

MODELIZACIÓN NUMÉRICA DE LOS DRENES VERTICALES

Numerical modelling of vertical drains

Svetlana Melentjevic*

Javier Moreno Robles**

Pablo Martín Blanco***

RESUMEN – La instalación de los drenes verticales (columnas de grava y drenes mecha) en terrenos blandos cohesivos es una técnica de mejora del terreno frecuentemente utilizada para la cimentación de los terraplenes. Conjuntamente con aplicación de la precarga permiten acelerar la consolidación del terreno. Este artículo presenta los métodos de la modelización numérica de los drenes verticales, cuyo comportamiento tiene carácter tri-dimensional. Se estudia la evolución de los asentos y disipación de los excesos de las presiones intersticiales durante el proceso de consolidación. Para facilitar los cálculos bi-dimensionales, es necesario transformar el flujo radial correspondiente al dren vertical en términos de una célula unitaria a las condiciones de deformación plana. Adicionalmente en el caso de las columnas de grava se requiere la coincidencia en términos de rigidez. Por ese motivo se requiere la conversión de determinados parámetros geotécnicos necesarios para conseguir la equivalencia en los tiempos de consolidación y de los asentos en los modelos tri-dimensionales y bi-dimensionales. En este artículo se presentan diferentes métodos existentes de transformación de permeabilidades entre la célula unitaria y el modelo en deformación plana, que se pueden conseguir igualando las condiciones de permeabilidad y/o geometría. Se presenta un ejemplo de aplicación contrastando los resultados obtenidos de asentos y disipación de los excesos de presiones intersticiales durante la consolidación. Al final del artículo se presenta un estudio de diferentes mecanismos de rotura de las columnas de grava en función de su posición debajo del terraplén.

SYNOPSIS – The installation of vertical drains (stone columns and wick drains) in soft cohesive soils is a soil improvement technique frequently used for the foundation of embankments. Its application with preloading allows the acceleration of the consolidation of soil. This paper presents the numerical methods for modelling of vertical drains whose behaviour is of the tri-dimensional character. The evolution of settlements and dissipation of the excess of the pore water pressure during the consolidation is studied. To facilitate the two-dimensional analysis, it is necessary to transform the radial flow corresponding to the vertical drain in terms of a unit cell to the plane strain conditions. Additionally, in the case of stone columns, the equivalence of the deformability is required as well. For this reason, the conversion of certain geotechnical parameters is necessary to achieve the equivalence in consolidation grade and settlements in three-dimensional and two-dimensional models. This paper presents different existing methods of permeability transformation between the unit cell and the plane strain model that can be achieved by matching the permeability and/or geometry conditions. An example of the application is presented contrasting the obtained results of settlements and dissipation of excess pore water pressure during the consolidation. Finally, the failure mechanism of stone columns is studied in function of their position under the embankment load.

Palabras Clave – Drenes prefabricados, columnas de grava, modelización numérica.

Keywords – Wick drains, stone columns, numerical modelling.

* Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid. E-mail: svmelent@ucm.es

** Laboratorio de Geotecnia, CEDEX. E-mail: javier.moreno@cedex.es

*** Tresca Ingeniería, E-mail: Pablomb1991@gmail.com

1 – INTRODUCCIÓN

Actualmente existen diferentes técnicas de mejora del terreno tipo inclusiones que proporcionan aumentos de la capacidad portante del terreno, disminución de los asentos, aceleración del proceso de consolidación, etc. Las técnicas ampliamente utilizadas para la mejora del terreno blando cohesivo que constituye el cimientado de los terraplenes son los drenes verticales, tanto del tipo de drenes prefabricados (PVD) como de columnas de grava (CG). Se suelen instalar en patrones de distribución uniforme, mayoritariamente de forma triangular o cuadrada.

El uso de los PVD en el terreno blando tiene como objetivo la aceleración del proceso de consolidación considerando su permeabilidad elevada en comparación con el terreno natural. Dada su rigidez despreciable, no afectan a la reducción de la deformabilidad del terreno natural ni tampoco a la disminución de los asentos inducidos por la sobrecarga de los terraplenes.

Las CG tienen los parámetros geotécnicos, tales como el módulo de deformabilidad, la resistencia al corte y la permeabilidad, más elevados que el terreno natural. La instalación de las CG en el terreno blando debajo de los terraplenes en comparación con el terreno natural sin tratamiento presenta las siguientes ventajas: el aumento de la capacidad portante, la aceleración del proceso de la consolidación dada la disipación rápida de los excesos de las presiones intersticiales generadas por la aplicación de la carga, la reducción de los asentos totales y diferenciales producidos, la mejora de la estabilidad de los taludes de terraplenes y de laderas naturales y la reducción del potencial a licuefacción. La rigidez elevada de las CG en comparación con el terreno blando influye en la reducción de la transmisión de carga del terraplén al terreno blando disminuyendo la generación de las presiones intersticiales. En este artículo se estudiará solamente la aplicación de las CG en la disminución de los asentos y aceleración del proceso de consolidación.

El comportamiento del conjunto del terraplén, suelo y drenes verticales depende de la interacción entre los mismos. Por lo general, para el análisis numérico de los terraplenes cimentados sobre los terrenos mejorados con inclusiones se introducen las simplificaciones para aplicar los modelos bidimensionales (2D) en deformación plana, aunque el comportamiento real es tridimensional (3D). Los modelos 3D suelen ser robustos suponiendo un esfuerzo computacional muy elevado. Para la aplicación de los modelos 2D se requiere realizar hipótesis distintas dado que no se puede usar la geometría y las propiedades geotécnicas reales, sino que es necesario realizar las equivalencias oportunas entre el comportamiento de las inclusiones correspondiente a las condiciones axisimétricas y las de deformación plana.

La modelización numérica del proceso de consolidación de los drenes verticales se realiza mediante el modelo de la célula unitaria. La base de la aplicación de este modelo simplificado es el uso de un gran número de los drenes verticales (PVD y CG) uniformemente distribuidos sobre el área extensa bajo carga uniformemente repartida. Tal caso se representa en la zona central de los terraplenes siendo el comportamiento de una única célula (dren vertical y el terreno circundante correspondiente) representativo para toda el área. Debido a las condiciones de simetría, en las superficies laterales de la célula unitaria solamente se permite desplazamiento vertical y el flujo de agua vertical.

La solución del modelo en deformación plana equivalente se desarrolló comparándola con la teoría simple de consolidación alrededor del dren vertical en condiciones axisimétricas por Hansbo (1981) (Hird et al, 1992). Las propiedades geotécnicas de los drenes verticales en condiciones de célula unitaria se tienen que transformar en las pantallas equivalentes en deformación plana. Debido a que los PVD poseen una rigidez insignificante, el problema de su análisis numérico se reduce solamente al estudio de consolidación. En el caso de las CG, adicionalmente se ha de tener en cuenta su rigidez.

La permeabilidad y la rigidez tanto del suelo blando como de los drenes verticales se tiene que adaptar al modelo 2D en deformación plana para representar adecuadamente el comportamiento deformacional y las condiciones de drenaje. Se han desarrollado las formulaciones de conversión de la permeabilidad entre los modelos 3D y 2D, presentadas por Hird et al. (1992, 1995) e Indraratna y

Redana (1997, 2000). Estas soluciones incluyen los efectos de instalación (“smear effects”) de los drenes verticales a las condiciones de drenaje y de consolidación. Para tener en cuenta la rigidez de las CG, las soluciones de conversión de los modelos 3D y 2D se han ampliado (Tan y Oo, 2005).

Los métodos de transformación de los parámetros geotécnicos mediante los métodos numéricos han sido contrastados con las soluciones analíticas existentes para los drenes prefabricados (Barron, 1948; Hansbo, 1981) y para las columnas de grava (Balaam y Booker, 1981; Han y Ye, 2001) por varios autores (Hird et al., 1992, 1995; Tan y Oo, 2005; Tan et al., 2008; etc.), y por lo tanto no se presentan en este estudio. Dicha comparación presenta variaciones de 8 a 20% entre la solución numérica y solución analítica en condiciones axisimétricas (Tan y Oo, 2005; Tan et al., 2008).

Los programas de elementos finitos resuelven el análisis del terraplén bajo hipótesis de deformación plana, permitiendo modelizar las fases del proceso constructivo. En este artículo se presentan los métodos de modelización numérica de los drenes verticales instalados en el terreno blando debajo de terraplenes, empleando análisis 2D y 3D mediante el programa de los elementos finitos Plaxis, aplicándolo a un ejemplo. Se presentan los resultados obtenidos en términos de asientos y disipación de los excesos de presiones intersticiales después de la construcción del terraplén.

Aparte del estudio de la consolidación y la evolución de los asientos con el tiempo del terreno blando mejorado con CG que constituye el cimiento del terraplén, la modelización numérica, tanto en condiciones 3D como en condiciones 2D en deformación plana, permite analizar el modo de rotura de cada una de las CG en función de su posición debajo del terraplén. En este estudio se presenta un ejemplo de análisis numérico en 3D y 2D contrastándolo con el método tradicional de análisis numérico del modelo homogeneizado en 2D. Este modelo homogeneizado es ampliamente usado por simplificar geoméricamente el estudio geotécnico. Las propiedades geotécnicas equivalentes del terreno homogeneizado se obtienen ponderando los parámetros geotécnicos de las CG y el terreno circundante con su correspondiente área introduciendo el factor de reemplazamiento (a_s). Su aplicación es recomendable solamente en el estudio de los asientos, pero no permite analizar el problema geotécnico a nivel detallado en el terreno, i.e. no se puede estudiar la concentración de las tensiones en las columnas y el terreno circundante, la consolidación del terreno de cimiento de los terraplenes, la estabilidad de los terraplenes, etc.

2 – BASE TEORICA DE CONSOLIDACIÓN

El estudio de la consolidación del terreno mejorado mediante PVD y/o CG abarca diferentes soluciones analíticas. Barron (1948) ha desarrollado el método de análisis de consolidación en condiciones axisimétricas para drenes de arena, que ha sido ampliado para su aplicación en PVD para incluir los efectos de instalación por hinca y capacidad de drenaje (Hansbo, 1981). Las hipótesis de estos métodos consideran representativa la deformación vertical uniforme, y que no hay reparto de cargas entre el suelo y PVD debido a su escasa rigidez.

En el caso del estudio de la consolidación radial alrededor de las CG bajo carga uniforme constante las soluciones analíticas más utilizadas son las de Balaam y Booker (1981), Han y Ye (2001), Castro y Sagasetta (2009), etc. Estos métodos han sido desarrollados para incluir el efecto de distribución de carga entre columnas y suelo y su variación con el tiempo. También se tienen en cuenta las componentes verticales y radiales de la deformación.

Considerando que la mejora del terreno debajo de los terraplenes tiene en cuenta el término grupo para todos los tipos de inclusiones, se puede asemejar el comportamiento de una célula unitaria a todos los elementos de tipo inclusiones, tales como los drenes verticales en este caso. Para poder realizar el análisis 2D de los terraplenes se debe establecer la equivalencia conveniente entre las condiciones axisimétricas y de deformación plana tanto en términos del grado o tiempo de consolidación (PVD, CG) como en requisitos de rigidez (CG).

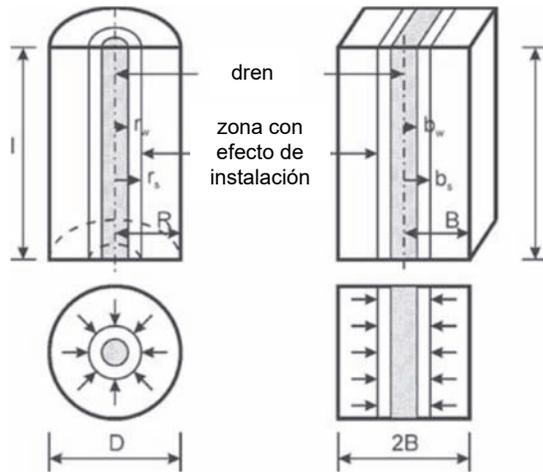


Fig. 1 – Célula unitaria en condiciones axisimétrica y de deformación plana (Hird et al., 1995).

Las características geométricas de la célula unitaria en condiciones de modelo axisimétrico y de deformación plana se observan en la Figura 1. El elemento del suelo cilíndrico (R) que tiene un comportamiento axisimétrico debe transformarse en un elemento continuo tipo panel (B) para reproducir las condiciones de deformación plana. Se observa alrededor del dren vertical (r_w , b_w) una zona del terreno con el efecto de instalación de drenes verticales (“smear zone”) (r_s , b_s), que tiene una reducción de la permeabilidad original del suelo generando la disminución del coeficiente de permeabilidad en dicha zona.

Tradicionalmente el diseño de las CG se basa en la estimación de los asentamientos aplicando el método homogeneizado, ponderando los parámetros de resistencia y deformabilidad en función del factor de sustitución (a_s) para representar el conjunto del material virtual suelo-columna. El factor de sustitución representa la relación entre el área de la columna y el área tributaria del suelo correspondiente a la columna ($a_s = A_c / A_s$). Sin embargo, este tipo de análisis no proporciona datos de las tensiones desarrolladas en el terreno y en las columnas, y tampoco permite realizar el análisis de consolidación.

2.1 – Drenes verticales prefabricados

De acuerdo con Hird et al. (1992), para el estudio de drenes tipo PVD las hipótesis empleadas en la solución de equivalencia del grado de consolidación en el modelo axisimétrico (U_{ax}) y el modelo en deformación plana (U_{pl}) son: a) terreno homogéneo en términos de permeabilidad y compresibilidad, b) comportamiento independiente de cada dren, c) drenaje se realiza solamente en la dirección horizontal. Dicha conversión de los grados de consolidación se puede lograr mediante uno de los siguientes métodos:

1. Equivalencia de permeabilidad (método 1 PVD): se mantiene la geometría en los modelos axisimétrico y de deformación plana ($B=R$) variando el coeficiente de permeabilidad del modelo ($k_{hax} \neq k_{hp}$):

$$\frac{k_{hp}}{k_{hax}} = \frac{2}{3 \left[\ln \left(\frac{n}{s} \right) + \left(\frac{k_{hax}}{k_s} \right) \ln(s) - \frac{3}{4} \right]} \quad (1)$$

2. Equivalencia geométrica (método 2 PVD): se mantiene el coeficiente de permeabilidad entre los modelos axisimétrico y de deformación plana ($k_{hax}=k_{hp}$) variando la geometría del modelo ($B \neq R$):

$$\frac{B}{R} = \left\{ \frac{3}{2} \left[\ln \left(\frac{n}{s} \right) + \left(\frac{k_h}{k_s} \right) \ln(s) - \left(\frac{3}{4} \right) \right] \right\}^{0.5} \quad (2)$$

3. Equivalencia combinada de geometría y de permeabilidad (método 3 PVD): se adopta la geometría del modelo de deformación plana ($B \neq R$) obteniendo el coeficiente de permeabilidad correspondiente en deformación plana ($k_{hax} \neq k_{hp}$):

$$\frac{k_{hp}}{k_{hax}} = \frac{2B^2}{3R^2 \left[\ln \left(\frac{n}{s} \right) + \left(\frac{k_{hax}}{k_s} \right) \ln(s) - \frac{3}{4} \right]} \quad (3)$$

siendo:

k_{hax} , k_{hp} – coeficiente de permeabilidad horizontal en condiciones axisimétrica y de deformación plana;

k_s – permeabilidad horizontal en la zona del efecto de la instalación del dren (“smear zone”);

R , B – dimensiones de la célula unitaria en las condiciones axisimétricas y de deformación plana;

r_c – radio del dren;

r_s – radio de la zona de influencia de la instalación del dren;

n – relación de separación de drenes ($n=R/r_c$);

s – factor de medida de la zona del efecto de la instalación con respecto a las dimensiones de dren ($s=r_s/r_c$).

2.2 – Columnas de grava

El esquema simplificado de CG de las condiciones geométricas para el modelo axisimétrico (r_c) y de deformación plana (espesor equivalente b_c) para los dos métodos definidos a continuación se representa en la Figura 2.

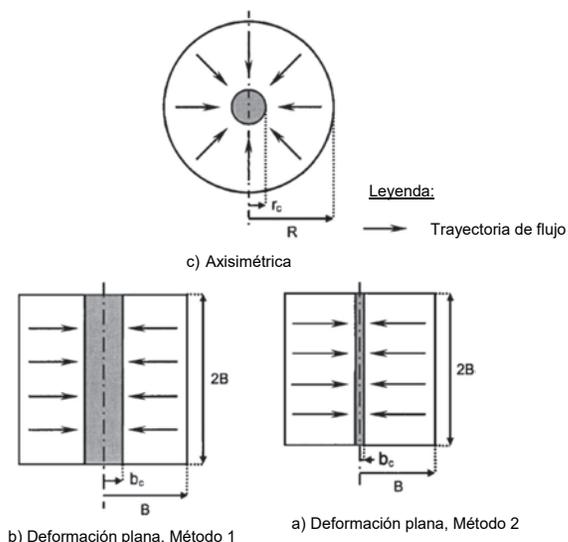


Fig. 2 – Sección transversal de la célula unitaria de CG en condiciones axisimétrica y de deformación plana (Tan et al., 2008).

Los métodos desarrollados para los drenes tipo PVD se han ampliado para el estudio de CG introduciendo la equivalencia en rigideces verticales de las columnas en 3D y en 2D ($EA_{3D}=EA_{2D}$) cuya desestimación podría infravalorar el cálculo de los tiempos y los grados de consolidación. Son de aplicación los siguientes dos métodos para conseguir equivalencia entre los modelos axisimétrico y de deformación plana (Tan et al., 2008) (Figura 2):

1. Equivalencia en permeabilidad (método 1 CG): se mantiene la geometría entre los modelos ($B=R$ y $r_c=b_c$).

Para obtener la misma longitud de flujo de agua en la dirección horizontal, perpendicular al perímetro de la columna, se considera que el diámetro de la columna coincide con el espesor del panel equivalente en condiciones de deformación plana ($r_c=b_c$). Consiguientemente corresponde la equivalencia en geometría de la célula unitaria ($B=R$). En este método 1 de CG el factor de sustitución en condiciones de deformación plana (a_{sp}) es mayor que el factor de sustitución en condiciones reales, axisimétricas (a_s).

Las propiedades de rigidez de las columnas entre el modelo axisimétrico (E_{cax}) y el modelo de deformación plana (E_{cp}) se ajustan de manera correspondiente al factor de sustitución (a_s). Las propiedades del suelo blando se mantienen iguales ($E_{sax}=E_{sp}$):

$$E_{cp} \cdot a_{sp} \cdot E_{sp} \cdot (1 - a_{sp}) = E_{cax} \cdot a_s + E_{sax} \cdot (1 - a_s) \quad (4)$$

$$\frac{k_{hp}}{k_{hax}} = \frac{F(n)_p}{F(n)_{ax}} \frac{B^2}{R^2} \left[\frac{m_{vs} m_{vc} (1 - a_s)}{m_{vc} (1 - a_s) + m_{vs} a_s} \right]_p \left[\frac{m_{vc} (1 - a_s) + m_{vs} a_s}{m_{vs} m_{vc} (1 - a_s)} \right]_{ax} \quad (5)$$

siendo:

m_{vs} , m_{vc} – coeficiente de compresibilidad volumétrica del suelo y de la columna obtenido en base al módulo elástico y el coeficiente de Poisson:

$$m_{vs} = \frac{(1 - 2\nu_s)(1 + \nu_s)}{(1 - \nu_s)} E_s$$

$$m_{vc} = \frac{(1 - 2\nu_c)(1 + \nu_c)}{(1 - \nu_c)} E_c \quad (6)$$

ν_s , ν_c – coeficiente de Poisson del suelo y de la columna;

E_s , E_c – módulo elástico del suelo y de la columna;

a_s – factor de sustitución ($a_s=A_c/A_t$);

A_c , A_t – área de la columna y área tributaria (columna + suelo);

$F(n)$ – factor de espaciamiento entre drenes:

$$F(n) = \frac{n^2}{(n^2 - 1)} \ln(n) - \frac{(3n^2 - 1)}{4n^2} \quad (7)$$

El valor del coeficiente de permeabilidad en la dirección vertical tiene poca influencia en el grado de consolidación, dado que el flujo de agua es predominantemente horizontal, y por lo tanto se asume que los coeficientes de permeabilidad vertical coinciden en condiciones axisimétrica y de deformación plana ($k_{vax}=k_{vp}$).

2. Equivalencia en geometría (método 2 CG): se mantiene el coeficiente de permeabilidad horizontal en los modelos ($k_{hax}=k_{hp}$).

Se asume que las columnas tienen la misma capacidad de drenaje tanto en condiciones axisimétricas como en deformación plana. El área de la columna se considera igual en ambas condiciones, resultando la longitud de flujo en deformación plana mayor que en las condiciones reales debido al menor espesor del panel (b_c) equivalente que el diámetro real de la columna (r_c), lo cual conlleva la coincidencia del factor de sustitución en ambos modelos ($a_{sax}=a_{sp}$):

$$b_c = B \frac{r_c^2}{R^2} \quad (8)$$

Debido a la igualdad del factor de sustitución en ambos modelos ($a_{sax}=a_{sp}$), se considera la igualdad entre los valores del módulo de elasticidad en el modelo axisimétrico y de deformación plana ($E_{sax}=E_{sp}$ y $E_{cax}=E_{cp}$). Los coeficientes de permeabilidad en dirección horizontal y vertical se mantienen tanto bajo hipótesis axisimétrica como de deformación plana ($k_{vax}=k_{vp}$ y $k_{hax}=k_{hp}$).

3 – CASOS DE CONSOLIDACIÓN ESTUDIADOS

El análisis numérico se ha realizado utilizando el software del programa comercial basado en el método de los elementos finitos Plaxis 2D y Plaxis 3D, para verificar la teoría descrita previamente en el apartado 2 sobre la conversión de los parámetros geotécnicos entre el modelo axisimétrico y el modelo equivalente de deformación plana en el caso de los drenes verticales (PVD y CG). El objetivo del análisis numérico es el estudio de la consolidación comparando las curvas de la evolución de los asentos y de la disipación de los excesos de la presión intersticial con el tiempo. Dicho análisis se basa en los resultados obtenidos bajo diferentes hipótesis de modelización de una célula unitaria en condiciones 3D y 2D (axisimetría y deformación plana) tal como se indica en la Tabla 1 (Casos 1 a 5). Por otro lado se ha estudiado el terraplén en condiciones 3D y 2D (deformación plana) (Casos 1A a 5A de la Tabla 1).

El resumen de las propiedades geotécnicas de los materiales utilizados en el ejemplo de la modelización se presenta en la Tabla 2. Para todos los materiales se ha empleado el modelo constitutivo elasto-plástico tipo Mohr-Coulomb. El coeficiente de permeabilidad del terreno blando considerado ha sido de $k_h=3 \cdot 10^{-4}$ m/día y $k_v=1 \cdot 10^{-4}$ m/día. Tanto el terraplén como los drenes verticales se han considerado como material permeable ($k_h=k_v=1$ m/día). El nivel freático se ha considerado en el contacto entre el terraplén y el suelo blando.

Tabla 1 – Casos estudiados.

	PVD	CG
Célula unitaria 3D	Caso 1-PVD	Caso 1-CG
Axisimétrico	Caso 2-PVD	Caso 2-CG
Deformación plana método 1	Caso 3-PVD	Caso 3-CG
método 2	Caso 4-PVD	Caso 4-CG
método 3	Caso 5-PVD	
Terraplén 3D	Caso 1A-PVD	Caso 1A-CG
Terraplén 2D método 1	Caso 3A-PVD	Caso 3A-CG
método 2	Caso 4A-PVD	Caso 4A-CG
método 3	Caso 5A-PVD	

Tabla 2 – Parámetros geotécnicos de los casos estudiados de la Tabla 1.

	γ (kN/m ³)	E (MPa)	ν	c' (kPa)	ϕ' (°)
Columnas de grava	20	100	0.3	0	42
Terreno blando	18	5	0.3	10	22
Terraplén	20	35	0.3	10	30

La simulación del proceso de construcción del terraplén de 6,0 m de altura total incluye 2 etapas con un incremento de altura de 3,0 m en cada etapa y con la duración de 2 días cada una de las fases de construcción, permitiendo la consolidación durante todas las fases constructivas del terraplén. Después de la construcción del terraplén se ha continuado el proceso de consolidación sin cambio de sobrecarga hasta la disipación completa de los excesos de presiones intersticiales (<1kPa) para determinar los tiempos necesarios en diferentes condiciones de drenaje del suelo blando de acuerdo con los casos presentados en la Tabla 1.

El espesor del terreno blando es de 10,0 m, cuyo drenaje se realiza a través de la superficie superior dado que bajo nivel inferior se encuentra el estrato impermeable.

La mejora del terreno mediante los drenes verticales (PVD y CG) se ha realizado por debajo del terraplén con una distribución cuadrada de 2,5 m de lado en ambos tipos de tratamiento, considerando el diámetro de PVD de 0,06 m y de CG de 0,8 m. En este estudio no se ha considerado la zona de efecto de instalación de los drenes verticales (“smear zone”).

4 – RESULTADOS DEL MODELO DE CONSOLIDACIÓN

A continuación, se presentan los resultados del análisis tanto del modelo realizado de la célula unitaria como del terraplén con la mejora del terreno mediante la introducción de los PVD y las CG. Se presentan las gráficas de correlación de: (a) la disipación de los excesos de las presiones intersticiales, y (b) la evolución de los asentos durante el proceso de consolidación.

Los gráficos que relacionan la disipación de los excesos de presiones intersticiales con el tiempo contemplan solamente el período de tiempo desde la construcción del terraplén completo sin tener en cuenta el tiempo de la construcción del terraplén por fases (Figuras 3, 4, 8 y 9). Los gráficos de correlación de la evolución de los asentos incluyen el período de tiempo desde la instalación de los drenes durante las fases de construcción del terraplén (Figuras 5, 6, 10 y 11). Se observa que los diferentes métodos aplicados para la modelización numérica de los PVD y las CG no presentan idénticas correlaciones, tanto en valores máximos como en forma de evolución de las curvas con tiempo.

4.1 – Célula unitaria

En el estudio de una célula unitaria, el punto de comparación de la disipación de los excesos de las presiones intersticiales se sitúa en el punto medio entre los drenes en el contacto entre el terreno blando y la capa impermeable, siendo este el punto de máxima generación del exceso de las presiones intersticiales que requiere el tiempo máximo para la disipación debido al camino de recorrido de agua más elevado. Los asentos estudiados corresponden al punto del terreno con el asiento máximo desarrollado siendo este el punto medio entre los drenes situado en la superficie del terreno blando.

Como es de esperar, para la misma distribución de los drenes tipo PVD y CG, el proceso de consolidación mediante las CG es más rápido que mediante los PVD, dada su mayor capacidad de evacuación de agua en comparación con los PVD (Figuras 3 y 4). El valor inicial de exceso de la presión intersticial en el caso de los PVD es del orden de la sobrecarga del terraplén (Figura 3). En

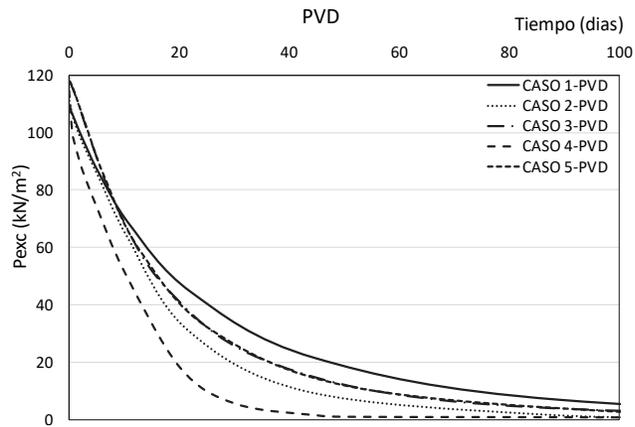


Fig. 3 – Disipación de excesos de presiones intersticiales – célula unitaria con PVD.

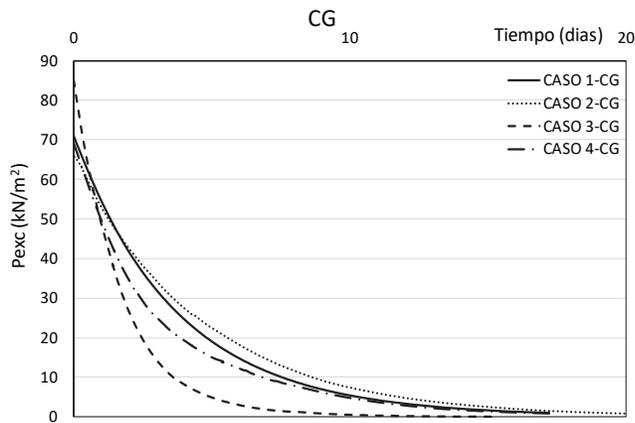


Fig. 4 – Disipación de excesos de presiones intersticiales – célula unitaria con CG.

el caso de las CG, debido a la gran capacidad de drenaje, el valor inicial del exceso de la presión intersticial es menor dado que una parte de la carga se disipa ya durante el período de construcción del terraplén (Figura 4). Los puntos iniciales de las curvas de las Figuras 3 y 4 demuestran el comportamiento no-drenado del terreno blando cohesivo debido a la sobrecarga del terraplén. El valor inicial del exceso de la presión intersticial generada varía para distintos métodos de modelización y de conversión empleados.

Los asientos máximos desarrollados en la célula unitaria empleando los PVD estimados mediante distintos métodos de modelización (Tabla 1) llegan aproximadamente al mismo valor con una variación de 1% respecto al modelo 3D (Figura 5). La evolución de los asientos con el tiempo para el Caso 4-PVD de modelización en deformación plana con equivalencia geométrica, es diferente a la tendencia general de los demás métodos empleados, indicando los tiempos de consolidación más bajos.

Los asientos máximos desarrollados en el caso de las CG tienen una variación máxima del orden de 8 a 10% con respecto al valor obtenido mediante el modelo de la célula unitaria en 3D (Figura 6). Utilizando el método de conversión tipo equivalencia en permeabilidad manteniendo la geometría entre los modelos (método 1 del apartado 2.3), los asientos se subestiman (Caso 3-CG). Esto se debe a la mayor sección transversal de la columna en deformación plana en comparación con el método 2 de conversión de equivalencia geométrica en deformación plana (Caso 4-CG),

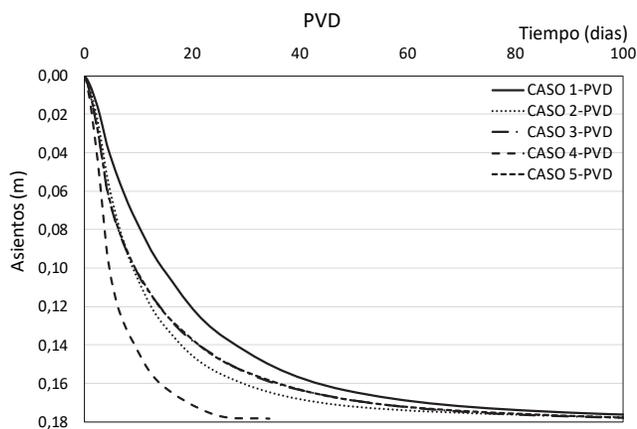


Fig. 5 – Asientos – célula unitaria con PVD.

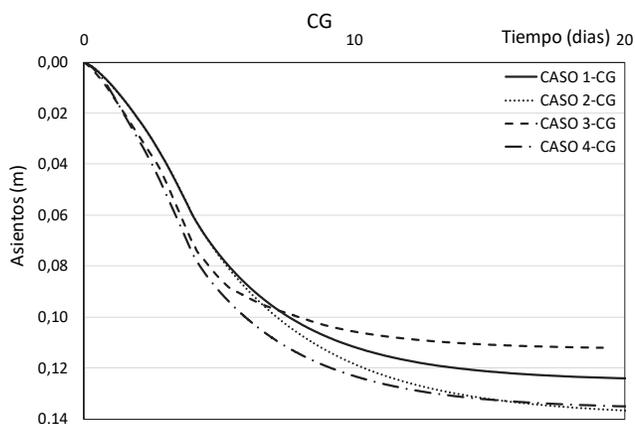


Fig. 6 – Asientos – célula unitaria con CG.

resultando en menor rigidez de la columna que en el caso 2 y resultando en mayor proporción de carga que se lleva el terreno blando al comienzo del proceso de consolidación. Debido a la subestimación de los asientos en este ejemplo realizado se considera más propio emplear el método 2 de equivalencia geométrica descrito en el apartado 2.3 (Caso 3-CG).

Los tiempos necesarios para llegar a 90% del grado de consolidación en el estudio de PVD difieren entre 25 y 64% respecto al modelo de célula unitaria en 3D (Caso 1-PVD) (Figuras 3 y 5), mientras que en el caso de CG resultan en diferencia de entre -22 y 53% en relación con el caso de la célula unitaria en 3D (Caso 1-CG) (Figuras 4 y 6).

De las Figuras 3, 4, 5 y 6 se observa la tendencia general de similitud entre los resultados obtenidos mediante el modelo 3D y el modelo axisimétrico. Los modelos de deformación plana permiten estimar los mismos parámetros observando en algunos modelos discrepancias, indicando errores en este tipo de conversión entre los modelos numéricos y los modelos analíticos. Estas diferencias son más pronunciadas en los casos 5-PVD y 4-CG, siendo menos importantes en los demás casos estudiados.

En la Figura 7a se presenta la generación de los excesos de presiones intersticiales en el modelo de célula unitaria tanto en el caso de los PVD como en el caso de las CG en el momento de aplicación de la sobrecarga máxima (momento de construcción de terraplén). En la Figura 7b se observa para

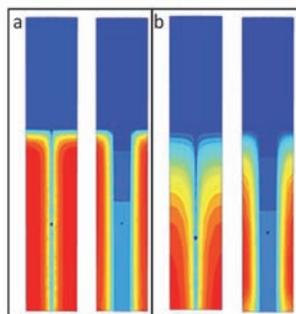


Fig. 7 – Disipación de excesos de presiones intersticiales – célula unitaria con PVD y con CG:
 (a) aplicación de sobrecarga, (b) grado de consolidación de 90%.

ambos casos (PVD y CG) la disipación de exceso de las presiones intersticiales en el momento de conseguir el grado de consolidación de 90%.

4.2 – Terraplén

En el estudio de terraplén, el punto de comparación de los excesos de las presiones intersticiales se sitúa en el punto situado debajo del centro de terraplén (en el eje de simetría) en el contacto entre el terreno blando y la capa impermeable, siendo el punto de máxima generación de excesos de las presiones intersticiales y el tiempo máximo necesario para la disipación debido al camino de recorrido de agua más elevado. Los asientos se han estudiado en el punto en el eje de simetría situado en la superficie del terreno siendo el punto del terreno donde se produce el asiento máximo.

Con el mismo carácter que en las Figuras 3 y 4, se observa en las Figuras 8 y 9 el carácter no drenado del terreno blando cohesivo mediante la curva de correlación del proceso de disipación de excesos de las presiones intersticiales estudiando los puntos iniciales de las curvas. Sin embargo, estos valores iniciales que representan la sobrecarga del terraplén transmitida al terreno son menores que en el caso de la célula unitaria debido a las condiciones reales del efecto tridimensional. Dada la mayor capacidad de descarga de las columnas de grava y consecuentemente mayor disipación de excesos de las presiones intersticiales durante el período constructivo del terraplén, este punto inicial tiene menor valor. Se observa distinta evolución de disipación de excesos de las presiones intersticiales con el tiempo debido a distintas hipótesis de conversión empleadas. La metodología 1 de equivalencia geométrica manteniendo la permeabilidad para PVD dada en el apartado 2.2 (Caso

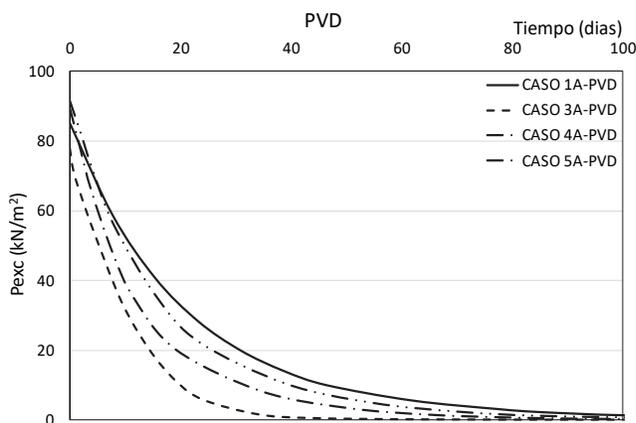


Fig. 8 – Disipación de excesos de presiones intersticiales – terraplén con PVD.

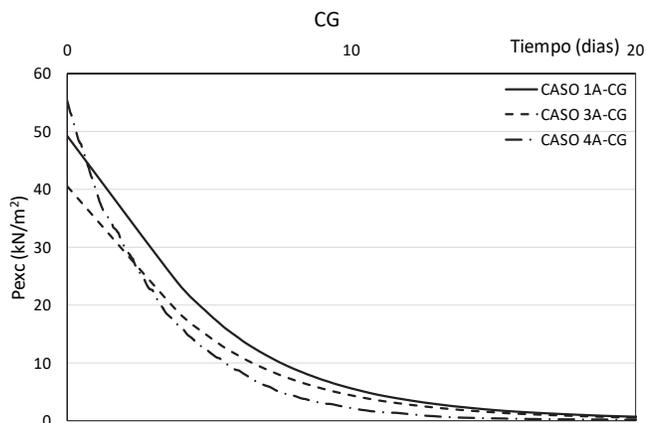


Fig. 9 – Disipación de excesos de presiones intersticiales – terraplén con CG.

3A-PVD) subestima los tiempos de consolidación requeridos en disipación de excesos de las presiones intersticiales (Figura 8) en comparación con los demás métodos.

De las Figura 10 y 11 se observa la tendencia de mayor evolución de los asientos debajo del centro del terraplén en el período de construcción, comparándolo con las Figuras 5 y 6 correspondientes a la célula unitaria.

Los asientos máximos desarrollados en la modelización del terraplén empleando los PVD llegan aproximadamente al mismo valor con una variación de 3 a 5% respecto al modelo 3D (Figura 10). La evolución de los asientos con el tiempo para el Caso 3A-PVD (modelización en deformación plana con equivalencia geométrica), subestima los asientos máximos y los tiempos de consolidación en comparación con el modelo 3D y con los demás métodos de conversión.

De la Figura 11 se observa la misma tendencia en evolución de asientos con la mejora del terreno mediante las CG comparándolo con el modelo de célula unitaria, observando una subestimación de los asientos desarrollados en el Caso 3A-CG (método de equivalencia en permeabilidad manteniendo la geometría). Sin embargo, el método de equivalencia geométrica estima los asientos mayores (Caso 4A-CG). Estas diferencias son debidas a las discrepancias de rigideces entre el modelo real en 3D y en los modelos equivalentes en deformación plana. La diferencia en los asientos máximos obtenidos mediante diferentes modelos empleados es del orden de 20%.

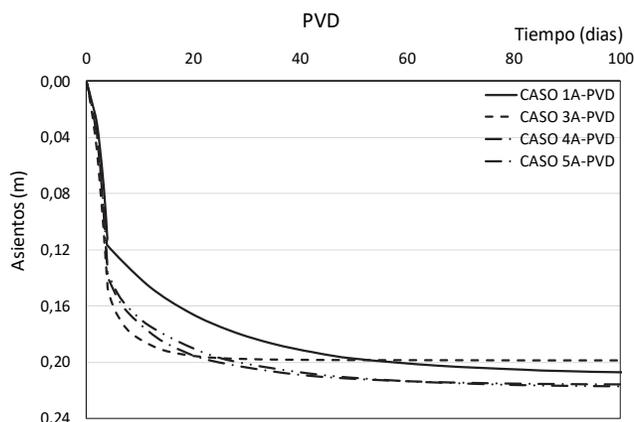


Fig. 10 – Asientos – terraplén con PVD.

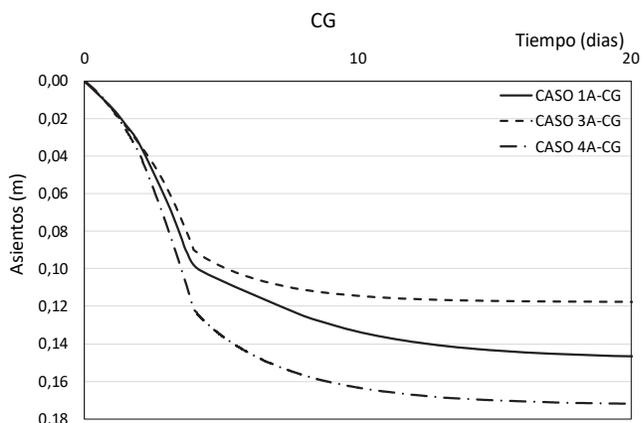


Fig. 11 – Asientos – terraplén con CG.

Los tiempos necesarios para llegar a 90% del grado de consolidación en el caso de diferentes modelos en deformación plana difieren entre 17 y 58% con respecto al modelo 3D de terraplén sobre terreno mejorado con PVD (Caso 1A-PVD) (Figuras 8 y 10), mientras que para la mejora mediante las CG los tiempos difieren entre 10 y 28% (Caso 1A-CG) (Figuras 9 y 11).

5 – ANÁLISIS DEL MODO DE ROTURA DE LAS COLUMNAS DE GRAVA

Con el objetivo de estudiar el mecanismo de deformación de las CG al ser sometidas a las cargas del terraplén, se ha llevado a cabo el siguiente análisis: (a) análisis 3D del sistema completo de terraplén-suelo-CG, (b) ídem (a) en 2D transformando las CG en pantallas equivalentes de acuerdo al método descrito en el apartado 2, (c) análisis 2D modelando las CG y el suelo blando como el bloque homogeneizado con parámetros geotécnicos equivalentes ponderando los parámetros de resistencia y deformabilidad en función del factor de sustitución (a_s) (ver Figura 12).

Los cálculos numéricos se han realizado mediante el software de elementos finitos “Midas”. El modelo numérico tanto en 3D como en 2D contempla solamente la mitad del terraplén debido a la condición de simetría.

En la Tabla 3 se resumen las propiedades geotécnicas adoptadas para el estudio de modos de rotura de CG bajo el terraplén cimentado sobre suelo blando. El terreno blando apoyado sobre un suelo base es de potencia de 10,0 m tratado con CG de 0,9 m de diámetro en malla triangular de 2,5 m de separación. El terraplén es de 6,0 m de altura modelizado con fases de ejecución de 1,0 m cada una.

Tabla 3 – Parámetros geotécnicos para el estudio de modos de rotura de CG.

	γ (kN/m ³)	E (MPa)	ν	c (kPa)	ϕ (°)
CG	22	60	0.3	0	40
Suelo blando	17	3	0.3	2	26
Suelo base	21	30	0.3	5	28
Terraplén	17	30	0.3	0	30

Los parámetros geotécnicos (resistencia y deformabilidad) equivalentes del terreno homogeneizado (bloque del conjunto de suelo y CG) se han definido mediante las formulaciones dadas por Madhav y Nagpure (1996):

$$\tan^2\left(45 + \frac{\phi_{bloque}}{2}\right) = a_s \cdot \tan^2\left(45 + \frac{\phi_c}{2}\right) + (1 - a_s) \cdot \tan^2\left(45 + \frac{\phi_s}{2}\right) \quad (9)$$

$$c_{bloque} = \frac{c_c \cdot a_s \cdot \sqrt{\tan^2\left(45 + \frac{\phi_c}{2}\right)} + c_s \cdot (1 - a_s) \cdot \sqrt{\tan^2\left(45 + \frac{\phi_s}{2}\right)}}{a_s \cdot \tan^2\left(45 + \frac{\phi_c}{2}\right) + (1 - a_s) \cdot \tan^2\left(45 + \frac{\phi_s}{2}\right)} \quad (10)$$

$$E_{bloque} = E_c \cdot [(a_s^2 + E_s/E_c \cdot (1 - a_s))^2] \quad (11)$$

siendo:

$\phi_s, \phi_c, \phi_{bloque}$ – ángulo de rozamiento del suelo, de la columna y del terreno homogeneizado;

c_s, c_c, c_{bloque} – cohesión del suelo, de la columna y del terreno homogeneizado;

E_s, E_c, E_{bloque} – modulo de elasticidad del suelo, de la columna y del terreno homogeneizado.

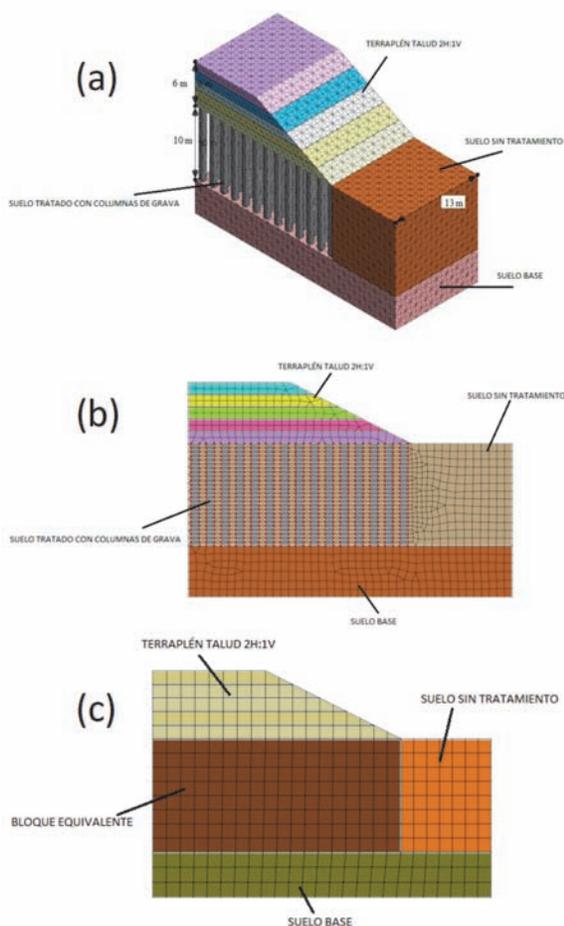


Fig. 12 - Modelos numéricos de análisis de mecanismos de rotura de CG: (a) modelo 3D, (b) modelo 2D con CG transformadas a pantallas equivalentes, (c) modelo 2D con bloque homogeneizado suelo-CG.

En las Figuras 13 y 14 se observa el comportamiento deformacional de las CG deducido de los modelos numéricos presentados en las Figuras 12a y 12b. Se observa la coincidencia en el comportamiento de las CG observado mediante los modelos en 2D y 3D. Se distinguen tres zonas de diferente comportamiento de las CG (Figura 13):

- Zona 1: debajo de la zona central del terraplén. Las CG están sometidas a una deformación vertical acompañadas de un ensanchamiento, estando sometidas a las condiciones de carga casi-axialmente simétricas (“bulging”) (ver Figura 14a). En esta zona 1, las CG están sometidas a condiciones de carga axisimétrica, considerándolo de esa manera aplicable para esta zona en concreto.
- Zona 2: justo detrás de la cresta del talud del terraplén. Las CG están sometidas a una deformación tanto vertical como horizontal por los efectos combinados de ensanchamiento y flexión. En la Figura 14b se observa en la zona 2 el mayor desarrollo de los desplazamientos verticales, mayores que en la zona 1 debido a los mecanismos de deformación simultánea de ensanchamiento y flexión de las CG.

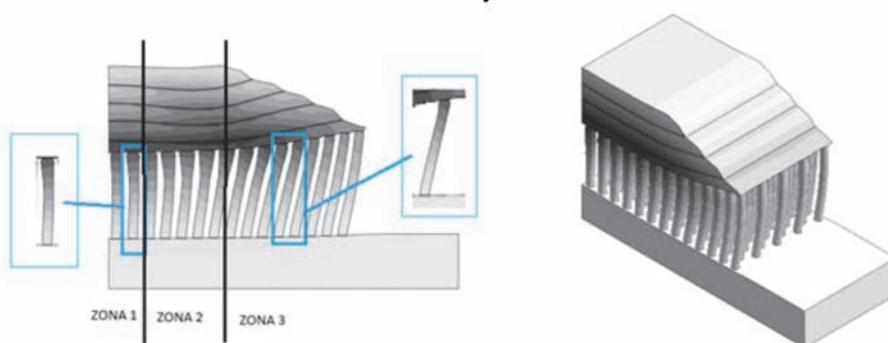


Fig. 13 - Mecanismo de deformación de las columnas de grava según su posición bajo el terraplén.

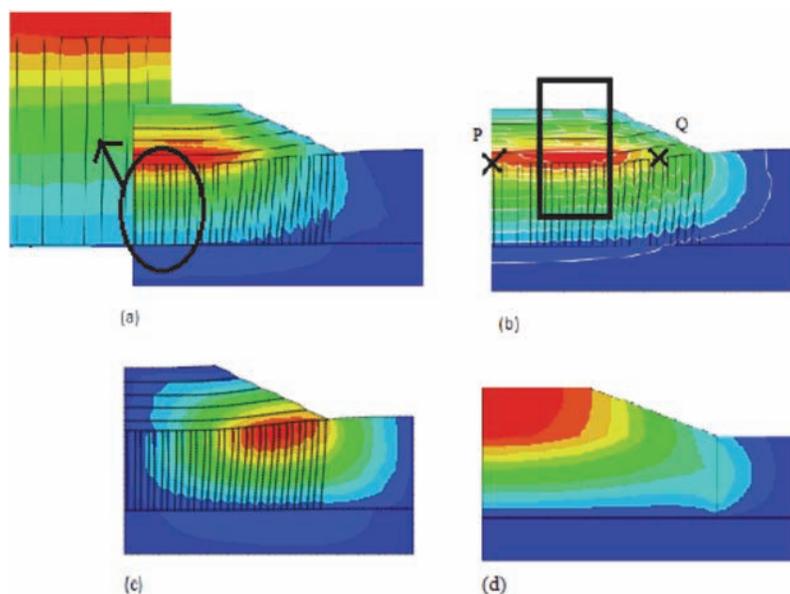


Fig. 14 - (a) Ensayamiento de CG (zona 1); (b) Desplazamiento vertical máximo (zona 2); (c) Desplazamiento horizontal máximo (zona 3); (d) Desplazamiento modelo homogeneizado 2D.

- Zona 3: debajo del talud del terraplén, donde las CG están sometidas principalmente a flexión. En la Figura 14c se observa el mayor desplazamiento horizontal en esta zona 3 debido a la flexión de las CG.

Los resultados obtenidos mediante el análisis numérico (Figuras 13 y 14) son consistentes con los resultados de los ensayos de centrifuga (Steward y Fahey, 1994) efectuados para las CG ejecutadas como apoyo de terraplén de ferrocarril.

En la Figura 14d se presentan los resultados de los desplazamientos para el modelo del terreno homogeneizado (bloque de las CG y el suelo blando) dado en la Figura 12c, confirmando que no es posible estimar las tensiones internas desarrolladas en las CG ni detectar sus mecanismos de deformación.

6 – CONCLUSIONES

La elección del tipo de drenaje del terreno blando que constituye el cimiento de los terraplenes de las obras lineales, mediante CG y PVD, en cuanto a su eficiencia, depende de los requerimientos del proyecto. Como es de esperar, la técnica de CG acelera con mayor rapidez el proceso de consolidación del terreno debido a su mayor capacidad de evacuación de agua en comparación con los PVD.

En este artículo se presentan distintas metodologías existentes y sencillas de conversión de las propiedades geotécnicas reales (modelo 3D) a los modelos de deformación plana en modelización numérica de las técnicas de drenes verticales (PVD y CG). Las diferencias entre distintos métodos de conversión tanto para los PVD como para las CG se basan en diferentes condiciones de transformaciones de geometría y/o del coeficiente de permeabilidad. En el caso de las CG otro parámetro a tener en cuenta en la conversión de las propiedades geotécnicas es la equivalencia de las rigideces de la columna real en el modelo 3D y del panel equivalente en deformación plana.

La comparación de los diferentes métodos de conversión se ha realizado tanto a nivel de la célula unitaria correspondiente al comportamiento individual del elemento tipo dren, como a nivel del terraplén completo modelizando todo el proceso constructivo. Se observa que distintos métodos aplicados para la modelización numérica de los PVD y CG no presentan las correlaciones idénticas de asientos y disipación de excesos de presiones intersticiales, observando las diferencias tanto en valores máximos como en forma de evolución de las curvas de correlación con tiempo.

Se observa en el caso de modelización de terraplén sobre el terreno mejorado con los PVD la subestimación de los asientos utilizando la hipótesis de equivalencia en permeabilidad manteniendo las propiedades geométricas, mientras que la curva de la disipación de los excesos de las presiones intersticiales se ajusta mejor el método de equivalencia geométrica manteniendo las propiedades de permeabilidad.

En el caso de modelización del terraplén sobre la mejora del terreno con las CG se observa la variación de los asientos empleando diferentes métodos debido a la variación en rigideces empleadas, obteniendo valores subestimados para el método de equivalencia en permeabilidad manteniendo las propiedades geométricas, y valores sobreestimados para el método de equivalencia en geometría en relación con los valores deducidos del modelo 3D.

Los métodos numéricos permiten determinar los mecanismos de rotura de las CG construidas como mejora del terreno blando que constituye el cimiento de los terraplenes utilizando los modelos 3D y 2D en deformación plana con las CG modelizadas mediante las franjas de rigidez equivalente, analizando en detalle el estado tenso-deformacional de cada una de las CG.

Se ha confirmado que los modelos numéricos empleando el terreno homogeneizado no son los apropiados para el análisis de los terraplenes cimentados sobre el terreno blando mejorado con las CG para el estudio de la transferencia tensional entre las CG y el suelo, estado deformacional de las CG con sus correspondientes mecanismos de rotura, evaluación de disipación de los excesos de presiones intersticiales, etc.

7 – REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Balaam, N.P. y Booker, J.R. (1981). *Analysis of rigid rafts supported by granular piles*. Int. Journal Numerical Analyt. Meth. Geomechanics, Vol. 5, Nº 4, pp. 397–403.
- Barron, R.A. (1948). *Consolidation of fine-grained soils by drain wells*. Trans. Am. Soc. Civ. Eng., Vol. 113, pp. 718–742.
- Castro, J. y Sagaseta, C. 2009. *Consolidation around stone columns. Influence of column deformation*. Int. Journal Numerical Analyt. Meth. Geomechanics, Vol. 33, pp. 851–877.
- Han, J. y Ye, S.L. (2001). *Simplified method for consolidation rate of stone column reinforced foundations*. Journal of Geotech. and Geoenviron. Eng., ASCE, Vol. 127, Nº 7, pp. 597–603.
- Hansbo, S. (1981). *Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains*. Proc. 10th Int. Conf. Soil Mechanics and Foundations Eng., Vol. 3, pp. 677–682.
- Hird, C.C., Pyrah, I.C. y Russell, D. (1992). *Finite element modelling of vertical drains beneath embankments on soft ground*. Geotechnique, Vol. 42, Nº 3, pp. 499–511.
- Hird, C.C., Pyrah, I.C., Russell, D. y Cinicioglu, F. (1995). *Modelling the effect of vertical drains in two-dimensional finite element analyses of embankments on soft ground*. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 32, pp. 795–807.
- Indraratna, B. y Redana, I. W. (1997). *Plane-strain modelling of smear effects associated with vertical drains*. Journal of Geotech. and Geoenviron. Eng., ASCE, Vol. 123, Nº 5, pp. 474–478.
- Indraratna, B. y Redana, I. W. (2000). *Numerical modelling of vertical drains with smear and well resistance installed in soft clay*. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 37, Nº 1, pp. 132–145.
- Madhav, M.R. y Nagpure, D.D. (1996). *Design of granular piles for embankments on soft ground*. Proc. 12th SE Asian Geot. Conf 1, 285–290, Kuala Lumpur.
- Midas (2016). Reference Manual.
- Stewart, D.P. y Fahey, M., 1994. *Centrifuge modelling of a stone column foundation system*. In: Seminar on ground improvement techniques, 1. Curtin Printing Services, Perth, pp. 101–111.
- Tan, S.A. y Oo, K.K. (2005). *Stone column FEM modeling – 2D and 3D considerations illustrated by case history*. Proc. Int. Symp. on Tsunami Reconstruction with Geosynthetics, ACSIG, Bangkok, Thailand, pp. 157–169.
- Tan, S.A., Tjahyono, S. y Oo, K.K. (2008). *Simplified Plane-Strain Modelling of Stone-Column Reinforced Ground*. Journal of Geotech. and Geoenviron. Eng. ASCE, Vol. 134, Nº 2, pp. 185–194.
- Plaxis 2D (2015). Reference Manual.
- Plaxis 3D (2015). Reference Manual.