

BOLETÍN TÉCNICO NO. 5

REFUERZO AL CORTANTE CON GEOPIER PARA ESTABILIDAD GLOBAL Y DE TALUDES

Este Boletín Técnico discute el incremento de la resistencia del suelo al cortante, aportado por la instalación de Pilas de Agregado Apisonado Geopier. En se requiere incrementar la resistencia al cortante en suelos blandos donde la construcción de estructuras de retención Estabilizadas Mecánicamente (MSE), muros de contención de concreto, y terraplenes de tierra puedan resultar en inestabilidad global. El incremento de resistencia al cortante también se requiere para pendientes naturales sujetas a problemas de deslizamientos. La construcción de elementos Geopier tiene como resultado pilas de agregado muy denso que presentan altos ángulos de fricción interna. Este Boletín Técnico describe los métodos de diseño usados para el mejoramiento de la resistencia del suelo al cortante mediante el refuerzo con elementos Geopier.

1. TRASFONDO: ESTABILIDAD GLOBAL Y RESISTENCIA AL CORTANTE

La construcción de muros de contención MSE, muros de contención de concreto, y terraplenes, generalmente inducen altos esfuerzos cortantes al suelo subyacente. Si la resistencia al cortante del suelo de cimentación es menor al esfuerzo cortante aplicado, ocurrirá una falla mientras la estructura rota en superficies de deslizamiento que se extienden a través del suelo de cimentación. De igual manera, si la resistencia al cortante de los taludes naturales o de terraplenes es menor que el esfuerzo cortante de la masa de suelo inclinada, ocurrirá un deslizamiento de tierra.

Las Pilas de Agregado Apisonado Geopier son instaladas en suelos matrices débiles para mejorar la resistencia compuesta al cortante y para incrementar el factor de seguridad contra inestabilidad global o deslizamiento. Las Figuras 1a, 1b, y 1c, muestran imágenes de Pilas de Agregado Apisonado Geopier reforzando una matriz de suelos debajo de un muro MSE, de un terraplén, y dentro de una masa de suelo deslizante, respectivamente.

GEOPIER®

Figura 1a.
Refuerzo de Suelo Geopier en Muro MSE

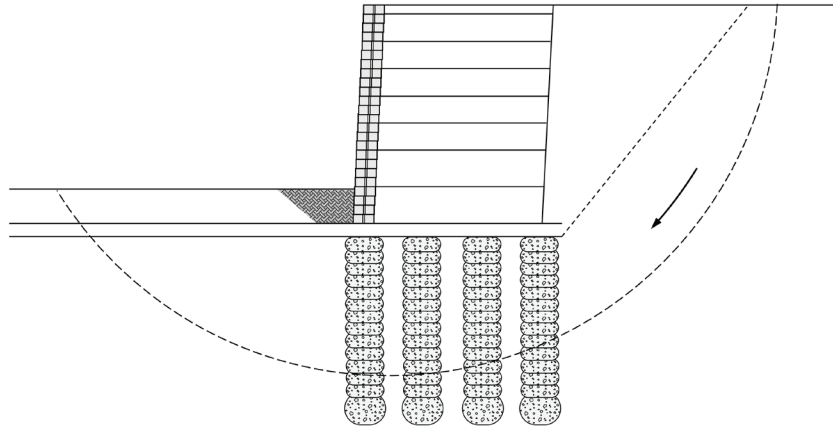


Figura 1b.
Refuerzo de Suelo Geopier en Terraplén

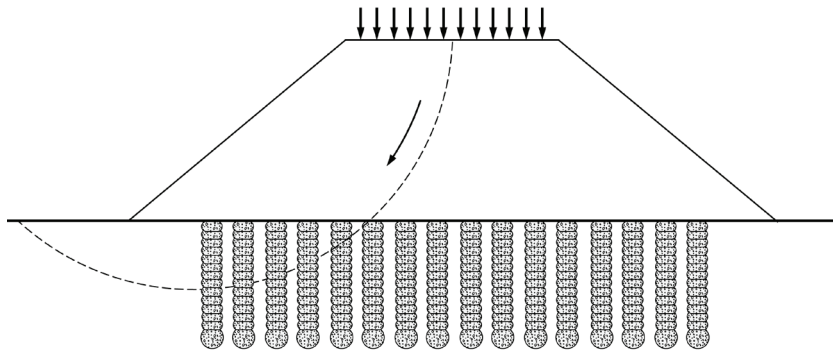
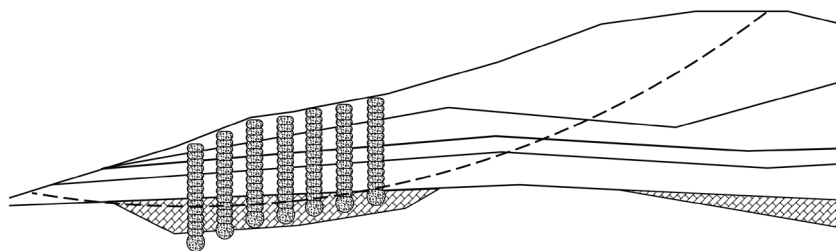


Figura 1c.
Refuerzo de Suelo Geopier en Talud Natural



2. CONSTRUCCIÓN DE GEOPIER

Las Pilas de Agregado Compactado Geopier se construyen creando una cavidad y después apisonando agregado selecto dentro de ella en capas delgadas usando un apisonador biselado patentado de compactación. El proceso de apisonamiento impacta al agregado verticalmente empujándolo de manera lateral contra el suelo matriz, incrementando a su vez, los esfuerzos horizontales

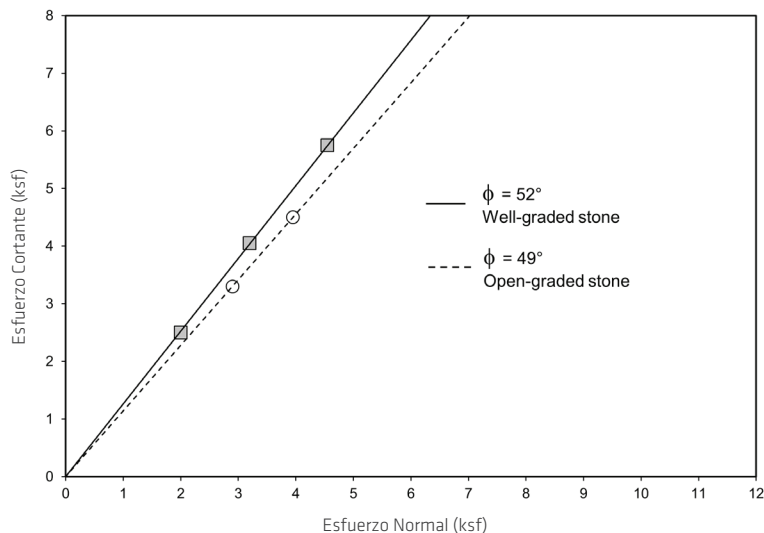
en el suelo matriz. La construcción de Geopier tiene como resultado una pila de agregado muy denso con gran rigidez y un alto ángulo de fricción interna resultante de la dilatación del agregado cuando es sujeto a los esfuerzos cortantes. El proceso constructivo permite desarrollar un alto nivel de confiabilidad en el ángulo de fricción interna de diseño usado para el agregado apisonado Geopier.

3. RESISTENCIA AL CORTANTE DE GEOPIER

Pruebas de corte directo a escala real llevadas a cabo en elementos Geopier de 30 pulgadas (0.76 m) de diámetro, así como pruebas triaxiales de laboratorio conducidas en muestras reconstituidas, demostraron que el ángulo de fricción interna para el agregado Geopier está en el rango de 49 a 52 grados, dependiendo de la granulometría. La Figura 2 presenta los resultados obtenidos en las pruebas de corte directo a escala real sobre los elementos

Geopier. Las pruebas fueron desarrolladas aplicando incrementos de carga normal al tope de los elementos de Pilas de Agregado Apisonado Geopier instalados, seguidos por cargas horizontales hasta alcanzar falla por cortante. Las Pilas de Agregado Apisonado Geopier fueron construidas y sometidas a prueba usando agregado bien graduado, así como agregado de granulometría abierta (AASHTO#57).

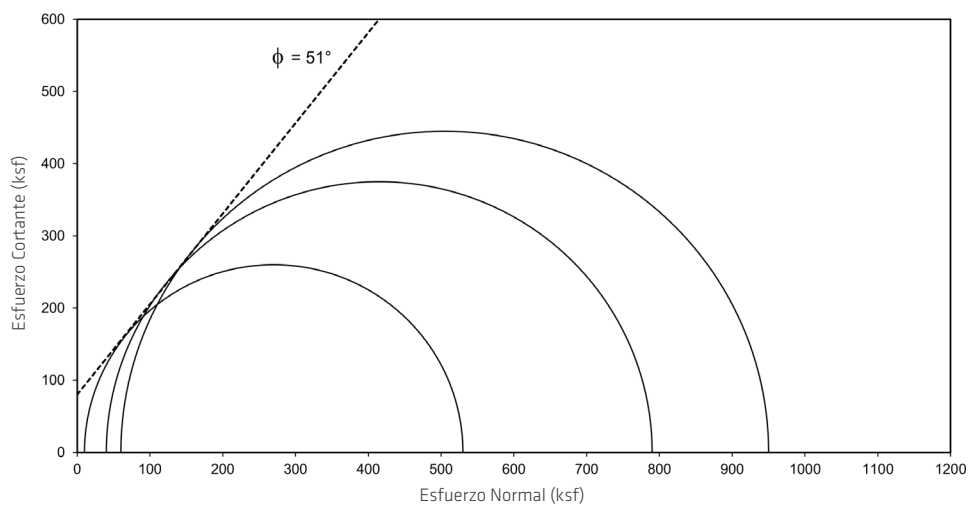
Figura 2.
Resultados de Prueba de Corte Directo a Escala Real en el Tope de Elementos Geopier



Se realizaron pruebas de laboratorio a pequeña escala tipo triaxiales en la Universidad Estatal de Iowa sobre muestras reconstituidas de agregado Geopier bien graduado (White 2001), compactado a densidades consistentes a aquellas obtenidas de elementos Geopier instalados. Los resultados de las pruebas, presentados en la Figura 3, indican un ángulo de fricción interna de 51 grados. Los altos ángulos de fricción obtenidos en campo y

mediante pruebas de laboratorio, se atribuyen a la alta densidad y al comportamiento de dilatación que el agregado produce durante la alta energía de apisonamiento de la piedra triturada usada en los elementos Geopier. Para propósitos de diseño, usualmente se utilizan ángulos de fricción interna ligeramente más conservadores (típicamente 45 grados).

Figura 3.
Resultados de Prueba Triaxial en
Agregado Geopier Apisonado



4. MÉTODOS DE DISEÑO PARA REFUERZO AL CORTANTE

El diseño de refuerzo al cortante para taludes, terraplenes, y muros, es desarrollado determinando el factor de seguridad contra inestabilidad global. El factor de seguridad contra inestabilidad es la relación del momento resistente al momento desestabilizante (Duncan 1981). Varios programas computacionales como PCSTABL, SLIDE, UTEXAS, SLOPE/W, y GSLOPE, están actualmente disponibles para el desarrollo de estos análisis convencionales. Los parámetros requeridos para el desarrollo del análisis incluyen la geometría del talud o del muro, el peso unitario del suelo, así como su resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna), y el nivel freático.

4.1 PARÁMETROS COMPUESTOS DE RESISTENCIA AL CORTE

La resistencia compuesta al cortante de los suelos reforzados con Geopier es calculada usando el método convencional para calcular los componentes de resistencia al corte promedio de los Elementos de Agregado Apisonado Geopier y el suelo matriz (FHWA 1999). La resistencia compuesta al corte es expresada en la siguiente ecuación:

$$\tau_{\text{comp}} = \sigma'_v \tan \phi'_{\text{comp}} + c'_{\text{comp}} \quad \text{Ec. 1.}$$

La cohesión compuesta (c'_{comp}) es calculada con la siguiente expresión:

$$c'_{comp} = c'_g R_a + c'_m (1-R_a), \quad \text{Ec. 2.}$$

Donde c'_g es la cohesión del agregado Geopier, c'_m es la cohesión del suelo matriz, y R_a es la relación del área de Geopier al área de la huella de la zona de suelo matriz reforzado. Debido a que la cohesión de Geopier es cero, la Ecuación 1 se reduce a:

$$c'_{comp} = c'_m (1-R_a), \quad \text{Ec. 3.}$$

El ángulo de fricción compuesto (ϕ'_{comp}) es calculado con la siguiente expresión:

$$\phi'_{comp} = \arctan [R_a \tan \phi'_g + (1-R_a) \tan \phi'_m], \quad \text{Ec. 4.}$$

Donde ϕ'_g es el ángulo de fricción interna del agregado Geopier y ϕ'_m es el ángulo de fricción interna del suelo matriz.

4.2 PARÁMETROS COMPUESTOS DE RESISTENCIA AL CORTE INCORPORANDO CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS

En situaciones donde los Elementos de Agregado Apisonado Geopier, que soportan muros MSE o terraplenes, se extienden a través de suelos blandos hacia una capa firme, la diferencia significativa entre la rigidez del suelo matriz y la de los Elementos de Agregado Apisonado Geopier, resulta en una concentración de esfuerzos en las puntas de los elementos Geopier. Esto produce un incremento significativo en la resistencia al corte compuesta (Mitchell 1981).

La resistencia al corte compuesta, presente en la zona reforzada con Geopier, es calculada de manera similar a la mencionada anteriormente, utilizando la metodología promedio presentado en la Ecuación 1. Sin embargo, los cálculos para determinar el ángulo de fricción compuesto, así como los valores de cohesión, incorporan términos adicionales para tomar en cuenta la concentración de esfuerzos:

$$\phi'_{comp} = \quad \text{Ec. 5.}$$

$$\arctan \left[\frac{n_s}{R_a n_s - R_a + 1} R_a \tan \phi'_g + \frac{1}{R_a n_s - R_a + 1} (1-R_a) \tan \phi'_m \right]$$

$$c'_{comp} = \frac{1}{R_a n_s - R_a + 1} (1-R_a) c'_m \quad \text{Ec. 6.}$$

Donde n_s es la relación de esfuerzo aplicado al elemento Geopier y el esfuerzo aplicado al suelo matriz (Mitchell et al., 1981). Para cimentaciones perfectamente rígidas (por ejemplo concreto), los valores de n_s , son los mismos que aquellos de la relación de rigidez, definida como la relación la rigidez del elemento Geopier a la rigidez del suelo matriz. Los valores típicos de la relación de rigidez se encuentran en el rango de 10 a 40 cuando se considera soporte de cimentaciones tradicionales (Lawton y Fox 1994, Lawton 2000). Sin embargo, para muros MSE y otras estructuras que no incluyen cimentaciones rígidas, la relación de concentración de esfuerzos, n_s , es generalmente menor a la relación de rigidez, n_s , debido a que la cimentación flexible no impone una condición límite. Además, debido a que los Elementos de Agregado Apisonado Geopier transfieren la carga al suelo con la profundidad, la concentración de esfuerzos disminuye con la profundidad dependiendo de la longitud del elemento, ancho del área de carga, y la rigidez del suelo al fondo de los elementos. Los valores típicos de n_s se encuentran en el rango de 1 a 5 para estructuras flexibles (Thompson et al., 2009) y debe ser seleccionado con juicio ingenieril.

4.3 INCORPORACIÓN DE PARÁMETROS COMPUESTOS

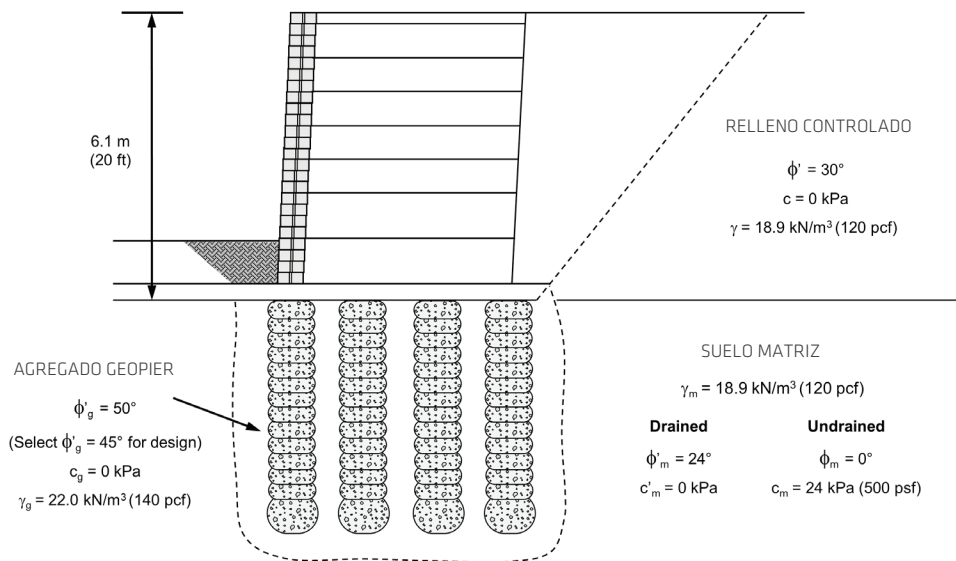
La zona reforzada con Geopier es diseñada para intersectar las superficies de corte críticas localizadas bajo los muros de contención y los taludes de terraplenes. Dentro de la zona reforzada, los valores compuestos para cohesión y ángulo de fricción (Ecuaciones 2 a 6) representan la resistencia al corte compuesta en la zona de suelo reforzada con elementos de agregado. Los análisis son desarrollados a base de prueba y error; el área de reemplazo (R_a) de Elemento Apisonado Geopier es variada en un proceso iterativo hasta alcanzar un factor de seguridad satisfactorio.

5. EJEMPLOS DE CÁLCULO

Las Figuras 4a y 4b presentan ejemplos de cálculo para estimar los parámetros compuestos de resistencia al corte usando los procedimientos mencionados anteriormente. Los parámetros de

resistencia al corte del suelo matriz y del agregado Geopier son presentados en la Figura 4a. Un área de reemplazo de 0.20 es asumida para los cálculos.

Figura 4a.
Determinación de Valores de Parámetros Compuestos de Resistencia al Corte Sin Concentración de Esfuerzos



PARÁMETROS COMPUESTOS DE RESISTENCIA AL CORTE (SIN CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS)

Valores de Parámetros Compuestos Drenados

$$c'_{\text{comp}} = (1 - 0.20) 0 \text{ kPa} = 0 \text{ kPa}$$

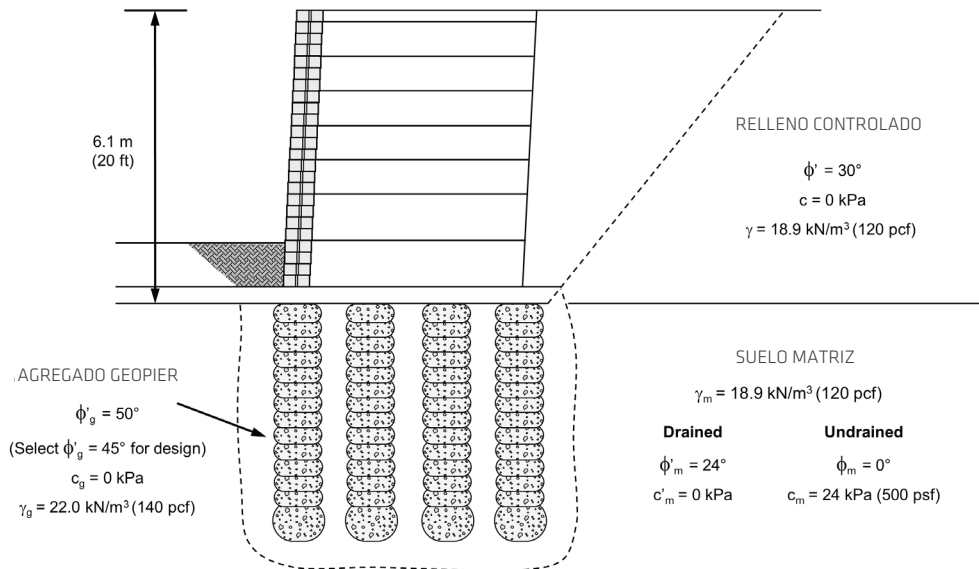
$$\phi'_{\text{comp}} = \arctan [0.20 \tan 45^\circ + (1 - 0.20) \tan 24^\circ] = 29.1^\circ$$

Valores de Parámetros Compuestos No Drenados

$$c'_{\text{comp}} = (1 - 0.20) 24 \text{ kPa} = 19.2 \text{ kPa (400 psf)}$$

$$\phi'_{\text{comp}} = \arctan [0.20 \tan 45^\circ + (1 - 0.20) \tan 0^\circ] = 11.3^\circ$$

Figura 4b.
Determinación de Valores de Parámetros Compuestos de Resistencia al Corte Usando Concentración de Esfuerzos



VALORES DE PARÁMETROS COMPUESTOS DE RESISTENCIA AL CORTE (RELACIÓN DE RIGIDEZ = 5, SELECCIONAR $n_s = 2$ PARA DISEÑO)

Valores de Parámetros Compuestos Drenados

$$c'_{comp} = \left[\frac{1}{2(0.20) - 0.20 + 1} \right] (1 - 0.20) 0 \text{ kPa} = 0 \text{ kPa}$$

$$\phi'_{comp} = \arctan \left[\left[\frac{2}{2(0.20) - 0.20 + 1} \right] 0.20 \tan 45^\circ + \left[\frac{1}{2(0.20) - 0.20 + 1} \right] (1 - 0.20) \tan 24^\circ \right] = 32.2^\circ$$

Valores de Parámetros Compuestos No Drenados

$$c'_{comp} = \left[\frac{1}{2(0.20) - 0.20 + 1} \right] (1 - 0.20) 24 \text{ kPa} = 16.0 \text{ kPa} (333 \text{ psf})$$

$$\phi'_{comp} = \arctan \left[\left[\frac{2}{2(0.20) - 0.20 + 1} \right] 0.20 \tan 45^\circ + \left[\frac{1}{2(0.20) - 0.20 + 1} \right] (1 - 0.20) \tan 0^\circ \right] = 18.4^\circ$$

La Figura 5a presenta los resultados de un análisis de estabilidad global no-drenado usando la misma geometría de muro y las mismas propiedades de suelo matriz presentadas en la Figura 4a. Los resultados del análisis para condiciones no reforzadas indican que el factor de seguridad es del orden de 1.0. Los resultados de los análisis incorporando una zona reforzada con Geopier

para intersectar la superficie crítica de falla son presentados en las Figuras 5b y 5c. Usando un área de reemplazo de 0.20 y una relación de rigidez de 1.0 (sin concentración de esfuerzos), el factor de seguridad es incrementado aproximadamente a 1.26 (Figura 5b). El factor de seguridad incrementa aproximadamente a 1.39 cuando una relación de rigidez de 2 es incorporada dentro del análisis.

Figura 5a.
Análisis de Estabilidad de Talud sin Refuerzo

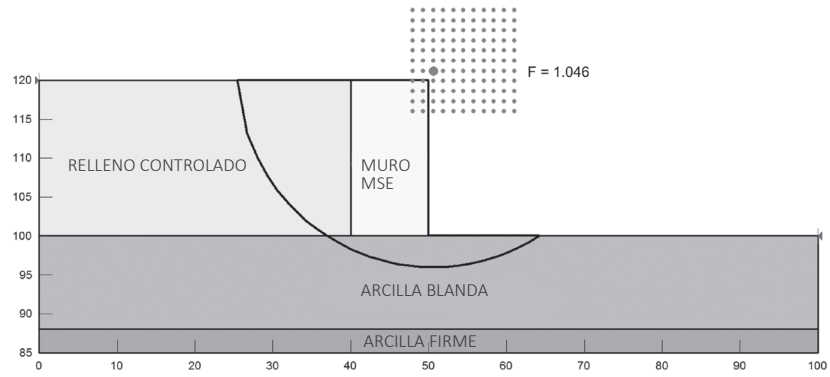


Figura 5b.
Análisis de Estabilidad de Talud Incorporando
Zona de Refuerzo Geopier

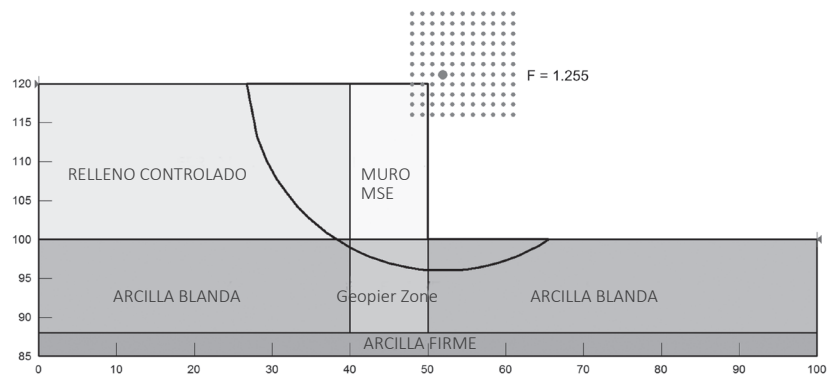
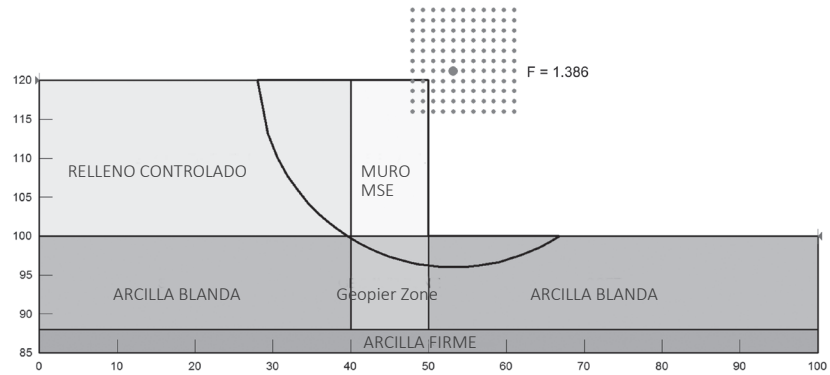


Figura 5c.
Análisis de Estabilidad de Talud Incorporando
Concentración de Esfuerzos Dentro de la
Zona de Refuerzo Geopier



6. RESUMEN

Reforzar el suelo con Geopier incrementa efectivamente el factor de seguridad contra inestabilidad global de muros de contención, terraplenes, y taludes. La inestabilidad global ocurre cuando el momento desestabilizador excede el momento resistente. Cuando los Elementos de Agregado Apisonado Geopier son instalados dentro de la zona de superficie crítica de corte, el alto ángulo de fricción interna presentado por los elementos Geopier aporta un incremento significativo en la resistencia al corte, mejorando así el factor de seguridad de estabilidad global y del talud.

REFERENCIAS

Duncan, M.J., A.L. Buchignani, and M. DeWet. (1981). An Engineering Manual for Slope Stability Studies. Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia. March.

Federal Highway Administration (1999). Ground Improvement Technical Summaries, Volume II. Demonstration Project 116. Publication No. FHWA-SA-98-086.

Lawton, E.C. and N.S. Fox. (1994). "Settlement of structures supported on marginal or inadequate soils stiffened with short aggregate piers." Geotechnical Specialty Publication No. 40: Vertical and Horizontal Deformation of Foundation and Embankments, ASCE, 2, 962-974.

Lawton, E.C. (2000) "Performance of Geopier Foundations During Simulated Seismic Tests at South Temple Bridge on Interstate 15, Salt Lake City, UT." Final Report, No. UUCVEEN 00-03, University of Utah, Salt Lakes City, UT.

Mitchell, J.K. (1981). "Soil Improvement: State of the Art." Session 12, Tenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Sweden, June 15-19.

Thompson, M.J., K.J. Wissmann, and H.T.V. Pham. (2009). "Performance Monitoring of a Rammed Aggregate Pier Foundation Supporting a Mechanically Stabilized Earth Wall." Journal of Performance of Constructed Facilities. ASCE, 244-250.

White, D.J. (2010). Letter to Geopier Foundation Company. Iowa State University. November 20, 2011.

AUTORES

Kord J. Wissmann, Ph.D., P.E.

Brendan T. FitzPatrick, P.E.

SÍMBOLOS UTILIZADOS

c'_{comp}	=	Cohesión compuesta
c'_g	=	Cohesión del elemento Geopier
c'_m	=	Cohesión del suelo matriz
n_s	=	Factor de concentración de esfuerzos
ϕ'_{comp}	=	Ángulo de fricción compuesto del suelo reforzado
ϕ'_g	=	Ángulo de fricción interna del elemento Geopier
ϕ'_m	=	Ángulo de fricción interna del suelo matriz
R_a	=	Relación entre el área de cobertura de las pilas de grava compactada y el área bruta de la matriz del suelo
σ'_v	=	Esfuerzo vertical efectivo
τ_{comp}	=	Resistencia al corte compuesta

REFUERZO Y MEJORAMIENTO DE SUELOS CON LOS SISTEMAS GEOPIER®

Trabaje con nuestros ingenieros alrededor del mundo para resolver sus retos de refuerzo y mejoramiento de suelos. Para más información, llame al **800-371-7470**, correo electrónico info@geopier.com, o visite geopier.com.

130 Harbour Place Drive, Suite 280, Davidson, NC 28036
800.371.7470 | info@geopier.com | marketing@geopier.com
www.geopier.com

GEOPIER®

©2022 Geopier. La tecnología Geopier® y las marcas de fábrica están protegidas bajo patentes de los EUA y marcas de fábrica listadas en www.geopier.com/patents y otras aplicaciones de marca y patentes pendientes. Existen otras patentes extranjeras, aplicaciones de patentes, marcas registradas y marcas de fábrica.

GEOPIER_TB_11_11.22