

CÁLCULO DE ESTABILIDAD DE TERRAPLENES CIMENTADOS SOBRE TERRENOS BLANDOS REFORZADOS MEDIANTE COLUMNAS DE MEZCLA PROFUNDA (DMM)

Svetlana MELENTIJEVIC^{1*} y Pablo MORILLA²

¹ Departamento Técnico
Grupo Rodio-Kronsa

² Alumno Master de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica
Laboratorio de Geotecnia - Cedex

RESUMEN

Las columnas de mezcla profunda (DMM) representan una de las soluciones más adecuadas para la mejora del terreno blando bajo los terraplenes. En este artículo se presenta el análisis de la estabilidad global de un terraplén apoyado sobre el terreno blando, mejorado con columnas DMM, y la comparación de los resultados obtenidos mediante métodos de equilibrio límite (LEM) y métodos de elementos finitos (FEM). Los métodos LEM han sido tradicionalmente utilizados en los cálculos de estabilidad de terraplenes, centrándose exclusivamente en la rotura por cortante del conjunto suelo-columnas. Se destaca la importancia de la aplicación de los métodos numéricos que ponen de manifiesto diferentes posibles modos de rotura, del tipo flexión o vuelco de columnas DMM, los cuales no se analizan mediante LEM. Dado que la rotura por flexión y/o vuelco pueden ser determinantes en la estabilidad global, las mismas deben analizarse para todos los tipos de columnas rígidas o semi-rígidas, que poseen una alta resistencia a compresión, y muy limitada resistencia a flexión y tracción.

1. INTRODUCCIÓN

La mejora del suelo con columnas realizadas por el método de mezcla profunda (DMM), consiste en la formación de elementos de mejora mediante la mezcla mecánica in situ del terreno natural con un aglomerante, que suele ser cal o cemento, o la mezcla de los dos en diferentes proporciones. El origen de la metodología de la construcción de las columnas DMM viene de los países escandinavos, orientados principalmente en la realización de las columnas de suelo-cal y/o suelo-cal/cemento, y de Japón centrándose básicamente en columnas de suelo-cemento. Las guías de diseño de las técnicas se resumen en EuroSoilStab

(2002) y CDIT (2002), respectivamente.

Las columnas se caracterizan por una elevada resistencia a compresión y un elevado módulo de deformación. A diferencia del suelo natural, experimentan relativamente bajas deformaciones correspondientes al estado de rotura, de entre 1% y 2%, mientras que en algunos suelos, como por ejemplo arcillas plásticas, las deformaciones pueden llegar a niveles de entre 10% y 20% antes de llegar a la rotura. Respecto a la resistencia residual de las columnas DMM, suele considerarse del orden de 80% de su resistencia de pico. Asimismo, tienen una resistencia a flexión y tracción muy limitada.

Una de las aplicaciones más habituales de este tipo de columnas DMM es la mejora del terreno blando bajo los terraplenes, con el objetivo de reducir los asentamientos máximos y diferenciales, para mejorar y garantizar la estabilidad global, para acelerar el proceso constructivo del terraplén, etc.

La distribución en planta de las columnas suele realizarse en mallas cuadradas o triangulares, mientras que en algunos casos, para conseguir los factores de seguridad adecuados es necesario realizar columnas solapadas, formando bloques o paneles perpendiculares al eje del terraplén.

Uno de los parámetros básicos para definir la intensidad del tratamiento es la relación de área mejorada (a_s), que representa el porcentaje de suelo tratado.

$$a_s = A_{col} / A \quad (1)$$

siendo: A_{col} - el área de la columna DMM (m^2), y A - el área del suelo correspondiente a una columna (m^2).

El proceso de definición de la malla y de diseño de la mejora en general suele ser iterativo. Se analizan diferentes patrones de columnas, variando tanto el espaciado entre las mismas como las diferentes formas que se pueden lograr solapando las columnas, con el objetivo de conseguir de forma óptima los valores de factores de seguridad requeridos.

A continuación se presentará el análisis de un terraplén apoyado sobre el terreno mejorado mediante columnas DMM, en este caso suelo-cemento. Se comparan distintos métodos de cálculo disponibles, demostrándose la importancia del uso de los métodos numéricos, que permiten detectar y verificar los tipos de rotura e inestabilidades que no se pueden analizar aplicando únicamente LEM, al limitarse estos últimos exclusivamente a la valoración de factores de seguridad correspondientes a la rotura por cortante.

2. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES

En este apartado se resumen los siguientes métodos de análisis de estabilidad de taludes

de terraplenes cimentados sobre columnas DMM: (a) Métodos de cálculo tradicionales, mediante aplicación de métodos de equilibrio límite; (b) Los ensayos del laboratorio de centrifugación, que permiten detectar los tipos de rotura que habitualmente se presentan en las columnas; y (c) Los métodos numéricos.

2.1. Métodos tradicionales de análisis

Los métodos tradicionales de cálculo de estabilidad para terraplenes mejorados con columnas DMM, consisten en la aplicación de LEM para analizar la superficie de deslizamiento que atraviesa el conjunto de suelo-columnas. En la mayoría de los casos se suele considerar como un terreno equivalente del conjunto columnas-suelo natural, cuyos parámetros ponderados básicamente se adoptan en función del porcentaje de área mejorada o del índice de sustitución:

$$\tau_u = \tau_{u,col} \cdot a_s + \tau_{u,suelo} \cdot (1 - a_s) \quad (1)$$

siendo: τ_u - la resistencia al corte a lo largo de la línea de rotura circular, $\tau_{u,col}$ - la resistencia al corte de las columnas DMM, y $\tau_{u,suelo}$ - la resistencia al corte del suelo entre columnas.

El terreno de apoyo del terraplén estabilizado mediante columnas DMM, considerado como un bloque rígido, se analiza examinando distintos modos de rotura (estabilidad externa) y tensiones inducidas dentro del cuerpo mejorado (estabilidad interna) (Porbaha, 2000). Las comprobaciones habituales se muestran en la Figura 1.

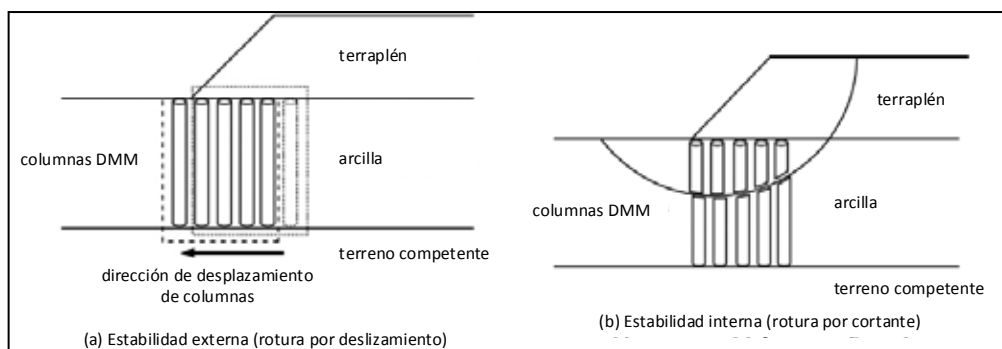


Figura 1 - Modos de rotura de las columnas DMM en el cálculo tradicional (adaptado de Kitazume, 2008).

La estabilidad externa se analiza calculando el factor de seguridad al deslizamiento horizontal en el contacto entre el terreno mejorado y el terreno natural, considerando que el conjunto de columnas y suelo sin tratar entre ellas se mueve o traslada de forma horizontal sobre una capa rígida, sin ningún movimiento relativo o reordenación de las columnas, como se muestra en la Figura 1a (Kitazume, 2008). La estabilidad externa puede ser evaluada como en el caso de estructuras de gravedad, verificando el deslizamiento horizontal, el vuelco y el hundimiento del conjunto de columnas y suelo. Además, se debe examinar la estabilidad

global del conjunto frente a deslizamientos circulares, cuyos círculos de rotura atraviesan zonas por debajo del cuerpo del terraplén y del terreno mejorado con columnas DMM.

La estabilidad interna se analiza calculando las tensiones inducidas por las cargas exteriores dentro del cuerpo del terreno mejorado, verificando si las mismas están dentro de los rangos admisibles (Porbaha, 2000). Lo que se realiza tradicionalmente mediante círculos de rotura que afectan a las columnas se muestra en la Figura 1b.

2.2. Ensayos de centrifugación

Mediante los ensayos de centrifugación realizados por Kitazume y Maruyama (2006) se observó que el modo de la rotura, o el factor que determina la estabilidad externa, es por vuelco de las columnas, en vez de los modos definidos en el cálculo tradicional (Ver Figuras 1 y 2). Después de la construcción del terraplén del ensayo, observaron que las columnas vuelcan como piezas de dominó, una a una con el punto de giro en la base de cada una, con el mismo ángulo de inclinación (ver Figura 3). En base a los resultados de los ensayos citados se deduce que el diseño tradicional en muchos casos conlleva a una sobreestimación de la estabilidad externa al no analizar todos los posibles tipos de rotura o inestabilidad.

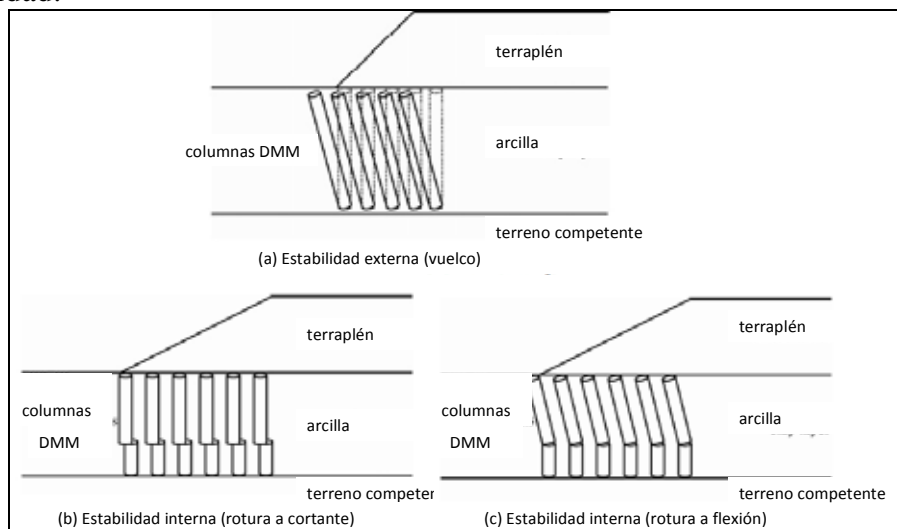


Figura 2 - Modos de rotura de las columnas DMM (adaptado de Kitazume, 2008).

Kitazume (2008) recopila los estudios de distintos autores que llevaron a cabo los ensayos para determinar la estabilidad interna. En función de las características del terreno natural, de la sobrecarga y de la ubicación de cada columna debajo del terraplén, se observaron las roturas principales a cortante, flexión y tracción (ver Figuras 1 y 2). Teniendo en cuenta la reducida resistencia a tracción y a flexión de las columnas, la estabilidad interna, basada únicamente en el estudio de la rotura por cortante, puede sobreestimar valores reales (Kitazume y Maruyama, 2007).

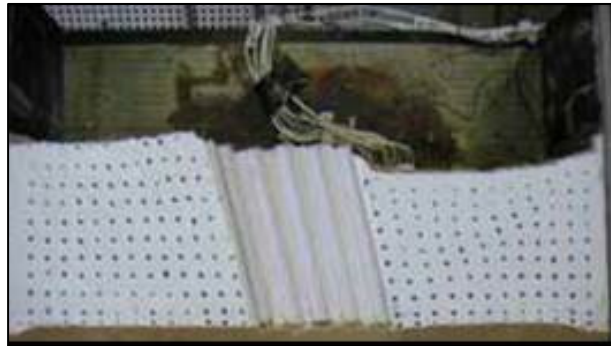


Figura 3 - Rotura por colapso o vuelco en ensayo de centrifugación (Kitazume y Maruyama, 2006).

Los ensayos efectuados verificaron que las columnas no fallan de forma simultánea, sino de una a una progresivamente, en una secuencia que va desde la columna situada al pie del talud hacia las columnas ubicadas en el eje del terraplén. En la Figura 4 se presentan algunos de los resultados de los ensayos de centrifugación con las roturas a flexión y vuelco observadas, para las columnas de dos distintas resistencias a compresión simple, siendo el de menor resistencia el caso dado en la Figura 4a. Se detectó la rotura a flexión en las tres columnas cercanas al pie del talud y en la columna situada en el interior del terraplén mientras que las columnas situadas en la zona central del talud no presentaron la rotura sino inclinación por los esfuerzos laterales inducidos por la carga del terraplén. Asimismo, los ensayos mostraron que la rotura a flexión se produce a menor profundidad en las columnas de menor resistencia (Figura 4a), y también a menor profundidad en las columnas situadas en el interior del terraplén comparándolo con las columnas próximas al pie del talud, independientemente de la resistencia de las mismas.

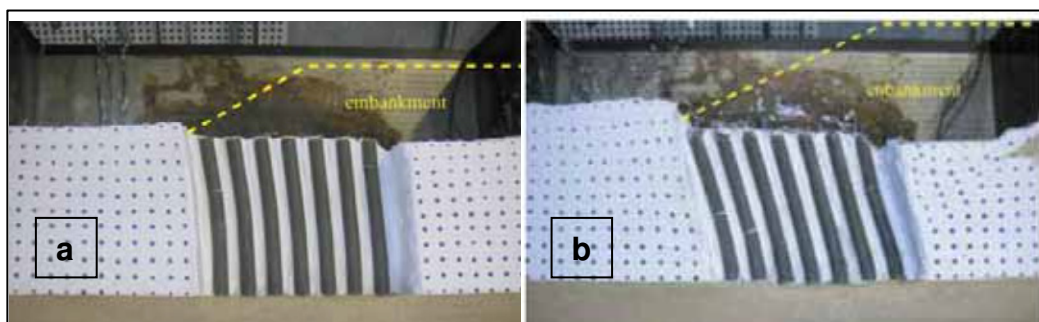


Figura 4 - Rotura a flexión en ensayo de centrifugación (Kitazume y Maruyama, 2007).

En resumen, los resultados de los ensayos de centrifugación permitieron concluir que: (a) El tipo de rotura por vuelco es característico para el caso de las columnas de resistencias a compresión altas; y (b) Las columnas de resistencias baja se caracterizan por el modo de rotura a flexión (Kitazume, 2008).

Es importante destacar que todos los tipos de rotura determinados mediante los ensayos de centrifugación se contrastaron mediante el análisis con modelos numéricos,

confirmando los modos de rotura observados en los ensayos. Se analizó la influencia de distintos parámetros a la estabilidad externa e interna, como por ejemplo la resistencia a compresión simple, la relación del área mejorada, el ancho del área mejorada debajo los taludes de terraplenes, etc. (Kitazume y Maruyama, 2006 y 2007). A base de estos estudios se verificó que tanto el aumento de la relación del área mejorada como la distribución de columnas solapadas en forma de paneles perpendiculares al eje del terraplén aumentan considerablemente la estabilidad externa e interna.

2.3. Análisis de estabilidad mediante métodos numéricos

Tal y como se ha indicado en los apartados anteriores, aplicando exclusivamente LEM, podría sobrestimarse significativamente la estabilidad tanto interna como externa de terraplenes. Los análisis numéricos, a parte de la rotura por cortante, lo que representa el enfoque principal de LEM, permiten detectar y prevenir las posibles roturas por flexión y vuelco. Consecuentemente, el uso de estos métodos es mucho más adecuado, por no decir imprescindible, para casos de terraplenes construidos sobre terrenos blandos mejorados mediante las columnas DMM o cualquier otro tipo de inclusiones rígidas o semi-rígidas.

En el caso de aplicación de modelos numéricos bidimensionales, las columnas se introducen mediante paneles verticales equivalentes, paralelos al eje del terraplén, alternándolos con suelo sin tratar. El espesor de los paneles se calcula en función de la disposición y las características geométricas de las columnas y en base a la equivalencia de rigideces axiales y flectoras.

Para prevenir las posibles roturas por flexión y vuelco, asociadas a las columnas aisladas bajo los taludes de los terraplenes, las columnas se suelen solapar para formar bloques o paneles en la dirección perpendicular al eje del terraplén, aumentando significativamente su resistencia.

En cualquier caso, hay que tener en cuenta que a pesar de la distribución de columnas en paneles pueden darse casos de rotura por vuelco como estructura rígida, la extrusión del terreno natural entre los paneles, o el cizallamiento de las zonas solapadas. Para analizar el fallo por cizalla en los programas de análisis numérico, dentro del área mejorada representada mediante paneles, pueden introducirse bandas con características de resistencia inferior al propio panel, de esta forma se imitan los solapes de las columnas menos resistentes por tener menor espesor (ver Figura 6).

3. EJEMPLO DE APLICACIÓN

En este apartado se presentan los resultados obtenidos mediante los programas de FEM (el código comercial Plaxis) y de LEM (el código comercial Slide), analizando el

terraplén apoyado sobre el terreno tratado con columnas DMM. Para contrastar los resultados se ha elegido el terraplén previamente analizado por Filz y Navin (2006) mediante los programas de diferencias finitas y el equilibrio límite, basándose en los programas comerciales FLAC y UTEXAS (el método Spencer), respectivamente.

El ejemplo de aplicación estudiado es un terraplén de 5,50 m de altura con una inclinación de taludes de 2H:1V, cimentado sobre una arcilla blanda de 8,50 m de espesor, y un nivel subyacente de arena densa. El nivel freático se encuentra en el límite superior de la capa de arcilla blanda. La geometría del terraplén estudiado puede observarse en las Figuras 5 y 6. En la Tabla 1 se presentan los valores de los parámetros geotécnicos del terraplén y del terreno natural adoptados en el cálculo:

Material	γ (kN/m ³)	E (kPa)	E_{ref} (kPa)	E_f (kPa)	$E_{increment}$ (kPa)	ν	c (kPa)	$c_{u,ref}$ (kPa)	$c_{u,f}$ (kPa)	$c_{u,increment}$ (kPa)	ϕ
Terraplén	19,6	29900	-	-	-	0,30	0	-	-	-	35
Capa de arena	18,1	12000	-	-	-	0,33	0	-	-	-	30
Arcilla blanda	15,1	200 c_u	2040	4114	244	0,45	-	10,2	20,6	1,22	0
Sustrato arenoso	22,0	47900	-	-	-	0,26	0	-	-	-	40
Columnas	15,1	207000	-	-	-	0,45	689	-	-	-	0

Tabla 1. Parámetros geotécnicos considerados para modelización.

Para analizar el efecto de la distribución de columnas se estudiaron dos casos: (a) Caso 1, con la distribución de columnas aisladas en una malla cuadrada (Figura 5), y (b) Caso 2, con la distribución de columnas aisladas en una malla cuadrada en la zona central del terraplén y paneles de columnas solapadas en la zona de los taludes (Figura 6).

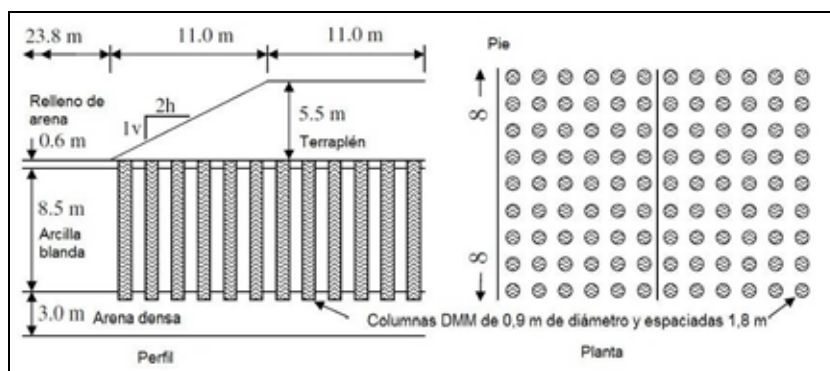


Figura 5 - Sección y planta del terraplén sobre grupo de columnas DMM (adaptado de Navin y Filz, 2006).

En el Caso 1, respetando los modelos estudiados por Filz y Navin (2006), columnas aisladas se han dispuesto en una malla cuadrada de 1,80 m bajo toda la zona de apoyo del terraplén (ver Figura 5), empotrándose 0,60 m en el sustrato arenoso de compacidad densa. Teniendo en cuenta el diámetro de columnas de 0,90 m, se obtiene la relación de

área mejorada, a_s , del 20%. Para adaptar la malla cuadrada al modelo bidimensional, teniendo en cuenta la relación de área mejorada del 20%, se modelizaron paneles verticales paralelos al eje del terraplén, de 0,40 m de ancho, separados 1,80 m entre sus ejes. El espesor de 0,40 m, utilizado en el análisis FEM, se basa en la equivalencia de la rigidez axial del modelo tridimensional y bidimensional, con lo cual se subestima la rigidez a flexión en los cálculos bidimensionales.

En el Caso 2, las columnas ubicadas bajo los taludes han formado paneles continuos, tal y como se puede ver en la Figura 6. Como se ha comentado previamente, esta disposición de columnas se analizó para verificar el aumento de la resistencia a la rotura por vuelco o flexión que pueden presentar las columnas aisladas. La separación entre paneles se adoptó para mantener la relación de área mejorada del 20% bajo los taludes del terraplén.

La resistencia al corte de los paneles se realizó mediante una media ponderada (ver ecuación 2) entre las columnas, el suelo sin tratar entre ellas y la relación de área mejorada. También se incluyeron 4 juntas para representar el solape, con una resistencia de 50% de la asignada a los paneles.

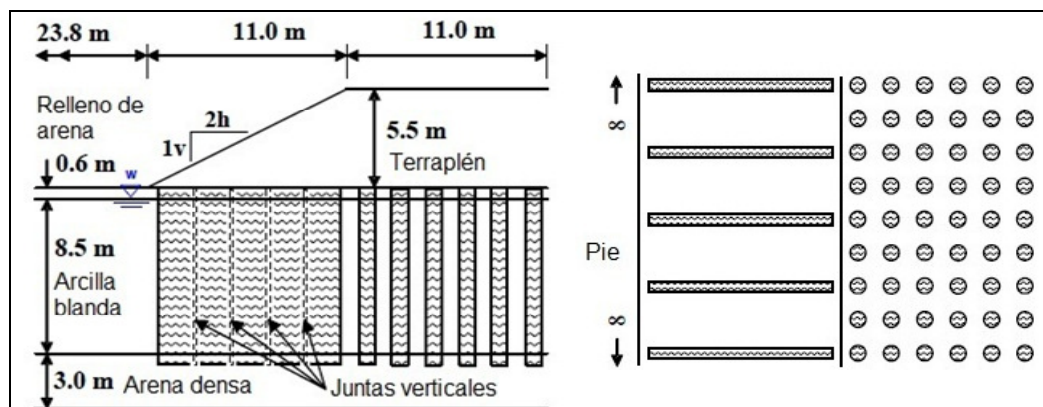


Figura 6 - Sección y planta del terraplén sobre grupo de columnas DMM (adaptado de Navin y Filz, 2006).

3.1. Cálculos de estabilidad realizados por equilibrio límite

Se han realizado los análisis de estabilidad por LEM utilizando el código comercial Slide en condiciones sin drenaje. Los parámetros geotécnicos se presentan en la Tabla 1. Los cálculos de estabilidad mediante LEM se basaron en el método de Bishop simplificado, mientras que los resultados de Filz y Navin (2006) se obtuvieron aplicando el método de Spencer, mediante el programa UTexas. En la Tabla 2 se presenta el resumen de los resultados del cálculo con distintas hipótesis valorados mediante el factor de seguridad. En total se han realizado 6 cálculos de estabilidad por LEM, cuyos resultados se muestran en las Figuras 7 y 8. Se recomienda la técnica de introducción de la capa ficticia, que representa un método en los programas que utilizan LEM, para repartir las tensiones transmitidas del terraplén entre las columnas y el suelo sin tratar. A la capa ficticia no se le asigna la rigidez, y tiene un espesor muy reducido entre el

terraplén y las columnas, cuya función es de generar las concentraciones de tensiones (Barksdale y Bachus, 1983).

Caso	Hipótesis de cálculo de terraplén	FS (Slide)	FS (Filz y Navin, 2006)	
0	Sin tratamiento	0.875		
1	Con tratamiento	Con valores medios equivalentes del conjunto terreno-columnas, ponderados en función del área de mejorada	4.31	
		Con columnas aisladas como franjas verticales de 0.40 m de espesor	4.57	4.4
		Con columnas aisladas como franjas verticales y capa ficticia para simular la distribución de tensiones columnas-suelo	2.83	
2	Con tratamiento	Con paneles de columnas solapadas debajo de taludes de terraplén y columnas aisladas debajo de la parte central del terraplén	4.08	4.4
		Con paneles de columnas solapadas debajo de taludes de terraplén y columnas aisladas como franjas verticales debajo de la parte central del terraplén y la capa ficticia en la zona de columnas aisladas	2.85	

Tabla 2. Casos estudiados y resultados de los análisis mediante LEM.

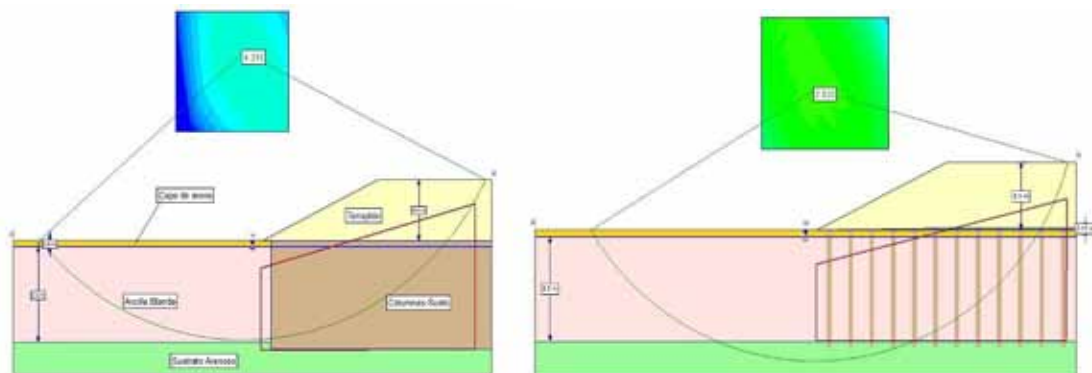


Figura 7 - Resultados del análisis LEM del Caso 1, como terreno equivalente y como columnas con franjas verticales y con capa ficticia (FS=4.31 y 2.83, respectivamente).

Aplicando LEM no se aprecian diferencias significativas del factor de seguridad entre el modelo del terreno equivalente correspondiente a una malla de columnas aisladas y el terreno mejorado mediante paneles debajo de los taludes del terraplén, debido al mismo valor de la relación del área mejorada. Dado que LEM tiene en cuenta únicamente el modo de rotura por cortante, se sobreestima la estabilidad global del terraplén cimentado sobre suelos blandos mejorados con DMM.

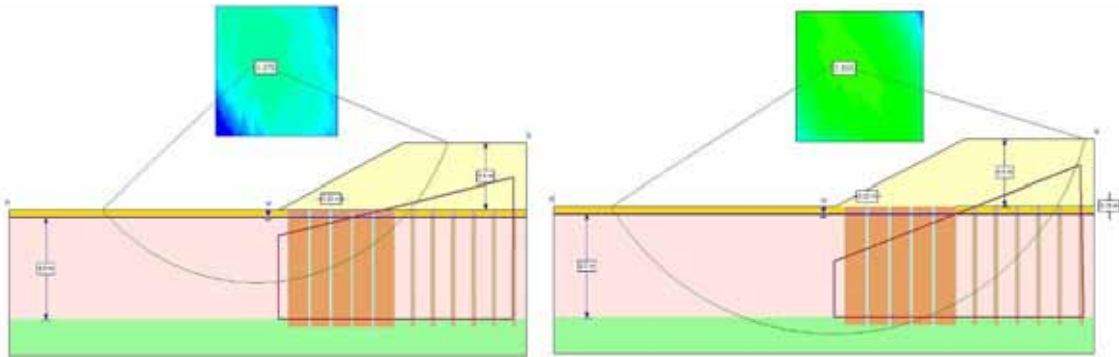


Figura 8 - Resultados del análisis LEM del Caso 2 con columnas solapadas, sin capa ficticia y con capa ficticia (FS=4.08 y 2.85, respectivamente).

3.2. Cálculos de estabilidad realizados por elementos finitos

Los cálculos de estabilidad mediante FEM se han realizado con el programa comercial Plaxis, versión 8.6, mientras que Filz y Navin (2006) utilizaron el programa FLAC de diferencias finitas. En la Tabla 2 se resumen los resultados de tres cálculos realizados con distintas hipótesis.

Caso	Hipótesis de cálculo de terraplén	FS (Plaxis)	FS (Filz y Navin, 2006)
0	Sin tratamiento	0.82	
1	Con tratamiento con columnas aisladas como franjas verticales con espesor de 0.40 m	1.23	1.42
2	Con tratamiento con paneles de columnas solapadas debajo de taludes de terraplén y columnas aisladas como franjas verticales	2.65	2.85

Tabla 3. Casos estudiados y resultados de los análisis mediante FEM.

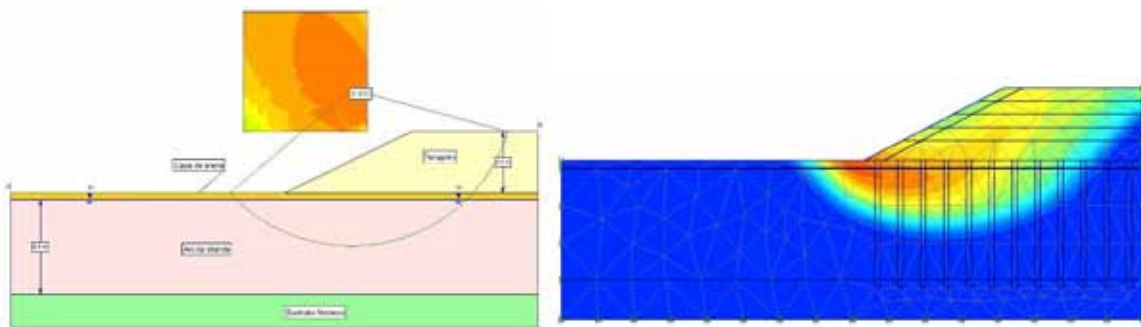


Figura 9 - Resultados del análisis LEM y FEM del terraplén para el Caso 0 de la Tabla 2 y 3 (FS=0.88 y 0.82).

Los valores del factor de seguridad, para ambos casos (Figuras 5 y 6), obtenidos mediante FEM son inferiores que los valores obtenidos mediante LEM. Se presentan las mallas deformadas de los casos 1 y 2 (ver Figura 11) de la Tabla 3 mostrando las roturas a flexión y vuelco en el caso 1. En la Figura 12 se presentan las tensiones cortantes y

verticales en el terreno, observando las roturas a cortante en las columnas y concentraciones de tensiones en las columnas, indicando la rotura por flexión, y el despegue del terreno circundante de las columnas.

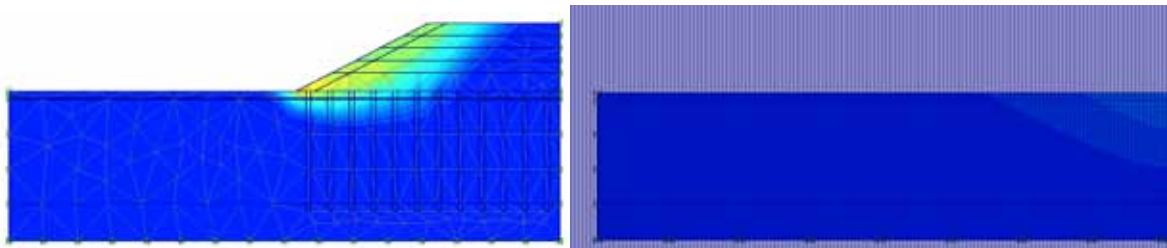


Figura 10 - Resultados del análisis FEM de terraplén de los Casos 1 y 2 (FS=1.23 y 2.65).

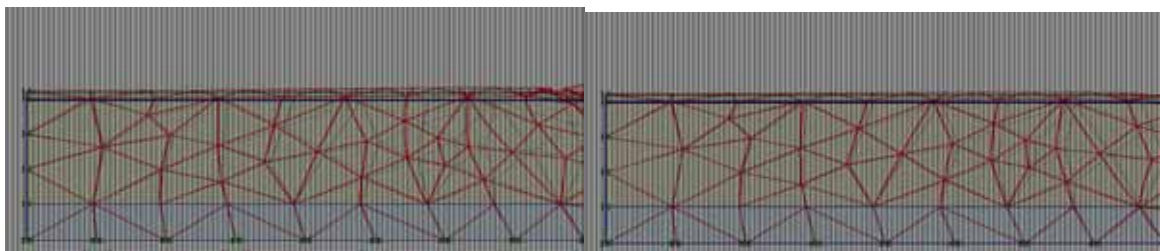


Figura 11 - Resultados del análisis FEM - mallas deformadas en los Casos 1 y 2.

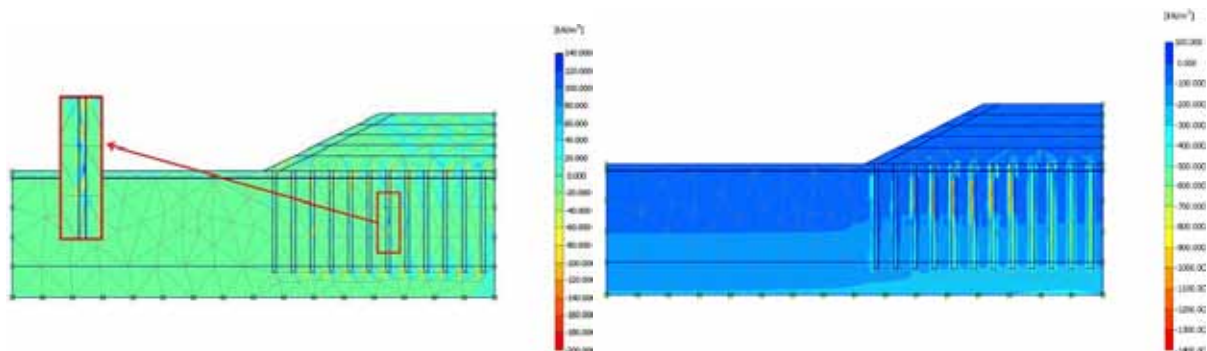


Figura 12 - Resultados del análisis FEM - tensiones a cortante y verticales en rotura del Caso 1.

Dado que los métodos numéricos se basan en las relaciones tensión-deformación permitiendo la rotura múltiple de las columnas, incluyendo la rotura a flexión, vuelco y cortante, se obtienen los resultados más reales que aplicando LEM.

4. CONCLUSIONES

A continuación se resumen las conclusiones principales del análisis realizado:

- En base a los ensayos de centrifugación, y posteriormente aplicando los métodos numéricos, se detectaron los modos de rotura por vuelco y flexión que no se tenían en cuenta en el diseño tradicional.

- Los análisis de estabilidad mediante LEM no detectan algunos modos de rotura, los cuales pueden ser determinantes respecto a la estabilidad global de taludes cimentados sobre terrenos blandos mejorados con columnas DMM. Para detectar y analizar todos los posibles modos de rotura, incluidos vuelco y flexión, es imprescindible aplicar los métodos numéricos. Consecuentemente, el valor de FS obtenido mediante métodos numéricos suele ser más bajo que el obtenido mediante LEM.
- El valor de FS obtenido mediante LEM aplicándole la hipótesis de la capa ficticia, es muy próximo a los resultados obtenidos mediante los métodos numéricos.
- La distribución en planta de columnas DMM formando paneles bajo los taludes de terraplén proporciona el aumento del FS en comparación con la distribución de columnas aisladas con la relación de área mejorada similar.
- Para valoración del FS en el caso de columnas distribuidas en paneles debajo los taludes es imprescindible aplicar FEM dado que LEM se fundamenta únicamente en el valor de relación de área mejorada y características del terreno equivalente, sin tener en cuenta la distribución de columnas.
- En general, los estudios de estabilidad de terraplenes cimentados sobre terrenos blandos mejorados mediante cualquier tipo de inclusiones rígidas y semi-rígidas deben realizarse aplicando métodos numéricos que permiten verificar todos los posibles modos de rotura e inestabilidades.

REFERENCIAS

- Barksdale, R. D. and Bachus, R. C., 1983. Design and construction of stone columns, Vol. 1. FHWA RD-83/026, 194 pp.
- CDIT (Coastal Development Institute of Technology), 2002. The Deep Mixing Method: Principle, Design and Construction, 123 pp.
- EuroSoilStab, 2002. Development of design and construction methods to stabilise soft organic soils. Design guide soft soil stabilization, 94 pp.
- Filz, G. and Navin, M., 2006. Stability of column-supported embankments. Report on state project N° VTRC 06-CR13: 76 pp.
- Kitazume, M., 2008. Stability of group column type DM improved ground under embankment loading. *Report of the Port and Airport Research Institute*, Vol. 47, No. 1: 53 pp.
- Kitazume, M. and Maruyama, K., 2006. External stability of group of column type deep mixing improved ground under embankment loading. *Soils and Foundations*, Vol. 46, No. 3: 323-340.
- Kitazume, M. and Maruyama, K., 2007. Internal stability of group of column type deep mixing improved ground under embankment loading. *Soils and Foundations*, Vol. 47, No. 3: 437-455.
- Navin, M. and Filz, G., 2006. Reliability of deep mixing method columns for embankment support. *GeoCongress 2006: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age*; Atlanta, GA (EE. UU.); ASCE Proc.
- Porbaha, A., 2000. State of the art in deep mixing technology. Part IV: Design considerations. *Ground Improvement*, Vol. 3: 111-125.