

Modelización numérica de drenes verticales mediante el programa Midas

Numerical Modelling of Vertical Drains through Midas Software

Pablo Martín Blanco^{1*}, Svetlana Melentijevic²

Resumen

Los drenes verticales permiten la disminución del camino de drenaje para la expulsión del agua del terreno disminuyendo el tiempo de consolidación de los suelos blandos.

En el presente artículo se realiza un análisis del comportamiento tenso-deformacional del terreno tratado mediante drenes verticales debajo de terraplenes. El análisis se ha efectuado mediante el programa comercial de elementos finitos Midas. Se estudia el comportamiento de un terreno tratado con diferentes técnicas de drenaje para comparar la evolución de los asientos verticales y disipación de los excesos de presión intersticial.

Los modelos numéricos se han desarrollado para un terreno tratado con columnas de grava, columnas de grava encapsuladas y drenes verticales prefabricados tipo mecha. Abarcan estudio de célula unitaria en condiciones axi-simétricas, en deformación plana y en 3D, terraplén estudiado en condiciones 3D y 2D.

En cuanto al resultado del estudio deformacional se ha corroborado que es importante utilizar un software de elementos finitos como herramienta en el cálculo ya que se obtiene información precisa del comportamiento del conjunto de terraplén – cimiento.

Palabras clave: Drenes verticales, columnas de grava, drenes prefabricados, métodos numéricos, célula unitaria.

Abstract

Vertical drains are high permeability wells that allow a decreasing drainage path for water expulsion from soil, thus reducing the time of consolidation of soft soils.

This paper aims at analysing the behaviour of a treated soil with stone columns under embankments, and researching into deformational behavior of the same ground through different analyses with the finite element software Midas. Furthermore, it will be presented a detailed study of the treated soil behavior with different vertical drain techniques so as to compare maximum displacement, excess pore pressures and the safety factor variation when stone columns are used as improvement technique.

Performed models in Midas that include analysis of stone columns, geotextile-encased stone columns and prefabricated vertical band drains are as follows: unit cell axisymmetric analysis, 2D plane-strain with geometric and permeability matches, unit cell and all the set 3D analysis and 2D plane-strain of the model.

The deformational study emphasizes the importance of the application of the finite element software in order to obtain detailed information on the behaviour of embankment and foundation.

Keywords: vertical drains, stone columns, prefabricated vertical drains, numerical methods, unit cell.

1. INTRODUCCIÓN

La necesidad de utilizar zonas con suelos de deficientes características da lugar al desarrollo de una gran variedad de técnicas de mejora de terreno, cuya finalidad es aumentar la capacidad portante, disminuir la deformabilidad de los suelos blandos y reducir los asientos.

Este artículo prestará su atención al tratamiento del terreno mediante técnicas de drenaje vertical, concretamente columna de grava, columna de grava encapsulada y dren prefabricado tipo mecha.

Hoy en día el uso de una herramienta de elementos finitos (MEF) en la modelización geotécnica es realmente importante ya que ofrece ventajas de cómputo y visualización de resultados.

2. BASE TEÓRICA

2.1. Distintos sistemas de drenaje vertical.

La técnica de columnas de grava consiste en la perforación vertical del suelo y su posterior relleno con material granular compactado. Su ejecución se lleva a cabo mediante vibro-reemplazamiento/vibrosustitución o vibrodesplazamiento. El tratar un terreno con columnas de grava tiene por principal finalidad aumentar la capacidad portante del suelo, reducir los asientos, reducir el potencial de licuefacción y acelerar la consolidación del terreno tratado.

* Autor de contacto: Pablomb1991@gmail.com

¹ Máster de Mecánica de Suelo e Ingeniería Geotécnica. Laboratorio de Geotecnia del CEDEX.

² Departamento de Geodinámica de la Universidad Complutense de Madrid (UCM).

Como las columnas de grava son normalmente más rígidas que el suelo circundante, la mayor parte de la carga aplicada es transferida a la columna.

Cuando el suelo donde se quiere realizar un tratamiento de mejora, tiene una resistencia al corte sin drenaje " S_u " muy baja se utiliza geotextil que encapsula a la columna consiguiendo su uniformidad, evitando la deformación horizontal y eliminando la posibilidad de contaminación por finos en la columna.

La técnica de drenes verticales prefabricados consiste en una mejora del terreno muy utilizada debido a su relación calidad-precio. Se utilizan conjuntamente con precarga para acelerar el proceso de consolidación del terreno blando. Considerando que no poseen suficiente rigidez como es el caso de columnas de grava, no influyen en la reducción de los asentos.

2.2. Modelización numérica mediante el software Midas

Midas es un software de elementos finitos que permite el diseño de cualquier tipo de estructura tanto en condiciones 2D como en 3D.

El comportamiento de los sistemas de mejora del terreno, como columnas de grava y drenes prefabricados es tridimensional. Por lo tanto, cuando se realizan modelos en 2D, es necesario realizar una serie de simplificaciones o hipótesis, para poder pasar de geometría compleja en 3D a geometría sencilla en 2D.

El modelo en deformación plana 2D se utiliza generalmente para geometrías con secciones transversales uniformes.

En un estudio cuya situación real sea un conjunto de elementos de mejora del terreno, repartidos en malla de geometría regular, el comportamiento de un elemento individual representa el comportamiento del conjunto. Es aconsejable realizar modelos en simetría axial reduciendo horas de diseño y cálculo o modelos en 3D que representen el conjunto.

2.2.1. Análisis axi-simétrico de drenes verticales

Los elementos drenantes se ubican uniformemente en mallas de diferentes geometrías: triangulares, cuadradas, hexagonales, etc. (ver figura 1).

En la figura 1 se observa el área de influencia de cada configuración indicada en la figura 2 en color naranja, una vez conocidas estas áreas con diferentes geometrías se calcula un área circular equivalente para cada geometría, de tal forma que ambas áreas sean las mismas (celda unidad).

En la tabla 1 se resumen las expresiones de cálculo del diámetro equivalente de las tres configuraciones en función de la separación entre elementos drenantes cuando se tiene en cuenta la semejanza de asentos e igualdad de tiempos de consolidación.

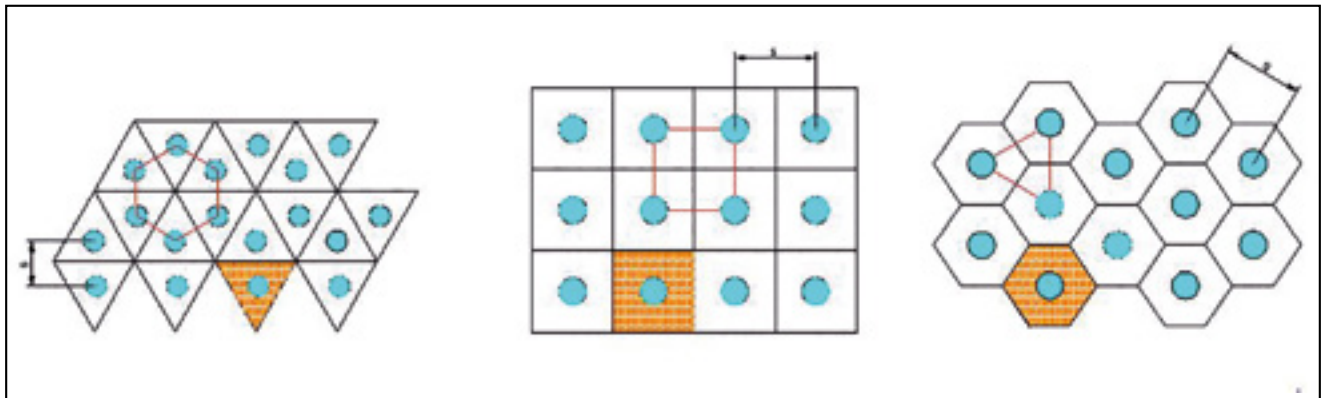


Figura 1. Disposición de los drenes verticales: hexagonal, cuadrada y triangular (cimentada 2016).

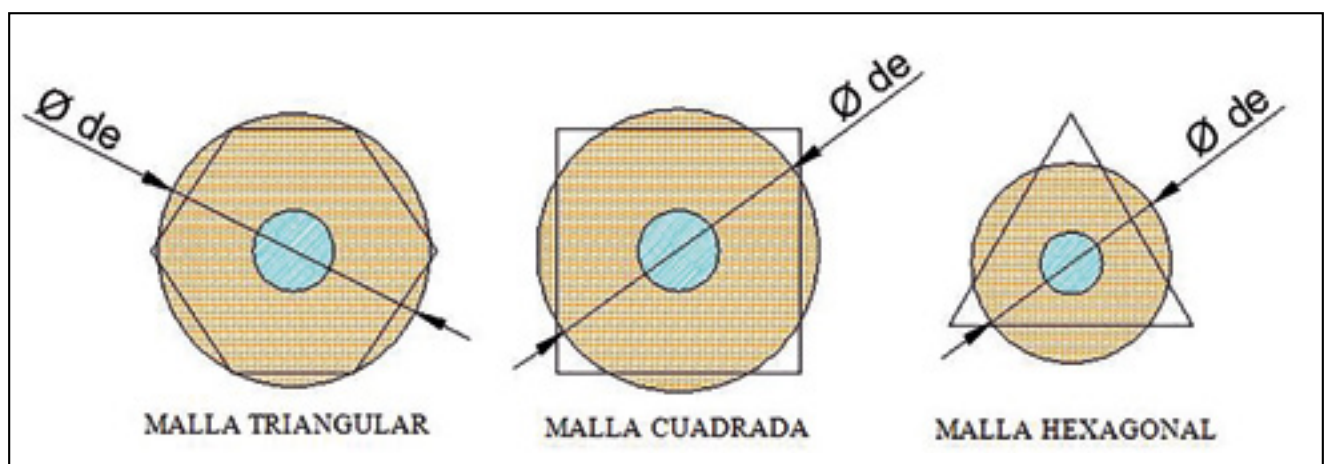


Figura 2. Transformación de la geometría en malla a un área circular equivalente para el análisis axi-simétrico (cimentada 2016).

Tabla 1. Áreas de influencia y radios de la celda unidad (adaptada de Castro 2008)

	Disposición de la malla	Área de influencia	Radio de la celda unidad
Igualdad de asientos	Triángular	$\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot s^2$	$r_1 = \sqrt{\frac{2\sqrt{3}}{\pi}} \cdot \frac{s}{2} \approx 0,525s$
	Cuadrada	s^2	$r_1 = \sqrt{\frac{4}{\pi}} \cdot \frac{s}{2} \approx 0,564s$
	Hexagonal	$\frac{3\sqrt{3}}{4} \cdot s^2$	$r_1 = \sqrt{\frac{3\sqrt{3}}{4\pi}} \cdot \frac{s}{2} \approx 0,643s$
Igualdad de tiempos de consolidación	Triángular	$\frac{5s^2}{36}$	$r_1 = \frac{\sqrt{10}}{3} \cdot \frac{s}{2} \approx 0,527s$
	Cuadrada	$\frac{s^2}{6}$	$r_1 = \frac{2\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{s}{2} \approx 0,577s$
	Hexagonal	$\frac{s^2}{4}$	$r_1 = \sqrt{2} \cdot \frac{s}{2} \approx 0,707s$

2.2.2. Análisis en deformación plana de drenes verticales

Para el paso del modelo real al modelo 2D en deformación plana se utilizan las conversiones siguientes que se observan en la figura 3:

El ancho equivalente “a” de cada franja que representa a las columnas de grava será:

$a = \sqrt{\frac{\pi d^2}{4}}$, mientras que la separación de las columnas entre ejes será igual a la separación “s” entre columnas en el caso de que tengan una disposición en malla rectangular o “ $s \cdot \cos(30^\circ)$ ” en el caso de que la disposición sea en triángulos equiláteros (tresbolillo), correspondiendo a los valores dados en la tabla 1.

2.2.3. Conversión de análisis en simetría axial a deformación plana

Con el fin de realizar un modelo realista en 2D en elementos finitos, hay que establecer la equivalencia entre el modelo axi-simétrico y en deformación plana. Dicha equivalencia puede conseguirse de tres maneras para columnas de grava: (a) tiempo de consolidación, (b) resistencia media al corte, (c) reducción de asientos (Castro, 2008).

Entre las tres propiedades anteriores, para el estudio de drenes verticales tipo mecha se aplica la transformación del tiempo de consolidación (Hird et al. 1992).

La figura 4 representa el paso de una célula unitaria en simetría axial a un modelo en deformación plana.

Para modelización de columnas de grava, se propusieron dos métodos de conversión para transformar un problema en simetría axial al de deformación plana que consideran los efectos de drenaje radial u horizontal y la reducción de la tensión vertical en la columna de grava del terreno mejorado (Tan et al, 2008) (ver figura 5).

Método 1: Para obtener igualdad en permeabilidad en la trayectoria normal al perímetro de la columna, la columna en deformación plana o anchura de la pared puede ser tomado igual al diámetro de la columna.

$$b_r = r_c \quad [2.1]$$

Esta transformación geométrica ha sido del mismo modo aplicada por Indraratna y Redana (2000) en la conversión a deformación plana con permeabilidades equivalentes. En consecuencia, el radio de la zona de drenaje “R” puede ser equiparado con la anchura de la franja en deformación plana “B”.

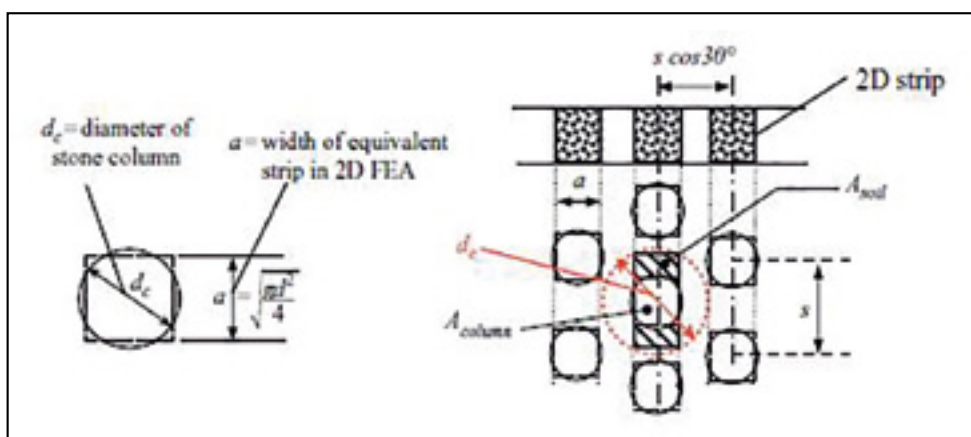


Figura 3. Paso de la geometría de análisis axi-simétrico a deformación plana en 2D. (GHD Geotechnics).

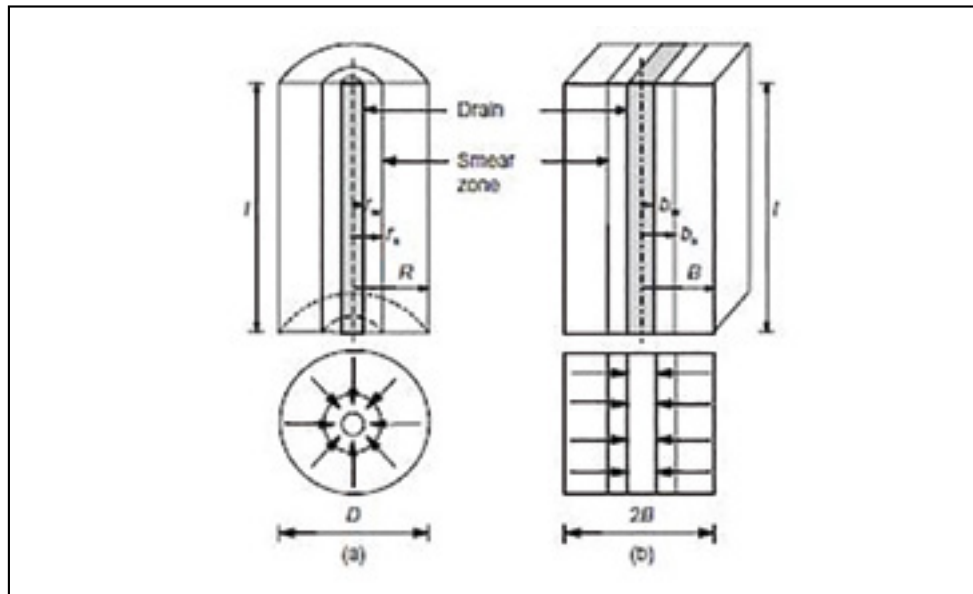


Figura 4. Transformación de simetría axial a deformación plana (Indraratna y Redana, 1997).

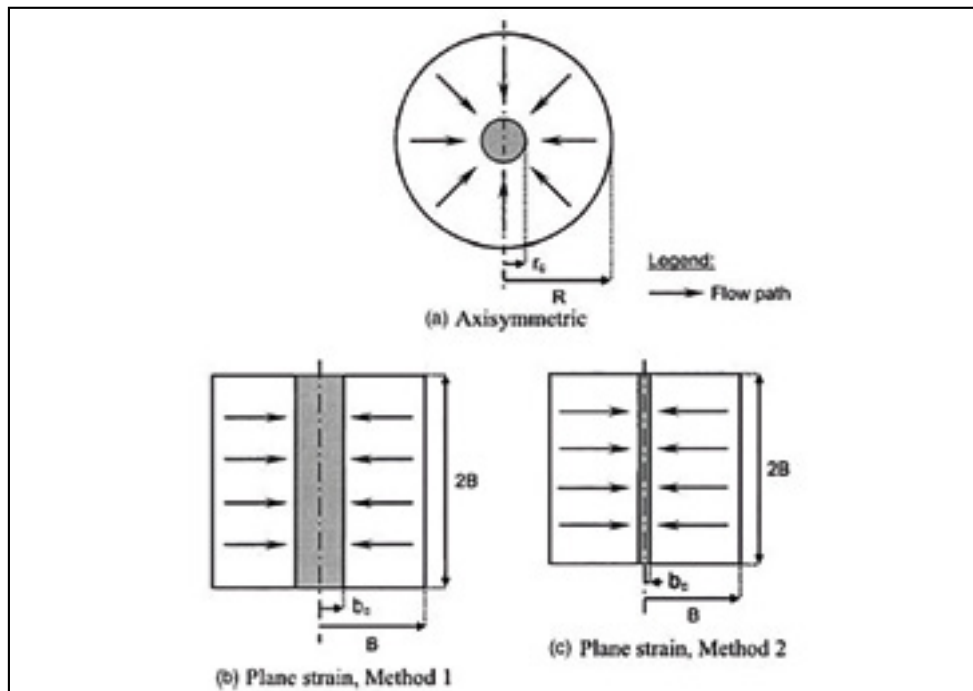


Figura 5. Célula unitaria en condiciones axi-simétricas y en deformación plana (Tan et al, 2005).

Las aplicaciones prácticas en elementos finitos permiten una fácil transición entre el mallado de un modelo en simetría axial a deformación plana, ya que ambos derivan de la misma geometría básica de entrada en 2D, sin embargo, las rigideces del nuevo modelo en deformación plana necesitan ser ajustadas por la siguiente relación de equivalencias entre rigideces columna-suelo.

$$E_{c,pl} \cdot a_{s,pl} \cdot E_{s,pl} \cdot (1 - a_{s,pl}) = E_{c,ax} \cdot a_{s,ax} + E_{s,ax} \cdot (1 - a_{s,ax}) \quad [2.2]$$

donde:

E_c , E_s módulo de elasticidad de la columna y suelo (Los subíndices pl, ax hacen referencia al modelo de deformación plana y axi-simétrico).

A_c y A_s son las áreas de la sección transversal de columna y suelo

a_s – factor de reemplazamiento definido mediante la siguiente ecuación:

$$a_s = \frac{A_c}{A_c + A_s} \quad [2.3]$$

Para este caso la expresión se simplifica tomando $E_{s,pl} = E_{s,ax}$, y así $E_{c,pl}$ puede ser determinado.

Esta transformación de la permeabilidad se realiza usando la ecuación analítica siguiente:

$$\frac{K_{h,pl}}{K_{h,ax}} = \frac{F(N)_{pl}}{F(N)_{ax}} \cdot \left[\frac{m_{vs} \cdot m_{vc} \cdot (1 - a_s)}{m_{vc} \cdot (1 - a_s) + m_{vs} \cdot a_s} \right]_{pl} \cdot \left[\frac{m_{vc} \cdot (1 - a_s) + m_{vs} \cdot a_s}{m_{vs} \cdot m_{vc} \cdot (1 - a_s)} \right]_{ax} \cdot \frac{B^2}{R^2} \quad [2.4]$$

dónde:

K_{hp} y $K_{h,ax}$: permeabilidad horizontal en el modelo de deformación plana y axi-simétrico

B : ancho equivalente en deformación plana al radio equivalente en célula unitaria

R : radio de influencia en simetría axial

K_s : permeabilidad de la zona de efecto de hinca (smear zone)

$$F(N) = \frac{\left[\frac{N^2}{(N^2 - 1)} \right] \cdot \ln N - (3N^2 - 1)}{4N^2} \quad [2.5]$$

Con relación de diámetro $N=R/r_c$ para simetría axial y $N=B/b_c$ para deformación plana

$$n_{vs} = \frac{\alpha_{vs}}{1 + e_s} \quad m_{vc} = \frac{\alpha_{vc}}{1 + e_c} \quad [2.6]$$

α_{vs} y α_{vc} son los coeficientes de compresibilidad de suelo y columna.

e_c y e_s son el índice de huecos de columna y suelo.

El coeficiente de permeabilidad vertical en deformación plana " $K_{v,pl}$ ", tiene poca influencia en el grado de consolidación global ya que el flujo de agua en el suelo es predominantemente radial, por lo que se asumen simplemente que $K_{v,pl} = K_{v,ax}$.

Método 2: Se plantea una transformación geométrica alternativa basada en la equivalencia de permeabilidades tanto en el modelo de simetría axial como en deformación plana. Este concepto ha sido desarrollado para convertir un sistema de drenaje vertical en la equivalente franja modelada como dren en deformación plana (Indraratna y Redana, 1997).

Se conservan las áreas de la sección transversal del suelo y de la columna en ambos modelos, siendo el ancho de la franja en deformación plana:

$$b_c = B \cdot \frac{r_c^2}{R^2} \quad [2.7]$$

Este valor resulta menor que el valor del modelo en simetría axial. La relación entre R y B puede darse siguiendo la ecuación de equivalencia de superficies según sea la disposición de las columnas triangular, cuadrada o hexagonal (ver tabla 1)

2.3. Cálculo del dren prefabricado.

Para poder realizar el modelo en simetría axial, se debe tener en cuenta: (a) el diámetro del dren, (b) el área del efecto de hinca ("smear zone"), (c) el radio de influencia del dren.

La sección habitual de los drenes prefabricados es rectangular, y es necesario transformarla en una sección circular equivalente de diámetro d_w , (ver figura 6).

Existen diferentes métodos de obtención, igualmente válidos, del diámetro equivalente:

- Equivalencia de perímetros $\rightarrow d_w = \frac{2(a+b)}{\pi}$ [2.8]

- Atkinson y Eldred (1981) $\rightarrow d_w = \frac{a+b}{2}$ [2.9]

- Long y Covo (1994) $\rightarrow d_w = 0,5a + 0,7b$ [2.10]

Para la obtención del diámetro de influencia debido a la hinca del dren se pueden utilizar las expresiones siguientes:

- Hansbo (1987) $\rightarrow d_s = 2 \cdot d_m$ [2.11]

- Jamiolkowski (1981) $\rightarrow d_s = 2,5 \text{ a } 3 d_m$ [2.12]

- Redana (1999) $\rightarrow d_s = 5d_m$ [2.13]

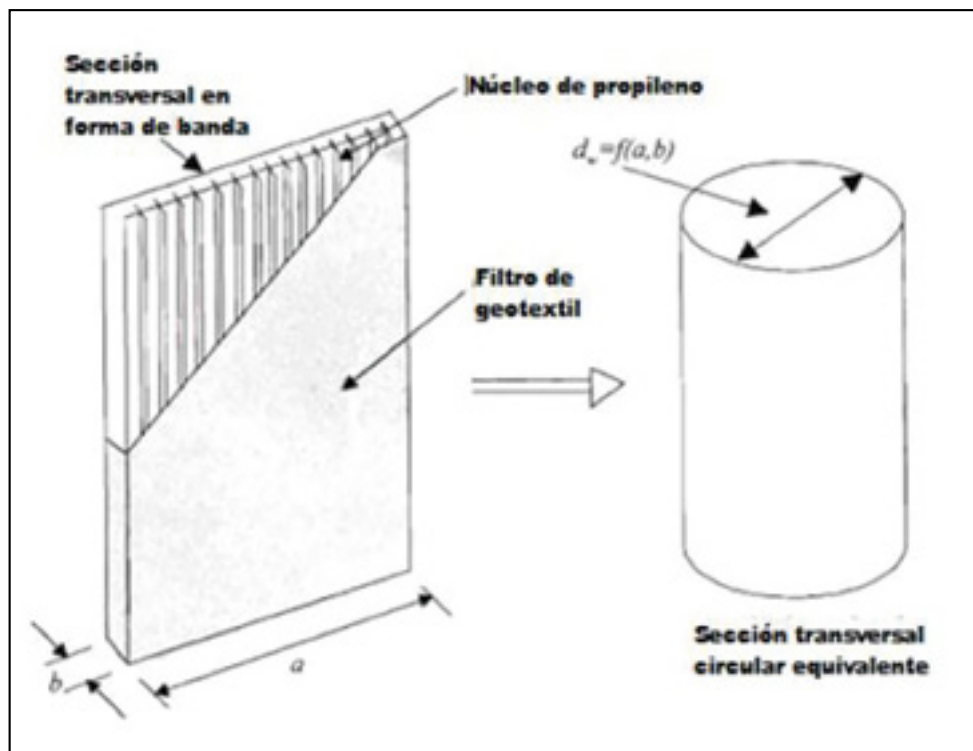


Figura 6. Transformación de la banda del dren de sección rectangular a circular (Sathananthan, 2005).

El valor de la permeabilidad en la zona de efecto de la hinca está reducido en comparación con la permeabilidad del suelo natural, por la compactación debido a la hinca.

Para concluir con los cálculos, se necesita conocer el radio de influencia del dren. Para ello se utilizan una de las ecuaciones descritas anteriormente (ver tabla 1 – igualdad de asientos) según la disposición del dren.

Para la transformación de un dren prefabricado de simetría axial a deformación plana se realiza un ajuste de los radios que componen el dren: radio del dren (r_w), radio de la zona de alteración (r_s) y radio de influencia (R) (ver figura 4). Las dimensiones del dren pueden ser determinadas considerando que la capacidad total del dren es la misma en los dos sistemas de cálculo. ($B=R$). Para drenes con disposición en malla cuadrada las expresiones a utilizar son las siguientes:

$$b_w = \frac{\pi \cdot r_w^2}{2S} \quad (2.15) \quad b_s = \frac{\pi \cdot r_s^2}{2S} \quad [2.14]$$

Si la disposición de los drenes es triangular las expresiones son:

$$b_w = \frac{1,143 \cdot \pi \cdot r_w^2}{S} \quad (2.17) \quad b_s = \frac{1,143 \cdot \pi \cdot r_s^2}{S} \quad [2.15]$$

La segunda transformación es por igualdad geométrica variando así la permeabilidad. Se supone equivalencias de rigideces para simplificar el problema. El primer cálculo es la permeabilidad horizontal del suelo estudiado en deformación plana K_{hp} .

$$\frac{K_{hp}}{K_h} = \frac{0,67}{[\ln(n) - 0,75]} \quad [2.16]$$

Una vez se conoce este valor con la expresión se calcula la permeabilidad horizontal de la zona alterada K'_{hp}

$$\frac{K'_{hp}}{K_{hp}} = \frac{\beta}{\frac{K_{hp}}{K_h} \cdot \left[\ln\left(\frac{n}{s}\right) + \left(\frac{K_h}{K'_h}\right) \cdot \ln(s) - 0,75 \right] - \alpha} \quad [2.17]$$

3. MODELOS DE ESTUDIO

3.1. Modelo de un terraplén sobre un suelo mejorado con columnas de grava.

El objetivo de este apartado es evaluar el comportamiento deformacional de un suelo tratado bajo la carga de un terraplén.

El modelo consiste en un terreno blando de 10 m de potencia tratado con columnas de grava de 0,9 m de diámetro con una disposición en planta triangular ($s = 2$ m). Este terreno está apoyado sobre un suelo base y está sometido a la carga de un terraplén de 6 metros de altura, ejecutado por fases de 1m cada una.

Los análisis que se han llevado a cabo han sido: análisis 3D (ver figura 7 A), análisis de célula unitaria en simetría axial (ver figura 7 B), análisis 2D del conjunto de terraplén-suelo-columnas de grava (ver figura 7 C) y análisis 2D transformando el conjunto de columnas y suelo en un bloque homogéneo con parámetros equivalentes (ver figura 7 D).

Las expresiones utilizadas para calcular los parámetros equivalentes del suelo tratado con columnas de grava son (Madhav y Nagpure, 1996):

$$\tan^2(45 + \phi_{\text{bloque}}) = a_r \cdot \tan^2\left(45 + \phi_{\text{columna}}/2\right) + (1 - a_r) \cdot \tan^2\left(45 + \phi_{\text{arcilla}}/2\right) \quad [2.18]$$

$$c_{\text{bloque}} = \frac{c_{\text{columna}} \cdot a_r \cdot \sqrt{\tan^2(45 + \phi_{\text{columna}}/2)} + c_{\text{suelo}} \cdot (1 - a_r) \cdot \sqrt{\tan^2(45 + \phi_{\text{suelo}}/2)}}{a_r \cdot \tan^2(45 + \phi_{\text{columna}}/2) + (1 - a_r) \cdot \tan^2(45 + \phi_{\text{suelo}}/2)} \quad [2.19]$$

$$E_{\text{bloque}} = E_{\text{columna}} \cdot \left[\left(a_r^2 + \frac{E_{\text{suelo}}}{E_{\text{columna}}} \cdot (1 - a_r)^2 \right) \right] \quad [2.20]$$

Los parámetros utilizados para realizar el modelo se adjuntan en la siguiente tabla (ver tabla 2):

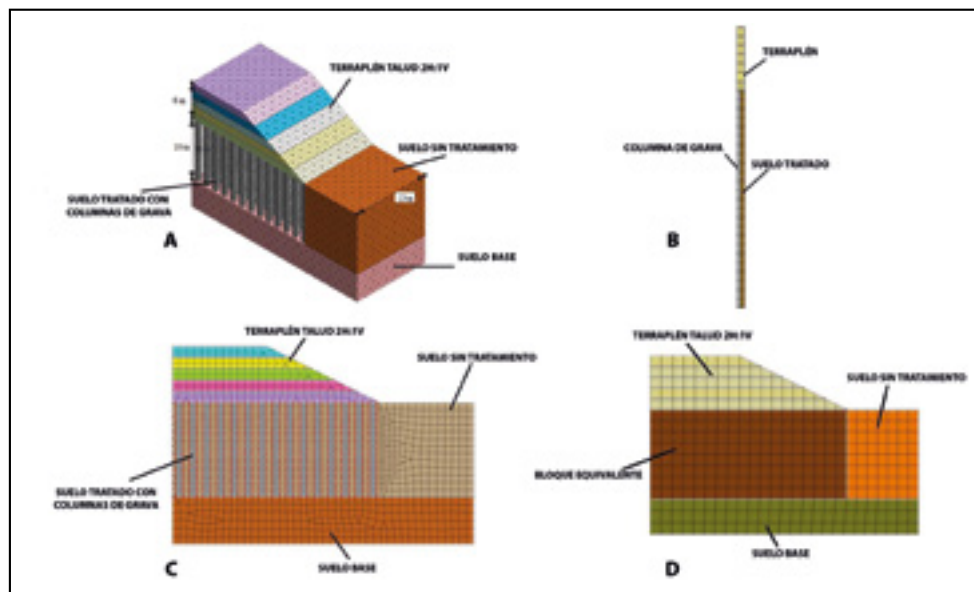


Figura 7. Ejemplos de los modelos realizados correspondientes a cada uno de los análisis.

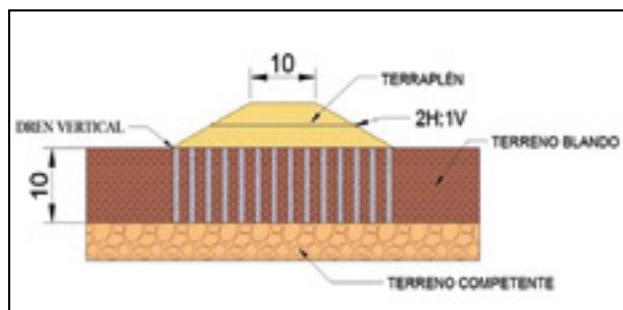
Tabla 2. Parámetros geotécnicos utilizados en el estudio del terraplén de la figura 7

Parámetros	Terraplén	Suelo	Suelo base	Columnas de grava
PESO ESPECÍFICO (KN/m ³)	17	17	21	22
MÓDULO DE ELASTICIDAD "E" (KPa)	30.000	3.000	30.000	60.000
COHESIÓN "c" (KPa)	0	2	5	0
ÁNGULO DE ROZAMIENTO INTERNO "Φ" (°)	30	26	28	40
COEFICIENTE DE POISSON "ν"	0,3	0,3	0,3	0,3

3.2. Estudio de consolidación de un terraplén en un terreno mejorado con drenes verticales.

En este apartado se realiza un análisis mediante el software de elementos finitos, Midas, en el que se estudia el comportamiento de un terreno tratado con distintos tipos de drenes verticales al someterlo a una carga de terraplén de 6 metros de altura (ver figura 8).

Se estudia un suelo blando con una potencia de 10 m con el nivel freático en la superficie. Se realiza un tratamiento del suelo con distintos tipos de drenes verticales como se ha explicado anteriormente. El diámetro del elemento drenante variará en función de que sea un tipo de dren u otro. La coronación del terraplén tiene un total de 10 metros y está construido secuencialmente en dos fases de 3 metros con una duración de dos días cada una.

**Figura 8.** Modelo de estudio.

Los resultados son comparados con distintos modelos realizados:

1. Comportamiento de un terreno blando tratado con columnas de grava al ser sometido a la carga de un terraplén.
2. Comportamiento de un terreno blando tratado con columnas de grava encapsuladas en un geotextil al ser sometido a la carga de un terraplén.
3. Comportamiento de un suelo blando tratado con drenes prefabricados al ser sometido a la carga de un terraplén.
4. Comportamiento de un terreno blando natural sin tratamiento alguno, al ser sometido a la carga de un terraplén.

Los modelos desarrollados para este estudio son:

1. Modelo axi-simétrico de célula unitaria (2D).
2. Modelo de célula unitaria en deformación plana (2D).

3. Célula unitaria en 3D.
4. Modelo 3D con una disposición en planta de las columnas de grava en una malla rectangular debajo del terraplén.
5. Modelo del terraplén y el suelo tratado con columnas de grava en 2D (deformación plana).

Las propiedades geotécnicas de los materiales presentes en el estudio se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 3. Parámetros geotécnicos utilizados para el estudio del terraplén de la figura 8

Parámetro	Terraplén	Suelo blando	Columna de grava
PESO ESPECÍFICO (KN/m ³)	20	18	22
PESO SATURADO (KN/m ³)	21	19	23
MÓDULO DE ELASTICIDAD "E" (KPa)	35.000	5.000	100.000
COHESIÓN "c" (KPa)	10	10	1
ÁNGULO DE ROZAMIENTO INTERNO "Φ" (°)	30	22	42
COEFICIENTE DE POISSON "ν"	0,3	0,3	0,3
PERMEABILIDAD VERTICAL "K _v " (m/día)	1	1E-4	1
PERMEABILIDAD HORIZONTAL "K _h " (m/día)	1	3E-4	1

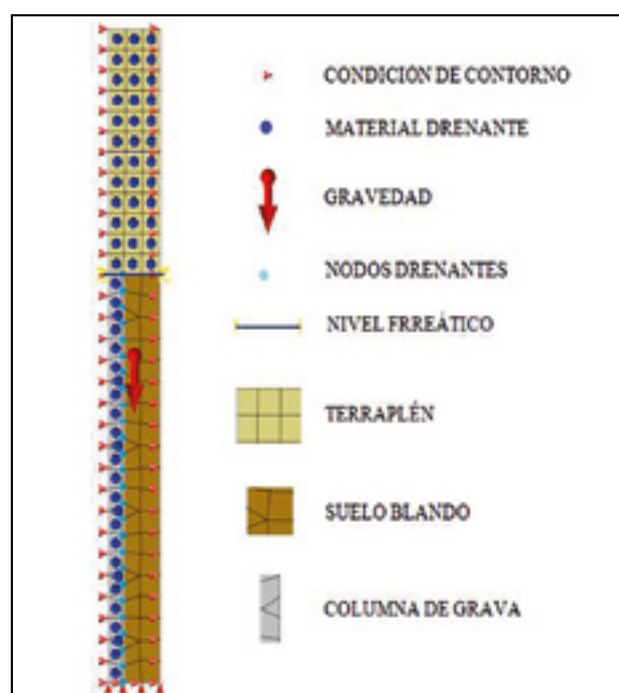
El criterio de rotura utilizado para definir los materiales ha sido el de Mohr Coulomb.

3.2.1. Modelo axi-simétrico de célula unitaria (2D)

Para un diámetro de columna de grava de 0,8 m con una disposición en planta cuadrada de 2,5 m de lado (ver tabla 1):

$$\text{Área de influencia: } s^2/6 = 2,5^2/6 = 1,042 \text{ m}^2$$

$$\text{Radio de la celda unidad: } 0,577 \cdot s = 0,577 \cdot 2,5 = 1,4425 \text{ m}$$

**Figura 9.** Célula unitaria.

3.2.2. Modelo en deformación plana de célula unitaria (2D)

Se utiliza una transformación geométrica basada en la equivalencia de permeabilidades (ver apartado 2.2.3). El modelo de célula unitaria es similar al anterior con variación de parámetros geométricos.

$$B = R/1,13 = 1,4425/1,13 = 1,27 \text{ m.}$$

$$b_c = \frac{r_c^2}{1,13 \cdot R} = \frac{0,4^2}{1,13 \cdot 1,4425} = 0,098 \text{ m.}$$

3.2.3. Modelo de célula unitaria en 3D

Se han utilizado las características geométricas del apartado anterior representando un modelo completo de columna-suelo circundante (ver figura 10).

3.2.4. Modelo 2D del terraplén y terreno

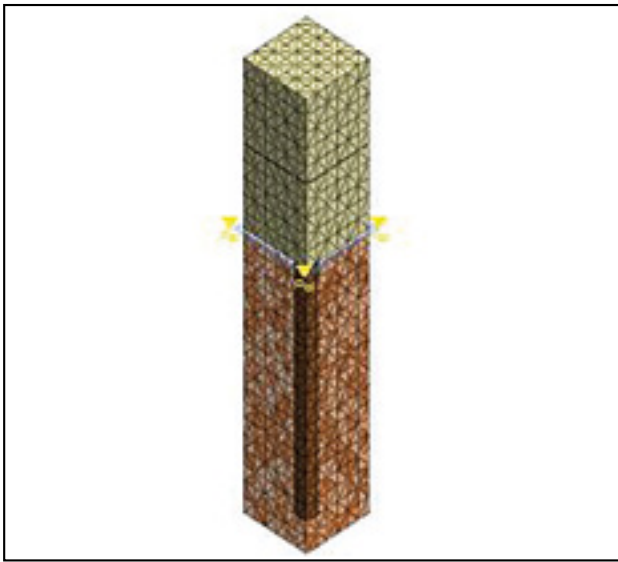


Figura 10. Célula unitaria en 3D.

Para el cálculo del modelo en 2D o modelo de franjas verticales equivalentes primero se ha de realizar una correcta transformación de la geometría estudiada en el modelo de célula unitaria.

$$\text{Diámetro equivalente de la columna de grava} \rightarrow \phi = \sqrt{\frac{\pi d^2}{4}} = \sqrt{\frac{\pi \cdot 0,8^2}{4}} = 0,71 \text{ m}$$

$$\text{Separación entre ejes de columnas} \rightarrow s = s \cos(30^\circ) =$$

$$= 2,5 \cdot \cos(30^\circ) = 2,165 \text{ m}$$

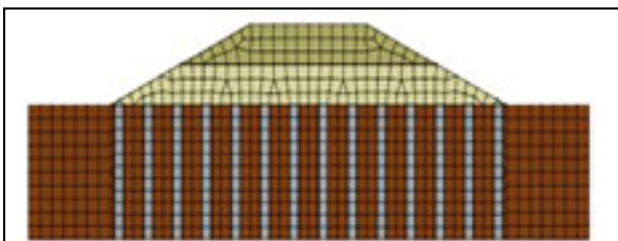


Figura 11. Modelo en 2D.

3.2.5. Modelo 3D del terraplén y terreno

El modelo consta de un terreno de 20 x 40 m, embebido en este se localiza la zona de terreno mejorado con las columnas de grava (14 x 34 m).

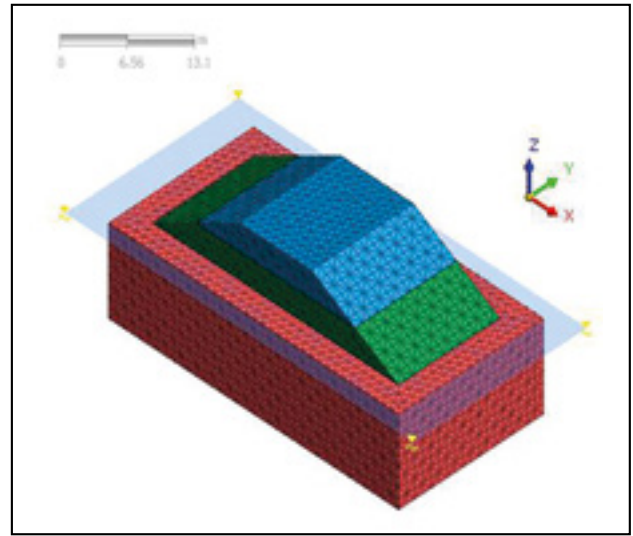


Figura 12. Modelo en 3D.

3.2.6. Tratamiento del terreno con columnas de grava encapsuladas con geomalla

En este apartado, la base de los cálculos es la misma pero en este caso se añade a los modelos un elemento geotextil entre la columna y el terreno.

Se han realizado los modelos de: célula unitaria en simetría axial (2D), análisis de la célula unitaria en deformación plana (2D) utilizando la transformación de equivalencia geométrica y análisis de la célula unitaria en 3D.

El patrón de desarrollo de estos modelos es igual que los desarrollados en el apartado de columnas de grava.

3.2.7. Tratamiento del terreno con drenes prefabricados

Con las expresiones indicadas en el apartado de teoría 2.3 para definir el dren a utilizar en los modelos, con la disposición en malla cuadrada de 2,5 m de lado se obtiene:

- El radio equivalente del dren es igual a 0,03 m.
- El radio equivalente de la zona alterada por la ejecución del dren son 0,21 m.
- El valor de la permeabilidad para la zona alterada se reducirá a la mitad, siendo la permeabilidad horizontal $1,5E^{-4}$ m/día y la vertical $5E^{-5}$ m/día.

$$k_s = k_h/2 = 3E^{-4}/2 = 1,5E^{-4} \text{ m/día}$$

$$k_s = k_v/2 = 1E^{-4}/2 = 5E^{-5} \text{ m/día}$$

- El radio de influencia del dren será de 2,825 m (ver tabla 1).

$$R = 1,13 \cdot s = 1,13 \cdot 2,5 = 2,825 \text{ m}$$

3.2.8. Modelo célula unitaria en simetría axial (2D) de dren con/sin área de influencia por la hincada del dren

Se han realizado dos modelos diferentes de dren prefabricado en célula unitaria para ver la influencia que existe si en el modelo del dren no se tiene en cuenta el efecto “smear zone” por la hincada del dren.

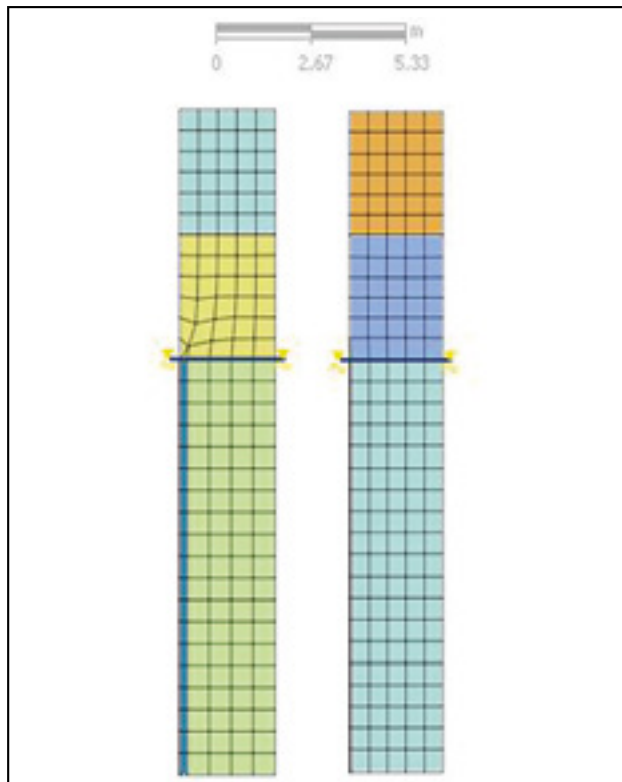


Figura 13. Dren modelado con área de influencia y sin área de influencia.

3.2.9. Modelo célula unitaria en deformación plana (2D) de dren prefabricado (Igualdad en permeabilidad)

Para el cálculo del análisis del dren con área de influencia en deformación plana, en primer lugar se han realizado las transformaciones pertinentes del modelo de simetría axial a deformación plana (Igualdad en permeabilidad ver ecuaciones 2.15 y 2.16).

$$R = B = 2,825 \text{ m} \quad b_w = 0,000565 \text{ m} \quad b_s = 0,0277 \text{ m}$$

3.2.10. Modelo célula unitaria en deformación plana (2D) de dren prefabricado (Igualdad geométrica)

En este caso se realiza la transformación por igualdad geométrica variando así la permeabilidad del modelo. Los valores obtenidos son (ver ecuaciones 2.19 y 2.20):

- $K_{hp} = 5,4E-5$
- $K_{hp}^* = 5,98E-7$

3.2.11. Modelo 2D del terreno natural en simetría axial y en deformación plana

Para contrastar todos los resultados y ver la efectividad de diferentes tratamientos mediante columnas de grava,

columnas de grava encapsuladas y drenes prefabricados se ha realizado un modelo 2d, axi-simétrico y en deformación plana, para ver cómo se comporta el suelo blando del presente estudio cuando no se le aplica técnica de mejora alguna.

Primeramente se ha realizado un estudio con métodos analíticos para determinar el tiempo necesario para que se produzca el 90 % de la consolidación y cuál es el asiento máximo del estrato blando con las condiciones de este caso.

Con la expresión del asiento máximo:

$$S_{\infty} = \frac{\Delta q}{E_M} \cdot H \text{ se obtiene que el valor máximo de asiento calculado analíticamente será próximo a } 17,83 \text{ cm.}$$

3.2.12. Determinación del factor de seguridad.

Para finalizar se ha realizado un estudio de como aumenta el factor de seguridad del terreno una vez que se realiza el tratamiento con columnas de grava. Cuando al terreno se le aplica una técnica de mejora del terreno como columnas de grava, estas proporcionan además una resistencia al desplazamiento horizontal, aumentando el factor de seguridad y limitando los círculos de rotura o superficies de deslizamiento a la zona del terraplén. La figura 14 representa las superficies de deslizamiento en el terreno: sin ninguna técnica de mejora donde los círculos de rotura son profundos y, círculos de rotura más superficiales, terminando en el pie del talud del terraplén, cuando el cimiento del terraplén está mejorado con columnas de grava.

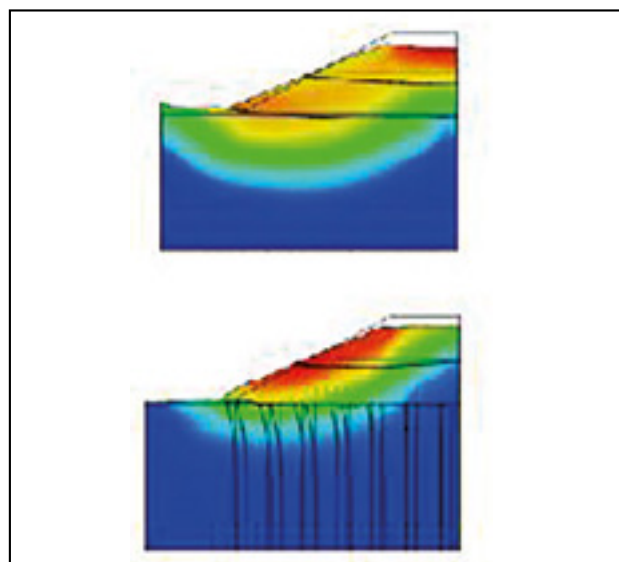


Figura 14. Círculos de rotura suelo sin tratar - tratamiento de columnas de grava.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

4.1. Mecanismo de deformación de las columnas de grava

El mecanismo de deformación obtenido en cada uno de los modelos (ver apartado 3.1) es preciso excepto en el modelo del bloque homogeneizado de propiedades equivalentes, ya que, al considerarse el conjunto suelo-columnas, no se puede obtener un resultado riguroso de los modos de rotura de las mismas

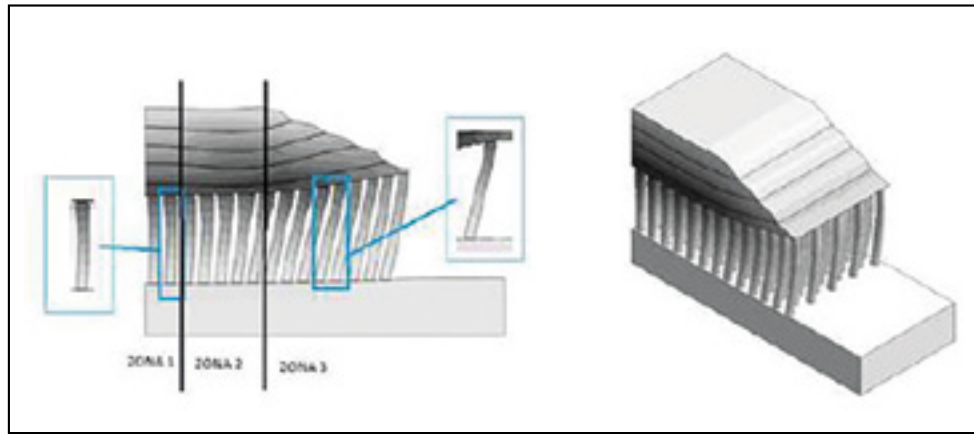


Figura 15. Comportamiento de las columnas de grava según su posición bajo el terraplén.

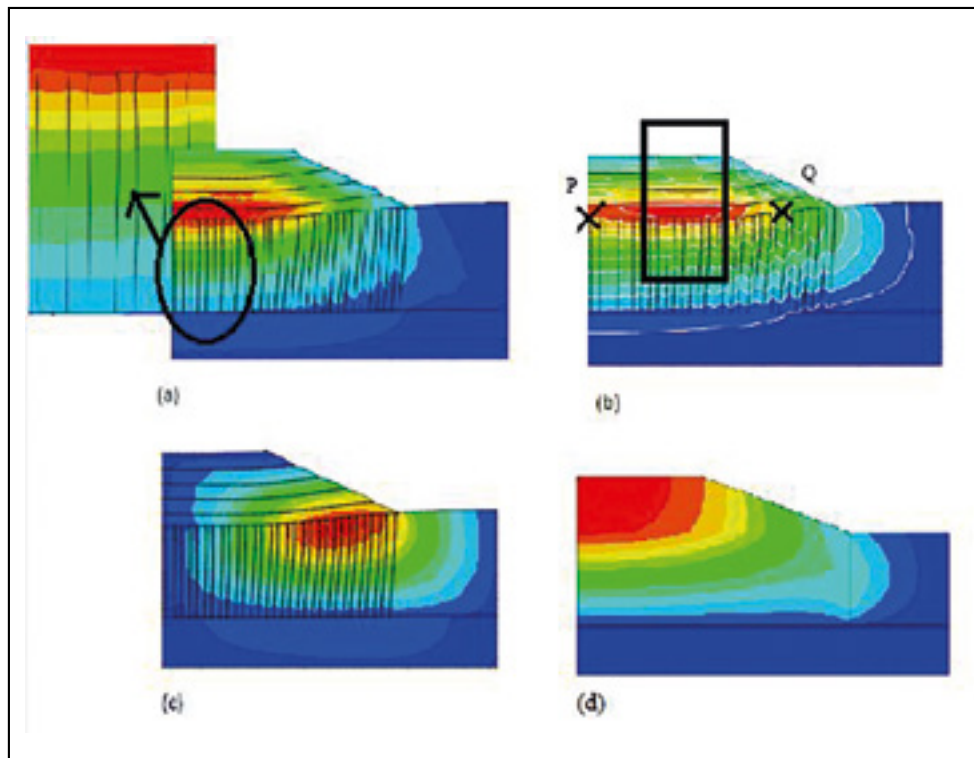


Figura 16. Ensanchamiento de CG (zona 1); (b) Desplazamiento vertical máximo (zona 2); (c) Desplazamiento horizontal máximo (zona 3); (d) Desplazamiento modelo homogeneizado 2D.

En el modelo en 2D y 3D se obtiene información precisa del comportamiento del sistema. Se pueden diferenciar 3 zonas según el comportamiento que experimenten las columnas de grava (ver figura 15).

Zona 1: lejos del talud del terraplén donde las columnas se someten a una deformación vertical y a un efecto de ensanchamiento.

Zona 2: junto detrás de la cresta del talud del terraplén, donde las columnas están sometidas a una deformación tanto vertical como horizontal por los efectos de ensanchamiento y flexión. Se produce el mayor desarrollo de los desplazamientos verticales.

Zona 3: debajo del talud del terraplén, donde las columnas se someten principalmente a flexión. Se observa el mayor desplazamiento horizontal de las columnas debido a esta flexión.

Estos resultados obtenidos de forma numérica parecen ser consistentes con los resultados del ensayo del modelo de centrifugación llevado a cabo por Steward y Fahey (1994)

para las columnas de grava ejecutadas como apoyo de terraplén de ferrocarril.

En la figura 16 se presentan los mecanismos de deformación para las diferentes zonas (ver figura a, b y c) junto al resultado de desplazamiento obtenido cuando se modela un bloque homogéneo de parámetros equivalentes en vez de las columnas de grava.

4.2. Terraplén cimentado sobre columnas de grava

En este apartado se ha realizado la comparación entre célula unitaria en simetría axial (2D), célula unitaria en deformación plana (2D), célula unitaria 3D y terraplén modelo en 2D y 3D.

En la figura 17 se observa la salida gráfica para cada uno de los análisis nombrados.

Las figuras 17-A, 17-C y 17-D representan los desplazamientos que experimentan los modelos siendo el color rojo el valor máximo y el azul en mínimo. Por otro lado, la figura B

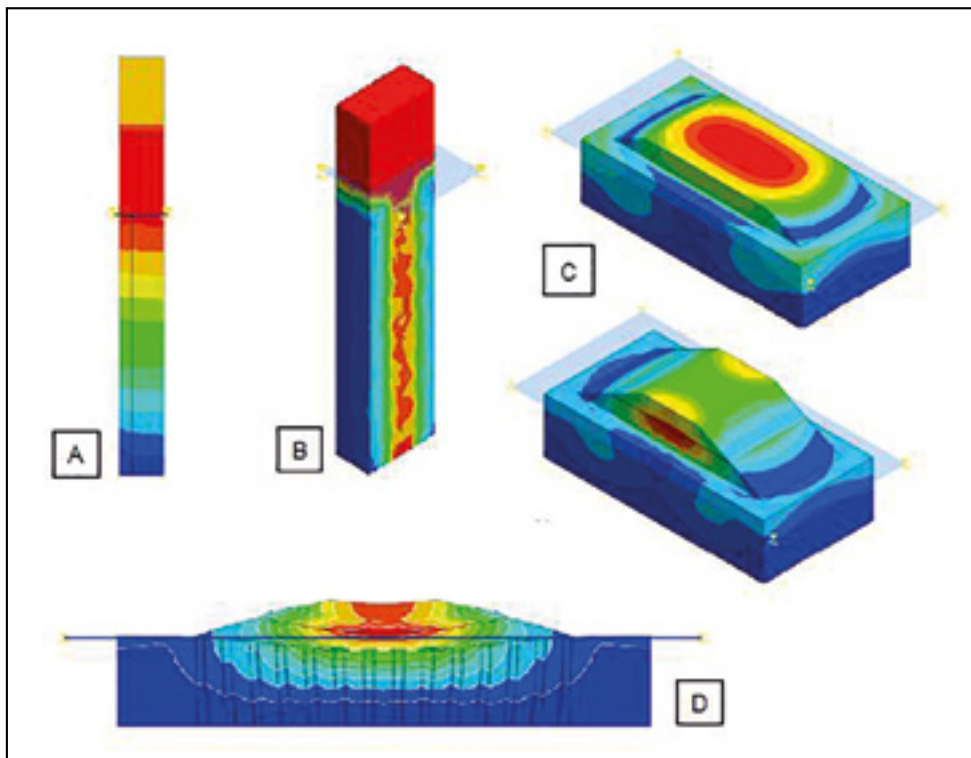


Figura 17. Análisis célula unitaria axi-simétrico (A), célula unitaria en 3D (B), terraplén modelo 3D (C) y terraplén modelo 2D (D).

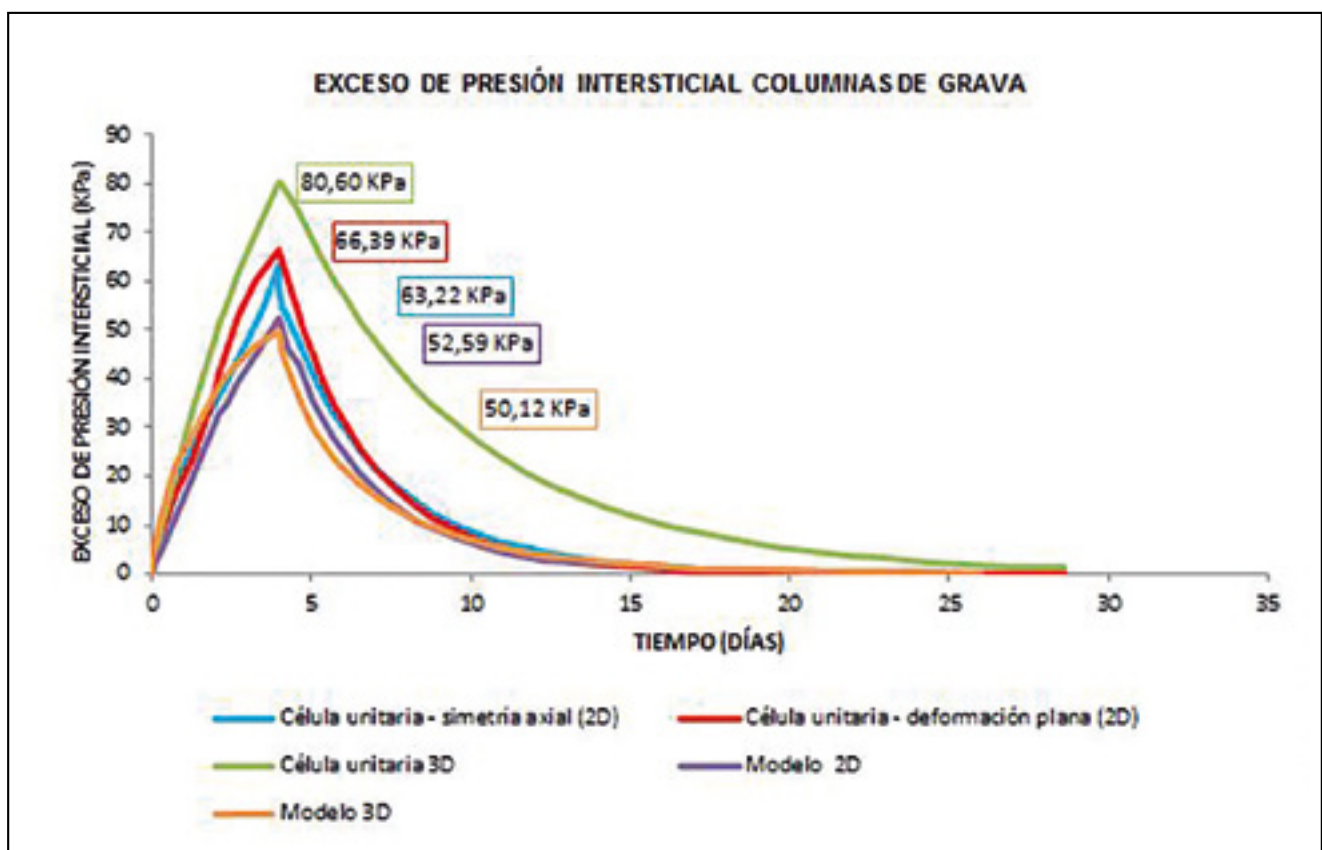


Figura 17. Comparativa de asentos máximos – terreno mejorado con columnas de grava.

representa la salida gráfica que ofrece el programa para la disipación de exceso de presión intersticial, donde el color rojo representa el valor mínimo y el azul el valor máximo.

En la figura 18 se presenta una comparación entre asentos máximos estimados en base del terraplén utilizando diferentes modelos.

Se obtienen valores con variaciones dentro de un rango ± 4 cm. En los análisis que son utilizados como modelos base debido a que la información obtenida en ellos es más precisa –análisis de célula unitaria en simetría axial y análisis del modelo en 3D– se observa que sus asentos máximos son 13,02 y 12,75 cm, es decir, la diferencia es mínima.

En cuanto a la comparativa de los excesos de presión intersticial tienen una diferencia algo mayor, estando el valor medio en un exceso de $60,5 \text{ KN/m}^2$ (ver figura 19).

4.3. Resultados para columnas de grava encapsuladas.

En este apartado se ha realizado la comparación entre célula unitaria en simetría axial (2D), en deformación plana (2D) y célula unitaria en 3D.

Se puede visualizar que los valores obtenidos son muy semejantes entre ellos, existiendo una ligera variación en el modelo de la célula unitaria en 3D (ver figura 20 y 21).

4.4. Comparativa de los resultados obtenidos para drenes prefabricados

La comparativa entre un dren modelado con el área de influencia de la hincia y modelado sin tenerlo en análisis axi-simétrico (2D), se observa que el asiento máximo es prácticamente el mismo (ver figura 22). Sin embargo se observa diferente evolución de los asientos con el tiempo, siendo por ejemplo a los 35 días la diferencia entre los modelos de 12,63 cm y 9,77.

Como se observa en la figura 13, ejecutar un dren sin área de influencia es equivalente a realizar el modelo con el radio del dren 0,03 m. Esto se traduce en que implica más

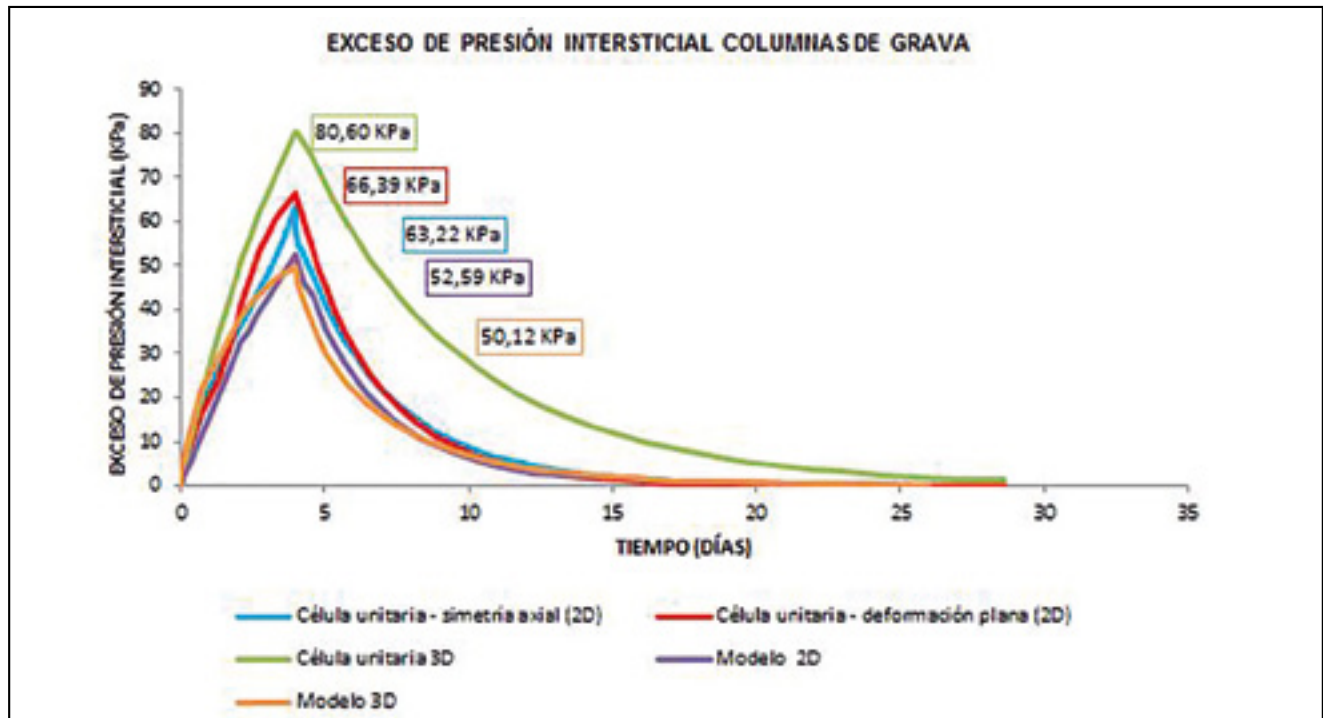


Figura 19. Comparativa de excesos de presión intersticial – terreno mejorado con columnas de grava.

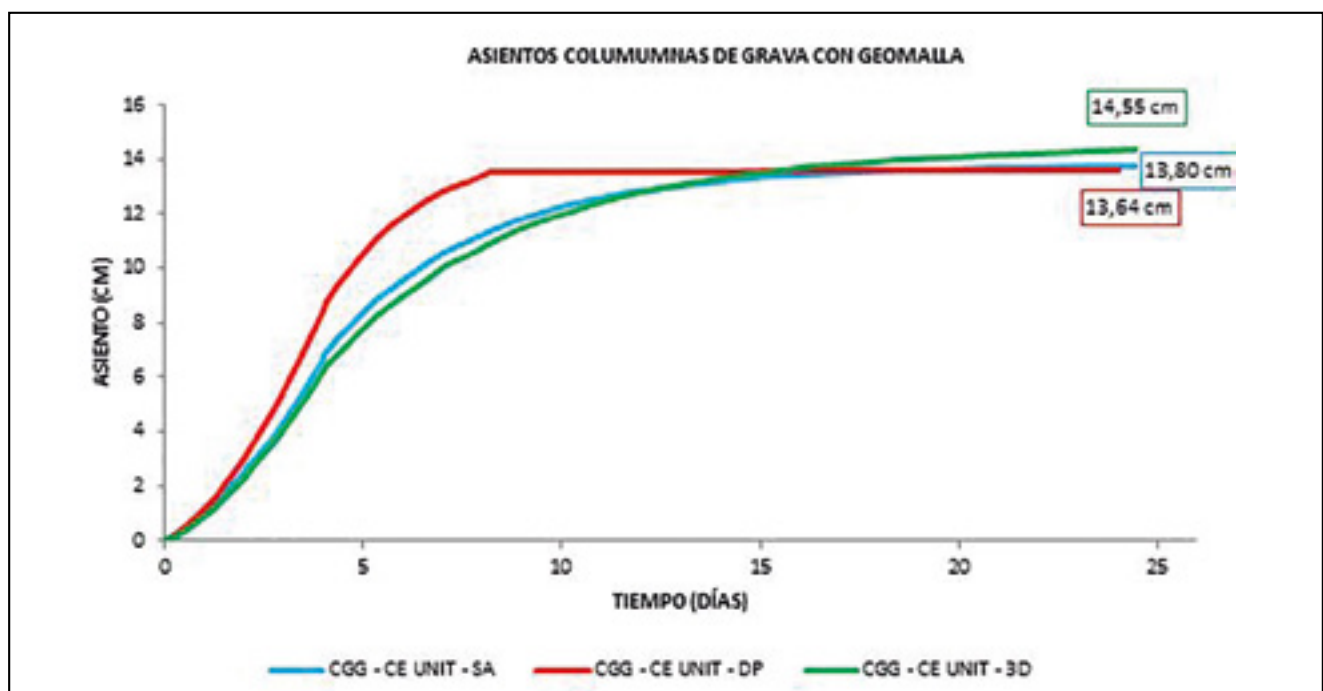


Figura 20. Asientos máximos – terreno mejorado con columnas de grava encapsuladas.

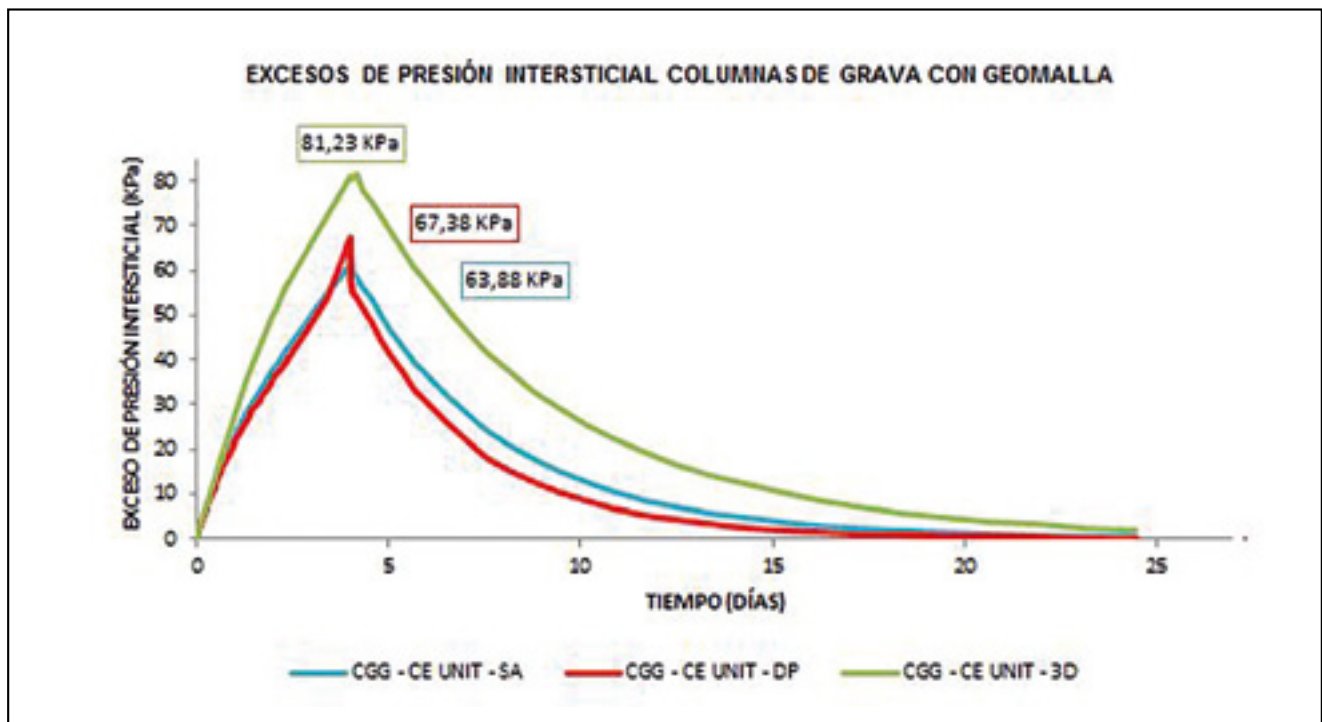


Figura 21. Excesos de presión intersticial máximos – terreno mejorado con columnas de grava encapsuladas.

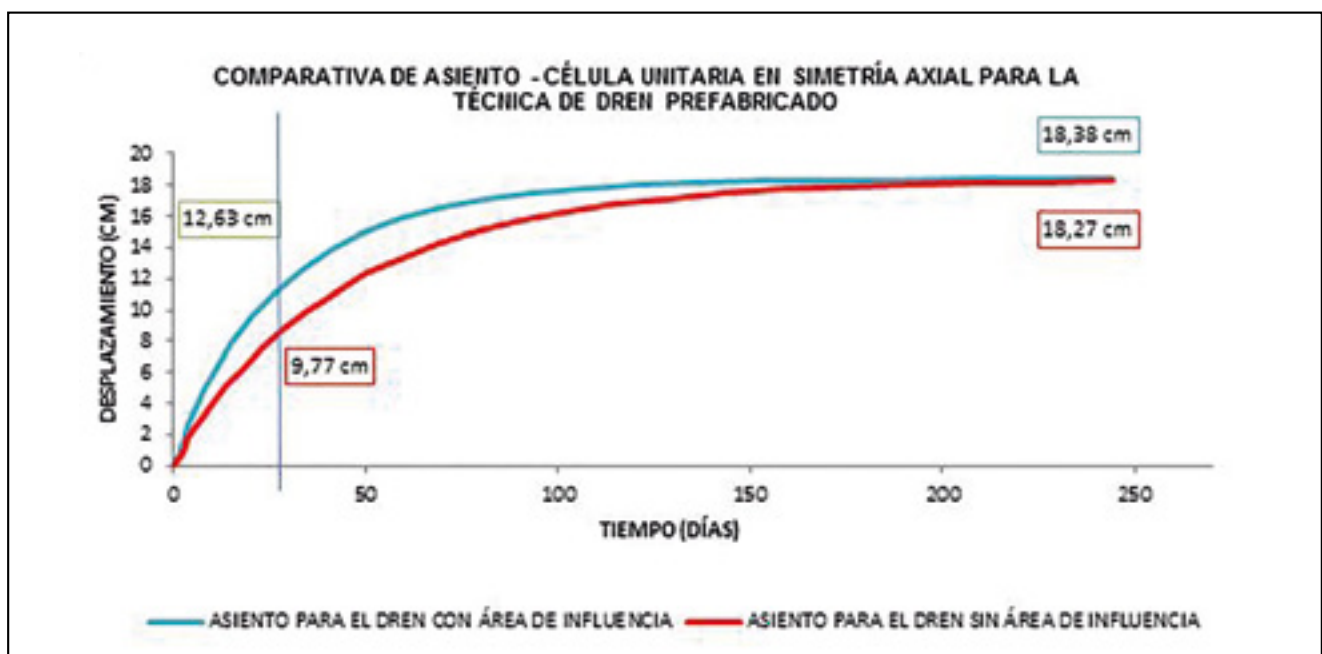


Figura 22. Comparativa de asentamientos máximos – terreno mejorado con drenes con/sin área de influencia.

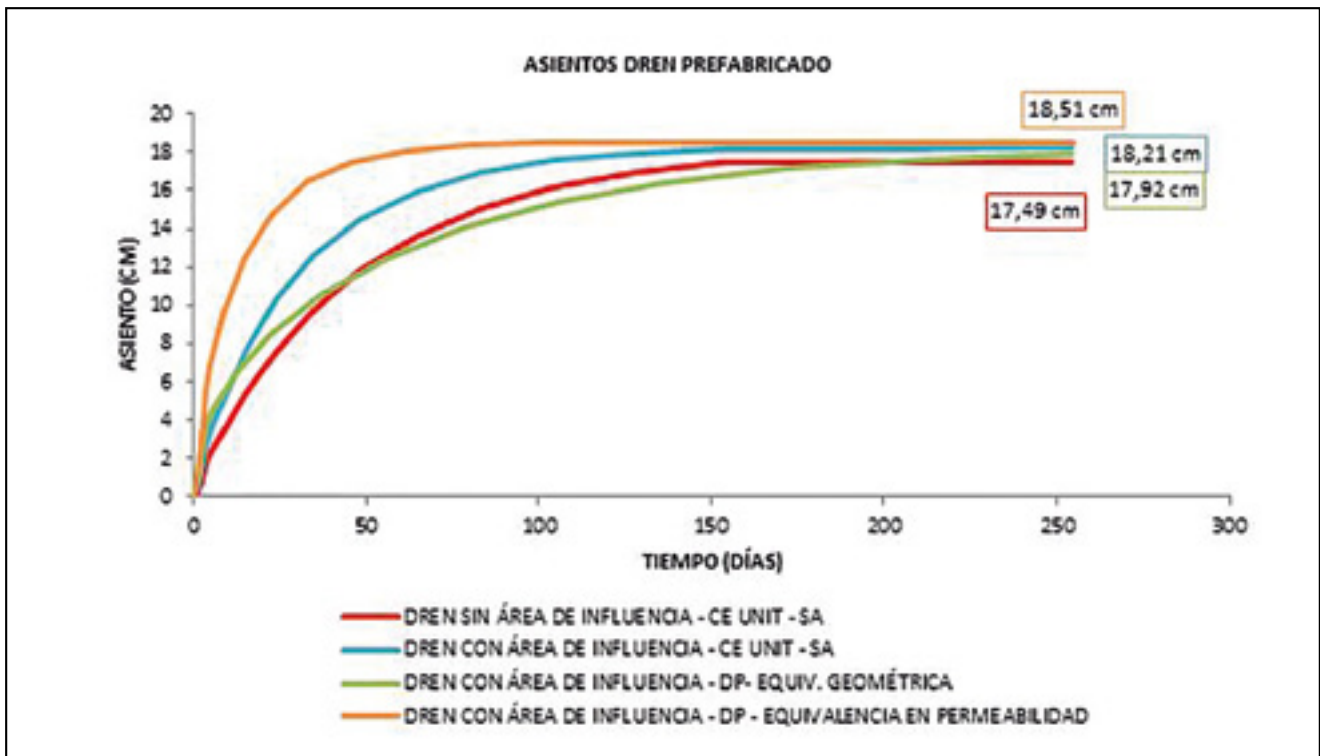


Figura 23. Evolución de asientos para terreno mejorado con dren prefabricado.

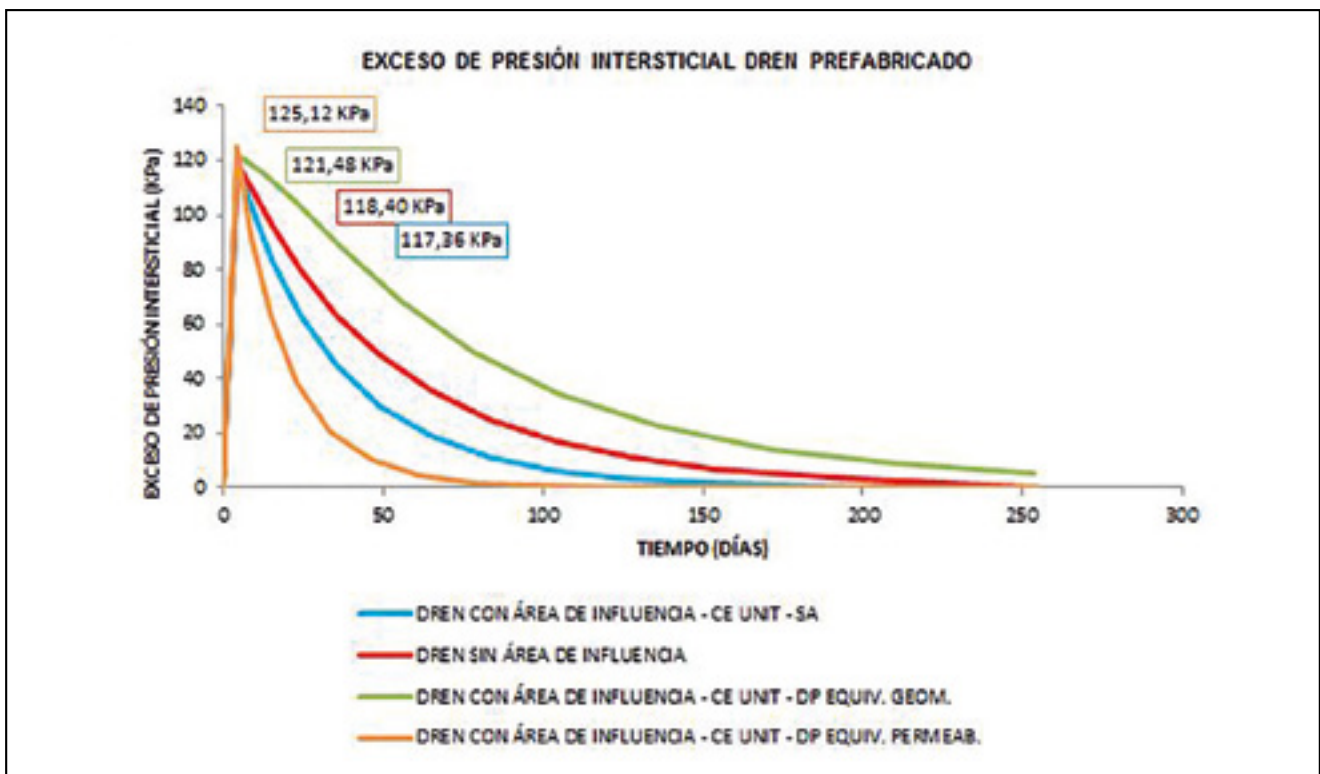


Figura 24. Disipación de excesos de presiones intersticiales para terreno mejorado con dren prefabricado.

tiempo eliminar al completo los excesos de presión intersticial.

Por último, realizando un estudio de los modelos de asientos máximos y excesos de presión intersticial para los modelos de célula unitaria en simetría axial, célula unitaria

en deformación plana en igualdad de permeabilidad y célula unitaria en deformación plana en igualdad geométrica, se observa que todas las técnicas utilizadas dan resultados parejos (ver figuras 23 y 24).

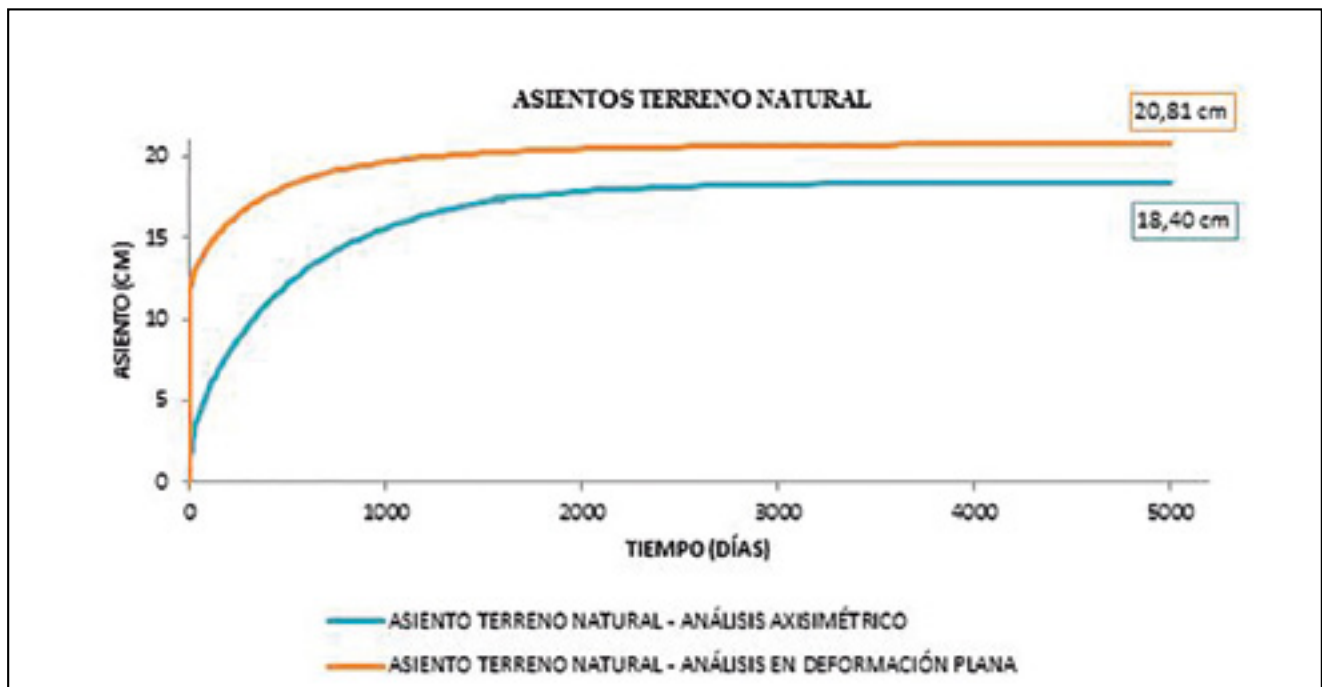


Figura 25. Comparativa de asientos máximos.

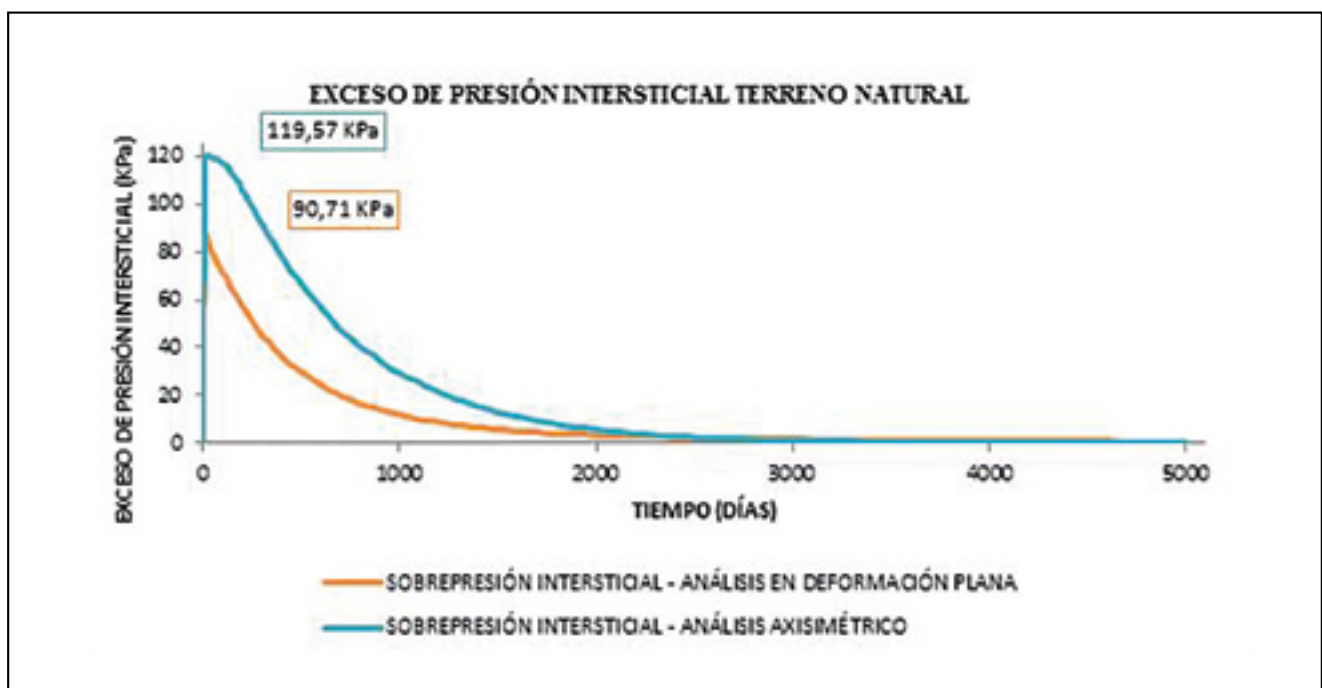


Figura 26. Comparativa del exceso de presión intersticial.

4.5. Resultados del comportamiento del terreno natural sin tratar

Para contrastar todos los resultados y ver la efectividad de las columnas de grava, columnas de grava encapsuladas y drenes prefabricados se ha realizado un modelo 2D, axi-simétrico y en deformación plana, para ver cómo se comporta el suelo blando del presente estudio cuando no se le aplica técnica de mejora alguna.

El tiempo necesario para que se produzca el 90% de la consolidación supera los 700 días frente a 15 días para la técnica de columnas de grava y columnas de grava con geotextil y 150 días para la técnica de drenes prefabricados (ver figuras 25 y 26).

5. CONCLUSIONES

Los análisis de célula unitaria en simetría axial y modelo en 3D son considerados como modelos base ya que la información que proporcionan es más exacta. El modelo en 2D ofrece información buena pero menos precisa. El modelo 2D en el que las columnas se realizan como un bloque de propiedades geotécnicas equivalentes, proporciona una información global, pero no es posible conocer el comportamiento de las columnas en distintas zonas debajo del terraplén.

Se ha comprobado mediante Midas que el comportamiento deformacional de un terreno blando tratado con columnas de grava bajo la carga de un terraplén es diferente

según la zona que se estudie. Si el estudio se realiza debajo de la coronación del terraplén “zona 1”, el efecto que se observa es un ensanchamiento de la columna de grava. Cuando el estudio es de la zona bajo la cresta del talud “zona 2”, las columnas de grava sufren un efecto combinado de ensanchamiento y flexión. Por último las columnas de grava bajo el talud del terraplén “zona 3” sufren un efecto de flexión.

El efecto conjunto de ensanchamiento y flexión de la zona 2 conduce a que se produzca un mayor asiento que bajo el centro del terraplén.

Tanto la técnica de drenaje vertical de columnas de grava sin/con encapsulamiento de geotextil como drenes prefabricados son soluciones realmente efectivas.

El efecto de las columnas de grava encapsuladas frente a columnas sin geotextil es leve. Se aprecia un ligero cambio en cuanto a la disipación de los excesos de presión intersticial. En ningún caso se verá disminuido el asiento total ya que el geotextil no tiene capacidad portante.

El sistema de drenes prefabricados necesita un mayor tiempo para que con las mismas condiciones que el tratamiento de columnas de grava, se disipen los excesos de presión intersticial.

La elección del tipo de drenaje mediante columna de gravas y drenes prefabricados, en cuanto a su eficiencia, depende de las características de proyecto. La técnica de columnas acelera con mayor rapidez el proceso de consolidación del terreno.

La técnica del geotextil evita la contaminación de la columna de grava por finos. Si la situación requiere que los plazos de ejecución sean cortos, se debe optar entre columnas de grava con/sin geotextil y drenes prefabricados tipo mecha. En el caso de utilizar drenes tipo mecha junto a una precarga reduce mucho los tiempos de consolidación. El efecto del dren es menor y se necesita una malla en la que los drenes tengan menor separación entre ellos.

6. BIBLIOGRAFÍA

Alexiew, D., Brokemper, D., y Lothspeich, S. (2005). *Contemporary Issues in Foundation Engineering*. Geotextile Encased Columns: Load Capacity, Geotextile Selection and Pre-Design Graphs. EE UU: American Society of Civil Engineers (ASCE).

Bergado, D.T. et al. (1996). Smear effects of vertical drains on soft Bangkok clay. *Journal of Geotechnical Engineering*. 117(10): pp. 1509-1530.

Castro, J. (2008). *Análisis teórico de la consolidación y deformación alrededor de columnas de grava*. Tesis Doctoral. Santander (España): Universidad de Cantabria.

Hansbo, S. (1979). Consolidation of clay by band-shaped prefabricated drains. *Ground Engineering*. 12(5): pp. 16-25.

Hansbo, S. (1987). Fact and fiction in the field of vertical drainage. *Prediction and performance in geotechnical engineering. Proceedings of the 17th Nordic Geotechnical Meeting, Alberta, Canadá*.

Hansbo, S. (1987). Design aspects of vertical drains and lime column installation. *Proceedings of the 9th Southeast Asian Geotechnical Conference, Bangkok, Tailandia*.

Hird, C.C., Pyrah, I.C., y Russel, D. (1992). Finite element modelling of vertical drains beneath embankments on soft ground. *Géotechnique*. 42(3): pp. 499-511.

Indraratna, B. et al. (2003). Modelling of prefabricated vertical drains in soft clay and evaluation of their effectiveness in practice. *Ground Improvement*. 7(3): pp. 127-137.

Indraratna, B., Basack, S., y Rujikiatkamjorn, C. (2013). Numerical solution of Stone column improved soft soil considering arching, clogging and smear effects. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 139(3): pp. 377-394.

Indraratna, B., y Redana, I. (1997). Plane-strain modelling of smear effects associated with vertical drains. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 123(5): pp. 474-478.

Melentijevic, S. et al. (2016). Modelización numérica de los drenes verticales. Reconocimiento, tratamiento y mejora del terreno. *5^{as} Jornadas Luso-Españolas de Geotecnia: Desafíos para la geotecnia en España y Portugal. Simposio Nacional de Ingeniería Geotécnica, A Coruña, 2016*.

Poon, B., y Chan, K. (2013). Stress Concentration Ratio and Design Method for Stone Columns using 2D FEA with Equivalent Strips. *18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. 3: pp. 2585-2588.

Priebe, H.J. (1995). *Design of vibro replacement*. Londres (RU): Thomas Telford Publishing.

Redana, I.W. (1999). *Effectiveness of vertical drains in soft clay with special reference to smear effect*. Doctor of Philosophy thesis, Department of civil, Mining and Environmental Engineering, University of Wollongong, pp. 82-95.

Sathananthan, I. (2003). Modelling of vertical drains with smear installed in soft clay. *Journal of Ground Improvement*. 7(3): pp. 127-138.

Tan, S.A., Tjahyono, S., y Oo, K.K. (2008). Simplified Plane-Strain Modelling of Stone-Column Reinforced Ground. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 134(2): pp. 185-194.