BOLETÍN TÉCNICO NO. 8

SOPORTE DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO USANDO SISTEMAS DE REFUERZO DE SUELOS GEOPIER

Este Boletín Técnico discute el uso de las Pilas de Agregado Compactado (RAP, por sus siglas en inglés) para el apoyo de tanques de almacenamiento de gran tamaño apoyados sobre el suelo. Tanques de este tipo aplican cargas bastante elevadas sobre el suelo de fundación lo cual podría resultar en asentamientos totales y diferenciales excesivos, además de problemas de estabilidad en los bordes. La utilidad del tanque se vería afectada, necesitándose reparaciones costosas, re-nivelación o incluso el cierre o remplazo del tanque. La instalación de elementos RAP aumenta la resistencia compuesta y la rigidez de los suelos de fundación. Los elementos poseen un alto ángulo de fricción interna que aumenta su resistencia al corte, logrando controlar la estabilidad en los bordes y en el perímetro del tanque.

1. TRASFONDO: RETOS DE DISEÑO PARA TANQUES DE ALMACENAMIENTO

La construcción de tanques de almacenamiento de gran diámetro sobre suelo resulta en presiones de apoyo entre 2,000 psf a 6,000 psf dependiendo de la altura y la gravedad especifica del producto contenido. En suelos blandos o rellenos pobres, las altas presiones aplicadas podrían exceder la capacidad soporte de suelo alrededor del perímetro del tanque resultando en inestabilidad en los bordes. La inestabilidad en los bordes provoca asentamientos excesivos en el perímetro del tanque y distorsiones en la estructura del tanque.

Las presiones aplicadas del tanque podrían resultar en asentamientos totales y diferenciales de grandes magnitudes, dependiendo de la compresibilidad del suelo. Los asentamientos totales de gran magnitud son tolerados frecuentemente siempre y cuando se realicen conexiones flexibles de tubería y juntas. Sin embargo, los asentamientos diferenciales podrían ser causa de preocupación debido a que pueden conducir a distorsiones en la estructura del tanque. La combinación entre inestabilidad de los bordes y asentamientos excesivos podrían afectar significativamente el desempeño de los tanques de almacenamiento.

Las soluciones típicas para prevenir los asentamientos excesivos e inestabilidad en los bordes en tanques con base flexible incluyen el uso de cimientos profundos con losa de cimentación, excavación y remplazo de los suelos compresibles, la aplicación de carga del tanque por etapas con provisiones para la re-nivelación, y el uso de Pilas de Agregado Compactado. Factores como el programa de carga, desempeño y el costo juegan un papel importante en la determinación de la solución más efectiva para el soporte de tanques. Los costos asociados a los cimientos profundos y losas de cimentación normalmente limitan su uso en tanques de gran diámetro. La sobre-excavación y remplazo normalmente se evita debido a dificultades con el nivel freático y el potencial de la necesidad de tablaestacado. Es posible, incluso, que no se cuente con el tiempo necesario para la aplicación de carga por etapas y la re-nivelación podría resultar riesgosa. La combinación de su rigidez superior y su mayor capacidad de soporte para controlar asentamientos con alta confianza hace de los sistemas de Pilas de Agregado Compactado una solución de bajo costo que brinda, al mismo tiempo, un desempeño superior comparado a otras soluciones.

GEOPIER®

2. CONSTRUCCION DE PILAS DE AGREGADO COMPACTADO

Las Pilas de Agregado Compactado Geopier se construyen al barrenar un volumen de suelo compresible para crear una cavidad, seguido por compactar agregado con alta energía en capas delgadas utilizando una apisonadora biselada. Las Pilas de Agregado Compactado Impact son instaladas en suelos con potencial de socavación utilizando un mandril hueco para penetrar a la profundidad de diseño. El agregado es vertido por el centro del mandril hueco para llenar la cavidad y es apisonado y compactado en capas delgadas por medio del subir y bajar del mandril. La alta energía de compactación impartida al agregado ocasiona que el agregado se compacte en sentido vertical y que empuje lateralmente contra las paredes de la cavidad, ocasionando un incremento del esfuerzo horizontal en el suelo matriz. La construcción de Pilas de Agregado Compactado resulta en elementos extremadamente densos, exhibiendo ángulos de fricción interna entre 48 y 52 grados (White, 2004) que les brinda resistencia y rigidez superiores. El alto ángulo de fricción se atribuye a la dilatación del agregado cuando es sujeto a esfuerzos de corte. El proceso de construcción permite un alto nivel de confianza en la elevada rigidez y resistencia al corte logrado con las Pilas de Agregado Compactado.

3. TANK PERFORMANCE IMPROVEMENTS USING RAMMED AGGREGATE PIERS

Como se ilustra en la figuras 1 y 2, las Pilas de Agregado Compactado se utilizan para:

1. Aumentar la resistencia al corte debajo del perímetro del tanque para mejorar el factor de seguridad contra estabilidad en los bordes.
2. Reforzar y rigidizar los suelos compresibles debajo del tanque para control de asentamientos totales y diferenciales.

El método de mejoramiento que se seleccione dependerá de las condiciones del suelo, las presiones aplicadas por el tanque, criterios de diseño y del presupuesto del proyecto.

Figura 1.
Refuerzo Para Estabilidad en los Bordes
Utilizando Pilas de Agregado Compactado

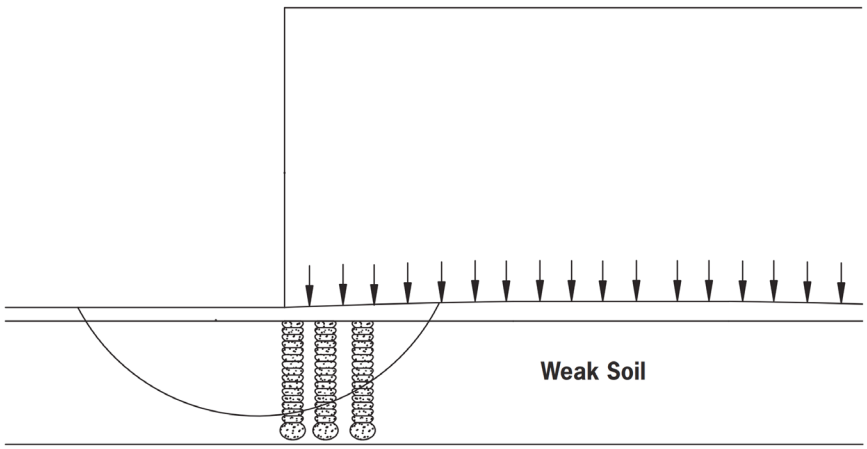
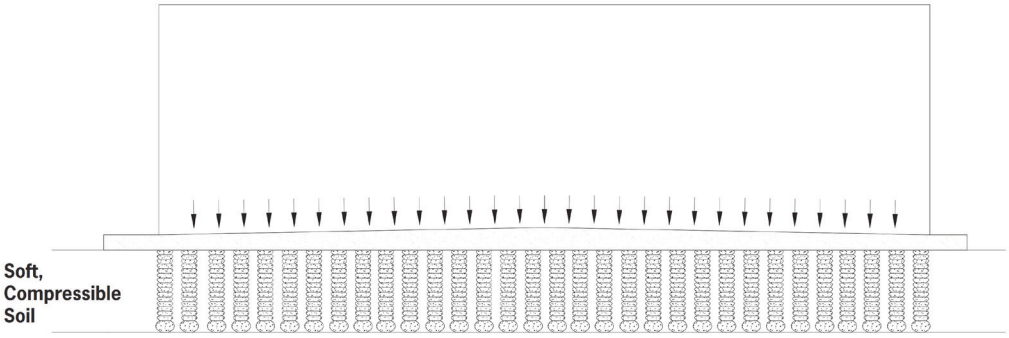


Figura 2.
Refuerzo Para Control de Asentamientos
Utilizando Pilas de Agregado Compactado



3.1 DISEÑO DE REFUERZO CORTANTE PARA ESTABILDAD EN LOS BORDES

El diseño del refuerzo cortante para mejorar el factor de seguridad para estabilidad en los bordes se determina a partir de resultados de análisis de equilibrio límite en dos dimensiones para evaluar el factor de seguridad contra la inestabilidad. El factor de seguridad contra la inestabilidad es la razón entre el momento resistente al deslizamiento y el momento causante del deslizamiento. Varios programas, como por ejemplo PCSTABL, UTEXAS, SLOPE/W, SLIDE y GSLOPE están disponibles actualmente para realizar estos análisis convencionales. Los parámetros de entrada que se necesitan para este análisis incluyen la presión aplicada por el tanque, perfil de suelos, peso unitario y parámetros de resistencia del suelo (cohesión y ángulo de fricción), y el nivel freático.

Los análisis de estabilidad se realizan al incorporar una zona reforzada de elementos RAP en el modelo donde los valores dentro de esta zona representan la resistencia al corte compuesta de los elementos RAP y el suelo matriz. La resistencia al corte compuesta de los suelos reforzados con elementos RAP se calcula usando el promedio ponderado de los parámetros de resistencia de los elementos y el suelo matriz (FHWA 1999). La resistencia al corte compuesta (t_{comp}) se expresa en la siguiente ecuación:

$$t_{comp} = \sigma'_v \tan \phi'_{comp} + c'_{comp}\ , \qquad \text{Ec. 1.}$$

donde σ'_v es el esfuerzo vertical efectivo del estrato, ϕ'_{comp} ies el ángulo de fricción interna compuesto, y c'_{comp} es la cohesión compuesta.

La cohesión compuesta (c'_{comp}) se calcula mediante la siguiente expresión:

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

donde c'_g es la cohesión del agregado en las Pilas de Agregado Compactado, c'_m es la cohesión del suelo matriz, y R_a es la razón del área de las Pilas de Agregado Compactado al área neta de la zona reforzada.

Debido a que la cohesión del agregado en las Pilas de Agregado Compactado es nula, la Ecuación 2 se reduce a:

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

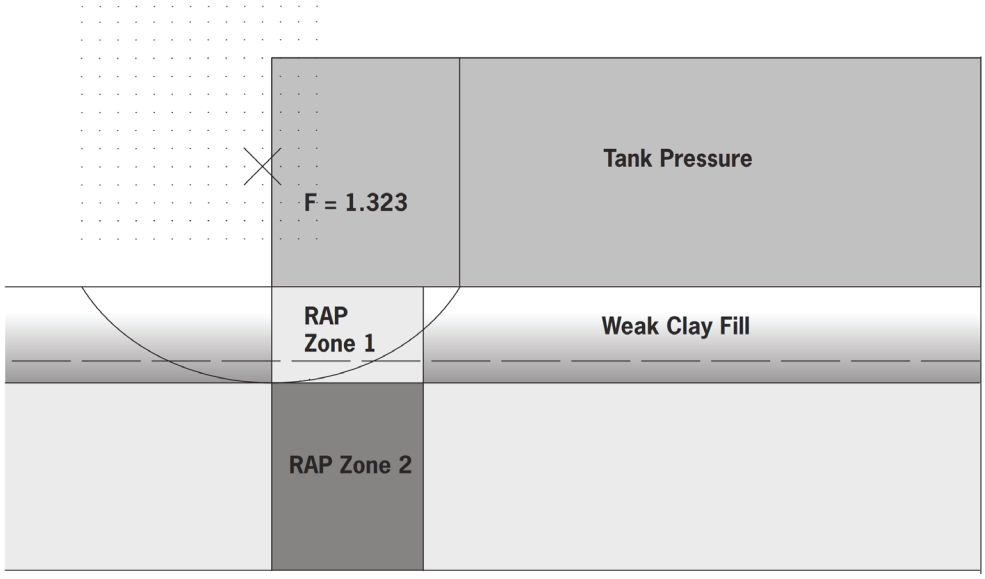
El ángulo de fricción compuesta (ϕ'_{comp}) se calcula con la expresión:

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

Donde ϕ'_g es el ángulo de fricción interna de las Pilas de Agregado Compactado y ϕ'_m es el ángulo de fricción interna del suelo matriz.

La zona reforzada por las Pilas de Agregado Compactado se diseña para incrementar la resistencia al corte del suelo pobre debajo de un nuevo tanque o vecino a un tanque existente donde podrían desarrollarse superficies de falla potenciales. Dentro de la zona reforzada, la cohesión compuesta y el ángulo de fricción interna (Ecuaciones 2 a 4) representan la resistencia al corte compuesto. Un ejemplo de resultados obtenidos de análisis de estabilidad en los bordes se muestra en la Figura 3. Los análisis son realizados a modo de prueba y error al variar la razón de áreas dentro de la zona reforzada por elementos RAP hasta que el factor de seguridad deseado sea obtenido. Se puede encontrar información más detallada acerca de modelar las Pilas de Agregado Compactado por computadora en el Boletín Técnico No. 5 de Geopier Foundation Company (FitzPatrick y Wissmann 2002).

Figura 3.
Resultado de Análisis de Estabilidad en los Bordes Realizado Por Computadora



3.2 CORTE DE ASENTAMIENTOS EN TANQUES

La metodología de diseño para el control de asentamientos en las Pilas de Agregado Compactado se basa en un proceso descrito por Lawton et al. (1994) y Fox (1994), Fox y Cowell (1998), y Wissmann et al. (2002). La instalación de Pilas de Agregado Compactado dentro de la zona de refuerzo, referido como la zona superior, crea una zona rigidizada con menor compresibilidad que reduce el asentamiento de los tanques. El asentamiento debajo la zona reforzada, referido como la zona inferior, se evalúa usando métodos de análisis geotécnicos convencionales. El asentamiento total (s_{tot}) se evalúa como la suma del asentamiento en la zona superior (s_{uz}) y la zona inferior (s_{lz}):

$$s_{tot} = s_{uz} + s_{lz} \quad . \qquad \text{Ec. 5.}$$

3.2.1 ASENTAMIENTOS EN LA ZONA REFORZADA

El asentamiento de la zona reforzada (zona superior) se estima con la ley de Hooke:

$$s_{uz} = \frac{q I_\sigma H_{uz}}{E_{comp}}, \qquad \text{Ec. 6.}$$

Donde q es la presión del tanque, I_σ es el factor de influencia de esfuerzos en la zona superior (asumido igual a 1.0 normalmente), H_{uz} ies el espesor de la zona superior reforzada, y E_{comp} es el modulo elástico compuesto de la zona superior reforzada. Los valores de E_{comp} son calculados como el promedio ponderado del módulo elástico de los elementos RAP, (E_g) y el modulo elástico del suelo matriz (E_m):

$$E_{comp} = E_g R_a + E_m (1-R_a), \qquad \text{Ec. 7.}$$

donde R_a es la razón de área de remplazo.

Los valores seleccionados de E_g dependen del módulo elástico intrínseco del elemento construido y de la habilidad de la fundación de aplicar esfuerzos concentrados a los topes de los elementos. Para cimientos de concreto rígidos, el valor máximo de E_g se podrá utilizar ya que la razón de concentración de esfuerzos equivale a la razón de rigidices entre los elementos y el suelo. Valores más pequeños de E_g son seleccionados para terraplenes y paredes flexibles que no aplican esfuerzos concentrados tan eficientemente y por ende no pueden utilizar a pleno la rigidez de los elementos RAP.

La metodología para control de asentamientos en la zona superior permite determinar la deflexión de los elementos de refuerzo pero no del suelo matriz entre los elementos. Debido a la gran disparidad en rigideces y la instalación de una capa granular sobre los elementos, la mayoría de los esfuerzos aplicados son atraídos a los elementos RAP. Esta concentración de esfuerzos permite asentamientos uniformes dentro de la zona reforzada.

3.2.2 ASENTAMIENTOS DEBAJO DE LA ZONA REFORZADA

El asentamiento debajo de la zona reforzada (s_{lz}) ies calculado utilizando métodos geotécnicos convencionales, que consiste en análisis de asentamiento elástico o de consolidación usando ecuaciones familiares:

$$s_{lz} = \frac{q I_\sigma H}{E_m}, \qquad \text{Ec. 8.}$$

y

$$s_{lz} = c_c \left[\frac{1}{1+e_o}\right] H \log \left[\frac{P_0 + q I_\sigma}{P_0}\right] \qquad \text{Ec. 9.}$$

donde q es la presión promedia aplicada por el tanque, H es el espesor de la zona inferior, E_m es el modulo elástico del suelo matriz dentro de la zona inferior, y c_c es el coeficiente de compresibilidad del suelo matriz, e_o es la razón de vacíos inicial del suelo matriz y P_0 es el esfuerzo vertical efectivo a la mitad del estrato compresible. El cambio de presión aplicada promedio con la profundidad es el producto de la presión aplicada (q) y el factor de influencia de esfuerzos, I_σ. El factor de influencia de esfuerzos dentro de la zona inferior se estima usando la distribución elástica de esfuerzos que depende de la profundidad del centro del estrato y del diámetro del tanque. Para tanques de gran diámetro, el factor de influencia de esfuerzos podría resultar considerablemente mayor de lo normal que para análisis de asentamientos convencionales.

Típicamente, el método de cálculo de asentamiento por medio del módulo elástico se usa para estimar asentamientos en suelos granulares y suelos cohesivos sobre-consolidados. Se pueden estimar módulos elásticos equivalentes del suelo matriz usando correlaciones empíricas de valores de pruebas SPT, resistencia corte no-drenado, resistencias de punta CPT y otros ensayos en sitio. El método de cálculo de asentamiento por consolidación es utilizado normalmente para calcular asentamiento en suelos cohesivos normalmente-consolidados a ligeramente sobre-consolidados.

4. CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE TANQUES SOPORTADOS POR PILAS DE AGREGADO COMPACTADO

Aunque el diseño para el soporte de tanques de gran diámetro sea similar en concepto al de soporte de cimientos convencionales, existen detalles en el diseño y consideraciones adicionales que caben mencionar. Estos detalles incluyen los criterios para asentamientos totales y diferenciales, diseño de la capa de granular, apoyo de los cimientos y adaptaciones al tanque los cuales se analizan a continuación.

4.1 CRITERIOS DE ASENTAMIENTO

El sistema de Pilas de Agregado Compactado hace posible modificar el espaciamiento y longitudes de fuste para acomodar diferentes grados de control de asentamientos. Al definir el criterio de asentamientos, se puede elaborar un diseño que represente la solución más económica que al mismo tiempo cumpla los requisitos de asentamientos. Por ejemplo, para tanques con tolerancias mayores de asentamientos, un diseño que consista en espaciamientos mayores y al mismo tiempo menor cantidad de elementos podría implementarse para proveer una solución más económica para el apoyo de la estructura.

4.2 ASENTAMIENTO TOTAL VERSUS DIFERENCIAL

Muchos criterios de asentamientos incluirán límites para ambos, asentamientos diferenciales y totales. El asentamiento diferencial normalmente equivale al diferencial de asentamiento entre el perímetro del tanque y el centro del tanque. Adicionalmente algunos propietarios de los tanques requerirán un criterio particular de asentamiento diferencial en el perímetro del tanque.

Mientras que las Pilas de Agregado Compactado se implementan para controlar asentamiento totales, otro gran beneficio del sistema es la reducción de asentamientos diferenciales entre el centro y los bordes del tanque al igual que en el perímetro del tanque. El control de asentamientos diferenciales resulta en la creación de una zona reforzada con una compresibilidad significativamente reducida y una rigidez mucho mayor que el suelo matriz. Los tanques construidos en suelos reforzados con Pilas de Agregado Compactado se asientan con mayor uniformidad y experimentan asentamientos diferenciales menores que aquellos sin refuerzo. Debido al control de asentamientos diferenciales superior, suele ser viable soportar tanques que experimenten grandes asentamientos totales siempre y cuando se instalen conexiones flexibles a las utilidades.

4.3 DISEÑO DE LA CAPA GRANULAR

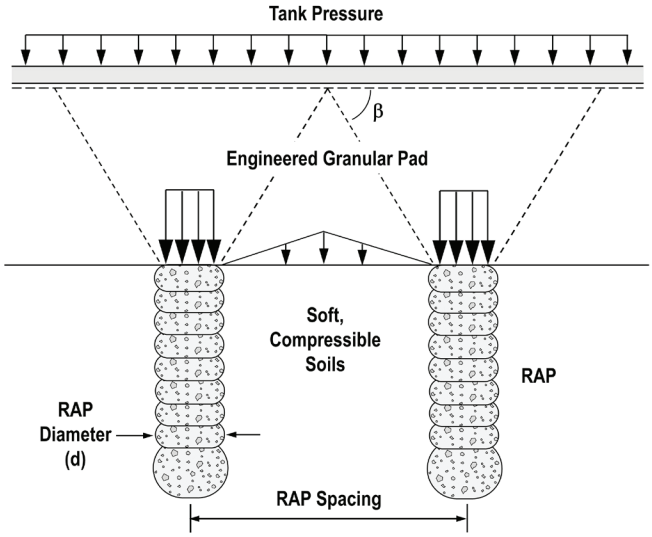
En la mayoría de los casos, se construye una capa granular encima de los topes de los elementos RAP. La capa granular provee un mecanismo de transferencia de presiones desde la base del tanque hacia los elementos RAP debido al arqueo de esfuerzos que ocurre dentro de la capa, como se ilustra en la Figura 4.

Es necesario un cierto espesor de la capa granular para transferir la mayoría de los esfuerzos aplicados hacia los elementos RAP. Este espesor mínimo (t) se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\frac{\tan ß(s - d)}{2} \qquad \text{Ec. 10.}$$

Donde s es el espaciamiento centro a centro de los elementos, d es el diámetro del elemento y ß es el ángulo de arqueo en la capa granular que equivale aproximadamente a 60 grados. En algunos casos es viable el uso de geomallas, como las fabricadas por Tensar Corporation, para transferir de forma más eficiente los esfuerzos hacia los elementos. Como resultado, es posible reducir el espesor de la capa granular y a la vez reducir el valor de ß de 60 grados a 45 grados. El material que debe utilizarse para la capa granular consiste en material selecto bien graduado que cumpla con la especificaciones

Figura 4.
Diseño de la Capa Granular Para el
Desarrollo de Arqueo de Esfuerzos



geotécnicas recomendadas. La compactación de la capa granular debe llevarse a cabo para lograr el 95% de la densidad seca máxima de acuerdo a la norma ASTM D-1557, a menos que se indique otra especificación. .

4.4 SOPORTE DE LA FUNDACION DEL TECHO Y DEL ANILLO DE CIMENTACION

Si no son diseñados como tanques de techo flotante, muchos tanques transfieren sus cargas del techo a zapatas aisladas las cuales se ubican dentro del área del tanque y transfieren sus cargas hacia la base del tanque. Aunque no siempre se especifiquen, algunos diseños para tanques incorporan además un anillo de cimentación para el apoyo del caparazón de acero del tanque. Las Pilas de Agregado Compactado se instalan debajo de la fundación del techo y del anillo de cimentación para reforzar los suelos y controlar asentamientos de estos elementos estructurales. El número de elementos requerido para el soporte de columnas aisladas depende de la carga de techo, mientras el espaciamiento de los elementos debajo del anillo de cimentación depende de las cargas aplicadas hacia el mismo además de las exigencias de estabilidad en los bordes.

4.5 ADAPTACIONES A TANGQUES EXISTENTES

En situaciones donde los tanques experimentan problemas de inestabilidad en los bordes, pero que no se requiera su remplazo, se instalan Pilas de Agregado Compactado alrededor del perímetro del tanque para reforzar los suelos pobres e incrementar la resistencia al corte. Aunque los elementos de refuerzo no provean control de asentamientos en estos casos, el incremento en la resistencia al corte provee un incremento en la estabilidad en los bordes y a menudo inhibe futuras deformaciones en el tanque. Aunque se utilice el mismo método de diseño descrito anteriormente, a menudo se necesitan razones de área de remplazo mayores para controlar la estabilidad en los bordes debido a que existen esfuerzos normales de menor magnitud en el perímetro del tanque en comparación a las altas presiones presentes debajo de la base del tanque.

5. CONCLUSIÓN

Las Pilas de Agregado Compactado aumentan el factor de seguridad contra inestabilidad en los bordes de forma eficaz y reducen el potencial de asentamientos diferenciales y totales para tanques de almacenamiento sobre suelo. Al instalarse dentro la zona de superficies de falla, el alto ángulo de fricción interna de los elementos RAP aumenta la resistencia al corte en la zona de refuerzo. Las Pilas de Agregado Compactado se utilizan para reforzar y rigidizar suelos compresibles antes de la construcción de un nuevo tanque. La zona reforzada creada por los elementos RAP disminuye significativamente el asentamiento diferencial y total y es diseñada para cumplir los requisitos de control de asentamientos del proyecto.

REFERENCIAS

Duncan, M.J., A.L. Buchignani, and M. DeWet. (1987). An Engineering Manual for Slope Stability Studies. Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, VA. March.

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

FitzPatrick, B.T. and K.J. Wissmann (2002). "Technical Bulletin No. 5: Geopier Shear Reinforcement for Global Stability and Slope Stability." Geopier Foundation Company, Blacksburg, VA.

Lawton, E.C., Fox, N.S. Fox, and Handy, R.L. (1994). "Control of settlement and uplift of structures using short aggregate piers." In-Situ Deep Soil Improvement, Proc. ASCE National Convention, Atlanta, CA 121-132.

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 Deformations of Foundations and Embankments, ASCE, 2, 962-974.

White, D.J. and M.T. Suleiman. (2004). "Design of Short Aggregate Piers to Support Highway Embankments." Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. No. 1868, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp 103-112.

Wissmann, K.J., FitzPatrick, B.T., White, D.J., and Lien, B.H. (200). "Improving global stability and controlling settlement with Geopier soil reinforcing elements." Proceedings, 4th International Conference on Ground Improvement. Kuala Lumpur, Malaysia, 26-28 March.

RECONOCIMIENTOS

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

Brendan T. FitzPatrick, P.E.

SIMBOLOS UTILIZADOS

ß	=	Ángulo de arqueo dentro de la capa granular
c_c	=	Coeficiente de compresibilidad del suelo matriz
c'_{comp}	=	Cohesión compuesta de la zona reforzada con elementos RAP
c'_g	=	Cohesión del elemento RAP
c'_m	=	Cohesión del suelo matriz
d	=	Diámetro del elemento RAP
e_o	=	Razón de vacíos inicial del suelo matriz
E_{comp}	=	Modulo elástico compuesto de la zona reforzada con elementos RAP
E_g	=	Modulo elástico del elemento RAP
E_m	=	Modulo elástico del suelo matriz
ϕ'_{comp}	=	Ángulo de fricción interna compuesto de la zona reforzada con elementos RAP
ϕ'_g	=	Ángulo de fricción interna del agregado del elemento RAP
ϕ'_m	=	Ángulo de fricción interna del suelo matriz
H	=	Espesor del estrato compresible
H_{UZ}	=	Espesor de la zona superior reforzada
I_σ	=	Factor de influencia de esfuerzos
P_o	=	Esfuerzo vertical efectivo inicial
q	=	Presión aplicada por estructura
q_g	=	Esfuerzo vertical en el tope de los elementos RAP
R_a	=	Razón de área de elementos RAP al área de refuerzo neto
R_s	=	Razón de concentración de esfuerzos entre los elementos RAP y el suelo matriz
S	=	Espaciamiento centro a centro entre elementos RAP
S_{lz}	=	Asentamiento debajo de la zona reforzada con elementos RAP
S_{uz}	=	Asentamiento en la zona reforzada con elementos RAP
S_{tot}	=	Asentamiento total
σ'_v	=	Esfuerzo vertical efectivo
t	=	Espesor de la capa granular
t_{comp}	=	Resistencia al corte compuesta de la zona reforzada con elementos RAP

NOTAS

REFUERZO Y MEJORAMIENTO DE SUELOS CON LOS SISTEMAS GEOPIER®

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

GEOPIER®

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

©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_8_11.22