

BOLETÍN TÉCNICO NO. 10

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

Este 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 a 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

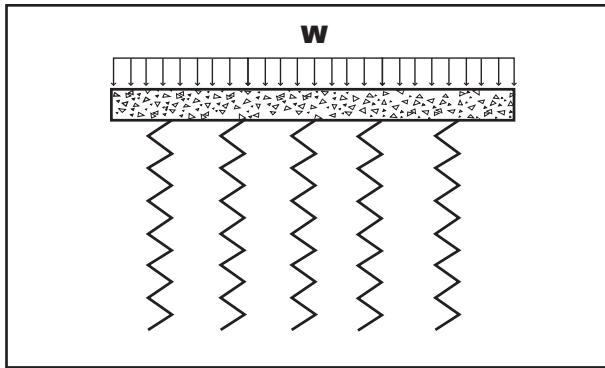


Figura 1a.
Método de Winkler

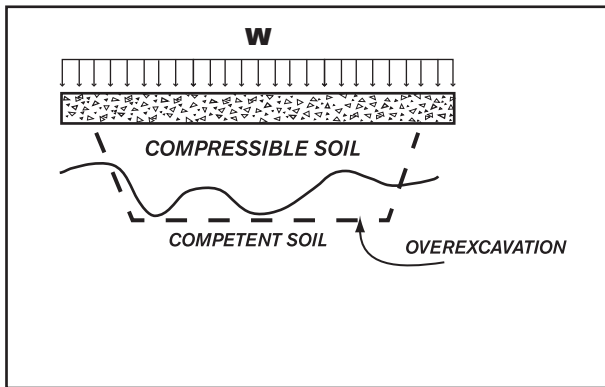


Figura 1b.
Retiro y Reemplazo de
Suelos Compresibles

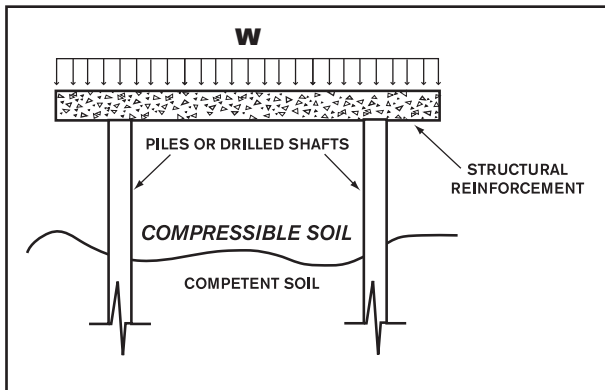


Figura 1c.
Losa Soportada por Pilotes

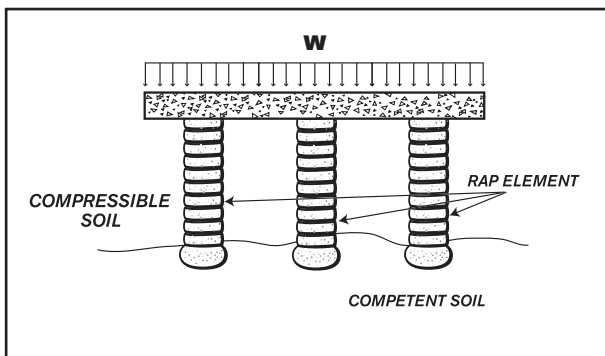


Figura 1d.
Losa Soportada por
Elementos Geopier

2. ANÁLISIS 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 piso (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

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 2015) 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 ser 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 a 28 días, fue usado en el análisis. El espaciamiento de los elementos Geopier fue variado desde 8 pies 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

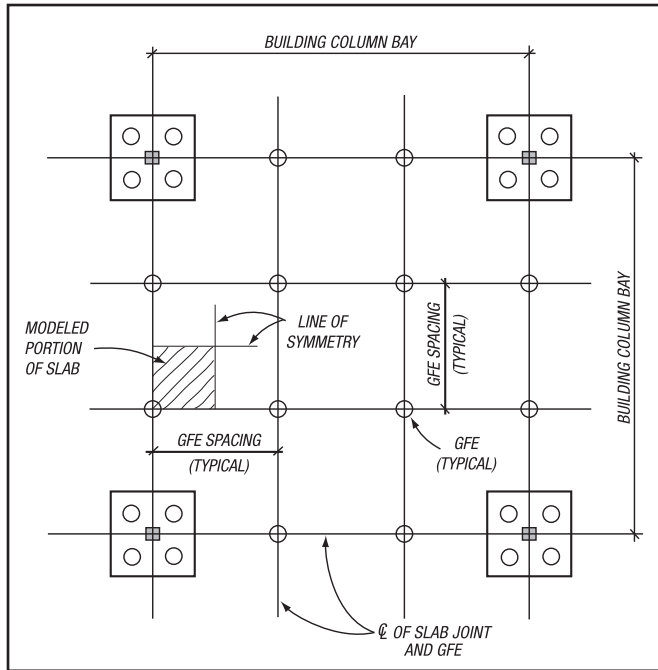
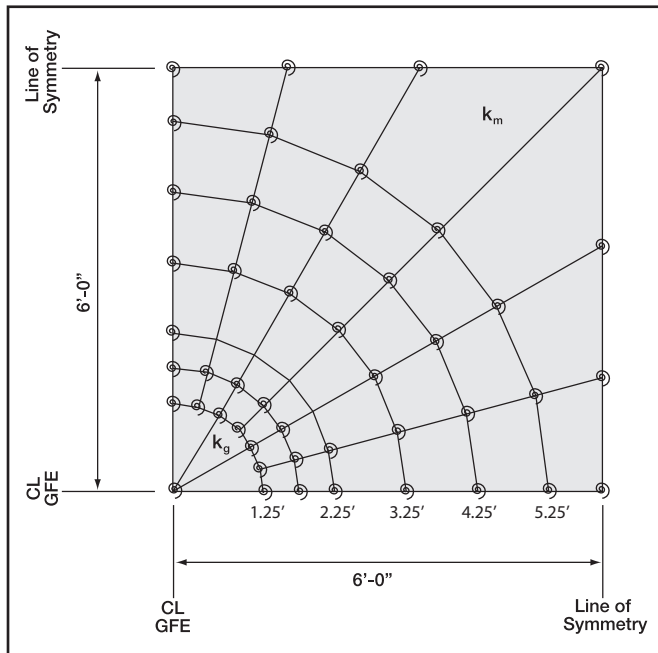


Figura 3.
Malla de Elementos Finitos Usada en el Análisis



2.2 SOPORTE DE SUBRAZANTE

Para la representación del soporte de la subrazante, se usaron resortes elástico-lineales, mientras que resortes rígidos (k_g) fueron usados para representar los elementos Geopier de 30 pulgadas de diámetro. Así mismo, resortes relativamente blandos fueron usados para la representación de la respuesta del suelo matriz sin mejoramiento. Se utilizó una constante de resorte de rigidez de elemento Geopier (k_g) de 150 pci y unos valores en el rango de 5 a 30 pci 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 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 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

prueba de módulo realizada en campo, conducida de acuerdo a los procedimientos descritos por Fox y Cowell (1988). 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 puede 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 subrasante 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

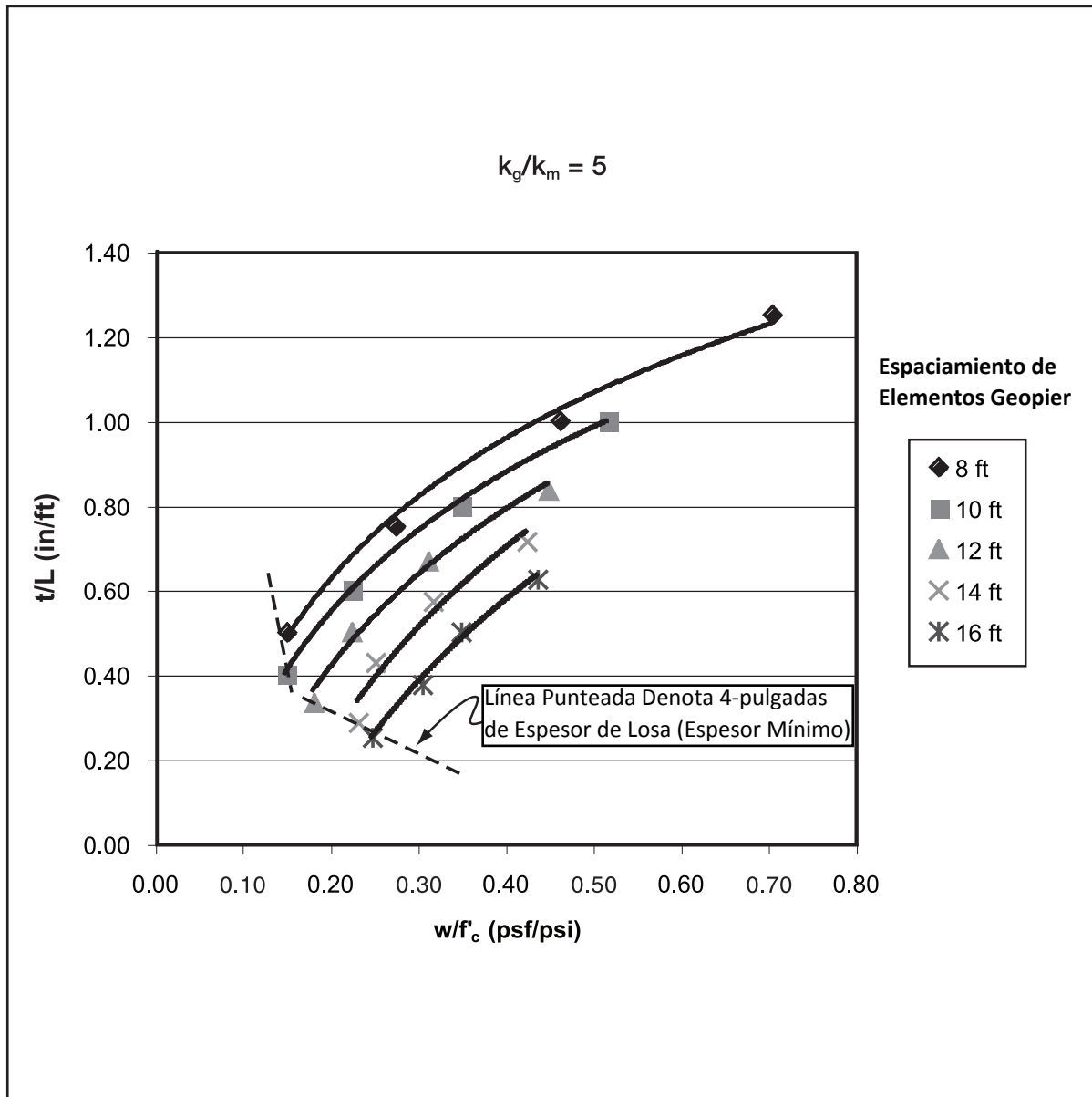


Figura 5.
Espesor Normalizado Requerido para Razón de Rigidez (k_g/k_m) de 10

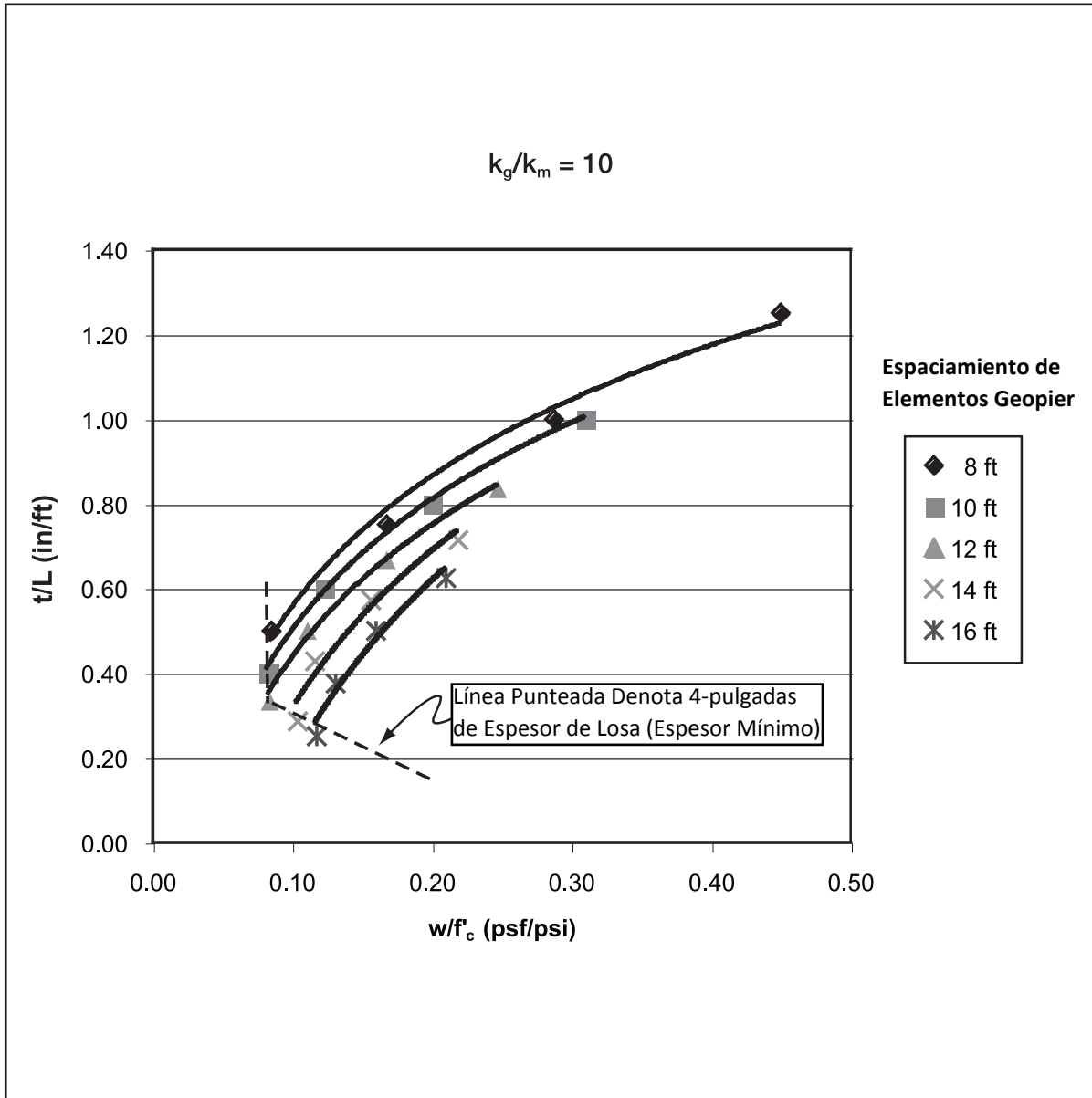


Figura 6.
Espesor Normalizado Requerido para Razón de Rigidez (k_g/k_m) de 20

