

BOLETÍN TÉCNICO NO. 12

PROCEDIMIENTOS APROPIADOS DE PRUEBA DE MÓDULO PARA LA VERIFICACIÓN DEL DISEÑO ADECUADO DE SISTEMAS DE CIMENTACIÓN SOPORTADOS POR GEOPIER

Este Boletín Técnico describe los procedimientos apropiados de la prueba de módulo en campo para la validación de diseño y construcción de elementos de columnas para el mejoramiento de suelos y soporte de cimentaciones. Este boletín es importante porque establece los esfuerzos apropiados en el tope del elemento durante la prueba de carga de verificación de módulo. La verificación apropiada determina la rigidez y la resistencia del elemento.

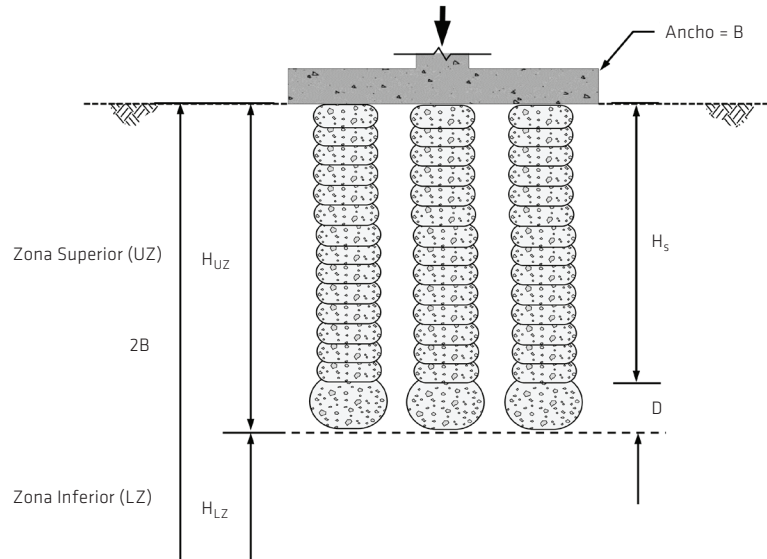
Los elementos Geopier rígidos atraen una mayor porción de la carga en comparación con el suelo matriz que rodea al elemento. Por consiguiente, el desarrollo de la prueba basado en el estado límite de servicio del esfuerzo en el tope del elemento es fundamental para demostrar que el elemento presenta una respuesta segura durante la carga de servicio. Debido a que el esfuerzo en el tope del elemento es mucho mayor que la presión promedio de la zapata, los métodos que sugieren que la prueba de carga sea desarrollada a 2x la presión aplicada de la zapata, son inapropiados. El desarrollar la prueba de módulo hasta al menos 150% del diseño o del estado límite del tope del elemento ha sido una práctica estandarizada en los proyectos de mejoramiento de suelos de Geopier (varios miles como el de ésta publicación) que además, satisface con los requerimientos del Código de Edificaciones Internacional (IBC), así como los códigos locales de edificación, con respecto a cimentaciones superficiales.

1. DISEÑO DE GEOPIER PARA SOPORTE DE CIMENTACIONES

Los elementos de refuerzo Geopier son diseñados en un modelo de dos capas para el control de asentamientos para cimentaciones (Figura 1). El asentamiento en la “zona superior” es definido por la profundidad de los elementos Geopier, la cual es una combinación de la longitud del fuste (H_s) y la

longitud del bulbo, el cual es típicamente asumido igual al diámetro del elemento Geopier. La “zona inferior” es la zona de suelo no-reforzada, sujeta a los esfuerzos de la zapata, por debajo de la punta del elemento Geopier.

Figura 1.
Método de Dos Capas Para Estimar
Asentamiento de Cimentaciones



El asentamiento total de la cimentación es estimado usando la Ecuación 1, sumando el asentamiento estimado en la zona superior y el asentamiento estimado en la zona inferior:

$$S_{TOT} = S_{UZ} + S_{LZ} \quad \text{Ec. 1.}$$

1.1 ASENTAMIENTOS DE LA ZONA INFERIOR

Los asentamientos en la zona inferior son calculados usando métodos geotécnicos que incorporan: la predicción de la profundidad de la influencia de esfuerzos por debajo de la zapata (típicamente se extiende a dos veces el ancho de zapata para zapatas cuadradas), estimar el esfuerzo inducido por la zapata hacia la zona inferior (calculado como el producto del esfuerzo aplicado por la zapata y las gráficas convencionales de factores de influencia de esfuerzos), y estimar la compresibilidad del suelo en la zona inferior. Los asentamientos de la zona inferior (S_{LZ}) en suelos granulares son típicamente estimados de la siguiente manera:

$$S_{LZ} = \frac{q \cdot I_{LZ}}{E_{LZ}} \cdot H_{LZ}, \quad \text{Ec. 2.}$$

donde q es la presión promedio en el fondo de la zapata, I_{LZ} es el factor de influencia de esfuerzo en la zona inferior, H_{LZ} es el espesor de la zona inferior, y E_{LZ} es el módulo elástico del suelo en la zona inferior:

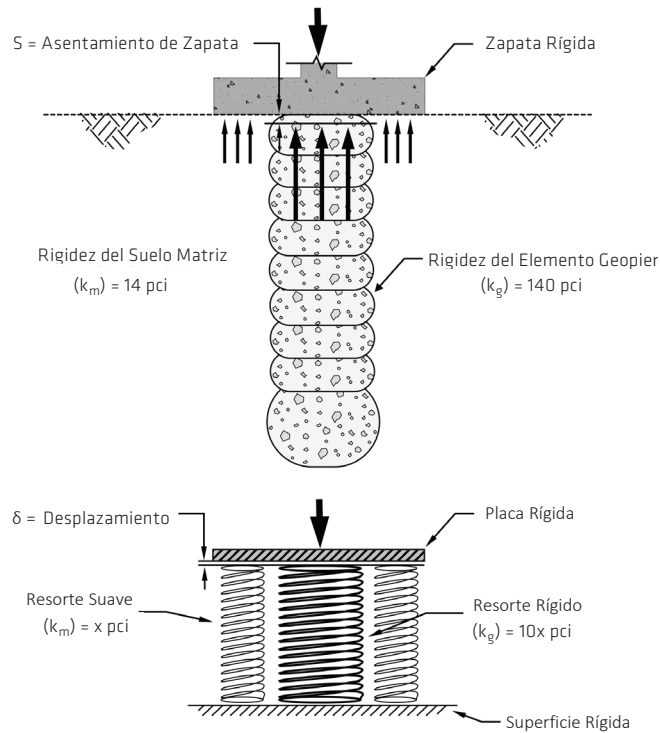
$$S_{LZ} = H_{LZ} \cdot c_e \cdot \log \left(\frac{P_f}{P_0} \right), \quad \text{Ec. 3.}$$

donde c_e es la pendiente de la curva virgen o de recompresión, P_0 es el esfuerzo vertical efectivo inicial, y P_f es el esfuerzo vertical efectivo final después de que la carga de la zapata ha sido aplicada.

1.2. ASENTAMIENTOS DE LA CAPA SUPERIOR

Para zapatas con anchos menores a 15 pies y elementos Geopier con largos de hasta 15 pies, o elementos impactados con grout/concreto de cualquier longitud, los asentamientos de la zona superior pueden ser calculados en base a la analogía de resortes de acuerdo a Lawton et al. 1994 donde los elementos Geopier actúan como resortes rígidos y el suelo matriz adyacente actúa como resortes más suaves.

Figura 2.
Analogía de Resortes
de la Zona Superior



La zapata de concreto es rígida en relación a los materiales de cimentación, entonces, los esfuerzos aplicados a los materiales de la cimentación compuestos, dependen de sus rigideces relativas y su área de cobertura. La fuerza total descendente (Q) en la zapata es el producto del esfuerzo compuesto (q) y del área de la zapata (A) y es resistido por la fuerza ascendente resistente del elemento Geopier (Q_g) y el suelo matriz (Q_m):

$$Q = q \cdot A = Q_g + Q_m = q_g \cdot A_g + q_m \cdot A_m, \quad \text{Ec. 4.}$$

donde q_g es el esfuerzo en el tope del elemento, A_g es el área de la sección transversal de los elementos Geopier, q_m es el esfuerzo vertical aplicado al suelo matriz, y A_m es el área del suelo matriz en contacto con el fondo de la zapata.

Debido a que la zapata es rígida en comparación con los materiales de cimentación, el asentamiento del

elemento Geopier iguala el asentamiento del suelo matriz. De acuerdo a la analogía de resortes, el asentamiento de la cimentación puede ser escrito en términos del esfuerzo en el elemento Geopier (q_g) y módulo de rigidez de Geopier (k_g) o en términos de esfuerzo en suelo matriz (q_m) y módulo de rigidez del suelo matriz (k_m):

$$S_{UZ} = \frac{q_g}{k_g} = \frac{q_m}{k_m}. \quad \text{Ec. 5.}$$

La ecuación 5 puede ser replanteada para expresar el esfuerzo en el suelo en términos del esfuerzo en el Geopier y de relación de rigidez del suelo matriz/ Geopier (R_s):

$$q_m = q_g \cdot \frac{k_m}{k_g} = \frac{q_g}{R_s} \cdot \frac{k_m}{k_g}. \quad \text{Ec. 6.}$$

Combinando las ecuaciones 4 y 6 y definiendo un área de reemplazo (R_a) como la razón de A_g a A y la relación de rigidez como la razón de k_g a k_m , la siguiente expresión simplificada para el esfuerzo en el elemento Geopier es establecida:

$$q_g = \frac{q \cdot R_s}{(R_a \cdot R_s) + 1 - R_a} \quad \text{Ec. 7.}$$

Para elementos de mayor longitud (por ejemplo mayores a 15 pies), y cimentaciones con una gran área de influencia (por ejemplo tanques, silos, etc.), los asentamientos en la zona superior pueden ser evaluados usando un método de módulo elástico compuesto en el cual el asentamiento dentro de la zona superior es estimado usando cálculos convencionales de asentamientos como es presentado en la siguiente ecuación (Terzagui et al. 1996):

$$S_{UZ} = \frac{q \cdot I_{UZ} \cdot H_{UZ}}{E_{comp}} \quad \text{Ec. 8.}$$

donde q es la presión ejercida promedio, I_{UZ} es la influencia de esfuerzos en la zona superior, H_{UZ} es el espesor de la zona superior, y E_{comp} es el valor del módulo elástico compuesto en la zona reforzada

con Geopier y se expresa de la siguiente manera:

$$E_{comp} = E_g \cdot R_a + E_m \cdot (1 - R_a), \quad \text{Ec. 9.}$$

donde E_g es el módulo elástico del elemento Geopier y E_m el módulo elástico del suelo matriz. El valor del módulo elástico (E_g) es estimado mediante la prueba de módulo y el conocimiento de las condiciones límite de esfuerzo que pueden ser obtenidas usando indicadores de desplazamiento dentro de las pruebas de módulo:

$$E_g = \frac{k_g \cdot H'_s}{2} \quad \text{Ec. 10.}$$

donde H'_s es la profundidad equivalente de transferencia de carga. Los valores para E_g típicamente se encuentran en un rango de entre 3000 y 4000 ksf.

El valor de módulo elástico del suelo matriz es usualmente estimado usando correlaciones de resistencia al corte no drenada, número de golpes de sondeos de penetración estándar, resistencia en punta de pruebas de cono dinámico, o son determinados de resultados de pruebas de consolidación.

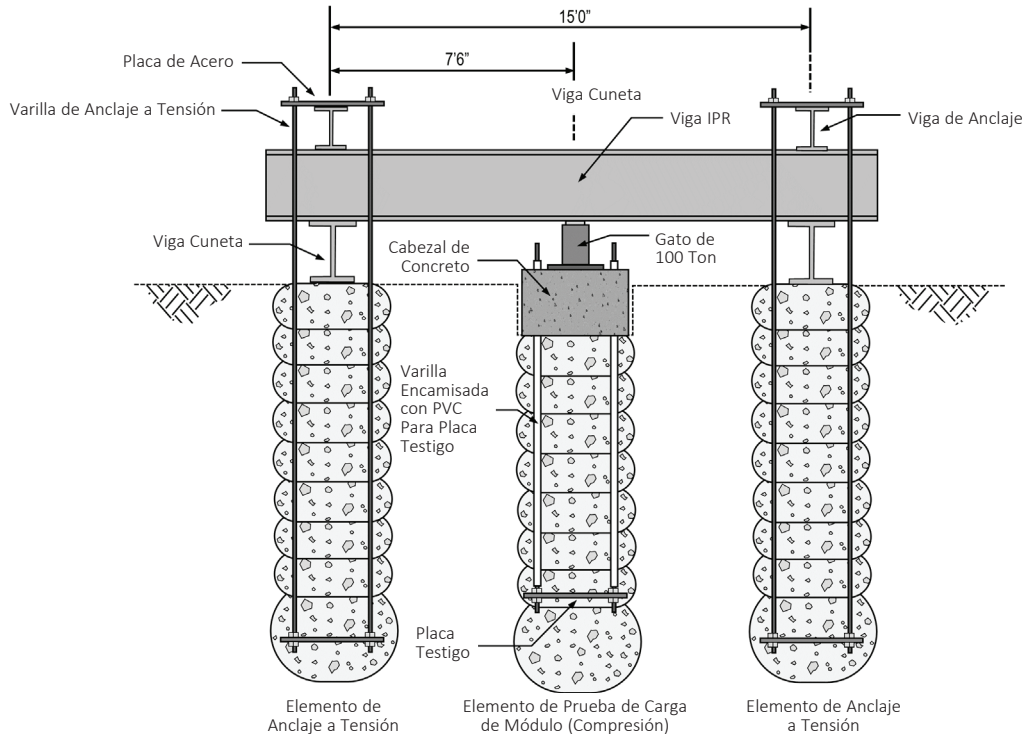
2. PRUEBA DE MÓDULO

Con el fin de validar los parámetros de diseño Geopier seleccionados para un proyecto en específico, una prueba de módulo es desarrollada en un elemento típicamente construido en el área más desfavorable del sitio (por ejemplo un área constituida por los suelos más blandos) bajo condiciones de carga conservadoras. Las pruebas de módulo son conducidas a una presión igual al menos 150% del máximo esfuerzo de diseño en el tope del elemento para asegurar un nivel de seguridad razonable que soporte el control de asentamientos a largo plazo y demuestre que el elemento Geopier tiene la resistencia adecuada. El conducir pruebas de módulo más allá del estado límite del esfuerzo en el tope del elemento satisface los requerimientos del Código de Edificaciones Internacional (IBC),

así como los códigos locales de edificación, con respecto a cimentaciones superficiales.

Un esquema de una prueba de módulo a compresión típica es presentado en la Figura 3. Un gato hidráulico aplica cargas a compresión al tope de los elementos Geopier. El marco de prueba transfiere las reacciones a elementos a tensión o algún otro elemento de anclaje. El elemento Geopier de prueba es equipado con una placa que funge como sensor de desplazamiento (Testigo) en el fondo del elemento para así poder cuantificar las deflexiones durante la prueba de módulo. El propósito de la placa testigo es incrementar el entendimiento de la transferencia de esfuerzos y la deformación del elemento durante la prueba.

Figura 3.
Arreglo de Prueba de
Carga de Módulo



2.1. SELECCIÓN DE ESFUERZO EN EL TOPE DEL ELEMENTO

El esfuerzo de diseño en el tope del elemento es calculado usando la Ecuación 7. Para cimentaciones con un área de remplazo de 0.25 y una razón de rigidez de 15, el esfuerzo en el tope del elemento es igual a $3.33q$ y la prueba debe de ser conducida al menos hasta $5.0q$ (150% del esfuerzo de diseño en el tope del elemento). Para una cimentación soportada por elementos con la misma rigidez que el suelo matriz (por ejemplo $R_s = 1$), el esfuerzo en el tope del elemento es q y la prueba de módulo es conducida a $1.5q$. En este último caso, los elementos Geopier no trabajan y el suelo de la cimentación se comporta como si no estuviera siendo soportada por elementos para el mejoramiento de suelos. Hay que resaltar que conducir la prueba de módulo

hasta el esfuerzo en el tope del elemento apropiado es fundamental para la demostración de que el elemento presenta una respuesta segura durante condiciones de carga.

Métodos de carga alternativos, tales como conducir la prueba de módulo basándose en la máxima presión ejercida de diseño (el doble de la presión ejercida por la zapata), que pueden ser propuestos por externos, no toman en cuenta la relación de rigidez ni la atracción de carga hacia el elemento. Por lo tanto, pueden proveer resultados erróneos que predicen de una manera poco conservadora la respuesta del elemento durante una carga de servicio.

2.2. INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS MEDIANTE LA PRUEBA DE MÓDULO

El módulo de rigidez (k_g), usado en los cálculos de asentamientos para la zona superior, puede ser directamente obtenido de la prueba de módulo, donde, a un nivel dado de esfuerzo, el módulo de rigidez es definido como el cociente del esfuerzo aplicado en el tope del elemento (q_g) y el desplazamiento vertical en el tope del elemento (δ_{top}):

$$k_g = \frac{q_g}{\delta_{top} - \delta_{TT}}, \quad \text{Ec. 11.}$$

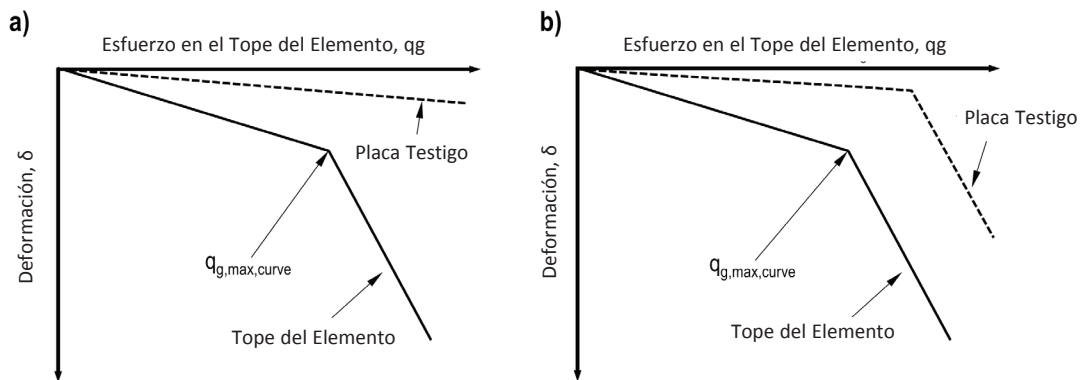
donde δ_{TT} es la deflexión de la placa testigo. En la mayoría de los casos, δ_{TT} es un valor demasiado pequeño y es conservativamente tomado como cero.

Para la interpretación de las mediciones de la prueba de módulo, los desplazamientos en el tope del elemento y en la placa testigo son graficados contra el esfuerzo aplicado en el tope del elemento. La comparación del movimiento relativo entre el tope del elemento y la placa testigo demuestra si el modo

de deformación durante la prueba es controlado por abultamiento o por una concentración de esfuerzos en la punta elemento. La Figura 4a presenta el comportamiento típico de la prueba de módulo controlada por abultamiento (con esfuerzo aplicado mayor a $q_{g,max}$), mientras que la Figura 4b presenta el comportamiento típico de una prueba de módulo controlada por una concentración de esfuerzos inducidos a las puntas de los elementos (a un esfuerzo aplicado mayor a $q_{g,max}$). En cualquier caso el esfuerzo máximo permisible en el tope del elemento ($q_{g,max,curve}$) es el punto máximo de curvatura en la curva de desplazamiento correspondiente al tope del elemento. Una prueba de carga exitosa idealmente resultaría en un $q_{g,max}$ que excede 150% el q_g de diseño, y que además brinda un k_g de mayor rigidez que el de diseño.

El aplicar una carga limitada a dos veces la presión de diseño ejercida por la zapata no confirma la resistencia del elemento. Si en la prueba no se utiliza 150% del esfuerzo de diseño en el tope del elemento, el comportamiento del sistema no será capturado adecuadamente.

Figura 4.
Modulus Test Results Interpretation

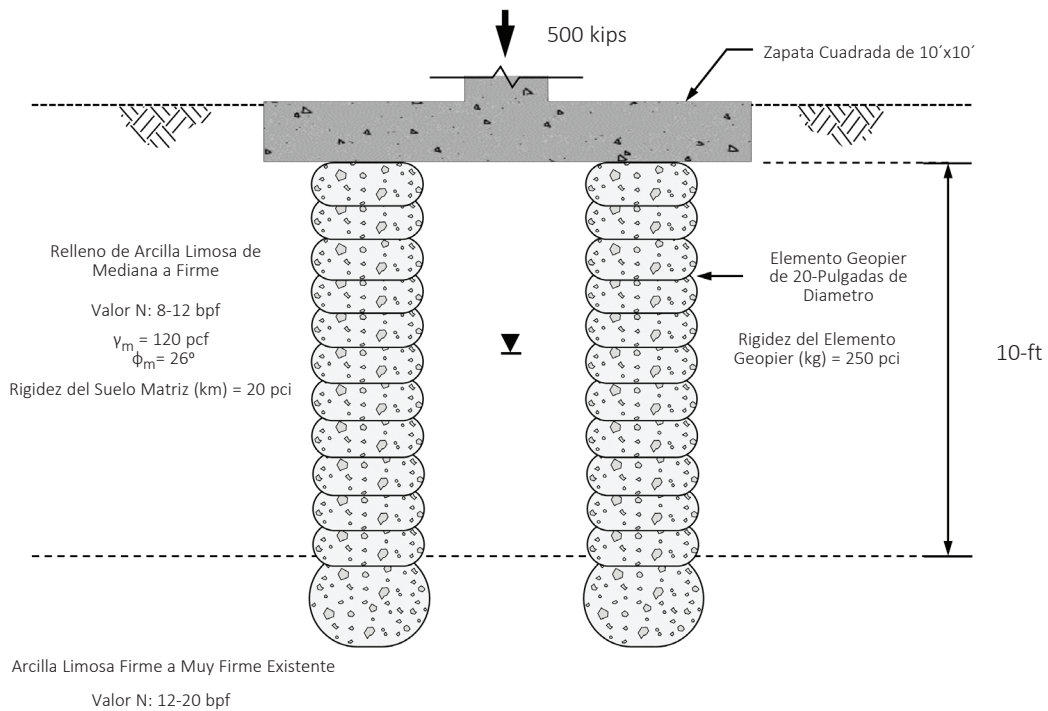


3. CASO REAL: PROYECTO DE SOPORTE DE CIMENTACION – ESTACIONAMIENTO DE DOS PISOS

Se instalaron elementos Geopier de 20-pulgadas de diámetro para soporte de cimentación para una estructura de estacionamiento de dos pisos con cargas máximas de columnas de 500 kips. Se diseñaron zapatas de 10-pies cuadrados para el soporte de las cargas máximas de columnas que resultaron en una presión de zapata aplicada

de 5.0 ksf. El perfil de suelo debajo de la zapatas consistió generalmente de 10 pies aproximados de un relleno de arcilla limosa de consistencia media a firme, subyacente por arcilla limosa de consistencia dura extendiéndose hasta la profundidad máxima explorada. El nivel freático fue encontrado a 5 pies por debajo de la superficie.

Figura 5.
Sección Transversal Idealizada de Cimentación Soportada por Geopier en Flemingsburg, KY, USA



Los elementos Geopier fueron diseñados con un módulo de rigidez de 250 pci y largos de fuste de 10 pies para penetrar completamente el relleno de arcilla limosa de consistencia media y alcanzar la arcilla limosa de consistencia firme a dura, satisfaciendo así, el criterio límite de asentamiento de 1-pulgada. Una rigidez de suelo matriz de

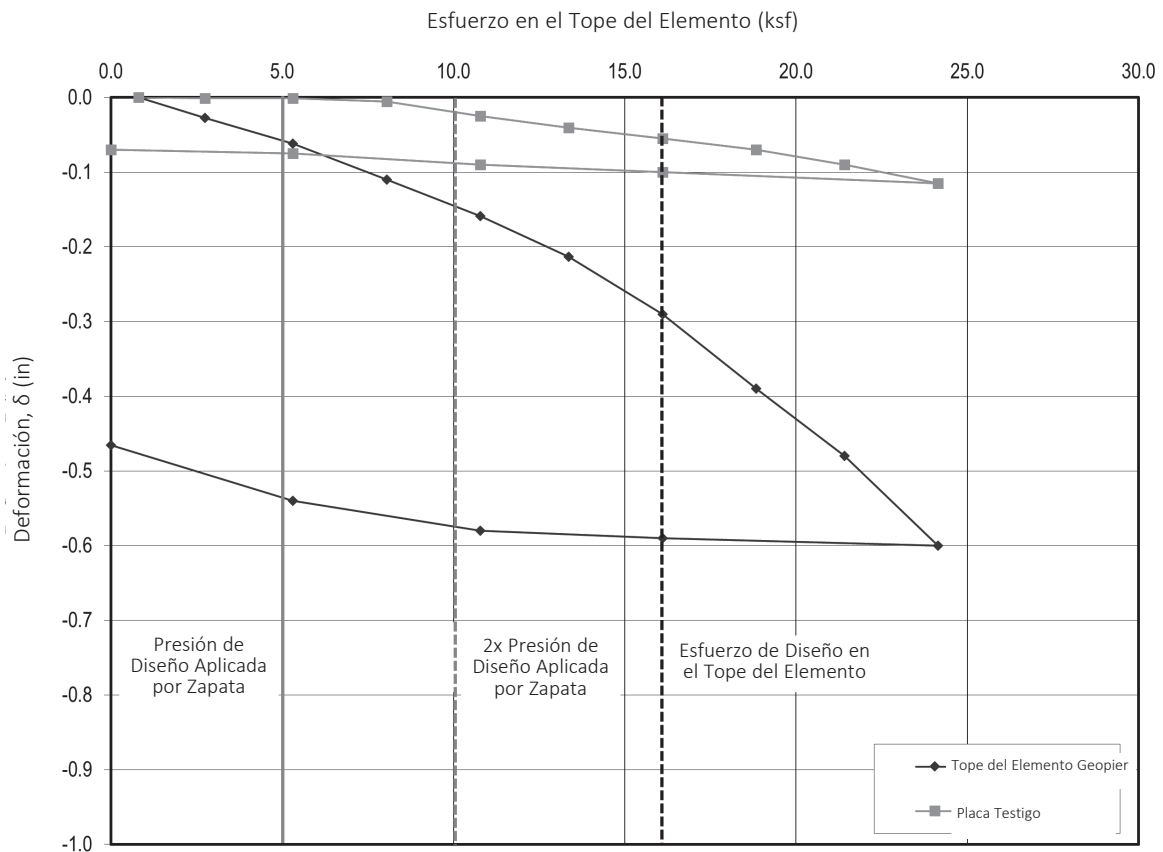
20 pci fue estimada para el relleno de arcilla de consistencia blanda a media, resultando en una razón de rigidez de 12.5. Para un área de reemplazo de 0.25 y un esfuerzo máximo de diseño en el tope del elemento de 16.1 ksf, el asentamiento estimado en la zona superior fue 0.45-pulgadas.

Para la validación de diseño de Geopier, se llevó a cabo una prueba de módulo en un elemento de prueba de 20-pulgadas de diámetro y una longitud de fuste de 10-pies, con un cabezal de concreto de 2-pies de espesor. Una carga máxima de 52.7 kips fue aplicada directamente en el cabezal de concreto, resultando en un esfuerzo máximo aplicado al tope del elemento de 24.2 ksf, el cual es 150% del esfuerzo de diseño Geopier, y aproximadamente 485% de una presión de diseño de zapata de 5 ksf.

Como se puede observar en la Figura 6, la deformación total en el esfuerzo máximo del tope del elemento fue aproximadamente 0.66-pulgadas.

En un esfuerzo de diseño en el tope del elemento de 16.1 ksf, la deformación total fue de 0.29-pulgadas, resultando en un módulo de rigidez Geopier de 386, excediendo el valor de diseño de 250 pci. Estos resultados confirman que el diseño satisface los requerimientos del proyecto en cuanto asentamientos, y provee cierta seguridad en el desempeño de cargas más allá de las anticipadas. Nótese que de haber conducido la prueba hasta una presión de dos veces la presión de diseño (10 ksf), los asentamientos hubiesen sido calculados de una manera poco conservadora e imprecisa por un factor de 2 (0.14-pulgadas vs 0.29 pulgadas).

Figura 6.
Prueba de Módulo de Geopier de 20-pulgadas;
Deformación vs Esfuerzo en el Tope del Elemento



APÉNDICE – ITINERARIO DE PRUEBA DE MÓDULO

Durante la prueba de módulo, dos micrómetros para la placa superior y un micrómetro para cada placa testigo son usados para cuantificar las deformaciones. Los micrómetros deben de tener una precisión de 0.001-pulgadas. Las mediciones promedio obtenidas por medio de los dos micrómetros en la placa son usadas para interpretar el movimiento de la parte superior del elemento, mientras que las mediciones promedio obtenidas por los micrómetros posicionados en las placas testigo son usados para interpretar el movimiento de la punta del elemento.

Las mediciones durante la prueba son obtenidas de acuerdo al itinerario presentado en la Tabla 1. La duración mínima de carga es seguida mientras la deformación sea menos de 0.01-pulgadas por hora (0.0025-pulgadas por 15 min.). El siguiente incremento de carga es aplicado cuando la duración máxima de la carga es alcanzada. El esfuerzo máximo de prueba corresponde a 150% del esfuerzo de diseño en el tope del elemento. Sin embargo, los diseñadores de Geopier pueden decidir llevar a cabo la prueba más allá de 150% del esfuerzo de diseño en el tope del elemento, particularmente para condiciones donde se cuenta con razones de rigideces altos (k_g/k_m). Nótese que ciertas regiones pueden requerir itinerarios de carga diferentes.

Tabla 1.
Itinerario Típico de Prueba de Módulo

Incremento de Carga	Esfuerzo Aplicado (% del Esfuerzo Máximo de Diseño)	Duración Mínima (min)	Duración Máxima (min)
Seating	< 9	N/A	60
1	17	15	60
2	33	15	60
3	50	15	60
4	67	15	60
5	83	15	60
6	100	15	60
7	117	60	240
8	133	15	60
9	150	15	60
10	100	5	N/A
11	66	5	N/A
12	33	5	N/A
13	0	5	N/A

REFERENCIAS

Lawton, E.C., Fox, N.S., 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, Georgia. 121-132

Terzaghi, K., Peck, R.B., and Mesri, G. (1996). Soil Mechanics in Engineering Practice. Third Edition. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY.

RECONOCIMIENTOS

W. Lake Carter, E.I.T.

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

SIMBOLOS UTILIZADOS

A	=	Área Neta de Zapata
A_g	=	Área de Zapata Soportada por Elementos Geopier
A_m	=	Área de Zapata en Contacto con Suelo Matriz
B	=	Ancho de Zapata
c_e	=	Pendiente de Curva Virgen o Recompresión
D	=	Longitud de Bulbo (Igual al Diámetro del Elemento Geopier)
E_{comp}	=	Módulo Elástico Compuesto de la Zona Reforzada con Geopier
E_g	=	Módulo Elástico del Elemento Geopier
E_{LZ}	=	Módulo Elástico de la Zona Inferior No-Reforzada
E_m	=	Módulo Elástico del Suelo Matriz
H_{LZ}	=	Espesor de la Zona Inferior
H_S	=	Longitud de Fuste del Elemento Geopier
$H's$	=	Profundidad de Transferencia de Carga Equivalente
H_{UZ}	=	Espesor de Zona Superior
I_{LZ}	=	Factor de Influencia de Esfuerzos en la Zona Inferior
I_{UZ}	=	Factor de Influencia de Esfuerzos en la Zona Superior
k_g	=	Módulo de Rigidez del Elemento Geopier
k_m	=	Módulo de Rigidez del Suelo Matriz
P_0	=	Presión Efectiva Inicial
P_f	=	Presión Efectiva Final Después de Zapata
q	=	Presión Promedio Aplicada por Zapata
Q	=	Carga Total Descendiente Actuante en Zapata
Q_g	=	Carga Total Ascendente Resistida por Elementos Geopier
q_g	=	Esfuerzo Vertical Aplicado al Tope del Elemento Geopier (Esfuerzo en el Tope del Elemento)
Q_m	=	Carga Total Ascendente Resistida por el Suelo Matriz
q_m	=	Esfuerzo Vertical Aplicado al Suelo Matriz
R_a	=	Razón de Área de Reemplazo (A_g/A)
R_S	=	Razón de Rigidez (k_g/k_m)
S_{LZ}	=	Asentamiento en Zona Inferior
S_{TOT}	=	Asentamiento Total de Zapata
S_{UZ}	=	Asentamiento en Zona Superior
γ_m	=	Peso Unitario del Suelo
δ_{top}	=	Deformación en el Tope del Elemento
δ_{TT}	=	Deformación en la Placa Testigo
ϕ_m	=	Ángulo de Fricción Interna del Suelo Matriz

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 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®
Tensor.

©2016 Geopier Foundation Company, Inc. 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_12_04.16