

Modelo Numérico del Comportamiento Hidrodinámico de un Firme.
Numerical Model of Pavement Hydrodynamical Behaviour.

Vicente Navarro Gámir e Ignacio Pérez Pérez.

Universidade da Coruña

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

RESUMEN: Se presenta en este artículo la aplicación de un nuevo programa de cálculo para estudiar el drenaje interno de un firme y de la explanada que lo sustenta. Se examinan las principales características del código utilizado y se describe su aplicación en la simulación del comportamiento hidrodinámico de los firmes. Como ejemplo de aplicación se ha analizado el drenaje de una base drenante en función de su permeabilidad.

ABSTRACT: In this paper is presented the application of a new calculation program to study the pavement subsurface drainage. The fundamental characteristics of the program are analysed and their application in the simulation of pavement hydrodynamical behaviour is described. As an application example, the drainage of a pavement base course is described in function of their permeability.

1 INTRODUCCIÓN

Usualmente los firmes se encuentran parcialmente saturados. Por ello, tanto para definir la distribución de humedad en su interior, como para describir correctamente su respuesta ante sollicitaciones mecánicas (inducidas por el tráfico) o térmicas (generadas por un gradiente térmico) es aconsejable utilizar modelos que introduzcan los conceptos básicos de la Mecánica de los Suelos Parcialmente Saturados.

Esta área del conocimiento es relativamente nueva. Tal como indica el profesor Jiménez Salas (1990), puede considerarse que inicia su desarrollo sobre los años cincuenta con los trabajos realizados por Croney y Coleman en el Laboratorio de Carreteras de Gran Bretaña. No obstante, ha sido en los dos últimos decenios cuando se han producido los avances más significativos. Muestra de este desarrollo fue la celebración en París en el año 1995 de la Primera Conferencia Internacional de Suelos No Saturados.

En la actualidad se dispone de modelos constitutivos capaces de reproducir los principales rasgos del comportamiento de los suelos parcialmente saturados (Alonso et al., 1987; Alonso et al., 1990; Gens y Alonso, 1992). Para poder utilizar estas formulaciones en la resolución de casos reales, se han desarrollado diversos programas de cálculo que incluyen los modelos en sus bases conceptuales. El programa utilizado en este trabajo ("FADES": Flujo Acoplado a DEformación en Suelos; Navarro, 1987) es una aportación a esta línea de trabajo. Con él puede realizarse la simulación numérica del comportamiento termo-hidro-mecánico de medios porosos parcial o totalmente saturados. Una de sus aplicaciones más relevantes es el análisis del comportamiento de los firmes y explanadas. Aunque FADES permite reproducir el efecto de las cargas sobre los firmes, este artículo va a centrarse en describir su aplicación para caracterizar el drenaje interno.

2 APLICACIÓN DEL PROGRAMA EN EL ANÁLISIS DEL DRENAJE INTERNO DE FIRMES Y EXPLANADAS.

La mayoría de los métodos utilizados para caracterizar el comportamiento drenante de los firmes (ver por ejemplo los propuestos por Casagrande y Shanon, 1952; Barber y Sawyer, 1952; Moulton, 1980) utilizan expresiones con gran carga empírica o basadas en análisis unidimensionales muy simplificados. FADES es una útil herramienta para verificar la validez de esas expresiones, y de este modo, ayudar a mejorar las prácticas de cálculo usuales. El análisis numérico en condiciones realistas (flujo bidimensional parcialmente saturado) de un número significativo de problemas permitiría evaluar la validez de las expresiones obtenidas mediante formulaciones teóricas simplificadas. La reproducción numérica de los ensayos realizados para obtener los coeficientes empíricos utilizados en esas expresiones, ayudaría a examinar si estos coeficientes pueden ser utilizados por administraciones de carreteras en las que la práctica constructiva no sea idéntica a la de la administración que obtuvo el coeficiente. Por otra parte, debe señalarse que los métodos convencionales de cálculo, o no introducen la condición de drenaje longitudinal a las secciones, o lo hacen de modo muy aproximado. En el ejemplo presentado posteriormente en este trabajo puede comprobarse como FADES permite introducir el drenaje longitudinal en el análisis sin necesidad de hacer ningún tipo de corrección adicional.

Además, los métodos de cálculo convencionales no ofrecen información acerca de la dinámica del proceso de drenaje. La descripción de esta dinámica no sólo tiene gran importancia conceptual, si no que en ocasiones cambia por completo la imagen que el proyectista tiene del funcionamiento del elemento que está

proyectando. En particular, es especialmente interesante simular el proceso de saturación que experimenta el firme ante una lluvia.

También debe destacarse que FADES permite reproducir de modo natural el drenaje vertical del firme hacia la explanada. Este análisis es de gran interés tanto para estimar el efecto positivo que una explanada con capacidad drenante tiene ante una infiltración superficial, como para evaluar el efecto negativo que la elevación del nivel freático del terreno puede tener sobre el firme.

Por último conviene remarcar la potencial utilidad del programa en la detección y diagnóstico de patologías. La simulación numérica puede ser una importante ayuda tanto en la identificación de las causas que provocan un funcionamiento incorrecto del drenaje, como en la evaluación de la eficacia de las medidas correctoras a adoptar.

3 BASES TEÓRICAS DEL PROGRAMA.

El programa permite analizar el flujo acoplado o independiente de aire, vapor de agua, agua líquida y calor en medios porosos. Como es sabido, la permeabilidad y el drenaje de los firmes hace que habitualmente en ellos el aire se encuentre a presión constante, por lo que no suele tener interés analizar su flujo. Sin embargo, si que debe prestarse atención al flujo del vapor, dado que los procesos de evaporación tienen una gran relevancia en el comportamiento de los firmes. Este flujo másico suele estar asociado al flujo de calor, flujo energético que determina la distribución de temperaturas en el firme y la explanada, y por ello, condiciona todos los importantes fenómenos asociados a la existencia de gradientes térmicos (ver por ejemplo los trabajos presentados por Fwa, 1987; Richardson y Armaghani, 1987; Thompson et al., 1987; Armaghani et al., 1987). No obstante, dado que el objetivo central de este artículo es el estudio del

drenaje interno de los firmes, sólo se va a analizar el flujo de agua líquida, por lo que en este apartado únicamente van a describirse sus ecuaciones de balance y de movimiento. Aquellos lectores que deseen una descripción más detallada de las bases conceptuales del programa, pueden obtenerla en Navarro (1997).

Para definir el balance de la masa de agua líquida se utiliza la ecuación:

$$\frac{\partial(\rho^w n S_r)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho^w \mathbf{q}^L) = 0 \quad (1)$$

donde ρ^w es la densidad del agua, n es la porosidad, S_r es el grado de saturación y \mathbf{q}^L es la filtración del agua líquida. Para calcularla se utiliza la generalización de la ley de Darcy:

$$\mathbf{q}^L = - \frac{\kappa^L \mathbf{K}^L}{\mu^w} \cdot (\nabla p^L + \rho^w g \nabla z) \quad (2)$$

donde κ^L es la permeabilidad relativa del líquido. Esta variable es función del grado de saturación, y define "la sección útil" de los "canales" del flujo de agua. \mathbf{K}^L es el tensor de permeabilidad intrínseca. Describe la variación de la permeabilidad con la porosidad y con la tortuosidad de los "canales" de flujo. Se diferencia de la permeabilidad saturada en que no refleja la influencia de la densidad y de la viscosidad del líquido. Por último, μ^w es la viscosidad dinámica del agua.

En el programa se contempla un gran número de leyes distintas para definir tanto la curva de retención (expresión que usualmente determina el grado de saturación en función de la succión- presión de gas menos presión del líquido-), como las permeabilidades intrínseca y relativa del medio.

4 DRENAJE DE UNA BASE GRANULAR.

Como ejemplo de aplicación de FADES se presenta la simulación del drenaje de una base granular (ver figura 1). Se ha

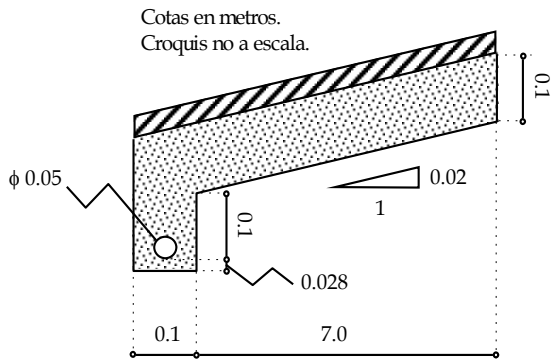


Figura 1. Croquis de la sección de firme analizada.

seleccionado esta base porque al haber sido analizada por McEnroe en 1994 se podrán comparar los resultados. En el análisis se ha utilizado la misma curva de retención que McEnroe (1994):

$$S_r = \begin{cases} 1, & \text{si } s \leq s_a \\ S_{r_m} + (1 - S_{r_m}) \left(\frac{s_a}{s} \right)^\lambda, & \text{si } s > s_a \end{cases} \quad (3)$$

Esta ley es la conocida fórmula de Brooks y Corey (1964). En ella S_{r_m} es el grado de saturación residual (mínimo grado de saturación que puede existir en el suelo) y s_a es la succión de entrada de aire (succión a partir de la cual el suelo deja de estar saturado). El parámetro λ es el índice de distribución del tamaño de poro, y controla la curvatura de la curva de retención. De acuerdo con McEnroe (1994) se ha supuesto que el material granular de la base está bien graduado, por lo que se ha tomado $\lambda=4$ y $S_{r_m}=0.1$. El valor de s_a se define a partir de la permeabilidad hidráulica del suelo mediante la expresión (McEnroe, 1994)

$$s_a = 13.33 \quad k^{-1/2} \quad (4)$$

donde k debe introducirse en metros por día para obtener s_a en kPa.

Para la permeabilidad relativa se ha tomado la ley de Corey (1957):

$$\kappa = \left(\frac{S_r - S_{r_m}}{1 - S_{r_m}} \right)^4 \quad (5)$$

De las expresiones anteriores se deduce que las propiedades del material de la base quedan totalmente definidas por su permeabilidad.

En la simulación se ha supuesto que los contactos de la base granular con la explanada y el pavimento son impermeables, al igual que el borde externo (cuneta revestida) y el interno (simetría). En condiciones iniciales se ha adoptado la hipótesis de que la base está completamente saturada y en situación hidrostática. Se ha utilizado una malla de 174 elementos finitos, con 226 nudos.

En la figura 2 se presenta la variación del mínimo grado de saturación obtenido en la base en función de la permeabilidad. Puede comprobarse que los resultados obtenidos mediante la formulación propuesta por McEnroe (1994) (en la figura en trazo discontinuo) y mediante FADES (en la figura en trazo continuo) son prácticamente idénticos, y difieren bastante de los valores obtenidos mediante la ecuación propuesta por la FHWA (Moulton, 1980) (en la figura en trazo de rectas y puntos) para definir el grado de saturación mínimo. Los resultados obtenidos por FADES confirman las conclusiones de McEnroe (1994): para que una base granular funcione bien debe tener un tamaño de partícula elevado. Materiales con permeabilidades inferiores a 1.7×10^{-4} m/s (≈ 15 m/día) apenas drenan, pues en ellos la presión de entrada de aire es superior a la succión que se produce por efecto puramente gravitatorio. Para alcanzar un grado de saturación del 50 % se necesita una permeabilidad de 7.4×10^{-4} m/s (≈ 64 m/día), y para que el grado de saturación final sea inferior al 20 % es necesaria una permeabilidad superior a 1.7×10^{-3} m/s (≈ 150 m/día).

Para obtener los valores finales del grado de saturación reflejados en la figura 2 se ha simulado con FADES el drenaje del firme durante 30 días para distintas permeabilidades. De este análisis se ha obtenido también el tiempo necesario para alcanzar un grado de saturación del 85 %, representado en la figura 3. Aunque las tendencias de comportamiento obtenidas por los distintos métodos utilizados son similares, se observan mayores diferencias que las registradas al definir la situación final en la gráfica 2. Es lógico que así sea, pues el tiempo asociado a un grado de saturación del 85 % es un parámetro "intermedio" del modelo del flujo, mucho más sensible a la calidad de este modelo que la descripción de la situación final. Debe recordarse que los programas SUBDRAIN (citado en McEnroe, 1994) y DAMP (Carpenter, 1990) están basados en modelos unidimensionales del flujo, en los que no se simula correctamente el drenaje externo de la sección de firme (ya sea hacia una cuneta o hacia un dren longitudinal). FADES si permite reproducir

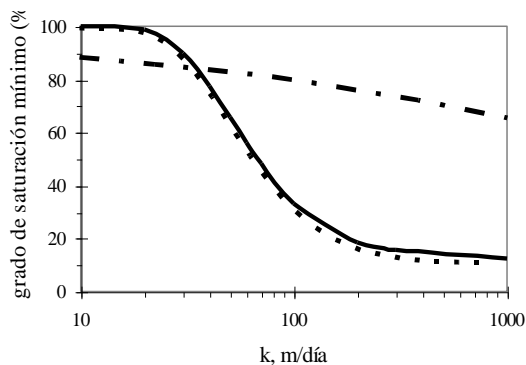


Figura 2. Grados de saturación mínimos. Línea continua, FADES. Discontinua, McEnroe (1994). Rectas y puntos, FHWA (Moulton, 1980).

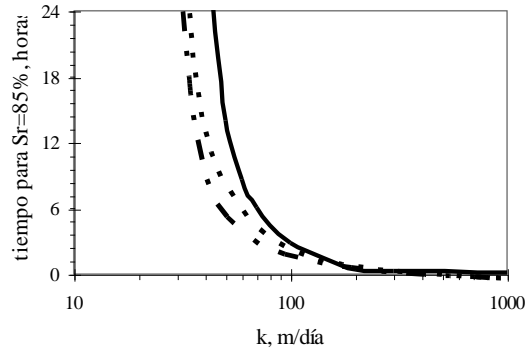


Figura 3. Tiempo necesario para $S_r=85\%$. Línea continua, FADES. Discontinua, SUBDRAIN; rectas y puntos DAMP.

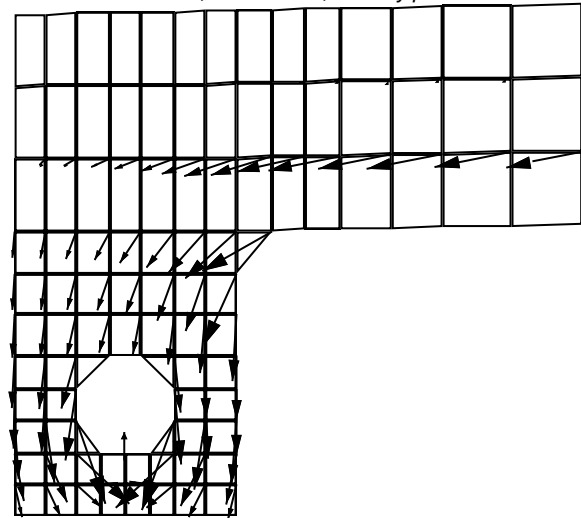


Figura 4. Red de filtración en torno al dren longitudinal. $k=100$ m/día, $t=0.75$ horas.

con sencillez este drenaje. En la figura 4 se han representado las líneas de filtración hacia el dren longitudinal considerado en este ejemplo.

La incorrecta simulación del drenaje de las secciones hace que se sobrestime la capacidad drenante de la sección estudiada, fenómeno que adquiere mayor importancia cuanto menor es la permeabilidad de la base granular. Este tipo de comportamiento se observa también en la figura 5, donde se han comparado los tiempos necesarios para obtener el 50 % del máximo drenaje posible ($U=\{(1-S_r)/(1-S_{r,m})\}=0.5$).

5 CONCLUSIONES.

El programa FADES permite la completa simulación del comportamiento drenante de los firmes. Con él se pueden introducir de modo natural el efecto que el drenaje longitudinal, el drenaje vertical hacia la explanada o el posible drenaje hacia la cuneta tiene en el comportamiento drenante de las secciones de firme. De este modo se corrigen errores que usualmente se cometen al utilizar los métodos de cálculo convencionales, ya que éstos están basados en modelos unidimensionales del flujo. Por ello, el

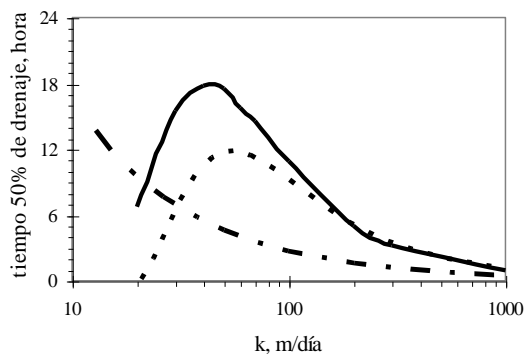


Figura 5. Tiempo necesario para alcanzar $U=50\%$. Línea continua, FADES. Discontinua, SUBDRAIN. Rectas y puntos, DAMP.

programa puede ser utilizado para ayudar a validar los métodos de cálculo utilizados en la práctica ingenieril.

El programa permite simular en condiciones realistas (flujo bidimensional parcialmente saturado) la dinámica del flujo en el interior del firme, ejercicio de gran riqueza descriptiva y de indudable aplicación práctica, especialmente en la detección y análisis de las medidas a adoptar ante comportamientos patológicos. Además el programa puede ser una importante herramienta de apoyo en las campañas de investigación experimental, pues la simulación numérica de los ensayos realizados mejora la interpretación los resultados obtenidos.

Dado que FADES también permite simular el comportamiento termomecánico de los materiales porosos, puede utilizarse para analizar el efecto que tienen en los firmes tanto de las cargas mecánicas o térmicas. Los distintos análisis (flujo de agua, flujo

de calor y comportamiento deformacional) pueden hacerse tanto de modo independiente como acoplado

REFERENCIAS.

- Alonso, E.E., Gens, A. y High, D.W. (1987) Special Problem Soils. General Report. *Proc. 9th Europ. Conf. Soil Mech. Fdn. Engng.*, Dublin, 3, pp. 1087-1146.
- Alonso, E.E., Gens, A. y Josa, A. (1990) A Constitutive Model for Partially Saturated Soils. *Géotechnique*, 40, pp. 405-430.
- Armaghani, J.M. Larsen., T.J. and Vogel, J. (1987). Temperature Response of Concrete Pavements. Transportation Research Record 1121. Transportation Research Board. National Research Council.
- Barber, E.S. y Sawyer, C.L. (1952). Highway Subdrainage. Highway Research Board Proceedings. pp 642-666.
- Brooks, R.H., and Corey, A.T. (1964). Hydraulic Properties of Porous Media. Hydrology Paper 3. Colorado State University, Ford Collins.
- Carpenter, S.H. (1990). Highway Subdrainage Design by Microcomputer. Drainage Analysis and Modelling Programs (DAMP). Report FHWA IP-90-012. FHWA. U.S. Department of Transportation.
- Casagrande, A. y Shannon, W.L. (1952). Base Course Drainage for Airport Pavements. ASCE, Transactions, 117, pp. 792-820.
- Corey, A.T. (1957). Measurement of Water and Air Permeability in Unsaturated Soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 21, pp. 7-10.
- Fwa, T.F (1987). Water-Induced Distress in Flexible Pavement in a Wet Tropical Climate. Transportation Research Record 1121. Transportation Research Board. National Research Council.
- Gens, A. y Alonso, E.E. (1992) A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays. *Can. Geotech. J.*, 29, pp. 1013-1032.

- Jimenez Salas, J.A. (1990) Hacia una Mecánica de los Suelos no Saturados. Conferencia "Nabor Carrillo" en la Sociedad Mexicana de Suelos.
- McEnroe, B. M. (1994). Drainability Of Granular Bases for Highway pavements. Transportation Research Record 1434. Transportation Research Board. National Research Council.
- Moulton, L.K. (1980). Highway Subdrainage Design. Report FHWA-TS-80-224. Federal Highway Administration.
- Navarro, V. (1997) Modelo del Comportamiento Mecánico e Hidráulico de Suelos no Saturados en Condiciones no Isotermas. *Tesis Doctoral*. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Richardson, M.J., Armaghani, J.M. (1987). Stress Caused by Temperature Gradient in Portland Cement Concrete Pavements. Transportation Research Record 1121. Transportation Research Board. National Research Council.
- Thompson, M.R., Demsey, B.J., Hill, H, Vogel, J. (1987). Characterizing Temperature Effects for Pavement Analysis and Design. Transportation Research Record 1121. Transportation Research Board. National Research Council.