

ANÁLISIS DE LA FILTRACIÓN EN PRESAS CON CIMIENTOS YESÍFEROS

Carmen María Baena Berrendero¹, Miguel Ángel Toledo Municio²

RESUMEN: El emplazamiento de presas en España es cada vez más restringido y las características geológicas y geotécnicas del cimiento no siempre tan favorables como se desearía.

En el caso de cimientos yesíferos, es necesario proyectar una sección tipo de presa que limite, dentro de valores aceptables, el proceso de disolución del cimiento.

El objetivo es modelizar el proceso de disolución del cimiento debido a la filtración, determinando el correspondiente cambio de permeabilidad de éste y el consiguiente aumento de los caudales de filtración. Para ello se ha desarrollado un programa en Visual Basic (denominado DISOLUCION2D) que realiza un cálculo iterativo en el tiempo, a partir de los resultados del programa comercial SEEP2D, de cálculo de redes de filtración mediante elementos finitos. Se han realizado ensayos, para comprobar la validez de las formulaciones.

Se han calculado modelos presa-cimiento con distintos diseños de presa y características del cimiento (porcentaje de material soluble, profundidad y espesor de la capa yesífera, permeabilidades iniciales, ...) para concluir qué factores son determinantes.

¹ Ing. de Caminos. Jesús Granell, Ingenieros Consultores S.L. cmb@jgicsa.com

² Dr. Ing. de Caminos. UPM. matoledo@caminos.upm.es

1. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Dado que el emplazamiento de presas en España es cada vez más restringido, se ha analizado, en el caso de cimientos yesíferos, el proceso de disolución del cemento y el consiguiente aumento de las filtraciones a través de él, para obtener en primera aproximación la solución más adecuada a cada caso. Para ello se ha desarrollado un modelo numérico que se ha aplicado a distintas tipologías de presa, variando los valores de todos parámetros que afectan al proceso.

2. ALCANCE

Primeramente se ha analizado el proceso de disolución, con el fin de modelizar el avance de la disolución en un cemento yesífero. Dado que el avance de la disolución es proporcional a la velocidad de filtración, se ha elaborado un programa denominado DISOLUCION2D, que con los resultados de velocidades suministrados por el programa comercial SEEP2D, de cálculo de redes de filtración por MEF, calcula el avance del frente de disolución y modifica los datos de permeabilidad para el cálculo de la siguiente iteración.

El alcance se limita al régimen laminar y a un flujo intergranular, por lo que el modelo de disolución que se ha aplicado es el de disolución de partículas. Además, dado que no se tiene en cuenta el efecto mecánico de la disolución, el modelo desarrollado es aplicable únicamente cuando el porcentaje de yeso es moderado, resultando difícil establecer un límite exacto.

3. ANÁLISIS DE LA DISOLUCIÓN

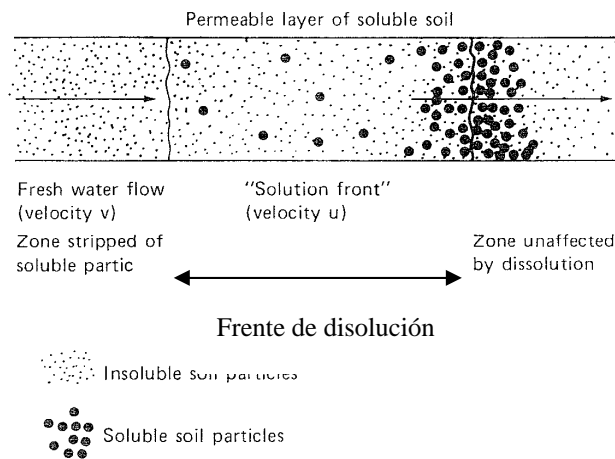
La ecuación que rige el proceso de disolución de un sólido en un líquido es la siguiente (Nernst, H. W., 1888):

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

Expresa la pérdida de masa M en el tiempo (en kg/s) de un sólido de área A expuesta a la disolución (en m^2). 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 (del orden de $2,5 \text{ kg/m}^3$ para el yeso) y C la concentración en el instante considerado.

K_d depende de diversos parámetros, tales como la temperatura, la velocidad del flujo, los iones disueltos, etc...

En cuanto a la disolución aplicada al terreno existen dos modelos, el de disolución de fisuras y el de disolución intergranular (James A.N., 1992). Este último modelo es el utilizado y se muestra en la siguiente figura, que representa una capa de terreno, formada por partículas solubles (de mayor tamaño en el dibujo) y por partículas insolubles:



James, A.N. (1992). "Soluble material in civil engineering"

El agua dentro del terreno se está filtrando con una velocidad v , y el avance del frente de disolución (zona donde se está produciendo la disolución) se desplaza con una velocidad u (siempre menor). La zona situada a la derecha del frente de disolución no se ha disuelto aún porque el agua en ella está saturada del material soluble.

Tras hacer una integración y un equilibrio de masas global, se obtiene una expresión sencilla que liga la velocidad de avance del frente de disolución con la solubilidad y con la masa de partículas solubles por unidad de volumen de suelo (σ_0):

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

Es decir, el avance del frente de disolución no depende de K_d , a pesar de que el tiempo que tardan en disolverse las partículas y la longitud del frente de disolución sí que dependen de la constante de disolución del material, siendo por lo tanto estos dos parámetros más complicados de determinar.

Los cimientos que podrían asimilarse a este modelo serían las lutitas yesíferas, las areniscas y conglomerados cementados con yeso, las margas conteniendo vetas de yeso de espesores pequeños, las dunas de arena yesífera y la roca de yeso muy fracturada (si el régimen no es turbulento).

En un cimiento con una fisuración más marcada, el agua circulará principalmente por las fracturas y la disolución se basaría en un modelo de disolución de fisuras. Entonces las velocidades de filtración pueden ser las correspondientes a un régimen turbulento, quedando fuera del campo de aplicación.

4. ANÁLISIS DEL AUMENTO DE PERMEABILIDAD

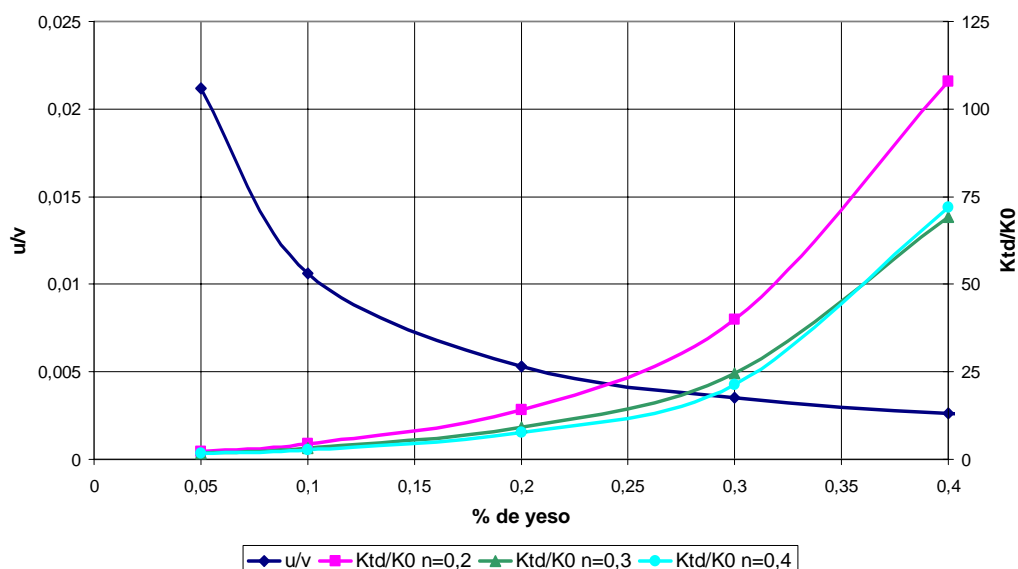
Una vez conocido el avance del frente de disolución, se ha estudiado cómo es el aumento del coeficiente de permeabilidad del suelo una vez que se han disuelto las partículas solubles. Este análisis se ha realizado a partir de la relación de Kozeny (1927)-Carman (1937, 1956) que relaciona la permeabilidad con la porosidad en medios granulares o fisurados.

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_0 , n_0 y ϕ , respectivamente):

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

El porcentaje de material soluble ϕ es fundamental en el proceso de disolución, en la velocidad de avance de su frente y en el aumento de la permeabilidad de un cemento debido a la disolución. Las relaciones u/v y K_{TD}/K_0 se muestran a continuación en un gráfico (donde se observa que el efecto del % de yeso del cemento es contrapuesto para ambas relaciones):

RELACIÓN DE u/v Y K_{TD}/K_0 CON % DE YESO



Para un mayor porcentaje de partículas solubles la velocidad de avance del frente de disolución es menor, es decir, que el frente avanza más lentamente, pero sin embargo el aumento que se produce en el coeficiente de permeabilidad respecto al inicial es mayor. Si n_0 es menor, la relación K_{TD}/K_0 es mayor.

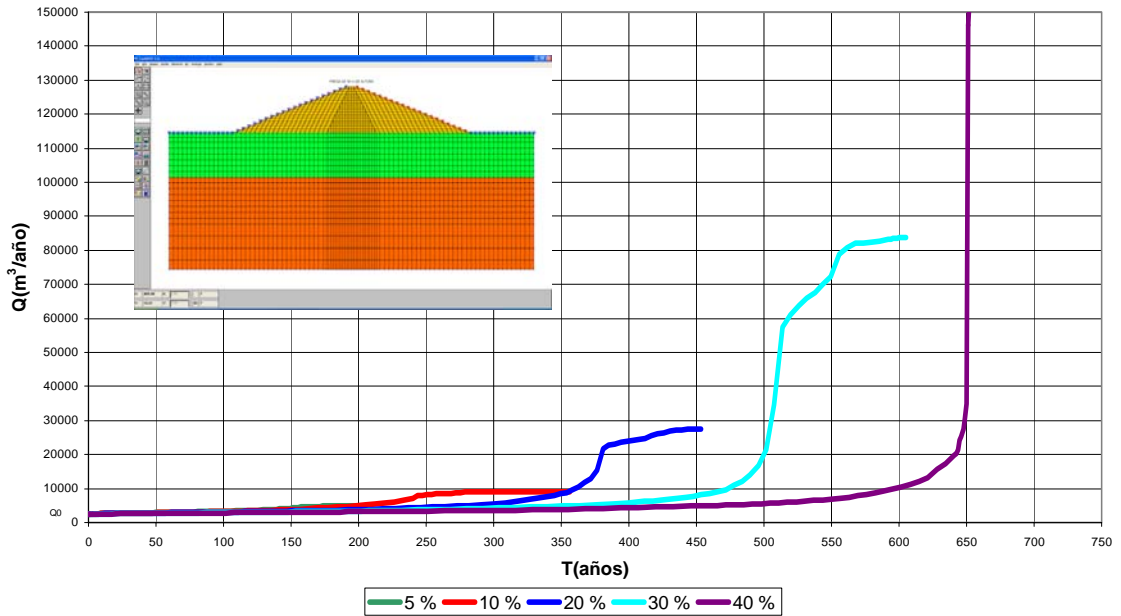
5. RESULTADOS DEL MODELO NUMÉRICO

La forma de obtener los resultados para distintas tipologías ha sido:

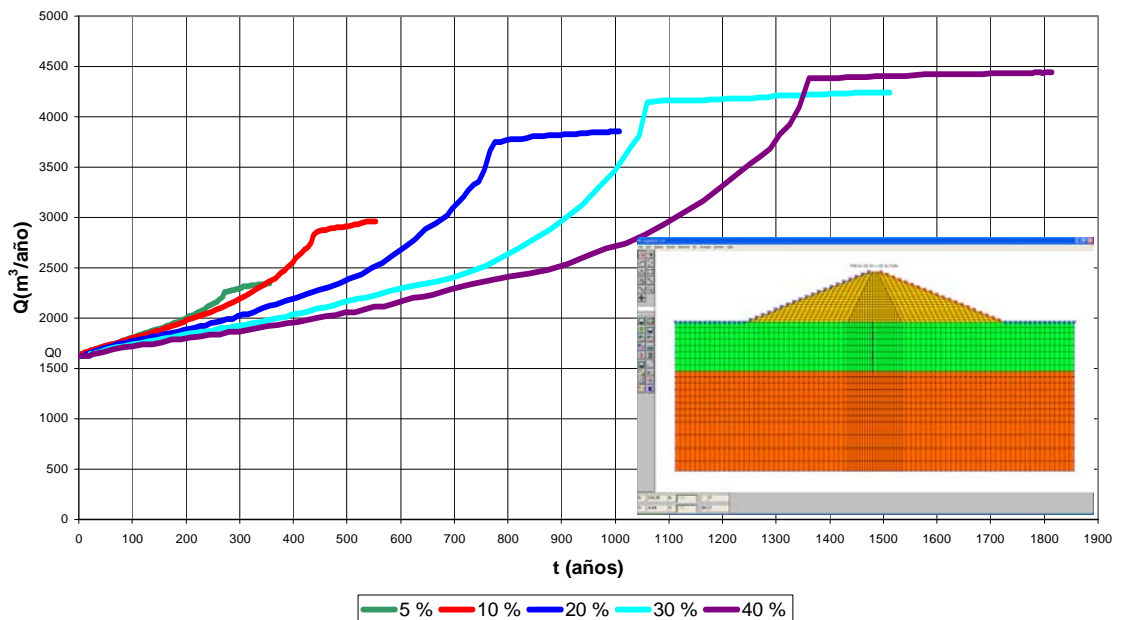
- Definición de tipologías tipo de presas (zonificada, homogénea, con o sin tapiz, con o sin pantalla).
- Realización de los cálculos para distintos espesores (e) de la capa soluble ($3H$, $1H$, $0,2H$, siendo H la altura de la presa) y para distintos porcentajes de yeso.
- Gracias al análisis adimensional de parámetros, a partir de una permeabilidad inicial K_0 de la capa yesífera y de una altura H de presa, se ha obtenido la expresión adimensional de caudales (Q/H^2K_0) y tiempos (tK_0/H).

- Se han representado para cada tipología los gráficos: tiempo-caudal filtrado, tiempo-caudal filtrado/caudal inicial, tiempo adimensional-caudal adimensional, porcentaje de yeso-tiempo máximo adimensional, porcentaje de yeso-caudal filtrado/caudal inicial. Se muestran a continuación unos ejemplos de los primeros gráficos para dos tipologías de presa³:

PRESA HOMOGÉNEA (L/H=5,25) SIN PANTALLA Y CON CAPA YESÍFERA (e/H=1)



PRESA HOMOGÉNEA (L/H=5,25) CON PANTALLA Y CON CAPA YESÍFERA (e/H=1)



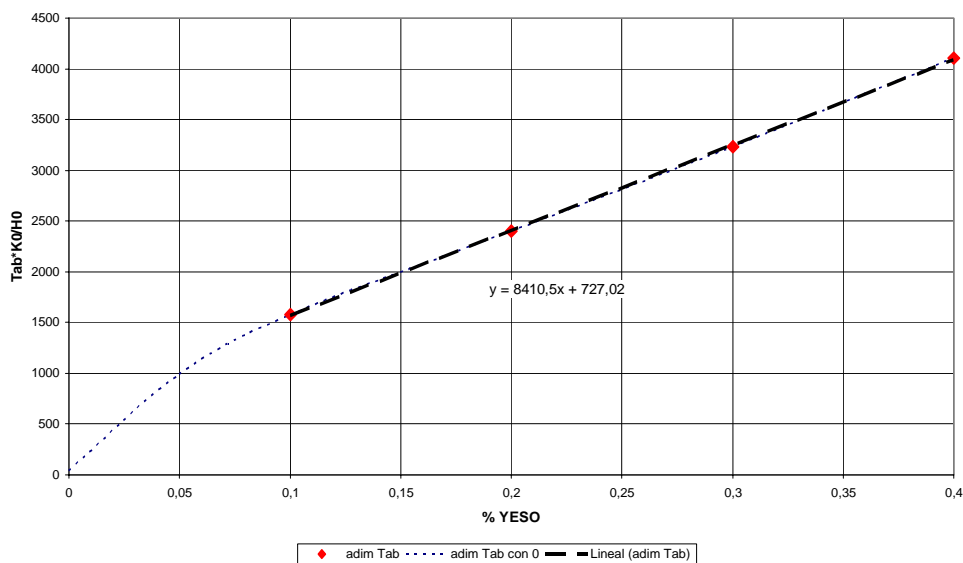
³ L/H es la relación entre el ancho de la base de la presa y la altura y e/H la relación entre el espesor de la capa yesífera y la altura de la presa

El análisis de estos gráficos muestra conclusiones muy importantes para el proyecto de la sección tipo. Por ejemplo, en el primer caso, los caudales se multiplican de forma considerable a partir de un 10 % de yeso. Sin embargo, en la segunda tipología se tiene prácticamente la misma relación Q_{TD}/Q_0 a partir de un 20 %. Además el caudal inicial es mucho menor.

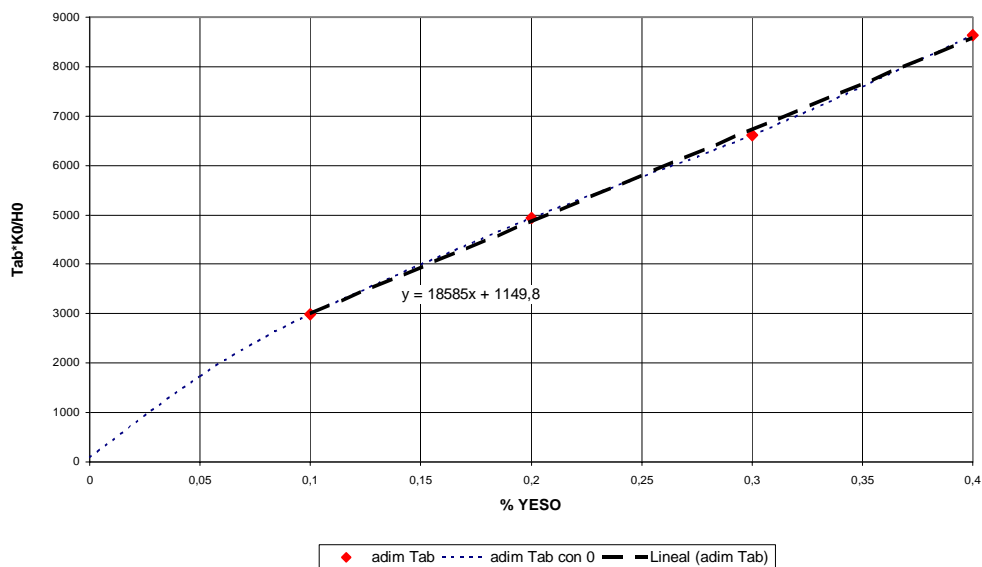
En ambas gráficas se observa que el tiempo que tarda en llegar el frente de disolución aguas abajo de la presa (lo denominamos t_{ab}) es mayor si el porcentaje es mayor y asimismo, el salto de caudales (Q_{ab}/Q_0) también.

Si se representa, en función del % yeso, el t_{ab} adimensional, se obtiene que en ambas tipologías es claramente lineal la relación entre ambos (si el porcentaje de yeso es mayor que 10):

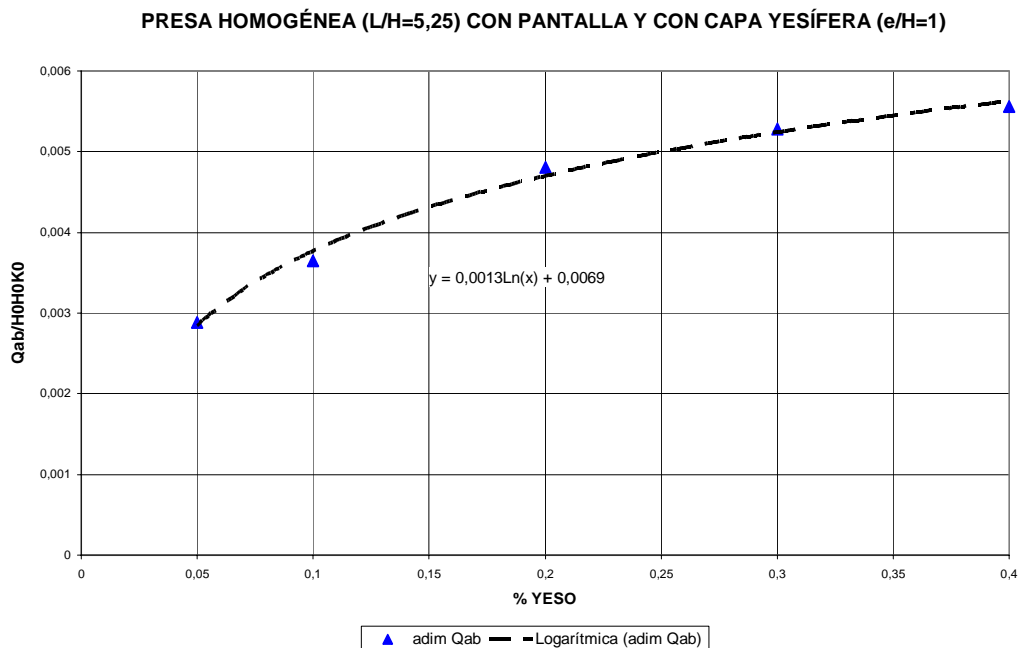
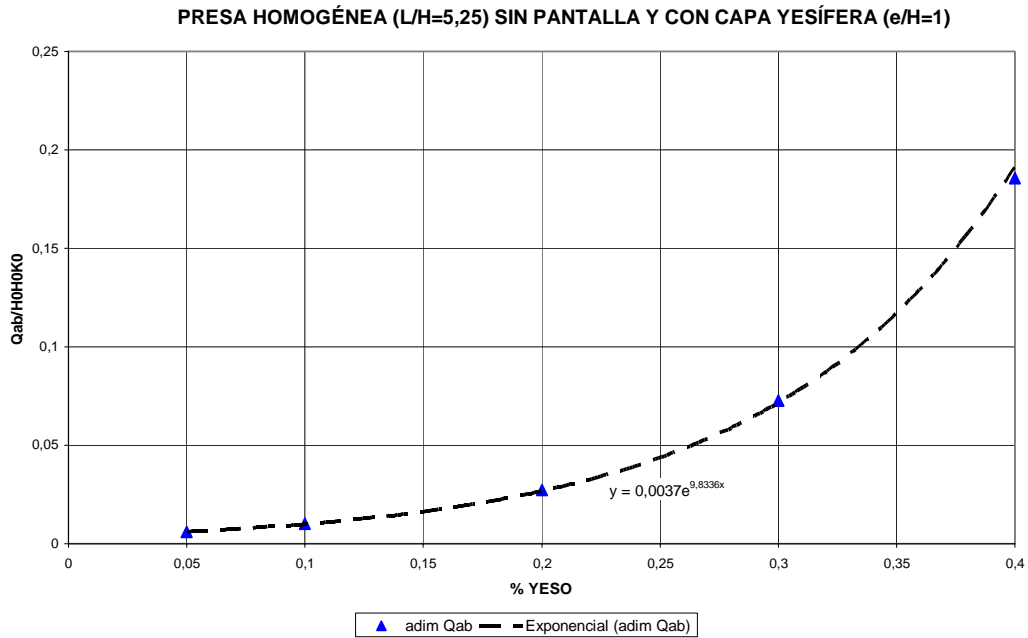
PRESA HOMOGÉNEA (L/H=5,25) SIN PANTALLA Y CON CAPA YESÍFERA (e/H=1)



PRESA HOMOGÉNEA (L/H=5,25) CON PANTALLA Y CON CAPA YESÍFERA (e/H=1)



Sin embargo, si se representa, en función del porcentaje de yeso, el Q_{ab} adimensional, el efecto de la pantalla es claro, ya que consigue que el crecimiento exponencial que tendría el caudal filtrado pase a ser un crecimiento logarítmico:



Es decir, con el diseño de la presa se puede contribuir no sólo a limitar el caudal inicial filtrado, sino a limitar el crecimiento de este caudal y frenar el proceso de disolución.

6. ENSAYOS REALIZADOS

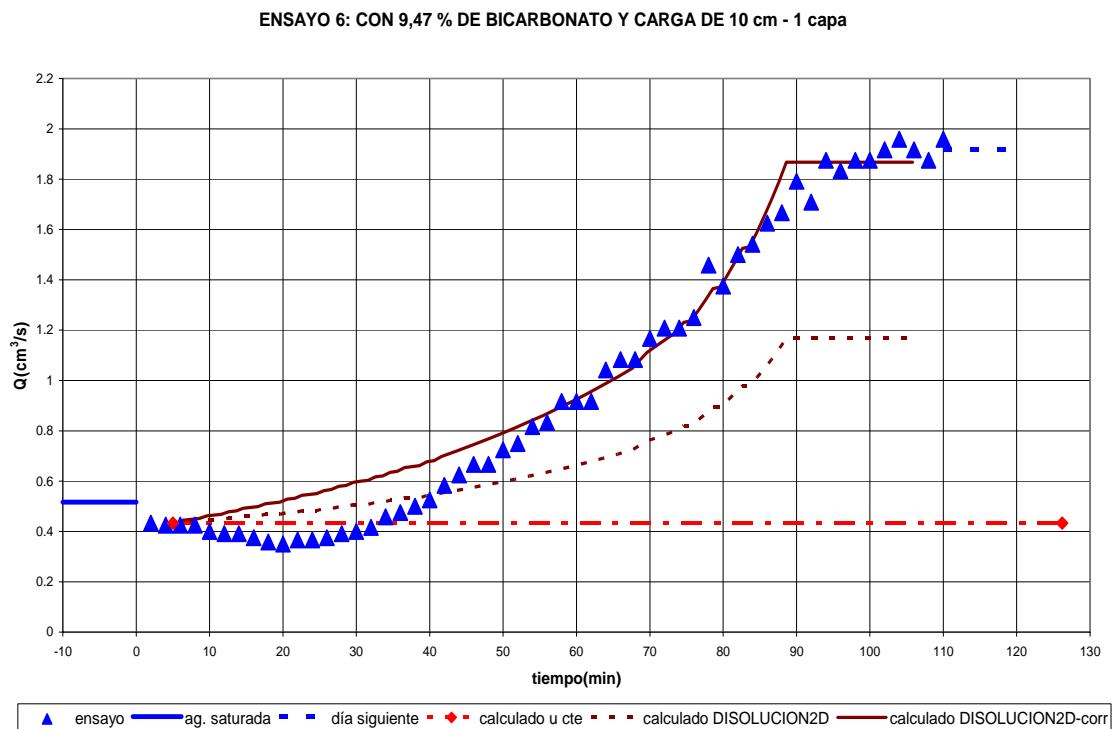
Se han realizado diversos ensayos de permeabilidad con un permeámetro de carga constante (del laboratorio de Geotecnia del CEDEX) para comprobar si el aumento de caudales y el tiempo en el que se producía este aumento era similar a los calculados mediante el modelo numérico DISOLUCIÓN2D. Se han utilizado muestras de arena Hostun con diversos porcentajes de material soluble.

Como material soluble se ha utilizado el bicarbonato sódico, que ha permitido que la duración de los ensayos se redujera a una jornada en la mayor parte de los casos.

Además, dada la solubilidad mayor del bicarbonato sódico en relación con el yeso, ha permitido analizar el proceso de disolución a partir del peso de los volúmenes de agua filtrados.

Esta solubilidad tan elevada produce un aumento de la densidad del agua saturada con bicarbonato respecto al agua limpia, que ha obligado a realizar una corrección en los resultados obtenidos. Esta corrección se ha realizado mediante el análisis de lo que sucede al cambiar el agua (de saturada con bicarbonato a limpia) en una muestra únicamente de arena.

Se muestra a continuación el resultado de uno de los ensayos realizados, donde el caudal medido se representa con triángulos y el caudal calculado con la corrección necesaria en línea continua:



Los ensayos realizados con bicarbonato han permitido constatar la buena aproximación del modelo numérico, ya que la similitud es alta (a pesar de las limitaciones de un ensayo como el permeámetro de carga constante).

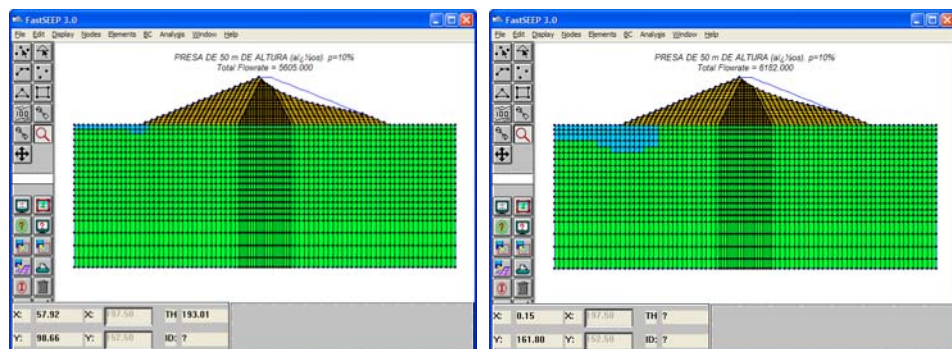
En resumen, pueden establecerse las siguientes conclusiones en función de los trabajos realizados hasta el momento:

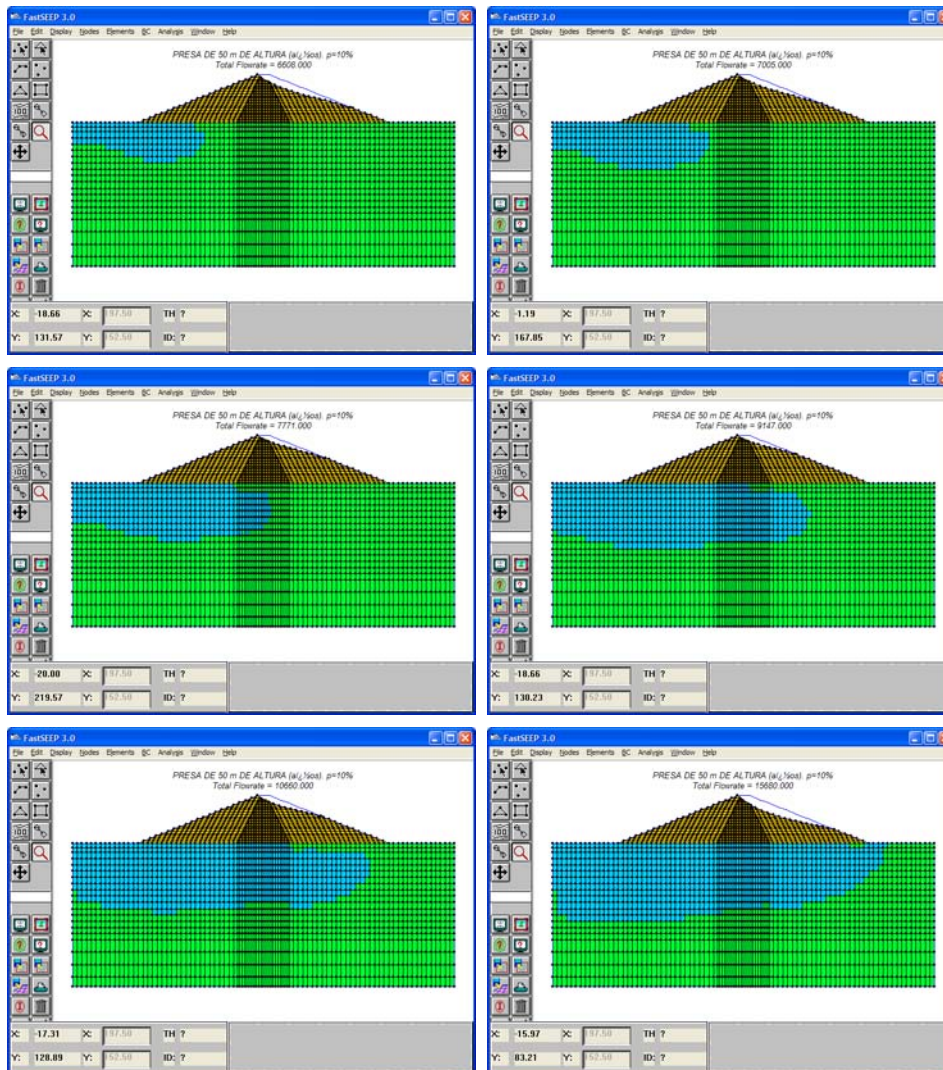
- El avance del frente depende inversamente del porcentaje de material soluble contenido en el suelo y directamente de la solubilidad del material y de la velocidad de filtración.
- La disolución aumenta el coeficiente de permeabilidad del cemento (y por lo tanto, las filtraciones a través de él).
- Todo el material susceptible de disolverse pasa a incrementar la porosidad efectiva, para unos porcentajes de material soluble limitados (esta hipótesis es independiente del material soluble utilizado).
- En el modelo de A.N. James se supone que la velocidad del frente de disolución es constante. Si se considera que el material soluble que ha sido disuelto aumenta la permeabilidad, aumentará la velocidad del flujo y por tanto la velocidad del frente. Esto se puede observar en los gráficos de cada ensayo, donde el tiempo medido y el calculado mediante DISOLUCION2D es similar y menor al calculado con velocidad constante mediante la formulación de A.N. James, (representado como una línea horizontal discontinua).

Por lo tanto, se corrobora la hipótesis de disolución para flujo intergranular de A.N. James y se confirma la validez de las hipótesis de partida de este estudio.

7. EJEMPLO DEL CÁLCULO

Se muestra a continuación un ejemplo de cálculo mediante DISOLUCION2D (con gráficos de SEEP2D), donde se observa, para distintos tiempos, cómo es el avance del frente de disolución (zona azul del cemento):





El avance de los gráficos correspondería a un porcentaje de yeso de un 10%. En este caso, el espesor de cemento afectado por la disolución es del orden de la altura de la presa. Con distinto %, cambia la forma de avance del frente.

REFERENCIAS

- Nernst, H. W. 1888. Z. Phys. Chem. 2, 613.
 James, A.N. 1992. "Soluble material in civil engineering".
 Kozeny, J. 1927. "Ueber kapillare Leitung des Wassers im Boden".
 Carman, P. C. 1937. "Fluid flow through granular beds".
 Carman, P. C. 1956. "Flow of gases through porous media".
 FASTSEEP versión 3.0. Boss International.
 DISOLUCION2D. 2007: Luis Medina Martínez y Carmen María Baena Berrendero.