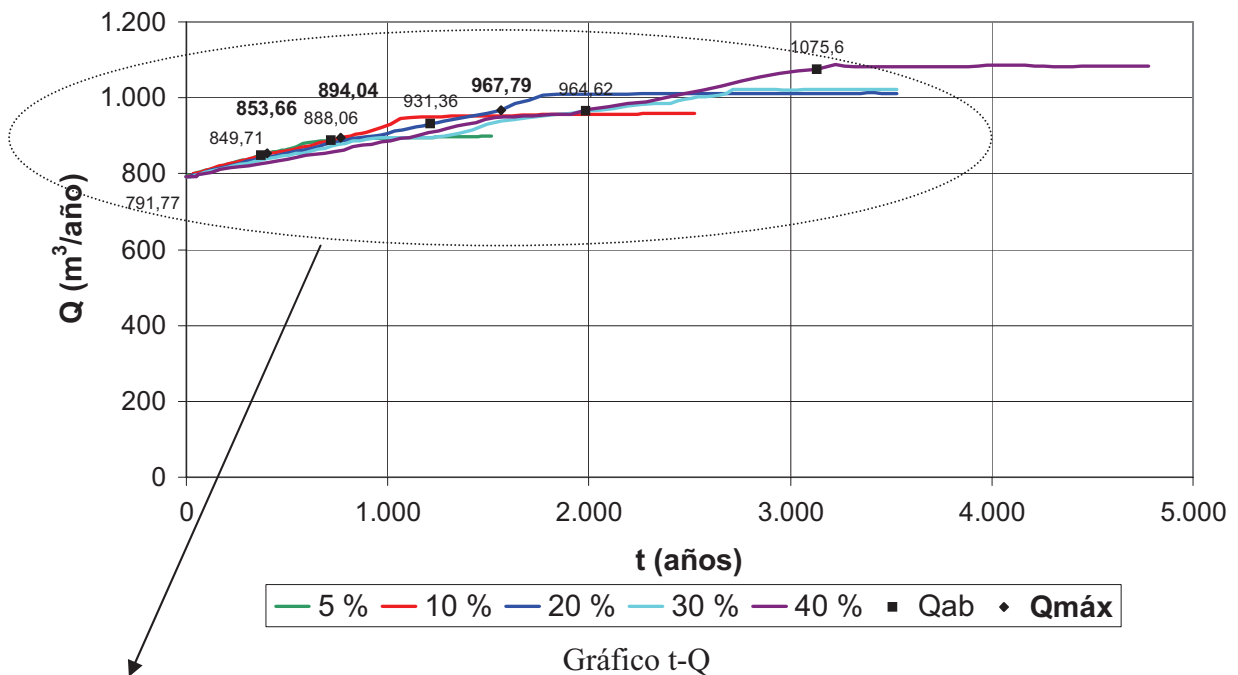


Gráfico porcentaje-FA

PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675) Y PANTALLA CENTRADA (P/H=1) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=1)



H=50 m
K₀=315 m/año
K materiales fijadas

Nota: el 30 y el 40% no los considero en los ajustes, porque al secarse el espaldón de aguas abajo les cuesta rellenar y no son representativos

GRÁFICOS ZTPC1H

GRÁFICOS ADIMENSIONALES

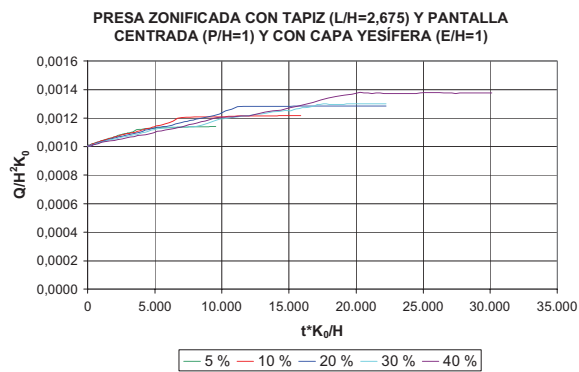


Gráfico tadim-Qadim

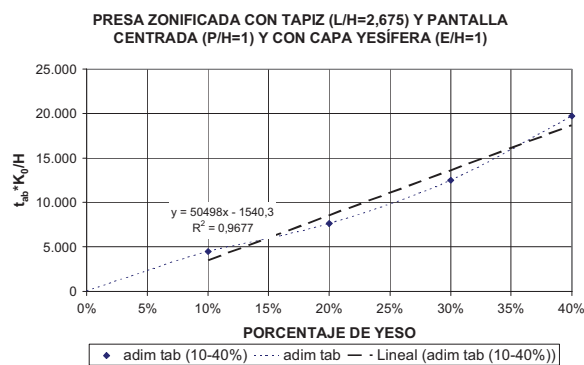


Gráfico porcentaje- t_{adim}

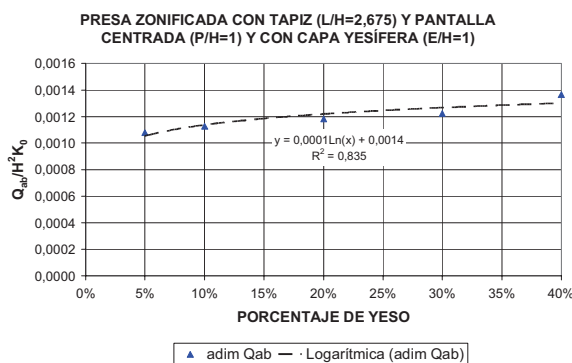


Gráfico porcentaje- Q_{ab}

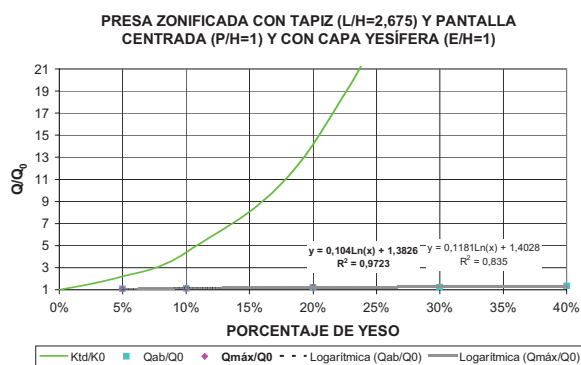


Gráfico porcentaje- Q/Q_0

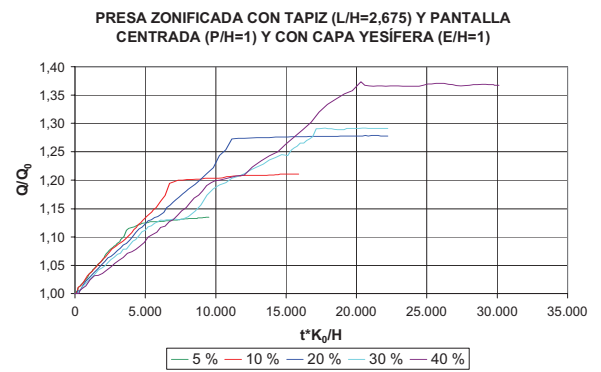


Gráfico tadim- Q/Q_0

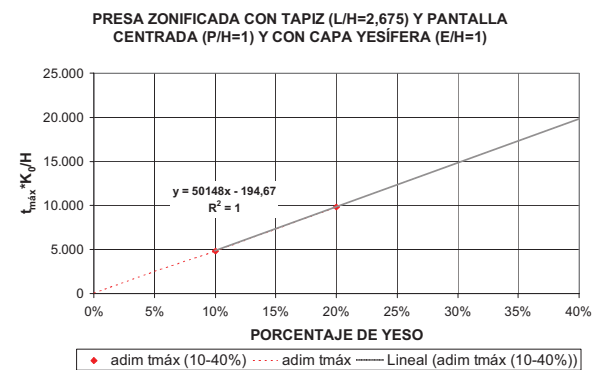


Gráfico porcentaje- $t_{máx}$

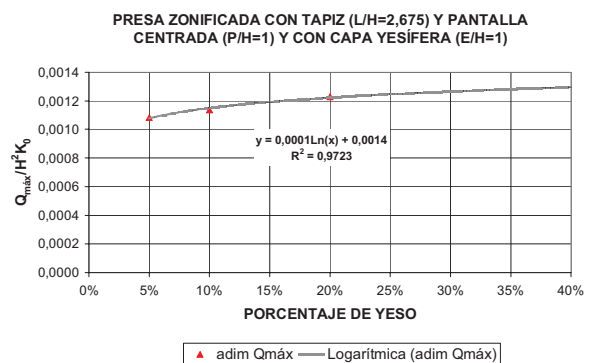


Gráfico porcentaje- $Q_{máx}$

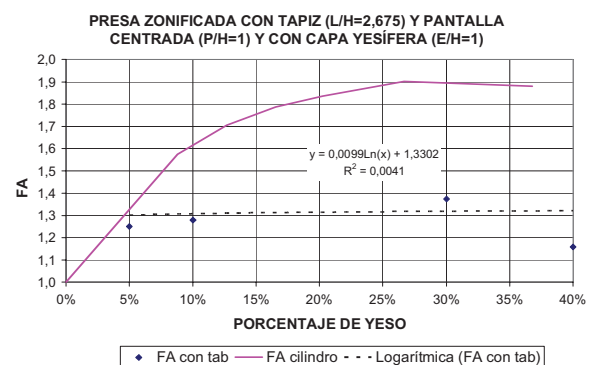
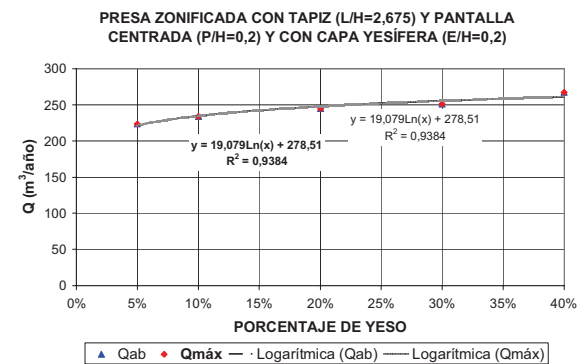
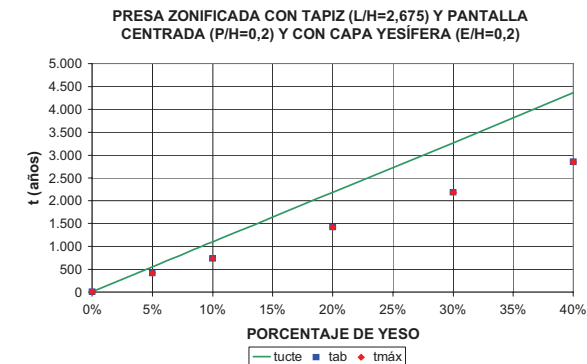
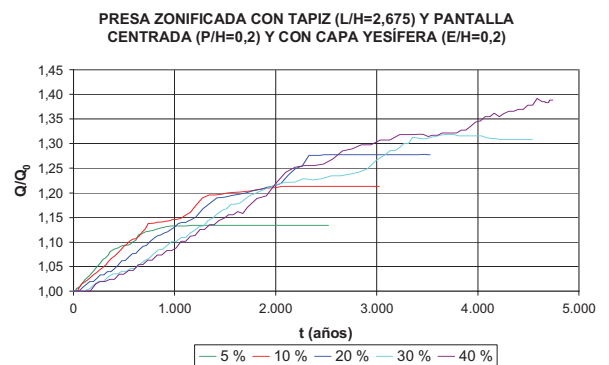
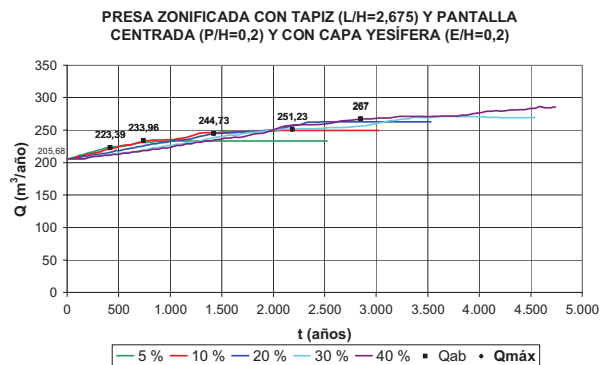
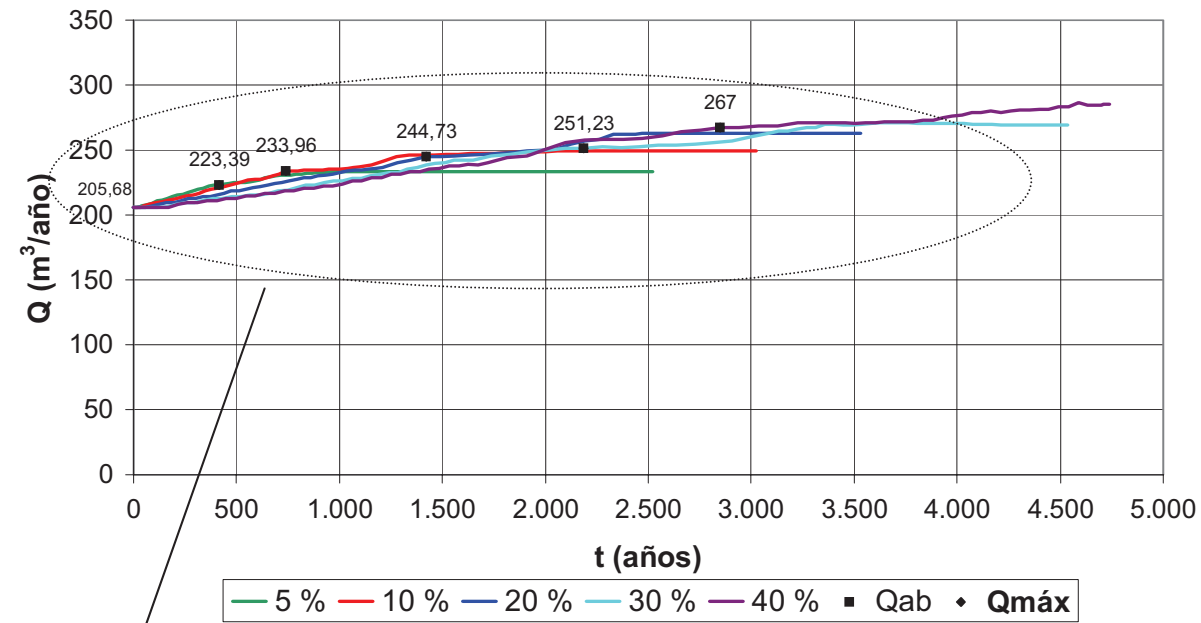


Gráfico porcentaje-FA

Nota: el 30 y el 40% no los considero en los ajustes, porque al secarse el espaldón de aguas abajo les cuesta rellenar y no son representativos

PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675) Y PANTALLA CENTRADA (P/H=0,2) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=0,2)



H=50 m
K₀=315 m/año
K materiales fijadas

GRÁFICOS ZTPC0.2H

GRÁFICOS ADIMENSIONALES

PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675) Y PANTALLA CENTRADA (P/H=0,2) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=0,2)

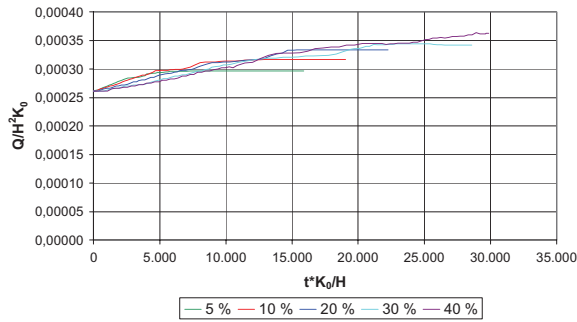


Gráfico tadim-Qadim

PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675) Y PANTALLA CENTRADA (P/H=0,2) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=0,2)

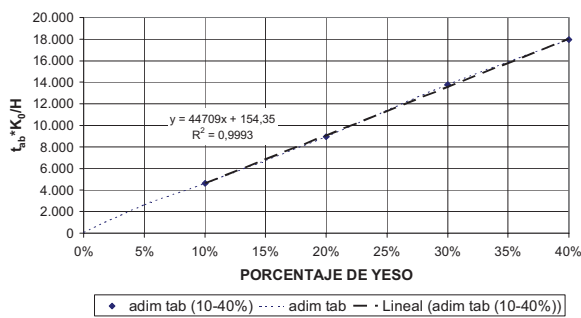


Gráfico porcentaje-tadim

PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675) Y PANTALLA CENTRADA (P/H=0,2) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=0,2)

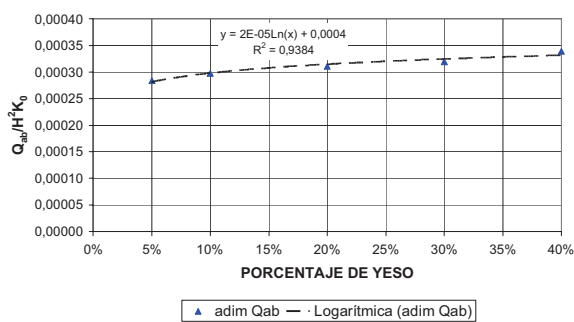


Gráfico porcentaje-Qadim

PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675) Y PANTALLA CENTRADA (P/H=0,2) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=0,2)

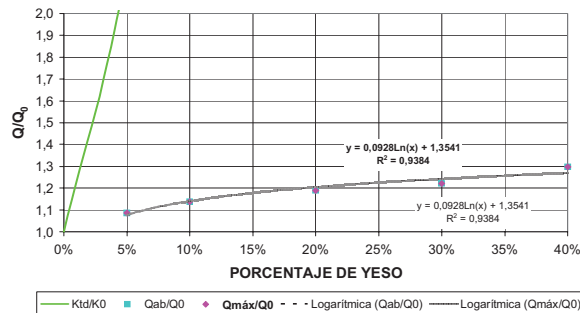


Gráfico porcentaje-Q/Q₀

PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675) Y PANTALLA CENTRADA (P/H=0,2) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=0,2)

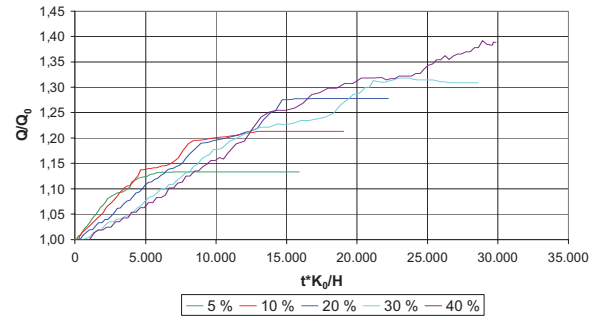


Gráfico tadim-Q/Q₀

PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675) Y PANTALLA CENTRADA (P/H=0,2) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=0,2)

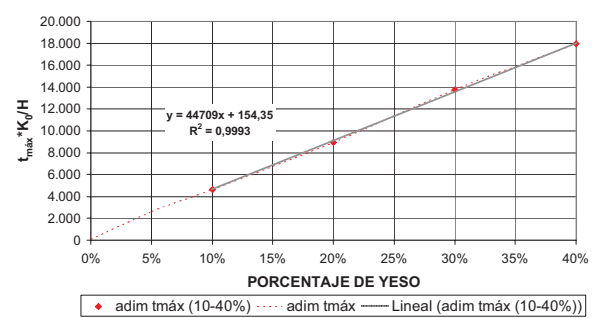


Gráfico porcentaje-t_maxadim

PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675) Y PANTALLA CENTRADA (P/H=0,2) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=0,2)

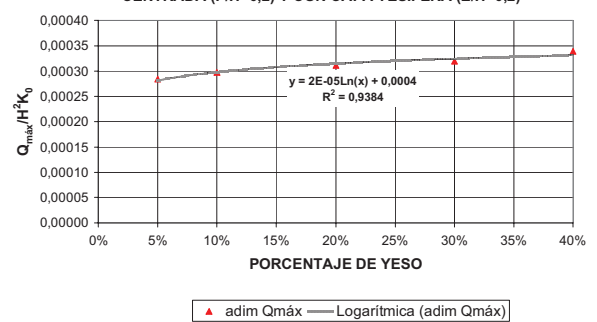


Gráfico porcentaje-Q_maxadim

PRESA ZONIFICADA CON TAPIZ (L/H=2,675) Y PANTALLA CENTRADA (P/H=0,2) Y CON CAPA YESÍFERA (E/H=0,2)

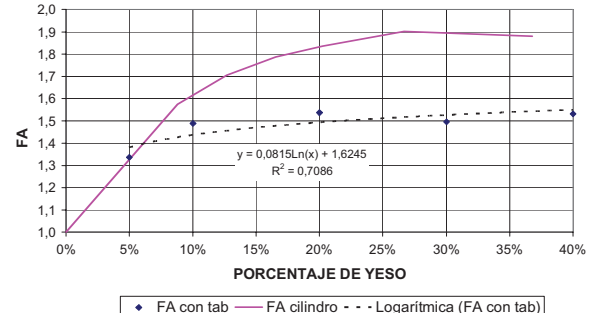


Gráfico porcentaje-FA