

2017

***Aplicación del programa SICOMED\_3D para el estudio de la consolidación de suelos. Aplicación a escenarios de suelos formados por tres capas.***



Macarena Tomás Ramírez de Arellano

Grado en Ingeniería Civil

Director: Iván Alhama Manteca

Codirector: Gonzalo García Ros

Cartagena, 3 de Abril de 2017



# Índice:

<b>1. Introducción y objetivos</b>	<b>3</b>
<b>2. Teoría de la consolidación</b>	<b>5</b>
2.1. Fundamentos teóricos	5
2.2. Mechass drenantes	18
<b>3. El programa SICOMED 3D.</b>	<b>28</b>
3.1. Descripción del software SICOMED_3D	28
3.2. Lenguaje de programación y entorno operativo	29
3.3. Guía de utilización del software SICOMED_3D	32
3.4. El programa SICOMED_3D	
<b>4. Simulaciones mediante SICOMED_3D</b>	<b>40</b>
4.1. Datos de las distintas capas del suelo	41
4.2. Simulación del supuesto Nº1	43
4.3. Simulación del supuesto Nº2	68
4.4. Optimización del reparto y penetración de las mechas	86
4.5. Discusión de los resultados obtenidos	93
<b>5. Conclusiones</b>	<b>95</b>
<b>6. Bibliografía</b>	<b>96</b>



## **1. Introducción y objetivos:**

De forma resumida, al aplicar una carga sobre un suelo (generalmente limos y arcillas) saturado con agua, ésta se verá sometida a un aumento de presión que la hará fluir desde los puntos de mayor presión hasta otros puntos sometidos a una presión menor, como es la presión atmosférica existente en la superficie del suelo, produciéndose una expulsión de agua intersticial. Esta pérdida de agua hace que la matriz de suelo se reestructure lentamente en el tiempo, produciendo un asentamiento diferido que puede llegar a tener un valor importante y que puede dañar a las estructuras colocadas sobre el terreno.

Para hacer compatible la construcción de estructuras con la consolidación del suelo, se emplean técnicas para acelerar este proceso de forma que la mayor parte del asentamiento diferencial se produzca antes de que se construya la estructura sobre el terreno, de modo que la parte residual del asentamiento diferencial que falte por producirse no sea capaz de dañar la estructura antes mencionada.

Las técnicas para producir este drenaje rápido del terreno han evolucionado a lo largo del tiempo, pudiendo convertir periodos de consolidación de varios años en periodos de consolidación de pocos meses.

La no utilización de sistemas drenantes resulta normalmente inviable en la práctica, debido a los grandes periodos temporales que se requerirían. A su vez, sistemas drenantes como columnas de gravas o arenas resultan efectivos para lugares aislados y puntuales, pero la realización de estas soluciones en grandes extensiones de terreno supone un coste demasiado alto para llevarlas a cabo.

Tras esto aparecen las soluciones mediante mechas drenantes, que surgieron en torno a los años 30 y que evolucionaron de forma más importante desde los años 70 hasta hoy. Estas soluciones permiten acortar el proceso de consolidación de un suelo poco permeable y saturado de agua a un tiempo relativamente pequeño, con un coste inferior al de otras técnicas conocidas.

Es por ello que, a lo largo de este trabajo, se intentarán conocer más a fondo las consecuencias de estos sistemas mediante mechas drenantes y el comportamiento del terreno, estudiado de forma espacial y numérica, viendo la influencia y variación en el proceso que tienen los parámetros geométricos del sistema de mechas drenantes, como son la penetración de la mecha dentro del estrato de suelo y su espaciamiento a lo largo de la superficie del terreno.



*Aplicación del programa SICOMED\_3D para el estudio de la consolidación de suelos.  
Aplicación a escenarios de suelos formados por tres capas.*



De forma resumida, los objetivos que se persiguen con este Trabajo Final de Grado son:

- Repasar y dominar la teoría de consolidación 1D existente en la bibliografía habitual que se utiliza para el estudio en el Grado de Ingeniería Civil.
- Plantear la extensión del problema de consolidación a escenarios con geometrías 2D y 3D
- Aprendizaje en el manejo de un programa informático para la resolución numérica de escenarios de consolidación 3D con mechas drenantes verticales: *SICOMED\_3D*.
- Planteamiento y resolución de escenarios reales de consolidación empleando la herramienta de cálculo *SICOMED\_3D*.
- Análisis y discusión de resultados de resultados.



## 2. Teoría de la consolidación:

### 2.1. *Fundamentos teóricos*

#### 2.1.1. *Introducción:*

Cuando un depósito de suelo es sometido a un incremento de esfuerzos totales, debido a una carga aplicada producida por ejemplo en la construcción de un edificio o de un terraplén, se produce en el suelo un exceso de presión intersticial. Puesto que el agua no puede resistir ningún tipo de esfuerzo cortante, el exceso de presión intersticial en los poros de suelo se irá disipando con el transcurso del tiempo mediante un flujo de agua desde el interior de la matriz de suelo hacia el exterior. El parámetro principal del que depende la velocidad del flujo de agua es la permeabilidad de la masa de suelo.

La disipación del exceso de presión intersticial debida al flujo de agua hacia el exterior se denomina consolidación, proceso con dos importantes consecuencias.

- a) Conduce a una reducción del volumen de poros y, debido a ello, a una reducción del volumen total de la masa de suelo, lo cual repercute en el asentamiento de la superficie del terreno y por consiguiente en un asentamiento de la estructura colocada en ella.
- b) Durante la disipación del exceso de presión intersticial, el esfuerzo efectivo en la masa de suelo aumenta incrementando debido a ello la resistencia al cortante. La consolidación y la resistencia al cortante están, por tanto, relacionados mutuamente.

De lo anterior podemos extraer que cuando un suelo se consolida se produce en él una disminución de la relación de vacíos la cual va acompañada por un incremento del esfuerzo efectivo.

En un suelo granular, como pudiera ser una arena, la permeabilidad es relativamente alta y por ello el exceso de presión intersticial se disipa de forma casi instantánea. En consecuencia, el asentamiento que ha de aparecer en el terreno bajo las cargas de una estructura por lo general aparece antes de finalizar la construcción. Opuestamente a esto, los depósitos de arcilla suelen tener una permeabilidad considerablemente baja y por ello la disipación del exceso de presión intersticial en los poros del suelo resulta ser un proceso muy lento. En consecuencia, una estructura ejecutada sobre un suelo de este tipo puede continuar asentándose durante varios años después de terminada la construcción.

El proceso de consolidación aparece en todos los tipos de suelos, sin embargo, en la práctica, solo tiene interés el caso de estructuras cimentadas sobre depósitos de arcilla. Para tales casos se necesita predecir:

- El asentamiento total de la estructura.
- La velocidad a la cual se produce dicho asentamiento.

Para predecir todos estos elementos la bibliografía técnica nos aporta una extensa teoría de la consolidación.

En general, el proceso de la consolidación involucra en tres dimensiones el flujo del agua intersticial y las deformaciones de la masa de suelo. Sin embargo, las teorías tridimensionales son muy complejas y difíciles de aplicar en la práctica. El caso más simple que puede tratarse matemáticamente es el caso unidimensional. Esta es la teoría que se utiliza con mayor frecuencia en la práctica y es la base de la casi totalidad de los cálculos de asentamientos.

### 2.1.2. Consolidación 1D, flujo vertical (coordenadas rectangulares). Terzaghi.

A partir de la “Teoría de Terzaghi” [1923, 1943], deducimos la ecuación de comportamiento para consolidación vertical. Considérese un depósito de suelo homogéneo, saturado, de longitud lateral infinita y sometido a una carga uniforme “ $q$ ” aplicada en toda el área superficial como se muestra en la Figura 2.1. Berry y Reid [1993].

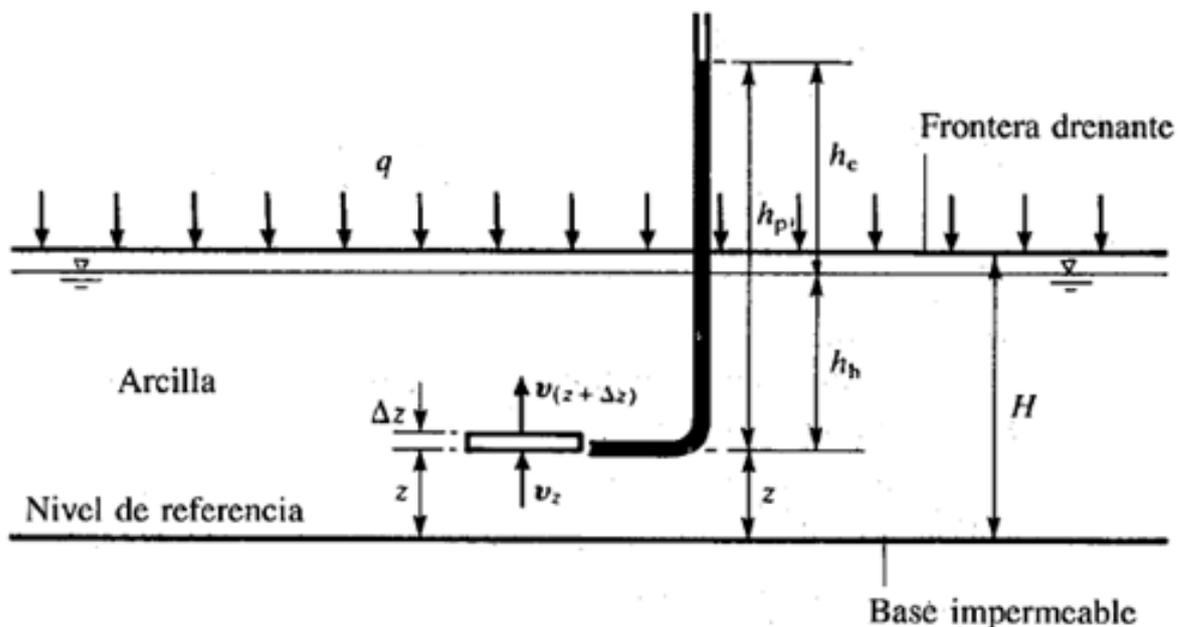


Figura 2.1 Consolidación vertical de una capa de suelo



El suelo reposa sobre una base impermeable y drena libremente por su cara superior. La disipación del exceso de presión intersticial en cualquier punto solo se producirá mediante el flujo del agua intersticial en sentido vertical ascendente hacia la superficie, ya que el gradiente hidráulico únicamente se presenta en la dirección vertical. Como resultado se producirán deformaciones en la dirección vertical. Por tanto, para un elemento de suelo se tiene:

$v_z$  es la velocidad vertical del flujo que entra en el elemento.

$v_z + \Delta_z$  es la velocidad vertical del flujo que sale del elemento.

Obteniendo la siguiente expresión:

$$v_z + \Delta_z = v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} * \Delta_z$$

A partir del principio de continuidad del volumen se tiene que:

$$\text{Flujo que sale por unidad de tiempo} - \text{Flujo que entra por unidad de tiempo} \\ = \text{Velocidad de cambio de volumen del elemento}$$

De esta forma:

$$\left[ v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} * \Delta_z \right] * A - v_z * A = - \frac{\partial V}{\partial t}$$

Donde "A" sería el area plana del elemento y "V" es el volumen. Por tanto:

$$V * \frac{\partial v_z}{\partial z} = - \frac{\partial V}{\partial t}$$

Suponiendo que las partículas de suelo y el agua intersticial son incompresibles, entonces la velocidad de cambio de volumen del elemento (termino derecho de la ecuación anterior) es igual a la velocidad de cambio de volumen de vacíos. Quedando así:

$$V * \frac{\partial v_z}{\partial z} = - \frac{\partial V_v}{\partial t}$$

Si " $V_s$ " es el volumen de solidos en el elemento y "e" es la relacion de vacios, entonces por definición:

$$V_v = e * V_s$$

Si se remplace en la ecuación anterior y se tiene en cuenta que " $V_s$ " es constante, se obtiene lo siguiente:

$$V * \frac{\partial v_z}{\partial z} = -V_s * \frac{\partial e}{\partial t}$$



Donde:

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{1+e} * \frac{\partial e}{\partial t}$$

Y a partir de la ecuación de *Darcy* se obtiene para flujo vertical del agua intersticial a través del elemento:

$$v_z = -k_z + \frac{\partial h}{\partial z}$$

Donde “*h*” sería la cabeza total en elemento y “*k<sub>z</sub>*” el coeficiente de permeabilidad vertical del suelo (“*k<sub>v</sub>*” según la notación de *Terzaghi*).

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( k_v * \frac{\partial h}{\partial z} \right) = \frac{1}{1+e} * \frac{\partial e}{\partial t}$$

En la práctica, las deformaciones verticales suelen ser pequeñas y por tanto es razonable suponer que la permeabilidad del suelo permanece constante durante la aplicación del incremento de carga. Por tanto, se obtiene:

$$k_v * \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{1+e} * \frac{\partial e}{\partial t}$$

Tomando como nivel de referencia la base del suelo, la cabeza total “*h*” del elemento está dada por:

$$h = z + h_h + h_e$$

Donde “*z*” es la cabeza de posición, “*h<sub>h</sub>*” es la cabeza hidrostática y “*h<sub>e</sub>*” el exceso de cabeza de presión. En la teoría de pequeñas deformaciones puede suponerse que la cabeza de posición y la cabeza hidrostática permanecen constantes. Por lo que obtenemos la siguiente expresión:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 h_e}{\partial z^2}$$

El exceso de presión intersticial en el elemento viene dado por:

$$u_e = \rho_w * g * h_e$$

De esta forma obtenemos:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{\rho_w * g} * \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2}$$

Reordenado términos se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{k_v * (1 + e)}{\rho_w * g} * \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = \frac{\partial e}{\partial t}$$

Se obtiene entonces una ecuación con dos incógnitas (“ $u_e$ ” y “ $e$ ”) y para plantear el problema completamente se necesita una ecuación adicional que relacione el exceso de presión intersticial y la relación de vacíos. Esta se obtiene al considerar el comportamiento del suelo bajo esfuerzo vertical – deformación. *Terzaghi* tomó este comportamiento como lineal para un incremento de carga en particular, como se puede ver en la Figura 2.2.

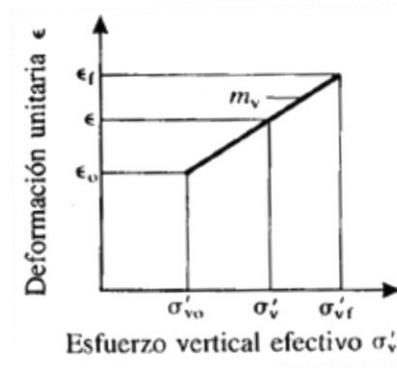


Figura 2.2 Deformación lineal unitaria para cada incremento de esfuerzo vertical efectivo

Puesto que el cambio de deformación es proporcional al cambio de relación de vacíos, esto también implica la existencia de una relación lineal entre “ $e$ ” y “ $\sigma'_v$ ”, como se puede ver en la Figura 2.3, lo cual es completamente razonable siempre que la relación de incremento de presión sea casi igual a la unidad. La pendiente de la línea se designa con “ $a_v$ ” y se denomina “*coeficiente de compresibilidad*”. Se tiene entonces:

$$a_v = - \frac{\partial e}{\partial \sigma'_v}$$

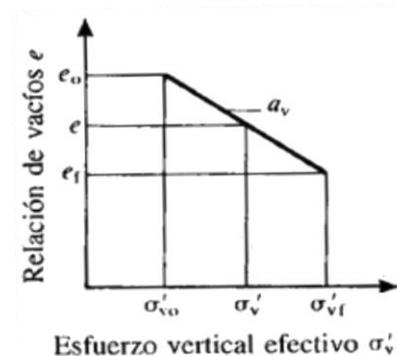


Figura 2.3 Relación de vacíos para cada incremento de esfuerzo vertical efectivo



La presión intersticial “ $u$ ” está dada por la presión hidrostática “ $u_h$ ” y por el exceso de presión “ $u_e$ ”. Esto es:

$$\sigma_v = \sigma'_v + u_h + u_e$$

Derivando respecto del tiempo obtenemos:

$$\frac{\partial \sigma'_v}{\partial t} + \frac{\partial u_e}{\partial t} = 0$$

Además:

$$\frac{\partial e}{\partial t} = \frac{\partial e}{\partial \sigma'_v} * \frac{\partial \sigma'_v}{\partial t}$$

Operando se obtiene:

$$\frac{\partial e}{\partial t} = a_v * \frac{\partial u_e}{\partial t}$$

Y sustituyendo:

$$\frac{\partial u_e}{\partial t} = \frac{k_v * (1 + e)}{\rho_w * g * a_v} * \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2}$$

De esta expresión obtenemos el denominador “coeficiente de consolidación vertical”:

$$c_v = \frac{k_v * (1 + e)}{\rho_w * g * a_v}$$

Y la expresión final de la consolidación unidimensional, derivada por Terzaghi en 1923, quedaría finalmente de la siguiente manera:

$$\frac{\partial u_e}{\partial t} = c_v * \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2}$$

El “coeficiente de compresibilidad volumétrica” por su parte se obtiene así:

$$m_v = \frac{a_v}{1 + e}$$

Para un área cargada de extensión ilimitada, la presión aplicada “ $q$ ” es constante con la profundidad e inicialmente es absorbida por el agua intersticial en la forma de un exceso de presión “ $u_{0e}$ ”. Se tiene entonces:

$$\text{Condición inicial para } t = 0; u_e = u_{0e} = q; \text{ para } 0 \leq z \leq H$$

$$\text{Condición de frontera para } t > 0: \frac{\partial u_e}{\partial z} = 0; \text{ en } z = 0, u_e = 0 \text{ en } z = H$$

$$\text{Condición final para } t = \infty; u_e = 0; \text{ para } 0 \leq z \leq H$$

La solución final de la ecuación está dada por:

$$\frac{u_e}{u_{0e}} = \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2}{M} * \sin \left[ M * \left( 1 - \frac{z}{H} \right) \right] * \exp(-M^2 * T_v)$$

Donde:

$$M = \frac{\pi}{2} * (2m + 1), \text{ con } m = 0, 1, 2, \dots, \infty$$

Donde "H" es la longitud máxima de la trayectoria de drenaje y "T<sub>v</sub>" es un factor adimensional denominado "factor de tiempo vertical", definido como:

$$T_v = \frac{C_v * t}{H^2}$$

El "grado de consolidación", designado por "U<sub>v</sub>", de un elemento de suelo quedaría definido por la siguiente expresión:

$$U_v = 1 - \frac{u_e}{u_{0e}}$$

Y el "grado de consolidación" es por tanto igual al "grado de disipación del exceso de presión intersticial":

$$U_v = 1 - \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2}{M} * \sin \left[ M * \left( 1 - \frac{z}{H} \right) \right] * \exp(-M^2 * T_v)$$

De esta ecuación podemos deducir una gráfica de triple entrada con "U<sub>v</sub>" en función de "T<sub>v</sub>" y "z/H", como la que se muestra en la Figura 2.4.

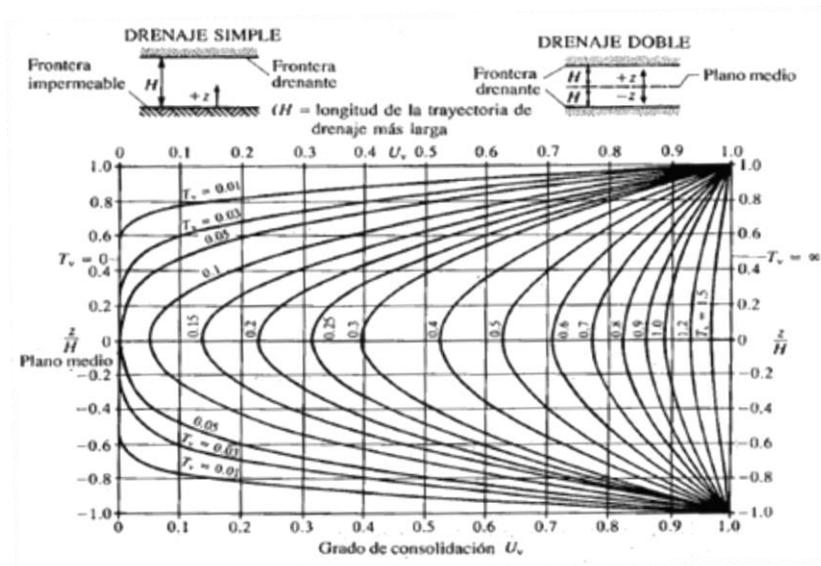


Figura 2.4 Grado de consolidación en función de "T<sub>v</sub>" y "z/H"

Donde como hemos mencionado:

$$U_v = 1 - \frac{u_e}{u_{0e}}$$

En un caso como el considerado inicialmente, donde la lámina de suelo reposa sobre una frontera impermeable y el agua solo puede drenar hacia arriba (hacia la superficie), la distribución del grado de consolidación en función de la profundidad para varios valores del factor de tiempo está representada por la mitad superior de la gráfica. Este caso se denomina "drenaje simple".

Para una lámina de suelo que reposa sobre una frontera permeable, la distribución del grado de consolidación en función de la profundidad para varios valores del factor de tiempo vertical, está representada por la gráfica completa. Este segundo caso se denomina "drenaje doble". Se puede observar que la consolidación se produce con mayor rapidez en las proximidades de las fronteras drenantes y con menor rapidez en la frontera impermeable de una lámina con drenaje simple o en el plano medio de una lámina con drenaje doble.

Además de los valores del grado de consolidación, también es interesante el cálculo del "grado promedio de consolidación,  $\bar{U}_v$ " el cual refleja el asentamiento en la superficie de la capa y, por tanto, el asentamiento en la estructura ingenieril.

$$\bar{U}_v = 1 - \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2}{M^2} * \exp(-M^2 * T_v)$$

La relación entre el "factor de tiempo vertical" y "el grado promedio de consolidación" puede observarse en la Figura 2.5.

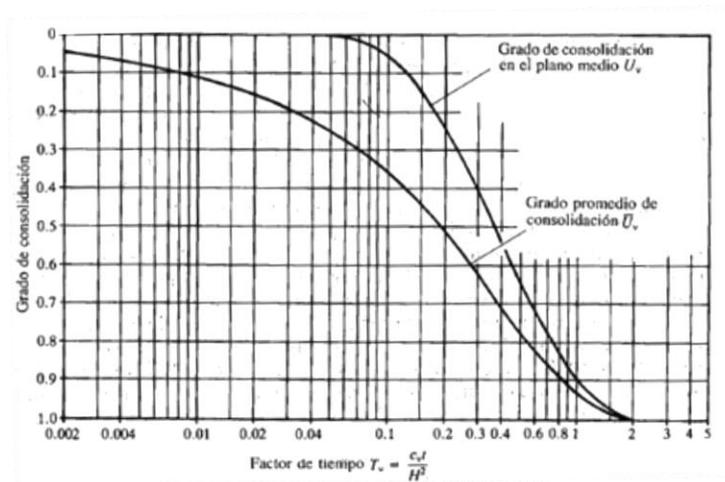


Figura 2.5 Relación entre el "factor de tiempo vertical" y "el grado promedio de consolidación"

### 2.1.3. Consolidación 2D, flujo radial (columnas de grava)

Teniendo en cuenta una supuesta muestra de depósito homogéneo de arcilla saturada de dimensión lateral infinita sujeta a una carga uniforme “ $q$ ” y aplicada en la totalidad del area de la superficie como la de la Figura 2.6.

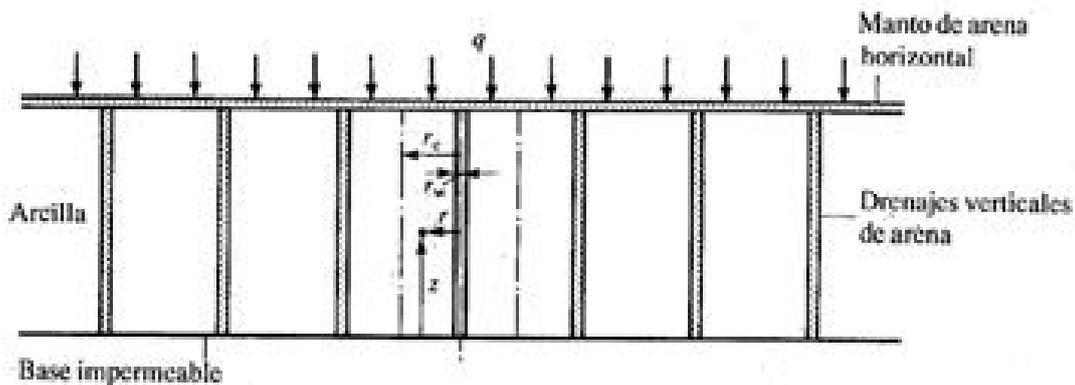


Figura 2.6 Deposito de arcilla saturada sujeta a carga uniforme

La arcilla reposa sobre una base impermeable y puede drenar con libertad por su cara superior. Si la arcilla es blanda, a menudo se necesita acelerar la velocidad de consolidación para limitar el asentamiento a largo plazo hasta un valor aceptable. Esto puede obtenerse instalando un sistema de drenaje vertical de arena, como también se puede ver en la figura anterior. El exceso de presión intersticial se disipa entonces por los flujos vertical y radial conjuntamente, sin embargo, las deformaciones que resultan se producirán en la dirección vertical.

Si la cimentación con la cual se aplica la carga al depósito de arcilla es flexible, la superficie asentará de manera diferencial durante la consolidación ya que la arcilla adyacente a los drenajes verticales de arena se consolida con mayor rapidez que el suelo por fuera de la zona de influencia. Este caso se denomina como de “*deformación vertical libre*”. Si por el contrario, la cimentación es rígida, el suelo en la superficie asentará uniformemente durante la consolidación y se denomina caso con “*deformación uniforme*”.

Al considerar los flujos radial y vertical del agua intersticial a través de un elemento de suelo a una altura “ $z$ ” sobre una base impermeable y a una distancia radial “ $r$ ” del eje vertical del drenaje de arena, como muestra la Figura 2.7, de modo similar a como se desarrollo en la “*Teoría de consolidación de Terzaghi*”, podremos obtener la ecuación de comportamiento para la condición de “*deformación vertical libre*”.

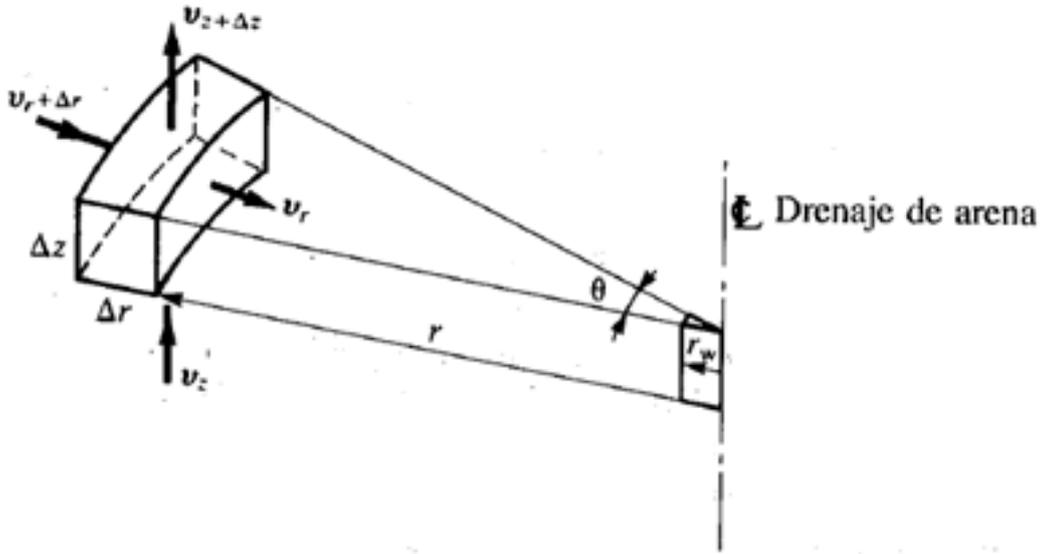


Figura 2.7 Flujo radial y vertical a través de un elemento de suelo

La ecuación diferencial que rige el flujo vertical y radial serie la siguiente:

$$\frac{\partial u_e}{\partial t} = c_v * \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} + c_h * \left[ \frac{\partial^2 u_e}{\partial r^2} + \frac{1}{r} * \frac{\partial u_e}{\partial r} \right]$$

Donde el “coeficiente de consolidación vertical” sigue siendo:

$$c_v = \frac{k_v * (1 + e)}{\rho_w * g * a_v}$$

Y el “coeficiente de consolidación horizontal” es:

$$c_h = \frac{k_h * (1 + e)}{\rho_w * g * a_v}$$

Según se demostró en Carrillo[1942], la ecuación puede convertirse en la ecuación lineal para la consolidación vertical:

$$\frac{\partial u_e}{\partial t} = c_v * \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2}$$

Y la ecuación para la consolidación radial plana, operándolas por separado y superponiendo los resultados.

$$\frac{\partial u_e}{\partial t} = c_h * \left[ \frac{\partial^2 u_e}{\partial r^2} + \frac{1}{r} * \frac{\partial u_e}{\partial r} \right]$$

Si “ $\bar{U}_v$ ” es el “grado promedio de consolidación debido al flujo vertical” para un tiempo dado y “ $\bar{U}_r$ ” es el “grado promedio de consolidación debido al flujo radial” para



el mismo tiempo, el “grado promedio de consolidación debido al flujo vertical y radial combinado” “ $\overline{U}_{vr}$ ”, se determina con la ecuación:

$$(1 - \overline{U}_{vr}) = (1 - \overline{U}_v) * (1 - \overline{U}_r)$$

La ecuación para el “grado promedio de consolidación radial”, por su parte, se puede obtener de la ecuación dada por Barron [1948] que se muestra a continuación:

$$\overline{U}_r = 1 - \sum_{\alpha_1, \alpha_2, \dots}^{\alpha=\infty} \frac{4 * U_1^2(\alpha)}{\alpha^2 * (n^2 - 1)[n^2 * U_0^2(\alpha n) * \alpha - U_1^2(\alpha)]} * \exp(-\alpha^2 * n^2 * T_r)$$

Donde:

$$U_1(\alpha) = J_1(\alpha) * Y_0(\alpha) - Y_1 * (\alpha) * J_0(\alpha)$$

$$U_0(\alpha n) = J_0(\alpha n) * Y_0(\alpha) - Y_0 * (\alpha n) * J_0(\alpha)$$

Siendo:

“ $J_0$ ” y “ $J_1$ ”, funciones de Bessel de primer genero, de orden cero y de primer orden respectivamente.

“ $Y_0$ ” y “ $Y_1$ ”, funciones de Bessel de segundo género, de orden cero y de primer orden respectivamente.

$\alpha_1, \alpha_2, \dots$ = raíces de las funciones de Bessel que satisfacen:

$$J_1(\alpha n) * Y_0(\alpha) - Y_1 * (\alpha n) * J_0(\alpha) = 0$$

$n = \frac{r_e}{r_w}$ ; donde “ $r_w$ ” es el “radio del drenaje” y “ $r_e$ ” es el radio de influencia y “ $T_r$ ” es el “factor de tiempo radial” adimensional, definido por:

$$T_r = \frac{c_h * t}{r_e^2}$$

Por tanto, para un valor de “ $n$ ” especificado y para valores dados del “factor de tiempo” pueden calcularse los valores correspondientes del grado promedio de consolidación “ $\overline{U}_r$ ”, obteniéndose las familias de curvas de la Figura 2.8 y disminuyendo la velocidad de consolidación a medida que el valor de “ $n$ ” aumenta.

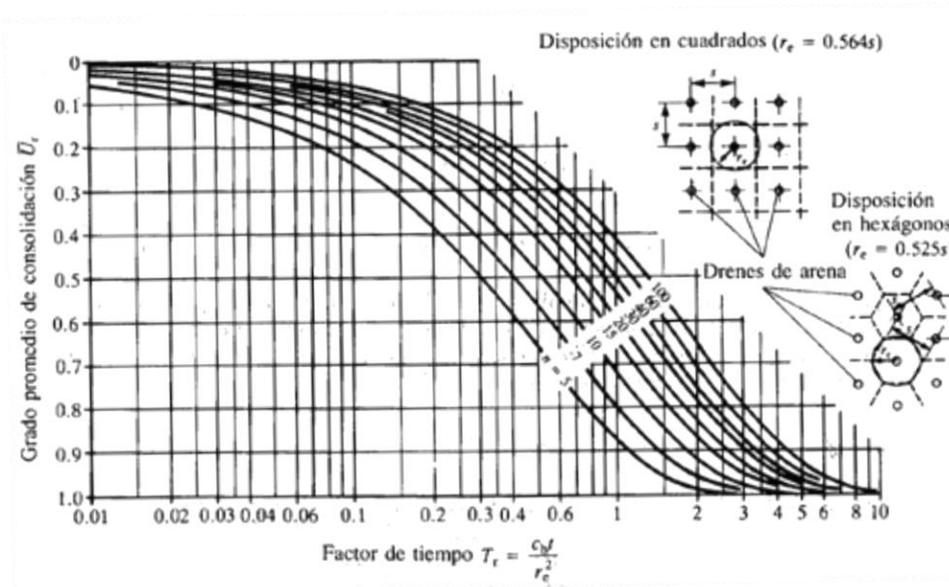


Figura 2.8 Grado promedio de consolidación en función de “n” y el “factor de tiempo”

Para obtener la “deformación vertical uniforme”, la ecuación de comportamiento está dada por:

$$\frac{\partial \bar{u}_e}{\partial t} = c_v * \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} + c_h * \left[ \frac{\partial^2 u_e}{\partial r^2} + \frac{1}{r} * \frac{\partial u_e}{\partial r} \right]$$

Donde “ $\bar{u}_e$ ” es el “valor promedio del exceso de presión intersticial” a cualquier profundidad.

Para el flujo radial esta expresión se reduce a:

$$\frac{\partial \bar{u}_e}{\partial t} = ch * \left[ \frac{\partial^2 u_e}{\partial r^2} + \frac{1}{r} * \frac{\partial u_e}{\partial r} \right]$$

La resolución a esta ecuación es dada por Barron[1948], apareciendo ésta a continuación:

$$\bar{U}_r = 1 - \exp \left[ -\frac{2 * T_r}{F(n)} \right]$$

Siendo:

$$F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} * \ln(n) - \frac{3 * n^2 - 1}{4 * n^2}$$

### 2.1.4. Consolidación 2D y 3D, flujo vertical y horizontal (coordenadas rectangulares)

En dominios anisótropos 2D y 3D las ecuaciones de *Terzaghi* se escriben, respectivamente, en la forma:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_{v,z} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + c_{v,x} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_{v,z} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + c_{v,x} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + c_{v,y} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

La Figura 2.9 muestra el esquema físico de un escenario de consolidación 2-D rectangular, con drenajes hacia las fronteras superior y lateral. En general, los coeficientes de consolidación en el plano horizontal son iguales,  $c_{v,x} = c_{v,y}$ . Llamando  $c_{v,h}$  al coeficiente de consolidación horizontal, la ecuación 3-D se simplifica a

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

Esta ecuación se aplica a escenarios 2-D (y 3-D horizontalmente isótropos) en los que el agua drena hacia las fronteras superior y lateral, esta última por la existencia de drenes corridos o zanjas, o por la existencia de mechas drenantes parcial o completamente introducidas en el terreno.

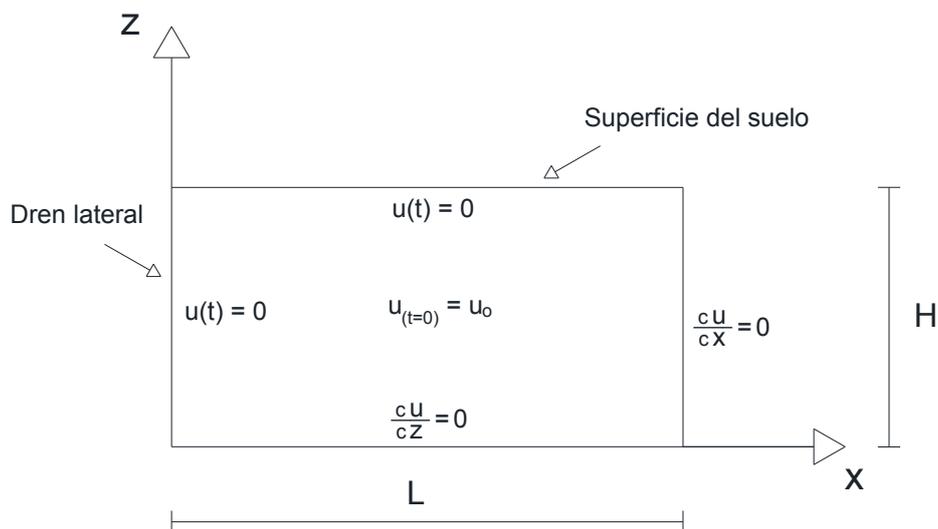


Figura 2.9 Esquema físico de un escenario de consolidación 2-D rectangular

Existen soluciones exactas, analíticas o semi-analíticas, para estas ecuaciones de consolidación en escenarios 2-D y 3-D, *Di Francesco* [2013], aunque dada su complejidad resultan de difícil aplicación por parte del ingeniero civil.



## 2.2. Mechas drenantes

Las mechas drenantes son geocompuestos que se instalan en forma vertical por hincas en terrenos cohesivos blandos y que tienen la propiedad de filtrar las partículas de suelo, drenando el agua y consiguiendo de esta manera la aceleración de la consolidación (asentamientos) del terreno.

Las mechas drenantes tuvieron un desarrollo paralelo al de los drenes de arenas y comenzaron sus aplicaciones en gran escala en la década de los 30 en Suecia, sin embargo no fue hasta los 70 cuando su mejor diseño, por ejemplo el de la Figura 2.10), hizo extensiva su aplicación a nivel mundial.

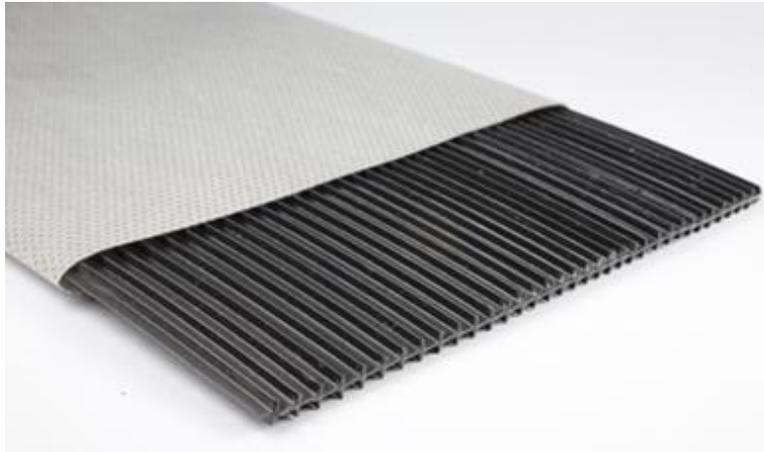


Figura 2.10 Mecha drenante modelo TenCate Polyfelt® Alidrain AD

El uso principal de las mechas drenantes es el de acelerar el proceso de consolidación para disminuir de forma significativa el tiempo de asentamientos de terraplenes sobre suelos blandos (generalmente limos y arcillas poco permeables), mejorando además con ello sus propiedades mecánicas al corte.

En la práctica las mechas drenantes se les utiliza en situaciones de consolidación en la que el suelo a tratar es moderada a altamente compresible con un coeficiente de permeabilidad bajo y totalmente saturado en su estado natural. Tales suelos son descriptos típicamente como limos, arcillas, turba y fangos.

Las mechas drenantes se presentan como el método más moderno, rápido y económico para consolidar áreas de suelo no competentes sobre los cuales apoyarán estructuras, frente a las técnicas habituales con el mismo fin, como el relleno (para sobrecarga y consolidación) o el cambio de suelos, los cuales implican plazos y costos excesivos.

Actualmente, el uso de mechas drenantes se ha impuesto a otras metodologías drenantes ya que el coste de su ejecución es bastante inferior a, por ejemplo, las columnas de arena o gravas además de acortar mucho los tiempos de ejecución.

La utilización de mechas drenantes acelera todo el proceso pasando de plazos que pueden llegar a ser de varios años, al de unos pocos meses, según la configuración y disposición de los drenes empleados.

Cabe recordar aquí que en suelos impermeables cualquier incremento de carga causa un incremento en las presiones de poro la cual se va disipando en el tiempo de forma muy lenta gracias al drenaje. En la Figura 2.11 se puede ver cómo sería una consolidación sin mechas drenantes.

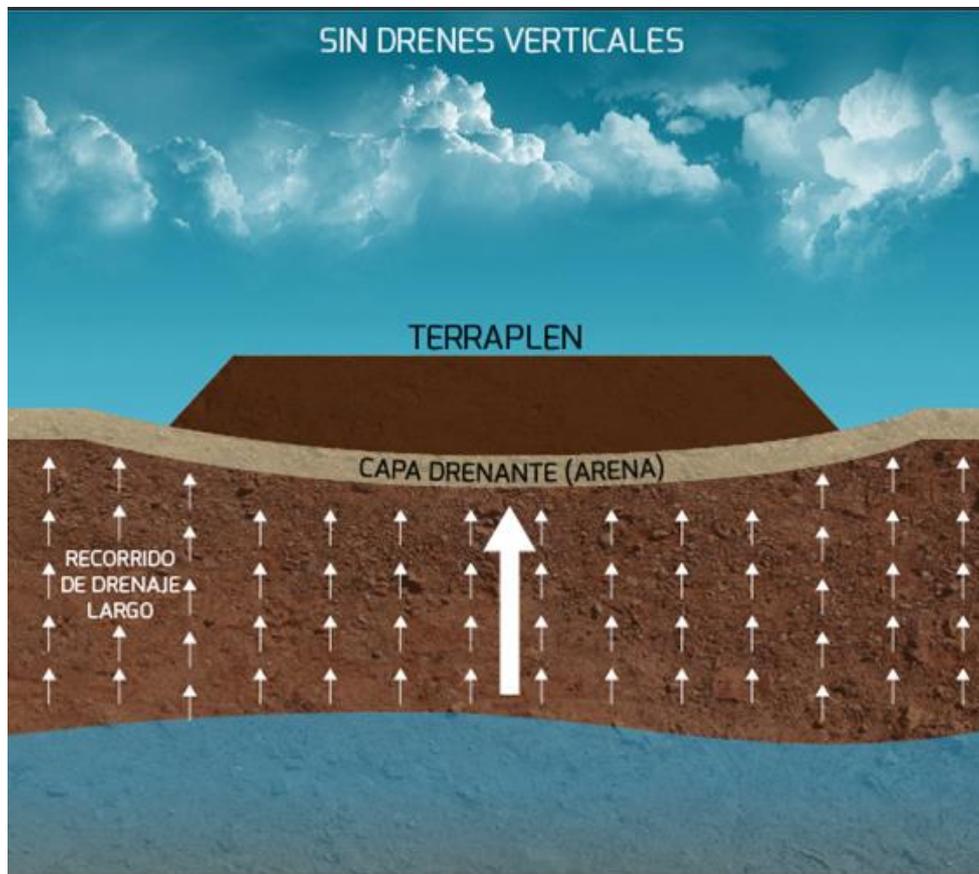


Figura 2.11 Drenaje natural, recorrido largo del agua

La instalación de mechas provee un recorrido de drenaje corto que provoca una mayor rapidez de liberación de las presiones de poro, resultando en una mayor rapidez de la materialización de los asentamientos y en una mejora de la resistencia al corte por consolidación como se puede ver en la Figura 2.12.

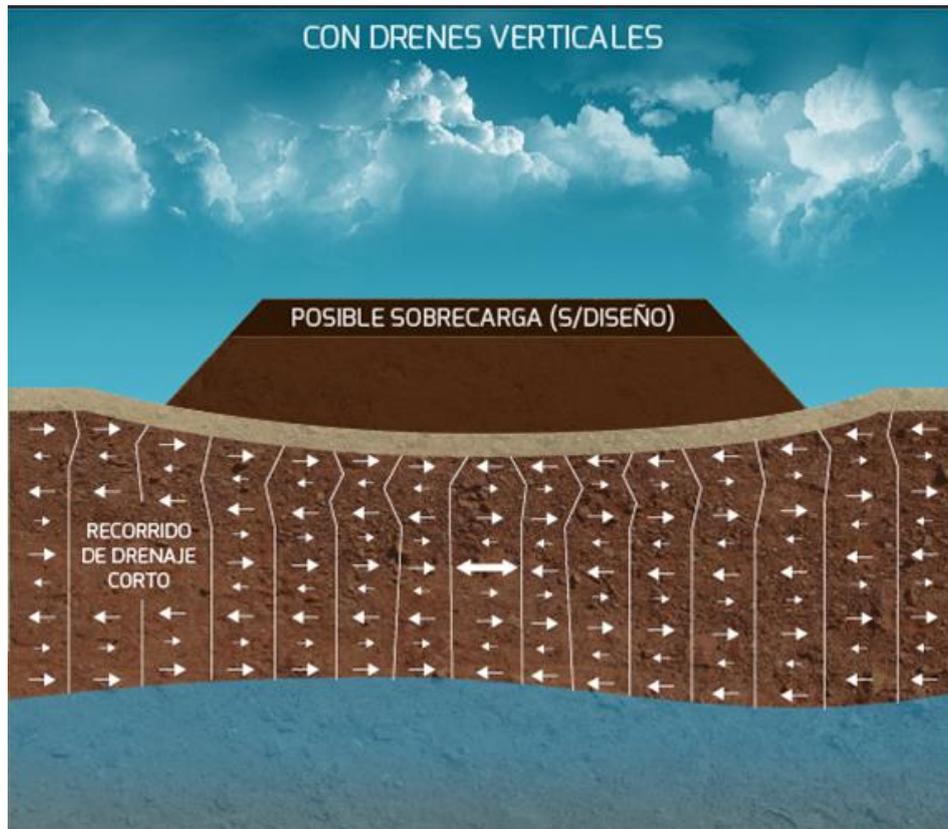


Figura 2.12 Drenaje con mechas drenantes, recorrido corto del agua

En los sitios donde existan problemas de estabilidad, el ritmo de incrementos de carga debe de ser abordada de forma cuidadosamente controlado siendo a su vez monitoreada.

Se debe de considerar que para mejorar el proceso de consolidación el suelo debe de estar normalmente consolidado o tener una pequeña preconsolidación antes de ser cargado. La sobrecarga debe exceder la máxima presión de preconsolidación para que la utilización de mechas drenantes sea beneficiosa. Igualmente se debe evaluar en ciertos casos la consolidación secundaria, (en suelos orgánicos principalmente), en caso de que afecte los asentamientos de post-construcción, pudiendo solucionarse con una mayor sobrecarga.

Es importante por otro lado, mencionar que las mechas drenantes no cumplen ningún tipo de función estructural excepto en casos muy específicos como la posible reducción del potencial de licuefacción en algunos suelos.

Para el adecuado diseño de la instalación de mechas drenantes con fines de consolidación se requiere conocer bien el suelo donde se va a hallar la cimentación, su extensión y sus propiedades geomecánicas. Los análisis de ingeniería deben incluir predicciones de cantidad y el ritmo de asentamientos, durante y después de la

construcción e indicar la estabilidad del terraplén durante las etapas de construcción.

Para los análisis de consolidación, la investigación geotécnica debe definir la extensión y profundidad de los estratos compresibles y asegurar la toma de muestras inalteradas de alta calidad para determinar presiones de preconsolidación, coeficientes de compresibilidad y de consolidación tanto vertical como horizontal.

Habitualmente se busca un grado de consolidación de entre un 90% y un 95% de la consolidación primaria para poder realizarse este proceso en un periodo de meses.

El efecto de las mechas drenantes en el proceso de consolidación quedaría bien reflejado en la Figura 2.13 que compara de forma grossa el proceso de consolidación sin drenes y el proceso de consolidación con drenes y precarga.

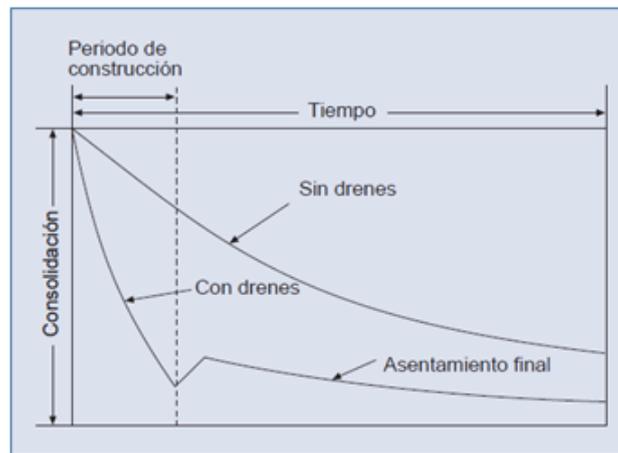


Figura 2.13 Consolidación del terreno en función del tiempo con drenaje o sin drenaje

La disposición habitual de mechas drenantes es en tresbolillo pudiendo ser también en forma de cuadrícula. Esto supone áreas de influencia distintas en ambos casos y unos diámetros equivalentes según aparece en la siguiente Figura 2.14.

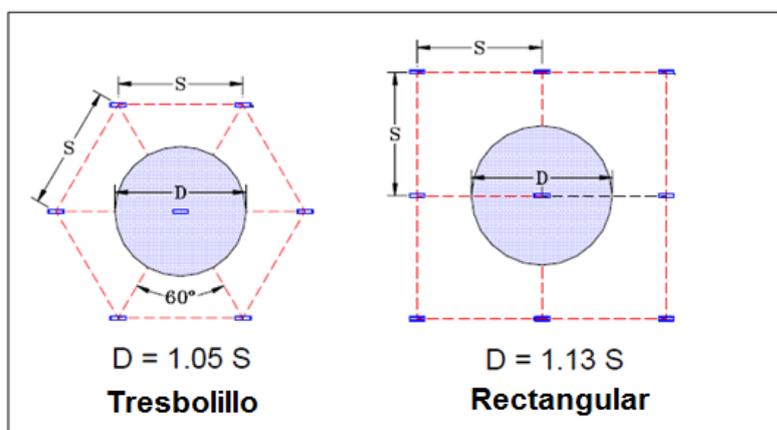


Figura 2.14 Esquema de disposición en "Tresbolillo" y "Rectangular"

El material con el que están fabricadas las mechas drenantes es un filtro geotextil que rodea un núcleo de plástico el cual está compuesto por canales que permiten el flujo de agua a través de él. Además puede tener una sección rectangular con unas dimensiones típicas de 10 centímetros de ancho y espesor de entre 3 y 7 milímetros.

Los equipos de instalación consisten en unos mástiles de empuje estático que se montan sobre la maquina base de retroexcavadoras o grúas. Los ritmos de trabajo permiten rendimientos de instalación de hasta 5000 metros lineales de mecha drenante por jornada y máquina.

Debe colocarse una capa o manto drenante superior que provee un claro camino de drenaje a las presiones de poro a la presión atmosférica sin crear una pérdida importante de carga. Habitualmente se hace de arena con espesores entre 0,6 y 1 metros siendo el espesor más pequeño si el material usado son gravas con filtros de protección. Un perfil tipo de suelo consolidado mediante mechas drenantes se puede ver en la Figura 2.15.

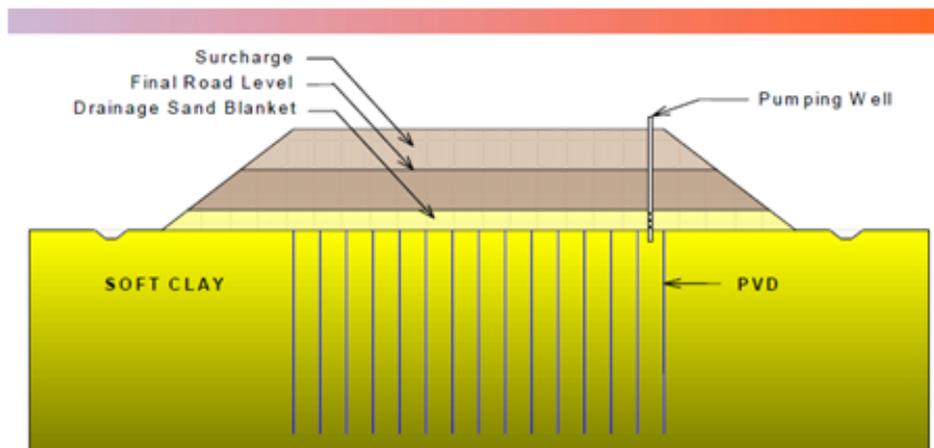


Figura 2.15 Perfil tipo de suelo consolidado mediante mecha drenante

Por su parte en los últimos años se ha incrementado el uso de drenes sintéticos en remplazo de la capa drenante.

La instrumentación de la obra mediante piezómetros, placas de asiento e inclinómetros entre otros revelan el desarrollo real del proceso de consolidación y dan la posibilidad de controlar el ritmo de ejecución del terraplén o de aplicación de la sobrecarga.

Los elementos de medición y asentamientos nos dan el ritmo y la cantidad de asentamiento, mientras que el inclinómetro principalmente se utiliza para medir deformaciones horizontales en profundidad como control de potenciales fallas de



deslizamiento. Los piezómetros son utilizados tanto para calcular el grado de consolidación alcanzado como el exceso de presiones de poro durante la construcción que indican el riesgo de potenciales fallas.

En caso de la incongruencia de la instrumentación se debe dar prioridad a las mediciones de asentamientos como indicadores del grado de consolidación.

Para proyectos sencillos en que la estabilidad no es una preocupación se puede implementar solo las placas de asentamientos.

La maquinaria usada resulta de gran tamaño, como se puede apreciar en la Figura 2.16, sin embargo, se consigue que no se produzca una gran perturbación en las distintas capas de suelo siendo además la implementación del sistema limpio, sin generar ningún tipo de residuo extra en el suelo.



Figura 2.16 Maquinaria usada para la colocación de mechas drenantes

Otra ventaja de esta tecnología es que puede realizar drenajes hasta una profundidad muy alta, en torno a los 70 metros de profundidad de ser necesario.

De cara al procedimiento constructivo se puede dividir éste en 4 etapas.

La primera de ellas es situar la maquinaria en el lugar donde se ha de realizar la mecha. Esto implica a su vez elegir las características de la mecha drenante y el vástago cuyas características combinen bien con las características del suelo a tratar.

La segunda etapa es la introducción del vástago junto a la mecha drenante hasta la profundidad necesaria. Es importante en esta etapa controlar la verticalidad del vástago y la colocación recta y estirada de la mecha drenante.

La tercera etapa es la extracción del vástago dejando la mecha drenante dentro del terreno tratado y en la profundidad necesaria.

La cuarta y última etapa consiste en, una vez totalmente extraído el vástago, cortar la mecha drenante unos 30 centímetros por encima de la superficie del terreno para conseguir que el agua llegue hasta la superficie y elimine toda su presión de poro.

Un resumen gráfico de todo este proceso se puede visualizar en la Figura 2.17.

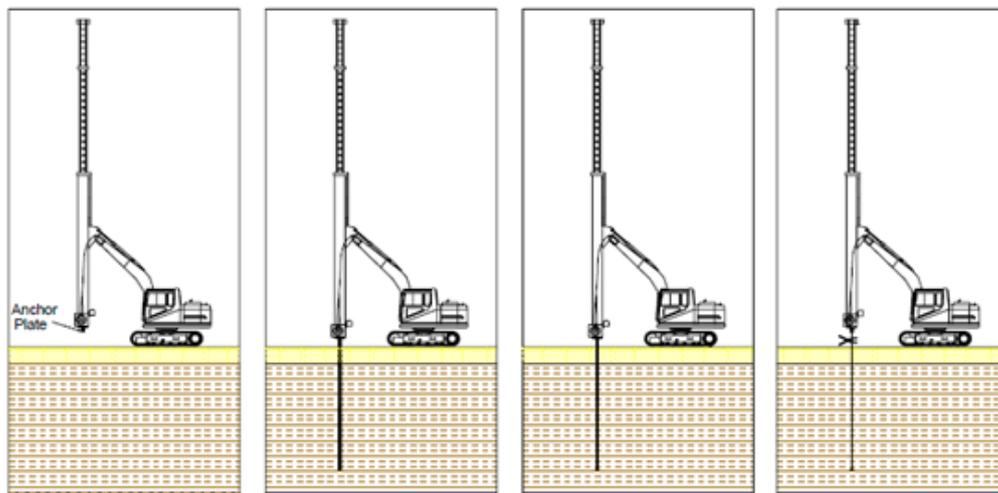


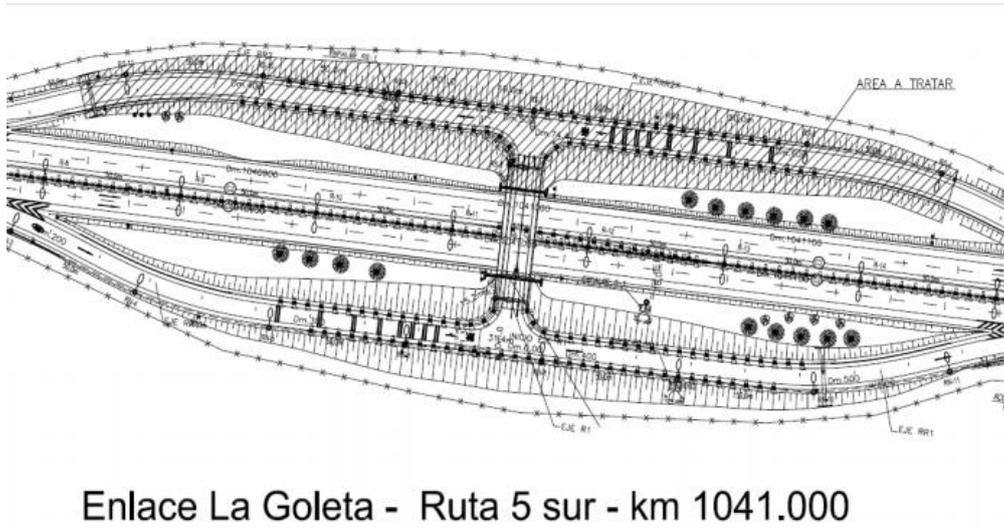
Figura 2.17 Etapas en la colocación de las mechas drenantes

Para terminar, mostraremos algunos ejemplos de casos que se han llevado a la práctica de obras civiles hoy en día en los que se han utilizado dichas mechas drenantes como método óptimo para alcanzar una la consolidación necesaria. Toda esta información ha sido obtenida de la página web de la empresa “Terratest”:

<http://www.terratest.cl/tecnologia-mechas-drenantes.html>

### **PROYECTO: ENLACE LA GOLETA, RUTA 5 SUR – PUERTO MONTT. (CHILE)**

En este proyecto, los estudios de mecánica de suelos indicaban niveles de consolidación inadmisibles para cualquier tipo de estructuras. Luego, considerando el coeficiente de consolidación vertical, se diseñó una distribución de mechas drenantes tipo Colbondrain CX-1000 en una malla regular de 1mx1m, donde se prevé que el 90% de los asentamientos por consolidación se completarán a los 18 meses. Figura 2.18.



Enlace La Goleta - Ruta 5 sur - km 1041.000

Figura 2.18 Esquema en planta del proyecto “Enlace La Goleta” (Chile)

**Resumen de la obra:**

- 14.77 km de Mechas de Drenantes. (Figura 2.19)
- Plazo de Ejecución: 6 Semanas.



Figura 2.19 Proceso de instalación de mechas drenantes. “Enlace La Goleta” (Chile)

**PROYECTO: NUEVO ACCESO AL PUERTO DE SAN ANTONIO (CHILE)**

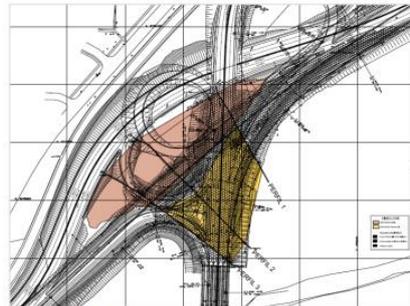


Figura 1 – Vista planta del proyecto.

**Resumen Obra**

**Mechas Drenantes**

- Cantidad (2.2x2.2) : 2.353 unidades.
- Área (2.2x2.2): 9.601 m<sup>2</sup>.



Figura 2.20 Proyecto “Nuevo acceso al Puerto de San Antonio” (Chile)

**Secuencia de ejecución:**



Figura 2 – Secuencia ejecución Mechass Drenantes.



Figura 2.21 Proceso de instalación de mechas drenantes. “Nuevo acceso al Puerto de San Antonio” (Chile)

### PROYECTO: AV. CIRCUNVALACIÓN SECTOR GUACAMAYO –VALDIVIA (CHILE)

Pilotes Terratest participó en el asesoramiento, diseño y ejecución de las mechas drenantes para la posterior estabilización de los terraplenes sobre suelos blandos a construir en la primera etapa del proyecto de la Av. Circunvalación, sector Guacamayo al sur poniente de la ciudad de Valdivia, región de los ríos

En este proyecto, los estudios de mecánica de suelos indicaban niveles de consolidación inadmisibles para cualquier tipo de estructuras. Luego, considerando el coeficiente de consolidación vertical, se diseñó una distribución de mechas drenantes tipo Colbondrain CX- 1000 en una malla regular de 1,3mx1,3m, donde se prevé que el 90% de los asentamientos por consolidación se completarán a los 18 meses. De esta forma se consiguió acelerar dichos asentamientos, que tras un análisis previo se pudo comprobar que con la geología existente del lugar eran inviables sin la aplicación de este método. El resultado de este análisis, como muestra la Figura 1, demostró que en 36 meses se alcanzarían consolidaciones cercanas al 8% del total, lo que estableció como prácticamente inviable realizar el terraplén proyectado sin el mejoramiento de drenes.

#### Resumen de la obra:

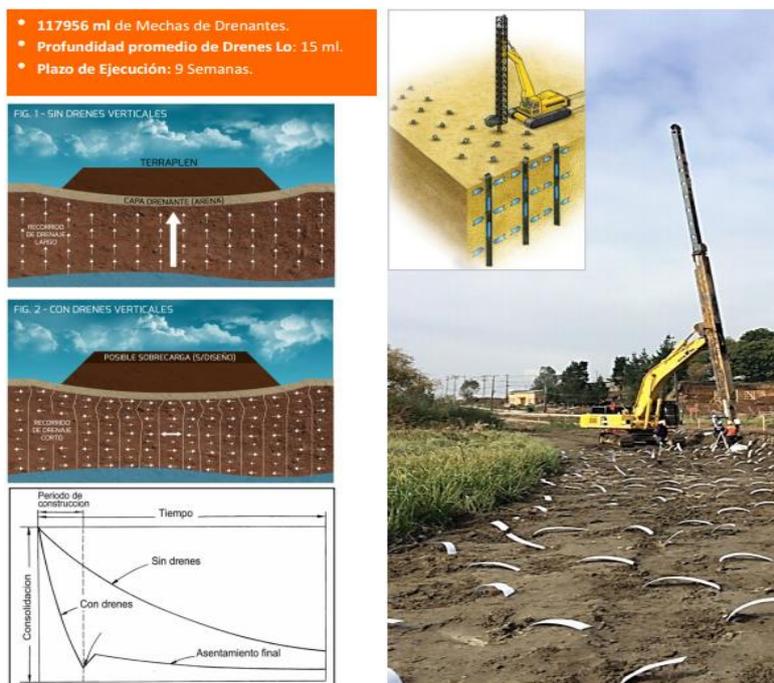


Figura 2.22 Proyecto “Av. Circunvalación Sector Guacamayo-Valdivia” (Chile)



### 3. El programa SICOMED 3D.

#### 3.1. Descripción del software SICOMED\_3D

El software SICOMED\_3D, acrónimo de “**S**imulación de **C**onsolidación con **M**echas **D**renantes”, permite simular el problema de consolidación 3D con mechas drenantes verticales en suelos heterogéneos formados por 1, 2 o 3 capas. Las mechas drenantes verticales son un sistema de drenaje que se utiliza en terrenos cohesivos blandos con el objeto de acelerar el proceso de consolidación y disminuir de esta manera el tiempo necesario para que se desarrollen los asentamientos producidos por la aplicación de cargas sobre la superficie del terreno. Durante este proceso, el suelo mejora también sus propiedades de resistencia al corte, lo cual hace que esta técnica de mejora de suelos sea muy utilizada en la actualidad.

Mediante una sencilla interfaz gráfica, el usuario establece las características geométricas y físicas del suelo, la carga aplicada al terreno y el mallado del modelo, así como algunos parámetros necesarios relacionados con la simulación como, por ejemplo, el tiempo inicial y final de la simulación.

Una vez terminada la etapa de cálculo, el programa permite conocer una gran variedad de resultados: evolución de asientos en la superficie del terreno, exceso de presión intersticial en cualquier punto de medio y grado medio de consolidación, entre otros.

##### 3.1.1 *Fundamentos teóricos del problema de consolidación 3D con mechas drenantes*

Este programa reproduce la consolidación de suelos anisótropos con mechas drenantes verticales parcialmente penetrantes y con disposición en planta rectangular, con el flujo de agua en la dirección ascendente y hacia las mechas, tal y como se muestra en la Figura 3.1. Se tiene en cuenta la influencia de la anchura de la mecha (dirección  $x$ ), considerando su espesor (dirección  $y$ ) despreciable. Se dan condiciones de impermeabilidad en la frontera inferior y en las laterales, con excepción de la zona de ubicación de la mecha, y condición de presión nula en la frontera superior y en la zona del dren.

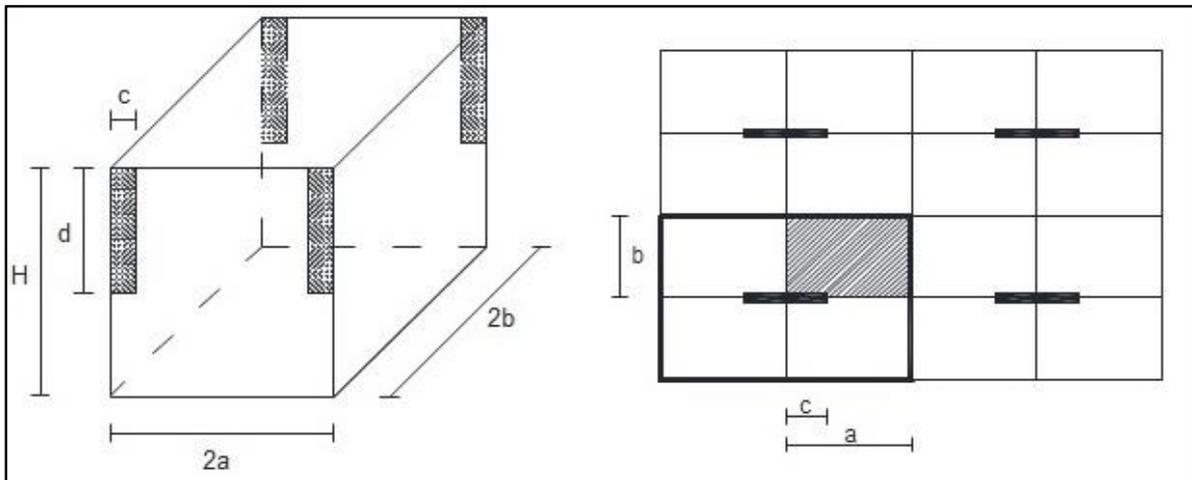


Figura 3.1 Esquema físico del proceso de consolidación 3-D (región de suelo con mechas drenantes verticales parcialmente penetrantes y disposición en planta rectangular)

Para la sección típica, el modelo matemático se rige por las ecuaciones

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_{v,z} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + c_{v,x} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) + c_{v,y} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad \text{Ecuación de gobierno}$$

$$u_{(x,y,z=0,t)} = u_{(0 \leq x \leq c, y=0, 0 \leq z \leq d, t)} = 0 \quad \text{Drenaje superficial y mecha}$$

$$\left( \frac{\partial u}{\partial n} \right)_{\text{resto de las fronteras}} = 0 \quad \text{Bordes impermeables}$$

$$u_{(x,y,z,t=0)} = u_0 \quad \text{Condición inicial}$$

Donde  $\frac{\partial u}{\partial n}$  representa la derivada en una dirección normal a la superficie frontera.

### 3.2. Lenguaje de programación y entorno operativo

SICOMED\_3D ha sido programado para todos los entornos operativos de Windows (XP, Vista, 7, 8 y 10) utilizando dos softwares distintos. El primero de ellos, NgSpice (Spice Code), software con licencia GNU, tiene la utilidad de motor de cálculo, es decir, resuelve las ecuaciones implementadas a través de los circuitos creados por nuestro software, generando un sencillo archivo de salida con los resultados obtenidos.



Por otro lado, Matlab se ha utilizado para crear la consola de introducción de datos de nuestro software, ya que permite programación orientada a objetos. Además, al ser un software específico de cálculo matemático presenta una aplicación muy completa y potente de representación gráfica, que es trasladada a los software programados con Matlab.

Por todo ello, SICOMED\_3D es un software potente que permite transcribir la ecuación de gobierno del problema de consolidación 3D a circuito eléctrico para que pueda ser resuelta, gracias a la gran capacidad de cálculo de NgSpice. Además, incluye la versatilidad y capacidad de representación gráfica de Matlab.

### *3.2.1 Método de Simulación por Redes (Spice Code)*

En el MESIR, el punto de partida es siempre el modelo matemático de un cierto proceso, esto es, un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales (EDP) espacio-temporales; la discretización de la variable espacial permite establecer el modelo en red o red eléctrica equivalente. Esta es la única manipulación directa que se hace de las ecuaciones.

El modelo en red es el formato que se da al modelo matemático para que pueda ser utilizado como entrada (fichero) en un programa de resolución de circuitos. Este software es el que resuelve las ecuaciones de la red proporcionando la solución numérica del modelo matemático.

En definitiva, puesto que la simulación del modelo en red mediante ordenador implica la resolución numérica de sus ecuaciones, el método de simulación por redes es, de hecho, un método numérico.

#### *3.2.1.1 Método de Simulación por Redes (Spice Code)*

Como dominio del problema se asume una región de terreno (3D) que se dividirá en  $N_x \times N_y \times N_z$  celdas o volúmenes elementales, también de geometría 3D. El dominio global puede estar formado, a su vez, por regiones homogéneas de diferente conductividad eléctrica y tamaño. Por tratarse de una celda simétrica (con tres ejes de simetría) de dimensiones  $\Delta x \times \Delta y \times \Delta z$ , el modelo eléctrico para el estado transitorio está formado por seis resistencias y un condensador, y las conexiones son las mostradas en la Figura 3.2:

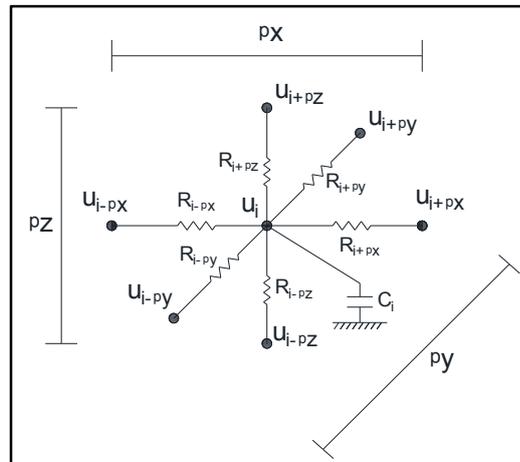


Figura 3.2 Modelo en red de la celda elemental

El valor de las resistencias es:

$$R_{x, i-\Delta} = R_{x, i+\Delta} = (\Delta x^2 / 2C_h)$$

$$R_{y, i-\Delta} = R_{y, i+\Delta} = (\Delta y^2 / 2C_h)$$

$$R_{z, i-\Delta} = R_{z, i+\Delta} = (\Delta z^2 / 2C_v)$$

El condensador es de capacidad unitaria, es decir,  $C=1$ . Como condición inicial (IC) se le asigna un voltaje (V) igual a la carga aplicada en superficie ( $N/m^2$ )

El contorno del dominio se somete a condición adiabática (una resistencia infinita) en las fronteras impermeables, mientras que en las fronteras drenantes se coloca una pila de voltaje 0.

### 3.2.1.2 NgSpice

NgSpice es un simulador de circuitos de señal mixta de nivel mixto con licencia GNU. Es el sucesor de código abierto de Spice3f5 y se basa en tres paquetes de software libre, Spice3f5, Xspice y Cider1b1, que le permiten implementar tres clases de análisis:

- Los análisis no lineal DC
- Los análisis no lineal transitoria
- Análisis lineal de CA

Ngspice implementa diversos elementos de los circuitos, como resistencias, condensadores, inductores (individuales o de inversión), líneas de transmisión y un número creciente de dispositivos semiconductores como diodos, transistores bipolares, MOSFETs (tanto a granel y SOI), MESFETs, JFET y HFET.



### **3.2.2 Matlab**

MATLAB® es el lenguaje de alto nivel y el entorno interactivo utilizado por millones de ingenieros y científicos en todo el mundo. Le permite explorar y visualizar ideas, así como colaborar interdisciplinariamente en procesamiento de señales e imagen, comunicaciones, sistemas de control y finanzas computacionales.

MATLAB permite el diseño y edición de interfaces gráficas de usuario utilizando GUI, un entorno de desarrollo interactivo que permite al usuario incluir componentes comunes, tales como pulsadores, menús desplegables y cuadros de lista, así como parcelas en su software.

Además, la capacidad de representación gráfica es trasladada a los softwares programados con Matlab permitiendo la representación en 1-D, 2-D o 3-D.

## **3.3. Guía de utilización del software SICOMED\_3D**

### **3.3.1 Inicio del software y resultados**

La organización y estructura del programa han sido diseñadas con la finalidad de que el usuario disponga de una herramienta de cálculo potente y útil, a la vez que sencilla, tanto en la introducción de datos como en la interpretación de resultados.

La entrada de datos se realiza a través de una interfaz gráfica que se compone de un total de tres pantallas, que aparecen de forma consecutiva a medida que se va completando la introducción de datos.

Al inicial el programa SICOMED\_3D se abre la primera pantalla, en la cual se introducen los datos relativos a la geometría en planta del problema: longitud total, anchura total y anchura de la mecha. Asimismo, en esta primera pantalla se ha de establecer el número de celdas (reticulado) que queremos asignar a cada una de estas medidas, tal y como se observa en la Figura 3.3.

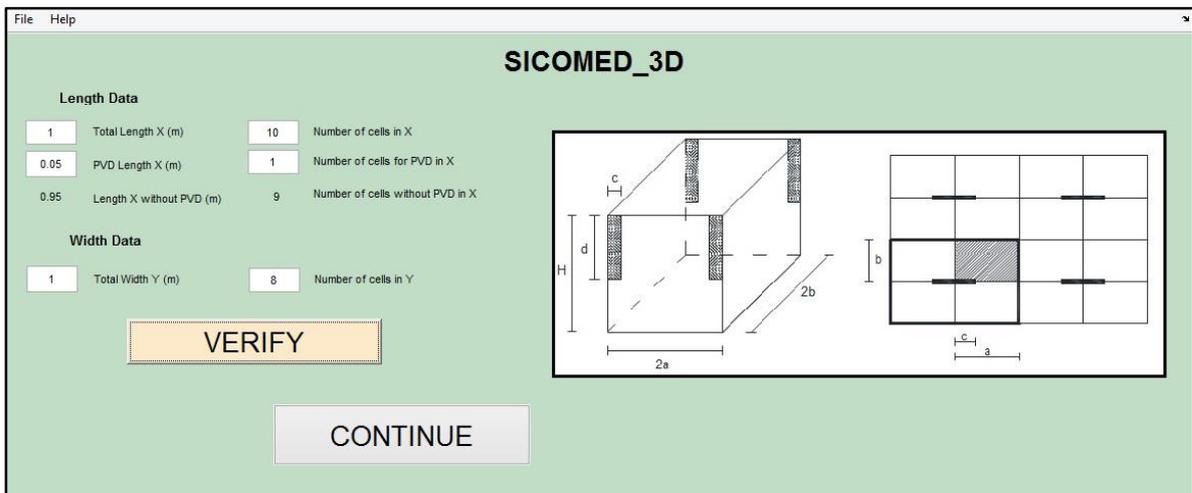


Figura 3.3 Primera pantalla de introducción de datos

Mediante un botón de verificación el programa comprueba que los datos introducidos son coherentes, y mediante el botón de continuación pasamos a la siguiente pantalla. En esta, se introducen los datos relativos a la geometría de los estratos, así como los coeficientes de consolidación de cada uno de ellos.

En primer lugar, elegimos el número de estratos de los cuales está compuesto el terreno, mediante una pestaña desplegable (de 1 a 3 estratos posibles). Una vez seleccionada esta opción se procede a introducir el espesor de cada estrato, así como la reticulación que queremos emplear para cada uno de ellos.

Mediante un segundo desplegable introducimos los valores de los distintos coeficientes de consolidación directamente ( $c_{vi}$  y  $c_{hi}$  son los respectivos coeficientes de consolidación vertical y horizontal del estrato  $i$ ), o bien, a partir de los distintos parámetros del suelo con los que se obtienen dichos coeficientes:

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

donde:

- $k_{vi}$ : conductividad hidráulica (coeficiente de permeabilidad) vertical del estrato  $i$ , (m/año)
- $k_{hi}$ : conductividad hidráulica (coeficiente de permeabilidad) horizontal del estrato  $i$ , (m/año)
- $e_{oi}$ : índice de poros inicial del estrato  $i$ , (adimensional)
- $\gamma_w$ : peso específico del agua. ( $N/m^3$ ).
- $a_{vi}$ : coeficiente de compresibilidad del estrato  $i$ . ( $m^2/N$ ).



Como unidad de medida del tiempo se ha optado por el año, magnitud más apropiada que el segundo para este tipo de problemas. De esta manera,  $c_{vi}$  y  $c_{hi}$  tienen unidades de  $m^2/año$ .

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 distintas: mecha parcialmente penetrante en el estrato superior (con introducción de la profundidad de penetración y la reticulación deseada), o mecha totalmente penetrante hasta el primer, segundo o tercer estrato (con la profundidad y reticulación asignadas automáticamente por el programa). En la Figura 3.4 se puede observar una captura de esta segunda ventana de introducción de datos.

**Number of layers**

3 (Layers already selected) [APPLY]

**Thicknesses and numbers of cells**

LAYER 1 DATA		LAYER 2 DATA		LAYER 3 DATA	
1	Thickness of top layer (m)	1	Thickness of intermediate layer (m)	1	Thickness of bottom layer (m)
5	Number of cells in Z (top layer)	5	Number of cells in Z (intermediate layer)	5	Number of cells in Z (bottom layer)
3	Total Thickness (m). "H"	15	Total Number of cells in Z		

**Cvi and Chi Data**

Known  $K_v$ ,  $K_h$ ,  $e_{0i}$  &... [APPLY] (Cv option selected)

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

0.02	$k_v$ of top layer (m/year)	0.06	$k_v$ of intermediate layer (m/year)	0.04	$K_v$ of bottom layer (m/year)
0.04	$k_h$ of top layer (m/year)	0.12	$k_h$ of intermediate layer (m/year)	0.08	$K_h$ of bottom layer (m/year)

Coefficients of Compressibility

5.7e-06	$a_v$ of top layer ( $m^2/N$ )	4e-06	$a_v$ of intermediate layer ( $m^2/N$ )	3.7e-06	$a_v$ of bottom layer ( $m^2/N$ )
---------	--------------------------------	-------	---	---------	-----------------------------------

Initial void ratios

1.5	$e_0$ of top layer	1.25	$e_0$ of intermediate layer	1	$e_0$ of bottom layer
-----	--------------------	------	-----------------------------	---	-----------------------

$c_v$  and  $c_h$  values:

0.895095	$c_v$ of top layer ( $m^2/year$ )	3.44388	$c_v$ of intermediate layer ( $m^2/year$ )	2.20629	$c_v$ of bottom layer ( $m^2/year$ )
1.79019	$c_h$ of top layer ( $m^2/year$ )	6.88776	$c_h$ of intermediate layer ( $m^2/year$ )	4.41258	$c_h$ of bottom layer ( $m^2/year$ )

**Penetration of the drain**

Partially penetrating into the top layer [PVD option selected] 1 (m) [2] (Number of cells of the drain)

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

[VERIFY] [VERIFY DRAIN] [BACK] [CONTINUE]

Thickness of top layer without drain 0.6 (m)  
Number of cells of top layer without drain 3

Figura 3.4 Segunda pantalla de introducción de datos



Nuevamente, mediante dos botones de verificación el programa comprueba que los datos introducidos son coherentes, y mediante el botón de continuación pasamos a la tercera pantalla, donde se introducen los parámetros necesarios relacionados con la simulación que necesita el programa: carga uniformemente distribuida aplicada en superficie ( $N/m^2$ ), tiempo inicial a partir del cual se desea obtener resultados, tiempo final de cálculo, incremento de tiempo máximo entre cada iteración y un parámetro de tolerancia relativa que utiliza el programa Ngspice para alcanzar la convergencia del problema. Una vez se han introducidos todos estos datos se puede comenzar la simulación, mediante el botón de cálculo. La Figura 3.5 recoge una captura de esta tercera pantalla de introducción de datos.

**Simulation Data**

Uniform Load  
 (N/m<sup>2</sup>)

Initial Time  (Years)      Final Time  (Years)

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

RELTOL (determines convergence across iterations)

**BACK** **RUN**

Figura 3.5 Tercera pantalla de introducción de datos

Como se puede observar, la segunda y tercera pantallas de introducción de datos disponen de un botón de retroceso a la pantalla anterior, en el caso de que se quiera revisar, modificar o guardar (retrocediendo hasta la pantalla primera) los datos introducidos con anterioridad.

Al finalizar las simulaciones se podrá tener una visualización de los resultados de forma gráfica. Esta última parte del programa cuenta con una gran variedad de formas de obtención de resultados, ordenadas convenientemente de manera 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. 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 introduce la ubicación de las columnas a representar mediante sus coordenadas X e Y, así como los tiempos inicial y final de la representación gráfica. (Figura 3.6).

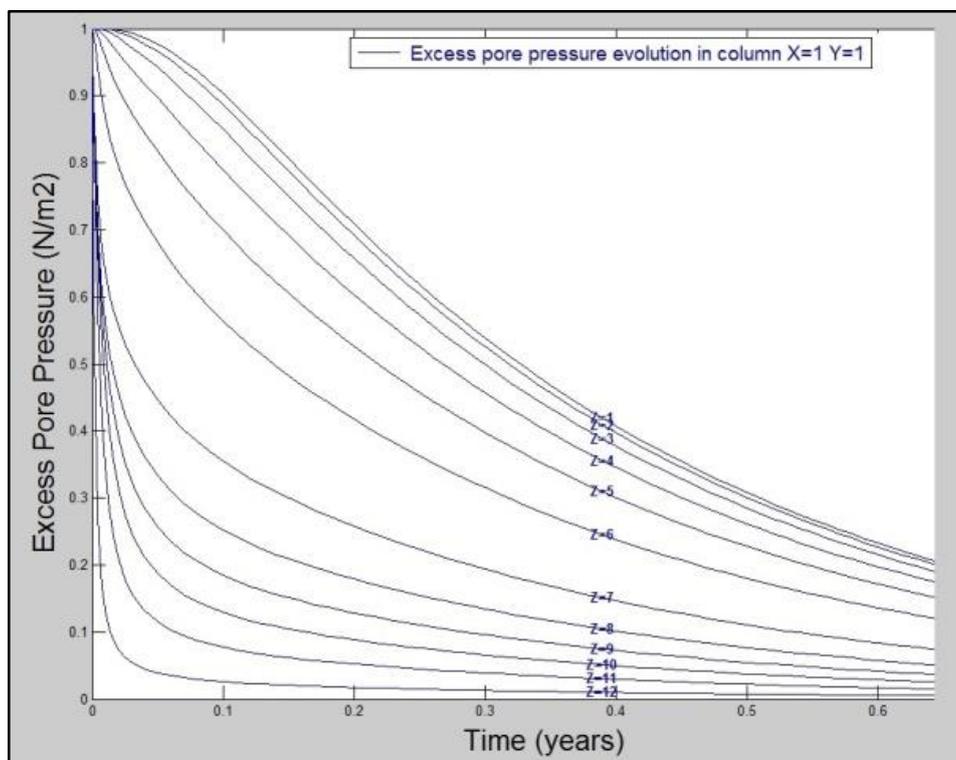


Figura 3.6 Exceso de presión intersticial en una columna de suelo

### 2. Exceso de presión intersticial en un punto del suelo

Se trata de una variante de la gráfica anterior. En este caso se permite obtener la evolución del exceso de presión intersticial en uno, dos o tres puntos concretos del suelo, determinados por sus coordenadas X, Y, Z.

### 3. Grado de consolidación promedio

Mediante esta representación gráfica se visualiza la evolución del grado de consolidación promedio del terreno. Esta función nos aporta información acerca del porcentaje de consolidación alcanzado en la superficie del terreno, determinado por la



relación entre el asiento promedio en cada instante y el asiento final una vez se hayan disipado todos los excesos de presión intersticial en el suelo. (Figura 3.7).

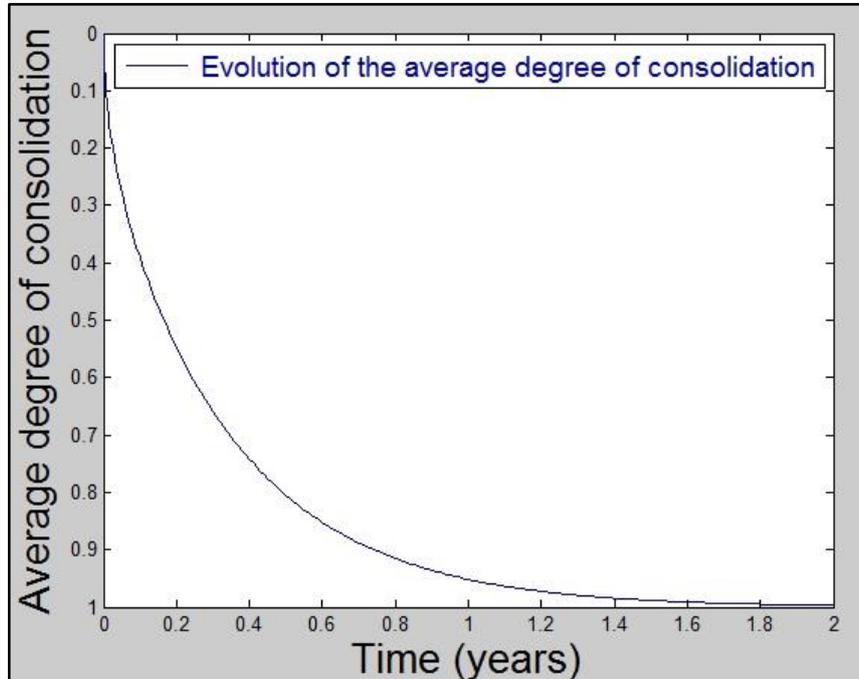


Figura 3.7 Evolución del grado de consolidación promedio

[4. Asientos locales en una columna de suelo \(sólo disponible en la opción que permite el cálculo de asientos\)](#)

Se trata de una representación análoga a la del exceso de presión intersticial en cada celda de una columna de suelo, solo que en este caso la variable representada es el asiento local (disminución de espesor de cada celda respecto de su espesor inicial).

[5. Asiento superficial en una columna de suelo \(sólo disponible en la opción que permite el cálculo de asientos\)](#)

Con esta representación gráfica obtenemos la evolución del asiento en superficie (cómputo de la suma de todos los asientos locales) de una o varias columnas de suelo. El usuario introduce la ubicación de las columnas a representar mediante sus coordenadas X e Y, así como los tiempos inicial y final de la representación gráfica. Es posible representar el asiento superficial de hasta 3 columnas simultáneamente.

[6. Animación de asientos superficiales \(sólo disponible en la opción que permite el cálculo de asientos\)](#)

Se trata de una representación animada, donde el usuario podrá generar, reproducir e incluso guardar un archivo de video (extensión .mp4) en el cual se recoge la evolución del asiento de toda la superficie del terreno, tal y como se puede ver en la

Figura 3.8. Además de elegir el tiempo hasta el que se quiere obtener la representación (el tiempo inicial está fijado al tiempo inicial escogido en la etapa de simulación), el programa permite escoger el número de fotogramas a utilizar, así como la velocidad con la que éstos se reproducirán en la animación de video (número de fotogramas por segundo).

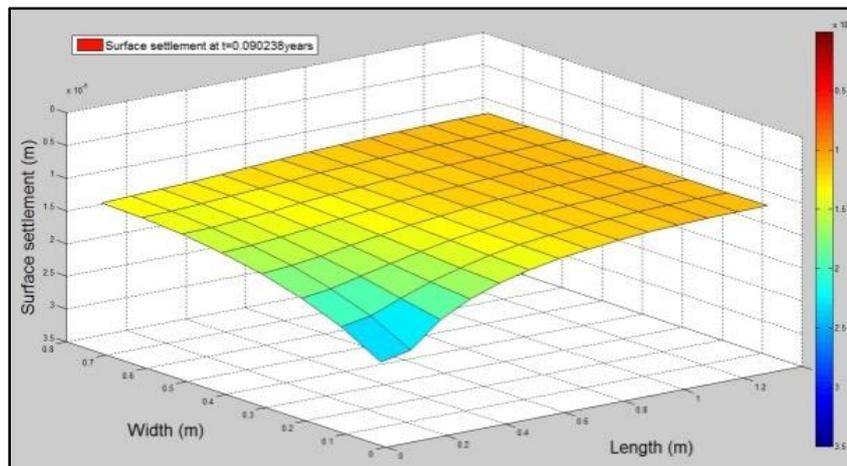


Figura 3.8 Captura de la animación de la evolución del asiento experimentado en superficie

Todas estas gráficas de resultados se pueden guardar como archivo de Matlab (Matlab Figure \*.fig)

### 3.3.2 Menús de opciones y ayuda

La Figura 3.9 muestra una captura de pantalla del menú de opciones del programa SICOMED\_3D. Entre sus principales funciones, destacan:

→ **Nuevo** (File → New)

Borra todos los datos introducidos y prepara el programa para la introducción de nuevos valores.

→ **Guardar** (File → Save)

Almacena todos los datos referentes a los parámetros físicos y geométricos introducidos.

→ **Cargar** (File → Load)

Carga dentro del programa todos los datos almacenados con anterioridad



→ **Cargar figura** (File → Load Figure)

Abre una figura en blanco de Matlab a partir de la cual se podrán abrir figuras guardadas de Matlab como, por ejemplo, las gráficas de resultados del propio programa.

→ **Cerrar** (File → Close)

Cierra el programa.

→ **Ayuda**(Help → Quick Help)

Consiste en una guía rápida de ayuda para la correcta utilización del programa.

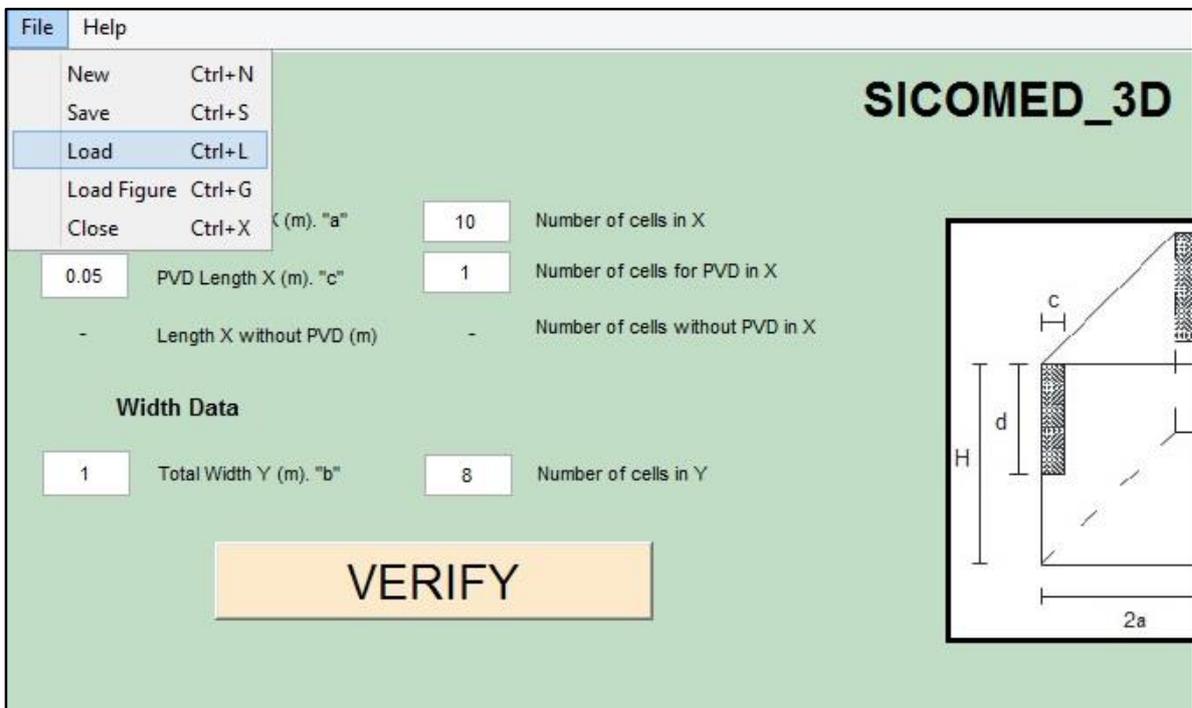


Figura 3.9 Opciones del menú de resultados guardados

#### 4. Simulaciones mediante SICOMED 3D:

##### 4.1. Datos de las distintas capas del suelo:

De cara a nuestra investigación se ha procedido a simular el problema de consolidación para un suelo en el que inicialmente no existen mechas drenantes y toda la expulsión del agua se hace a través de la superficie del terreno. Tras ello, se procede a simular distintos escenarios de consolidación para el mismo suelo, en el que vamos variando la profundidad de penetración de la mecha drenante, de manera que podamos cuantificar como afecta esta profundidad al problema de la consolidación. F

La disposición en planta de las mechas drenantes se ha considerado que es rectangular. En concordancia con la Figura 4.1, la geometría de la cuadrícula de las mechas queda resumida en la tabla que sigue a continuación.

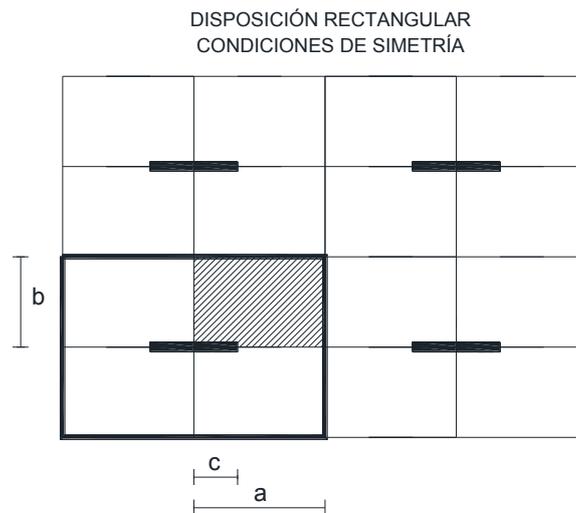


Figura 4.1 Geometría de la cuadrícula de las mechas

Separación entre mechas de una misma Hilera	$2a$	2 m
Separación entre hileras	$2b$	2 m
Anchura de mecha	$2c$	0.10 m

Para este estudio consideraremos un suelo compuesto de tres estratos diferentes. Figura 4.2.

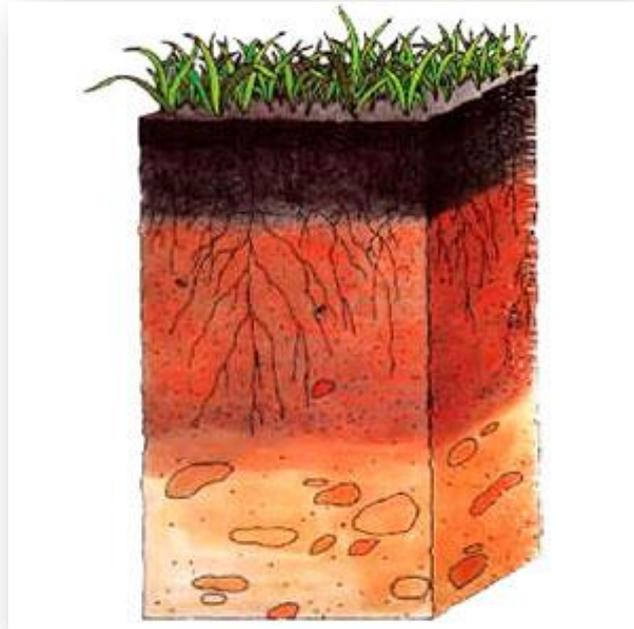


Figura 4.2 Terreno compuesto por tres estratos

Las propiedades de dicho terreno para el que realizaremos distintas simulaciones quedan resumidas en la siguiente tabla:

		S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>
Permeabilidad vertical (m/año)	<b>K<sub>v</sub></b>	0,007	0,015	0,006
Permeabilidad horizontal (m/año)	<b>K<sub>h</sub></b>	0,022	0,04	0,01
Coefficiente de compresibilidad (m <sup>2</sup> /N)	<b>A<sub>v</sub></b>	0,0000075	0,0000028	0,00000125
Relación de vacíos	<b>e<sub>0</sub></b>	1,5	0,9	0,7
Espesor del estrato (m)	<b>H</b>	1	3	2

A partir de estos datos realizaremos una serie de simulaciones para dos casos diferentes. En cada uno de ellos variará la disposición de los diferentes estratos. Esto lo utilizaremos para comparar los resultados obtenidos con el mismo procedimiento para dos disposiciones de estratos diferentes.

**Caso N°1:**

Siendo la disposición de los estratos para este caso la que se muestra en la Figura 4.3.

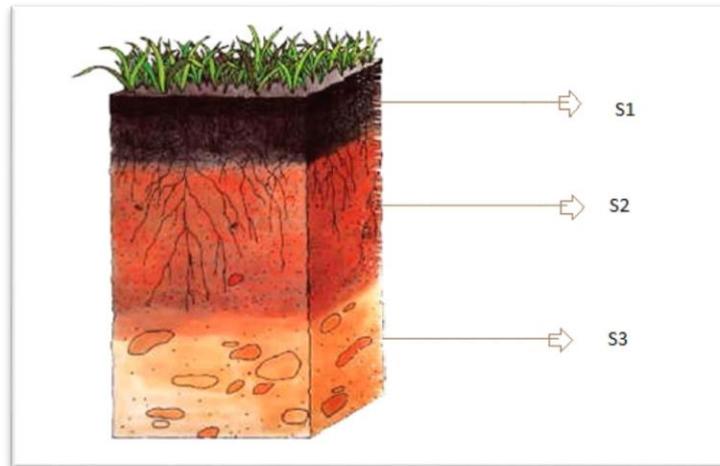


Figura 4.3 Terreno para el Caso N°1

**Caso N°2:**

Con una disposición de estratos mostrada en la Figura 4.4:

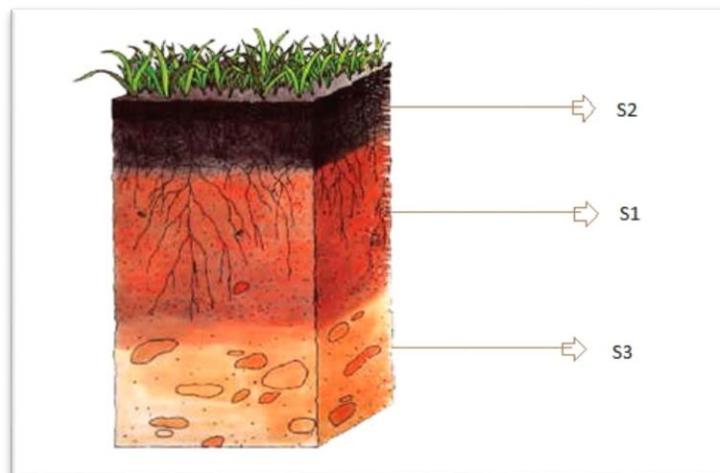


Figura 4.4 Terreno para el Caso N°2

Para cada uno de estos casos realizaremos una serie de simulaciones teniendo en cuenta diferentes aspectos. Para empezar, diferenciaremos las simulaciones gracias a la profundidad de penetración de la mecha ( $d$ ). Estas primeras simulaciones vendrán determinadas por la altura de cada uno de los estratos.

- 1) 1ª Simulación: Sin mecha drenante. ( $d=0.001$ )

- 2) 2ª Simulación: Con mecha totalmente penetrante hasta el primer estrato. (d=1)
- 3) 3ª Simulación: Con mecha totalmente penetrante hasta el segundo estrato. (d=4)
- 4) 4ª Simulación: Con mecha totalmente penetrante hasta el tercer y último estrato. (d=6)

Una vez establecida la profundidad de la mecha deseada, realizaremos las simulaciones necesarias para comprobar a qué distancia han de estar separadas entre ellas para conseguir un resultado final adecuado. Esto puede conllevar varias simulaciones.

#### 4.2. Simulación del supuesto N°1:

Disposición de los estratos para este caso, una vez más, Figura 4.3

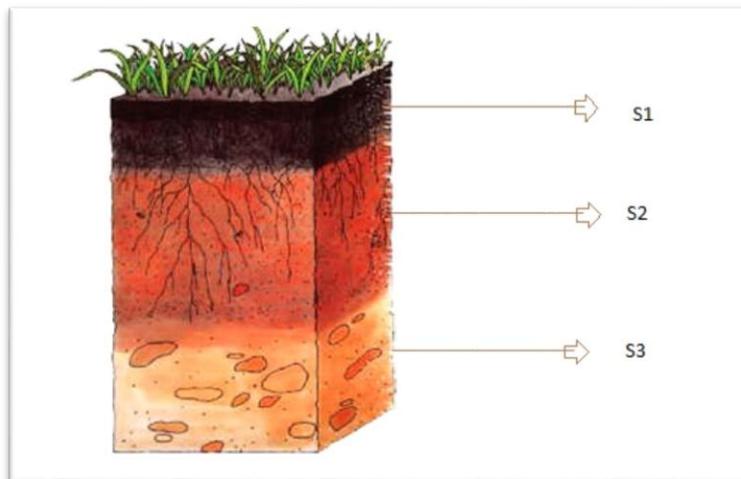


Figura 4.3 Terreno para el Caso N°1

#### 1ª Simulación: Sin mecha drenante. (d=0.001)

Al ejercer una carga sobre el terreno, ésta es transmitida instantáneamente al agua, experimentándose un exceso de presión intersticial en los poros del suelo. En esta simulación vamos a trabajar considerando que no hay mecha drenante en el suelo. Esto implica que todo el drenaje ha de producirse de forma vertical.

Por las características del programa que vamos a utilizar, SICOMED\_3D, no podemos realizar una simulación completamente sin mecha, por lo que haremos una simulación dándole una capa adicional a la mecha de 0.001m de profundidad.

A continuación se presenta una imagen donde se refleja la primera pantalla del programa para introducir los datos. Como hemos explicado en el capítulo anterior, aquí tenemos los datos en planta, Figura 4.5, las dimensiones de la mecha y la división en celdas de nuestro terreno.

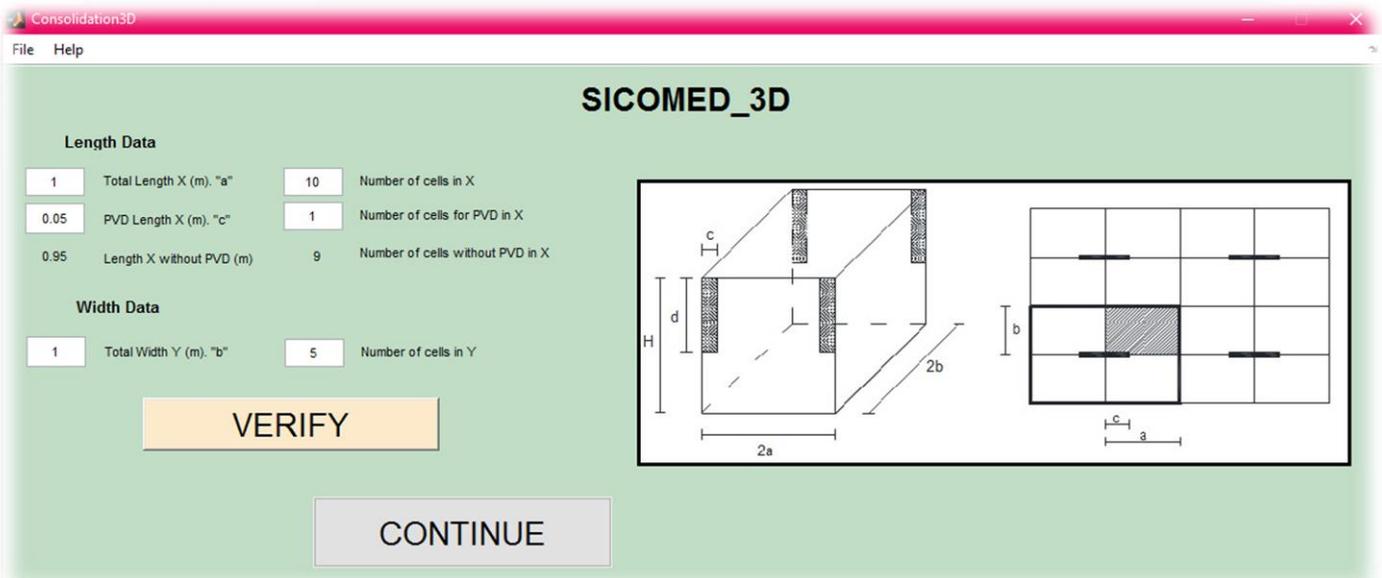


Figura 4.5 Primera pantalla del programa

Como hemos dicho anteriormente, ya que el programa no permite hacer el ensayo completamente sin mecha, introducimos una celda adicional al terreno que ya tenemos con una profundidad de 0.001m. Esto no influirá de manera significativa en nuestros cálculos, por lo que podríamos considerar que hemos realizado un ensayo sin mecha.

Se han hecho diferentes simulaciones previas para hallar la reticulación óptima para este problema. En concreto, se han hecho simulaciones ( $N_x \times N_y \times N_z$ ) con  $20 \times 20 \times 24 = 9600$  y  $10 \times 10 \times 12 = 1200$ , siendo éstos últimos los valores correspondientes a las celdas totales. Debido a que no hemos encontrado diferencias significativas, hemos optado por elegir un modelo basado en 600 celdas con la siguiente disposición:  $10 \times 5 \times 12$ . Con éste, el resultado es más fácil de obtener y la diferencia, como ya hemos dicho, no es significativa.

A continuación se encuentran los datos aportados a la segunda pantalla del programa, Figura 4.6. Podemos observar los datos que hacen referencia a esa celda adicional. En este caso, la disposición elegida de celdas será  $10 \times 5 \times 13 = 650$  celdas. Cada metro de capa se corresponde con dos celdas, cada una de 0.5m. Sin embargo, en los valores correspondientes al primer estrato, podemos darnos cuenta de que contamos



con una capa más. Esta capa adicional solo se tendrá en cuenta en este primer ensayo sin mecha. Para todos los demás, serán las celdas correspondientes a su profundidad. Esa será la correspondiente a la mecha ( $d=0.001$ ).

- Primer estrato,  $H=1$  m -- 2 celdas + 1
- Segundo estrato,  $H=3$  m -- 6 celdas
- Tercer estrato,  $H=2$  m -- 4 celdas

Como hemos dicho anteriormente, esto no afecta de manera significativa al resultado de esta simulación.

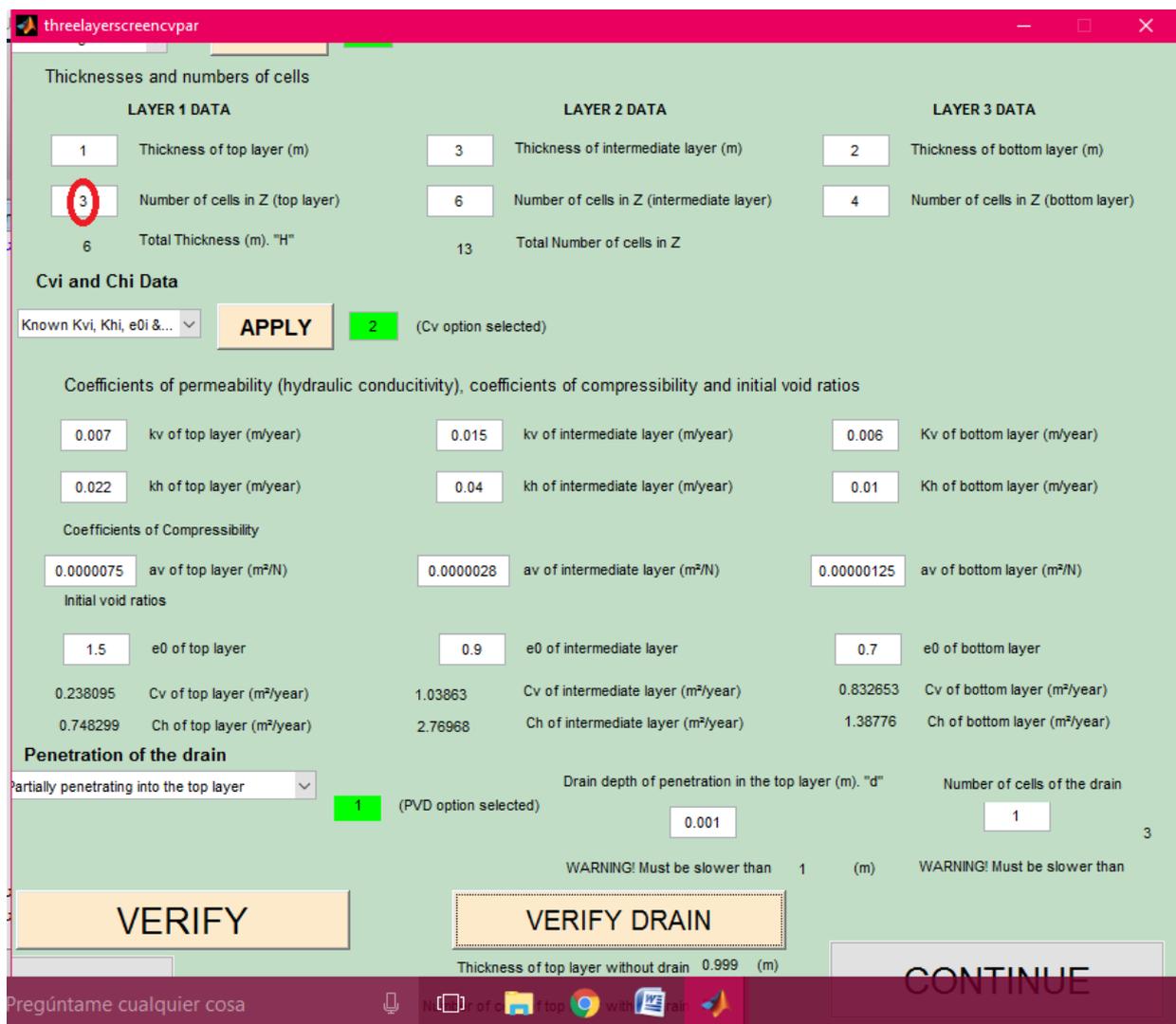


Figura 4.6 Segunda pantalla del programa

En un primer tanteo hemos considerado un periodo de consolidación de 20 años para un espesor correspondiente a 6m. Hemos encontrado que llegamos aproximadamente a un 80% de la consolidación, por lo que necesitaríamos hacer un nuevo tanteo con más años.

A continuación, en la Figura 4.7, mostramos una imagen con los resultados obtenidos sobre el grado de consolidación promedio sin mecha drenante.

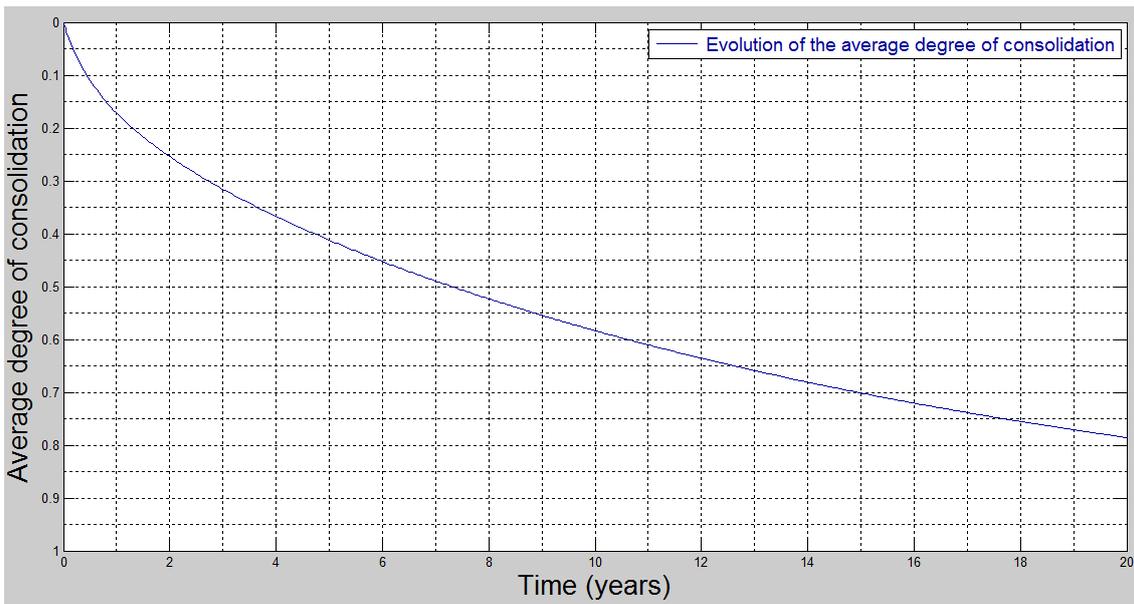


Figura 4.7 Grado de consolidación sin mecha drenante

Vamos a realizar una segunda simulación para ver el tiempo real. Para esto, ampliaremos el tiempo de simulación de 20 a 75 años. Así podremos ver realmente el tiempo que tarda nuestro terreno en alcanzar un 90% del grado de consolidación final. Establecemos un 90-95 % como valor aceptable porque a partir de ahí, la variación es mucho menor y podría ser un valor bueno para llevar a la práctica en determinadas obras sin que pueda dañar estructuras ubicadas encima de dicho suelo.

A continuación, en la Figura 4.8, se muestra el nuevo resultado obtenido del grado de consolidación promedio con el programa SICOMED\_3D:

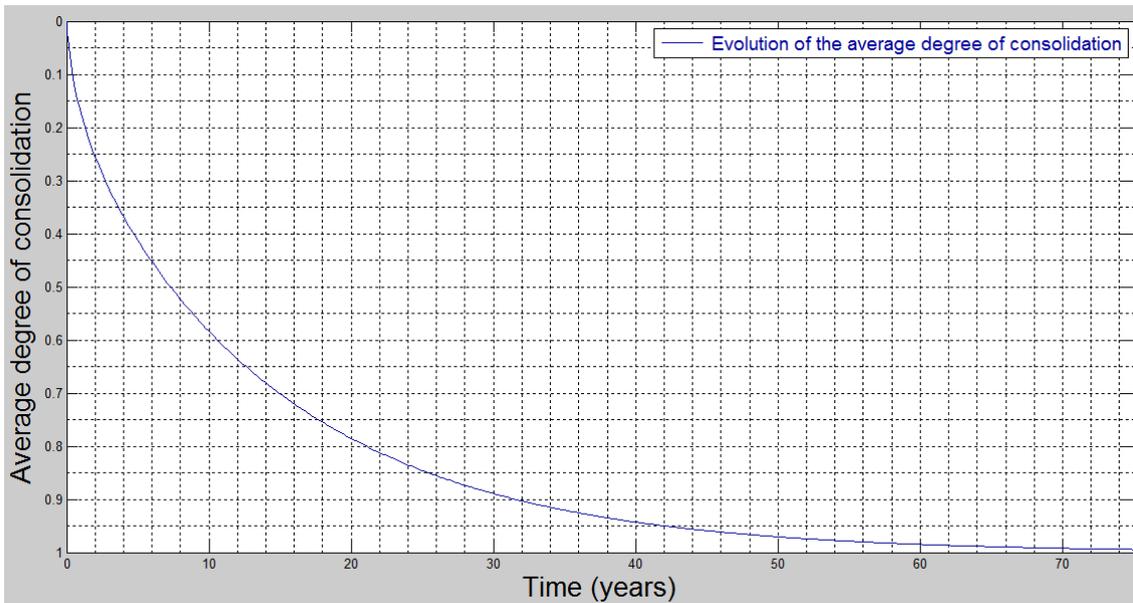


Figura 4.8 Grado de consolidación

Ahora mostraremos otra gráfica donde podemos observar la evolución del asiento real de una columna de suelo, una de las potentes opciones de representación que nos brinda SICOMED\_3D. Podemos seleccionar la columna de suelo que queramos, incluso 2 a la vez, y ver la diferencia de asiento en cada una de ellas.

En este caso le hemos pedido al programa información para las coordenadas ( $x_1=1$ ,  $y_1=1$  ;  $x_2=0.2$ ,  $y_2=0.2$ ). Hemos elegido estas coordenadas porque consideramos que las coordenadas correspondientes al punto 1 serán las más alejadas a la mecha, y las correspondientes al punto 2 las más cercanas. Como ya hemos dicho anteriormente, en esta simulación no hay mecha, por lo que el resultado obtenido para ambas coordenadas debería de ser el mismo.

Debido a la reticulación establecida, no podemos conocer los resultados correspondientes a los puntos exactos escogidos, pues no existe información exacta en esas coordenadas. Por lo tanto, el programa es el que busca las coordenadas más próximas a las que le facilitamos donde existan datos. (*Esto viene perfectamente explicado en la guía del programa*). En la Figura 4.9 que les mostramos a continuación aparecen dichas coordenadas, las cuales muestran el asiento real de cada columna de suelo.

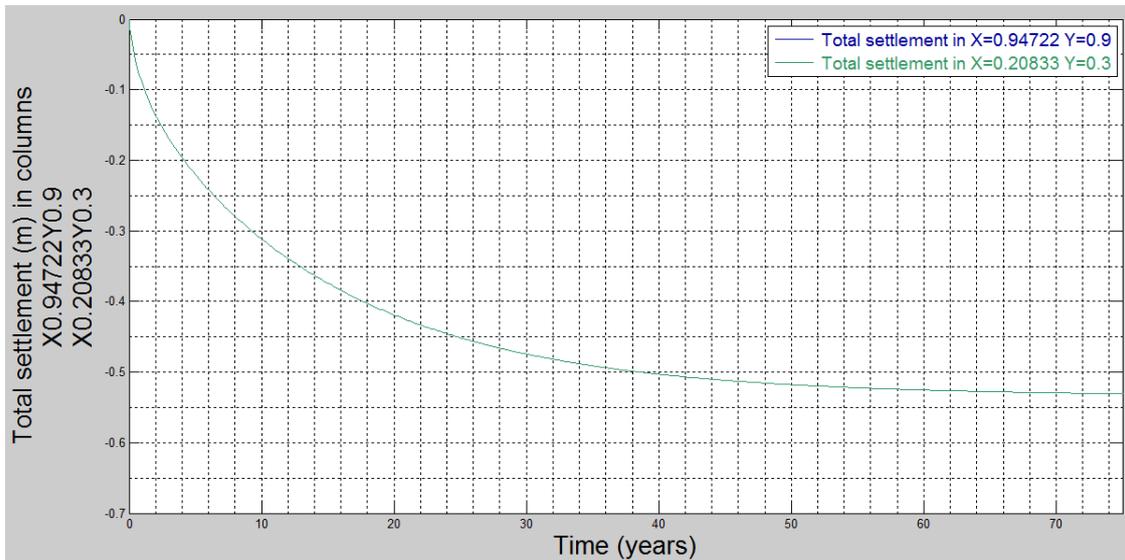


Figura 4.9 Asiento real de dos columnas de suelo

Al principio de la simulación hablábamos de que al no haber ningún tipo de mecha drenante todo el drenaje se produce de forma vertical. Por esta razón, los asentamientos son completamente homogéneos de principio a fin; es decir, todas las columnas de suelo asientan por igual.

En la siguiente imagen, Figura 4.10, podemos apreciar también como en las capas más superficiales, el exceso de presión intersticial se disipa antes que en las capas inferiores del suelo.

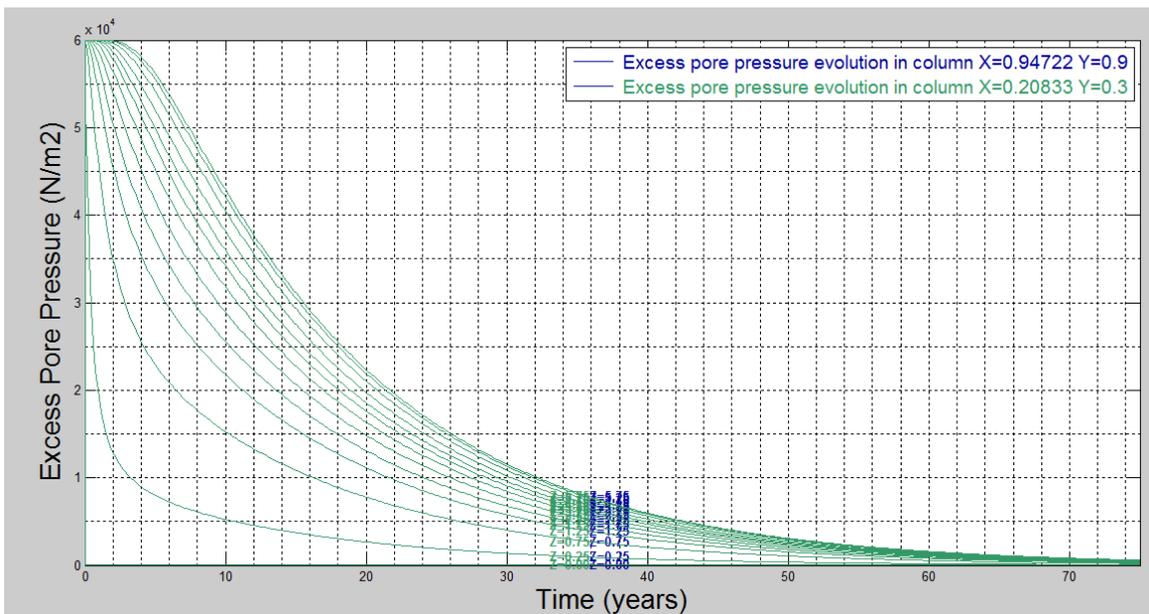


Figura 4.10 Exceso de presión intersticial

La distribución de asientos en superficie se recoge en la siguiente secuencia de imágenes. En ellas podemos ver de nuevo que los asientos son completamente homogéneos de principio a fin al no existir mechas drenantes dispuestas en este caso y drenar el agua entera de forma vertical.

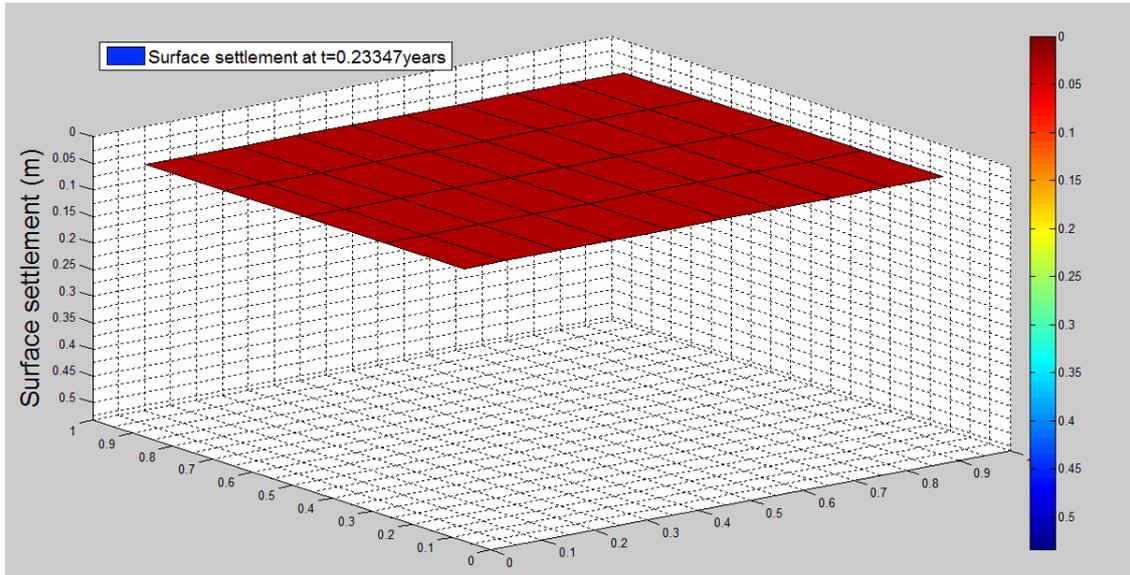


Figura 4.11 Asiento del terreno correspondiente a un 20%

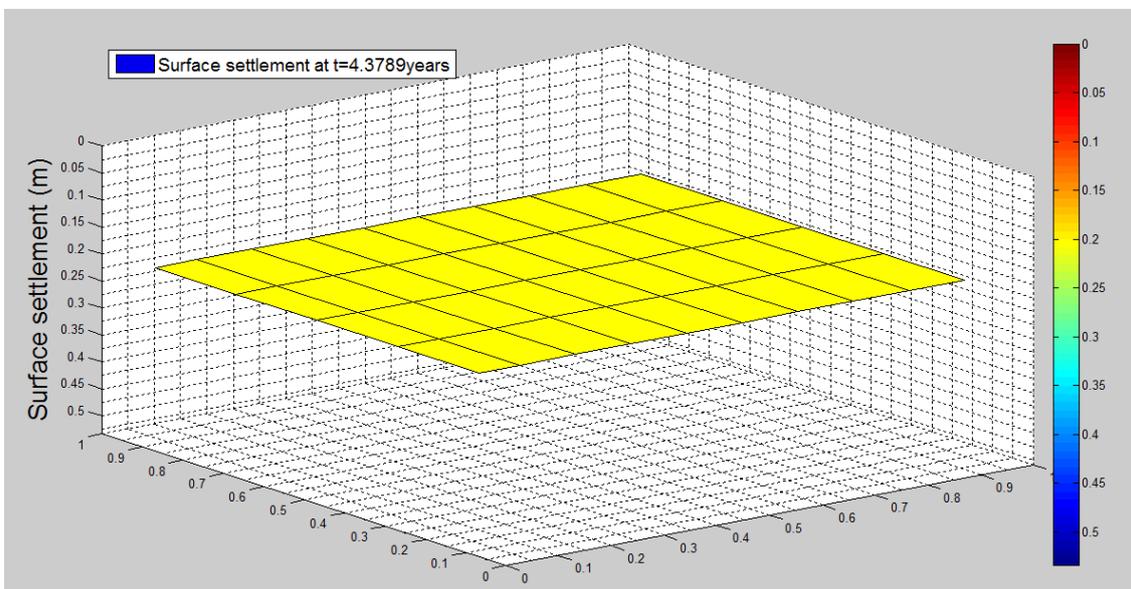


Figura 4.12 Asiento del terreno correspondiente a un 45%

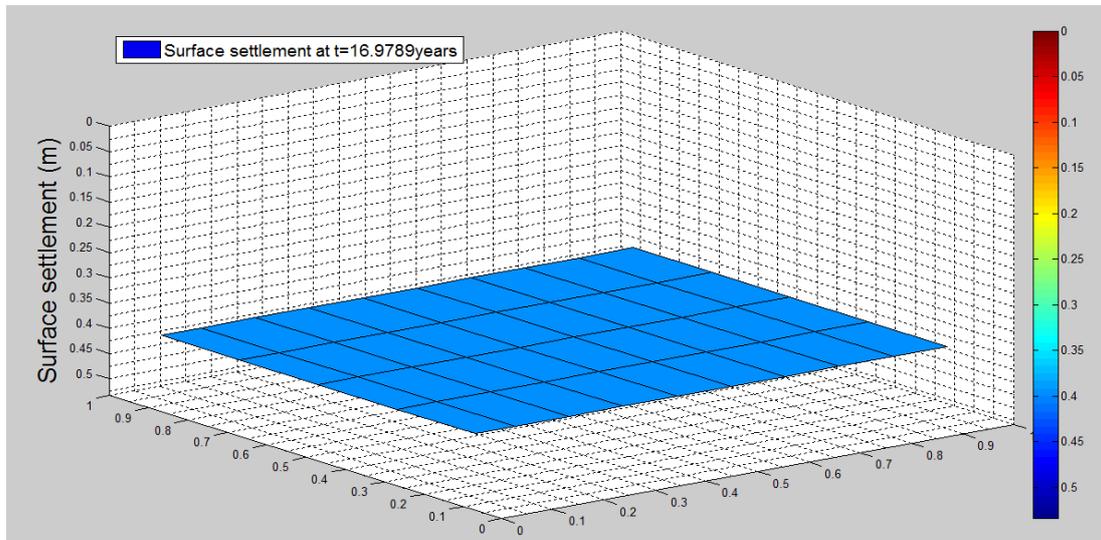


Figura 4.13 Asiento del terreno correspondiente a un 70%

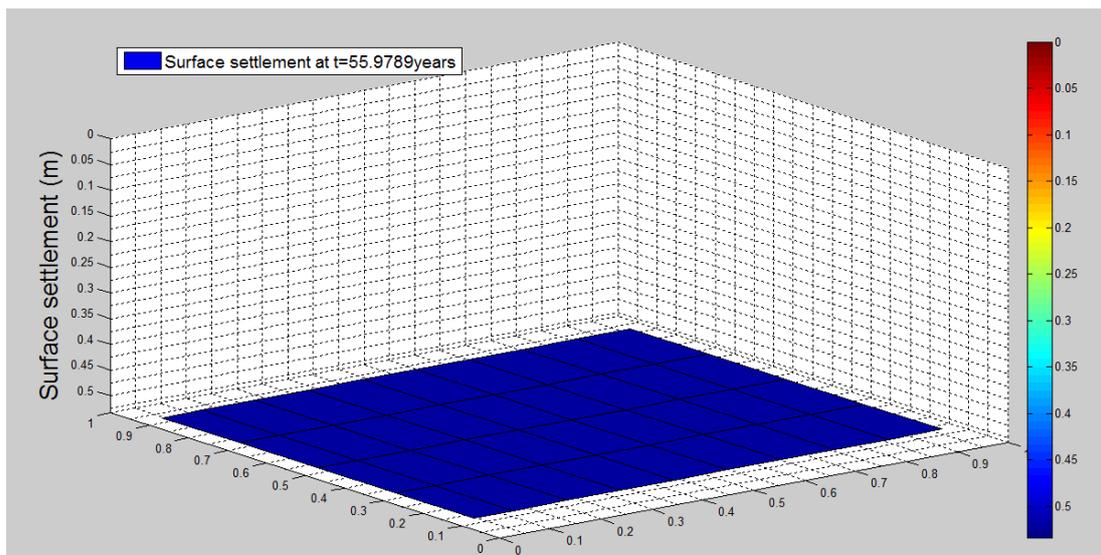


Figura 4.14 Asiento del terreno correspondiente a un 90%

Ésta última figura se correspondería con un 90% de la consolidación promedio. Podemos ver que se desarrolla de forma homogénea en el espacio.

De todo esto podemos sacar dos conclusiones:

Conclusión nº1. Como ya hemos dicho anteriormente, al no haber mecha, todas las columnas de suelo consolidan de la misma forma.

Conclusión nº2. El asiento final de todo el terreno es aproximadamente de unos 0.53 m. Si consideramos un 90% de la consolidación como válido obtendríamos 0.477 m, un valor aceptable.



Volviendo a la gráfica de la consolidación promedio, podemos ver que el tiempo que tarda un suelo en consolidar ese 90% se corresponde con 32 años. Un tiempo claramente inaceptable e inasumible en la construcción de una obra civil. Es por ello por lo que consideramos el introducir unas mechas en el terreno para ver cómo, cuánto y de qué manera podemos acelerar el proceso de consolidación de este terreno.

Para ello, proponemos tres supuestos diferentes y así poder elegir el más indicado para nuestro terreno.

- 1) 1ª Simulación: Sin mecha drenante. ( $d=0.001$ )
- 2) 2ª Simulación: Con mecha totalmente penetrante hasta el primer estrato. ( $d=1$ )
- 3) 3ª Simulación: Con mecha totalmente penetrante hasta el segundo estrato. ( $d=4$ )
- 4) 4ª Simulación: Con mecha totalmente penetrante hasta el tercer y último estrato. ( $d=6$ )

Todas estas simulaciones serán llevadas a cabo gracias al programa SICOMED\_3D.

**2ª Simulación:** Mecha totalmente penetrante hasta el primer estrato. ( $d=1$ )

Para esta segunda simulación penetraremos la mecha hasta el final del primer estrato y consideraremos un tiempo de actuación inferior al considerado en la simulación anterior. Pues se entiende que gracias a la mecha conseguiremos reducir el tiempo de consolidación. Esta vez trabajaremos con tiempo final de 40 años.

Como podemos ver en la Figura 4.15, esta vez no hay que añadir esa pequeña celda adicional, y en la parte de abajo de la imagen podemos ver como hemos seleccionado la penetración de la mecha hasta el primer estrato.

En la Figura 4.16 podemos observar la tercera pantalla del programa SICOMED\_3D.

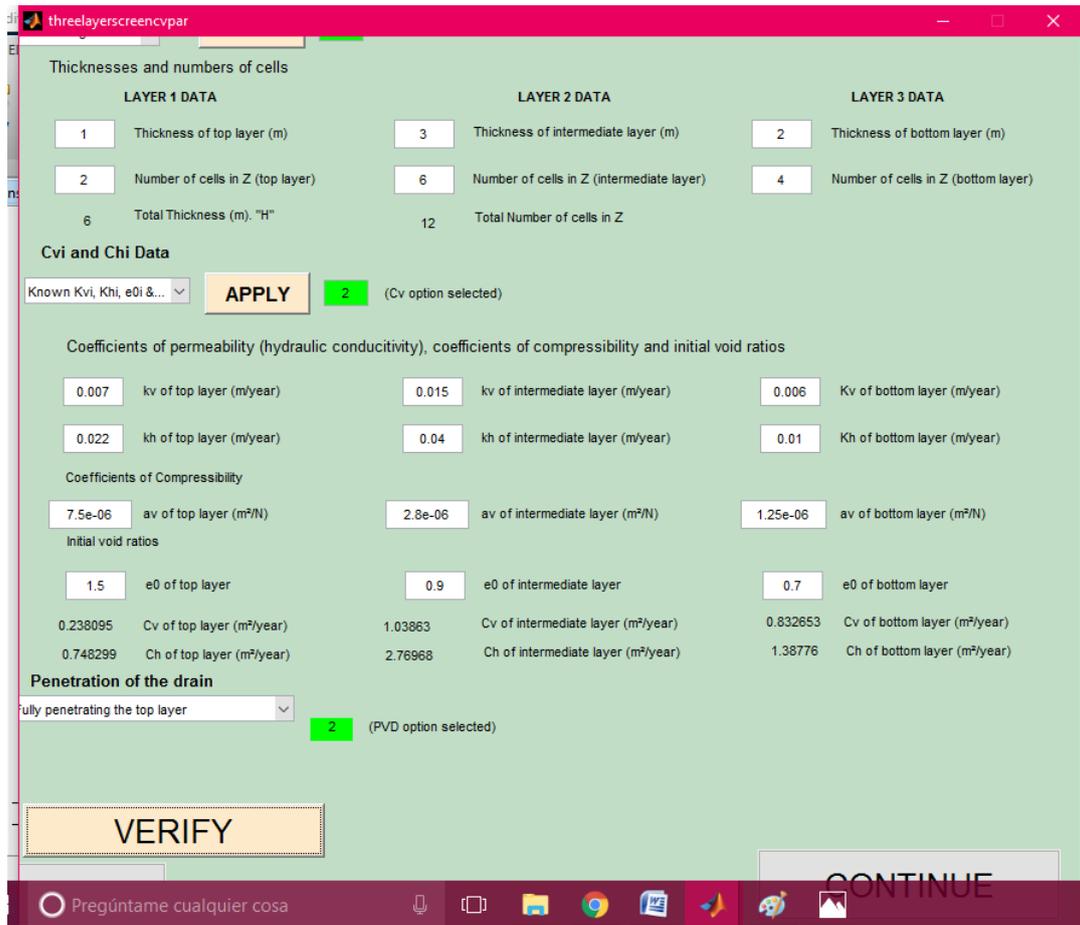


Figura 4.15 Segunda pantalla del programa SICOMED\_3D



Figura 4.16 Tercera pantalla del programa SICOMED\_3D



La evolución del grado medio de consolidación de todo el dominio se presenta en la Figura 4.17.

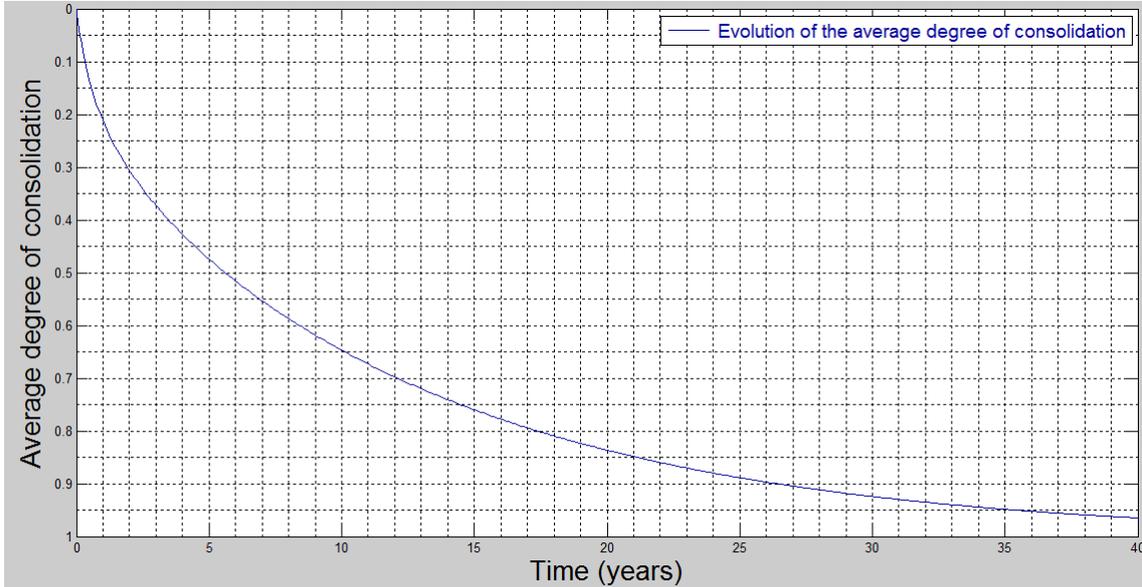


Figura 4.17 Grado medio de consolidación

Como podemos observar, el tiempo para el que se alcanza un valor medio del 90% del asiento final por consolidación ha bajado de 32 a 27 años gracias a la utilización de mechas drenantes hasta una profundidad del primer estrato.

Además, gracias a la imagen de la evolución del exceso de presión intersticial en dos columnas de suelo, Figura 4.18, podemos apreciar como la influencia de la mecha hace que el exceso de presión intersticial (que comienza siendo de igual valor en todos los puntos del medio en el instante inicial), con la evolución del tiempo, sea de menor valor en las zonas de suelo cercanas a la misma, pues éstas consiguen disipar antes este exceso de presión. Se puede apreciar también como para las capas más profundas del terreno, donde no llega la mecha drenante, la disipación de presión de poros apenas se ve influenciada por la mecha, siendo para cualquier vertical del terreno prácticamente de igual valor.

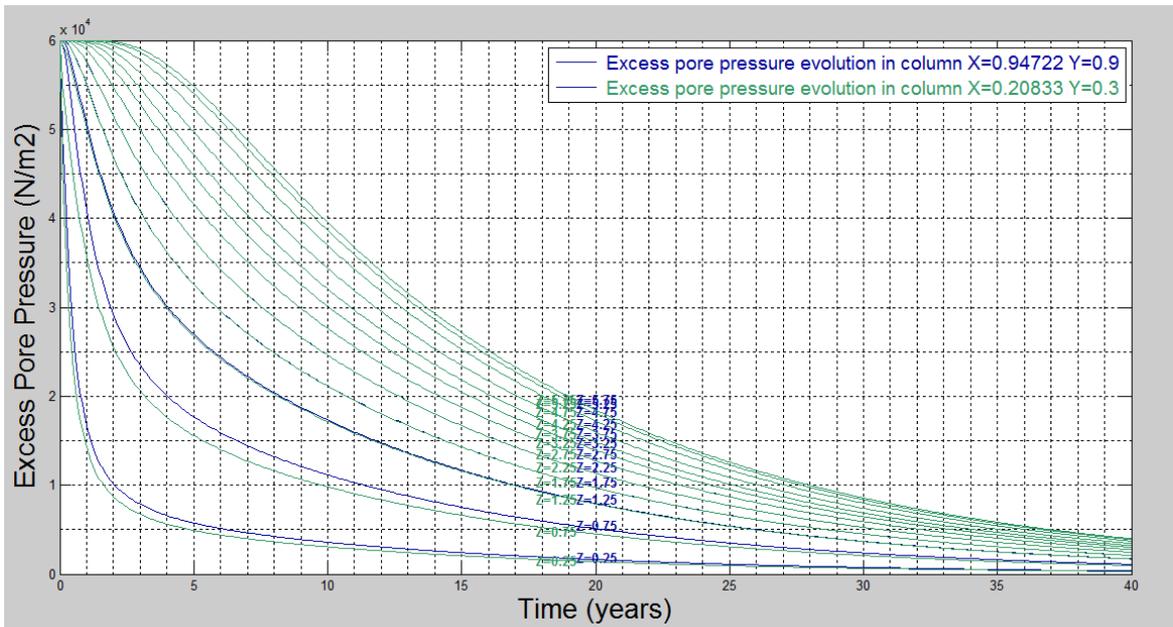


Figura 4.18 Evolución de la presión intersticial en dos columnas de suelo

El asiento real de cada columna de suelo viene dado por la siguiente imagen, Figura 4.19. Como podemos observar en ella, el asiento final es el mismo para todas las columnas para toda la superficie del terreno independientemente de la cercanía del punto a la mecha. El valor de los asientos en el terreno continua evolucionando paralelamente al de la disipación de presión intersticial dentro de los poros del terreno. Lo único que varía es la velocidad de asentamiento, el cual depende de la proximidad a la mecha.

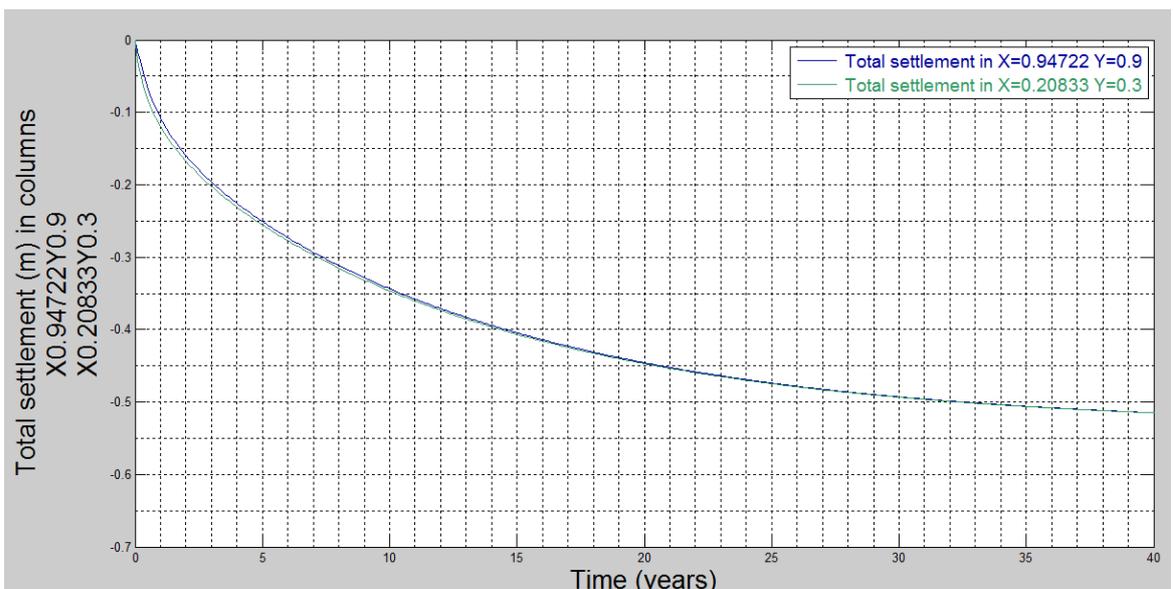


Figura 4.19 Asiento real de dos columna de suelo



De hecho, si ponemos el punto más alejado a la mecha y el punto justo más cerca de la mecha ( $x_1=1, y_1=1; x_2=0, y_2=0$ ) podemos comprobar lo descrito anteriormente. La consolidación final es la misma, pero aquí la velocidad de asiento vendrá mas diferencia de un punto a otro. He aquí la gráfica que lo demuestra, Figura 4.20.

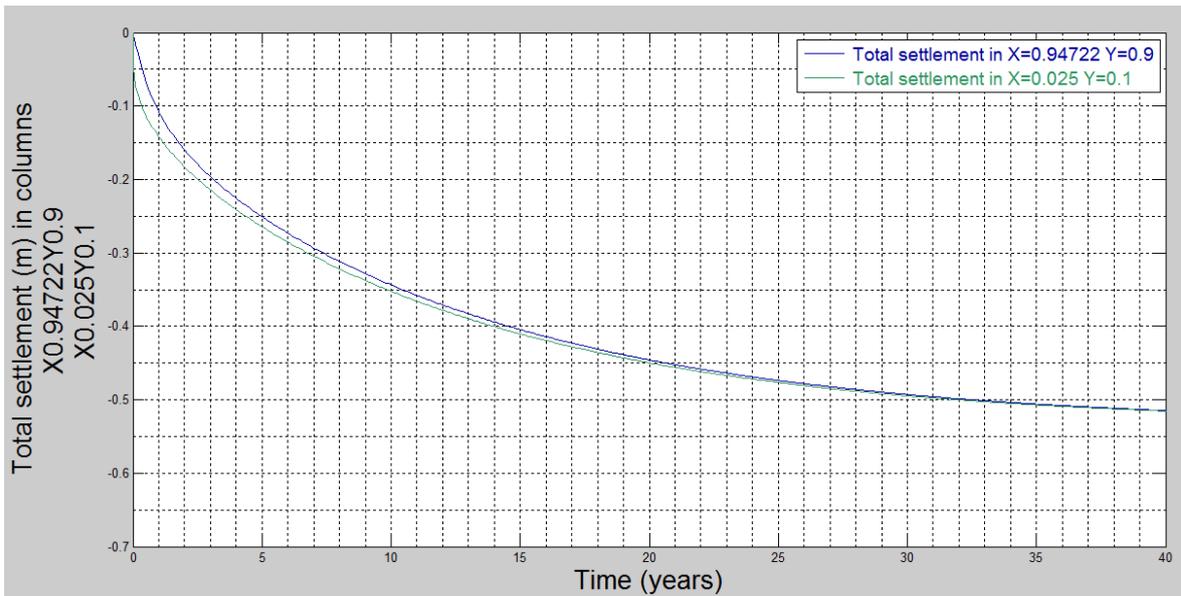


Figura 4.20 Asiento real de dos columnas de suelo

Esto lo vamos a comprobar en todas las gráficas, aunque la profundidad de la mecha sea mayor, el asiento final siempre será el mismo, 0.53m. Sólo se modificará la evolución temporal.

Con la gráfica de asientos locales, Figura 4.21, veremos cómo una columna de terreno asienta en cada estrato. Las dos líneas de abajo se corresponden a las dos celdas del primer estrato. Éstas son las que más rápido asientan. Las siguientes por encima de ellas son las pertenecientes a las celdas del segundo estrato que, según lo esperado, asientan un poco más tarde. Y por último, las de arriba, las más superficiales, son las pertenecientes al tercer estrato. Éstas son las que se asentarán las últimas.

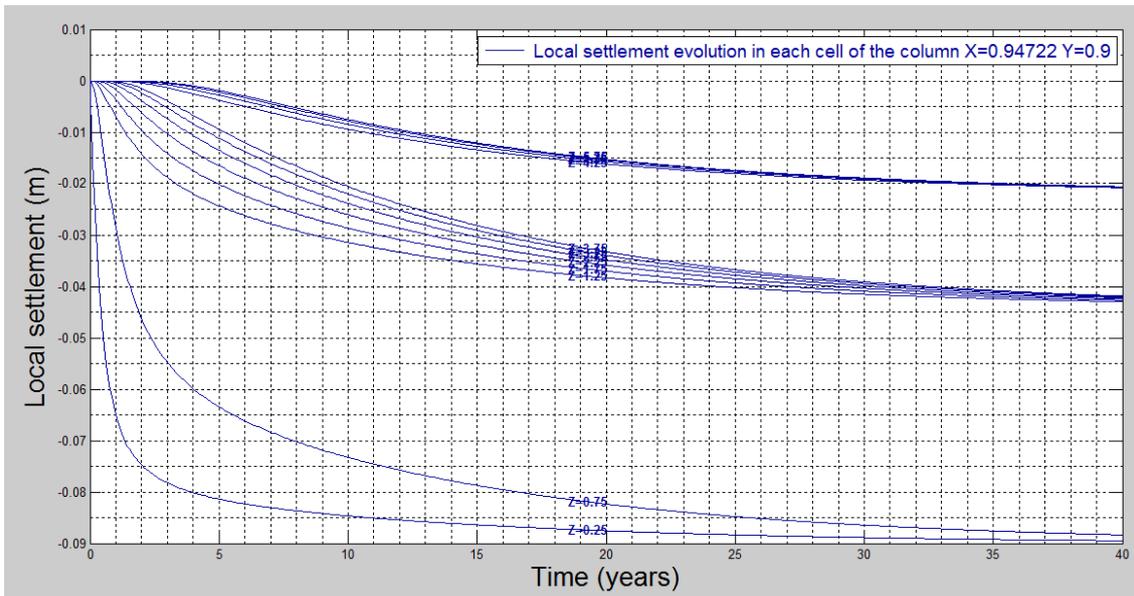


Figura 4.21 Asientos locales

En esta gráfica observamos también que, por un lado los estratos o las celdas consolidan más rápido cuanto más próximas estén a la superficie. Y, por otro lado, cada estrato tiende a un valor distinto de asiento puesto que para cada estrato el  $a_v$  (coeficiente de compresibilidad) es diferente.

No siempre ha de producirse primero el asiento del primer estrato, pues puede pasar que al colocar las mechas con otra disposición y/o profundidad, las curvas de asentamiento de las celdas de cada estrato se crucen, como veremos en un ejemplo posterior.

Después de todo esto, como hemos visto, el tiempo de consolidación se había reducido significativamente, pero no lo suficiente. Por lo que pasamos a realizar otra simulación en la que la profundidad de la mecha será mayor.

**3ª Simulación:** Mecha totalmente penetrante hasta el segundo estrato. ( $d=4$ )

Para esta tercera simulación penetraremos la mecha hasta el final del segundo estrato y consideraremos un tiempo de actuación inferior al considerado en la simulación anterior. Pues se entiende que gracias a aumentar la profundidad de la mecha conseguiremos reducir el tiempo de consolidación aún más. Esta vez trabajaremos con tiempo final de 25 años.

A continuación, en la Figura 4.22, mostramos el grado medio de asiento de todo el dominio para esta simulación:

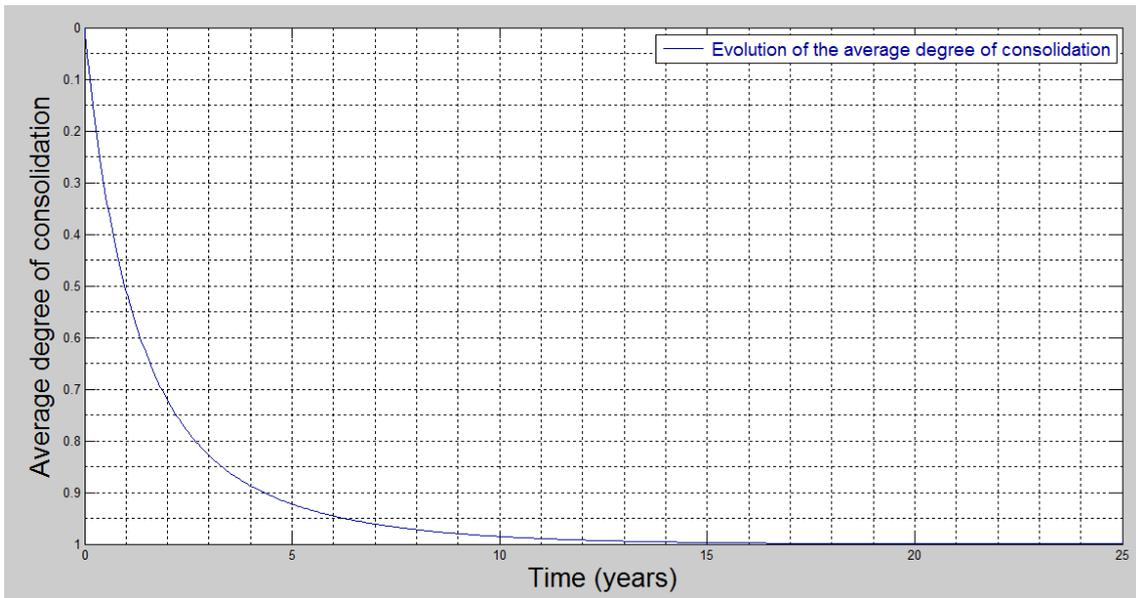


Figura 4.22 Evolución del grado medio de asiento para todo el dominio

Con esta profundidad de la mecha, hemos conseguido reducir el tiempo de consolidación a unos 4 años y medio aproximadamente. Para ilustrar mejor el resultado, vamos a repetir la simulación con un tiempo final de 10 años. El cual mostramos aquí, en la Figura 4.23:

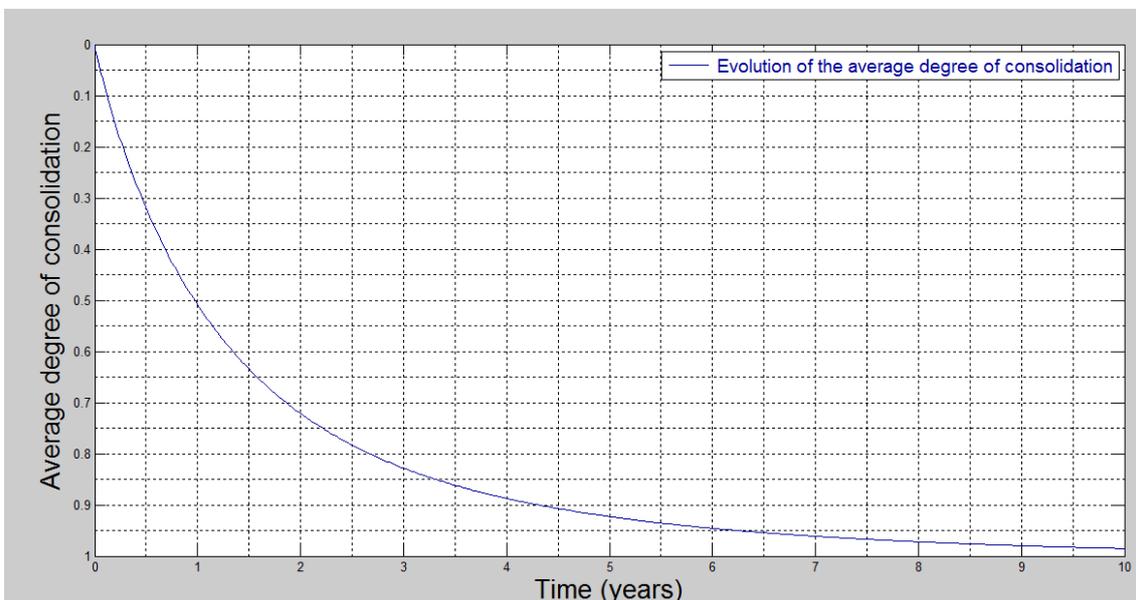


Figura 4.23 Evolución del grado medio de consolidación para todo el dominio

Haciendo referencia a las gráficas, hemos conseguido bajar mucho el tiempo de consolidación del terreno, pero aún así sigue siendo insuficiente para poder llevarlo a la práctica en una obra civil.

Con la gráfica, Figura 4.24, siguiente queremos mostrar el exceso de presión intersticial en la columna de suelo más alejada para las distintas posiciones de  $z$  en los diferentes estratos y celdas. Refleja la carga aplicada ( $60000 \text{ N/m}^2$ ) y cómo cada celda va expulsando el agua.

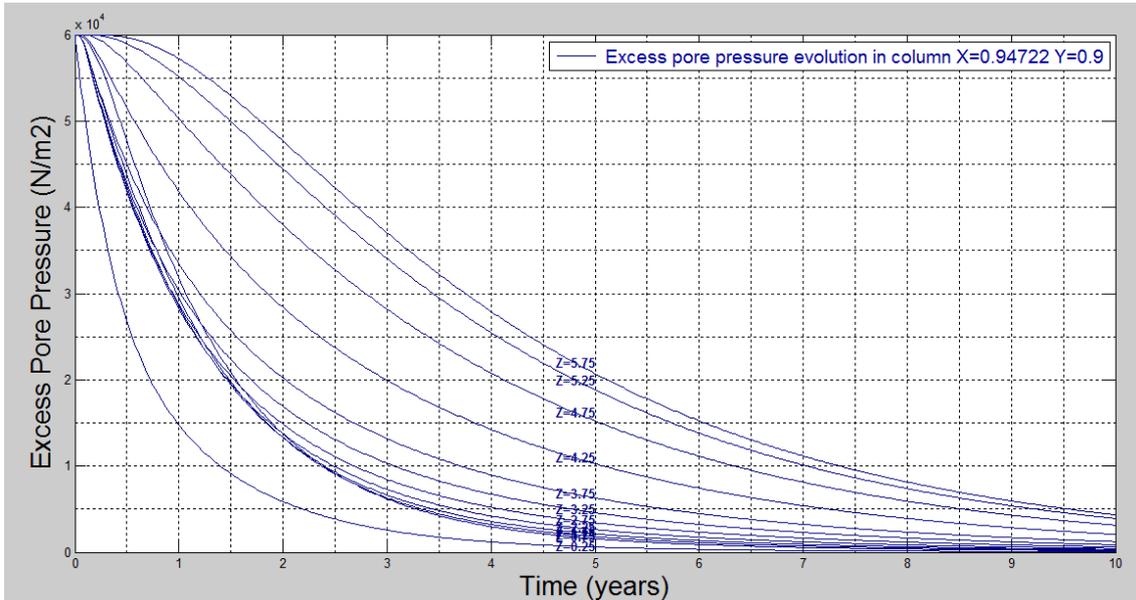


Figura 4.24 Exceso de presión intersticial en una columna de suelo

Volvemos a mostrar también la misma gráfica pero para la simulación 1, Figura 4.10, cuando no teníamos mecha para poder visualizar y comparar los cambios producidos de una simulación a otra.

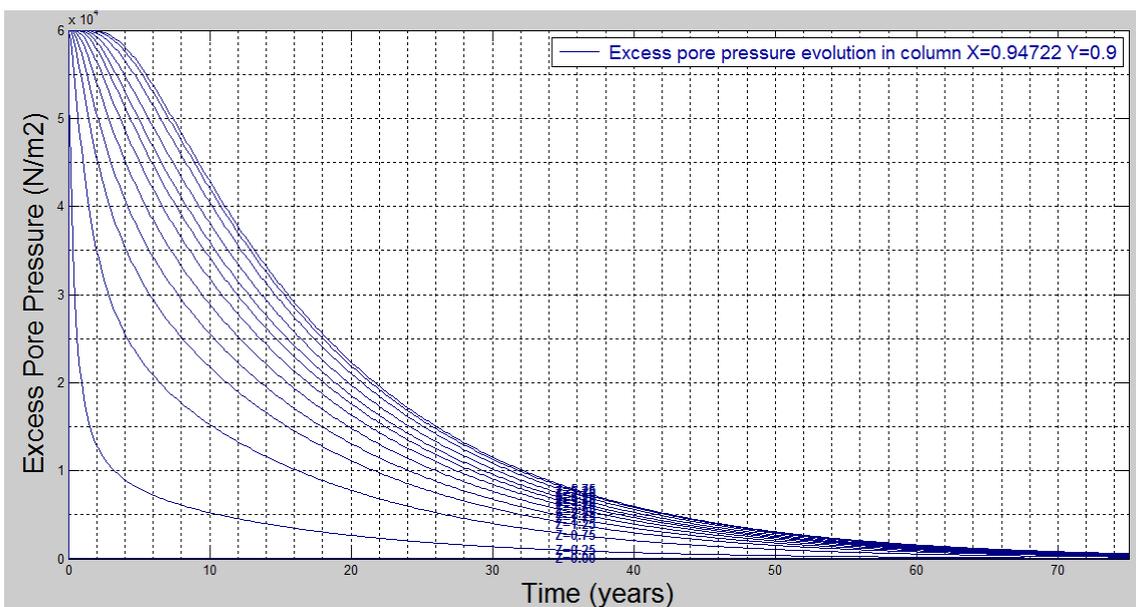


Figura 4.10 Exceso de presión intersticial para una columna de suelo



Claramente, en términos cuantitativos, podemos observar cómo la gráfica correspondiente a la primera simulación tarda mucho más tiempo en consolidarse. El hecho de tener un drenaje horizontal hace que muchas partículas de agua que sin mecha drenarían las últimas, gracias a la permeabilidad horizontal del terreno, alcancen la mecha y sean expulsadas mucho antes y con mucha más facilidad. Eso podemos observarlo, como bien dijimos al principio de este capítulo, en el cruce de líneas que se produce en la primera gráfica del exceso de presión intersticial, la correspondiente a la tercera simulación. Esto se debe a que la permeabilidad horizontal del segundo estrato es muy elevada en relación a los otros dos.

Finalmente, como hemos visto, el tiempo de consolidación se había reducido significativamente. Hemos conseguido alcanzar un valor muy bajo, pero aún sigue sin ser lo suficiente bajo. Por lo que pasamos a realizar otra simulación en la que la profundidad de la mecha será mayor.

**4ª Simulación:** Mecha totalmente penetrante hasta el tercer estrato. ( $d=6$ )

Para esta cuarta simulación penetraremos la mecha hasta el final del tercer y último estrato y consideraremos un tiempo de actuación inferior al considerado en la simulación anterior. Pues al aumentar la profundidad de la mecha conseguiremos reducir el tiempo de consolidación aún más. Esta vez trabajaremos con tiempo final de 7 años.

A continuación, en la Figura 4.25, mostramos el grado medio de asiento de todo el dominio para esta simulación:

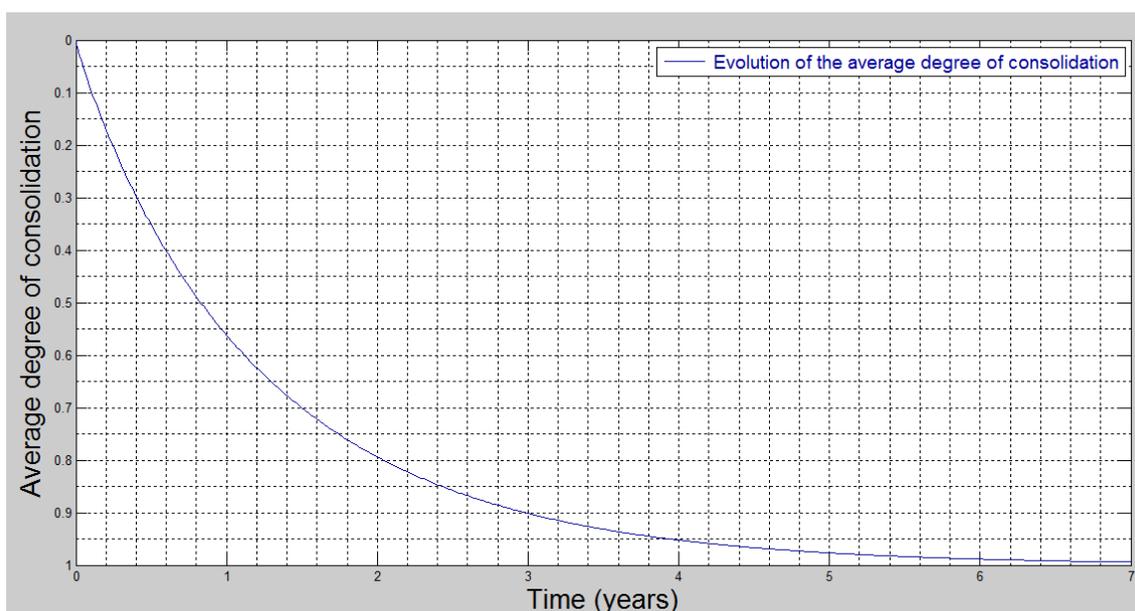


Figura 4.25 Evolución del grado medio de asiento de todo el dominio



Con esta profundidad de la mecha hasta el final del último estrato, es decir, en toda la profundidad del terreno, el tiempo para el que se produce un valor del 90% de la consolidación es de unos 3 años aproximadamente. Siendo éste un valor muchísimo más bajo que en el caso de no haber introducido mechas drenantes en el terreno. Estos datos indican que una mecha drenante introducida hasta esta profundidad causa modificaciones importantes en los tiempos de consolidación. Algo que hemos ido viendo a lo largo de todas las simulaciones que hemos realizado.

Además de esto, a edades tempranas de consolidación, esta reducción de presión de poro se ve importantemente reducida, sobre todo en las zonas más cercanas a la mecha.

Aunque hemos conseguido reducir a gran escala el tiempo de consolidación necesario para este terreno, aún sigue siendo mucho para poder llevarlo a la práctica. Por lo que necesitamos encontrar otra solución para seguir disminuyendo este tiempo hasta que alcancemos un valor de 2 años aproximadamente.

Para ello, como no podemos profundizar más la mecha en el terreno, nos centraremos en tratar de determinar la influencia del espaciado existente entre las hileras de las mechas drenantes. Hasta ahora habíamos estado tomando una separación entre mechas de 2 metros ( $a=1\text{m}$ ), mientras que la distancia entre hileras era de 2 metros ( $b=1\text{m}$ ). En las siguientes simulaciones iremos acercando las mechas hasta que consigamos alcanzar el tiempo de consolidación necesario.

**5ª Simulación:** Mecha totalmente penetrante hasta el tercer estrato ( $d=6$ ), variando la distancia entre mechas, siendo:

$$\sim a = 0.9 \text{ m}$$

$$\sim b = 0.9 \text{ m}$$

Para esta simulación tomaremos un tiempo final de 4 años.

A continuación, en la Figura 4.26, mostramos la variación de datos producida en esta simulación.

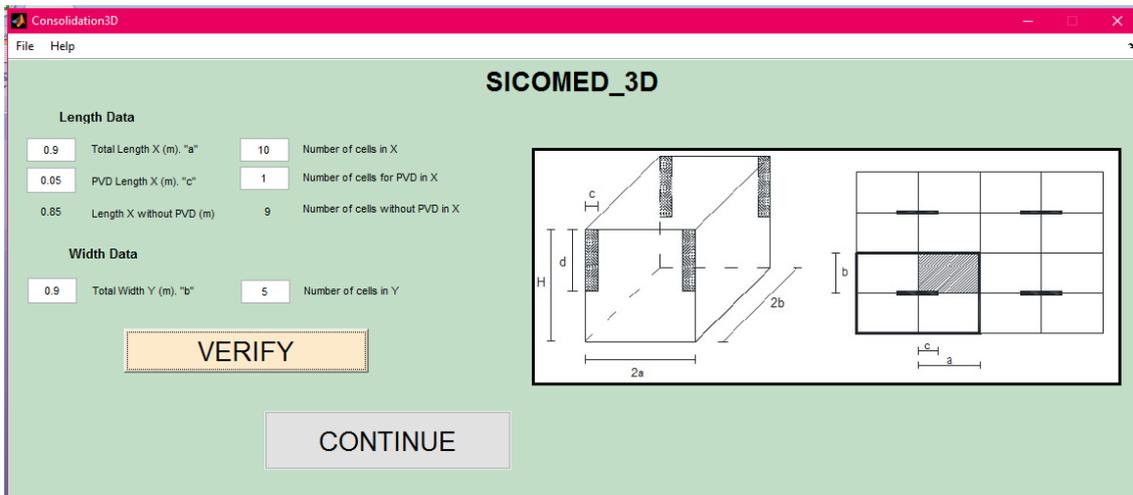


Figura 4.26 Primera pantalla del programa SICOMED\_3D

La evolución del grado medio de consolidación, para este caso, se puede apreciar en la siguiente gráfica, Figura 4.27. El tiempo para el que se produce un valor del 90% de la consolidación es de 2.4 años aproximadamente, notándose, de forma importante, la influencia de las mechas en los tiempos de consolidación.

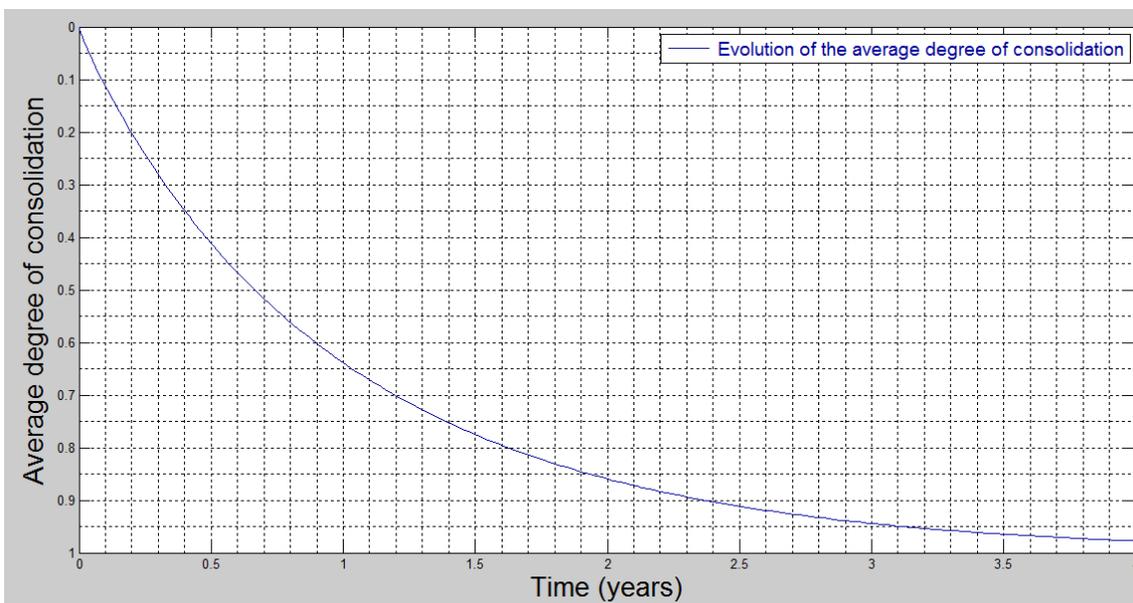


Figura 4.27 Evolución del grado medio de consolidación para todo el dominio

**6ª Simulación:** Mecha drenante hasta un 100% del estrato del suelo ( $d=6$ ), variando la distancia entre mechas, siendo:

~  $a = 0.8 \text{ m}$

~  $b = 0.8 \text{ m}$

La separación real de la mecha en esta simulación sería de 1.6 m.

Para esta simulación tomaremos un tiempo final de 3 años.

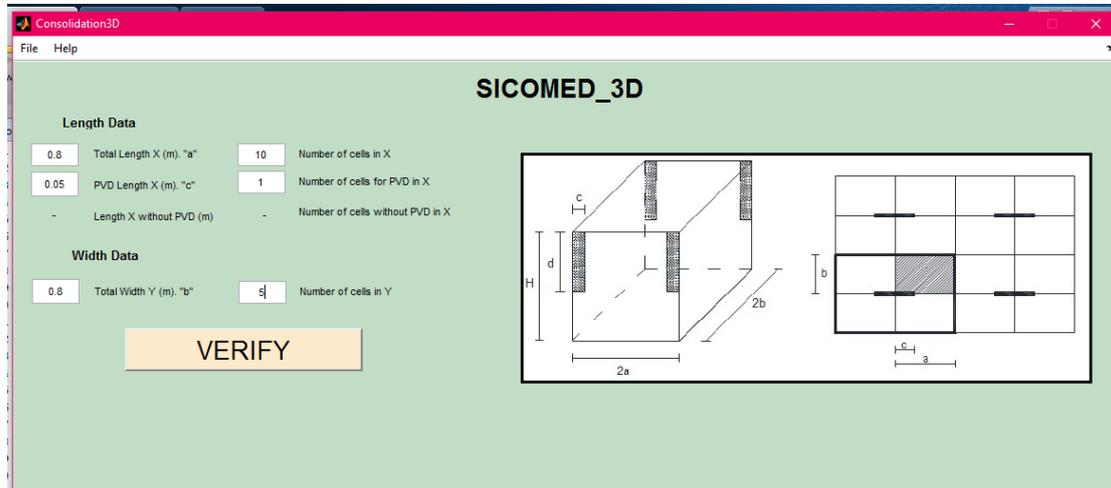


Figura 4.28 Primera pantalla del programa SICOMED\_3D

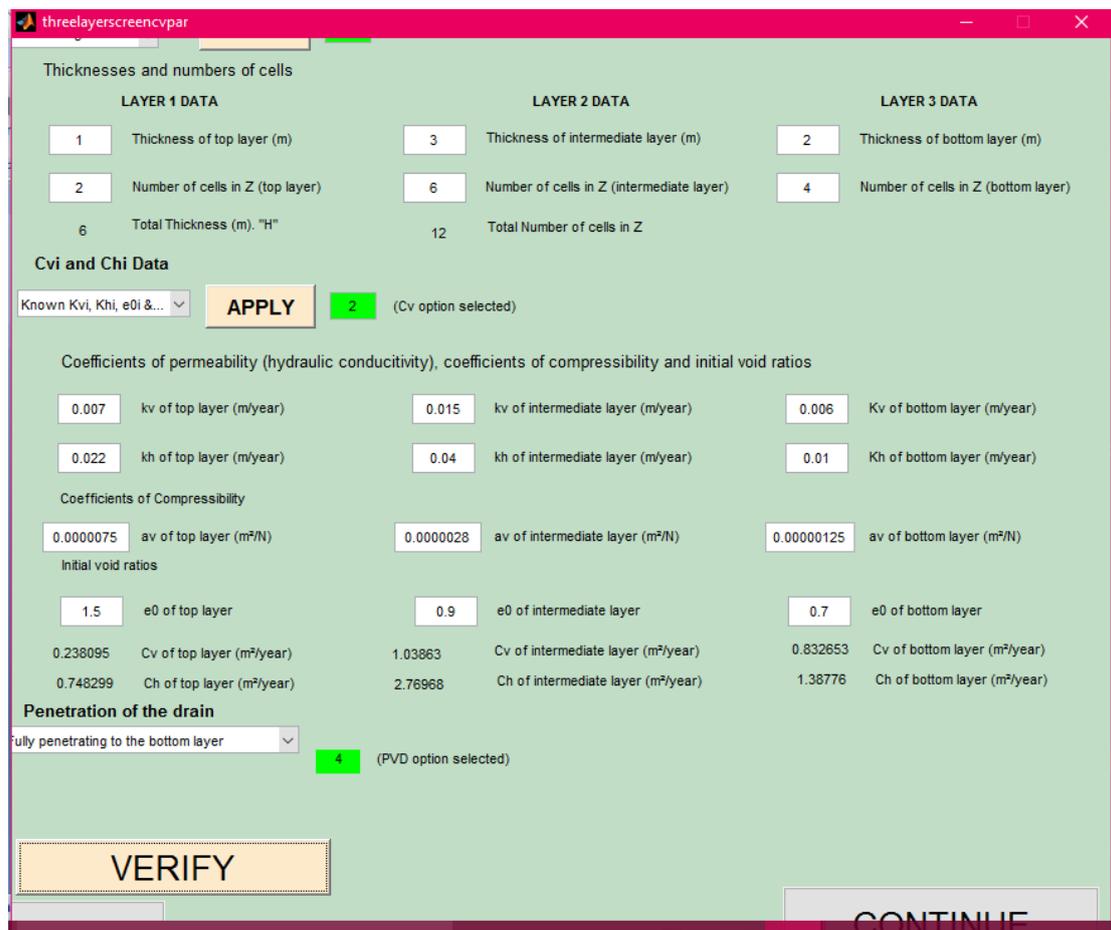


Figura 4.29 Segunda pantalla del programa SICOMED\_3D

En la Figura 4.30 podemos apreciar como la disipación del exceso de presión de poro se consigue en un tiempo menor a cualquier caso anterior. Resulta evidente la mayor rapidez con que se disipa la presión en las zonas cercanas a la mecha, siendo además los tiempos de consolidación algo inferiores a los casos anteriormente presentados. La columna de suelo escogida en la gráfica es aquella que se encuentra más alejada de la mecha. Nosotros fijamos el valor al programa de 0.8m para que nos dé el punto más alejado, escogiendo así esta columna de suelo ( $x=0.75833$ ,  $y=0.72$ )

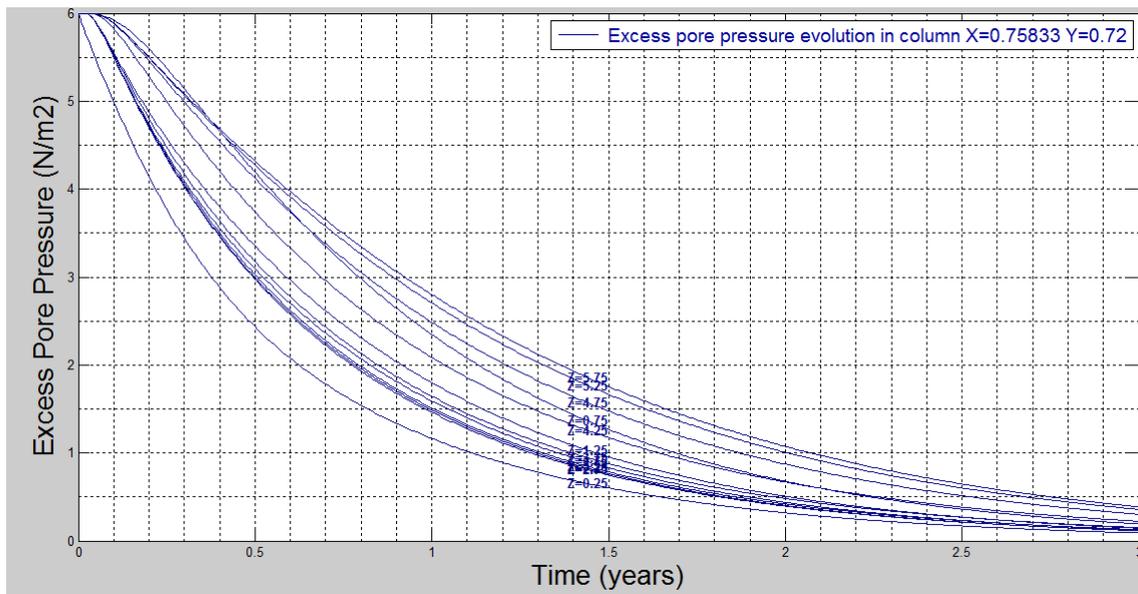


Figura 4.30 Disipación del exceso de presión de poro

La evolución en el grado de consolidación promedio del terreno se puede ver en la siguiente figura, siendo ésta la más rápida de todos los casos estudiados en este trabajo y teniendo un valor del tiempo de consolidación (para este nivel, 90%) de 1.85 años.

Esto supone una reducción importante del tiempo de consolidación, Figura 4.31, respecto al tiempo obtenido con distancias entre hileras superiores calculados en simulaciones anteriores.

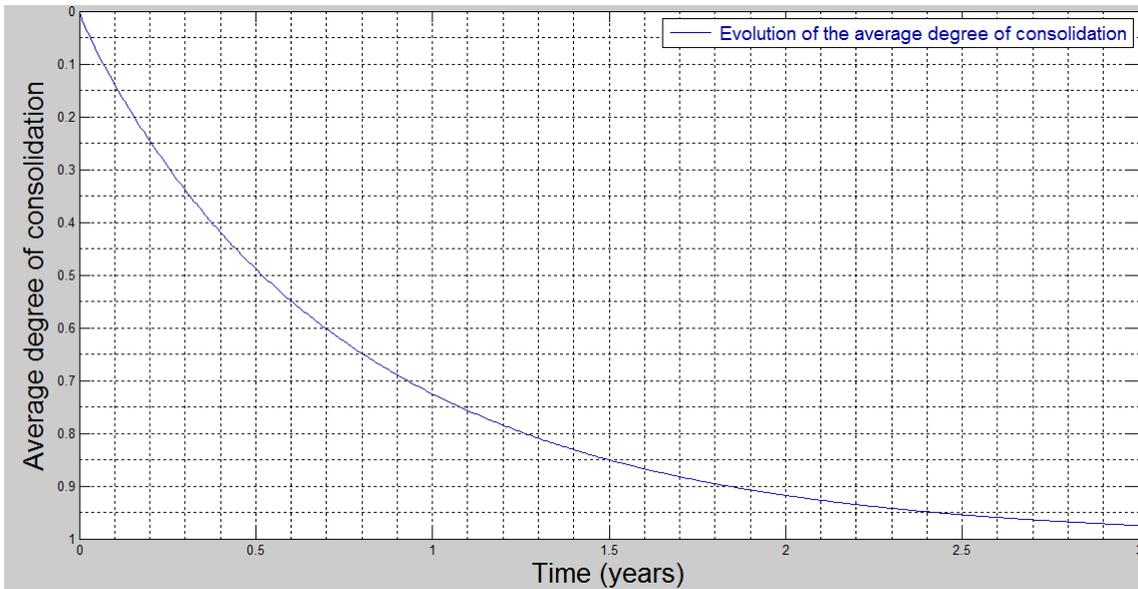


Figura 4.31 Evolución del grado medio de consolidación para todo el dominio

Los asentamientos en el terreno los podemos ver en la figura que mostramos a continuación, Figura 4.32. Se observa la evolución de los asentamientos en dos verticales de terreno estudiadas, una la más cercana a la mecha y otra la más alejada. Una vez más diremos que esos valores los establece el programa SICOMED\_3D. Éste se correlaciona en el tiempo con la disipación de presión intersticial. Se aprecia que las zonas cercanas a la mecha sufren un asentamiento más acusado siendo la parte más superficial del terreno la que asienta de forma más rápida. Dichos asentamientos evolucionan de la forma más rápida de todos los casos que se han estudiado.

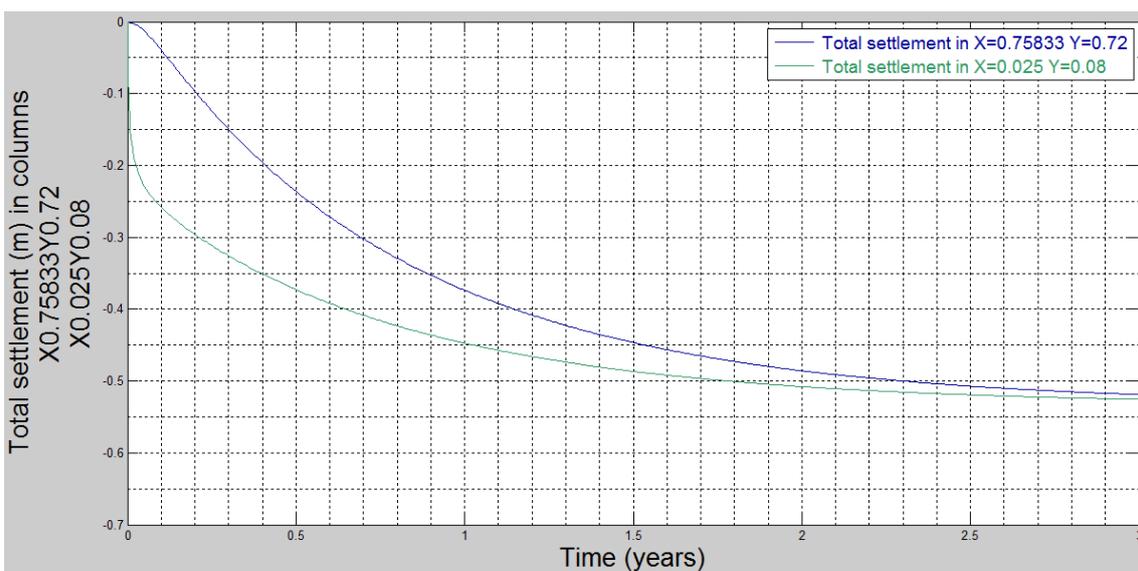


Figura 4.32 Asiento real de todo el terreno para dos columnas de suelo

El asiento local de una columna de suelo para cada celda de cada estrato lo podemos observar en la Figura 4.33:

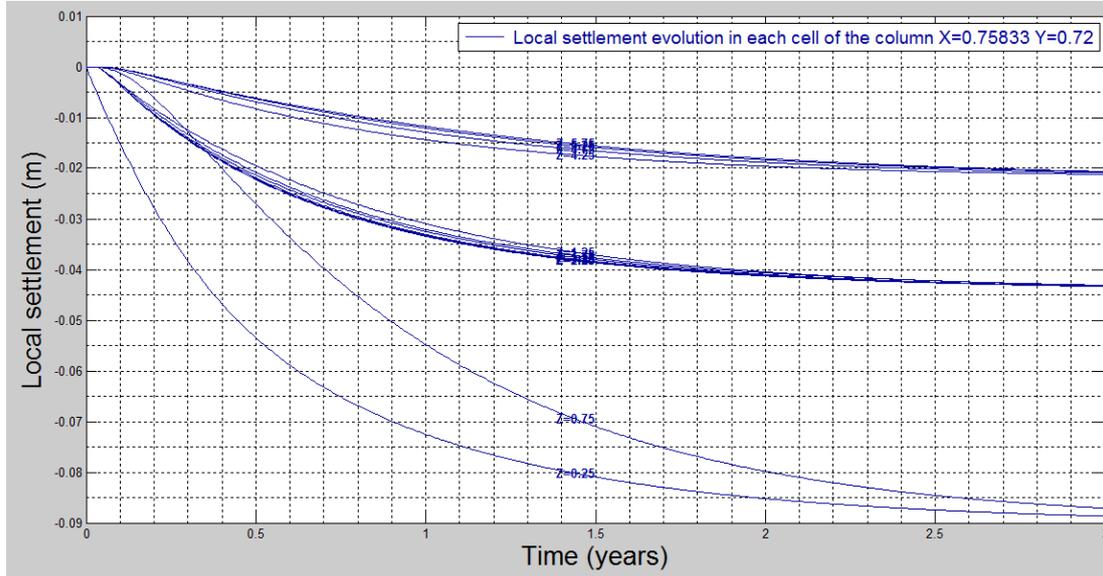


Figura 4.33 Asiento local de una columna de suelo

Para finalizar con esta simulación, vamos a ilustrar unas imágenes tomadas de una animación en la que se muestra cómo y cuándo se va asentando el terreno a lo largo del tiempo.

Adjuntamos también una captura del programa, Figura 4.34, donde podemos observar las características para formar esa animación.

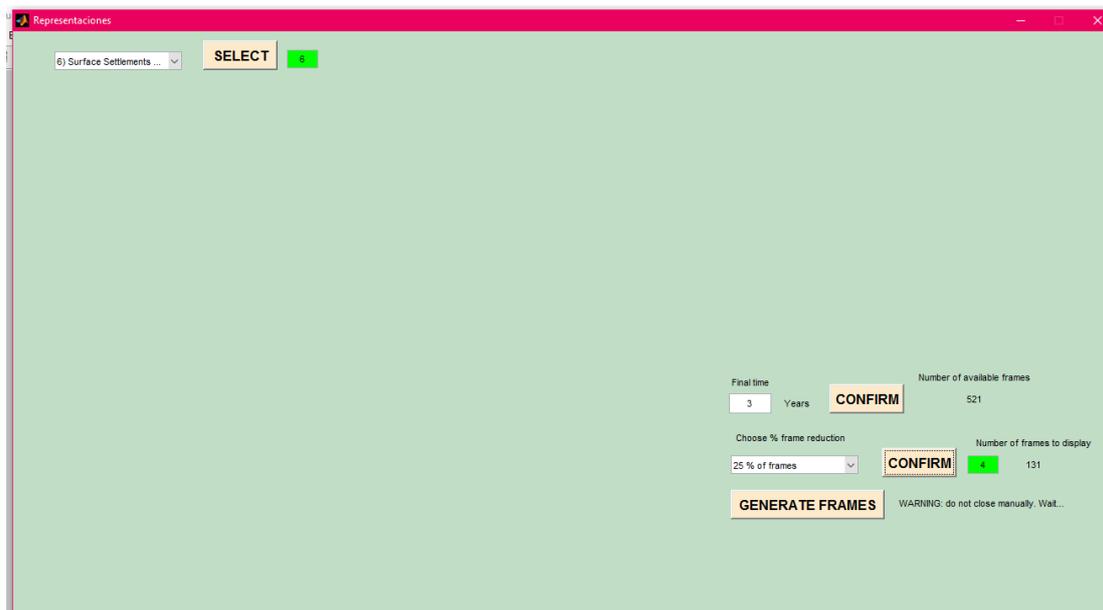


Figura 4.34 Pantalla cuarta del programa SICOMED\_3D

Esta primera imagen, Figura 4.35, muestra el asiento en superficie al comienzo del proceso de consolidación que se correspondería con un 10%, aproximadamente, de dicha consolidación. Podemos comprobar que la influencia de la mecha drenante, para este nivel de consolidación, a efectos de asiento diferencial, es muy importante.

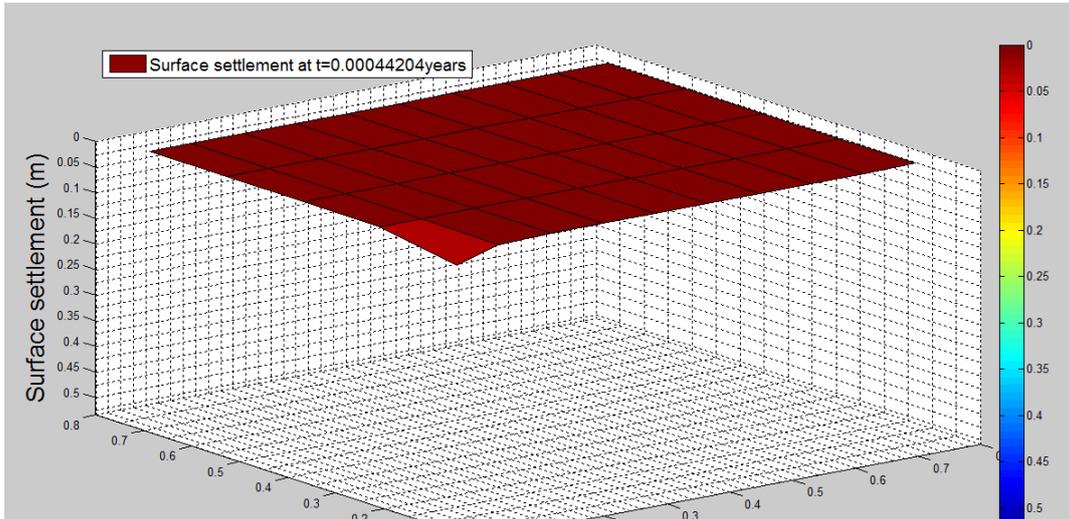


Figura 4.35 Asiento en superficie para un 10% de la consolidación final

En esta segunda imagen, Figura 4.36, podemos observar el asiento que podría corresponderse con un 25-30% aproximadamente, de dicha consolidación. Este nivel de consolidación se consigue para un tiempo en torno a 0.2 años. Los asientos diferenciales en la superficie del terreno en este nivel de consolidación resultan claramente evidentes, mostrándose una fuerte influencia de la mecha drenante en las cercanías de la misma.

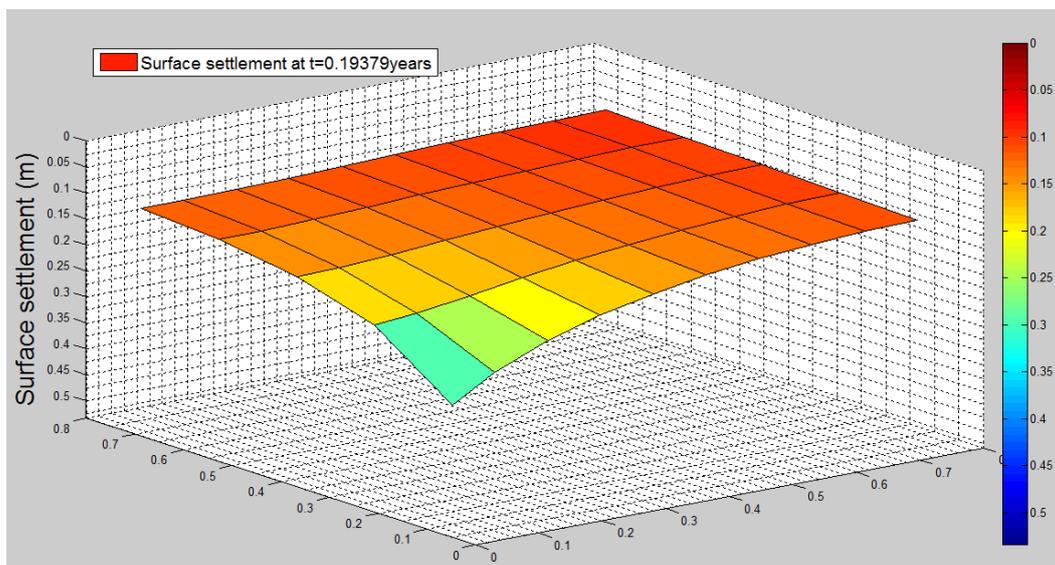


Figura 4.36 Asiento en superficie para un 25-30% de la consolidación final

El asiento correspondiente con la tercera imagen se corresponde con un 60% aproximadamente de la consolidación total. Este nivel de asentamiento se consigue en casi un año. Aún podemos observar una fuerte diferencia en los asentamientos diferenciales del terreno, dejando claro el efecto que produce la mecha en esta etapa.

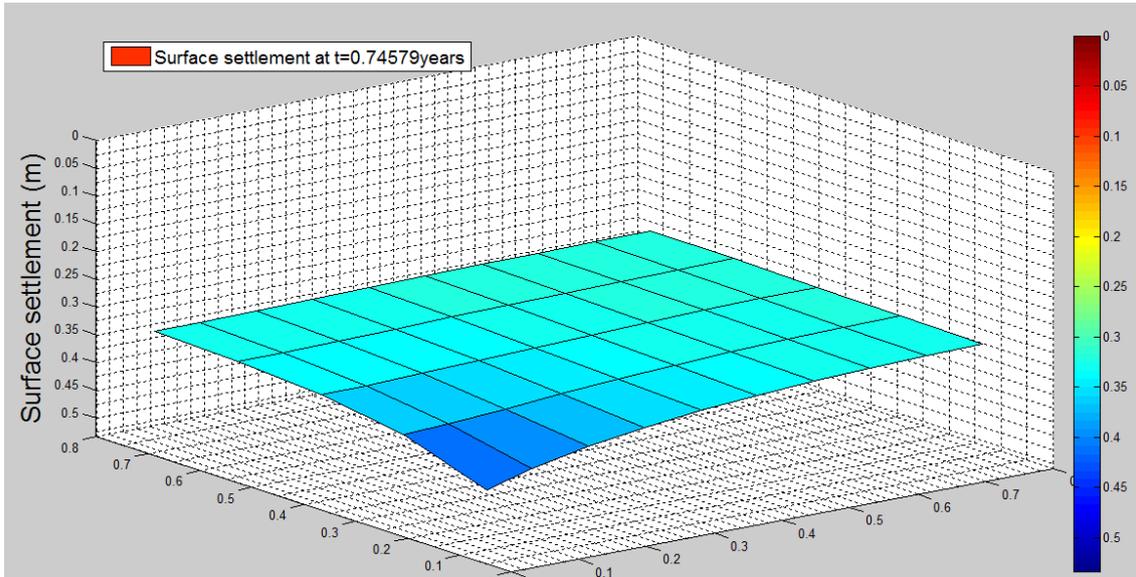


Figura 4.37 Asiento en superficie para un 60% de la consolidación final

En esta cuarta y última fotografía, Figura 4.38, podemos ver cómo después casi dos años el efecto de la mecha se vuelve apenas apreciable al llegar la consolidación a un nivel del 90% en promedio. El asiento diferencial es prácticamente nulo.

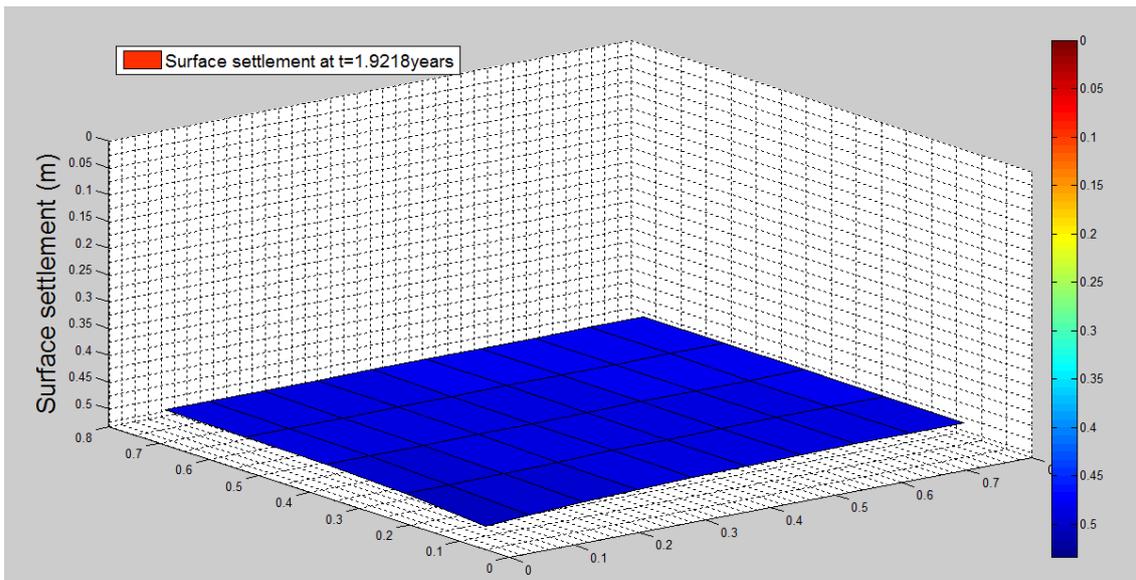


Figura 4.38 Asiento en superficie para un 90% de la consolidación final

Como conclusión diremos que hemos alcanzado un valor para el tiempo de consolidación aceptable, pues el 90% se alcanza en menos de dos años. De manera que ésta sería el método a llevar a cabo para un terreno con estas condiciones.

Para finalizar, en la Figura 4.39, se expone a modo de resumen, para cada una de las 6 simulaciones llevadas a cabo, el tiempo necesario para alcanzar el 90% de la consolidación media del terreno.

Profundidad de la mecha drenante (m)	$t_{90}$ (años)
Sin mecha	32
1	27
4	4,5
6 (a=1; b=1)	3
6 (a=0,9; b=0,9)	2,4
6 (a=0,8; b=0,8)	1,85

Figura 4.39 Resumen de los resultados obtenidos para el 90% del grado de consolidación en este Caso N°1

#### 4.2. Simulación del supuesto N°2:

Disposición de los estratos:

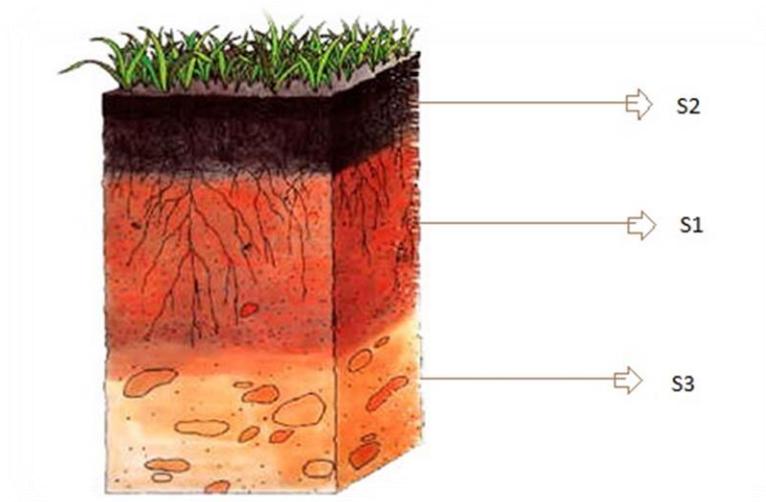


Figura 4.40 Disposición de los estratos para el Caso N°2



### 1ª Simulación: Sin mecha drenante. (d=0.001)

En esta simulación vamos a trabajar considerando que no hay mecha drenante en el suelo. Como ya dijimos en la primera simulación del caso anterior, al no haber mecha, todo el drenaje se producirá de forma vertical.

Igual que en el otro caso, en esta simulación debemos tener en cuenta la capa adicional para la mecha. En este caso también tendrá una profundidad de 0.001m.

A continuación en la Figura 4.41, se encuentran los datos aportados a la segunda pantalla del programa. Podemos observar los datos que hacen referencia a esa capa adicional en los valores correspondientes al primer estrato.

- Primer estrato, H=3 m -- 6 celdas + 1
- Segundo estrato, H=1m -- 2 celdas
- Tercer estrato, H=2m -- 4 celdas

Como hemos dicho anteriormente, esto no afecta de manera significativa al resultado de esta simulación.

The screenshot shows the 'threeayerscreenvpar' window with the following data:

Thicknesses and numbers of cells		
LAYER 1 DATA	LAYER 2 DATA	LAYER 3 DATA
3 Thickness of top layer (m)	1 Thickness of intermediate layer (m)	2 Thickness of bottom layer (m)
7 Number of cells in Z (top layer)	2 Number of cells in Z (intermediate layer)	4 Number of cells in Z (bottom layer)
6 Total Thickness (m). "H"	13 Total Number of cells in Z	

**Cvi and Chi Data**

Known Kvi, Khi, e0i &... **APPLY** 2 (Cv option selected)

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

Parameter	Value	Parameter	Value	Parameter	Value
kv of top layer (m/year)	0.015	kv of intermediate layer (m/year)	0.007	Kv of bottom layer (m/year)	0.006
kh of top layer (m/year)	0.04	kh of intermediate layer (m/year)	0.022	Kh of bottom layer (m/year)	0.01

Coefficients of Compressibility

Parameter	Value	Parameter	Value	Parameter	Value
av of top layer (m <sup>2</sup> /N)	2.8e-06	av of intermediate layer (m <sup>2</sup> /N)	0.0000075	av of bottom layer (m <sup>2</sup> /N)	1.25e-06

Initial void ratios

Parameter	Value	Parameter	Value	Parameter	Value
e0 of top layer	0.9	e0 of intermediate layer	1.5	e0 of bottom layer	0.7

Coefficients of consolidation

Parameter	Value	Parameter	Value	Parameter	Value
Cv of top layer (m <sup>2</sup> /year)	1.03863	Cv of intermediate layer (m <sup>2</sup> /year)	0.238095	Cv of bottom layer (m <sup>2</sup> /year)	0.832653
Ch of top layer (m <sup>2</sup> /year)	2.76968	Ch of intermediate layer (m <sup>2</sup> /year)	0.748299	Ch of bottom layer (m <sup>2</sup> /year)	1.38776

**Penetration of the drain**

partially penetrating into the top layer **1** (PVD option selected)

Drain depth of penetration in the top layer (m). "d" 0.001

Number of cells of the drain 7

WARNING! Must be slower than 3 (m) WARNING! Must be slower than

**VERIFY** **VERIFY DRAIN**

Figura 4.41 Datos aportados a la segunda pantalla de programa SICOMED\_3D



Para esta primera simulación hemos considerado un periodo de consolidación de 60 años para una profundidad correspondiente a 6m.

A continuación, en la Figura 4.42, mostramos una imagen con los resultados obtenidos sobre el grado de consolidación promedio sin mecha drenante. En ella podemos apreciar que el tiempo para el que se produce un valor del 90% de la consolidación es de 30 años.

Si comparamos este resultado con el obtenido en el caso anterior con una disposición de los estrato diferentes, podemos observar como el asiento se consigue más o menos en el mismo tiempo

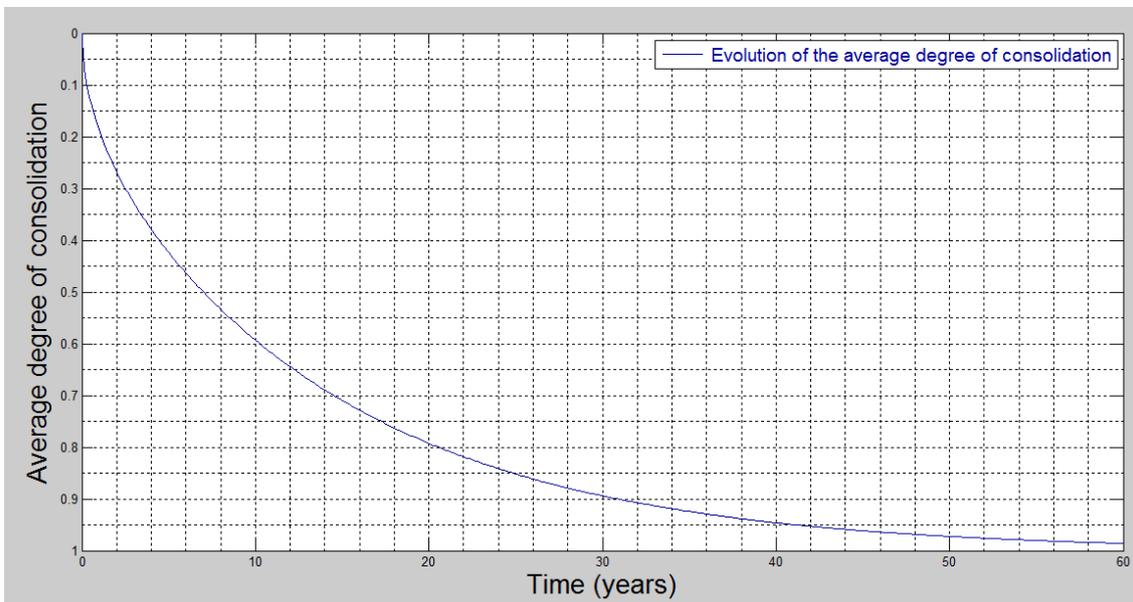


Figura 4.42 Evolución del grado medio de consolidación para todo el dominio

Ahora mostraremos otra gráfica, Figura 4.43, donde podemos observar el asiento real de una columna de suelo. En nuestro caso, hemos cogido dos columnas de suelo diferentes. Le hemos pedido al programa información para las coordenadas ( $x_1=1, y_1=1; x_2=0, y_2=0$ ). Como ya hemos dicho anteriormente, en esta simulación no hay mecha, por lo que el resultado obtenido para ambas coordenadas debería de ser el mismo (y al tratarse de los mismos estratos y espesores que en el caso anterior, el valor es también de 0.53 m).

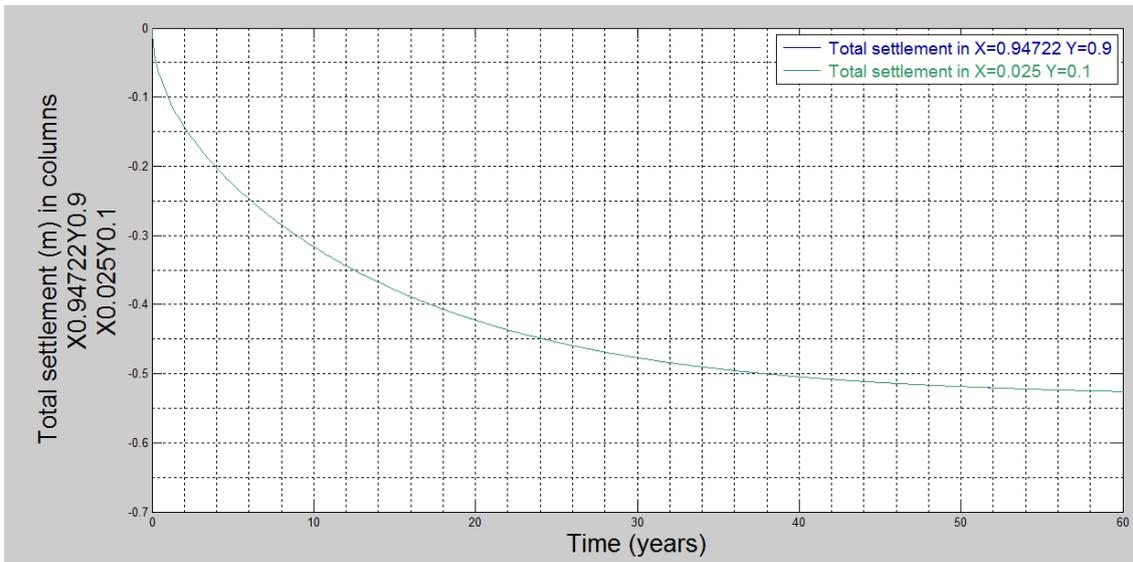


Figura 4.43 Asiento real para dos columnas de suelo

En la Figura 4.44 se puede apreciar el exceso de presión intersticial en los poros del suelo. Solo está representada una columna de agua porque al no haber mecha drenante todas las columnas de suelo presentan las mismas presiones intersticiales en todo momento. Podemos apreciar también como en las capas más superficiales, el exceso de presión intersticial se disipa antes que en las capas inferiores del suelo.

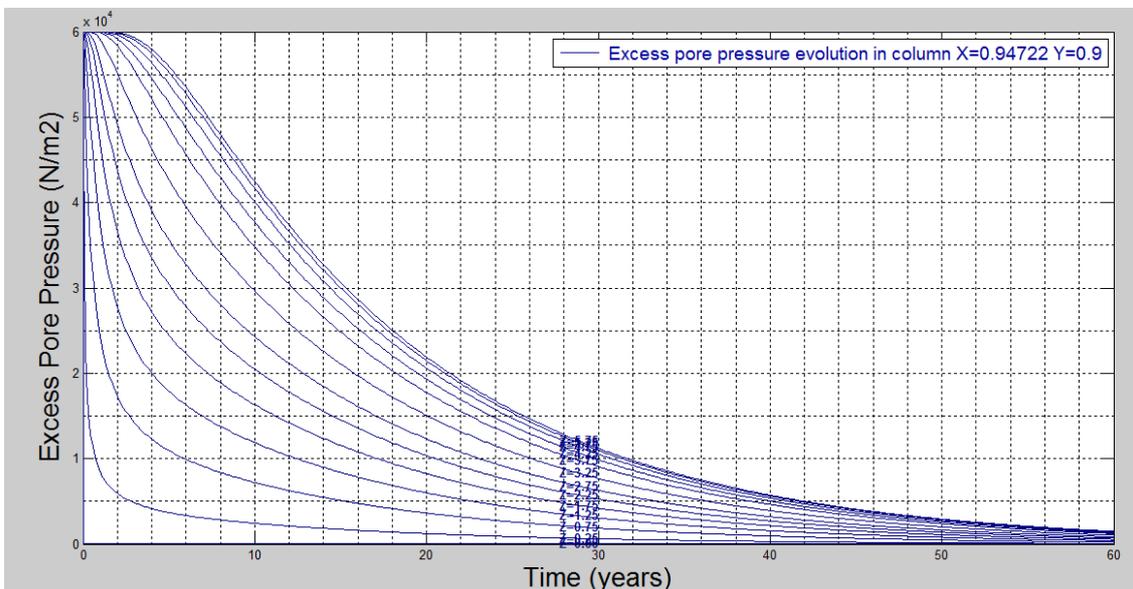


Figura 4.44 Exceso de presión intersticial en los poros del suelo

La distribución de asientos en superficie se recoge en la siguiente secuencia de imágenes. En ella podemos ver que los asientos son completamente homogéneos de

principio a fin al no existir mechas drenantes dispuestas en este caso para drenar el agua entera de forma vertical.

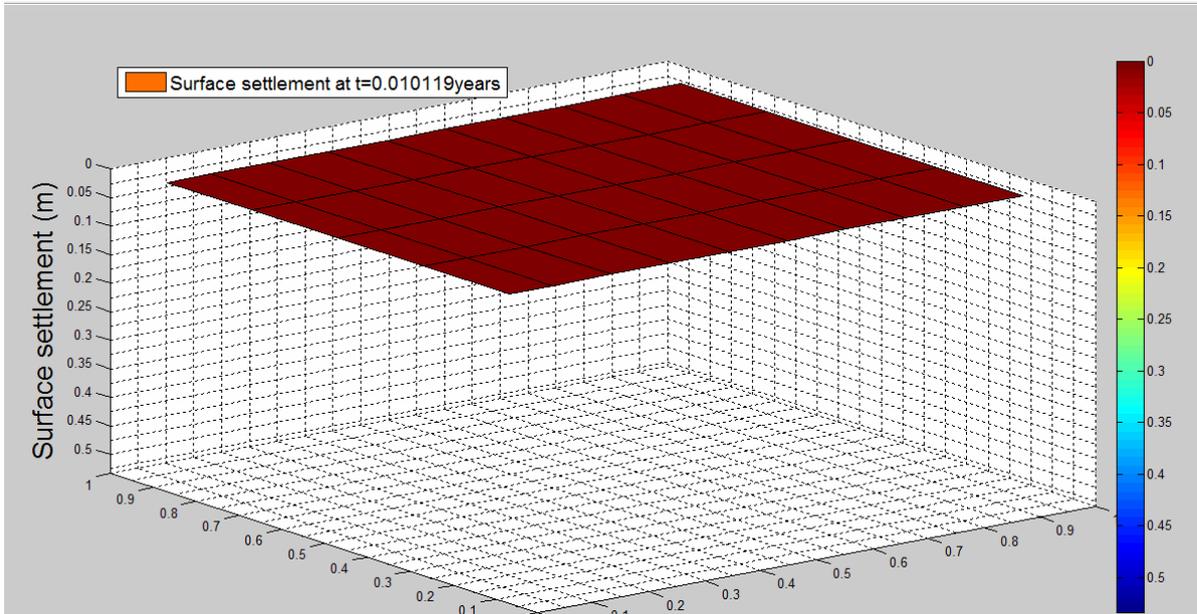


Figura 4.45 Asiento en superficie para un 10% de la consolidación final

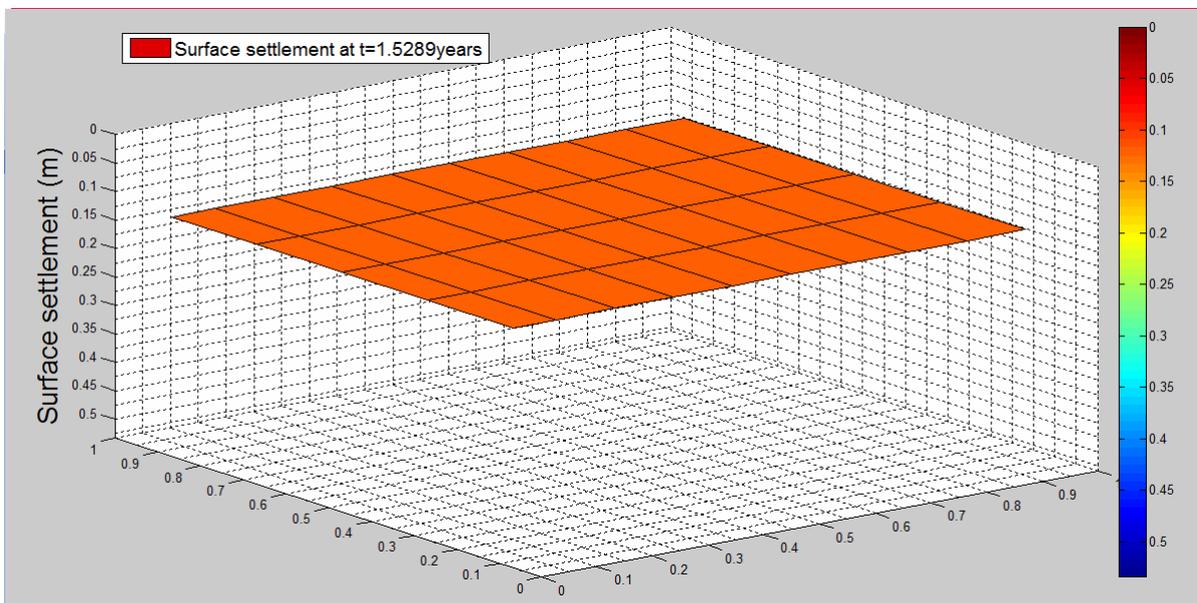


Figura 4.46 Asiento en superficie para un 30% de la consolidación final

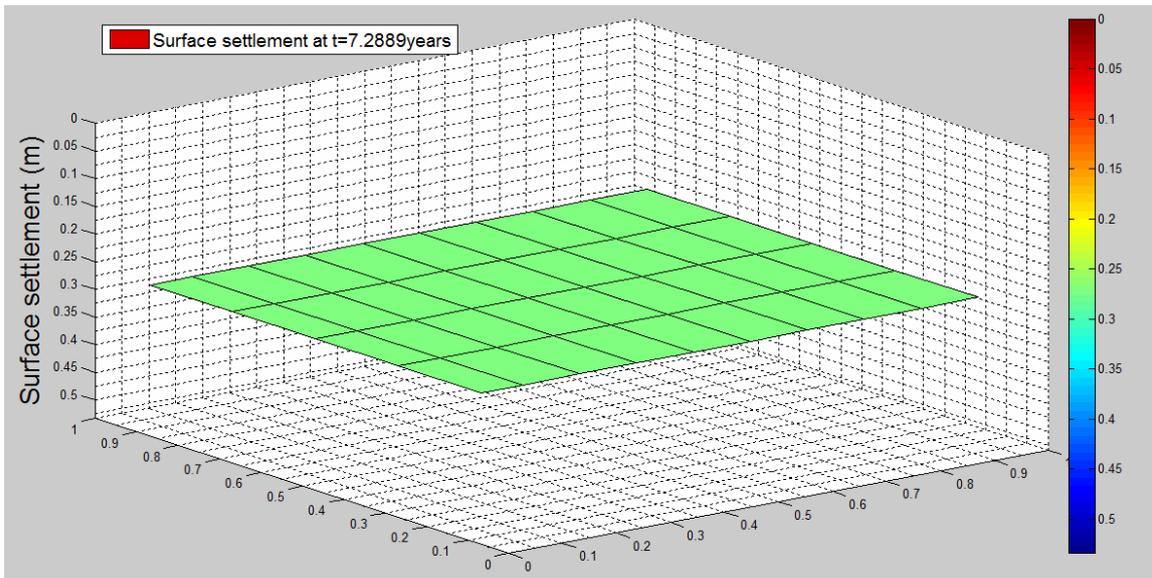


Figura 4.47 Asiento en superficie para un 55% de la consolidación final

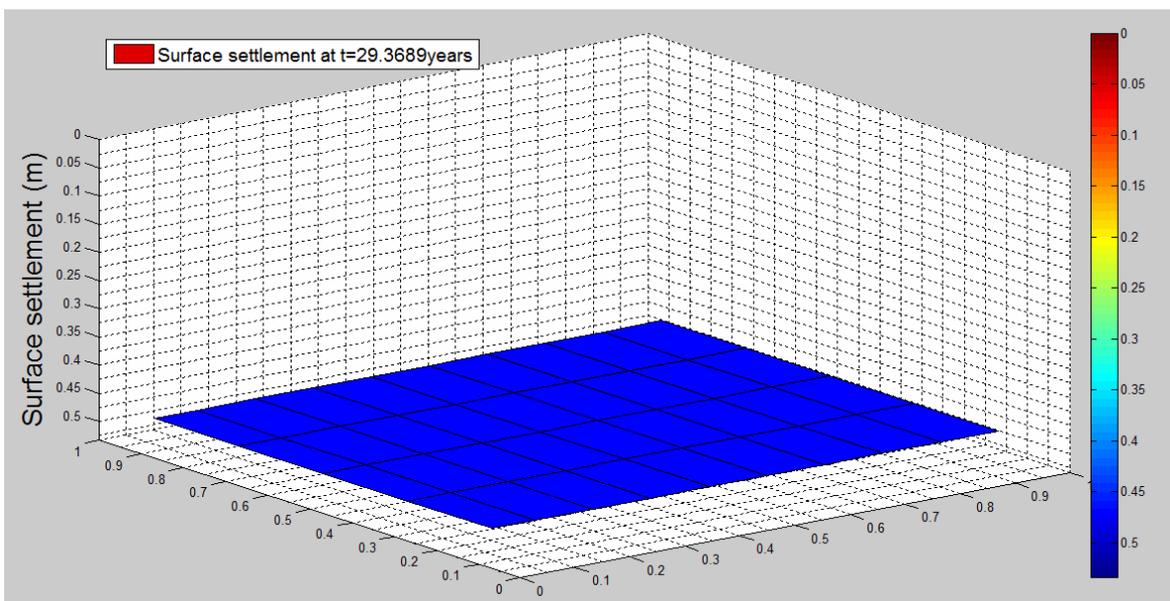


Figura 4.48 Asiento en superficie para un 90% de la consolidación final

Dichas imágenes se corresponden con un 10, 30, 55 y 90% de consolidación en promedio. Ésta última figura se correspondería con el 90%. Podemos ver que todas se desarrollan de forma homogénea en el espacio.

Como el tiempo obtenido es demasiado para poder ser asumible, vamos a realizar otra simulación.

## 2ª Simulación: Mecha totalmente penetrante hasta el primer estrato. ( $d=3$ )

Para esta segunda simulación penetraremos la mecha hasta el final del primer estrato y consideraremos un tiempo de actuación inferior al considerado en la simulación anterior. Pues se entiende que gracias a la mecha conseguiremos reducir el tiempo de consolidación. Esta vez trabajaremos con tiempo final de 40 años.

La evolución del grado medio de consolidación de todo el dominio se presenta en la Figura 4.49.

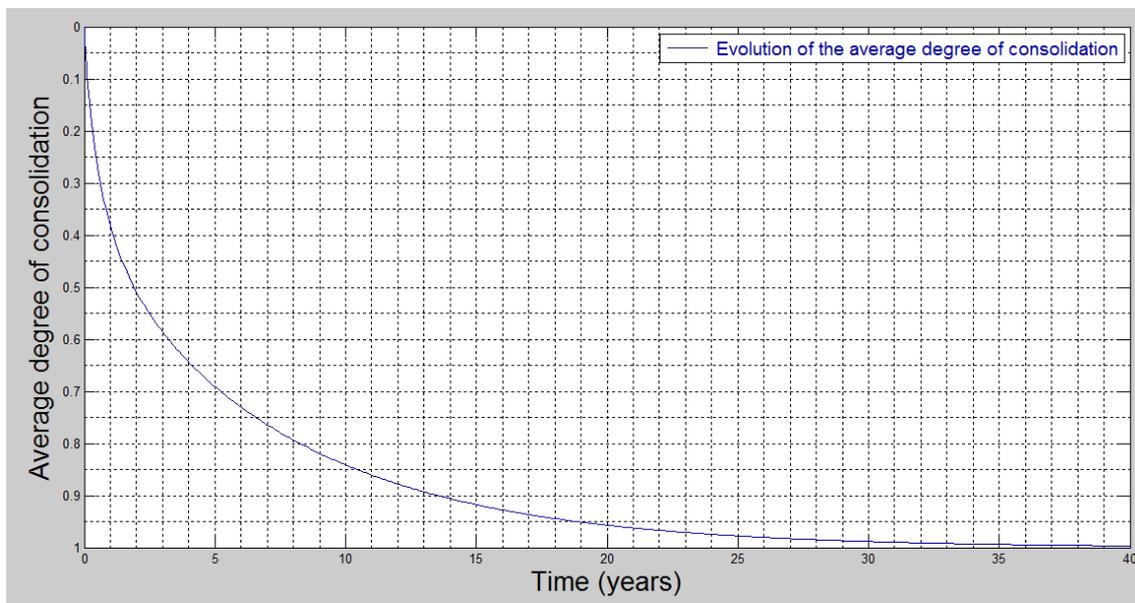


Figura 4.49 Evolución del grado medio de consolidación para todo el dominio

Como podemos observar, el tiempo para el que se alcanza un valor medio del 90% del asiento final por consolidación de consolidación es de 13 años y medio, aproximadamente. La utilización de mechas drenantes nos ha permitido pasar de conseguir el 90% de la consolidación en 30 años a conseguirlo en más de 15 años menos.

La siguiente imagen, Figura 4.50, muestra la evolución del exceso de presión intersticial en dos columnas de suelo. Podemos apreciar como la influencia de la mecha hace que el exceso de presión intersticial (que comienza siendo de igual valor en todos los puntos del medio en el instante inicial), con la evolución del tiempo, sea de menor valor en las zonas de suelo cercanas a la misma, pues éstas consiguen disipar antes este exceso de presión. Se puede apreciar también como para las capas más profundas del terreno, donde no llega la mecha drenante, la disipación de presión de poros apenas se ve influenciada por la mecha, siendo para cualquier vertical del terreno prácticamente de igual valor.

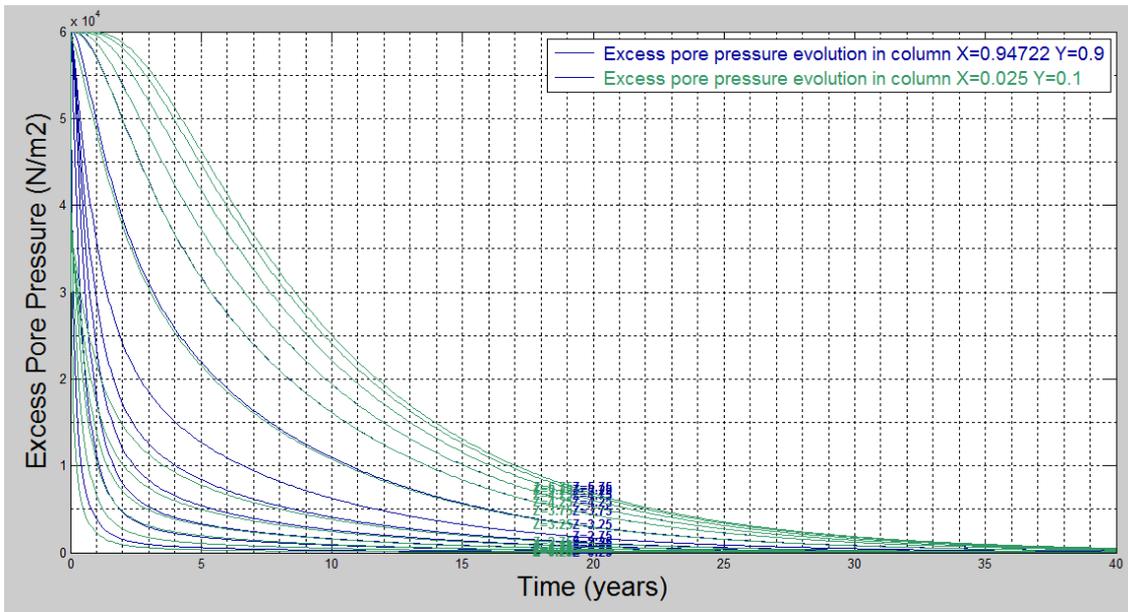


Figura 4.50 Exceso de presión intersticial

El asiento real de cada columna de suelo viene dado por la Figura 4.51. El valor de los asientos en el terreno continua evolucionando paralelamente al de la disipación de presión intersticial dentro de los poros del terreno. Lo único que varía es la velocidad de asentamiento, el cual depende de la proximidad a la mecha. El asiento total final es el mismo en todos los puntos. Sólo se modificará la evolución temporal. Los puntos reflejados en la gráfica siguen siendo el más alejado y el más cercano ( $x_1=1, y_1=1; x_2=0, y_2=0$ ).

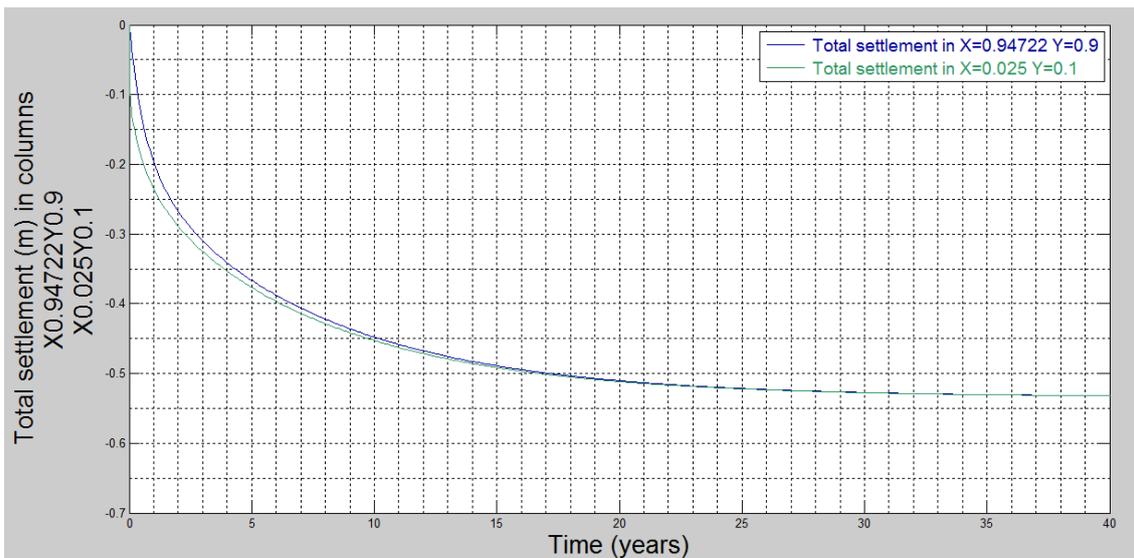


Figura 4.51 Asiento real para dos columnas de suelo



Después de todo esto, como hemos visto, el tiempo de consolidación se había reducido significativamente, pero no lo suficiente. Por lo que pasamos a realizar otra simulación en la que la profundidad de la mecha será mayor.

**3ª Simulación:** Mecha totalmente penetrante hasta el segundo estrato. ( $d=4$ )

Para esta tercera simulación, igual que en el caso anterior, penetraremos la mecha hasta el final del segundo estrato y consideraremos un tiempo de actuación inferior al considerado en la simulación anterior. Esta vez trabajaremos con tiempo final de 20 años.

La evolución del grado medio de consolidación de todo el dominio, para este caso, se muestra en la Figura 4.52. El tiempo para el que se produce un valor del 90% de la consolidación es 7.7 años, siendo este valor prácticamente la mitad del valor alcanzado en la simulación anterior.

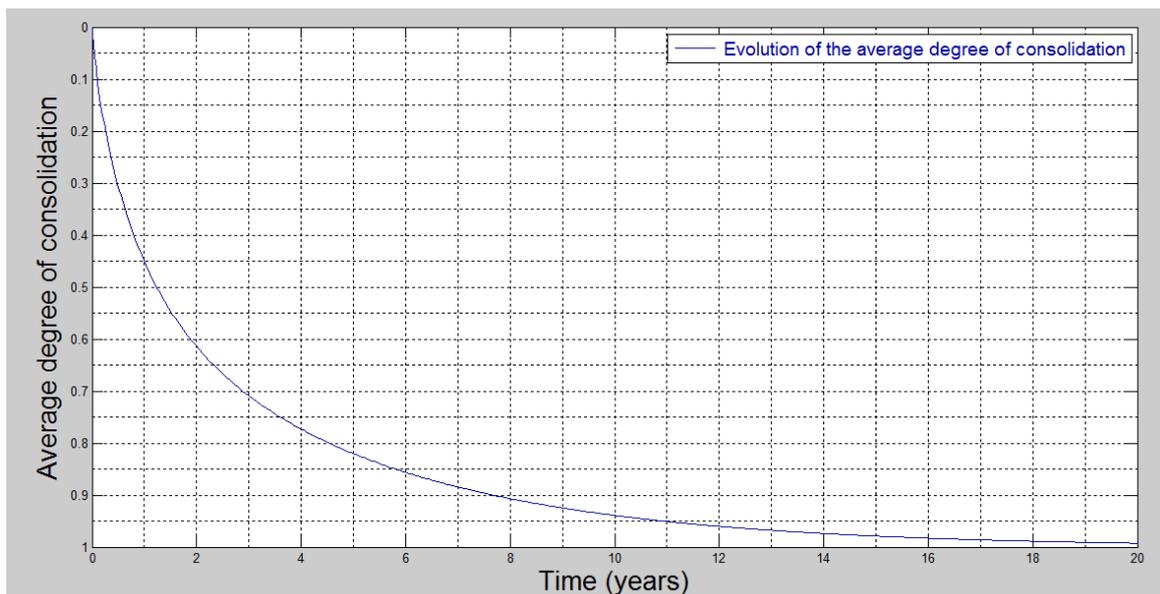


Figura 4.52 Evolución del grado medio de consolidación

Estos datos muestran, una vez más, gracias al programa SICOMED\_3D, la clara influencia que ejerce la presencia de una mecha penetrante sobre la consolidación del terreno. Hemos conseguido bajar mucho el tiempo de consolidación del terreno, pero aún así sigue siendo insuficiente para poder llevarlo a la práctica en una obra civil.

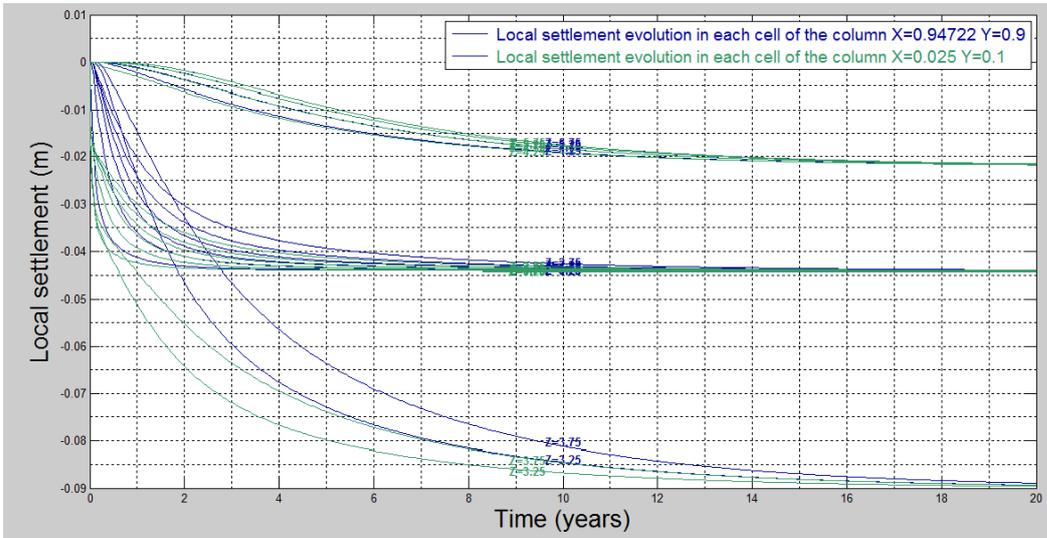
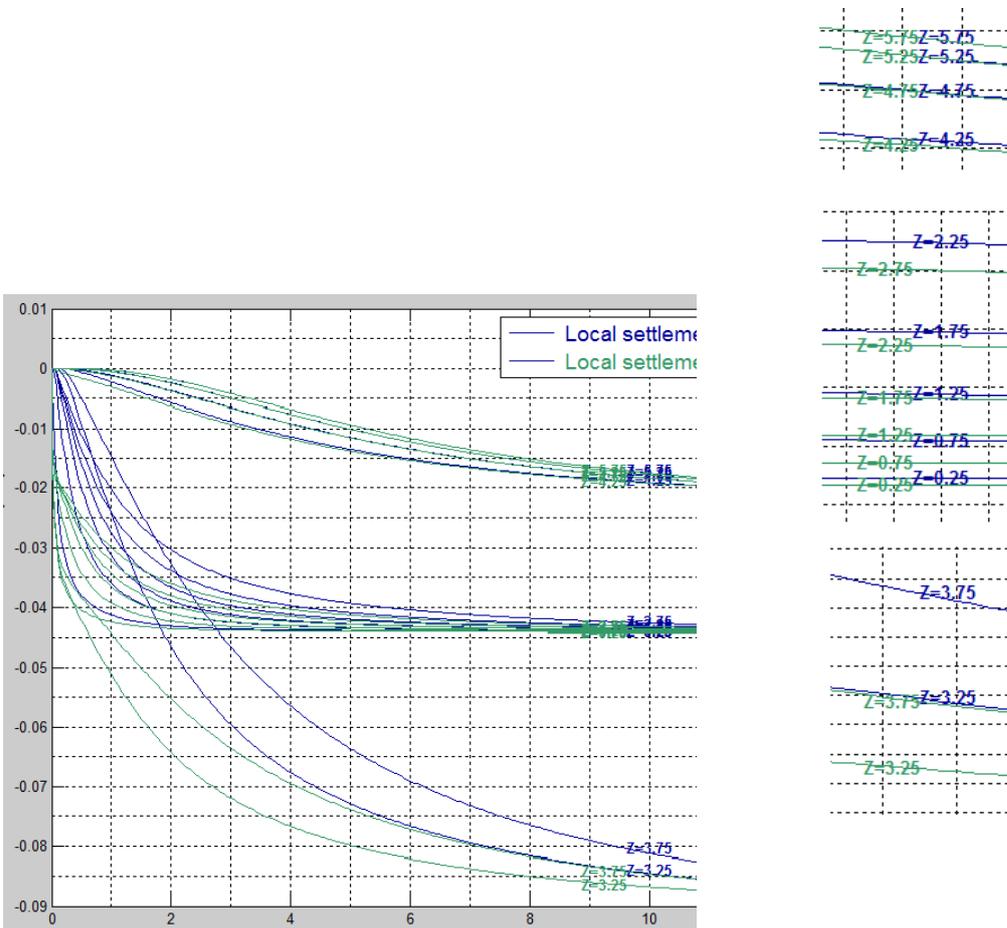


Figura 4.53 Asiento de dos columnas de suelo para cada celda en cada estrato

En la imagen anterior, Figura 4.53, se muestran los datos correspondientes al grado de asiento de dos columnas de suelo en cada celda de cada estrato.

Ampliamos los datos obtenidos para poder observar bien lo ocurrido.





Como podemos observar, el asiento mayor se produce en las celdas correspondientes al segundo estrato (efectivamente, tiene un mayor  $a_v$ ), pero es un asentamiento más largo en el tiempo que el producido en el estrato primero. En este estrato, el asiento se produce muy rápidamente, pero no asientan tanto como el segundo estrato. El tercero, sin embargo, tiene un asiento mucho más reducido y se va produciendo mucho más poco a poco que en los demás estratos, debido a que está condicionado por el drenaje de los estratos superiores y por la ausencia de mecha.

Si diferenciamos las columnas elegidas, podemos ver como en el primer estrato, el asiento de la columna más cercana a la mecha se produce antes, aunque ambas asienten lo mismo al final. En el segundo estrato, es otra vez el terreno junto a la mecha el que asienta antes. Sin embargo, en el tercer estrato, el asiento de ambas columnas se produce de igual manera, pues ahí no llega la mecha y no podemos notar una clara diferencia como en las demás capas del terreno.

Finalmente, como hemos visto, el tiempo de consolidación se había reducido significativamente. Hemos conseguido alcanzar un valor muy bajo, pero aún sigue sin ser lo suficiente bajo. Por lo que pasamos a realizar otra simulación en la que la profundidad de la mecha será mayor.

#### **4ª Simulación:** Mecha totalmente penetrante hasta el tercer estrato. ( $d=6$ )

Para esta cuarta simulación penetraremos la mecha hasta el final del tercer y último estrato y consideraremos un tiempo de actuación inferior al considerado en la simulación anterior. Pues al aumentar la profundidad de la mecha conseguiremos reducir el tiempo de consolidación aún más. Esta vez trabajaremos con tiempo final de 7 años.

A continuación mostramos, en la Figura 4.54 el grado medio de asiento de todo el dominio para esta simulación:

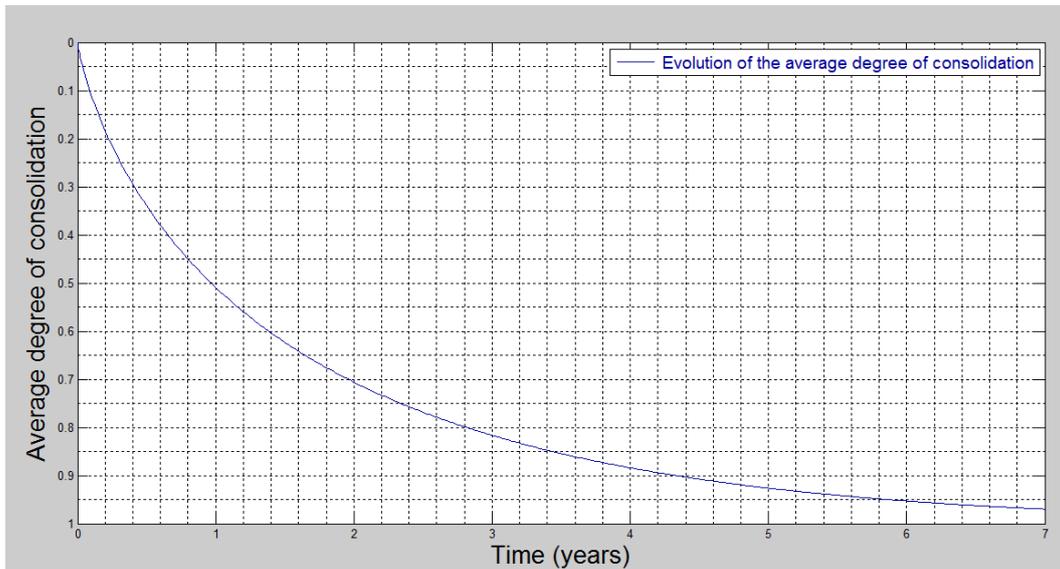


Figura 4.54 Evolución del grado medio de consolidación

Con esta profundidad de la mecha hasta el final del último estrato, es decir, en toda la profundidad del terreno, el tiempo para el que se produce un valor del 90% de la consolidación es de unos 4.4 años aproximadamente. Estos datos indican que una mecha drenante introducida hasta esta profundidad causa modificaciones importantes en los tiempos de consolidación.

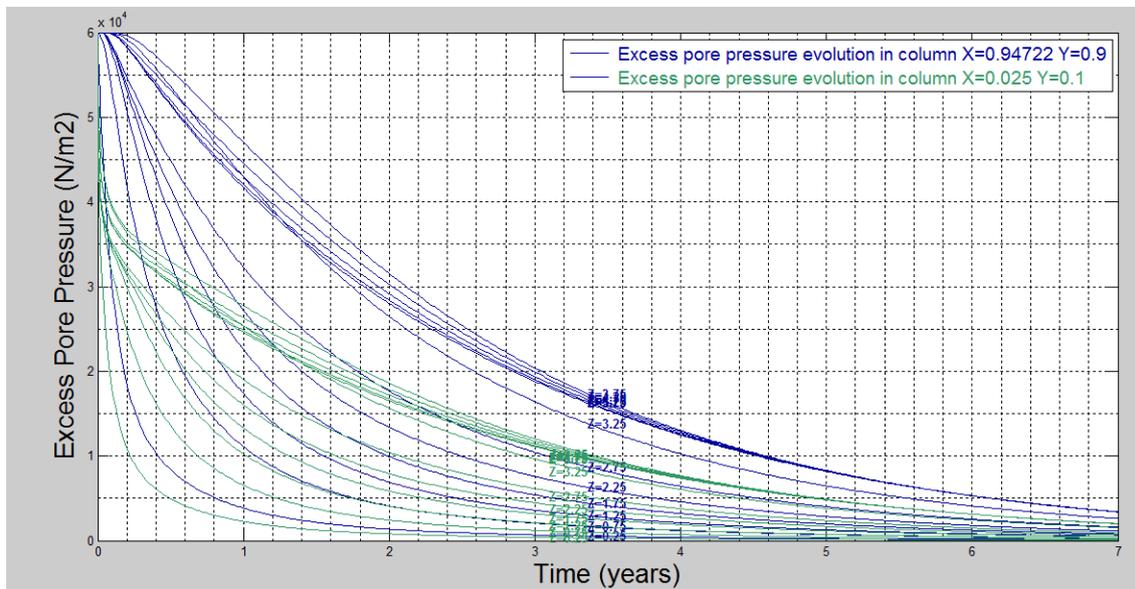


Figura 4.55 Exceso de presión intersticial en el poro

Además de esto, a edades tempranas de consolidación, esta reducción de presión de poro se ve importantemente reducida, sobre todo en las zonas más cercanas a la mecha. El exceso de presión intersticial lo observamos en la Figura 4.55.



Aunque hemos conseguido reducir a gran escala el tiempo de consolidación necesario para este terreno, aún sigue siendo mucho para poder llevarlo a la práctica. Para reducirlo aún más, como no podemos profundizar más la mecha en el terreno, vamos a reducir el espacio entre hileras. Hasta ahora, como en el caso N°1, habíamos estado tomando una separación entre mechas de 2 metros ( $a=1\text{m}$ ), mientras que la distancia entre hileras era de 2 metros ( $b=1\text{m}$ ). En las siguientes simulaciones iremos acercando las mechas hasta que consigamos alcanzar el tiempo de consolidación necesario.

**5ª Simulación:** Mecha totalmente penetrante hasta el tercer estrato ( $d=6$ ), variando la distancia entre mechas, siendo:

$$\sim a = 0.8 \text{ m}$$

$$\sim b = 0.8 \text{ m}$$

Para esta simulación tomaremos un tiempo final de 4 años.

La evolución del grado medio de consolidación, para este caso, se puede apreciar en la Figura 4.56. El tiempo para el que se produce un valor del 90% de la consolidación es de 2.6 años aproximadamente, notándose, de forma importante, la influencia de las mechas en los tiempos de consolidación.

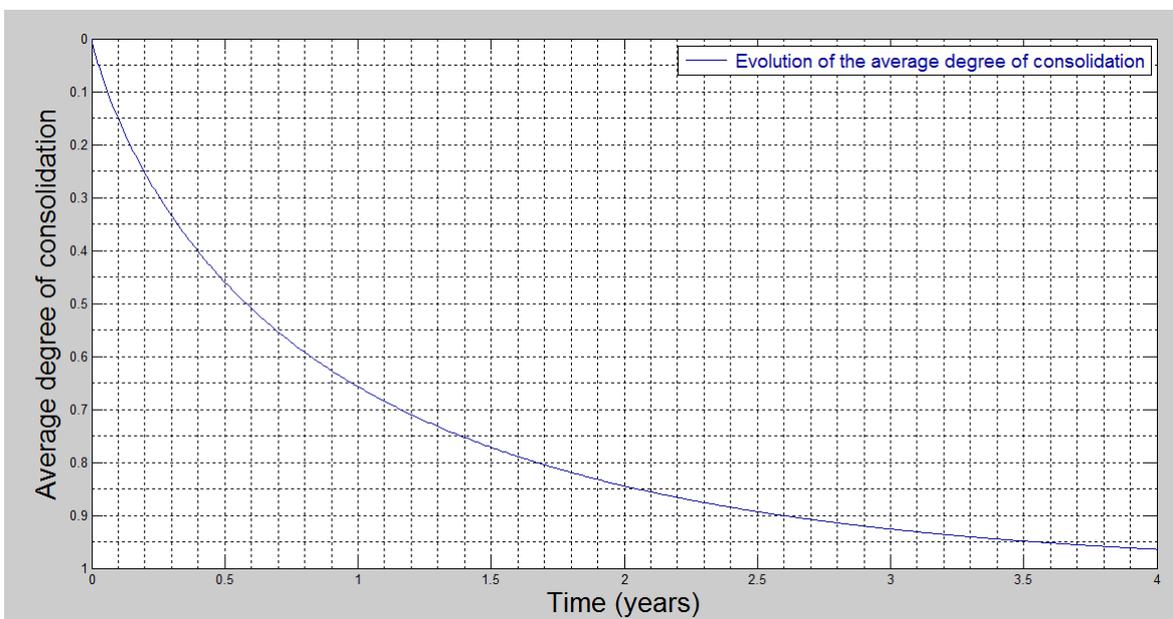


Figura 4.56 Evolución del grado medio de consolidación del terreno



**6ª Simulación:** Mecha drenante hasta un 100% del estrato del suelo ( $d=6$ ), variando la distancia entre mechas, siendo:

~  $a = 0.6 \text{ m}$

~  $b = 0.6 \text{ m}$

La separación real de la mecha en esta simulación sería de 1.2 m.

Para esta simulación tomaremos un tiempo final de 3 años.

La evolución en el grado de consolidación promedio del terreno se puede ver en la Figura 4.57, siendo ésta la más rápida de todas las simulaciones estudiadas en este caso y teniendo un valor del tiempo de consolidación (para este nivel, 90%) de 1.33 años. Esto supone una reducción importante del tiempo de consolidación respecto al tiempo obtenido con distancias entre hileras superiores calculados en simulaciones anteriores. Además, en este caso, con dicha disposición de hileras, habríamos alcanzado un valor aceptable para llevar a cabo una obra civil.

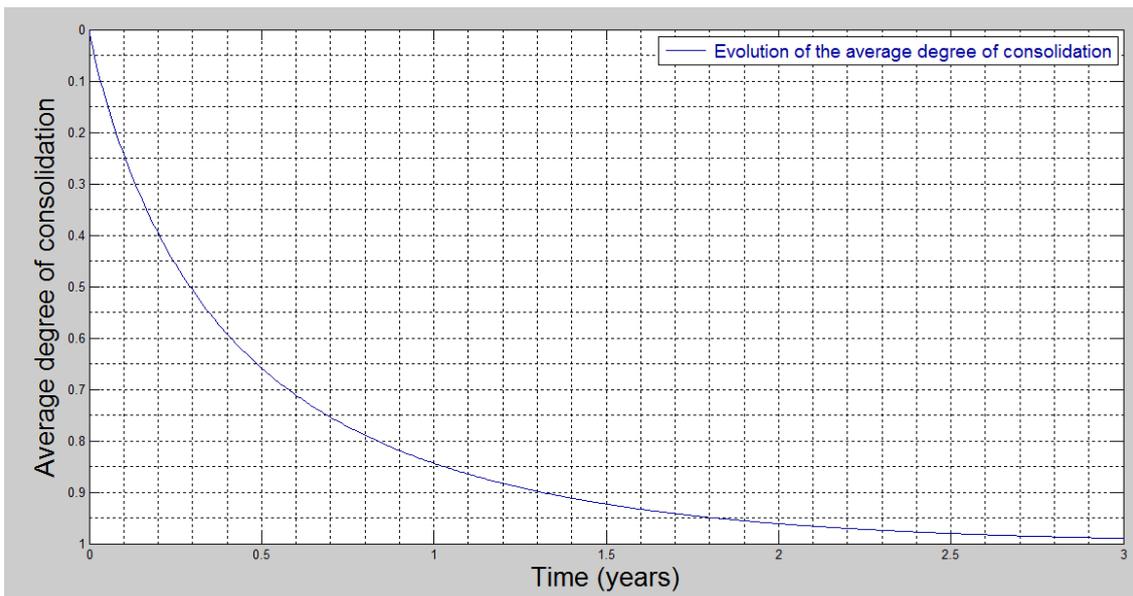


Figura 4.57 Evolución del grado medio de consolidación del terreno

El asiento local de una columna de suelo para cada celda de cada estrato lo podemos observar a continuación, en la Figura 4.58:

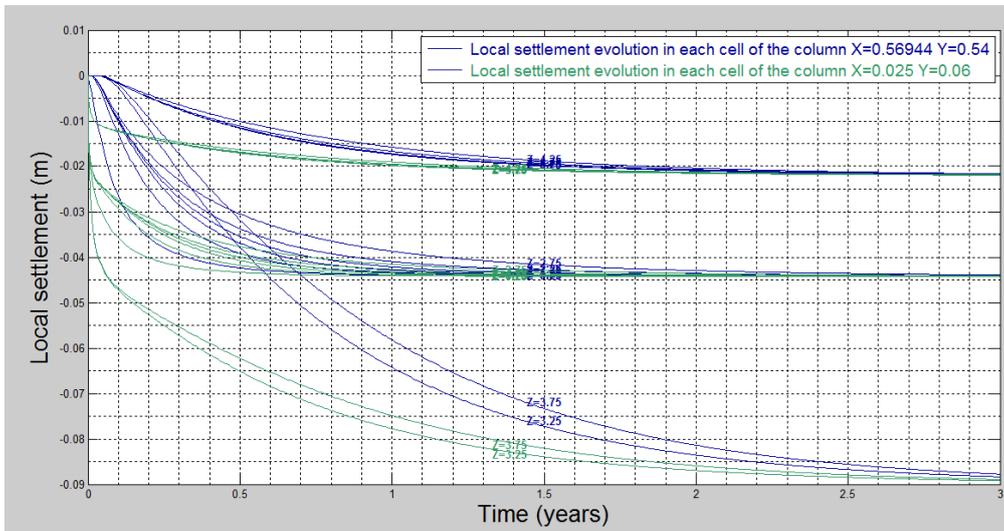


Figura 4.58 Asiento local para dos columnas de suelo

En la imagen podemos observar que el estrato que más asiento produciría sería el estrato de en medio, además de tener la consolidación más lenta de todos. Sin embargo, la consolidación en el primer estrato sería la más rápida y la segunda más profunda. Para terminar, diremos que el asiento producido en la capa más profunda será el menor.

En la siguiente imagen, Figura 4.59, podemos apreciar como la disipación del exceso de presión de poro se consigue en un tiempo menor a cualquier caso anterior. Resulta evidente la mayor rapidez con que se disipa la presión en las zonas cercanas a la mecha, siendo además los tiempos de consolidación algo inferiores a los casos anteriormente presentados.

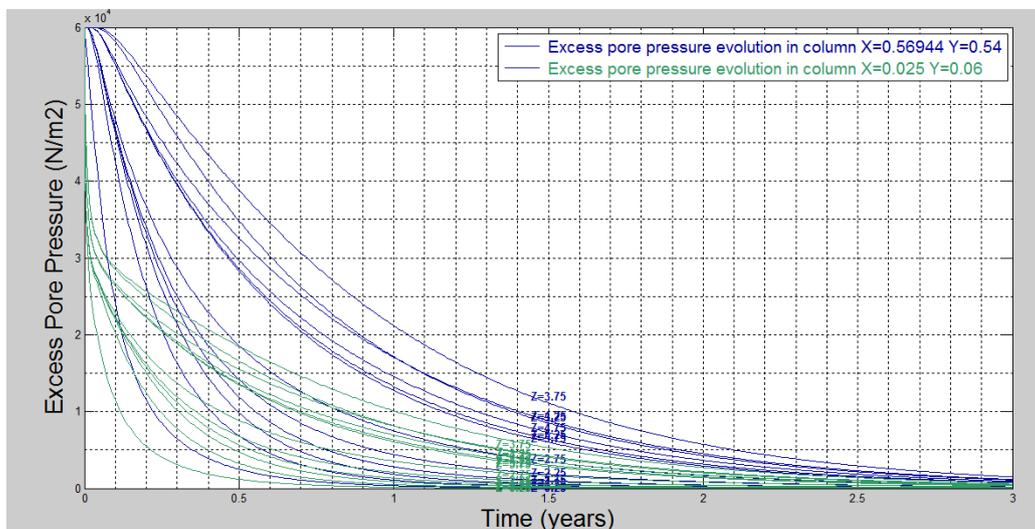


Figura 4.59 Exceso de presión intersticial del terreno

Los asientos en el terreno los podemos ver en la imagen que mostramos a continuación, Figura 4.60. Se observa la evolución de los asientos en dos verticales de terreno estudiadas, una la más cercana a la mecha y otra la más alejada. Se aprecia que las zonas cercanas a la mecha sufren un asentamiento más acusado. Dichos asientos evolucionan de forma más rápida que todos los casos que se han estudiado.

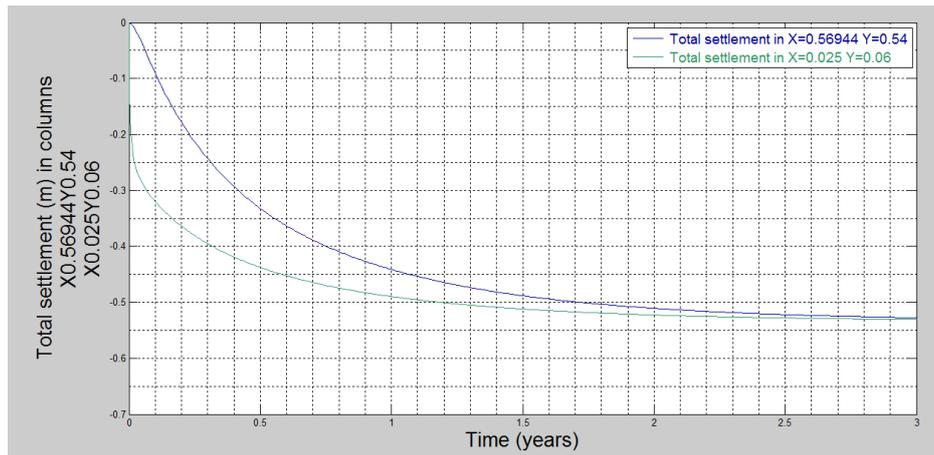


Figura 4.60 Asiento real para dos columnas de suelo

Para finalizar con esta simulación, vamos a ilustrar unas imágenes tomadas de una animación en la que se muestra cómo y cuándo se va asentando el terreno a lo largo del tiempo.

Esta primera imagen, Figura 4.61, muestra el asiento en superficie al comienzo del proceso de consolidación que se correspondería con un 15%, aproximadamente, de dicha consolidación. Podemos comprobar que la influencia de la mecha drenante, para este nivel de consolidación, a efectos de asiento diferencial, es muy importante.

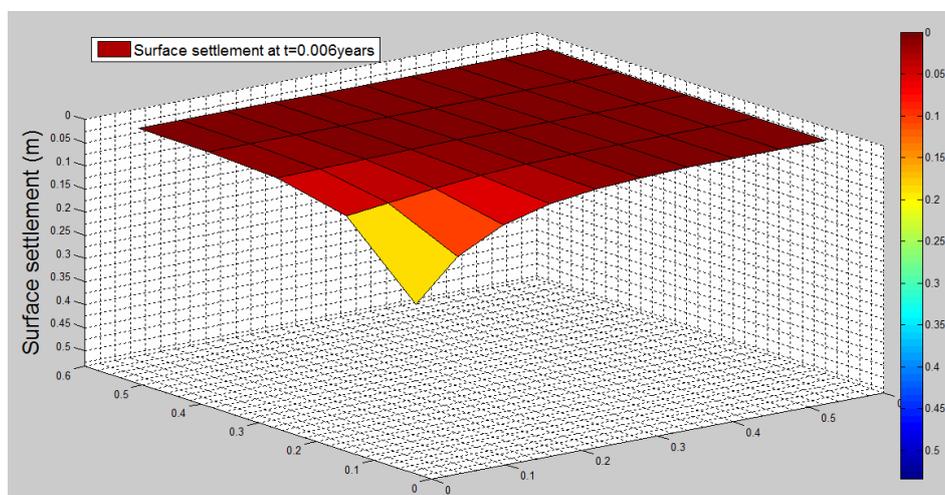


Figura 4.61 Asiento en superficie para un 15% de la consolidación final

En la Figura 4.62 podemos observar el asiento que podría corresponderse con un 20-35% aproximadamente, de dicha consolidación. Los asientos diferenciales en la superficie del terreno en este nivel de consolidación resultan claramente evidentes, mostrándose una fuerte influencia de la mecha drenante en las cercanías de la misma. Podemos comprobar, también, la gran diferencia que hay de la imagen a anterior a esta. Con tan solo un 10% de consolidación, el efecto de la mecha es muchísimo más fuerte.

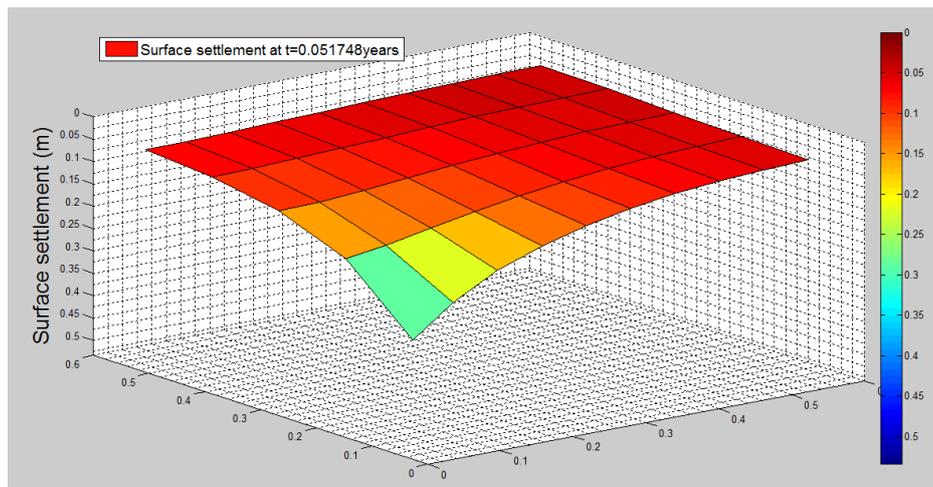


Figura 4.62 Asiento en superficie para un 25-30% de la consolidación final

El asiento correspondiente con la tercera imagen, Figura 4.63, se corresponde con un 60% aproximadamente de la consolidación total. Este nivel de asentamiento se consigue en menos de la mitad de un año. Aún podemos observar una fuerte diferencia en los asientos diferenciales del terreno, dejando claro el efecto que produce la mecha en esta etapa, aunque poco a poco se va reduciendo.

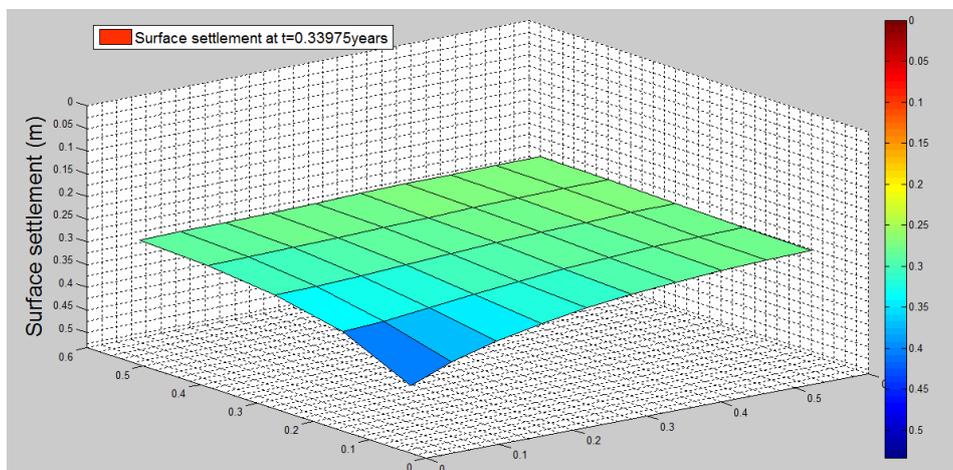


Figura 4.63 Asiento en superficie para un 60% de la consolidación final

En esta cuarta y última fotografía, Figura 4.64, podemos ver cómo después de poco más de un año el efecto de la mecha se vuelve apenas apreciable al llegar la consolidación a un nivel del 90% en promedio. El asiento diferencial es prácticamente nulo.

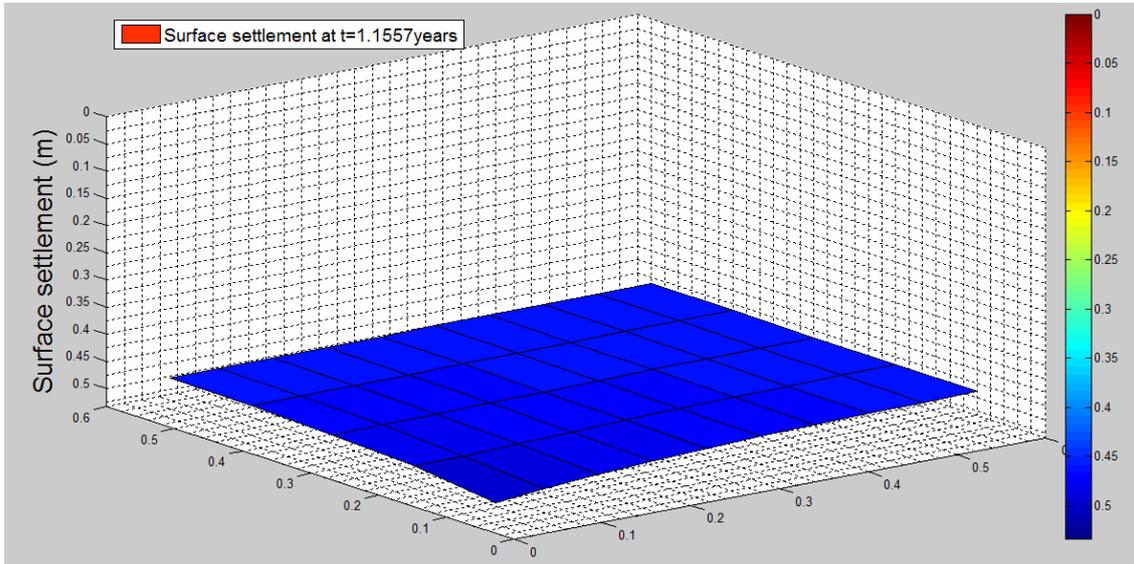


Figura 4.64 Asiento en superficie para un 90% de la consolidación final

Como conclusión diremos que hemos alcanzado un valor para el tiempo de consolidación aceptable, pues el 90% se alcanza en poco más de un año. De manera que éste sería el método a llevar a cabo para un terreno con estas condiciones.

Para finalizar, se expone a modo de resumen en la Figura 4.65, para cada una de las 6 simulaciones llevadas a cabo, el tiempo necesario para alcanzar el 90% de la consolidación media del terreno.

Profundidad de la mecha drenante (m)	$t_{90}$ (años)
Sin mecha	30
3	13,5
4	7,7
6 (a=1; b=1)	4,4
6 (a=0,8; b=0,8)	2,6
6 (a=0,6; b=0,6)	1,33

Figura 4.65 Resumen de los resultados obtenidos para el 90% del grado de consolidación en este Caso N°2



#### **4.4. Optimización del reparto y penetración de las mechas.**

En este apartado reflejamos una alternativa a lo que hemos ido viendo anteriormente. En los casos anteriores hemos estado trabajando con profundidades de capa cada vez mayores, hasta que no podíamos profundizar más dicha penetración. Era, entonces, cuando establecíamos una disposición de las mechas diferente, acercándolas entre ellas.

A continuación, vamos a establecer una penetración final de la mecha hasta el segundo estrato en cada uno de los casos (motivada, quizá, por una alta resistencia a la penetración de la mecha del estrato inferior) y a partir de ahí, vamos a buscar una separación de mechas para conseguir un resultado del grado de consolidación aceptable.

Debido a la disposición de nuestros estratos, en ambos casos, la penetración final de nuestra mecha se corresponderá con una profundidad de 4m.

##### **4.4.1. Optimización del reparto de mechas para el Caso N°1:**

Como hemos dicho anteriormente, empezaremos a partir de la simulación n°3 del Caso N°1 del apartado anterior.

**4ª Simulación:** Mecha totalmente penetrante hasta el segundo estrato ( $d=4$ ), variando la distancia entre mechas, siendo:

$$\sim a = 0.8 \text{ m}$$

$$\sim b = 0.8 \text{ m}$$

Para esta simulación tomaremos un tiempo final de 4 años.

La evolución en el grado de consolidación promedio del terreno se puede ver en la Figura 4.66:

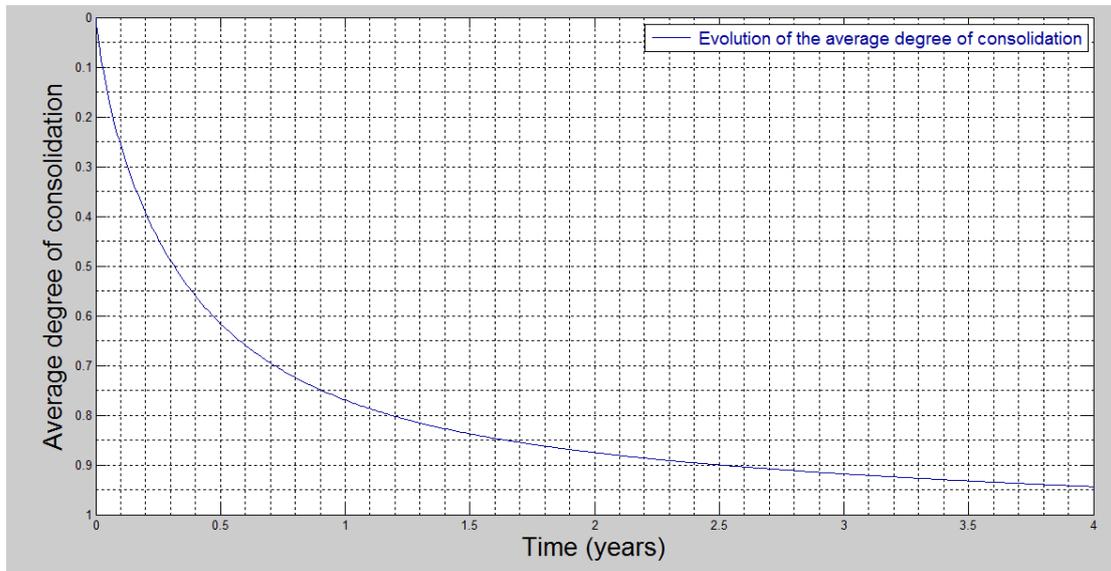


Figura 4.66 Evolución del grado medio de consolidación del terreno

En ella tenemos un valor del tiempo de consolidación (para este nivel, 90%) de 2.55 años.

**5ª Simulación:** Mecha totalmente penetrante hasta el segundo estrato ( $d=4$ ), variando la distancia entre mechas, siendo:

~  $a = 0.7$  m

~  $b = 0.7$  m

Para esta simulación tomaremos un tiempo final de 3 años.

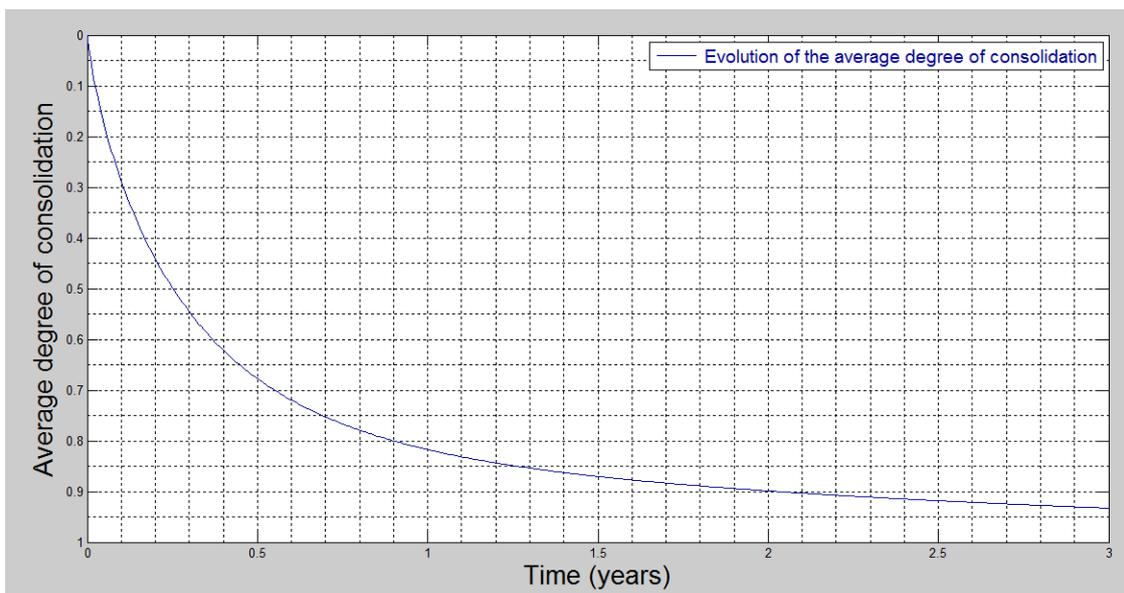


Figura 4.67 Evolución del grado medio de consolidación del terreno



Como podemos observar en esta gráfica, Figura 4.67, de la evolución del grado medio de consolidación de todo el dominio, el tiempo para el que se alcanza un valor medio del 90% del asiento final es de 2.05 años aproximadamente. Podría considerarse un valor aceptable, pero vamos a realizar una última simulación con un pequeño acercamiento más de las mechas para comparar los resultados con los obtenidos en esta simulación.

**6ª Simulación:** Mecha totalmente penetrante hasta el segundo estrato ( $d=4$ ), variando la distancia entre mechas, siendo:

$$\sim a = 0.65 \text{ m}$$

$$\sim b = 0.65 \text{ m}$$

Para esta simulación tomaremos un tiempo final de 3 años.

La evolución del grado medio de consolidación de todo el dominio se presenta en la Figura 4.68.

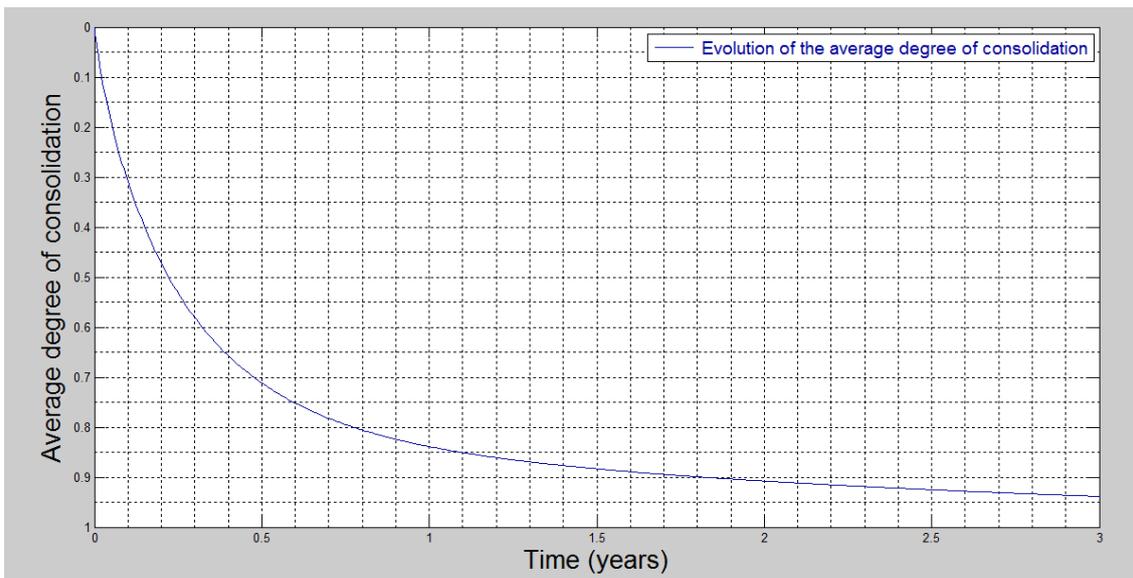


Figura 4.68 Evolución del grado medio de consolidación del terreno

En ella tenemos un valor del tiempo de consolidación (para este nivel, 90%) de 1.85 años.

Para terminar con este caso mostramos, en la Figura 4.69, los valores obtenidos del grado de consolidación para ese 90% establecido. Primero, se muestran los valores obtenidos en el caso nº1 del apartado anterior, hasta una profundidad  $d=4$ , la cual hemos decidido establecer como profundidad final de la mecha. A partir de ese valor,



se muestran los obtenidos en estas últimas simulaciones, correspondientes a esa misma profundidad de la mecha pero con una disposición diferente de hileras.

Profundidad de la mecha drenante (m)	$t_{90}$ (años)
Sin mecha	32
1	27
4	4,5
4 (a=0,8; b=0,8)	2,55
4 (a=0,7; b=0,7)	2,05
4 (a=0,65; b=0,65)	1,85

Figura 4.69 Resumen de los resultados obtenidos para el 90% del grado de consolidación en este Caso N°1\_optimización

#### 4.4.2. Optimización del reparto de mechas para el Caso N°2:

Como hemos dicho anteriormente, empezaremos a partir de la simulación n°3 del Caso N°2 del apartado anterior.

**4ª Simulación:** Mecha totalmente penetrante hasta el segundo estrato ( $d=4$ ), variando la distancia entre mechas, siendo:

- ~  $a = 0.8$  m
- ~  $b = 0.8$  m

Para esta simulación tomaremos un tiempo final de 7 años.

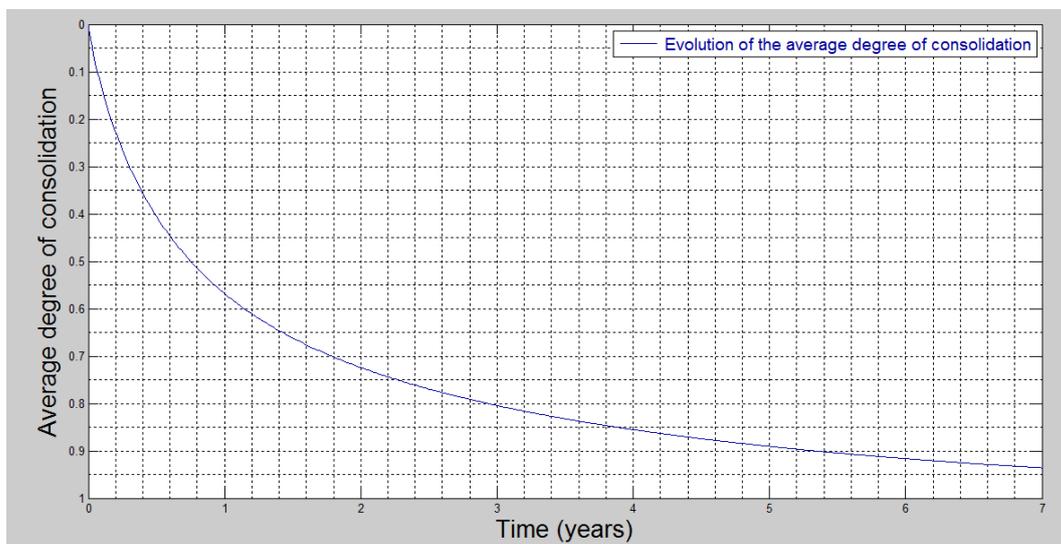


Figura 4.70 Evolución del grado medio de consolidación del terreno



Como podemos observar en la Figura 4.70, la evolución del grado medio de consolidación de todo el dominio, el tiempo para el que se alcanza un valor medio del 90% del asiento final es de 5.2 años aproximadamente.

**5ª Simulación:** Mecha totalmente penetrante hasta el segundo estrato ( $d=4$ ), variando la distancia entre mechas, siendo:

~  $a = 0.6 \text{ m}$

~  $b = 0.6 \text{ m}$

Para esta simulación tomaremos un tiempo final de 5 años.

La evolución del grado medio de consolidación de todo el dominio podemos observarlo en la Figura 4.71:

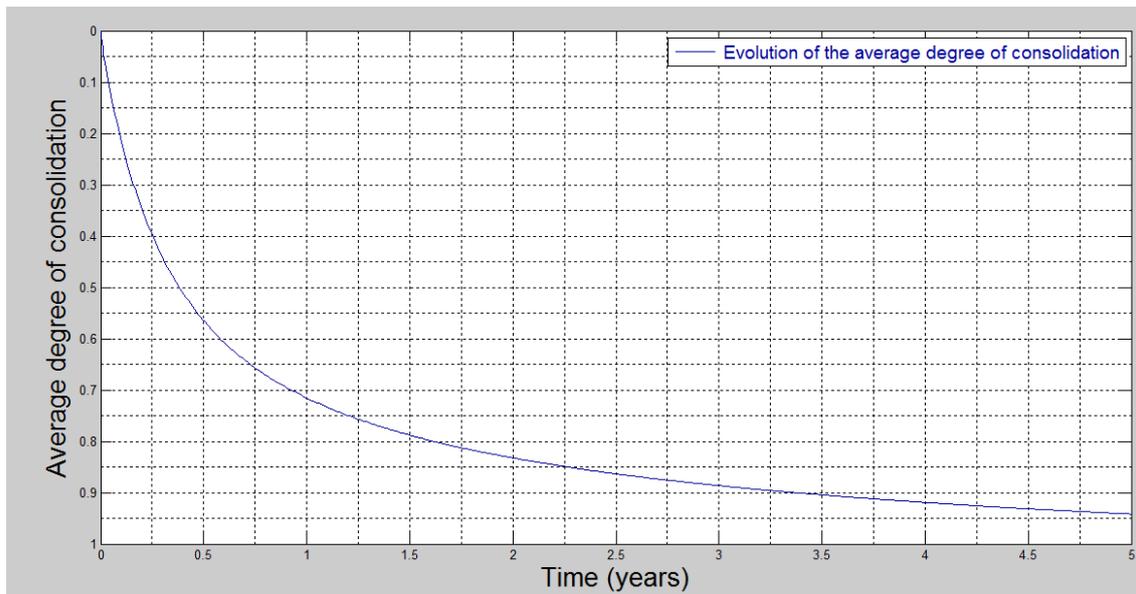


Figura 4.71 Evolución del grado medio de consolidación del terreno

Como podemos observar, el tiempo para el que se alcanza un valor medio del 90% del asiento final por consolidación es de 3 años y medio, aproximadamente. Un valor reducido, pero no lo suficiente, por lo que vamos a realizar otra simulación.

**6ª Simulación:** Mecha totalmente penetrante hasta el segundo estrato ( $d=4$ ), variando la distancia entre mechas, siendo:

~  $a = 0.5 \text{ m}$

~  $b = 0.5 \text{ m}$



Para esta simulación tomaremos un tiempo final de 3 años.

El grado medio de consolidación para esta simulación será el que se muestra en la Figura 4.72:

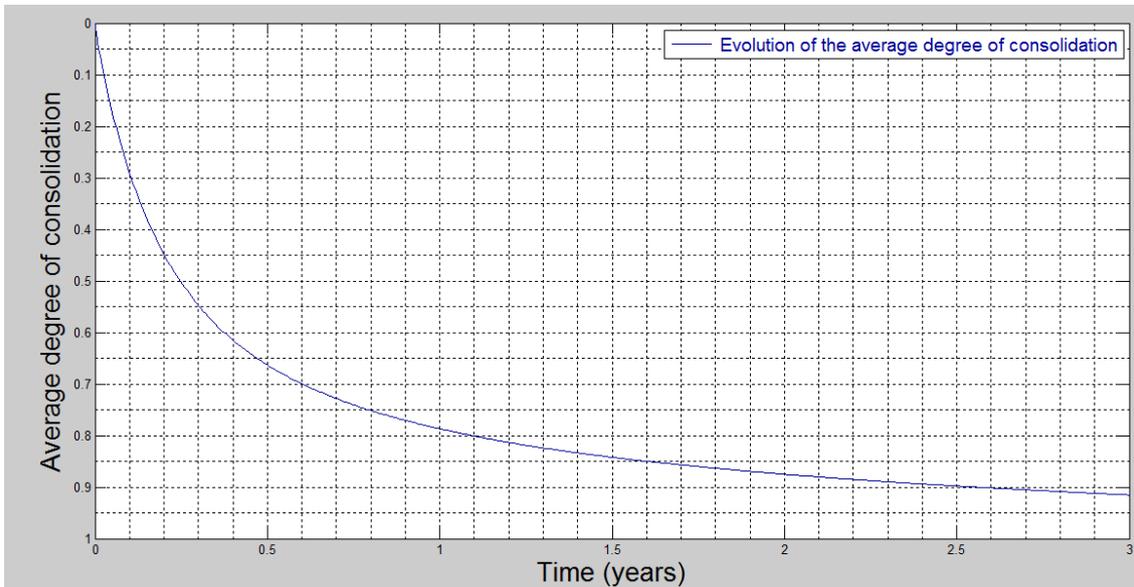


Figura 4.72 Evolución del grado medio de consolidación del terreno

En este caso, el 90% del asiento se corresponde con 2.6 años aproximadamente. Un valor casi aceptable, pero realizaremos una simulación más.

**7ª Simulación:** Mecha totalmente penetrante hasta el segundo estrato ( $d=4$ ), variando la distancia entre mechas, siendo:

~  $a = 0.4 \text{ m}$

~  $b = 0.4 \text{ m}$

Para esta simulación tomaremos un tiempo final de 3 años.

La evolución del grado medio de consolidación de todo el dominio se presenta en la siguiente imagen, Figura 4.73.

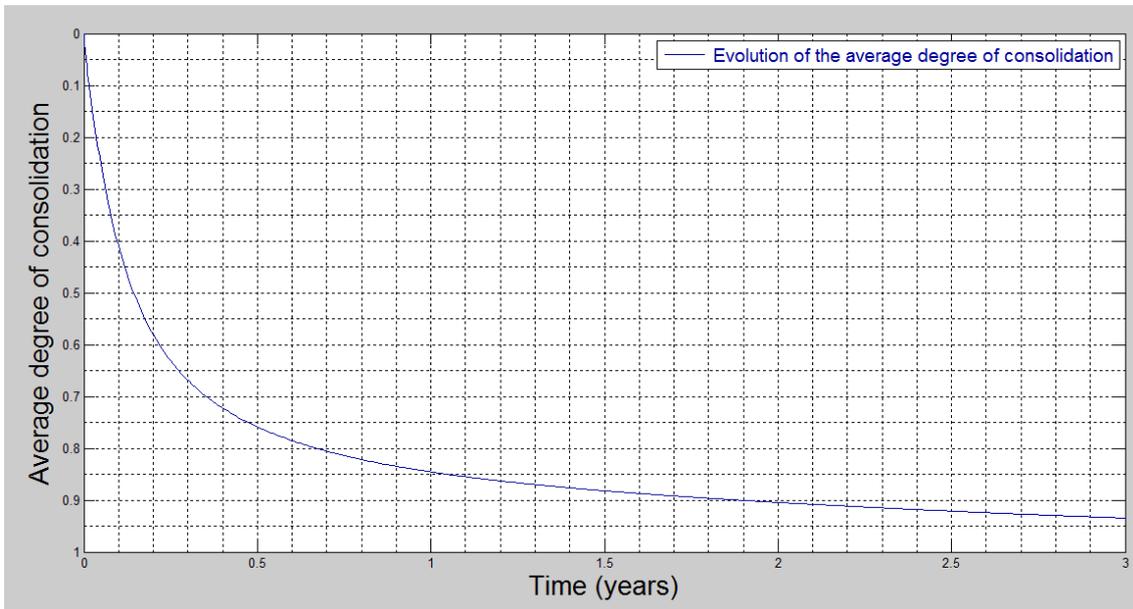


Figura 4.73 Evolución del grado medio de consolidación del terreno

Como podemos observar, el tiempo para el que se alcanza un valor medio del 90% del asiento final por consolidación de consolidación es de menos de 2 años, 1.9 aproximadamente.

Para finalizar, haremos un pequeño resumen de los valores obtenidos del grado de consolidación para ese 90% establecido. El cual se muestra en la Figura 4.74. Primero, se muestran los valores obtenidos en el caso nº2 del apartado anterior, hasta una profundidad  $d=4$ , igual que el caso anterior, la cual hemos decidido establecer como profundidad final de la mecha. A partir de ese valor, se muestran los obtenidos en estas últimas simulaciones, correspondientes a esa misma profundidad de la mecha pero con una disposición diferente de hileras.

Profundidad de la mecha drenante (m)	$t_{90}$ (años)
Sin mecha	30
3	13,5
4	7,7
4 (a=0,8; b=0,8)	5,2
4 (a=0,6; b=0,6)	3,4
4 (a=0,5; b=0,5)	2,6
4 (a=0,4; b=0,4)	1,9

Figura 4.74 Resumen de los resultados obtenidos para el 90% del grado de consolidación en este Caso N°2\_optimización



#### 4.5 Discusión de los resultados obtenidos.

A continuación, en las Figura 4.75 y 4.76, se presenta un resumen de los tiempos de consolidación que se han obtenido a lo largo de todas las simulaciones, para los casos N°1 y N°2 y para las distintas configuraciones de colocación de las mechas (separación y profundidad de penetración).

##### CASO N°1

Profundidad de la mecha drenante (m)	$t_{90}$ (años)
Sin mecha	32
1	27
4	4,5
6 (a=1; b=1)	3
6 (a=0,9; b=0,9)	2,4
<b>6 (a=0,8; b=0,8)</b>	<b>1,85</b>

Profundidad de la mecha drenante (m)	$t_{90}$ (años)
Sin mecha	32
1	27
4	4,5
4 (a=0,8; b=0,8)	2,55
<b>4 (a=0,7; b=0,7)</b>	<b>2,05</b>
4 (a=0,65; b=0,65)	1,85

Figura 4.75 Resumen de los resultados obtenidos para el 90% del grado de consolidación en este Caso N°1

Como el objetivo del estudio ha sido reducir el tiempo de consolidación a un máximo de 2 años, entre las alternativas estudiadas para este caso se podría optar por una de estas 2 opciones:

##### Alternativa 01

- ~ Profundidad de la mecha: 6m.
- ~ Separación entre mechas e hileras: 1.6

##### Alternativa 02

- ~ Profundidad de la mecha: 4m.
- ~ Separación entre mechas e hileras: 1.4



De entre las cuales, elegimos la alternativa 02, dado que con ella evitamos tener que instalar la mecha en el estrato inferior (presenta una alta resistencia), mientras que el reparto de mechas en planta aumenta muy poco.

### CASO N°2

Profundidad de la mecha drenante (m)	$t_{90}$ (años)
Sin mecha	30
3	13,5
4	7,7
6 (a=1; b=1)	4,4
<b>6 (a=0,8; b=0,8)</b>	<b>2,6</b>
<b>6 (a=0,6; b=0,6)</b>	<b>1,33</b>

Profundidad de la mecha drenante (m)	$t_{90}$ (años)
Sin mecha	30
3	13,5
4	7,7
4 (a=0,8; b=0,8)	5,2
4 (a=0,6; b=0,6)	3,4
4 (a=0,5; b=0,5)	2,6
<b>4 (a=0,4; b=0,4)</b>	<b>1,9</b>

Figura 4.76 Resumen de los resultados obtenidos para el 90% del grado de consolidación en este Caso N°2

Entre las alternativas estudiadas para este caso se podría optar por una de estas 2 opciones:

#### Alternativa 01

- ~ Profundidad de la mecha: 6m.
- ~ Separación entre mechas e hileras: 1.4 (0.7 x 2)

#### Alternativa 02

- ~ Profundidad de la mecha: 4m.
- ~ Separación entre mechas e hileras: 0.8

En esta ocasión, la elección de la alternativa óptima no es tan clara como en el caso N°1. Se necesitaría hacer un estudio económico-constructivo de ambas alternativas para determinar la solución a adoptar.



## 5. Conclusiones

Las conclusiones que se derivan de este Trabajo Final de Grado son las siguientes:

- Hemos repasado la teoría de consolidación 1D existente en la bibliografía habitual que se utiliza para el estudio en el Grado de Ingeniería Civil.
- Se ha planteado la extensión del problema de consolidación a escenarios con geometrías 2D y 3D, presentando el modelo matemático que se corresponde con este problema concreto.
- Se ha aprendido el manejo del programa informático *SICOMED\_3D*, empleándolo para la resolución numérica de escenarios de consolidación 3D con mechas drenantes verticales.
- Se han planteado y resuelto 2 escenarios reales de consolidación de un suelo formado por 3 capas con distintas propiedades, empleando la herramienta de cálculo *SICOMED\_3D*. En concreto, se han realizado simulaciones en las cuales se juega con la profundidad de la mecha drenante, así como su reparto en planta.
- Finalmente, se ha realizado un análisis de los resultados obtenidos, aportando la solución óptima para cada uno de los escenarios propuestos.



## 6. Bibliografía

Barron, R.A. Consolidation of fine grained soils by drain wells. Transactions of the ASCE, 113, 718-742 (1948)

Berry, P.L. y Reid, D. Mecánica de Suelos. McGraw-Hill Int. Santa Fe de Bogotá, Colombia (1993)

Carrillo, N. Simple two and three dimensional cases in the theory of consolidation of soils. Journal of Mathematics and Physics, 21 (1), 1, 1-5 (1942)

Di Francesco, R. Exact Solution of Terzaghi's Consolidation Equation and Extension to Two/Three-Dimensional Cases. Applied Mathematics, 4, 713-717 (2013)

<http://www.terratest.cl/tecnologia-mechas-drenantes.html>

SICOMED\_3D ('Simulación de consolidación con mechas drenantes'). García-Ros, Alhama, I. y Sánchez Pérez, J. F. © UPCT.(2016)

Terzaghi K. Die Berechnung der Durchlässigkeitszifferdes tones aus dem verlauf der hydrodynamischen spannungserscheinungen. Akademie der Wissenschaften in Wien, Technical report II a, 132 N 3/4, 125-138. Sitzungsberichte Mathnaturwiss Klasse Abt (1923)

Terzaghi K. Theoretical Soil Mechanics. Ed. Wiley, New York (1943)