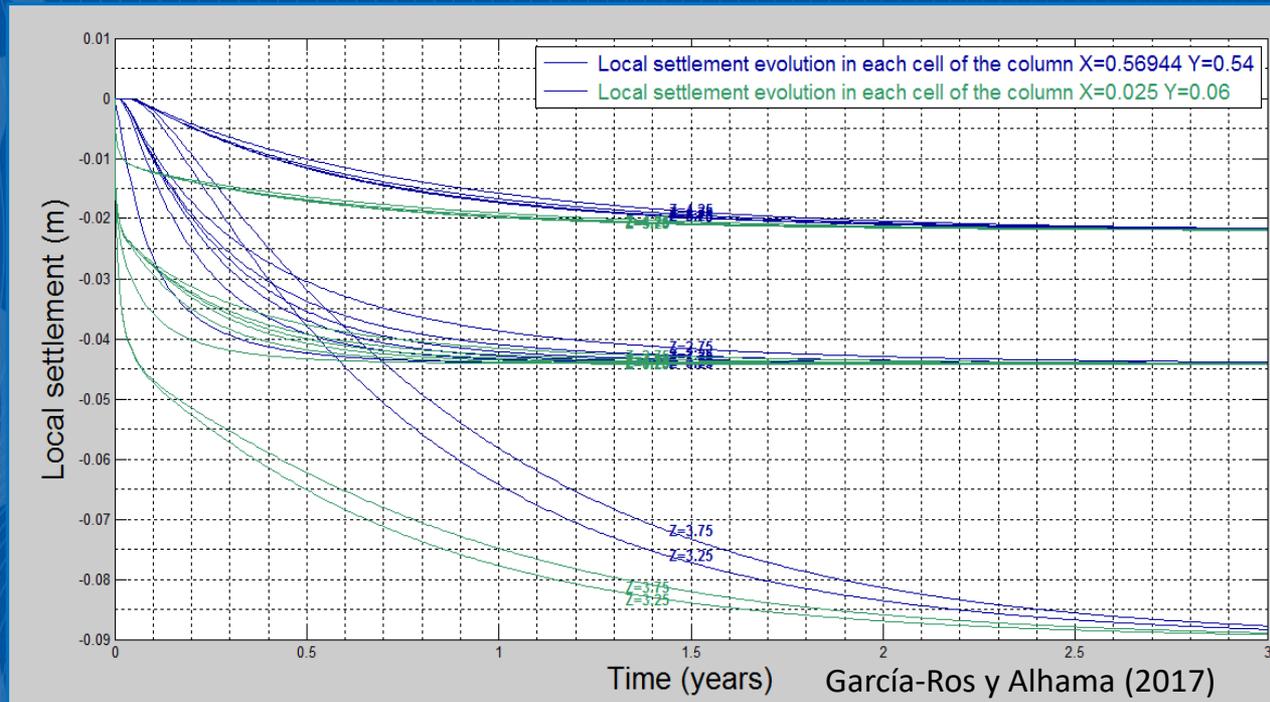


Mecánica Avanzada de Suelos

MCieTAT (UPCT)



Tema 8

Programas para la resolución de casos prácticos

Prof. Gonzalo García Ros



ÍNDICE

El programa SICOMED_3D

Modelo de consolidación 3D. Ecuación de gobierno

Modelo de consolidación 3D. Solución de la ecuación de gobierno

Solución analítica vs. solución numérica

El programa SICOMED_3D

Entrada de datos

Datos geométricos en planta

Datos relativos a la geometría de los estratos y coeficientes de consolidación

Parámetros necesarios relacionados con la simulación

Representación de resultados

El paquete de software GeoStudio

Características del paquete de software GeoStudio

Programas de interés para la mecánica de suelos del paquete de software GeoStudio

SEEP/W

SLOPE/W

Referencias



Modelo de consolidación 3D. Ecuación de gobierno

El planteamiento del problema en coordenadas 3-D permite obtener una solución más precisa que la obtenida por simplificación a una geometría radial:

La variación del exceso de presión intersticial (u) a lo largo del tiempo se iguala a la suma de los flujos de agua en las tres direcciones espaciales (x, y, z)

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_{v,z} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + c_{v,h} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$$

u : exceso de presión intersticial (kPa)

t : tiempo (años)

$c_{v,z}$: coeficiente de consolidación vertical (m²/año)

z : coordenada espacial vertical (m)

$c_{v,h}$: coeficiente de consolidación horizontal (m²/año)

x : coordenada espacial de longitud (m)

y : coordenada espacial de ancho (m)

k_v : conductividad hidráulica (permeabilidad) vertical (m/año)

k_h : conductividad hidráulica (permeabilidad) horizontal (m/año)

e : índice de poros (adimensional)

γ_w : peso específico del agua (kN/m³)

a_v : coeficiente de compresibilidad del suelo (m²/kN)

$$c_{v,z} = \frac{k_v(1+e)}{\gamma_w a_v}$$

$$c_{v,h} = \frac{k_h(1+e)}{\gamma_w a_v}$$

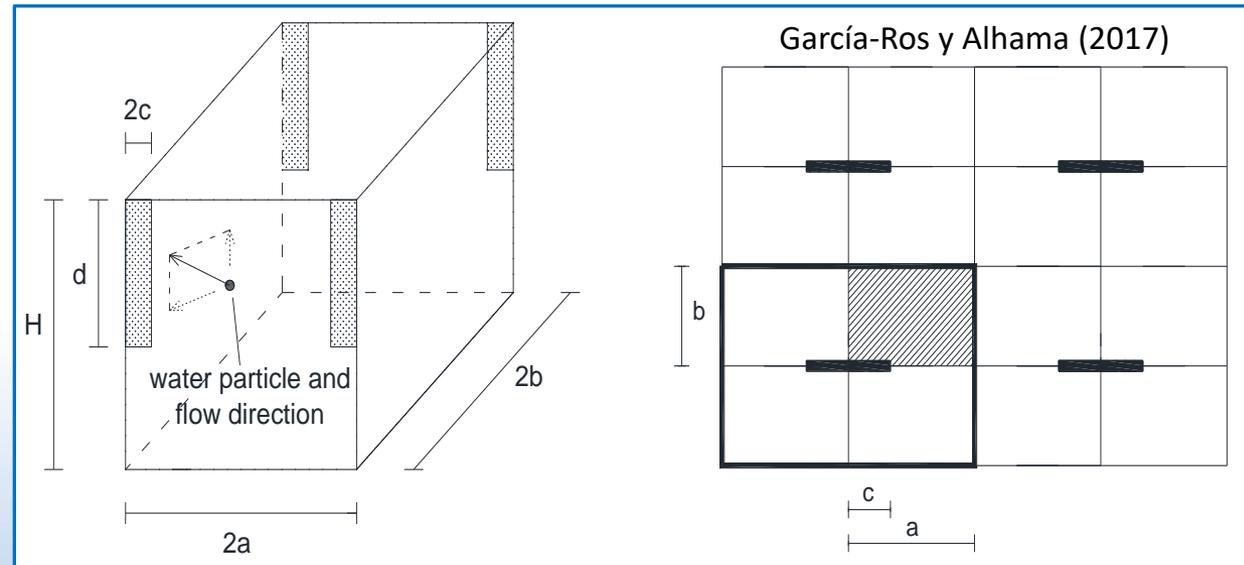


Modelo de consolidación 3D. Solución de la ecuación de gobierno

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_{v,z} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + c_{v,h} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$$

Las soluciones analíticas para el problema de consolidación en geometrías tridimensionales, tanto para el exceso de presión intersticial como para el grado medio de consolidación, se pueden obtener en forma de desarrollos de largas series, cuya aplicación en la práctica por parte del ingeniero civil queda prácticamente casi descartada.

Por otro lado, no se puede implementar una solución gráfica en forma de ábacos, dado el elevado número de parámetros de los que depende el problema: separación entre drenes, separación entre hileras de drenes, geometría o disposición en el terreno, ancho de la drenaje y profundidad de penetración.



Esquema físico del proceso de consolidación 3-D con drenes verticales. Disposición rectangular

La solución se vuelve aún más compleja si queremos abordar el problema en un suelo heterogéneo, formado por capas de diferentes propiedades geotécnicas.



Solución analítica vs. solución numérica

Como hemos visto, obtener soluciones analíticas para el problema de consolidación de suelos con drenes verticales prefabricados puede ser una tarea compleja:

- La reducción del problema a una geometría radial implica una serie de aproximaciones, debiendo determinar valores equivalentes tanto para el radio del dren (r_w) como para el radio efectivo (r_e), con el consecuente porcentaje de error que esto conlleva. La solución, además, se limita a suelos monocapa.
- La solución en geometrías 3-D es mucho más precisa en cuanto al error cometido, aunque la obtención de la solución analítica es aún más compleja que en geometrías radiales.

Por todo ello, con la capacidad de cálculo que tienen los ordenadores hoy en día, es posible resolver estos problemas de consolidación de suelos mediante técnicas numéricas.

Correctamente implementado, el programa de cálculo es capaz de resolver con precisión el modelo matemático que representa el terreno con la máxima fidelidad: separaciones entre drenes, disposición en la superficie del terreno, suelos multicapa, profundidad de penetración de los drenes, etc...



El programa SICOMED 3D

El software SICOMED_3D, acrónimo de “Simulación de CONsolidación con MEchas Drenantes”, permite simular el problema de consolidación 3-D con drenes verticales en suelos heterogéneos formados por 1, 2 o 3 capas.

Desarrollado por el grupo de investigación “Simulación por Redes”, de la UPCT.

El método numérico que utiliza el programa es el método de redes (analogía eléctrica con el modelo matemático). El código informático es Ngspice (2016), un software gratuito para la resolución de circuitos eléctricos.

Mediante una sencilla interfaz gráfica (compuesta por un total de tres pantallas, que aparecen consecutivamente a medida que se completa la entrada de datos), el usuario establece las propiedades geométricas y físicas del suelo, la carga aplicada sobre la superficie del terreno y el tamaño de la malla, así como algunos parámetros necesarios relacionados con la simulación, como el tiempo inicial y final de la simulación.

La organización y estructura del programa ha sido diseñada con el objetivo de proporcionar al usuario una herramienta de cálculo potente y útil, además de ser sencilla tanto en la entrada de datos como en la interpretación de los resultados.



Entrada de datos

Datos geométricos en planta

Al iniciar el programa SICOMED_3D, se abre la primera pantalla, en la que se ingresan los datos relacionados con la geometría del problema en planta: longitud total (separación entre drenes), ancho total (separación entre filas de drenes) y ancho del dren. Además, en esta primera pantalla tenemos que establecer el número de celdas (tamaño de mallado) que queremos asignar a cada una de estas medidas, tal y como se muestra en la siguiente figura.

The screenshot shows the SICOMED_3D software interface. It features a menu bar with 'File' and 'Help'. The main area is titled 'SICOMED_3D' and contains two sections for data entry:

- Length Data:**
 - Total Length X (m): 1 (input field)
 - PVD Length X (m): 0.05 (input field)
 - Length X without PVD (m): 0.95 (input field)
 - Number of cells in X: 10 (input field)
 - Number of cells for PVD in X: 1 (input field)
 - Number of cells without PVD in X: 9 (input field)
- Width Data:**
 - Total Width Y (m): 1 (input field)
 - Number of cells in Y: 8 (input field)

Below the input fields are two buttons: 'VERIFY' (highlighted in orange) and 'CONTINUE' (grey). To the right, there are two diagrams: a 3D perspective view of a drainage system with dimensions $2a$, $2b$, c , and d ; and a 2D grid diagram showing a 4x4 grid with a shaded central cell and dimensions a , b , and c .

García-Ros y Alhama (2017)

Mediante el botón “Verify” el programa comprueba que los datos introducidos sean coherentes, y con el botón “Continue” pasamos a la siguiente pantalla.



Entrada de datos

Datos relativos a la geometría de los estratos y coeficientes de consolidación

En primer lugar, elegimos el número de estratos que componen el suelo, mediante una pestaña desplegable (de 1 a 3 estratos posibles). Una vez seleccionada esta opción se introduce el grosor de cada capa, así como la cuadrícula que queremos utilizar para cada capa.

Mediante un segundo desplegable introducimos directamente los valores de los diferentes coeficientes de consolidación (c_{vi} y c_{hi} son los respectivos coeficientes de consolidación vertical y horizontal de la capa i). Una segunda opción es introducirlos a partir de los diferentes parámetros del suelo con los que se obtienen estos coeficientes (esta segunda opción permite un análisis adicional en cuanto a la determinación del valor de los asentamientos).

$$c_{vi} = \frac{k_{vi}(1 + e_{oi})}{\gamma_w a_{vi}} \quad c_{hi} = \frac{k_{hi}(1 + e_{oi})}{\gamma_w a_{vi}}$$

donde:

- k_{vi} : conductividad hidráulica vertical de la capa i , (m/año)
- k_{hi} : conductividad hidráulica horizontal de la capa i , (m/año)
- e_{oi} : índice de poros inicial de la capa i , (adimensional)
- γ_w : peso específico del agua (N/m³)
- a_{vi} : coeficiente de compresibilidad del suelo (m²/N)

Como unidad de medida del tiempo se ha elegido el año, una magnitud más apropiada que el segundo para este tipo de problemas. De esta forma, c_{vi} y c_{hi} tienen unidades de m²/año.



Entrada de datos

Datos relativos a la geometría de los estratos y coeficientes de consolidación

Finalmente, también a través de una tercera pestaña desplegable, elegimos la profundidad de penetración de la mecha drenante. El programa permite elegir entre 4 opciones diferentes: mecha parcialmente penetrante en la capa superior (con opción de profundidad de penetración y rejilla deseada), o mecha totalmente penetrante en la primera, segunda o tercera capa (con profundidad y rejilla asignadas automáticamente por el programa). En la figura de la derecha se muestra una captura de esta segunda ventana de entrada de datos.

García-Ros y Alhama (2017)

Number of layers
 APPLY 3 (Layers already selected)

Thicknesses and numbers of cells

LAYER 1 DATA		LAYER 2 DATA		LAYER 3 DATA	
<input type="text" value="1"/>	Thickness of top layer (m)	<input type="text" value="1"/>	Thickness of intermediate layer (m)	<input type="text" value="1"/>	Thickness of bottom layer (m)
<input type="text" value="5"/>	Number of cells in Z (top layer)	<input type="text" value="5"/>	Number of cells in Z (intermediate layer)	<input type="text" value="5"/>	Number of cells in Z (bottom layer)
3 Total Thickness (m). "H"		15 Total Number of cells in Z			

Cvi and Chi Data
 APPLY 2 (Cv option selected)

Coefficients of permeability (hydraulic conductivity), coefficients of compressibility and initial void ratios

<input type="text" value="0.02"/>	kv of top layer (m/year)	<input type="text" value="0.06"/>	kv of intermediate layer (m/year)	<input type="text" value="0.04"/>	Kv of bottom layer (m/year)
<input type="text" value="0.04"/>	kh of top layer (m/year)	<input type="text" value="0.12"/>	kh of intermediate layer (m/year)	<input type="text" value="0.08"/>	Kh of bottom layer (m/year)
<input type="text" value="5.7e-06"/>	av of top layer (m ² /N)	<input type="text" value="4e-06"/>	av of intermediate layer (m ² /N)	<input type="text" value="3.7e-06"/>	av of bottom layer (m ² /N)
<input type="text" value="1.5"/>	e0 of top layer	<input type="text" value="1.25"/>	e0 of intermediate layer	<input type="text" value="1"/>	e0 of bottom layer
0.895095	Cv of top layer (m ² /year)	3.44388	Cv of intermediate layer (m ² /year)	2.20629	Cv of bottom layer (m ² /year)
1.79019	Ch of top layer (m ² /year)	6.88776	Ch of intermediate layer (m ² /year)	4.41258	Ch of bottom layer (m ² /year)

Penetration of the drain
 1 (PVD option selected)

WARNING! Must be slower than 1 (m) WARNING! Must be slower than 5

 Thickness of top layer without drain 0.6 (m)

Number of cells of top layer without drain 3



Entrada de datos

Parámetros necesarios relacionados con la simulación

De nuevo, mediante dos botones de verificación el programa comprueba que los datos introducidos sean coherentes, y mediante el botón “Continue” pasamos a la tercera pantalla, donde se introducen los parámetros relacionados con la simulación que necesita el programa para realizar los cálculos: carga superficial uniforme (N/m^2), tiempo inicial a partir del cual se obtendrán resultados, tiempo de cálculo final, incremento de tiempo máximo entre cada iteración y un parámetro de tolerancia relativa utilizado por Ngspice para alcanzar la convergencia del problema. Una vez introducidos todos estos datos se puede iniciar la simulación, mediante el botón “Run”. La siguiente figura muestra una captura de esta tercera pantalla de ingreso de datos.

Como se puede observar, la segunda y tercera pantalla de introducción de datos cuentan con un botón de retroceso (“Back”) a la pantalla anterior, en caso de querer revisar, modificar o guardar los datos ingresados anteriormente. Para guardar los datos, es necesario regresar hasta la primera pantalla de introducción de datos.

Simulation Data

García-Ros y Alhama (2017)

Uniform Load
 (N/m²)

Initial Time
 (Years)

Final Time
 (Years)

Time increment for each iteration (approx.)
 (Years)

RELTOL (determines convergence across iterations)



Representación de resultados

Al final de las simulaciones, los resultados se pueden ver gráficamente. Esta última parte del programa cuenta con una gran variedad de formas de obtención de resultados, dispuestas convenientemente para que el ingeniero geotécnico pueda conocer la información que necesita de una forma sencilla, rápida y precisa.

El programa ofrece hasta 6 posibilidades de representación de resultados, que se seleccionan a través de una pestaña desplegable:

- 1) Evolución del exceso de presión intersticial en una columna de suelo.
- 2) Evolución del exceso de presión intersticial en un punto del suelo.
- 3) Grado medio de consolidación.
- 4) Evolución del asentamiento local en una columna de suelo*.
- 5) Evolución del asentamiento superficial en una columna de suelo*.
- 6) Video-animación de asentamientos superficiales*.

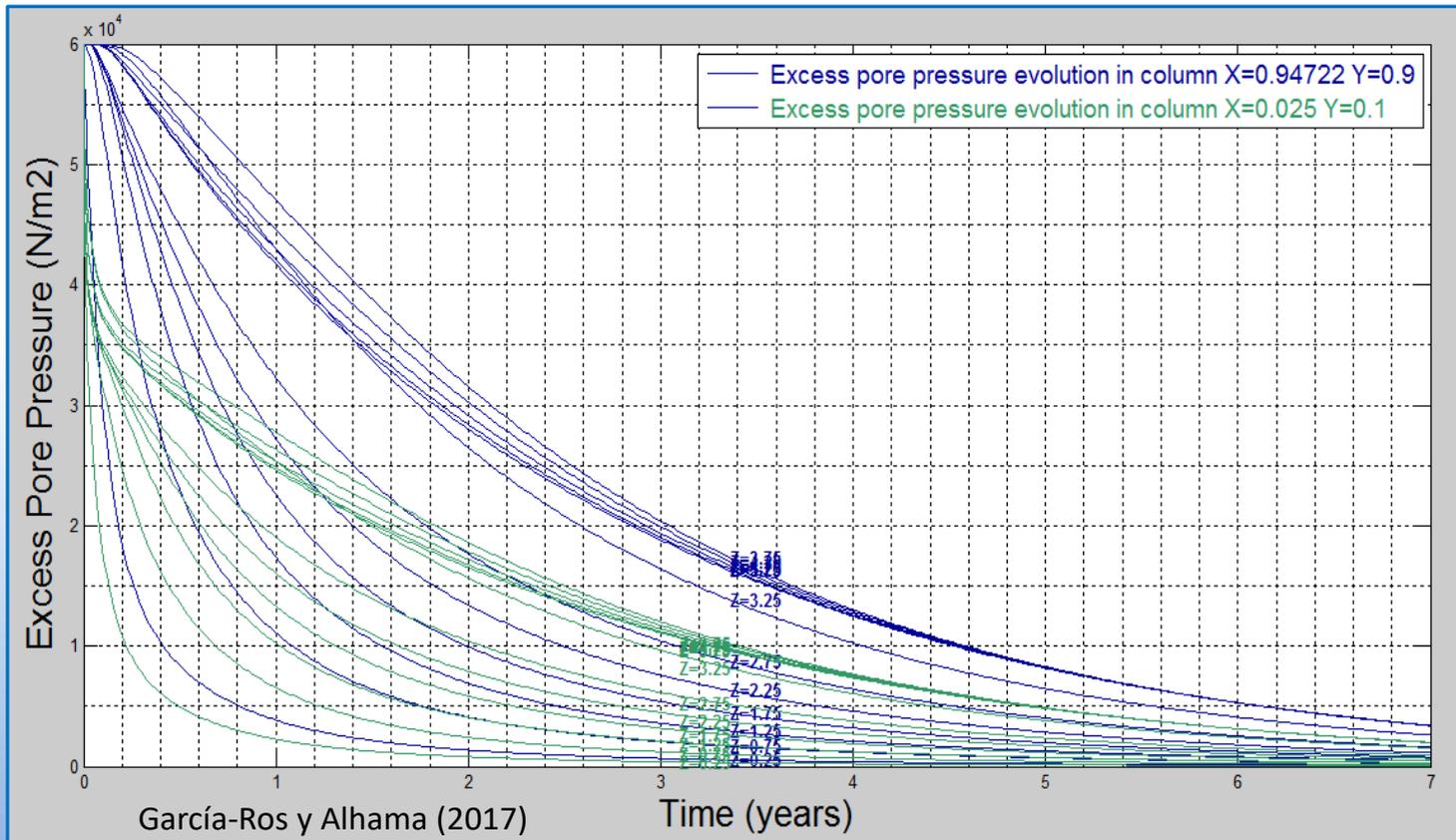
* solo disponible en la opción que permite el cálculo de asentamientos



Representación de resultados

1) Evolución del exceso de presión intersticial en una columna de suelo

Esta opción permite obtener la evolución del exceso de presión intersticial en todas las celdas de una o dos columnas de suelo. El usuario ingresa la ubicación de las columnas a representar por sus coordenadas X e Y, así como los tiempos inicial y final deseados para la representación gráfica.





Representación de resultados

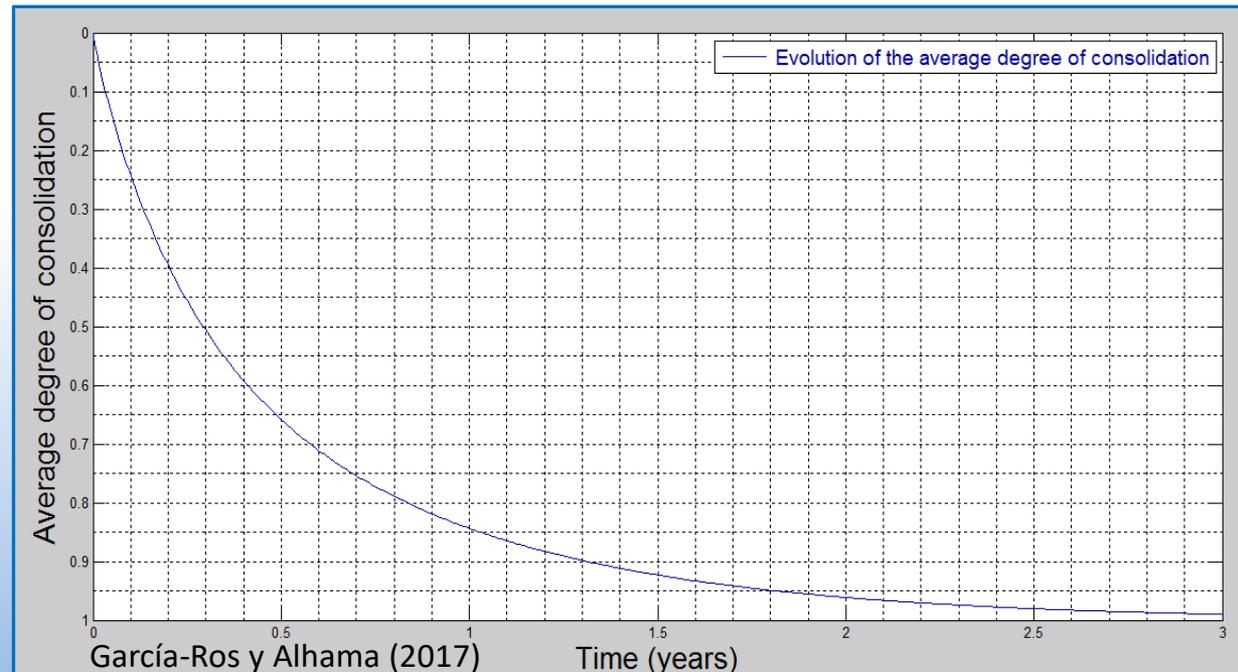
2) Evolución del exceso de presión intersticial en un punto del suelo

Esta es una variante del gráfico anterior. En este caso es posible obtener la evolución del exceso de presión intersticial en uno, dos o tres puntos localizados del suelo, determinados por sus coordenadas X, Y y Z.

3) Grado medio de consolidación

Esta representación gráfica muestra la evolución del grado medio de consolidación del suelo.

Esta función nos da información sobre el porcentaje de consolidación alcanzado en la superficie del terreno, determinado por la relación entre el asentamiento superficial medio en un tiempo determinado y el asentamiento superficial final al terminar el proceso de consolidación.

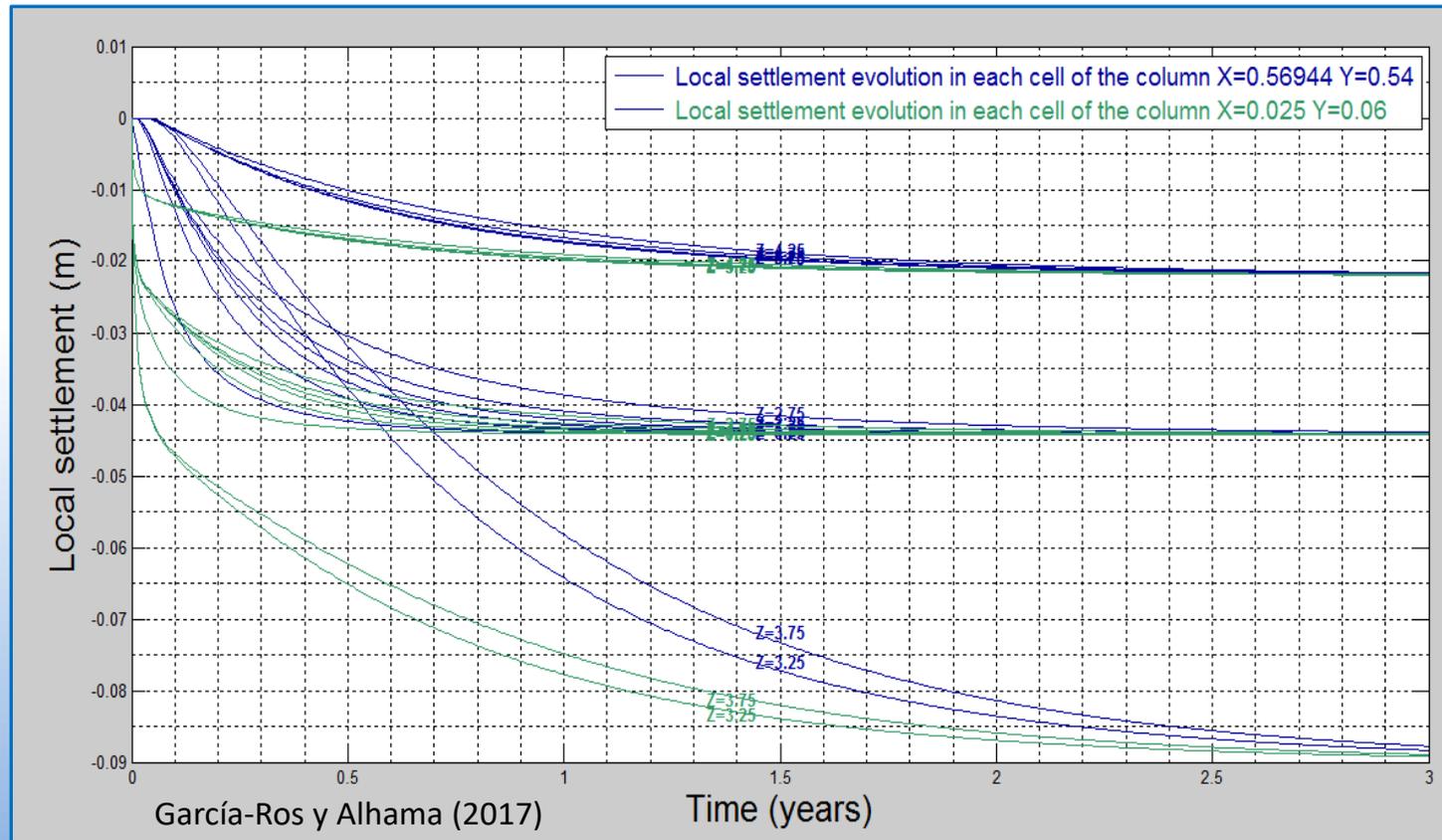




Representación de resultados

4) Evolución del asentamiento local en una columna de suelo

Es una representación análoga al exceso de presión intersticial en cada celda de una columna de suelo, pero en este caso la variable representada es el asentamiento local (disminución del espesor de cada celda con respecto a su espesor inicial).

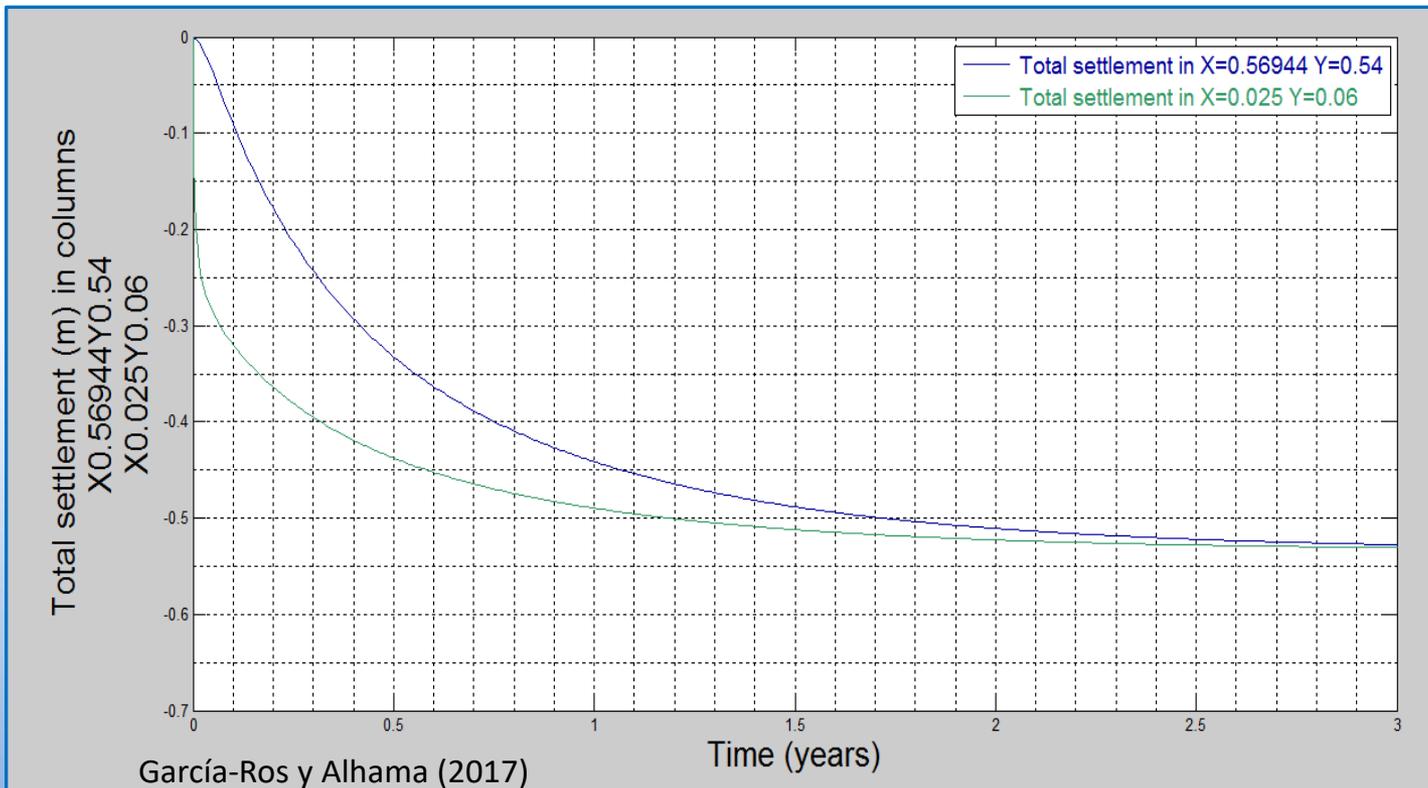




Representación de resultados

5) Evolución del asentamiento superficial en una columna de suelo

Con esta representación gráfica obtenemos la evolución del asentamiento superficial (suma de todos los asentamientos locales) de una o varias columnas del terreno. El usuario ingresa la ubicación de las columnas a representar por sus coordenadas X e Y, así como los tiempos inicial y final de la gráfica. Es posible representar el asentamiento superficial de hasta 2 columnas simultáneamente.

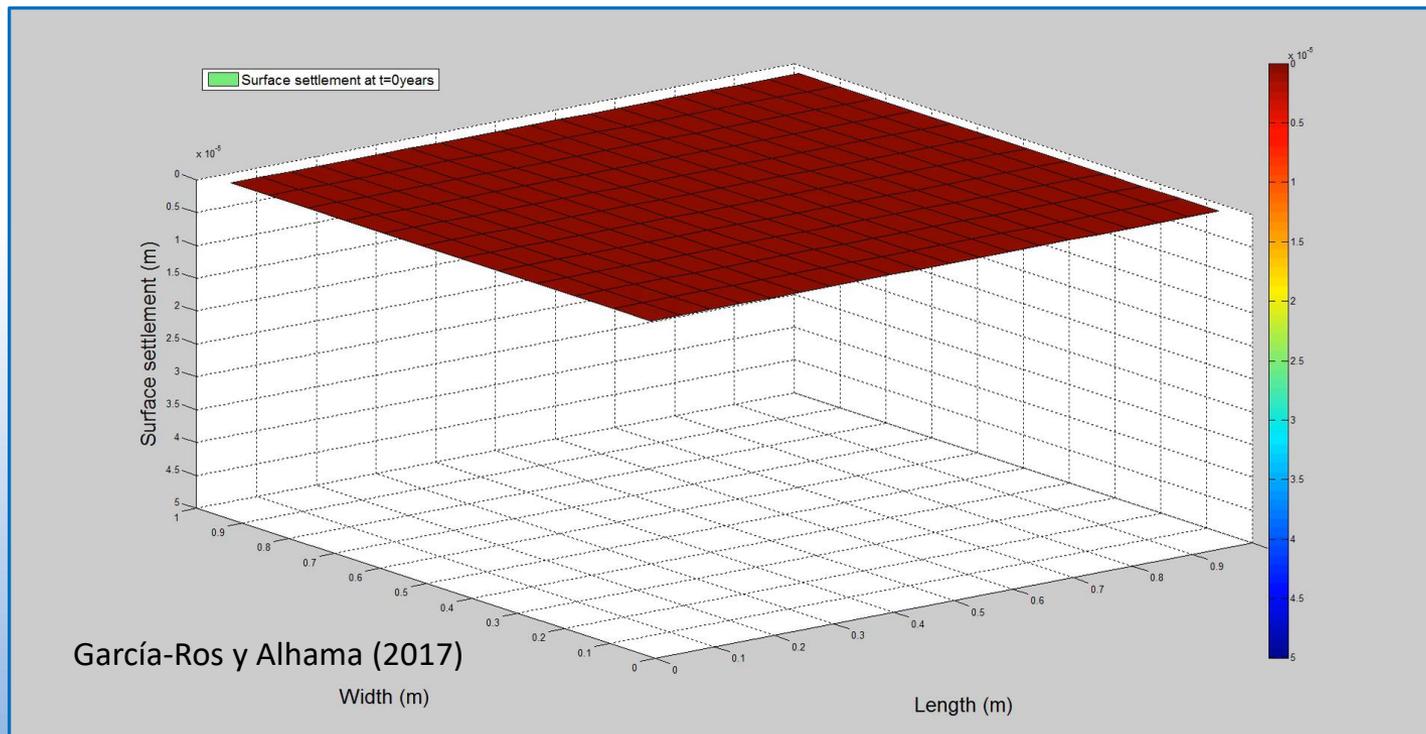




Representación de resultados

6) Video-animación de asentamientos superficiales

Se trata de una representación animada, donde el usuario puede generar, reproducir e incluso guardar un archivo de vídeo (formato .avi) en el que se muestra la evolución del asentamiento de toda la superficie del terreno. Además de elegir el tiempo hasta el que se desea la representación (el tiempo inicial está fijado al tiempo inicial elegido en la etapa de simulación), el programa permite elegir el número de fotogramas a utilizar, así como la velocidad con la que se reproducirán en la animación de vídeo (número de fotogramas por segundo).





Características del paquete de software GeoStudio

Potente software de elementos finitos.

Permite combinar geometrías y análisis en un solo proyecto.

Dibujar geometría directamente o importar archivos CAD.

Resolver múltiples análisis simultáneamente.

Interpretar los resultados con visualizaciones y gráficos.

Programas de interés para la mecánica de suelos del paquete de software GeoStudio

SEEP/W + SEEP3D: modelización de flujo de agua subterránea en medios porosos (problemas simples en estado estacionario saturado, o análisis transitorios sofisticados en suelos saturados y no saturados con acoplamiento atmosférico en la superficie del suelo).

SLOPE/W: Análisis de estabilidad de taludes.

FLOW + 3D FLOW: modelación de protección ambiental, flujo de agua subterránea, clima y problemas de congelación del suelo.

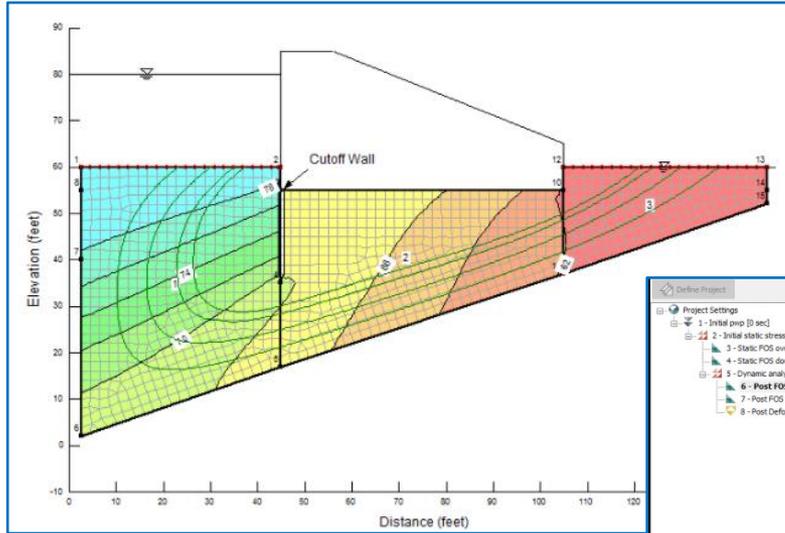
SIGMA/W: modelización de tensiones y deformaciones en suelos, rocas y estructuras.

QUAKE/W: para modelar licuefacción sísmica y cargas dinámicas.

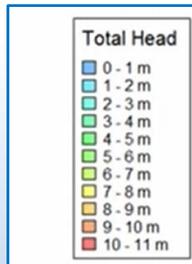


El paquete de software GeoStudio

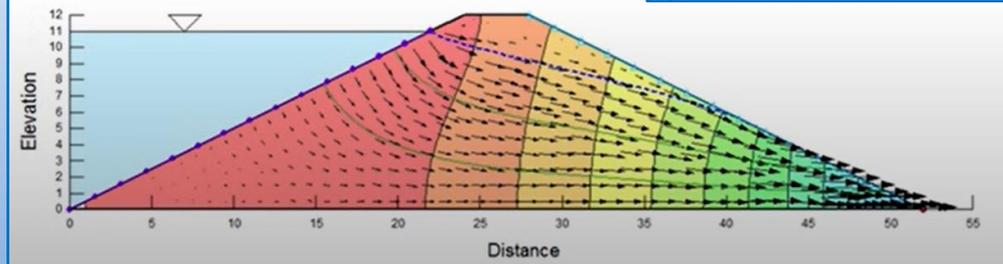
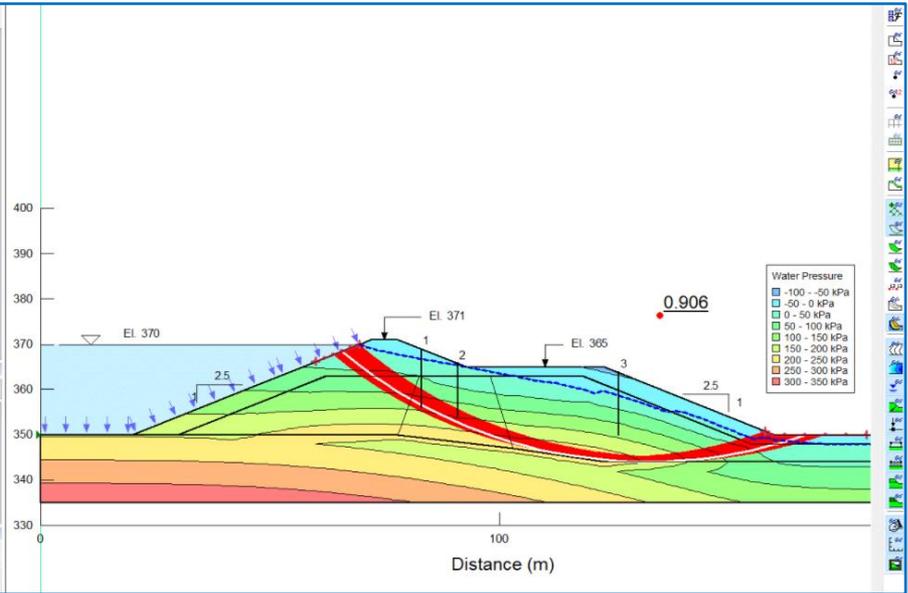
SEEP/W



geoslope.com/seequent



Analysis Name	Status
1 - Initial prep	Solved 04/26/2017 04:44:42 PM
2 - Initial static...	Solved 04/26/2017 04:44:44 PM
3 - Static FOS o...	Solved 04/26/2017 04:44:48 PM
4 - Static FOS d...	Solved 04/26/2017 04:44:48 PM
5 - Dynamic an...	Solved 04/26/2017 04:59:28 PM
6 - Post FOS ov...	Solved 04/26/2017 04:59:28 PM
7 - Post FOS do...	Solved 04/26/2017 04:59:30 PM
8 - Post Deform...	Solved 04/26/2017 05:00:30 PM

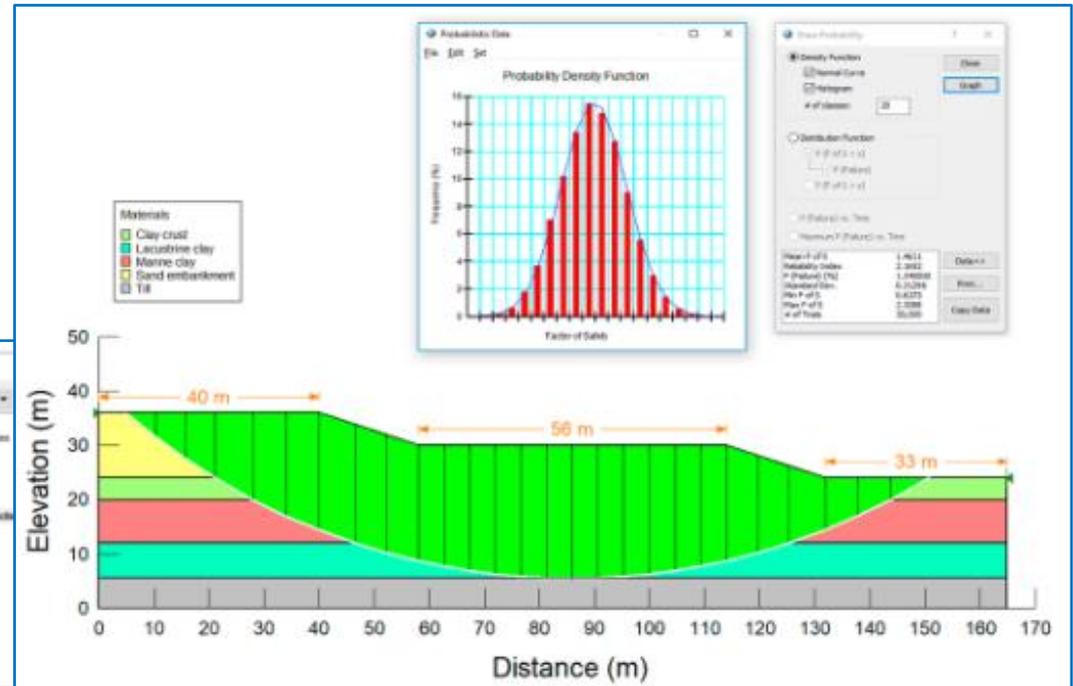
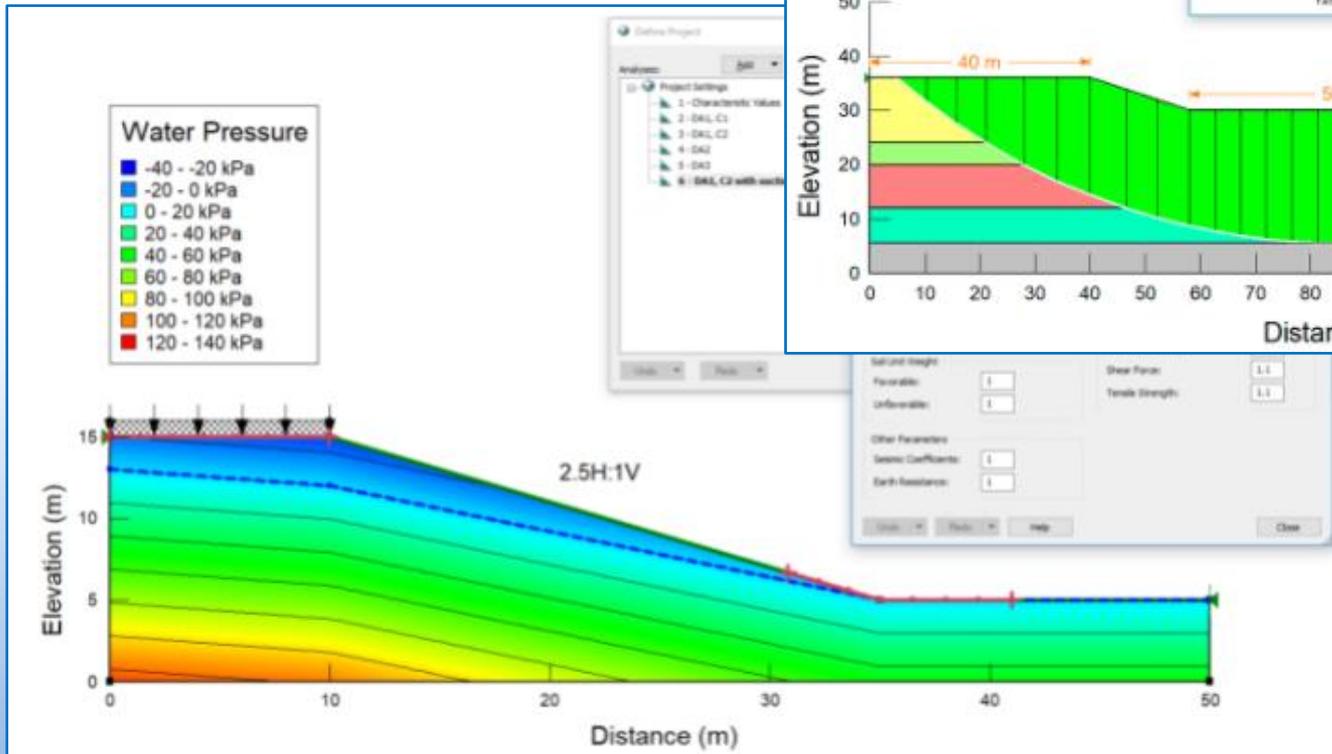


G. García. UPCT



SLOPE/W

geoslope.com/seequent





Referencias

García Ros, G., & Alhama Manteca, I. (2017). SICOMED_3D: *simulación y diseño de problemas de consolidación de suelos con mechas drenantes*. Repositorio Digital de la Universidad Politécnica de Cartagena.

SICOMED_3D ('Simulación de consolidación con mechas drenantes') (2017). García-Ros, Alhama, I. y Sánchez Pérez, J. F. © UPCT.

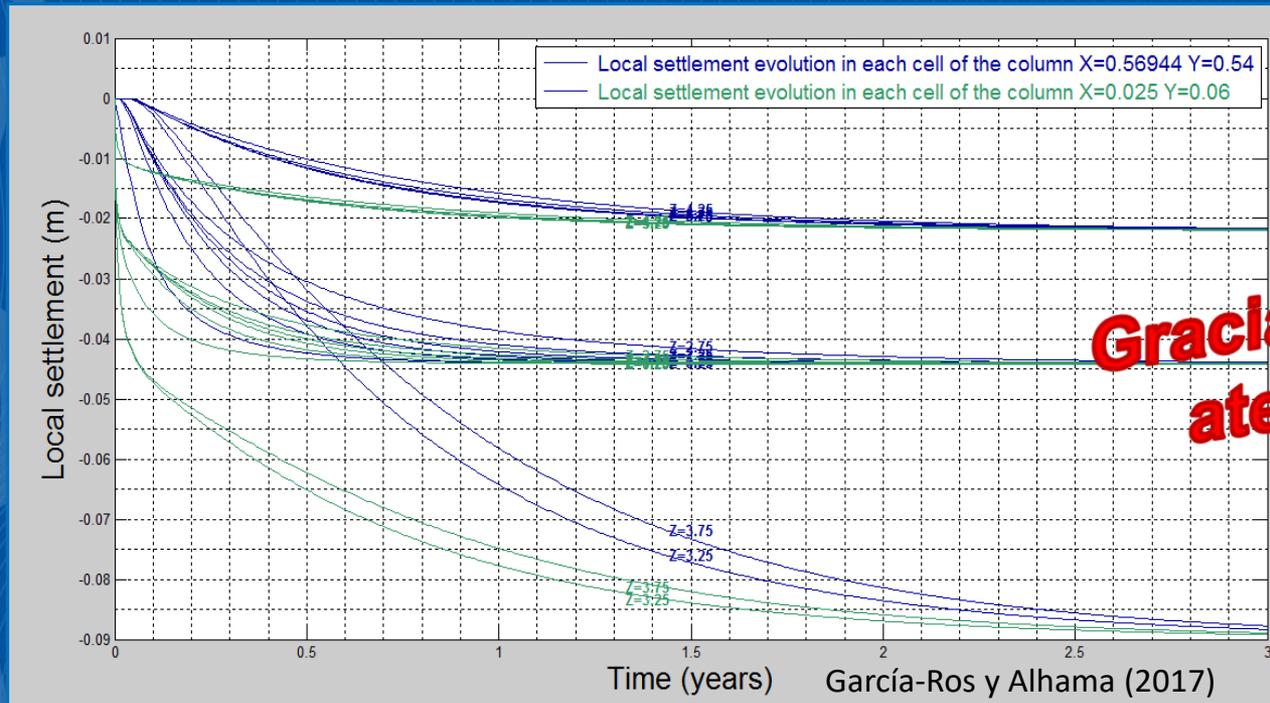
Ngspice (2016) – Open Source mixed mode, mixed level circuit simulator (based on Berkeley's Spice3f5).

<http://ngspice.sourceforge.net/>

<https://www.geoslope.com/seequent/>

Mecánica Avanzada de Suelos

MCieTAT (UPCT)



Gracias por su atención

Tema 8

Programas para la resolución de casos prácticos

Prof. Gonzalo García Ros