

REVISTA TECNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DEL ZULIA

MARACAIBO - VENEZUELA



Una Revista Internacional Arbitrada
que está indizada en las publicaciones
de referencia y comentarios:

- Science Citation Index (SCIExpanded)
- Compendex
- Chemical Abstracts
- Metal Abstracts
- World Aluminium Abstracts
- Mathematical Reviews
- Petroleum Abstracts
- Current Mathematical Publications
- MathSci (online database)
- Revenct
- Materials Information
- Periódica
- Actualidad Iberoamericana

Evaluation of bearing capacity in Bimsoil under a shallow foundation using FEM

Denisse Dianet Campos-Muñoz, Alfonso Mariano Ramos-Cañón, Luis Felipe Prada-Sarmiento

Facultad de Ingeniería. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia. Cra 7 No 40-62. denisse_campos@javeriana.edu.co

Instituto Geofísico. Facultad de Ingeniería. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia. Cra 7 No 40-62. a-ramos@javeriana.edu.co

Facultad de Ingeniería. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia. Cra 7 No 40-62. lf.pradas@javeriana.edu.co

Abstract

The colluvial deposits are loose and heterogeneous materials composed of soils or rock fragments deposited on the slopes. The Bimsoil term is used for denominate blocks of rock embedded in soil matrix and the strength and stiffness ratio is higher to 2. Frequently, the geotechnical engineer considers the strength of weak matrix in design, which could oversize or undersize in engineering works depending on the nature of matrix. The aim of this work is to compare the strength of soft clayey soil deposit and colluvial deposit with clayey matrix based on two FEM model in order to calculate bearing capacity of a square footing. The bearing capacity in colluvial deposit shows that the blocks contribute to the Bimsoil's strength for high settlements due to the formation of chains of strength that generate an arc effect. The increment of friction angle due to the blocks in a limit equilibrium formulation is an acceptable approximation for estimate the bearing capacity in a Bimsoil.

Keywords: Bimsoil; square shallow foundation; colluvium; finite element method; bearing capacity.

Evaluación de la capacidad portante en un Bimsoil bajo una cimentación superficial mediante FEM

Resumen

Los depósitos coluviales son materiales sueltos y heterogéneos de suelos o fragmentos de roca depositados en la base o parte media de las laderas. Para denominar a estos materiales, se deriva el término Bimsoil para definir bloques de roca embebidos en una matriz de suelo, en el que la relación de resistencia y rigidez entre los bloques y la matriz es mayor a 2. Frecuentemente, el ingeniero geotecnista considera sólo la resistencia de la matriz débil para el diseño, lo que puede generar sobredimensionamiento o subdimensionamiento de obras de ingeniería, dependiendo de la naturaleza de la matriz. Con el fin de comparar la resistencia de un depósito de suelo arcilloso blando y un depósito coluvial de matriz arcillosa, se generaron dos modelos en FEM para obtener la capacidad portante bajo una cimentación cuadrada. La capacidad portante en un depósito coluvial refleja que los bloques aportan resistencia al Bimsoil para asentamientos altos y se debe a que los bloques embebidos en la matriz forman cadenas de esfuerzos generando un efecto de arco. El incremento del ángulo de fricción ($\Delta\phi$) debido a los bloques en una formulación de equilibrio límite es una buena aproximación para estimar la capacidad portante en Bimsoils.

Palabras clave: Bimsoil; cimentación superficial cuadrada; coluvión; método de elementos finitos; capacidad última.

Introducción

Bimsoil y Bimrock son términos compuestos por la abreviatura BIM que significa Block in matrix y soil o rock para referirse a una matriz de suelo o roca. Medley [1] propuso el término de Bimrock para suelos conformados por bloques rígidos dentro de una matriz rocosa débil. Algunos ejemplos son los meláncas, rocas piroclásticas gruesas, aglomerados, rocas falladas, meteorizadas y altamente tectonizadas. Kalender et al. [2] deriva el término Bimsoils para denominar depósitos coluviales y glaciares. En materiales BIM, la relación de resistencia y rigidez entre el bloque y la matriz debe ser mayor a 1,5 y 2, respectivamente (Lindquist y Goodman, [3]). La resistencia de Bimrocks y Bimsoils depende de la proporción volumétrica de bloques (*PVB*), tamaño, grado de cementación, ubicación espacial y orientación de los bloques (Irfan y Tang, [4]). Kalender et al. [2] generaron un esquema para caracterizar los parámetros de resistencia en Bimrocks y Bimsoils, en el que se indica que el aumento de la *PVB* genera un incremento en el ángulo de resistencia y una reducción en la cohesión. Sin embargo, si la naturaleza de la matriz es predominantemente cohesiva y la *PVB* es menor al 40 %, la cohesión puede aumentar por la generación de zonas de compactación ubicada entre los bloques (Miller y Sowers, [5]).

La caracterización de estos materiales es muy compleja y típicamente el ingeniero geotecnista considera sólo la resistencia de la matriz débil para el diseño, sin considerar el aporte de los bloques (Medley y Rehmann [6], Medley y Goodman [7]). Esta consideración permite que diversos diseños geotécnicos se sobredimensionen cuando la naturaleza de la matriz es cohesiva y el contenido de bloques es alto o subdimensionen cuando la naturaleza de la matriz es predominantemente granular y el grado de cementación entre el bloque y la matriz es débil que no permite que los bloques se sostengan dentro de la matriz (Glawe y Upreti [8]).

Irfan y Tang [4] proponen un modelo de análisis con base en el mecanismo de falla de coluviones que puede ser visualizado a lo largo de una superficie irregular definido por la forma, tamaño y espaciado de los bloques. El incremento de la dilatancia de la masa del suelo durante el corte a lo largo de la superficie irregular puede ser expresado como un incremento en el ángulo de fricción de la resistencia al corte de la matriz del Bimsoils, por lo que la contribución de dilatancia y fricción en la pendiente de las curvas de fluencia se le llama ángulo de resistencia. El análisis teórico de taludes muestra que el ángulo de

resistencia incrementa linealmente con el contenido de bloques y la cohesión cambia muy poco. Para representar el aporte de los bloques se adiciona un $\Delta\phi'$ al ángulo de resistencia de la matriz que depende principalmente de la proporción volumétrica de bloques en el depósito.

Bajo este panorama, en este trabajo se determina la validez de la propuesta de incremento del ángulo de resistencia ($\Delta\phi'$) a una formulación de equilibrio límite por medio de la comparación con un análisis esfuerzo deformación de un Bimsoil modelado en FEM. Es necesario determinar el aporte de los bloques rígidos en la capacidad de carga de cimentaciones superficiales, debido a que es un parámetro de verificación en el diseño útil para el dimensionamiento de la estructura. Por lo anterior, se generaron modelos en elementos finitos encontrando la capacidad portante en los dos tipos de depósito de suelo mencionados y se compararon con el resultado de aplicar la formulación de equilibrio límite propuesta por Terzaghi et al. [9] para falla local considerando un $\Delta\phi'$ al ángulo de resistencia.

Propiedades de los materiales

La definición de las propiedades para los depósitos de suelo a analizar se ha separado en matriz y bloques. El depósito de suelo arcilloso blando corresponde a la matriz y el depósito coluvial será la mezcla de matriz y bloques con un contenido de 20% en volumen (*PVB* bajas).

Matriz

El modelo constitutivo utilizado para la matriz es Mohr - Coulomb con ablandamiento para representar un suelo arcilloso ligeramente sobreconsolidado. El software de elementos finitos utilizado es Abaqus y presenta los parámetros de módulo de elasticidad (*E*), coeficiente de poisson (*v*), ángulo de fricción (ϕ), dilatancia (ψ), cohesión equivalente (c^*) y deformación plástica equivalente (ϵ_{eq}^{pl}). Para obtener los parámetros se realizaron simulaciones de ensayos triaxiales consolidados hasta que los resultados se ajustaron al comportamiento de un caolín sobreconsolidado en laboratorio reportado por Sachan y Penumadu [10], considerando la mínima diferencia en el esfuerzo pico ($\Delta\sigma_p$), la deformación al esfuerzo pico ($\Delta\epsilon$) y el esfuerzo residual ($\Delta\sigma_r$) como se observa en la Figura 1. Además, en la Figura 1 se presentan las características del caolín obtenidas en laboratorio y reportadas por Sachan y Penumadu [10]. Los parámetros del modelo se presentan en la Tabla 1 y reflejan una cohesión de 33 kPa y un ángulo de resistencia de 12° para la envolvente de la resistencia Mohr - Coulomb.

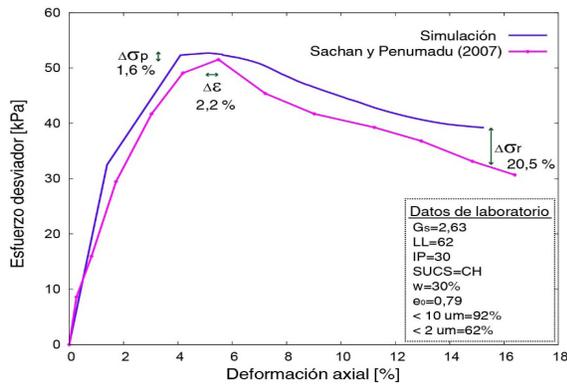


Figura 1. Curvas esfuerzo desviador - deformación axial para caolín (Sachan y Penumadu, [10]) y la simulación.

Tabla 1.

Parámetros del modelo constitutivo Mohr-Coulomb para matriz arcillosa.

Parámetro	Valor
γ	15 kN/m ³
E	15,000 kPa
ν	0,32
φ'	12°
ψ	3°
c^*	30 kPa - 30 kPa - 10 kPa
ε_{eq}^p	0 - 0,15 - 0,6

Bloques

El modelo constitutivo para los bloques es elasticidad lineal dado su carácter rígido y debido a que el nivel de esfuerzos a los que estará sometido estará en el rango lineal. Los parámetros para los bloques se obtuvieron considerando las propiedades del granito. Zhang [11] presenta que el módulo de elasticidad (E) varía entre 6 GPa y 100 GPa y el coeficiente de Poisson (ν) entre 0,09 y 0,39. Para el modelo se consideró un E de 52 GPa y un ν de 0,19.

Modelo numérico

Dado que la naturaleza de un Bimsoil es muy compleja, se adoptaron los siguientes supuestos para la configuración del modelo de una cimentación cuadrada rígida sobre un depósito de suelo.

Los bloques de roca son esféricos y de tamaño uniforme en todo el suelo con el fin de obtener la influencia únicamente de la variable PVB en el depósito. Irfan y Tang (1993), Lindquist y Goodman (1994) indican que la PVB es la variable más influyente en la resistencia de Bimsoils.

La ubicación espacial de los bloques sigue una distribución aleatoria uniforme para no generar caminos de preferencia de bloques en ninguna dirección y para representar la naturaleza no organizada de un coluvión (Fletcher, [12]).

La PVB es baja y corresponde al 20% del volumen del suelo.

El tamaño de bloque corresponde al 33% del ancho de la cimentación (B), que es la dimensión característica de ingeniería (L_c) definida por Medley y Zekkos [13].

La matriz tiene un grado de compresibilidad alto por lo que los bloques y la matriz circundante se desplazan juntos al imponer el asentamiento. Para ello, se hizo que las caras externas de los bloques y la matriz circundante compartan nodos.

El análisis se realiza en función de esfuerzos efectivos.

Geometría

La definición de la geometría consiste en generar un prisma cuadrangular que representa al depósito de suelo y otro para la cimentación. Para reducir el problema, se utilizó líneas de simetría (LS) como se muestra en la Figura 2. Estas líneas de simetría reducen el problema a un cuarto del tamaño original. Las dimensiones del prisma son 7,5 m de lado y 8 m de profundidad, que corresponde a $5B$ aproximadamente, donde B es el ancho de la cimentación igual a 1,5 m.

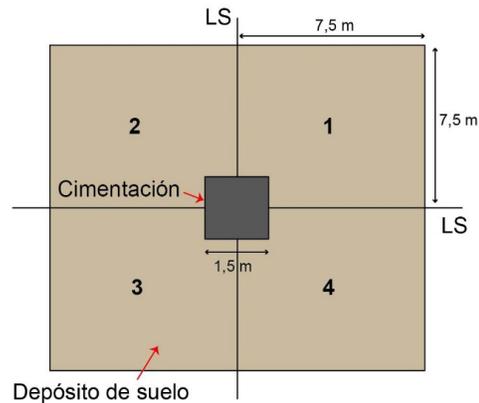


Figura 2. Esquema geométrico de la cimentación superficial cuadrada.

Para representar los bloques se realizó un código que permita ubicar los bloques de forma aleatoria uniforme dentro del prisma, sin variar su tamaño en toda la masa del suelo. Medley y Zekkos [13] presenta que la distribución de tamaños que caracteriza a los melánces es una función potencial; desde bien gradada hasta pobremente gradada. Al suponer que el tamaño de los bloques es único en todo el depósito de suelo, la granulometría de los bloques de roca es pobremente gradada y el análisis es conservador, ya que una granulometría bien gradada ofrece mayor resistencia en estos materiales (Medley, [14]). Se comprueba que la ubicación espacial de los bloques sea aleatoria uniforme en el prisma mediante la Prueba Kolmogorov - Smirnov, con un nivel de confiabilidad de 99 %.

El modelo consta de dos pasos: el geoestático y el asentamiento. El geoestático considera el peso del suelo arcilloso blando (matriz) y de los bloques de roca y el asentamiento consiste en la imposición de una condición de desplazamiento controlado en z sobre el área de la cimentación hasta llegar a 5 cm. En la Figura 3 se presentan las condiciones del modelo considerando la geometría, modelo constitutivo de los materiales, condiciones de contorno impuestas en el depósito de suelo y enmallado.

La cimentación cuadrada se modeló como un cuerpo rígido para obtener la fuerza de reacción y calcular el esfuerzo a distintos asentamientos. El modelo de interacción entre cimentación y suelo fue el de "Fricción isotrópica de

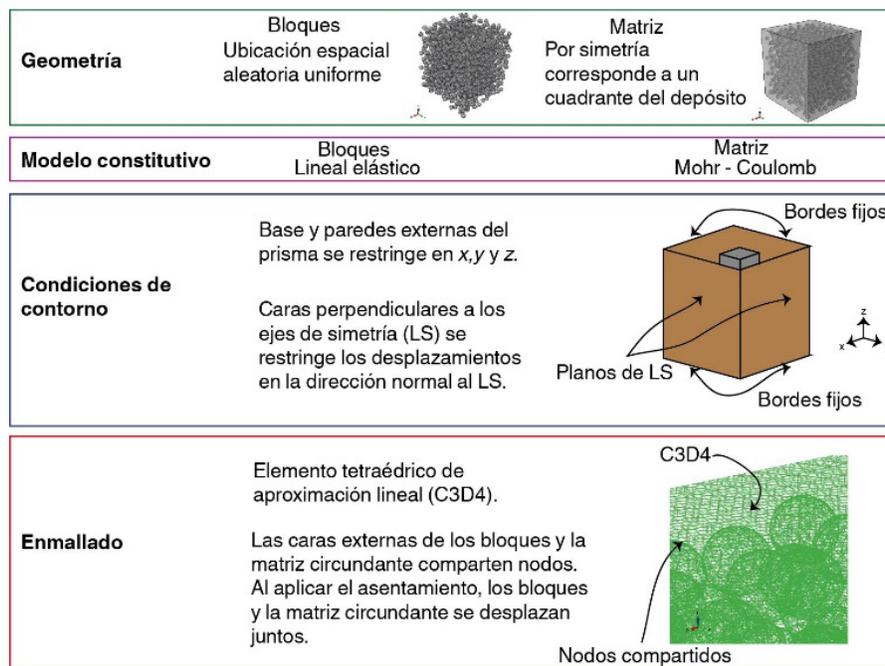


Figura 3. Consideraciones del modelo en FEM del depósito de suelo.

Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno se dividen en tres grupos. El primer grupo corresponde a los nodos de la base y las paredes externas del prisma, el segundo y tercer grupo se generan por la condición de simetría impuesta para reducir el tamaño del modelo y corresponden a los nodos de las caras perpendiculares a las líneas de simetría (Johnson et al., [15]; Johnson [16]; Oktay [17]). Al primer grupo se le restringe los desplazamientos en todas las direcciones, al segundo y tercer grupo se restringen los desplazamientos en el plano normal al eje de simetría dejando el movimiento a lo largo de los planos en la dirección vertical y horizontal.

Coulomb", en el que se define un coeficiente de fricción (μ) entre las superficies en contacto. El coeficiente de fricción relaciona el esfuerzo tangencial y presión de contacto. Si durante la simulación el esfuerzo tangencial equivalente (magnitud de todos los esfuerzos tangenciales) supera el esfuerzo crítico (definido por $\mu=0,15$) se produce deslizamiento (Hibbitt et al., [18]).

Enmallado

La técnica de enmallado fue de malla libre debido a que la geometría del depósito coluvial consta de bloques esféricas y se asignó un elemento tetraédrico de aproximación lineal. Se generaron cerca de 1 millón de

elementos para el depósito de suelo arcilloso blando y 8 millones de elementos para el depósito coluvial.

Las mallas se generaron por separado, primero el depósito de suelo arcilloso blando (matriz) y luego los bloques, se establecieron las propiedades del material a los elementos de cada malla y luego se unieron. La unión de mallas permite que los bloques y la matriz compartan nodos, y que ambos componentes se desplacen juntos. La verificación de malla revisa la forma, angularidad y adaptabilidad del elemento tetraédrico que compone toda la geometría siguiendo los criterios de Hibbitt et al., [18].

Análisis de resultados

En el modelo de depósito arcilloso blando se observa que se genera una falla de punzonamiento característica de arcillas blandas (Vesic, [19]). La distribución de esfuerzos Von Mises o esfuerzos de corte en el depósito de suelo arcilloso blando y el depósito coluvial para un asentamiento de 5 cm se presenta en la Figura 4 y se definen como $q = \sqrt{\frac{3}{2}(S:S)}$, siendo S el tensor de esfuerzos. Los esfuerzos de corte generados hasta 3 m de profundidad (2B) son de 40 kPa y 35 kPa, respectivamente y la máxima deformación es de 8% en la superficie de suelo en contacto con la cimentación. Los bloques generan caminos tortuosos (Medley, [14]), por lo que los contornos de esfuerzos de corte en el depósito coluvial presentan irregularidades (ver Figura 4b).

Las deformaciones en el depósito coluvial no son uniformes y se propagan por zonas de menor rigidez. Es decir, se extiende por la matriz compresible generando caminos preferenciales que rodean los bloques dentro del depósito.

En la Figura 5 se presenta la capacidad última con el asentamiento y se observa que para asentamientos menores a 1,3 cm no existe diferencia entre suelo arcilloso y coluvión, mientras que para mayores asentamientos existe un aporte de los bloques de roca. Este resultado es compatible con lo reportado por Barton [20] que presenta un esquema de comportamiento de resistencia con la deformación para saprolitos (Figura 6). Se observa que inicialmente la resistencia es dominada por la matriz arcillosa (deformaciones bajas) y posteriormente se presenta una zona dominada por los bloques de roca (deformaciones altas).

El aporte de los bloques es importante a deformaciones altas. Es decir, en proyectos en donde se admiten pequeños asentamientos, los resultados de análisis son similares con sólo matriz o incorporando en el análisis la mezcla bloque-matriz. Para proyectos que permitan asentamientos mayores se puede realizar un análisis considerando los bloques, siempre que la rigidez de los bloques sea alta y presente un bajo grado de meteorización.

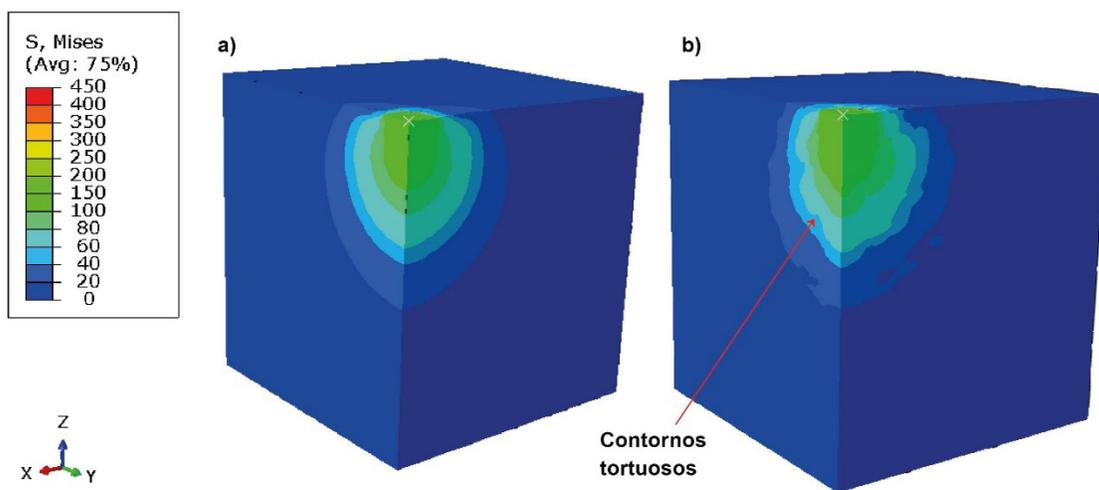


Figura 4. Distribución de esfuerzos Von Mises [kPa] en a) depósito de arcilla blanda y b) depósito coluvial.

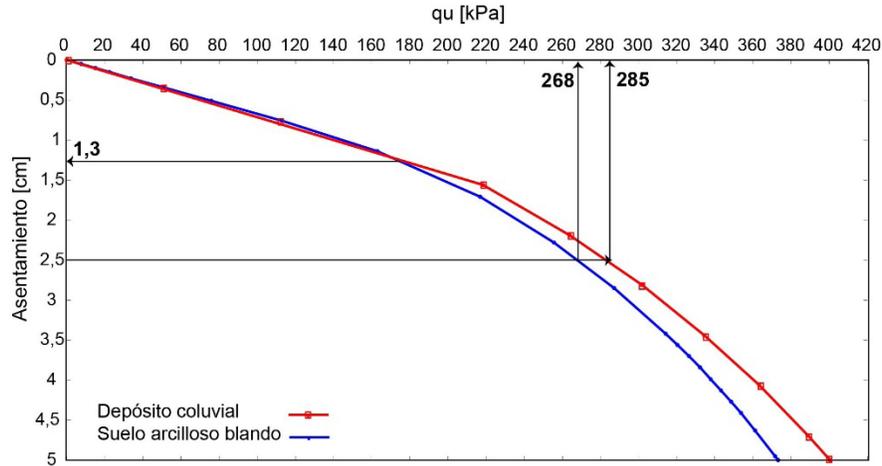


Figura 5. Evolución de la capacidad última con el asentamiento.

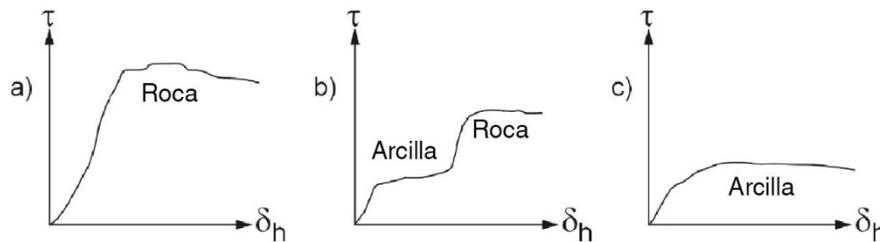


Figura 6. a) Resistencia al corte de roca. b) Resistencia al corte de saprolitos. c) Resistencia al corte de matriz arcillosa (Adaptada de Barton [20]).

Dado que la resistencia de un Bimsoil depende de la naturaleza de la matriz y de los bloques de roca, se observa que debido a que los bloques son más rígidos que la matriz arcillosa, desarrollan más resistencia y dependiendo del tamaño y ubicación espacial se pueden formar cadenas de esfuerzos generando un efecto de arco como se puede observar en la Figura 7, cuyos esfuerzos Von Mises o esfuerzos de corte se obtienen con la expresión $q = \sqrt{\frac{3}{2}(S:S)}$, siendo S el tensor de esfuerzos.

En la distribución de esfuerzos de corte en una sección a la mitad de la cimentación (plano x - z) se observa que los bloques ubicados justo debajo de la cimentación son los que presentan mayores esfuerzos (hasta 8,5 MPa) y la transferencia de esfuerzos se visualiza entre bloques

cercanos y se extiende a una profundidad mayor que la definida en el depósito arcilloso blando.

En la distribución de esfuerzos de corte en una sección a la mitad de la cimentación (plano y - z) se observa que existen más bloques justo bajo la cimentación con esfuerzos de hasta 7,7 MPa y se encuentran más cerca entre sí, por lo que la transferencia de esfuerzos en ese plano llega a menos profundidad que en el plano x - z. La transferencia de esfuerzos generada en el interior del depósito permite que los contornos de esfuerzos sean tortuosos como se visualizó en la Figura 7b e interiormente se pueden

dibujar enlaces dependiendo de la cercanía entre bloques.

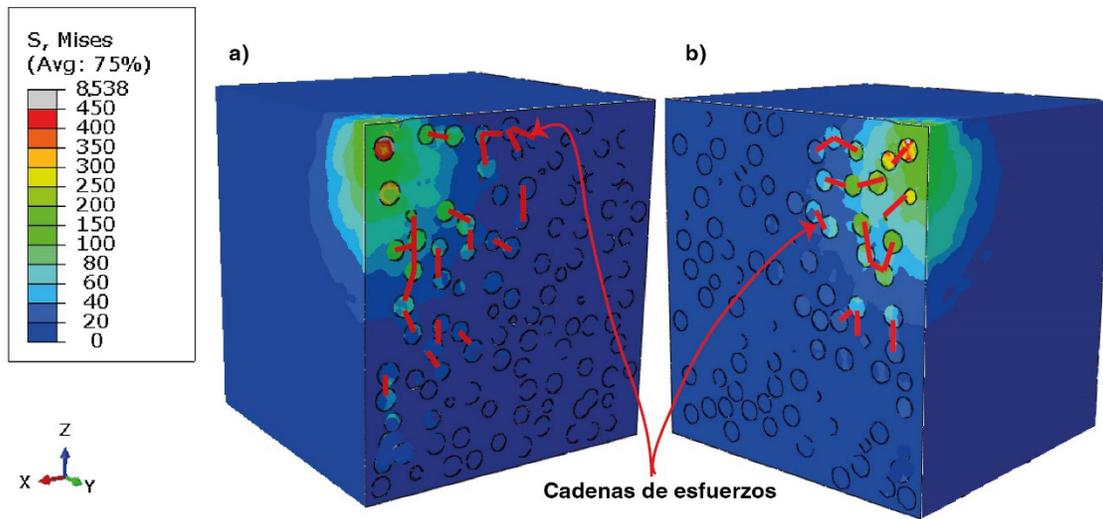


Figura 7. Distribución de esfuerzos en a) plano x - z y b) plano y - z del depósito coluvial.

La diferencia de la capacidad última de una cimentación superficial sobre un depósito coluvial y sobre un depósito de un suelo arcilloso blando radica en que los bloques rígidos generan una mayor distribución de los esfuerzos a través de cadenas de esfuerzos que dependen principalmente de la PVB y la ubicación espacial de los bloques que denota la cercanía entre ellos.

Por otro lado, se aplicó la ecuación de capacidad última propuesta por Terzaghi et al. [9] para falla local (ver ecuación 1), y tomando las propiedades de la matriz ($\gamma=15$ kN/m³, $c=33$ kPa y $\phi'=12$) para una cimentación cuadrada con 1,5 m de ancho, se obtiene un valor de q_u de 281 kPa. Este resultado es mayor a la capacidad última de 268 kPa obtenida en la simulación para un asentamiento de 1" (Ver Figura 5) para un depósito homogéneo.

$$q_u = 0,867c'N'_c + \gamma D_f N'_q + 0,4\gamma B N'_\gamma \quad (1)$$

De acuerdo a la propuesta de Irfan y Tang [4] para estimar la resistencia al corte de coluviones se adiciona un $\Delta\phi'$ al ángulo de fricción. Para obtener el $\Delta\phi'$ se toma como referencia las relaciones encontradas por Sonmez et al. [18], se ingresa con la PVB que es 20% y se obtienen los valores de ϕ y c (ver Figura 8). Estos valores indican que el ángulo de fricción aumenta en un 10% y la cohesión en un 2 %, por lo que el ángulo de fricción y cohesión del Bimsoil son 13, 2° y 33,7 kPa.

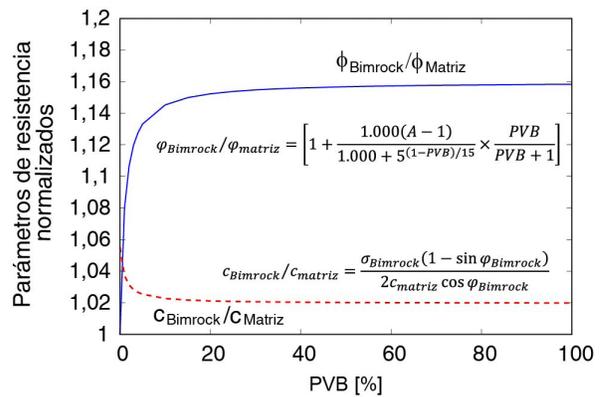


Figura 8. Variación del ángulo de fricción y cohesión con la PVB para un grado de entrelazamiento de 1,15 (Adaptado de Sonmez et al., [21]).

Al aplicar las propiedades del *Bimsoil* en la ecuación 1 se obtiene un q_u de 307 kPa, que es 22 kPa más que el encontrado en el modelo de depósito coluvial con modelación con elementos finitos (ver Figura 5). Se debe tener en cuenta que las relaciones propuestas por Sonmez et al. [21], fueron para masas con bloques de roca de distintas formas y rugosidades (grado de entrelazamiento) diferente a los bloques esféricos y lisos del modelo. La propuesta de Irfan y Tang [4] y las relaciones de Sonmez et al. [21] son una buena aproximación para estimar la resistencia al corte de Bimsoils. Los resultados de los modelos generados para la evaluación de una cimentación superficial muestran que los bloques contribuyen a la capacidad última.

Este aporte incrementa con el nivel de deformación bajo las condiciones y suposiciones del modelo.

Conclusiones

La evaluación de la capacidad última en un depósito coluvial bajo una cimentación cuadrada, utilizando un modelo de FEM bajo ciertas condiciones y suposiciones, refleja que los bloques aportan resistencia al Bimsoil para asentamientos mayores a 1,3 cm. Este resultado es compatible con lo reportado para saprolitos, en los que a bajos niveles de deformación la resistencia es dominada por la matriz arcillosa y conforme aumenta el nivel de deformación, la resistencia es dominada por los bloques de roca. Esto es aplicable para el diseño de cimentaciones cuando el requerimiento de asentamientos admisibles en el proyecto sea alto.

Para ambos casos, la distribución de esfuerzos obtenida por elementos finitos, muestran la generación de una falla por punzonamiento, que corresponde para materiales como arcillas blandas.

La capacidad última en un depósito coluvial bajo una cimentación cuadrada es mayor que sobre un depósito de suelo arcilloso blando, debido a que los bloques embebidos en la matriz forman cadenas de esfuerzos y dependiendo de la VBP, tamaño y separación entre bloques se generan efectos de arco. La aplicación de las propuestas de Irfan y Tang y Sonmez et al. en la ecuación de capacidad última para falla local de una cimentación cuadrada dan una buena aproximación de la q_u para asentamiento de 1" comparado con lo obtenido en los modelos de elementos finitos. Todos los resultados se han obtenido utilizando el modelo constitutivo Mohr – Coulomb y una buena práctica a futuro sería utilizar otros modelos constitutivos.

Referencias Bibliográficas

- [1] Medley, E.: Using stereological methods to estimate the volumetric proportions of blocks in melanges and similar block-in-matrix rocks (bimrocks). In 7th International IAEG Congress, Lisboa, Portugal, (1994) 1031– 1040.
- [2] Kalender, A., Sonmez, H., Medley, E., Tunusluoglu, C., and Kasapoglu, K. (2014). An approach to predicting the overall strengths of unwelded bimrocks and bimsoils. *Engineering Geology*, Vol. 183, (2014) 65–79.
- [3] Lindquist, E. and Goodman, R.: Strength and deformation properties of a physical model melange. In 1st North American Rock Mechanics Symposium. American Rock Mechanics Association. 1994.
- [4] Irfan, T. and Tang, K.: Effect of the coarse fractions on the shear strength of colluvium. Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering Department. 1993.
- [5] Miller, E. A. and Sowers, G. F.: The strength characteristics of soil-aggregate mixtures & discussion. *Highway Research Board Bulletin*, (183). 1958.
- [6] Medley, E. W., & Rehmann, P. F. S.: Characterization of bimrocks (rock/soil mixtures) with application to slope stability problems. 2004.
- [7] Medley, E. and Goodman, R. E.: Estimating the block volumetric proportions of melanges and similar block-in-matrix rocks (bimrocks). In 1st North American Rock Mechanics Symposium. American Rock Mechanics Association. 1994.
- [8] Glawe, U., & Upreti, B.: Better understanding of the strengths of serpentinite bimrock and homogeneous serpentinite. *Felsbau Rock Soil Eng*, Vol.22(5);(2004) 53-60.
- [9] Terzaghi, K., Pec, R. B., & Mesri, G.: Soil mechanics in engineering practice. John Wiley & Sons. 1996.
- [10] Sachan, A. and Penumadu, D.: Effect of microfabric on shear behavior of kaolin clay. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, Vol.133(3); (2007) 306–318.
- [11] Zhang, L.: Engineering properties of rocks. Butterworth-Heinemann of Elsevier. Arizona, USA. 2016.
- [12] Fletcher C.: *Geology for Ground Engineering Projects*. CRC Press. Taylor & Francis Group. New York. 2016.
- [13] Medley, E. W. and Zekkos, D.: Geopractitioner approaches to working with antisocial mélanges. *Geological Society of America Special Papers*, Vol. 480 (2011) 261–277.
- [14] Medley, E.: Observations on tortuous failure surfaces in bimrocks. *Felsbau, J. of Engineering Geology, Geomechanics and Tunnelling*, Vol. 22 (2004)35–43.
- [15] Johnson, K., Christensen, M., and Karunasena, N. S. W. :Simulating the response of shallow foundations

- using finite element modelling, 2003.
- [16] Johnson, K.: Load-deformation behaviour of foundations under vertical and oblique loads (Doctoral dissertation, James Cook University) 2005.
- [17] Oktay, H. E.: Finite element analysis of laboratory model experiments on behavior of shallow foundations under general loading (doctoral dissertation, middle east technical university) 2012.
- [18] Hibbitt, K. and Soreson. ABAQUS/Standard User's Manual. Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., United States (Pawtucket). 2001.
- [19] Vesic, A. S. Analysis of ultimate loads of shallow foundations: Closure of discussion of original paper j. soil mech. found. div. jan. 1973. 1f, 6r. j. geotech. engng. div. Vol. 100, No 8, (1974)949-951. In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol 11, page A230. Pergamon.
- [20] Barton, N., Shear strength criteria for rock, rock joints, rockfill and rock masses: Problems and some solutions. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 5(4) (2013)249-261.
- [21] Sonmez, H., Kasapoglu, K., Coskun, A., Tunusluoglu, C., Medley, E., Zimmerman, R., et al. (2009): "A conceptual empirical approach for the overall strength of unwelded bimrocks". In ISRM Regional Symposium-EUROCK 2009. International Society for Rock Mechanics.

Recibido el 27 de Marzo de 2017

En forma revisada el 22 de Marzo de 2018



UNIVERSIDAD
DEL ZULIA

REVISTA TECNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DEL ZULIA

Vol. 41. N°2, Mayo - Agosto 2018_____

*Esta revista fue editada en formato digital y publicada en Abril de 2018, por el **Fondo Editorial Serbiluz**, Universidad del Zulia. Maracaibo-Venezuela*

www.luz.edu.ve
www.serbi.luz.edu.ve
produccioncientifica.luz.edu.ve