

Comportamiento de las deformaciones en sistemas de confinamiento celular mediante modelación física de muros reforzados con geosintéticos en arenas

/ Deformation behavior of cellular confinement systems using physical modeling geosynthetics reinforced walls sands.

Martín Ernesto Riascos Caípe¹, Giovanni Antonio Arango Ruiz²

¹Magister en Ingeniería Civil. Especialista en Geotecnia Vial y Pavimentos, Asesor en Laboratorio y Geotecnia, Escuela Ingenieros Militares, Bogotá, Colombia. martinriascos@gmail.com

²Magister en Ingeniería Civil. Especialista en Geotecnia, Especialista Geotecnia, Antea Colombia S.A., Bogotá, Colombia. giovanniarango@gmail.com

Fecha de recepción: 22/09/2014 Fecha de aceptación: 21/10/2014

Página
11

ESING

COMPORTAMIENTO DE LAS DEFORMACIONES EN SISTEMAS DE CONFINAMIENTO CELULAR MEDIANTE MODELACIÓN FÍSICA DE MUROS REFORZADOS CON GEOSINTÉTICOS EN ARENAS - REVISTA INGENIEROS MILITARES

Resumen

La intensificación del uso de geosintéticos en la actualidad ha originado el aumento en el estudio de su comportamiento dentro de sistemas estructurales. En este trabajo se presenta el modelamiento físico de muros reforzados con geosintéticos desarrollados mediante pruebas de modelamiento a escala reducida en centrifuga, con el objeto de investigar la estructura y estabilidad de un muro de contención de gravedad en geoceldas, los parámetros de los materiales de relleno y de refuerzo fueron evaluadas por distintas pruebas de laboratorio. Los resultados de los modelamientos demostraron una alta capacidad por parte de las geoceldas para soportar cargas elevadas antes de la falla, aumentando la resistencia del muro.

Palabras clave

Muros reforzados, geoceldas, modelamiento físico y centrifuga.

Abstract

The increased use of geosynthetics has now led to a rise in the study of their behavior within structural systems. This paper presents the physical modelling of reinforced walls with geosynthetics developed through a centrifuge modelling test at a reduced scale, in order to investigate the structure and stability of a gravity retaining wall in geocells. The parameters of filling and reinforcement materials were evaluated by a variety of laboratory tests. The results of the modellings showed a high capacity to withstand high loads by the geocells before failure, which increases the resistance of the wall.

Keywords

Reinforced walls, geocell, physical modeling, and centrifuge.

Para citar este artículo / To cite this article

M. Riascos, G. Arango. Comportamiento de las deformaciones en sistemas de confinamiento celular mediante modelación física de muros reforzados con geosintéticos en arenas. Revista Ingenieros Militares, No.9, pp. 11-20. 2014.

Introducción

El uso de geosintéticos en la actualidad se ha intensificado debido a los grandes avances tecnológicos e industriales, además de la construcción de obras complejas y de gran magnitud, demostrando que el uso de estos materiales fabricados mediante polímeros es una solución muy práctica y económica, teniendo en cuenta que logra aumentar las propiedades mecánicas del sistema, genera un ahorro del material granular aportado, minimiza en cierta medida los plazos de ejecución, genera un ahorro económico significativo y aumenta la calidad y seguridad de las obras.

Las propiedades mecánicas e hidráulicas de estos materiales generan una gran confianza y seguridad para su uso en proyectos de construcción en especial obras de geotecnia, como son: obras viales, obras hidráulicas, sistemas de control de erosión, aplicaciones medioambientales, entre otras.

En Colombia el uso de estos materiales se ha incrementado debido a experiencias con buenos resultados, que evidencian ventajas ante otras soluciones y elementos de construcción tradicionales [1].

De acuerdo al objeto de estudio de esta investigación, resulta importante reconocer algunas generalidades y antecedentes de los tres elementos representativos que fundamentan teóricamente las pruebas y ensayos desarrollados en el método utilizado, como lo son las geoceldas, los muros de contención reforzados con geoceldas y la modelación física en centrifuga.

Por un lado, las geoceldas son productos geosintéticos tridimensionales, creados alrededor de 1980, que se utilizan para contener rellenos en taludes, son conocidos como sistemas de confinamiento celular (CCS). Están formadas por franjas lineales de poliméricos (polietileno de alta densidad), con elevada resistencia a la tracción, que forman un panel especial con espesores entre 75 y 100 mm, como se muestra en la figura 1, las cuales están soldadas entre sí en las articulaciones fuertes, en algunos casos

estas franjas tiene pequeños orificios de 1 cm aproximadamente.

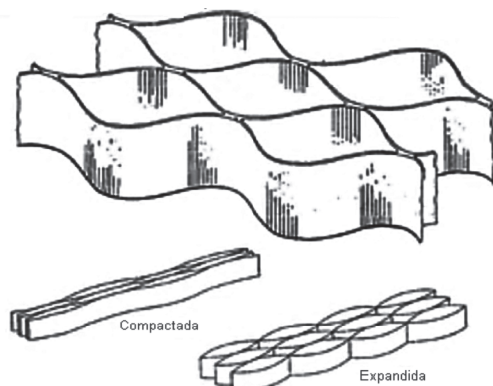


Figura 1. Estructura malla de geoceldas [2].

Teóricamente cuando las geoceldas se encuentran abiertas en su máxima extensión y son rellenas con material de suelo la estructura empieza a funcionar monolíticamente, capaz de contener cualquier material de tierra compactada [2], al proveer medios eficaces de confinamiento.

Históricamente los sistemas de confinamiento celular, se empezaron a desarrollar en 1975 por el Cuerpo de Ingeniero del Ejército de EEUU, cuando vieron la necesidad de crear caminos de acceso sobre suelos blandos mediante una red de confinamiento de materiales que fuera capaz de ser estable y proporcionar rigidez ante la exposición de cargas de vehículos pesados [3].

A partir de ese momento se empezaron a realizar estudios para determinar el comportamiento mecánico de estos sistemas de confinamiento celular, mostrando un claro efecto de aumento en la rigidez y la resistencia del suelo debido a que se genera un mayor confinamiento en el sistema suelo-geocelda. Con respecto a los parámetros de resistencia del suelo reforzado se ha logrado constatar que el uso de geoceldas aumenta significativamente la cohesión de los materiales granulares [4].

El aumento en la capacidad estructural se debe al confinamiento al que se somete el suelo por las geoceldas, un principio que se asemeja a la teoría que respalda la prueba triaxial, cuan-

do se aumenta el confinamiento (σ_3) en una muestra de suelo, un mayor esfuerzo desviador ($\Delta\sigma$) es necesario para inducir una falla resistencia al corte del suelo probado [5].

Como segundo factor se encuentra que el uso de geoceldas, en muros de contención reforzados, ha aumentado en los últimos años, orientados principalmente a la construcción de muros de retención, cimentación de terraplenes, control de erosión en laderas, protección de canales, entre otras.

Una de las primeras referencias en la construcción de estructuras de confinamiento celular como estructuras de contención se encuentra en 1993 en el Royal Military College of Canadá in Kingston, cuando un grupo de investigadores junto al Dr Bathurst [6] realizan pruebas a un muro de geoceldas y otro de gravedad, en este estudio se observó que el muro de contención reforzado con polímeros tenía un mejor comportamiento ante asentamientos diferenciales. El confinamiento del relleno genera la estabilidad y resistencia que evitan que el sistema de celdas falle tempranamente, debido a la resistencia a la tensión, generada por el sistema suelo-geocelda.

Finalmente como una prueba experimental de laboratorio se encuentra la modelación física en centrífuga, que es un método que busca trabajar con modelos reducidos sometidos a diferentes condiciones dentro de una centrífuga. Propuesto inicialmente por E. Phillips en 1869, a la Academia de Ciencias de Francia, y que se basa teóricamente en el estudio del equilibrio de los cuerpos elásticos mediante ecuaciones diferenciales. Phillips planteaba utilizar la fuerza centrífuga en los modelos reducidos a escala para lograr la similitud con la fuerza de gravedad sobre los cuerpos reales [7].

Cincuenta años más tarde su idea fue llevada a la práctica y en los años treinta se comenzó a desarrollar esta técnica experimental en la antigua Unión Soviética y en los Estados Unidos. En los últimos años se ha desarrollado un aumento considerable en el estudio de modelos en centrífuga, siendo de gran importancia es-

pecialmente en el diseño de obras ingenieriles de gran importancia [7].

En este documento se presentan la metodología y procedimiento para realizar un modelo físico de un muro de contención reforzado con geosintéticos (geoceldas); posteriormente se realiza un análisis sobre los resultados que se han obtenido y finalmente, se presentan conclusiones y recomendaciones de acuerdo con la investigación realizada.

Metodología

Para el desarrollo de este documento se recopiló información sobre trabajos y estudios de investigación acerca del uso de geoceldas en la construcción de muros reforzados, especialmente sistemas de confinamiento celular. Posteriormente se estudió las características de los materiales, para el caso de la arena se realizaron pruebas para determinar su ángulo de reposos (corte directo y método del embudo), además se determinó el peso unitario del material mediante ensayos de pluviación. En el caso de las geoceldas se encontró un material con propiedades similares a las originales escaladas.

Luego se realizó la construcción del modelo, compuesto por el muro y el relleno con el mismo material (arena del Guamo), en la cámara de la centrífuga, a continuación se instaló la sobrecarga e instrumentación conformada por dos deformímetros verticales en la parte superior. Se ejecutó el ensayo variando valores de gravedad con incrementos progresivos de carga hasta su máximo, luego se realizó el análisis de los resultados del comportamiento del modelo físico en la centrífuga. Posteriormente se analiza de acuerdo a los resultados obtenidos mediante este ensayo y una comparación con un modelo numérico.

Caracterización material

Geoceldas: Es fundamental la caracterización geométrica de las geoceldas utilizadas para la elaboración del modelo físico [8], se obtienen los valores que se presentan en la Tabla 1. En cada cara de la geocelda tiene 18 perforacio-

nes de 9 mm aproximadamente, y el ancho de unión entre dos tiras de geocelda es de aproximadamente 10 mm a todo lo largo de su altura.

Tabla 1. Características geométricas de las geoceldas prototipo

Característica	Descripción
Altura pared (mm)	200
Distancia entre juntas (mm)	445 ($\pm 2.5\%$)
Dimensiones celdas expandidas (mm)	340 x 290 ($\pm 3\%$)
Número de celdas por m ²	22
Dimensiones de la sección expandida (m)	2.81 x 10.7 ($\pm 3\%$)

En este trabajo se muestran resultados de pruebas de resistencia a la tracción para una tira de geoceldas con perforaciones de acuerdo con las normas D4595 ASTM (Método de prueba para propiedades de tracción de geotextiles por el método de la tira ancha). La resistencia media a la tracción de las geoceldas obtenida mediante el anterior ensayo fue de 12,78kN/m, valor que se tuvo en cuenta para la modelación física, buscando un material que cumpliera la magnitud (escalada) de esta propiedad.

Suelo de fundación y relleno: El suelo utilizado para la modelación física fue caracterizado de acuerdo a cada uno de sus parámetros, (cohesión, fricción y peso unitario máximo), para el caso de estudio se toma arena del Guamo. A través de ensayos de pluviación se tuvo como resultado que el peso unitario máximo de la arena es de 16,47 kN/m³, obtenida con una altura de caída igual a 90 cm, como se puede observar en la curva experimental de la figura 2.

El ángulo de reposo se determinó con el ensayo de corte directo y el ángulo natural de reposo mediante el método del embudo, en el cual se llena un embudo con el material y posteriormente el embudo se levanta lentamente para ir construyendo la pila por privación del material, asegurando el contacto con la parte superior (cima) [1], de tal manera que se pudiera garantizar la verticalidad del embudo, ver Figura 3.

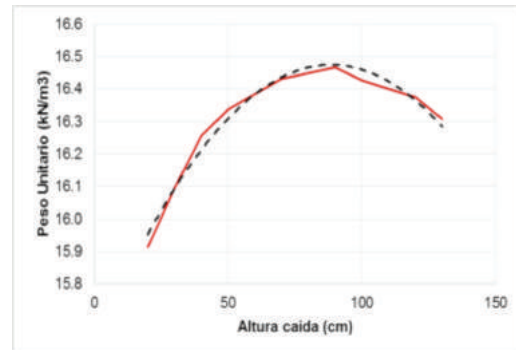


Figura 2. Curva del peso unitario de la arena en función de la altura de caída.

Una vez obtenido el valor del ángulo para cada uno de los cuatro ensayos realizados se realizó el promedio, se obtuvo como resultado un valor igual a 33,44°.

Los ensayos de corte directo mostraron que el ángulo de fricción pico, de arena del Guamo seca, es igual a 51.96° y el residual, es igual a 38.73°.

En la Figura 4 se muestra las envolventes de falla de la arena para la prueba obtenida del ensayo de corte directo CD, que fueron tenidos en cuenta para el predimensionamiento del muro.



Figura 3. Vista montículo de arena ensayo de ángulo de fricción natural de reposo, arena del Guamo.

En otro estudio, realizado a la arena del Guamo se reporta un ángulo de reposo por medio del método del embudo de 35.8° [9], valor que difiere con las pruebas desarrolladas en este trabajo en las que se obtuvo un valor de 33,44°.

Este puede ser explicado, porque el método del embudo está sujeto a posibles errores experimentales en la toma de las muestras. Para el predimensionamiento se tomó el valor más

crítico entre el ensayo de corte y el obtenido por el método del embudo.

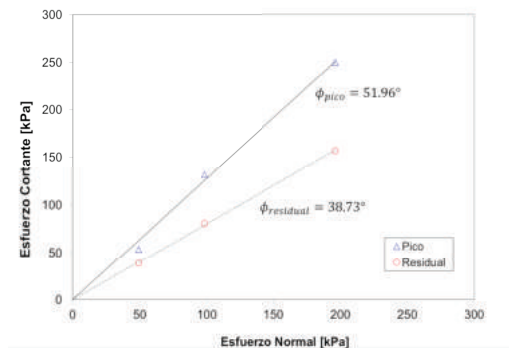


Figura 4. Curva Esfuerzo Cortante vs Esfuerzo Normal.

Características modelo físico

Para el modelo físico se realizó un modelo a escala reducido, las leyes de escala que fueron usadas en el modelo físico del muro se presentan en Tabla 2. El modelo se trabajó a 20g de acuerdo con [8], por tanto el factor de escalamiento n es igual a 20. Además de este trabajo, también se tuvo en cuenta el escalamiento y construcción de las geoceldas, usadas en el modelamiento realizado, que utilizó acetato industrial (comportamiento más aproximado a las propiedades del material real a escala reducida), para la representación de las geoceldas, en la Tabla 3 se presentan las características más importantes de las geoceldas escaladas.

Tabla 2. Leyes de escala [8].

Cantidad	Escala
Longitud	$1/n$
Densidad de masa	1
Aceleración	N
Rigidez	1
Esfuerzo	1
Fuerza	$1/n^2$
Deformación	1
Desplazamiento	$1/n$
Tiempo (difusión)	$1/n^2$

La cámara donde se construyó el modelo es una caja metálica con una de sus paredes compuesta por una placa acrílica transparente para observar el modelo. Adicionalmente, en la parte superior, adosada en uno de sus bordes se localiza un brazo con el que se hace la aplicación de la carga sobre el muro, en la Tabla 4 se presentan sus dimensiones.

Tabla 3. Dimensiones geoceldas escaladas.

Dimensión	Valor
Altura (mm)	10
Distancia entre juntas (mm)	22.25
Dimensiones de apertura de cada celda (mm)	17x14.5

Tabla 4. Dimensiones cámara construcción modelo

Dimensión	Valor
Altura (mm)	45,0
Largo (mm)	56,2
Ancho (mm)	19,0

Construcción modelo físico-muro de contención

Predimensionamiento: La geometría del muro se definió mediante un predimensionamiento clásico para un factor de seguridad muy cercano a 1 y con una sobrecarga en la parte superior del muro igual a 40 kPa. Se utilizó el parámetro de ángulo de reposo hallado por medio del método del embudo. En la Tabla 4 se presentan los resultados de dimensionamiento del muro a modelar.

Tabla 5. Dimensionamiento muro de contención escala real.

Parámetro	Valor
Ancho corona (m)	0.8
Base (m)	2.6
Altura (m)	5.0
Inclinación cara muro (grados)	70
FS Volcamiento	1.80
FS Deslizamiento	1.09
FS Capacidad portante	1.10

Tomando en cuenta los lineamientos de escalamiento mencionados anteriormente, en la Figura 5 se muestra un esquema de la geometría del modelo de muro reforzado con geoceldas, el cual tiene una inclinación en la cara del muro igual a 70° . La sobrecarga se recrea por medio de un brazo con un actuador, el cual se introduce al momento de realizar el ensayo.

Montaje y construcción: se realizó mediante el método de pluviación ensayo, éste se ejecutó previamente con el fin de determinar la altura de caída para la arena, de tal forma que proporcionara la mayor densidad al suelo, como se muestra en la Figura 6.

El proceso se llevó a cabo conformado primero el nivel de fundación, posteriormente se construye, al mismo tiempo, el muro de contención y el relleno, instalando los marcadores de imagen sobre la pared de acrílico, cuya función es trazar los desplazamientos del suelo a su alrededor y poder definir los vectores de desplazamiento.

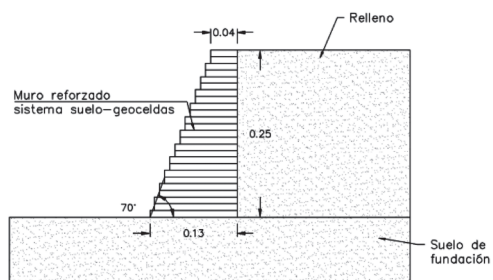


Figura 5. Geometría modelo muro de contención escalado.

Como procedimiento final se pesó el modelo en una báscula y se instaló en el brazo de la centrífuga, se configuró el contrapeso (peso igual al del modelo) en el otro extremo para compensar el modelo.

Instrumentación: para el análisis de la deformación vertical en el modelo físico, se instalaron tres deformímetros (LVDT), dos en sentido vertical y uno en sentido horizontal (en la parte superior del muro), además de la instalación de marcadores en el cuerpo del muro y del relleno como se presenta en la Figura 7.

Los LVDT's verticales, se instalaron a una distancia de 7 cm y de 22,5 cm con respecto a la espalda del muro. Se instalaron terminales gruesas (madera balsó) para evitar el punzonamiento de los deformímetros y evitar errores de medición.

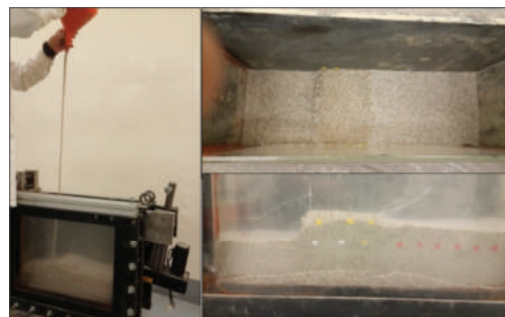


Figura 6. Proceso constructivo relleno mediante el método de pluviación, extendido y anclaje geoceldas muro, e instalación de los marcadores.

Los marcadores se fueron ubicando a medida que se construía el muro por etapas, formando una malla con separación aproximada de 3 cm en sentido horizontal y 5 cm en vertical, en el relleno.

Un actuador neumático apoyado sobre una celda de carga se situó en la parte superior del relleno, entre los dos deformímetros verticales, conectado a un brazo metálico el montaje de este sistema de carga se observa en la Figura 8.

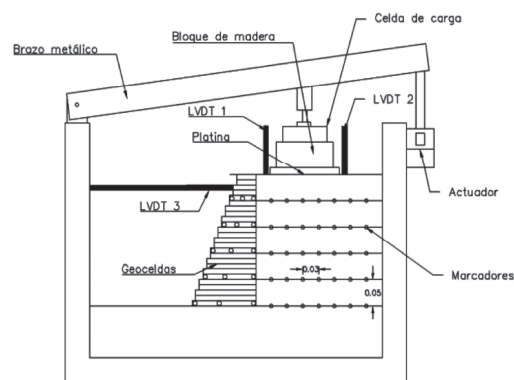


Figura 7. Esquema instrumentación modelo.



Figura 8. Montaje del sistema de carga en el modelo físico.

Modelo numérico: para realizar la modelación numérica se utilizó el programa de elemento finitos (FEM) Phase2.7.0 de Rocscience Inc, Se tomó el peso unitario seco igual a 16.47 kN/m³, para el suelo de fundación y de relleno en la espalda del muro de contención, el ángulo de fricción pico y residual de la arena fue de 50° y 38° respectivamente, y una cohesión igual a cero, se asumió un ángulo de dilatación igual a cero.

La relación de Poisson (ν) promedio del suelo se asumió igual a 0.33 y un módulo de elasticidad (E) de la arena se calculó a partir de la relación que existe con el módulo cortante (G). A partir de los resultados de los ensayos de corte directo realizados a la arena, se calculó el módulo cortante secante, para el 50% de esfuerzo cortante pico, se adoptó un módulo de elasticidad igual a 48,000 kPa.

Resultados

La prueba se realizó a una aceleración de 20g, ejecutando una sobrecarga al muro por medio de un actuador instalado en la cámara, el cual llegó tres veces a su capacidad máxima sin ocasionar falla en el muro, posteriormente en cada ocasión se volvió a cargar el modelo. Los resultados de las deformaciones del muro obtenidos en la prueba del modelo físico en la centrifuga se discuten a continuación.

Los resultados de los desplazamientos registrados por los deformímetros que fueron instalados en el modelo se presentan en las figuras 9 y 10, donde se observa el aumento de defor-

mación en la superficie del muro a medida que se incrementa la carga por medio del actuador.

Los deformímetros verticales registraron deformaciones de 18,45 y 0,94 mm correspondientes a deformímetro 1 y 2 respectivamente, en este último sensor se presentan dispersión, esto causado por ruido o vibraciones que son generadas por la centrifuga.

Al realizar la aplicación de carga inicial hasta alcanzar el valor máximo registrado el actuador deja de aplicar la carga y las deformaciones permanecían constantes, luego al aplicar nuevamente la carga las deformaciones aumentaban, este tipo de comportamiento puede corresponder a la redistribución y acomodamiento de las partículas de arena del relleno del muro [10].

El análisis de las deformaciones dentro del muro se llevó a cabo mediante los marcadores de imagen, estos elementos que fueron instalados en el muro y en el relleno sufrieron desplazamientos como se puede evidenciar en la Figura 11, donde se presentan las imágenes del muro antes y después de realizada la prueba en la centrifuga.

Posteriormente en la Figura 12, se puede identificar la trayectoria de desplazamiento de los marcadores (vectores amarillos) al superponer la ubicación antes (marcadores verdes) y después (marcadores rojos), la magnitud máxima alcanzada por los desplazamientos dentro del sistema de relleno-contención, en el primer tercio superior del muro.

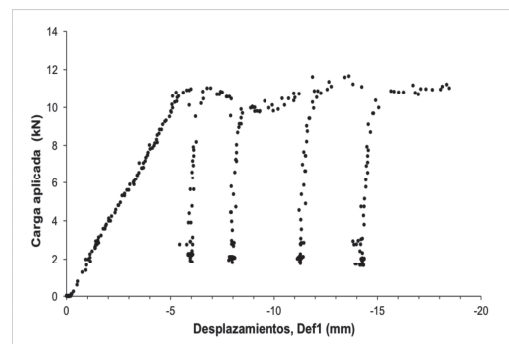


Figura 9. Desplazamientos verticales registrados deformímetro Def1.

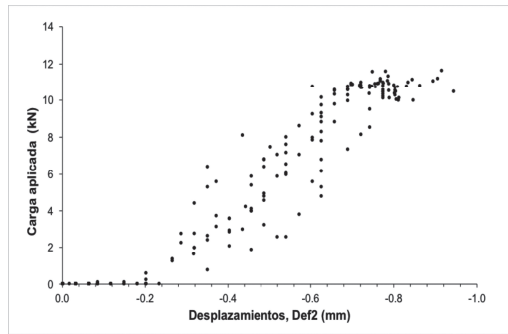
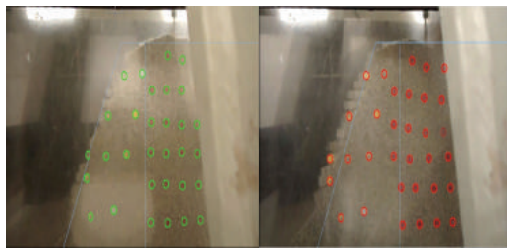


Figura 10. Desplazamientos verticales registrados deformímetro Def2.

Lo que evidencia que se produjo un indicio de falla, pero con las prueba desarrolladas el muro no se pudo fallar por completo, debido a las limitaciones de carga con las que se disponían en laboratorio, pero de acuerdo al seguimiento que se le realizó a la estructura es posible afirmar que para las cargas superiores a 11.65 kN, el modelo podría fallar.



Muro antes de la prueba Muro después de la prueba
 Figura 11. Condición modelo físico.

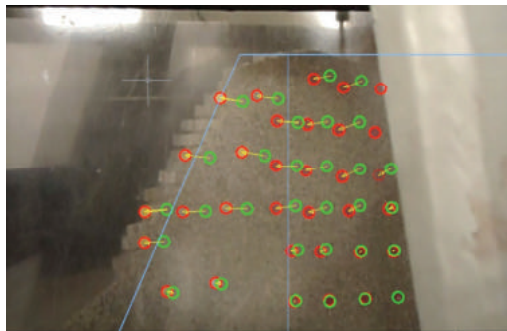


Figura 12. Vectores de desplazamiento modelo físico.

Comparando los resultados de la modelación numérica con el modelo físico (figura 13), se puede encontrar que los asentamientos calculados con la modelación numérica tienen una buena concordancia con los registrados en la prueba. También se puede observar que los

asentamientos registrados en el modelo físico son menores a los resultados del modelo numérico.

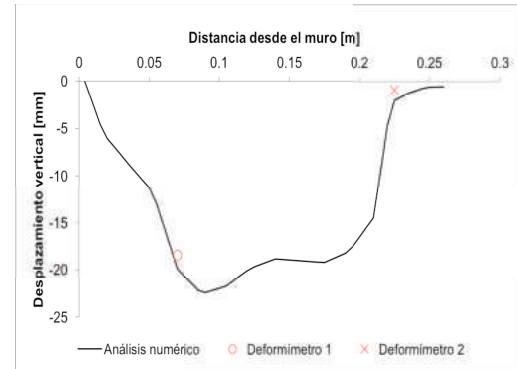


Figura 13. Deformación vertical, Modelo Físico vs. Modelo Numérico.

Conclusiones

Los resultados de comportamiento del muro ante la carga aplicada fueron mejor de lo esperado, considerando que el predimensionamiento del muro se calculó para factores de seguridad cercanos a la falla, y durante la realización de la prueba de centrifuga fue necesario realizar varios procesos de carga durante el tiempo de vuelo, debido a, que la carga máxima aplicada no provocó la falla del muro de contención, y posteriormente se caía a cero en la magnitud de aplicación de carga, realizando varios ciclos de carga.

La caracterización física de la arena procedente del Guamo pudo constatar que al realizar un confinamiento de material existe una altura a la cual la arena adquiere una mayor densidad, al pasarse de esta altura la densidad disminuye, un comportamiento similar a la curva de compactación y contenido de humedad que se obtiene en el ensayo de proctor.

Los valores obtenidos mediante el ensayo de corte directo CD que dio como resultado ángulo de fricción pico y residual de 51.96° y 38.73° respectivamente, fueron mayores a los obtenidos mediante el método del embudo (33,44°), al tomarse este último valor como el valor de predimensionamiento, generó un modelo con una estabilidad mayor a la calculada, al evitar

que éste fallase, aunque se mostraron deformaciones considerables.

La instalación de LVDT's verticales permitieron analizar el comportamiento de los asentamientos en la superficie, el deformímetro, más próximo a la espalda del muro (ubicado a 7cm) registro una deformación mayor con respecto al deformímetro 2 (ubicado a una distancia de 22,5cm), con valores de 18,45 y 0,94 mm respectivamente, esto se debió a que el muro sufrió mayores desplazamientos.

El análisis de desplazamientos verticales del muro, realizado en función de la trayectoria de desplazamientos por medio de los marcadores e imagen instalados en el modelo físico, identificaron mecanismos de falla que coinciden con los correspondientes a volcamiento y deslizamiento del muro, esto debido a la acción de la carga inducida, generando una cuña de falla activa sobre el relleno, lo que muestra que el modelo físico se encuentra en estado marginal de estabilidad.

Mediante la comparación del modelo numérico y físico se puede observar resultados muy similares, aunque el modelo físico presenta valores menores. Se recomienda continuar realizando pruebas en centrífuga de muros reforzados con geoceldas en arenas, trabajando en condiciones saturadas para determinar la relación entre el contenido de agua y las deformaciones en este tipo de muros.

Referencias

- [1] E. Rendon. "Muros en Suelo Reforzado con Geotextil Alternativa Económica para la Estabilización y Conformación de Vías" en *Memorias del XII Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos*, Junio de 1999, pp.397-408
- [2] A. Cancelli, P. Rimoldi, F. Montanelli. "Index and Performance Tests for Geocells in Different Applications." *Geosynthetic Soil Reinforcement Testing Procedures, ASTM STP 1190*. 1993.
- [3] D. G. Bautista. "Iniciación De La Modelación Física En Centrífuga, Geotécnica De Un Muro De Contención Con, Geoceldas." Trabajo de grado Universidad De Los Andes, Facultad De Ingeniería. Bogotá D.C., Co., pp. 7-8. Junio de 2011
- [4] S. L. Webster. "Investigation of Beach Sand Trafficability Enhancement Using Sand-Grid Confinement and Membrane Reinforcement Concepts." Report 2. Sand Test Sections 3 and 4." 1981.
- [5] R.J. Bathurst, R. Karpurapu. "Large-scale triaxial compression testing of geocell-reinforced granular soils." *Geotechnical Testing Journal*, vol. 16 no. 3, pp. 296–303. 1993.
- [6] R. J. Bathurst, E. R. Crowe. *Recent case histories of flexible geocell retaining walls in North America. Recent case histories of permanent geosynthetic-reinforced soil retaining walls*. F., Leshchinsky, D. Balkema, Rotterdam. Editors Tatsuoka, 1994.
- [7] B. C. Hormaza, A. Lizcano, "The Universidad de los Andes Geotechnical Centrifuge" *Physical Modelling In Geotechnics: Proceedings Of The International Conference Icpgm '02*, St. John'S, Newfoundland, Canada, 10-12 July 2002. En: Canadá ISBN: 9058093891, ed: A.A. Balkema Publishers, v.1, p.97-102 1, 2002.
- [8] D. Gómez. "Identification of Failure Mechanisms by Internal Rupture of Geocell Retaining Walls through Centrifuge Modelling". 2012.
- [9] D. S. Guzmán, A. L. Peláez. "Ángulo de fricción crítico y ángulo de reposo de la arena del Guamo." *Rev. Épsilon*, vol. 11, pp. 7-20, Julio-Diciembre 2008.
- [10] B. C. Hormaza, "Geotechnical Centrifuge applications to foundations engineering teaching Geotechnical Engi-

neering Edu-cation And Training". En:
Estados Uni-dos ISBN: 9058091546
ed: A.A. Balkema Publishers, vol.1 ,
p.p.271 - 274 1 ,2000.