

Análisis numérico del ensayo de corte directo en arenas limosas plantadas con vetiver: un aporte a las soluciones basadas en naturaleza para estabilización de taludes

Numerical analysis of the direct shear test on silty sands planted with vetiver: a contribution to nature-based solutions for slope stabilization

Jesús Torres, Roberto Torres

Departamento de Obras Civiles y Geología, Universidad Católica de Temuco, Chile, jtorres@uct.cl

Grupo de Investigación en Geología Aplicada, Universidad de los Andes, Venezuela

Alexis Urrutia

Empresa constructora CPU, Chile

Wilmer Barreto & Ricardo Picón

Departamento de Obras Civiles y Geología, Universidad Católica de Temuco, Chile, jtorres@uct.cl

Facultad de Ingeniería, Universidad Centrooccidental Lisandro Alvarado, Venezuela

ABSTRACT: El uso de vegetación para incrementar la resistencia de los suelos ha sido ampliamente estudiado en los últimos años, buscando comprender el mecanismo de refuerzo del suelo enraizado, ya sea mediante ensayos de resistencia de suelos en laboratorio, campo o simulaciones numéricas. El objetivo de esta investigación es simular numéricamente un ensayo de corte directo de un suelo areno limoso con y sin raíces de vetiver, mediante el método de elementos finitos (MEF), utilizando propiedades experimentales de los materiales y un ordenamiento de raíces simplificado, asumiendo un comportamiento elástico para las raíces y considerando al suelo como un medio perfectamente elástico. La simulación evidenció la afectación del suelo frente a la integración de raíces en éste y se analizó el grado de similitud entre el modelo numérico y el modelo experimental obteniendo diferencias mínimas entre el ensayo y la simulación para un suelo control y, variaciones que oscilaban según el número de elementos estructurales utilizados para simular las raíces (tres y cinco elementos). Se espera que esta investigación aporte un mecanismo complementario para la simulación del reforzamiento de suelos con fibras naturales particularmente en la estabilización de taludes.

KEYWORDS: Método de Elementos Finitos, Ensayo de Corte Directo, Vetiver, Soluciones Basadas en Naturaleza, Resistencia al corte.

1 INTRODUCCIÓN.

En la actualidad se demanda que las soluciones ingenieriles sean más amigables con el medio ambiente, esto ha traído como consecuencia el uso de soluciones basadas en la naturaleza (NBS, Natural Based Solutions). Este tipo de soluciones apuntan a que el nuevo desarrollo tecnológico en la ingeniería debe impactar lo menos posible en las áreas a desarrollar y emplear los mecanismos que la propia naturaleza provee para disminuir el impacto negativo que usualmente desarrollan las intervenciones tradicionales (Nesshöver et al., 2017).

En las obras de ingeniería lineal, tradicionalmente se han empleado materiales inertes para dar solución a los problemas de inestabilidad en taludes y laderas, sin embargo en la actualidad, surge la bioingeniería como mecanismo factible que controla o mitiga estos problemas, considerando aspectos técnicos, económicos y ambientales.

La bioingeniería considera dos ámbitos de aplicación, el control de erosión y la estabilización de taludes frente a movimientos superficiales. En el caso de la estabilidad, se han utilizado empíricamente partes de plantas (raíces y tallos) como elementos de refuerzo del suelo, ya que las raíces conforman un entramado que se adhiere al suelo manteniéndolo unido (Valdés, 2010), pero su efecto puede considerar aspectos indirectos como

el control de la humedad del suelo mediante la interceptación y evapotranspiración, el control de erosión (Ampuero, 2016), la absorción del dióxido de carbono de la atmósfera (World Bank, 1990), entre otros.

En los últimos años, se ha investigado respecto de la resistencia de las raíces, así como el efecto de estas fibras naturales en el reforzamiento mecánico de los suelos y su contribución en la estabilidad de taludes y laderas. En este sentido, estudios previos señalan que la resistencia a la tracción de las raíces está dada por una ecuación exponencial, donde la resistencia disminuye con el diámetro, variando los parámetros según la especie considerada (Wu et al., 1979; Bishetti et al., 2005; De Baets et al., 2008; Muys et al., 2008; Liu et al., 2012; Méndez et al., 2014; Zhang et al., 2014; Torres, et al., 2020).

El efecto de la plantación conlleva que el suelo se comporte como un material compuesto, en el que las raíces se consideran inclusiones de alta resistencia a la tracción, similar a un anclaje, por lo que incrementan significativamente su resistencia (Wu, 1976; Waldron, 1977; Ennos, 1990; Gray y Barker, 2004; Goldsmith, 2006; Alí y Osman, 2008; Mickovski et al., 2009; Preti y Giadrossich, 2009; Liu et al., 2011; Hu et al., 2013; Torres et al., 2019). Aún persisten algunas diferencias entre los autores respecto al efecto que produce, atribuyéndose principalmente a un aumento de la cohesión, aunque algunos autores señalan que

igualmente se incrementan la fricción interna del material (Torres et al., 2019).

Dentro de estos estudios, destacan los realizados sobre el vetiver (*Vetiveria Zizanioides*) (Ali y Osman, 2008; Mickovski et al., 2011; Noorasyikin y Zainab, 2015), considerando que se trata de una planta herbácea perenne, perteneciente a la familia de las gramíneas, la cual crece en suelos variados y con un amplio rango de fertilidad, con alta resistencia a la contaminación y climas adversos, pudiendo resistir temperaturas de hasta -9°C (Alegre, 2007). También presenta un desarrollo muy rápido, con un sistema radicular vertical y profundo que puede alcanzar hasta 6 metros de longitud. Adicionalmente, las gramíneas son buenas para la captura de dióxido de carbono de la atmósfera, pudiendo secuestrar potencialmente hasta 1 Kg de carbono de la atmósfera en un año por metro cuadrado, lo que ayudaría a hacer la infraestructura más sustentable contribuyendo en la disminución del efecto invernadero (Subha Lakshmi, C y Chandra Sekhar, Ch, 2020).

Se conocen tres modelos que permiten conocer la resistencia al corte en suelos reforzados con raíces, el modelo de rotura de raíces propuesto por Wu (1976) y Waldron y Dakessian (1981) donde el incremento de la resistencia es consecuencia de la resistencia a la tracción de las raíces, el ángulo de distorsión de la raíz y la fricción del suelo; Preti y Giadrossich (2009), sugieren que este modelo sobreestima significativamente el valor de la cohesión. El segundo modelo de estiramiento de raíces, propone que la ausencia de suficiente elongación de las raíces puede evitar que se movilice la resistencia a la tracción de las mismas y por lo tanto no se alcance la rotura. En estos casos, el cálculo de la resistencia movilizada estará controlada por la cantidad de elongación y el módulo de elasticidad de la raíz (Gray y Barker, 2004). El tercer y último modelo de deslizamiento de raíz, señala que, si las raíces son muy cortas, con bajos esfuerzos confinantes, tenderán a deslizarse o salirse. Sin embargo, contribuirán al reforzamiento, quedando el modelo en función de la fricción entre el suelo y la raíz, el área cizallada, la distorsión de la fibra natural y las características (longitud, diámetro, cantidad) de las raíces presentes (Gray y Barker, 2004).

La interacción suelo-raíz, además, ha sido modelada mediante análisis numérico (Dupuy et al., 2007; Liu et al., 2011; Zhang et al., 2010; Huang et al., 2011; Mickovski et al, 2011), por lo que se plantea un modelo numérico calibrado con datos de laboratorio previos de un ensayo de corte directo de un suelo control y un suelo reforzado con raíces de vetiver, que sirva de base para los modelos numéricos de análisis de estabilidad de taludes y sean complementarios a análisis predictivos como los realizados con redes neuronales artificiales (Barreto et al, 2019).

2 METODOLOGÍA

La metodología de la presente investigación se desarrolló en dos etapas. La primera, fue una revisión documental donde se recopiló antecedentes relacionados a los suelos reforzados con raíces, ensayos de resistencia de suelos y raíces, así como simulaciones numéricas empleando el método de elementos finitos (MEF); y, la segunda etapa, correspondiente a la fase de modelamiento y análisis.

En la etapa inicial, se hizo especial énfasis en el ensayo que se utilizó a modo control, y sobre los mecanismos utilizados para simular las raíces, así como a la equivalencia numérica entre los elementos a utilizar y las fibras naturales, tipos de interacción, propiedades mecánicas, y las equivalencias entre los modelos de resistencia de suelos con raíces.

La etapa del modelado numérico, por el método de elementos finitos, se subdivide en tres fases: pre procesamiento, procesamiento y post procesamiento.

El pre procesamiento inicia en la selección del ensayo a modelar, escogiendo un ensayo de corte directo (ASTM D6528), de deformación controlada, a una velocidad de corte de 1

mm/min, en una cajuela cuadrada de 100 cm^2 de área y una altura de muestra de 4 cm.

La muestra fue imperturbada, plantada y cuidada con condiciones controladas en el laboratorio, bajo metodología descrita en Torres et al., (2019).

El modelo considera una geometría bidimensional rectangular de $10 \times 4\text{ cm}$, dividida al centro, correspondiente a la sección central del corte (Figura 1).

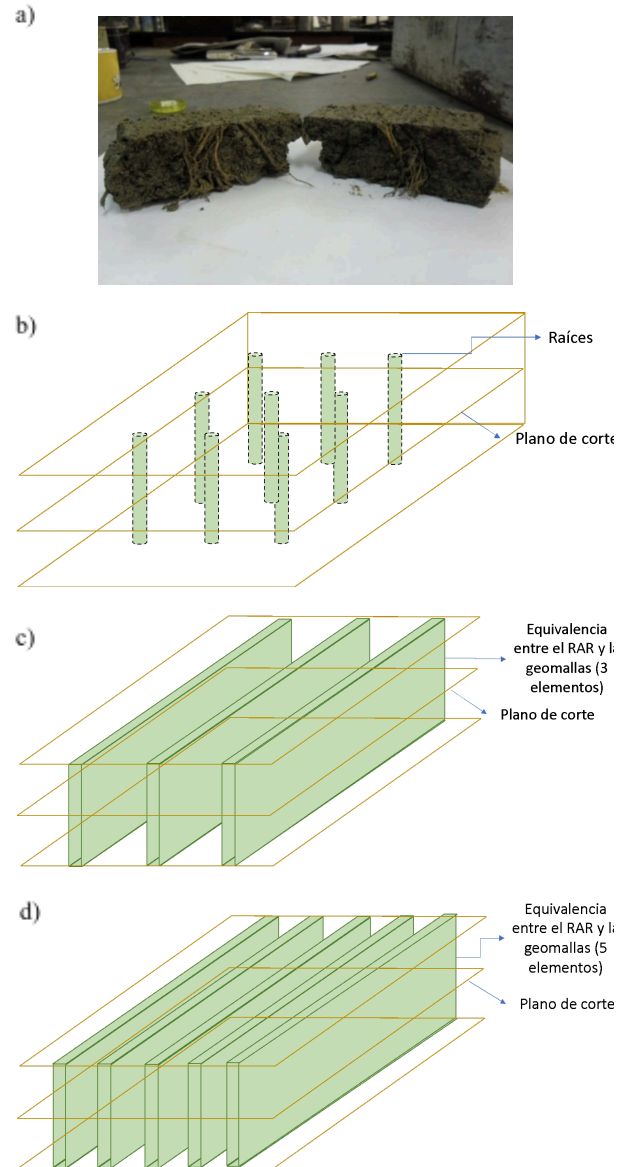


Figura 1. Esquema del modelo experimental. a) Modelo experimental, b) Modelo experimental simplificado, donde los cilindros verdes representan las raíces equivalentes a un RAR isotrópico. c) Modelo numérico equivalente 3 elementos, d) Modelo numérico equivalente 5 elementos.

Se restringió el movimiento de la mitad inferior de la cajuela, dejando la parte superior libre para emular el desplazamiento al que se somete el aparato, restringiendo el movimiento en la dirección vertical por condiciones de contorno del ensayo. Sobre la parte superior se aplica un esfuerzo normal de 1 kg/cm^2 (equivalente a $0,98\text{ kN/cm/cm}$) y un desplazamiento horizontal de

1 mm/min, replicando el desplazamiento máximo registrado en el ensayo de laboratorio (11,5 mm y 16,5 mm) (Figura 2)

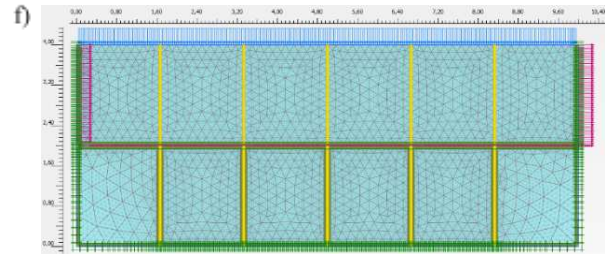
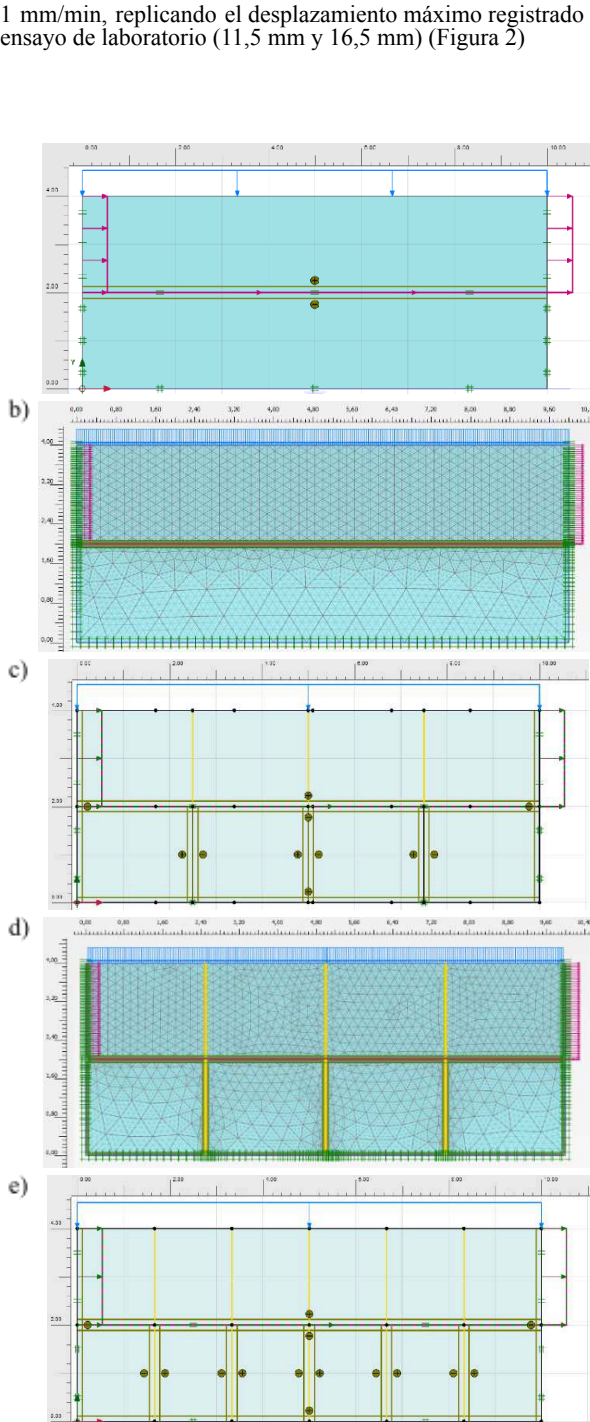


Figura 2. Geometría y mallado de los modelos de suelo control y suelo con 3 y 5 raíces de vetiver, las dimensiones representadas corresponden a cm. a) Geometría suelo control. b) Mallado suelo control. c) Geometría suelo con 3 elementos. d) Mallado suelo con 3 elementos. e) Geometría suelo con 5 elementos. f) Mallado suelo con 5 elementos.

Las propiedades geomecánicas del suelo y geotextil (geomalla) utilizados se encuentran en la Tabla 1. La equivalencia entre la raíz y el geotextil se realizó utilizando la ecuación (Ec. 1) de Mickovski, Stokes, Van Beek, Ghestem, y Fourcaud, (2011), la cual se distribuyó entre la cantidad de raíces consideradas en la simulación.

Tabla 1. Propiedades geomecánicas utilizadas en los modelos.

Suelo	
C (kN/cm ²)*	7,8*10 ⁻⁵
φ(°)*	28,61
γ _{unsat} (kN/cm ³)*	16,91*10 ⁻⁶
γ _{sat} (kN/cm ³)*	19,11*10 ⁻⁶
E (kN/cm ²)**	5
u***	0,265
Raíz	
E (kN/cm ²)**	7,5
RAR*	4,477*10 ⁻³
EA (kN/cm)	3,3578
EA (kN/cm) 3 elementos	1,1193
EA (kN/cm) 5 elementos	0,6716

* Datos obtenidos de Méndez y Rojas (2013)

** Datos obtenidos de Mickovski, Stokes, Van Beek, Ghestem, y Fourcaud, (2011)

*** Datos obtenidos mediante iteración y referencias.

$$E_g * A_g = E_r * RAR * A_T \quad (1)$$

Se aplicó un desplazamiento horizontal correspondiente al máximo registrado en el ensayo experimental de corte directo, de 1,150 cm en el suelo control y 1,65 cm en el suelo con vetiver. Se generó un mallado medio con ajuste a mallado fino en las principales zonas de interés, como se muestra en la Figura 2b), 2d) y 2f).

Se colocó una interfaz para separar los mallados entre las mitades de la cajuela y generar un comportamiento diferenciado entre el suelo y el geotextil.

Considerando que se utilizó el desplazamiento como variable de entrada, se calibró el modelo utilizando el esfuerzo cortante (τ_{max}), permitiendo un margen de error máximo de 5%.

Una vez finalizada la calibración, se continuó con la fase de procesamiento, la que, para ambos modelos, suelo control y suelo

con vetiver, consistió en dos etapas: fase inicial, la cual considera el proceso de consolidación inicial, y la fase I, donde se aplican carga y deslizamiento a la vez, para replicar las condiciones del ensayo de corte directo.

En la fase I, se considera un intervalo de tiempo de 11,5 minutos, correspondientes al tiempo que demoró el suelo control en llegar a la rotura en ensayo de corte directo realizado por Méndez y Rojas, (2013). Para el suelo con vetiver, se consideró un intervalo de 16,5 minutos.

Posteriormente, se realizó un análisis de datos y comparación de los resultados obtenidos entre los resultados experimentales y los obtenidos numéricamente. Para esto, se definió un área de estudio diferente para ambas situaciones, suelo con y sin raíces de vetiver.

3 RESULTADOS

Para la calibración del modelo se analiza la correspondencia entre el esfuerzo cortante máximo registrado en el ensayo y lo calculado.

En el modelo, esta variable tiene una distribución simétrica, en función de lo cual se trabaja con la mitad izquierda de la cajuela, justo en el área que abarca entre las coordenadas $X=2\text{cm}$, $Y=2,5\text{cm}$ y $X=3\text{cm}$, $Y=1,5\text{cm}$, es decir, en el área adyacente al punto central de la mitad izquierda, puesto que en dicho sector se registran los máximos valores (Fig.3).

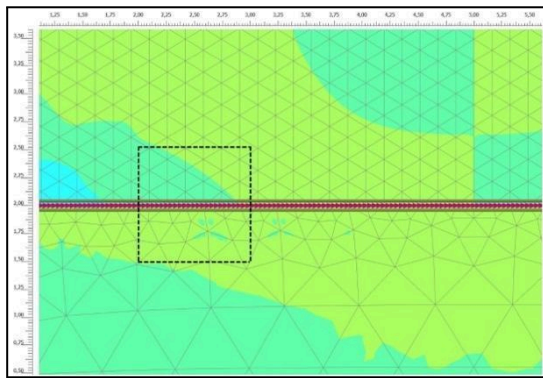


Figura 3. Área considerada para la calibración del modelo, las dimensiones representadas corresponden a cm

Los valores de esfuerzo cortante calculados promedian $6,023 \times 10^{-3} \text{ kN/cm}^2$, los que comparados con el valor registrado en el ensayo experimental ($6,0564 \times 10^{-3} \text{ kN/cm}^2$), muestran una diferencia mínima ($0,03 \times 10^{-3} \text{ kN/cm}^2$, 0,5%), lo cual junto con el desplazamiento horizontal máximo obtenido (1,164 cm en el modelo y 1,15cm en el ensayo), permiten confirmar que el modelo se comporta adecuadamente.

Para lograr una mayor similitud en el comportamiento tensodeformacional, se sugiere utilizar un modelo de endurecimiento por deformación.

Como el objeto de interés corresponde al comportamiento del sistema suelo-raíz, se analiza el esfuerzo cortante máximo en cada raíz y sus áreas adyacentes hasta un máximo de 0,8 cm hacia ambos lados, manteniendo la distancia vertical de 1 cm sobre el plano de corte (desde 1,5 a 2,5 cm), como se evidencia en la Figura 4 en la zona demarcada con línea discontinua.

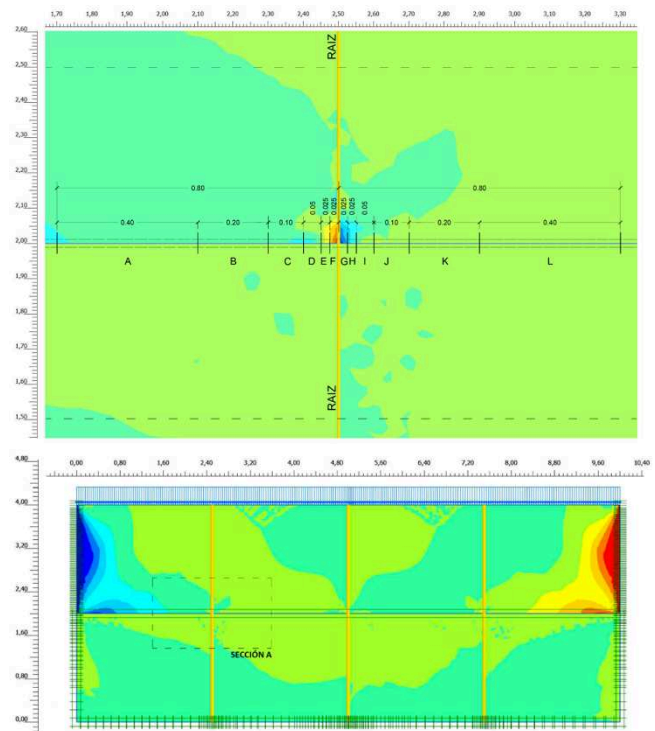


Figura 4. Área de análisis en cajuela de simulación de suelo con vetiver, las dimensiones representadas corresponden a cm

Para el cálculo de $\tau_{\text{máx}}$ de la cajuela, se decidió utilizar una media ponderada para considerar la rigidez mostrada por la raíz. En este sentido la distribución del esfuerzo cortante se obtiene en las distancias que se muestran en la Figura 5.

Figura 5. Distancias para media ponderada en suelo con raíces de vetiver.

La distribución de los valores promedios de esfuerzos cortantes máximos, para cada simulación se muestra en la Tabla 2, comparados con los valores medidos en el ensayo experimental.

Tabla 2. Valores de Esfuerzo Cortante Máximo en los modelos considerados ($\times 10^{-3} \text{ kN/cm}^2$).

Elemento	Ensayo Experimental	Modelo 3 raíces	Modelo 5 raíces
Raíz 1	-	11,5312	29,0583
Raíz 2	-	6,4586	5,7278
Raíz 3	-	4,2174	6,5790
Raíz 4	-	-	7,5640

Raíz 5	-	-	2,9125
Promedio	7,2226	7,4018	10,3683
Diferencia	0	0,1792	3,1457
Porcentaje	0	2,48%	43,55%

En función de estos resultados se observa que el modelo con tres elementos se comporta de mejor manera que el de 5, consecuencia de la rigidez de la raíz, las condiciones de frontera y las dimensiones del modelo (10x4 cm) que generan un efecto importante en el cálculo de los resultados.

En las figuras 6 y 7, se muestran las mallas deformadas, así como los resultados de desplazamientos horizontales, esfuerzos principales y esfuerzo cortante máximo para cada modelo analizado.

En la Figura 6, se observa la deflexión que existe en las fibras naturales, lo cual guarda estrecha relación con lo observado en el modelo experimental, donde las fibras naturales no mostraron rotura, sino deflexión y elongación dentro del plano de corte. Por su parte los desplazamientos horizontales calculados son consistentes con los registrados en el ensayo experimental. A su vez, la distribución de esfuerzos principales muestra una distribución bastante uniforme, dada la presencia de las raíces y su rigidez, éstos se encuentran concentrados en la mitad superior de la cajueta, al igual que en el modelo de suelo control, dadas las condiciones impuestas al modelo (restricción de los movimientos en el eje X e Y de la mitad inferior), mientras que la distribución de esfuerzos cortantes máximos muestra la influencia de las condiciones de borde, donde los contactos con las cajuelas de corte, muestran los mayores valores y disminuyen progresivamente hacia el centro (consistentes con el ensayo de corte directo), sin embargo, el promedio ponderado de cada fibra muestra los valores ya analizados y registrados en la tabla 2.

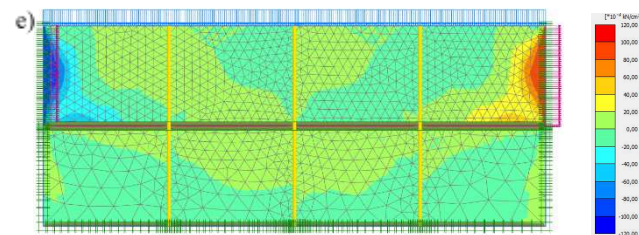
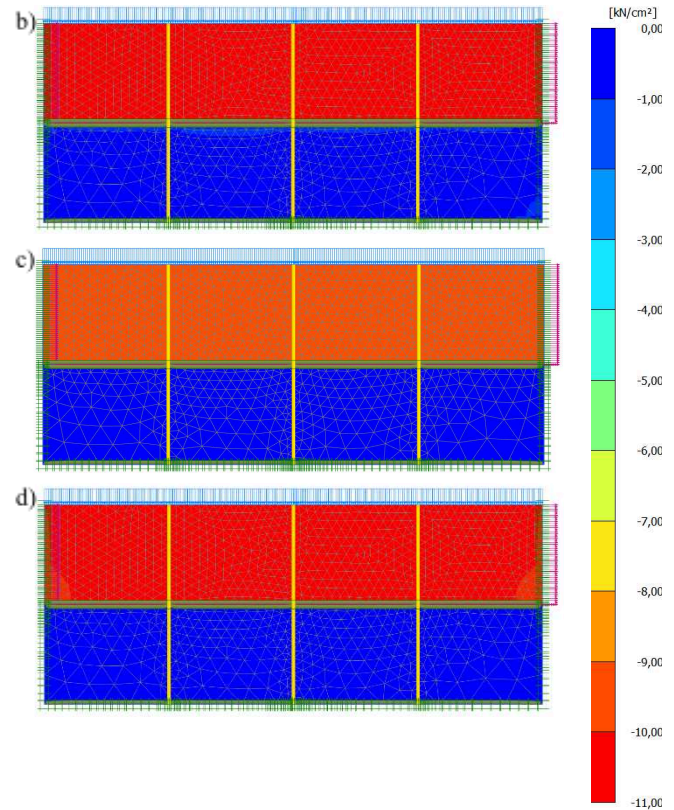
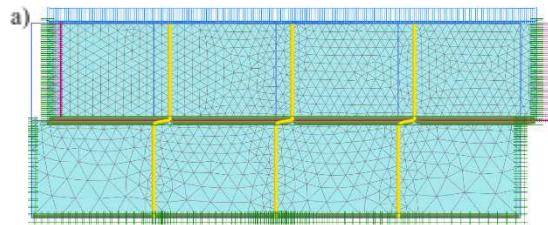


Figura 6. Resultados obtenidos, modelo 3 elementos. a) Malla deformada, b) Desplazamiento horizontal, c) Esfuerzo principal mayor, d) Esfuerzo principal menor, e) Esfuerzo cortante máximo.

En la Figura 7 se observa la deflexión que existe en las fibras naturales, lo cual guarda estrecha relación con lo observado en el modelo experimental, donde las fibras naturales no mostraron rotura, sino deflexión y elongación dentro del plano de corte. Por su parte los desplazamientos horizontales calculados son consistentes con los registrados en el ensayo experimental. Por otro lado, la distribución de esfuerzos principales muestra una distribución bastante uniforme dada la presencia de las raíces y su rigidez; éstos se distribuyen en la mitad superior por lo expuesto en el modelo anterior. La distribución de esfuerzos cortantes máximos muestra la influencia de las condiciones de borde, donde los contactos entre las cajuelas de corte muestran los mayores valores y disminuyen progresivamente hacia el centro (consistentes con el ensayo de corte directo), sin embargo, el promedio ponderado de cada fibra muestra los valores ya analizados y registrados en la tabla 2. Es importante destacar, que tanto en este modelo, como el anterior, la distribución del esfuerzo de cizalla es simétrica.

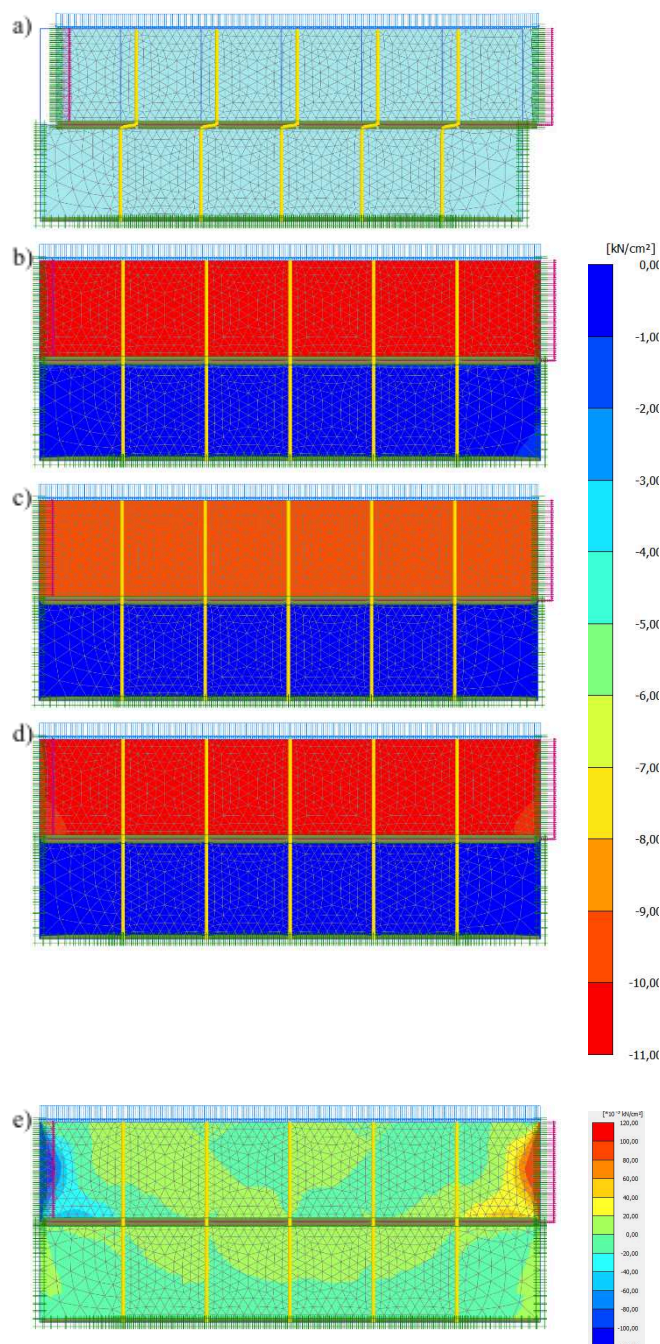


Figura 7. Resultados obtenidos, modelo 5 elementos. a) Malla deformada, b) Desplazamiento horizontal, c) Esfuerzo principal mayor, d) Esfuerzo principal menor, e) Esfuerzo cortante máximo.

4 CONCLUSIONES

El análisis numérico del suelo control permite validar la efectividad del modelo realizado. La distribución y valores calculados son consistentes con el ensayo experimental, donde los valores máximos se registran en los bordes de la cajuela y

disminuye hacia el centro, donde se obtiene el menor valor del ensayo. El promedio calculado es consistente con el valor registrado en la realidad.

Este efecto es considerado en el cálculo de los efectos de las raíces, en función de lo cual, el promedio ponderado permite determinar una aproximación similar al registrado experimentalmente. La presencia de 5 elementos resistentes influye significativamente, dada la escala del modelo y la cercanía a las condiciones de borde, por lo que se sugiere emplear el modelo de 3 elementos.

La inclusión de raíces de vetiver en un suelo se considera favorable para su estabilidad, ya que le otorga mayor resistencia al conjunto suelo-raíz. Esto se encuentra ampliamente documentado en estudios previos, sin embargo, la presente investigación presenta un método por el cual se puede analizar la estabilidad de estos elementos resistentes, incluyendo un potencial cálculo del Factor de seguridad, empleando los parámetros aquí señalados.

El modelo evidenció el estiramiento presentado por las geomallas al momento de realizar el desplazamiento horizontal de la cajuela superior, demostrando que las raíces no son un componente rígido integrado al suelo, sino que más bien se comportan como un elemento flexible; donde se pueden experimentar los tres modelos de rotura simultáneamente. En este sentido, se sugiere incorporar la fricción suelo raíz para simular la adherencia y succión que experimentan el sistema natural.

La simulación realizada se presenta como una buena alternativa al estudio y análisis cualitativo y cuantitativo de fibras naturales, teniendo en consideración sus propiedades mecánicas reales. Para este estudio, se simuló como un geotextil, debido a las propiedades que el software requería del material y según los resultados obtenidos, se logra apreciar un comportamiento similar a una raíz, donde existe un aumento en los parámetros resistentes del suelo, además de presentar un alargamiento en la zona de movimiento.

5 AGRADECIMIENTOS

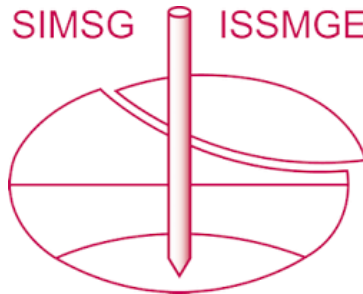
Agradecemos la colaboración y el apoyo Luiggi Méndez, Williams Rojas y al personal del Laboratorio de Mecánica de Suelos y Pavimentos de la Universidad de los Andes (Venezuela) por elaborar y facilitar los datos del ensayo experimental para la generación del modelo numérico.

6 REFERENCES

- Alegre, J. (2007). *Manual sobre el uso y manejo del pasto Vetiver (Chrysopogon zizanioides)*. Obtenido de: http://www.vetiver.org/TVN_manualvetiver_spanish-o.pdf
- Ali F. y Osman N.: Shear strength of a soil containing vegetation roots. 2016. *Soils and Foundations*, 48 (4), 587-596.
- Ampuero, J.F. (2016). La vegetación en los taludes. *Obras Urbanas* (54). Obtenido de: El portal líder del sector técnico.
- Barreto, W., Torres, J., Torres, R., Gonzalez, L., and Picón, R., (2019), Modelling Tensile Strength of Vetiver Roots Using Artificial Neural Networks, *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*, Vol. Especial (1), 154-159.
- Bischetti G.B., Chiaradia, E.A, Simonato, B, Speziali, B. Vitali, Vullo, P. et al. 2005. Root strength and root area ratio of forest species in Lombardy (Northern Italy) *Plant Soil*. (278), 11-22
- De Baets S., Poesen J., Reubens B., Wemans K., De Baerdemaeker J. y Muys B. 2008. Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength. *Plant Soil*, 305 (1-2), 207-226.
- Dupuy L.X., Fourcaud T., Lac P., Stokes A. 2007. A generic 3D finite element model of tree anchorage integrating soil mechanics and real root system architecture. *Am. J. Bot.*, 94 (9), 1506-1514

- Ennos A.R. 1990. The anchorage of leek seedlings: the effect of root length and soil strength. *Ann. Bot.*, 65, 409-416
- Goldsmith W.: *Soil Strength Reinforcement by Plants*. The Bioingeniering Group Inc., Salem, 2006.
- Gray D.H., and Barker D. 2004. *Root-Soil Mechanics and Interactions*. In: S.J. Bennett y A. Simon (ed), *Riparian Vegetation and Fluvial Geomorphology*. American Geophysical Union, Washington, DC, 113-123
- Hu X, Brierley G., Zhu H., Li G., Fu J., Mao X., et al. 2013. An Exploratory analysis of vegetation strategies to reduce shallow landslide activity on loess hillslopes, northeast Qinghai-Tibet Plateau, China. *J. Mt. Sc.*, 10 (4), 668-686
- Huang Y., Lu K., Zhu Y., Xie X., Yang X. 2011. Numerical simulation on laboratory triaxial test of composite soil with roots. *Adv. Mater. Res.*, 287-290, 777-780
- Liu K., Yang X., Xie X., Wu C., Liu Y. 2011. Laboratory triaxial test study on soil reinforce with roots of Manilagrass *Adv. Mater. Res.*, 250-253, 1366-1370
- Méndez L.J., y Rojas, W.J. 2013. Determinación de las variaciones de resistencia al esfuerzo cortante en suelos granulares a través de la implantación de pasto Vetiver. Universidad de Los Andes, Mérida-Venezuela
- Méndez L., Rojas W., Torres J., Torres R., Rada M. y Calderas R. 2014. Resistencia a la tracción del sistema radicular del vetiver (*Vetiveria zizanioides*) plantado en un suelo granular. *Geominas*, 42(64), 165-169.
- Mickovski S.B., Hallett P.D., Bransby M.F., Sonnenberg R., Bengough A.G. 2009. Mechanical reinforcement of soil by willow roots: impacts of root properties and root failure mechanism. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 73(4), 1276-1285
- Mickovski, S., Stokes, A., van Beek, R., Ghestemc, M., Fourcaud, T. (2011). Simulation of direct shear tests on rooted and non-rooted soil using finite element analysis. *Ecological Engineering* (37), 1523-1532.
- Nesshöver, C., Assmuth, T., Irvine, K. N., Rusch, G. M., Waylen, K. A., Delbaere, B., ... & Wittmer, H. (2017). The science, policy and practice of nature-based solutions: An interdisciplinary perspective. *Science of the total environment*, 579, 1215-1227.
- Noorasyikin M.N. y Zainab M. 2015. A tensile strength of bermuda grass and vetiver grass in terms of root reinforcement ability toward soil slope stabilization. *IOP Conf. Series Mater. Sci. and Eng.*, 136, 1-8.
- Preti F. y Giadrossich F. 2009. Root reinforcement and slope bioengineering stabilization by Spanish Broom (*Spartium junceum* L.). *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13, 1713-1726
- Subha Lakshmi C. y Chandra Sekhar, Ch. (2020). Role of *Vetiveria zizanioides* in soil protection and carbon sequestration. *The Pharma Innovation Journal*, 9(9): 492-494
- Torres J., Torres R., Blandria N., Barreto W., Picón, R., Peña M., Guarache J., Méndez, L. (2019). Study of increment of shear strength in poorly graded sands caused by vetiver plants. *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*. Vol. Especial, 1, 239-246
- Torres J.A., Torres R.J., Peña, J.C., Picón, R.A., Méndez, L., & Calderas, R.J. (2020). Estudio experimental del sistema radicular del pasto vetiver sometido a esfuerzos de tracción. *Informes De La Construcción*, 72(560), e365. <https://doi.org/10.3989/ic.70923>
- Valdés, O. A. (2010). Como controlan la erosión las raíces de las plantas. *La Ciencia y el Hombre*, 23(2).
- Waldron L.J. 1977 The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41 (5), 843-849
- Waldron L.J. y Dakessian S. 198. Soil reinforcement by roots: calculation of increased soil shear resistance from root properties. *Soil Sci.*, 132 (6), 427-435
- World Bank: *Vetiver Grass – The Hedge Against Erosion*, Wold Bank, Washington DC, 1990.
- Wu, T.H., 1976. Investigation of Landslides on Prince of Wales Island, Alaska. *Geotechnical Report* No. 5. Ohio State University, Depart. of Civ. Eng., Columbus, OH.
- Wu T.H., McKinell W.P., Swanson D.N. 1979. Strength of tree roots and landslides on Prince Wales Island, Alaska, *Can. Geotech. J.*, 16 (1), 19-33
- Zhang C.B., Chen L.H., Li Y.P., Ji X.D., Liu X.P. 2010. Triaxial compression test of soil-root composites to evaluate influence of roots on soil shear strength. *Ecol. Eng.*, 36, 19-26

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12th to November 16th 2024 in Chile.