BOLETÍN TÉCNICO NO. 10

CONSIDERACIONES DE DISEÑO ESTRUCTURAL PARA LOSAS DE PISO CON CARGA UNIFORME SOPORTADAS POR ELEMENTOS DE AGREGADO APISONADO GEOPIER

Éste Boletín Técnico discute el análisis estructural de losas de piso uniformemente cargadas soportadas por Elementos de Agregado Apisonado Geopier para el refuerzo de suelos. Los elementos Geopier son comúnmente usados para el apoyo de losas de piso de concreto, eliminando la necesidad de losas estructurales soportadas en cimentaciones profundas o excavaciones y recompactaciones masivas requeridas para la construcción de losas sobre la superficie de terreno. Los elementos Geopier reducen los asentamientos totales y diferenciales debido a sus características de alta resistencia y rigidez. Sin embargo, debido a la variación de rigideces entre el elemento Geopier y el suelo matriz ya no es válido asumir que el soporte de la superficie es uniforme. La disimilitud de condiciones en el soporte de losa, debido la alta rigidez donde se localizan los Geopiers y relativamente baja rigidez entre los Geopiers, induce al desarrollo de momentos flexionantes y esfuerzos cortantes dentro de las losas bajo las cargas aplicadas.

Este Boletín Técnico describe el resultado de una serie de análisis de elementos finitos conducidos para cuantificar las condiciones de momento flexionante y esfuerzo cortante que se desarrollan en losas relativamente delgadas soportadas por elementos Geopier. Este boletín provee gráficas de diseño que pueden ser usadas para estimar el espesor de concreto requerido para losas en condiciones de carga distribuida uniformemente soportadas por elementos Geopier. Sin embargo, las gráficas deben de ser usadas con criterio debido a que el análisis de carga distribuida uniformemente puede no capturar el caso de condición crítica de carga para el diseño de la losa.

1. TRASFONDO: DISEÑO Y OPCIONES DE CONSTRUCCIÓN

Para la mayoría de los edificios, las losas de piso son típicamente diseñadas usando prácticas empíricas estandarizadas que requieren poco esfuerzo ingenieril y que resultan en secciones de losa relativamente delgadas y costo-efectivas. Métodos analíticos que usan nomografías están disponibles para los diseñadores para tomar en cuenta condiciones de carga no-uniformes como las cargas inducidas por llantas de vehículos o por soportes de estantes de almacenaje. Ambos métodos, empírico y analítico, asumen rigideces uniformes en el suelo subyacente, el cual es representado como resortes elásticos (Figura 1a.), comúnmente conocido como modelo de Winkler. Usando los métodos mencionados por la Asociación de Cemento Portland entre otras, el diseño de losas de piso incluye la aplicación simulada de cargas a la losa para evaluar los esfuerzos cortantes y momentos flexionantes calculados. Los diseños resultantes pueden incluir losas construidas simplemente de concreto y concreto reforzado con varilla convencional o acero post-tensado. El diseño se basa típicamente en una sección sin juntas y se enfoca en limitar los esfuerzos a tensión en el concreto a un valor mucho menor del módulo de ruptura del concreto o del esfuerzo flexionante de

GEOPIER®
Tensar.

agrietamiento. El módulo de ruptura del concreto (f_r) es normalmente tomado como:

$$f_r = 9\sqrt{f'_c} \qquad \text{Ec. 1.}$$

Donde f'_c es la resistencia a la compresión del concreto (psi). Un factor de 1.7 es normalmente usado en el diseño de losas de piso. Las losas de piso convencionales generalmente presentan de cuatro a seis-pulgadas de espesor y su costo de construcción es relativamente bajo.

Cuando las losas de piso son posicionadas en rellenos no controlados, suelos orgánicos, y otros materiales compresibles, y el asentamiento excesivo es inadmisible, las opciones de diseño para la losa usualmente consiste en una de las siguientes tres opciones:

1. Mantener la filosofía de diseño de la losa de piso relativamente delgada, solo si el suelo inapropiado es excavado y recompactado o remplazado con material más competente (Figura 1b). Las losas de piso son después analizadas con el método de balasto de Winkler previamente mencionado, que resulta en secciones de losa comparables con aquellas para suelos apropiados. El costo adicional que representa esta opción es relacionado al costo del movimiento de tierras, costos que pueden rápidamente convertirse en limitantes en sitios con sobreexcavaciones profundas, suelos contaminados, nivel freático superficial, o cuando estructuras adyacentes tienen que ser protegidas o reforzadas desde sus cimientos.

2. Instalar pilotes o pilas de concreto para soportar una losa estructural (por ejemplo una losa que es estructuralmente diseñada y reforzada para tener claros entre las cimentaciones profundas instaladas). Una losa estructural soportada por pilotes (Figura 1c.) puede costar por sí sola, tanto como la opción de sobreexcavación y reemplazo. Debido a la alta relación de rigidez entre las pilas y el suelo natural, es asumido que las pilas resisten la carga completa de la losa y que la losa debe de ser estructuralmente capaz de soportar claros entre los apoyos de pilotes. En este caso, la rigidez y el soporte del suelo entre las pilas es completamente ignorado en el análisis.

3. Instalar Elementos de Agregado Compactado Geopier para el refuerzo de suelos compresibles y permitir la construcción de una losa de piso relativamente delgada (Figura 1d). Los elementos Geopier son instalados para reforzar los suelos pobres a un espaciamiento de elementos de un rango entre 8 y 15 pies (2.4 - 4.5 m) centro a centro. Debido a que los elementos Geopier presentan mayor rigidez que el suelo adyacente, atraen las cargas de la losa formando una condición de soporte no-uniforme. De igual manera que las losas estructurales soportadas por pilotes o pilas, las losas de piso deben de ser diseñadas para resistir esfuerzos de corte y momentos a flexión que se desarrollan mientras las cargas aplicadas intentan abrirse a los soportes de mayor rigidez. Sin embargo, estos esfuerzos son significativamente menores a aquellos para losas estructurales soportadas por pilotes o pilas debido a la relación de rigidez reducida.

Este Boletín Técnico se enfoca en la metodología de diseño para la opción de elementos Geopier. La construcción de elementos de refuerzo Geopier está bien descrita en la literatura (Lawton y Fox 1994, Fox y Cowell 1998, Wissmann et al. 2000). El uso de una acción de apisonamiento vertical sobre capas delgadas de agregado, constituye un proceso único que resulta en elementos de alta resistencia y rigidez (Wissmann et al. 2000).

La técnica de elementos Geopier resulta en una subyacente de rigidez distribuida de manera no-uniforme: alta rigidez en los elementos Geopier y baja rigidez en las áreas soportadas por el suelo matriz entre los elementos Geopier. Por lo tanto, la losa experimenta demandas de esfuerzos cortantes y de momentos de flexión entre aquellas experimentadas por una losa estructural y una losa de piso sobre la superficie. Análisis de elementos finitos pueden ser usados para calcular los esfuerzos de flexión y de corte originados en la losa. Las variables de diseño usadas en el análisis de elementos finitos incluyen el área de una carga uniformemente distribuida, la resistencia a la compresión del concreto, la rigidez de los elementos Geopier, la rigidez del suelo, el espaciamiento de los elementos Geopier, y el espesor de la losa.

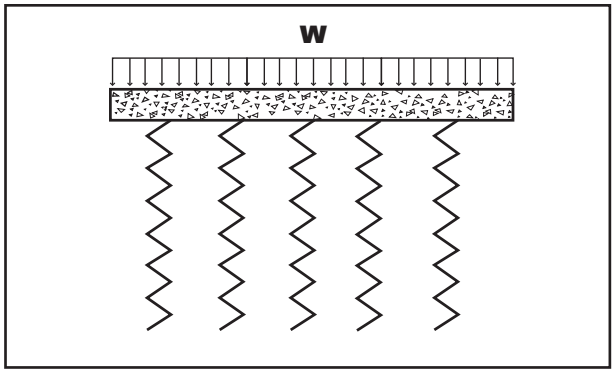


Figura 1a.
Método de Wrinkler

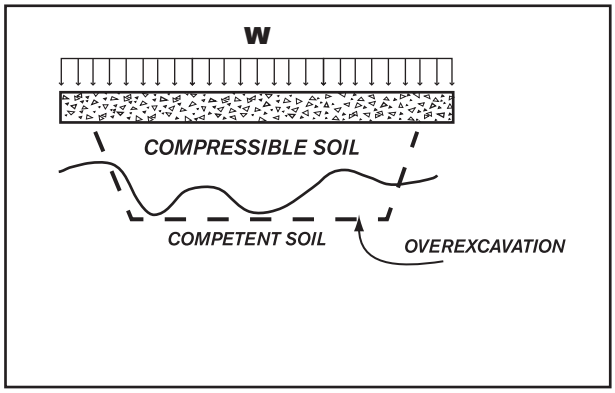


Figura 1b.
Retiro y Reemplazo de
Suelos Compresibles

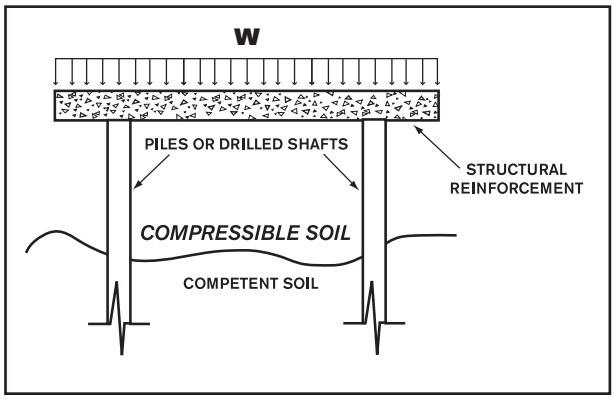


Figura 1c.
Losa Soportada por Pilotes

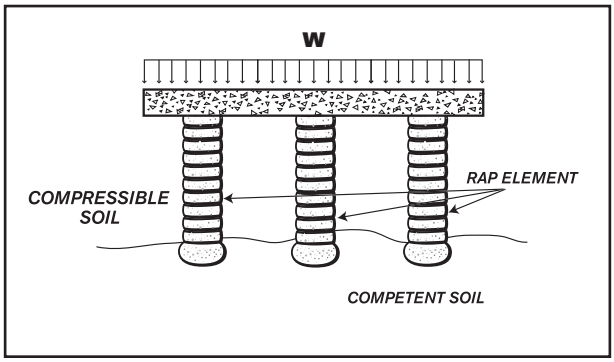


Figura 1d.
Losa Soportada por
Elementos Geopier

2. ÁNALISIS NUMÉRICO

Para entender el desarrollo de esfuerzos cortantes y momentos flexionantes en losas de piso soportadas por elementos Geopier, un grupo de análisis de elementos finitos fue llevado a cabo por los ingenieros estructurales de KPFF, John P. Miller, P.E., S.E., y Jason N. Richards, P.E., S.E. Los análisis consideraron el comportamiento de una losa a condiciones de carga distribuida uniformemente, tomando en cuenta el soporte mediante el uso de resortes rígidos en las localizaciones de elementos Geopier y utilizando resortes blandos para representar el suelo matriz entre los elementos. Los análisis fueron llevados a cabo con las siguientes variables:

- Carga de presión aplicada uniformemente a la losa de pisto (w, expresada en psf),
- Resistencia a la compresión del concreto (f'c, expresado en psi) y características de rigidez correspondientes,
- Rigidez de resorte de los elementos Geopier (k_g, expresada en psi/in),
- Rigidez de resorte de suelo matriz (k_m, expresada en psi/in),
- Espaciamiento de elementos Geopier (L, expresada en pies),
- Espesor de losa de piso (t, expresada en pulgadas).

Los resultados de cada análisis fueron usados para comparar los esfuerzos en tensión calculados en las fibras inferiores contra los valores permisibles para establecer el valor permisible de la presión aplicada a la losa para la geometría y condiciones de resortes de soporte modelados. Estos resultados fueron usados para evaluar la carga máxima permisible uniformemente aplicada (previo al desarrollo de los esfuerzos a tensión límite del concreto) para cada valor de espesor de losa normalizado (t/L). Para simplificar, los análisis ignoraron los esfuerzos inducidos por contracción del concreto y deformaciones de losa, factores que se piensan son mitigados mediante el uso de juntas como se describe en la sección 3.

2.1 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

La Figura 2 muestra un arreglo típico para un edificio con soporte de cimentaciones y losa mediante el uso de elementos Geopier. Los elementos son espaciados equidistantes entre las columnas con un espaciamiento determinado en base a las características del suelo matriz, carga en losa de piso, espesor de la losa de piso, y el espaciamiento de las juntas constructivas de la losa. Los elementos son comúnmente localizados directamente por debajo de las juntas constructivas donde la junta pueda transferir esfuerzos cortantes más no momentos a flexión. El área sombreada mostrada en la Figura 2 indica la extensión del modelo de elementos finitos usado en este estudio, adherido por dos lados a las juntas de la losa y en los lados opuestos por líneas de simetría

El software RAM Concept (RAM International 2005) fue usado para el desarrollo de las simulaciones de elementos finitos. Para modelar el comportamiento de la losa, se modelaron elementos de caparazón híbridos que pudieran acomodar esfuerzos cortantes y axiales dentro del plano, así como esfuerzos cortantes y momentos flexionantes hacia afuera del plano. Un concreto con resistencia a la compresión (f'_c) de 4000 psi (27.6 MPa) a 28 días, fue usado en el análisis. El espaciamiento de los elementos Geopier fue variado desde 8 pies (2.4-5 m) hasta 16 pies centro a centro en incrementos de dos pies. La Figura 3 presenta la malla de elementos finitos usada para este modelo.

Figura 2.
Planta Típica de Edificio

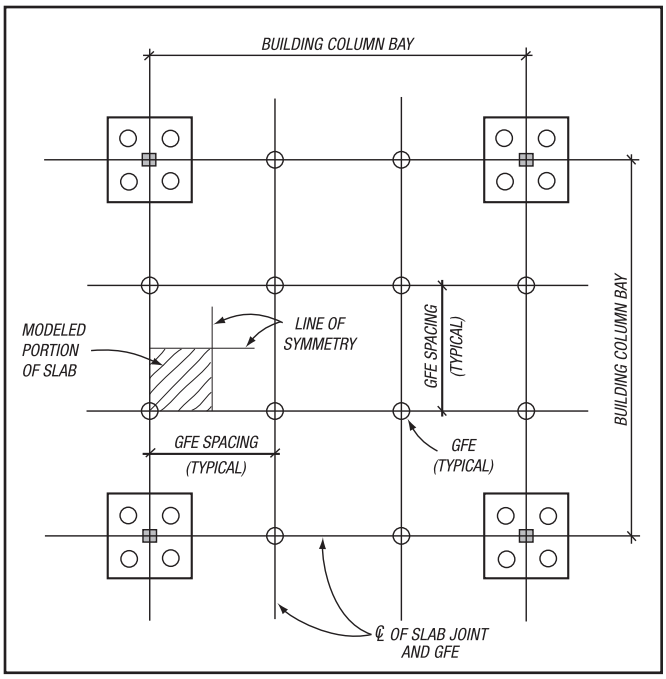
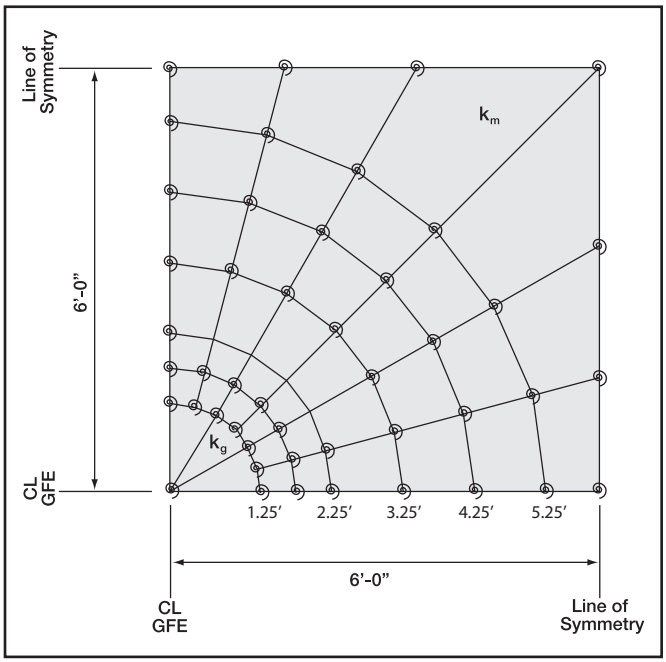


Figura 3.
Malla de Elementos Finitos
Usada en el Análisis



2.2 SOPORTE DE SUBRAZANTE

Para la representación del soporte de la subrazante, se usaron resortes elástico-lineares, mientras que resortes rígidos (k_g) fueron usados para representar los elementos Geopier de 30 pulgadas (0.76 m) de diámetro. Así mismo, resortes relativamente blandos fueron usados para representar la respuesta del suelo matriz sin mejoramiento. Se utilizó una constante de resorte de rigidez de elemento Geopier (k_g) de 150 pci (41 MN/M^3) y unos valores en el rango de 5 a 30 pci (1.4 - 8 MN/M^3) correspondientes al suelo matriz (k_m) La razón de la constante de resorte es denotada por la razón de rigidez ($R_s = \frac{k_g}{k_m}$) y es un factor clave determinante en el desarrollo de los esfuerzos flexionantes de la losa (por ejemplo, una relación de rigidez infinita resultaría en el diseño de una losa estructural como la presentada en la Figura 1c; una razón de rigidez de uno resultaría en una losa de piso convencional como la presentada en la Figura 1a). La Tabla 1 presenta las constantes de rigidez y las razones de rigidez usadas en este estudio.

La instalación de los elementos Geopier incrementa los esfuerzos laterales en el suelo matriz lo cual resulta en características de rigidez mejoradas (Handy 2001). El mejoramiento de suelo resulta en una transición de la alta rigidez de los elementos a la estructura del suelo matriz. La función de transición de rigidez que fue usada en los análisis fue tomada de los resultados de pruebas de carga de placa conducidas por investigadores de la Universidad Estatal de Iowa (White 2004).

Tabla 1.
Rango de Parámetro de Valores
Considerados en este Estudio

Parámetro	Valores Considerados en Este Estudio
Espaciamiento Centro a Centro de Geopier (ft)	8, 10, 12, 14, y 16
Rigidez de Geopier, k_g (pci)	150
Razón de Rigidez, $R_s = \frac{k_g}{k_m}$	5, 10, y 20
Espesor de Losa, t (in)	4, 6, 8, y 10

3. RESULTADOS

Las Figuras 4 a 6 presentan los resultados de las simulaciones numéricas para los 60 grupos de geometría, soporte de subrazante, y condiciones de carga uniforme presentadas en la Tabla 1. Las figuras presentan contornos de razones de espesor (t/L) normalizados requeridos por las demandas de esfuerzos límite impuestas por las presiones de losa normalizadas (w/f'_c) dentro de los valores permisibles. Los contornos mostrados en las figuras fueron desarrollados para un espaciamiento de elementos que varió de 8 a 16 pies (2.4 - 5 m)centro a centro. El espesor de losa requerido para las varias aplicaciones de presión uniforme en la losa puede ser estimado usando el siguiente procedimiento:

1. Establecer la razón de rigidez apropiada entre los elementos Geopier y el suelo matriz para el sitio de proyecto. El módulo de rigidez del elemento Geopier (k_g) es típicamente verificado con una

1. prueba de módulo realizada en campo, conducida de acuerdo a los procedimientos descritos por Fox y Cowell (1998). El módulo de rigidez del suelo matriz (k_m) es obtenido calculando el asentamiento del suelo no-reforzado en respuesta a la presión de losa, donde k_m es la razón de presión aplicada para una deformación calculada. Nótese que los valores k_m calculados por este procedimiento pueden resultar en valores significativamente menores a los valores recomendados usualmente en la literatura para losas de piso con carga uniforme sujetas a cargas puntuales en movimiento.

2. Establecer el valor del parámetro de carga normalizado (w/f'_c) para el proyecto. Incluir el peso de la losa cuando se determina la presión de la misma, w.

3. Seleccionar un espaciamiento para los elementos Geopier.

4. Para el parámetro de carga normalizado calculado (w/f'_c) y para el espaciamiento de elementos seleccionado (L), se usan las Figuras 4 a 6, apropiadamente, para encontrar el espesor de losa normalizado requerido (t/L). Si el valor de w/f'_c resulta en una solución graficada a la izquierda de la línea punteada mostrada en las figuras, se debe usar un espesor de losa mínimo de 4 pulgadas.

5. Estimar el espesor de losa requerido en pulgadas para resistir apropiadamente los esfuerzos a tensión inducidos, multiplicando el espesor de losa normalizado (t/L) por el espaciamiento centro a centro (L) de los elementos.

Cuando se usan las gráficas de diseño mostradas en las Figuras 4 a 6, se debe reconocer que los resultados de los análisis numéricos están sujetos a limitaciones. Los valores de esfuerzos a tensión calculados en la losa a nivel de piso son desarrollados únicamente para condiciones de carga uniforme; otras condiciones de patrones de carga, tales como cargas puntuales concentradas, cargas lineales, o cargas intercaladas, resultará en valores de esfuerzos diferentes que pueden ser más críticos para un desempeño aceptable de la losa. Las losas de piso modeladas incluyen una junta de construcción ubicada en el tope de los elementos, la cual no pude transmitir momentos a flexión. Las losas de piso con juntas de construcción en diferentes orientaciones deben de ser evaluadas de forma separada. Los modelos también excluyen la presencia de relleno controlado existente entre el tope de los elementos y el fondo de losas de piso, lo cual mejora la uniformidad en las características de soporte de losa. Los análisis están basados en condiciones de soporte de subrazante para Elementos de Agregado Apisonado Geopier. Estos resultados no deben de ser extrapolados a otro tipo de mejoramiento de suelo debido a las variaciones de razones de rigidez y en las diferencias de rigideces radiales en el suelo matriz resultante de diferencias en los procesos de instalación.

Figura 4.
Espesor Normalizado Requerido para Razón de Rigidez de 5 (k_g /k_m) of 5

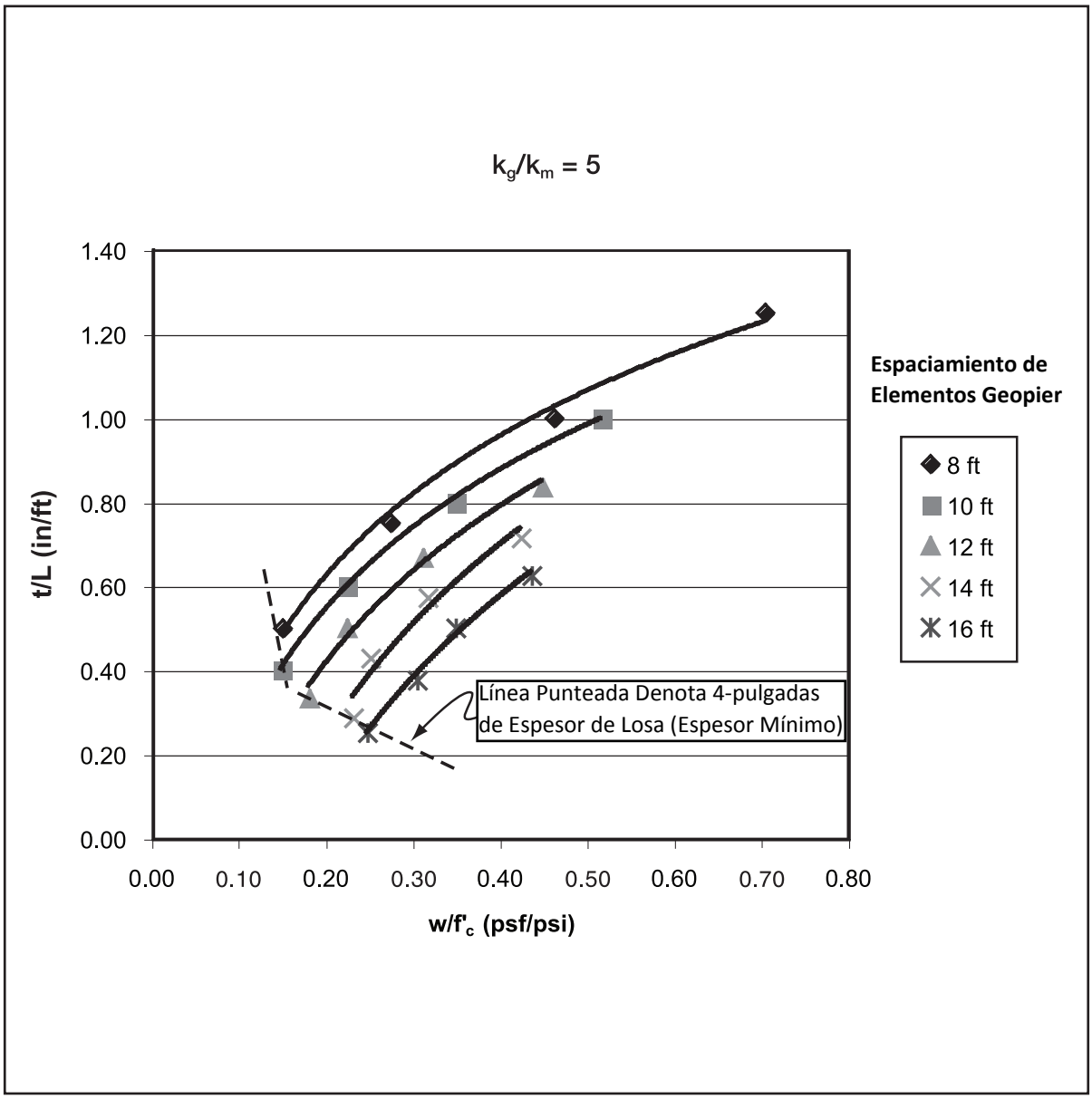


Figura 5.
Espesor Normalizado Requerido para Razón de Rigidez (k_g /k_m) de 10

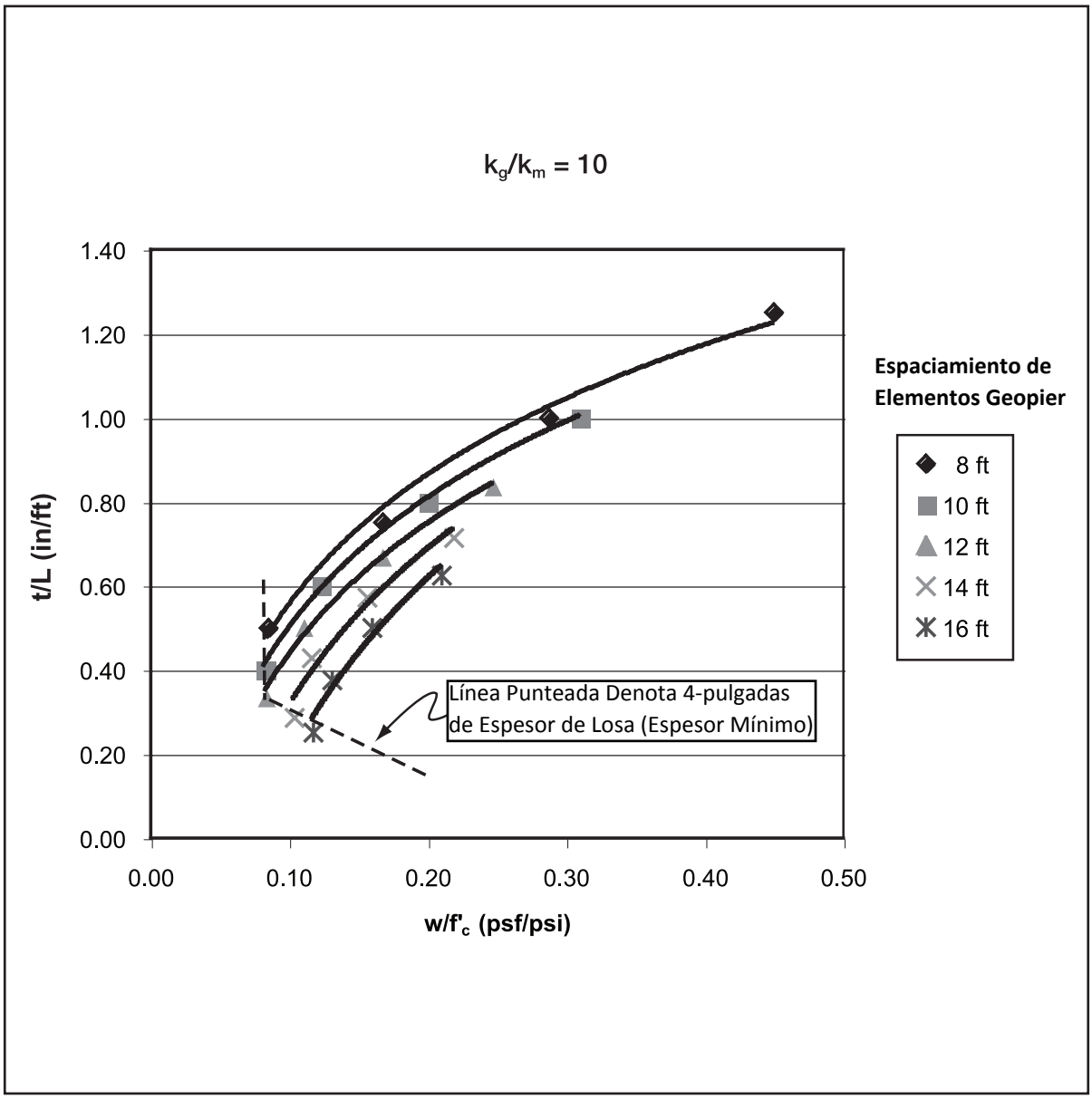
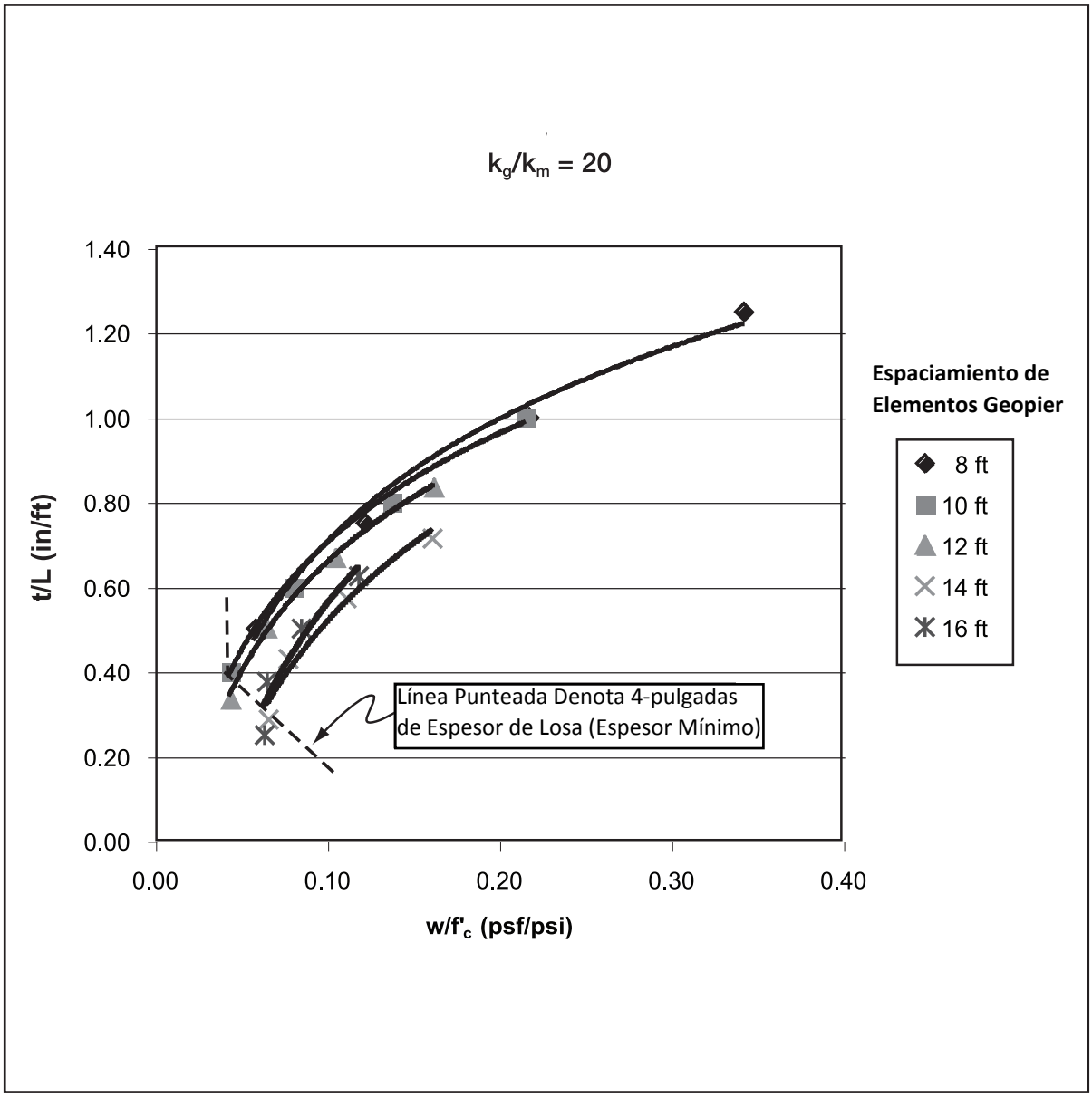


Figura 6.
Espesor Normalizado Requerido para Razón de Rigidez (k_g /k_m) de 20



4. CONCLUSIÓN

Los Elementos de Agregado Apisonado Geopier son usados comúnmente para el soporte de losas sobre terreno hechas de concreto y de un espesor relativamente delgado que soportan cargas de ligeras a pesadas. El diseño de las losas de piso debe considerar las condiciones de soporte no-uniforme, ofrecidas por el elemento rígido Geopier, contrastando con la matriz de suelo relativamente blanda, encontrada entre los elementos. Estas condiciones de soporte no-uniforme pueden ser estudiadas usando análisis numéricos estructurales desarrollados para calcular la respuesta de losas de piso de concreto cargadas uniformemente y soportadas por elementos Geopier con valores variables de razones de rigidez del elemento al suelo matriz, y tomando en cuenta los rangos de presión aplicada a la losa para cargas uniformes presentados en las Figuras 4 a 6. Estos resultados proveen espesores de losa (t), estimados que puedan resistir las presiones aplicadas sin desarrollar esfuerzos a tensión que excedan la capacidad permisible. Las soluciones de diseño de las gráficas presentadas son únicamente para condiciones de carga uniforme; los análisis para un proyecto en específico deben ser desarrollados de acuerdo a las condiciones de carga correspondientes.

AUTORES

Jason Richards, KPFF

John Miller, P.E., S.E., Principal, KPFF

Kord J. Wissmann, Ph.D., P.E., President/Chief Engineer, Geopier Foundation Company, Inc.

REFERENCIAS

Fox, N.S. and M.J. Cowell, 1998. “Geopier Soil Reinforcement Manual.” Geopier Foundation Company, Blacksburg, Virginia.

Handy, R.L. 2001. “Does Lateral Stress Really Influence Settlement?” ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. July.

Lawton, E.C. and N.S. Fox 1994. “Settlement of Structures Supported on Marginal or Inadequate Soils Stiffened with Short Aggregate Piers.” Proceedings, Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments. College Station, TX. June 16-18.

RAM International 2005. “RAM Concept Analysis Software”, a trademark of RAM International, Copyright 2005, Structural Concrete Software, Inc.

White, D.J. 2004. “Subgrade Ramp Function.” Letter to Geopier Foundation Company describing results of plate load tests data. October 19.

Wissmann, K.J., N.S. Fox, and J.P. Martin, 2000. “Rammed Aggregate Piers Defeat 75-foot Long Driven Piles.” Proceedings, Performance Confirmation of Constructed Geotechnical Facilities. ASCE Special Publication No. 194. Amherst, MA. April 9-12.

RECONOCIMIENTOS

Greg Gear, P.E.

Rimas Veitas, P.E.

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 informacion, 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®
Tensar.

©2017 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_10_11.17