

RELLENOS GRANULARES REFORZADOS CON GEOTEXILES Y APOYADOS SOBRE PILOTES

Ing. Leoni Augusto José*

Ing. Viscardi Juan Martín**

1.- INTRODUCCIÓN

Este trabajo es la continuación de nuestras primeras conclusiones, que dieron como resultado la publicación del trabajo denominado:

“ENSAYOS SOBRE MODELOS REDUCIDOS DE RELLENOS GRANULARES APOYADOS SOBRE PILOTES” Publicado en el XV Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, en octubre de 2000, en la Ciudad de Buenos Aires.

Es muy común que en distintos proyectos de ingeniería, se nos presenten casos en los que tenemos que atravesar con estructuras de vías de comunicación, distintas zonas conformadas por suelos de baja capacidad portante, que nos obligan a pensar en proyectos de estructuras rígidas (puentes, viaductos, etc) ya que la solución con terraplenes, se vería perjudicada por los asentamientos que experimentarían los suelos durante un tiempo considerable de la vida útil de la obra, que obligarían a costosos y molestos trabajos de mantenimientos.

En el presente trabajo se presentan los resultados obtenidos en ensayos ejecutados sobre modelos de laboratorio, conformados por rellenos granulares reforzados con geogrillas, apoyados sobre pilotes que atraviesan mantos de suelos compresibles.

En todos los casos, se realizaron ensayos que guardan una relación entre el espesor del relleno granular y la distancia entre centros de los pilotes que resulta menor a la unidad y que hemos clasificado como rellenos de pequeño espesor.

El uso de una geogrilla como refuerzo de los rellenos granulares, en los casos en que la capacidad portante de los suelos subyacentes sea muy baja, es una práctica habitual y muy difundida, ya que, por sus características, nos permite además de una rápida colocación, lograr un refuerzo mecánico importante en el esquema de rotura que se genera debido a la transmisión de cargas que esta efectúa hacia los pilotes, logrando así, disminuir las tensiones que actuarán sobre el terreno compresible y contar además con el uso de un material cuyo comportamiento es neutro desde el punto de vista del estudio del medio ambiente.

2.- EL MODELO UTILIZADO

2.1. Marco de cargas

El modelo ideado se puede observar en el esquema que se indica en la figura N°1, y en la foto adjunta, el mismo consta de un marco de carga rígido, capaz de generar una carga uniformemente repartida.

En la parte intermedia de este marco de carga, se ubica una plancha rígida de acero que hace las veces del manto rígido donde se apoya el material compresible, conformado por una plancha de poliestireno expandido.

* Director del laboratorio de Mecánica de Suelos Facultad de Ingeniería U.N.L.P.

** Becario del Laboratorio de Mecánica de Suelos Facultad de Ingeniería U.N.L.P.

Atravesando esta plancha de poliestireno expandido y apoyándose en la plancha metálica intermedia se ubican varillas de acero de 2 cm de diámetro que simulan los pilotes en este esquema .

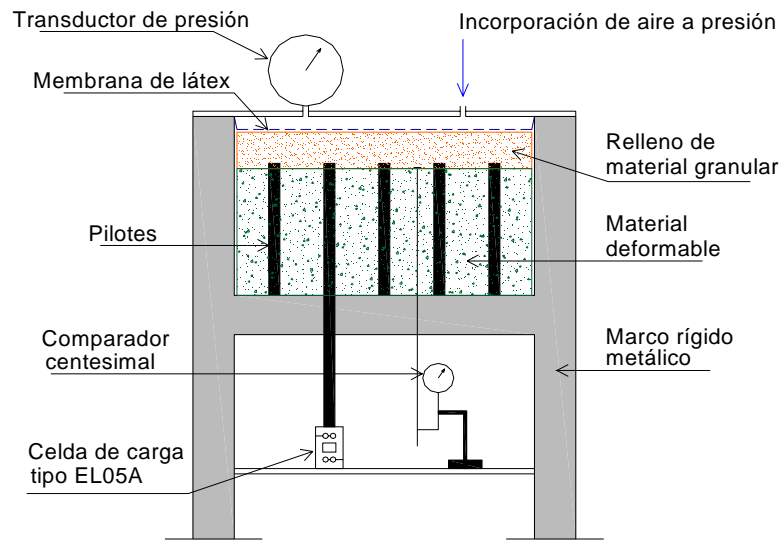


Foto y Figura N °1: Esquema y foto del marco de carga utilizado

2.2. Dispositivos de medición del modelo

Por encima del relleno compactado de arena se coloca una manta de látex y sobre ella una tapa rígida metálica fijada con bulones al marco de carga, que con burletes especiales asegura la hermeticidad.

A los efectos de lograr la carga uniformemente distribuida, entre la tapa y la membrana de látex se inyecta aire a presión, generando así la carga sobre el relleno de arena.

Para medir los esfuerzos sobre los pilotes se permite que tres (3) pilotes del total, se apoyen sobre celdas electrónicas de carga que se apoyan en una bandeja metálica inferior, tal como se muestra en la figura y en la foto N° 1.

Finalmente para obtener el parámetro correspondiente a las deformaciones del manto compresible, se insertan varillas de acero muy delgadas (4 mm de diámetro) que se apoyan en la parte superior de la plancha de poliestireno y que la atraviesan, y se conectan en la parte inferior con comparadores centesimales.

3.- USO DEL POLIESTIRENO EXPANDIDO EN ENSAYOS DE MODELO

El material utilizado para simular un suelo compresible, fue una plancha de poliestireno expandido con una densidad de 15 kg/m^3 que mantiene inalterados (dentro de un entorno aceptable) sus parámetros de tensión – deformación.

Los resultados obtenidos de un número importante de ensayos realizados en nuestro laboratorio y que incluyeron ensayos de compresión simple sobre probetas cúbicas y cilíndricas, complementados con ensayos de platos de carga con distintos tamaños, son los siguientes:

$$\gamma = 15 \text{ kg/m}^3$$

$$E = 20 \text{ kg/cm}^2$$

$$K_t = 1,5 E / B \text{ kg/cm}^3 \text{ (Coeficiente de balasto del poliestireno expandido)}$$

Se puede observar que estos parámetros, varían dentro del entorno de valores comparables a los que podrían obtenerse en ensayos sobre suelos blandos compresibles.

4.- USO DE GEOGRILLA COMO REFUERZO EN LOS ENSAYOS EN MODELO

Los geotextiles son usados en la ingeniería en distintos aspectos, como filtros, como separadores, como drenes, etc. En este caso serán utilizados fundamentalmente como refuerzos y por lo tanto toman el nombre de geogrillas.

Estos geotextiles específicos tienen una muy alta resistencia a la tracción con la cualidad adicional de alcanzar este valor máximo con una muy pequeña deformación, con lo cuál logra un elevado módulo resistente.

Su utilización en la presente investigación es a los efectos de transmitir mayor carga a los pilotes y aliviar las tensiones que el relleno y la sobrecarga, pudieran generar sobre el terreno natural, que por lo general es de baja capacidad portante y susceptible de experimentar asentamientos importantes.

La inclusión de la geogrilla, en el modelo como el que estamos investigando, se basa fundamentalmente en el hecho de que las cargas actuantes sobre el relleno, en las zonas entre pilotes, inducen tensiones sobre el terreno natural provocando su deformación, esta deformación del terreno natural, es acompañada por el relleno granular, ocasionando con este hecho la deformación de la geogrilla.

La deformación que se produce, puede ser asimilada a una catenaria entre dos pilotes contiguos, donde el tramo que cruza diametralmente la cabeza de los pilotes se considera como un punto fijo de la geogrilla, teniendo en cuenta la elevada presión que se produce en el relleno que está por encima de la cabeza de los mismos y que la comprime fuertemente.

Al tener la geogrilla un módulo de deformación elevado, la misma necesitará de una muy pequeña deformación específica para desarrollar un elevado esfuerzo de tracción, desviando parte de las cargas actuantes sobre el manto compresible hacia los pilotes produciendo un aumento de carga sobre los mismos y descargando, a su vez los esfuerzos sobre el manto compresible, lo cuál posibilita un aumento de las presiones ejercidas por las sobrecargas “ q_0 ” en la parte superior del relleno.

Es necesario destacar que para los valores utilizados en estos ensayos, estamos frente al caso de rellenos granulares de pequeño espesor, donde no se produce el “efecto arco” y donde el comportamiento a la rotura es exclusivamente por punzonado.

5.- ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL MODELO CON LA INCLUSIÓN DE LA GEOGRILLA

Los primeros pasos fueron ver si se mantenía la misma mecánica de rotura, observada en el modelo, sin la inclusión de la geogrilla, también se buscaba ver cual sería, dentro del manto granular, la posición en la cual la geogrilla podría actuar con su mayor eficiencia.

Para ello se realizaron numerosos ensayos variando la posición de la geogrilla dentro del relleno granular como los que se indican en las fotos N° 2 y 3, donde utilizamos un único pilote para observar el mecanismo de rotura del conjunto, a los efectos de interpretarlo matemáticamente.



Fotos N° 2 y 3: Ensayos con un solo pilote y con geogrilla arriba (izquierda) ó abajo (derecha)

6.- ENSAYOS REALIZADOS PARA UN CONJUNTO DE PILOTES

Una vez interpretado el comportamiento del modelo se procedió a realizar ensayos mediante la inclusión de un numero mayor de pilotes, estos ensayos, se realizaron para distintas relaciones $H/(nD)$ donde:

H = Altura del relleno granular tomado a partir de la superficie del pilote.

$n.D$ = Distancia entre ejes contiguos de dos pilotes de una fila

Y para cada uno de estos, se analizaron las distintas posibilidades de ubicación de la geogrilla dentro del relleno.

Para estos ensayos se utilizaron cabezales en los pilotes con un diámetro $D = 4,4$ cm.

Habíamos observado además, como es lógico, la importancia que para la eficacia de la geogrilla tiene la ubicación relativa de la misma con relación a la altura del relleno, en nuestros ensayos hemos definido la ubicación de la geogrilla dentro del relleno con la distancia "X" de la misma a la cabeza de los pilotes (ver figura N° 6).

Se comprueba que cuando la geogrilla se ubica relativamente cerca de la cabeza del pilote, es decir en la parte inferior del relleno, se logra la mayor eficacia del conjunto, pero por el contrario, cuando la geogrilla se coloca en la parte superior del relleno, prácticamente no tiene influencia mecánica en la resistencia del sistema, ya que al alejarse de la cabeza del pilote las

tensiones de compresión sobre la misma para anclarla disminuyen y además se produce también un asentamiento de la misma, con lo cual toda la geogrilla sufre un desplazamiento con el relleno y este movimiento relativo impide que la misma se deforme y con ello entre en tracción.

Un ejemplo de los resultados que obtuvimos de los ensayos, se muestran en las curvas que se enseñan a continuación donde se mantuvo una relación:

$$H/(nD) = 0,4$$

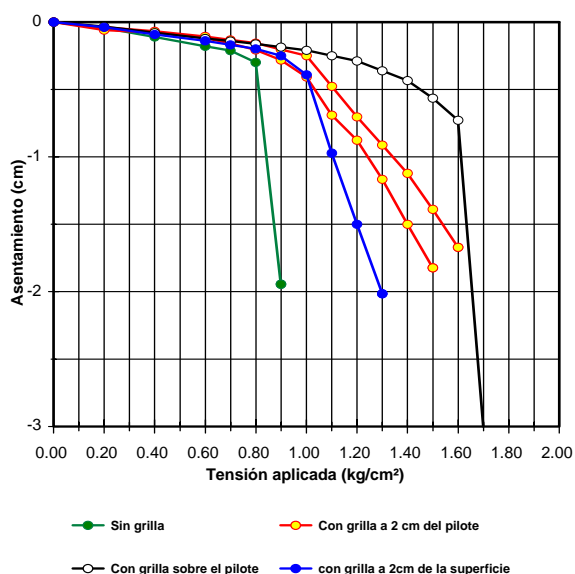


Figura N° 2: Carga sobre los pilotes para $H/(nD) = 0,4$ con distintas posiciones de la geogrilla.

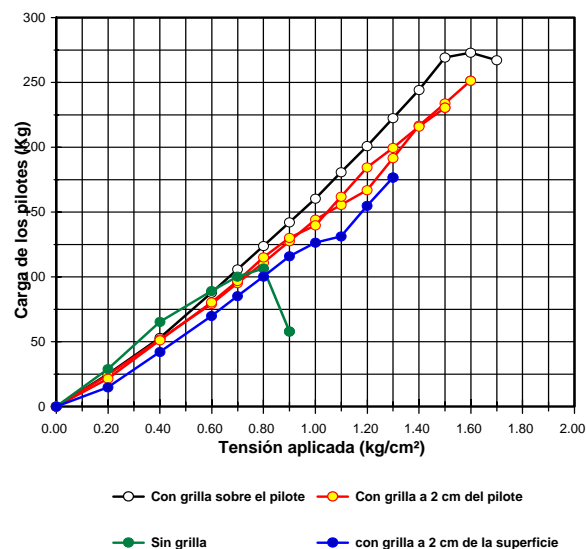
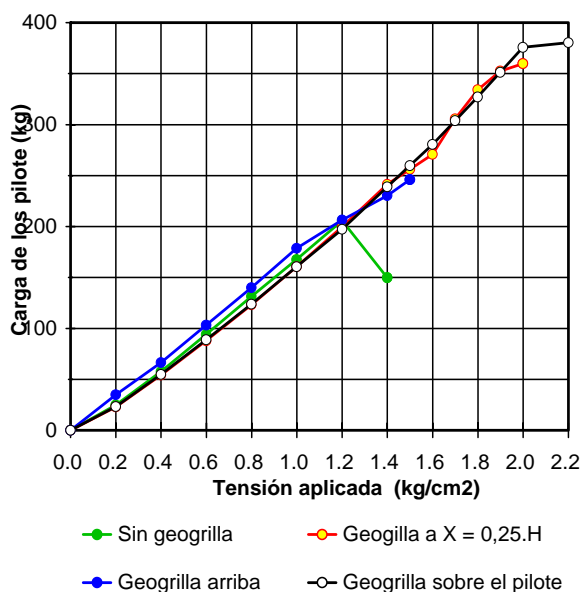


Figura N° 3: asentamiento del manto compresible para $H/(nD) = 0,4$ con distintas posiciones de la geogrilla.

Esta misma medición se realizó para una relación de $H/n.D = 0,5$ y $0,3$ donde se obtuvieron los



siguientes resultados para la relación $0,5$:

Figura N° 4: Carga sobre los pilotes para $H/(nD) = 0,5$ con distintas posiciones de la geogrilla

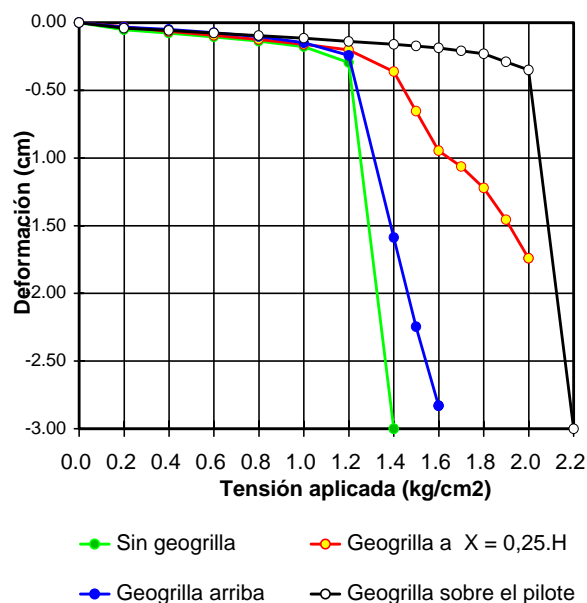


Figura N° 5: Asentamiento del manto compresible para $H/(nD) = 0,5$ con distintas posiciones de la geogrilla

Se nota que la resistencia máxima del conjunto se obtiene para una ubicación de la geogrilla apoyada sobre los pilotes pero también en este caso se observa una rotura frágil del sistema, ya que se produce la rotura de la misma por punzonado como se aprecia en la Foto N° 4.



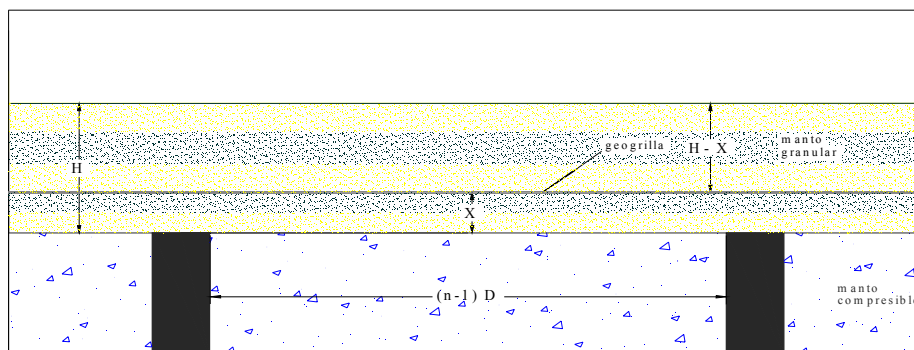
Foto N° 4: Punzonado de la geogrilla sobre la cabeza del pilote

En los ensayos realizados que se muestran en las figuras 2 a 5 se han incluido también resultados de ensayos realizados sin geogrillas, es decir solamente con un relleno granular sobre los pilotes. Se observa, que una vez agotada la resistencia del conjunto sin la inclusión de la geogrilla, comienza a notarse el aporte de la misma con el aumento de la carga que toman los pilotes, dependiendo la magnitud de dicho aporte, de su ubicación dentro del relleno definida por "X".

7.- INTERPRETACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL MODELO CON LA INCLUSIÓN DE LA GEOGRILLA

Para evaluar la efectividad de la geogrilla dentro del conjunto analizado, será necesario conocer los parámetros geométricos del paquete que la incluye y que se muestra en la Figura N° 6.

Figura N° 6: Variables intervinientes



De la observación de la forma de rotura en los ensayos ejecutados, mostrados en la fotografía N° 5, se pueden interpretar las acciones y reacciones que se producen dentro del modelo debido a las sollicitaciones externas. De ellas podemos deducir las ecuaciones que nos permiten obtener, con los conocimientos básicos de la geotécnica, los distintos esfuerzos que se generan y plantear las ecuaciones de equilibrio a los efectos de obtener un modelo matemático que se aproxime a los resultados medidos tanto en la carga que toman los pilotes, como en la deformación del manto compresible, este esquema se muestra en la Figura N° 7.

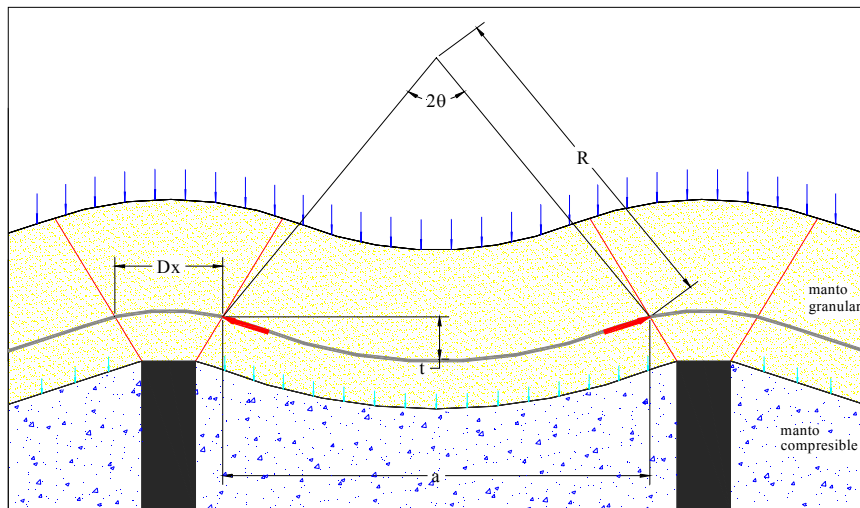


Figura N° 7: Esquema de desplazamientos sufridos por el modelo durante la aplicación de la carga.



Foto N° 5: Corte del relleno granular en el modelo ensayado con el cabezal de los pilotes a la vista y la inclusión de la geogrilla. Se ve la deformación tronco cónica del relleno y de la geogrilla diámetro de los pilotes 4,40 cm, altura del relleno $H = 6,5$ cm, separación entre ejes 4D.

De los numerosos ensayos realizados en nuestro anterior trabajo, surge que los esfuerzos que genera el relleno granular sobre la cabeza de los pilotes puede ser interpretado con el mecanismo simplificado en la figura N° 8 que se adjunta, donde se muestra como se genera el punzonado de los pilotes en el relleno cuyo resultado se puede apreciar en las fotos del modelo mostradas tanto en corte (foto N° 5) y en planta (foto N° 6)

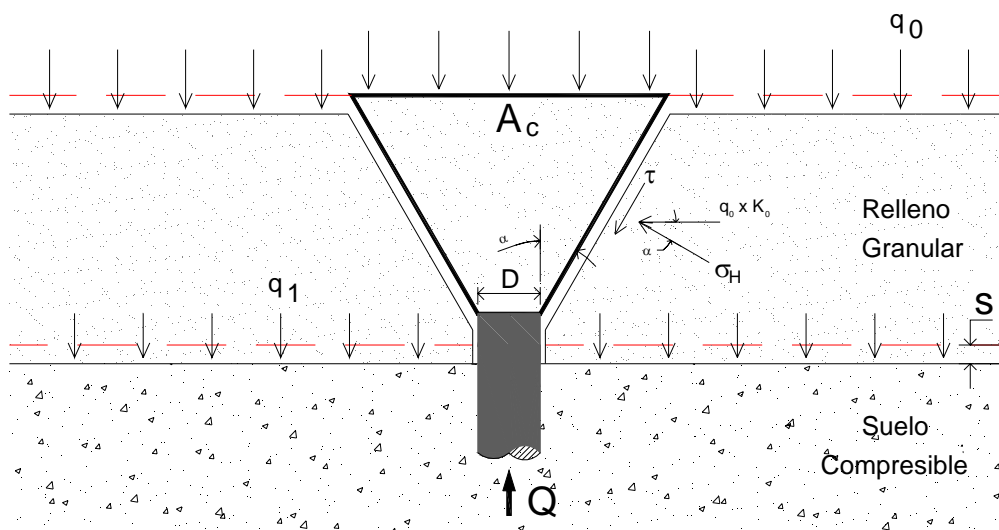


Figura N° 8 Esquema de rotura del relleno sobre el pilote

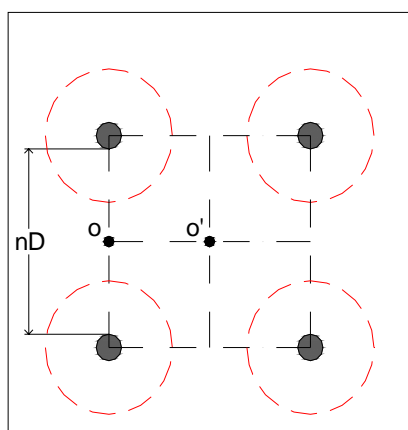


Foto N° 6: foto de la parte superior del manto granular luego de la rotura en el modelo (derecha) y esquema geométrico de cálculo adoptado (izquierda)

En primer lugar vimos que el punzonado de la cabeza del pilote en el relleno granular se efectúa con un ángulo que definimos como “ α ” y que delimita el tronco de cono invertido que encierra la porción del relleno que carga directamente sobre la cabeza del pilote. Haciendo ensayos con una misma conformación geométrica y suspendiéndolos en distintas etapas de la carga aplicada, pudimos apreciar midiendo en forma directa sobre el modelo, que el mismo varía con el asentamiento del terreno compresible y encontramos que puede ser interpretado matemáticamente con la siguiente fórmula:

$$\alpha = \phi \times \left[Y - \left(\frac{s}{H} \right) \right] \quad (1)$$

Donde “ ϕ ” es el ángulo de fricción interna del relleno, “ s ” es el asentamiento del suelo compresible inferior al relleno, “ H ” es el espesor del relleno colocado, medido a partir de la cabeza del pilote e “ Y ” está dado por la expresión que se detalla a continuación y que varía únicamente entre el valor unitario correspondiente a una relación de $H/n.D = 0,3$ y un valor mínimo de 0,65 que le corresponde a $H/n.D = 0,5$ o mayor.

$$Y = 0,1 + \frac{0,275}{\left(\frac{H}{n.D}\right)} \leq 1$$

Con este valor de “ α ” se puede calcular la carga que se transfiere a la cabeza del pilote cuando actúa una carga uniformemente repartida “ q_0 ” sobre el relleno, para ello debemos calcular la superficie superior del tronco de cono, la que denominamos “ A_c ”.

$$A_c = [2.H . \tan(\alpha) + D]^2 . \frac{\pi}{4} \quad (2)$$

También se debe calcular el área lateral del tronco de cono “ AL ” donde actúa el esfuerzo de corte “ τ ” y que se traduce en una fuerza adicional que carga directamente sobre el pilote.

$$AL = \pi \times [(H - s) \times \tan(\alpha) + D] \times (H - s) \quad (3)$$

Este esfuerzo de corte “ τ ” es interpretado por la siguiente fórmula matemática.

$$\tau = q_0 \times K_o \times (\text{sen}(\alpha) + \cos(\alpha) \times \tan(\theta)) \quad (4)$$

donde K_o es el coeficiente de empuje en reposo del relleno y lo interpretamos con la fórmula

$$K_o = 1 - \text{sen}(\phi) \quad (5)$$

Con éstos valores se puede calcular la carga que soporta el pilote a través de la siguiente fórmula.

$$Q_p = A_c . q_0 + AL . \tau + 2.D.T_G . \text{sen}(\theta) \quad (6)$$

En esta última expresión, los dos primeros términos representan la carga que llega a la cabeza del pilote a través del relleno granular y el tercero representa la carga transmitida por la geogrilla.

“ D ” es el diámetro del pilote y “ T_G ” es la tensión que se genera en la geogrilla dada por:

$$\text{Tensión de la geogrilla} = T_G = f(\epsilon) \quad (7)$$

La interpretación matemática de “ T_G ”, se materializa a través de una ecuación del tipo:

$$T_G = Cte . (\epsilon_G)^n$$

Donde “ ε_G ” es la deformación específica de la geogrilla, y los valores adoptados para “Cte” y “n” fueron los siguientes Cte = 78 kN/cm y n = 0,38.

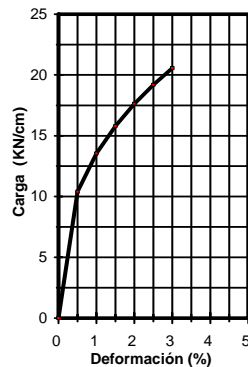


Figura N° 9 Tensión deformación de la geogrilla

Utilizando esta ecuación podemos deducir la tensión asumida por la geogrilla para cualquier valor de “ ε ”.

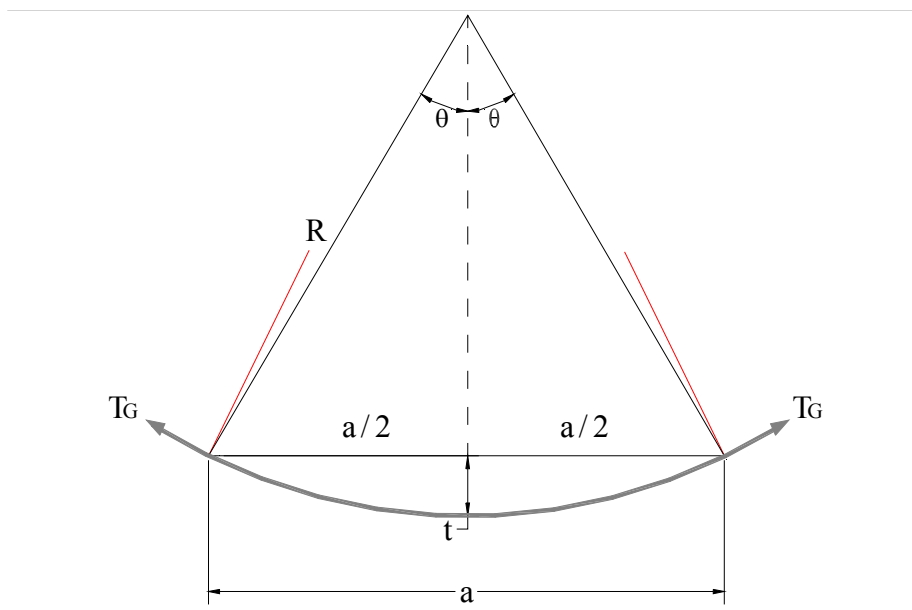


Figura N° 10: Esquema de cálculo de la deformación específica de la geogrilla.

De la observación de la figura anterior se deducen las relaciones geométricas para la obtención de los relaciones necesarias que se muestran continuación

La deformación específica de la geogrilla estará dada por la siguiente fórmula:

$$\varepsilon_G = \frac{L_f - L_i}{L_i} = \frac{2\theta R - 2R \times \text{sen}(\theta)}{2R \times \text{sen}(\theta)} = \frac{\theta - \text{sen}(\theta)}{\text{sen}(\theta)} \quad (8)$$

Una vez obtenida la deformación específica de la geogrilla y reemplazando este último valor en la ecuación (8), se tendrá la formulación matemática de la tensión de la geogrilla usada en los cálculos:

$$T_G = Cte \times (\varepsilon_G)^n = Cte \times \left(\frac{\theta - \text{sen}(\theta)}{\text{sen}(\theta)} \right)^n \quad (9)$$

El valor de θ será, como lo muestra la figura N° 10, el correspondiente al ángulo que forma el radio de circunferencia dado por la deformación de la geogrilla, y que puede ser representado en función del asentamiento del conjunto (t), y de la separación entre bordes de los pilotes $a = (n-1) \cdot D$

$$t = R - R \times \cos(\theta) = R \times (1 - \cos(\theta))$$

$$a = 2 \times R \times \text{sen}(\theta)$$

Haciendo la relación entre estos dos valores y simplificando obtenemos la siguiente relación entre los mismos:

$$\frac{t}{a} = \frac{1 - \cos(\theta)}{2 \text{sen}(\theta)} = \frac{1 - \sqrt{1 - \text{sen}^2(\theta)}}{2 \text{sen}(\theta)}$$

De esta fórmula podemos despejar el valor del $\text{sen}(\theta)$, y también conocer el valor del ángulo θ :

$$\text{sen}(\theta) = \frac{4 \times \frac{t}{a}}{4 \times \left(\frac{t}{a} \right)^2 + 1} \quad (10)$$

$$\theta = \text{arsen} \left[\frac{4 \times \frac{t}{a}}{4 \times \left(\frac{t}{a} \right)^2 + 1} \right] \quad (11)$$

que nos permitirá obtener el valor de la tensión de la geogrilla a partir de la ecuación (9), en función de la deformación que se produce en el conjunto.

Para calcular la tensión que llega al terreno natural que soporta el relleno, se toma una cuadrícula formada por cuatro pilotes como la que se indica en la Foto N° 6 y se hace el equilibrio de las fuerzas aplicadas en la superficie del relleno menos las fuerzas que toman los pilotes, con lo cual nos queda:

$$q_o \cdot (n \cdot D)^2 - Qp = q_1 \cdot [(n \cdot D)^2 - Ap] \quad (12)$$

En la que “D” es el diámetro de la cabeza del pilote y “Ap” es el área, “q₁” es la tensión que llega a la superficie del terreno natural y “n” es la cantidad de veces que entra el diámetro D, en la separación entre los ejes de dos pilotes contiguos.

De esta forma se obtiene:

$$q_1 = \frac{q_0 \times (n \times D)^2 - Q_p + \gamma \times H}{[(n \times D)^2 - A_p]} \quad (13)$$

Finalmente calculamos el asentamiento que se produce en el terreno natural ubicado inmediatamente debajo del relleno, como consecuencia de la tensión “q₁” aplicada sobre el mismo, éste valor puede ser interpretado conociendo la variación del coeficiente de balasto “kt”.

$$kt = \frac{q_1}{\delta} \text{ (kgcm}^3\text{)} \quad (14)$$

Donde δ representa el asentamiento producido por la tensión aplicada “q₁”.

A los efectos de obtener una relación sencilla que permita relacionar la variación de “Kt” con la carga aplicada, se adoptó la sugerida por Núñez y anteriormente también por Duncan y Chang, que indica una relación lineal de dicho valor y que puede ser expresada por la fórmula que se deduce de la figura que se muestra.

$$K = K_i \times \left[1 - \left(\frac{q_1}{q_R} \times dR \right) \right] \quad (15)$$

Donde:

K_i = valor de K donde la recta representada con línea de trazos intercepta al eje de las ordenadas.

q_r = Último valor de tensiones medido en el ensayo.

q_u = Valor teórico de tensiones donde supuestamente el valor de K es nulo.

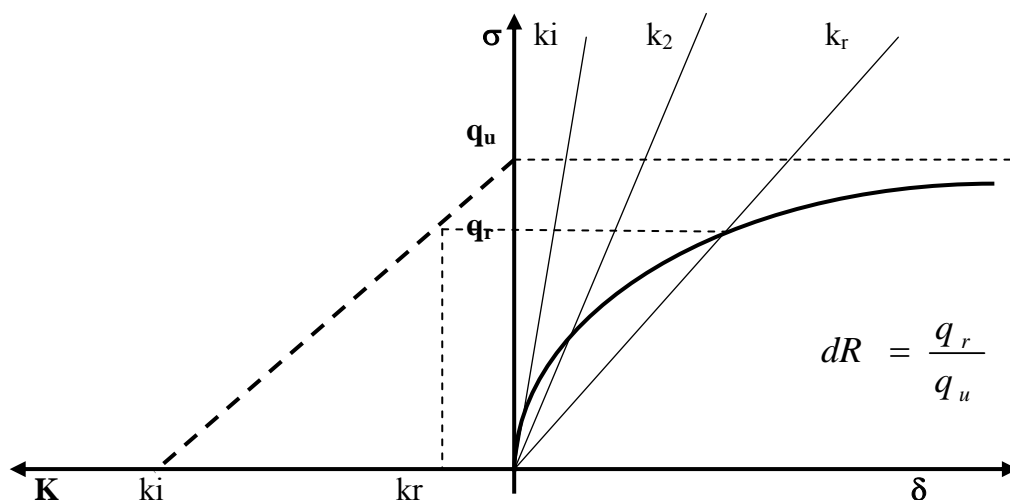


Figura N° 11: Variación del módulo de balasto con la tensión aplicada

De los ensayos de laboratorio ejecutados se deduce que para el caso del poliestireno expandido de densidad 15 kg/m^3 el valor de $dR = 0,77$

8.- VARIACIÓN DE LA LONGITUD INICIAL DE LA GEOGRILLA

La longitud de la geogrilla, que podrá ser “arrastrada” por la deformación o el asentamiento del relleno granular, disminuirá al elevar la posición de la misma debido a la extensión del tronco de cono sobre el pilote.

Esto puede observarse en la figura N° 12, que muestra la disminución de la longitud inicial de la geogrilla en función de la posición de la misma dentro del manto granular, cuyo parámetro será “X” y crecerá desde los cabezales de los pilotes hacia la superficie superior del relleno.

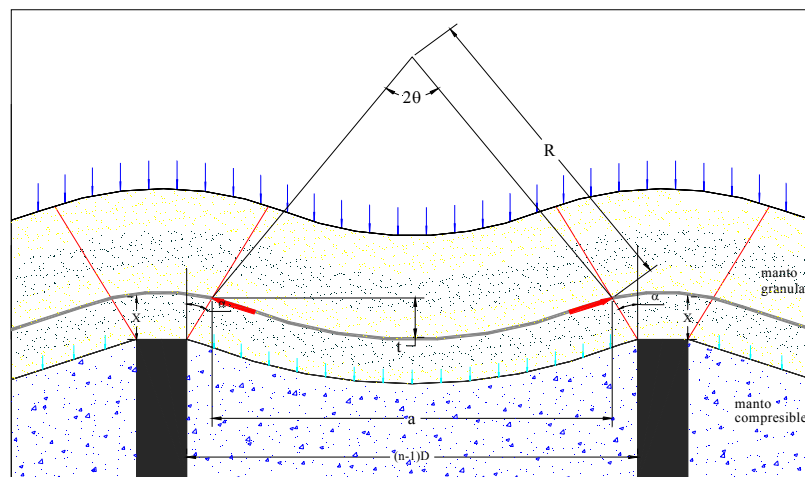


Figura N° 12: Disminución de la longitud inicial de la geogrilla con la posición relativa de la misma dentro del relleno.

La variación de $a = f(X)$ la podemos estimar con la siguiente expresión:

$$a = (n - 1) \times D - X \times \tan(\alpha) \quad (16)$$

9.- DEFORMACIÓN DE LA GEOGRILLA

Al variar la posición de la geogrilla dentro del manto granular alejando la misma de los pilotes, es decir, aumentando el valor de “X”, ésta comenzará a “flotar” dentro del relleno con lo cual el anclaje pierde sustentación.

Este hecho ha sido comprobado mediante mediciones en el modelo, donde hemos colocado puntos fijos para medir asentamientos dentro del relleno, tanto en su parte superior, en la parte media y en la parte inferior del mismo, como lo muestra la Foto N° 7.



Foto N° 7 Se aprecia el asentamiento del relleno sobre los pilotes por el afinamiento de los mantos de arena coloreados, ubicados dentro del cono de rotura.

De estas mediciones se desprende que el relleno en el tronco de cono invertido que carga sobre los pilotes, sufre un asentamiento como consecuencia de las grandes tensiones que se desarrollan en él, en la cercanía de la cabeza de los pilotes que hace que el relleno granular fluya hacia los costados del pilote y por lo tanto descienda la parte superior del cono y con ello la grilla experimenta un asentamiento, con lo cuál no logra establecer un punto fijo, lo que impide que la misma experimente deformaciones, o lo que es lo mismo que entre en tracción.

En los ensayos realizados en modelo, hemos medido que las tensiones que se desarrollan en el relleno, sobre la cabeza de los pilotes, es del orden de los 50 kg/cm² en los pilotes de 20 mm de diámetro y de los 20 kg/cm² en los pilotes de 44 mm de diámetro con geogrillas.

En la figura N° 13 se muestran los distintos mecanismos de rotura deducidos de los ensayos en modelo para las distintas posiciones de la geogrilla dentro del relleno.

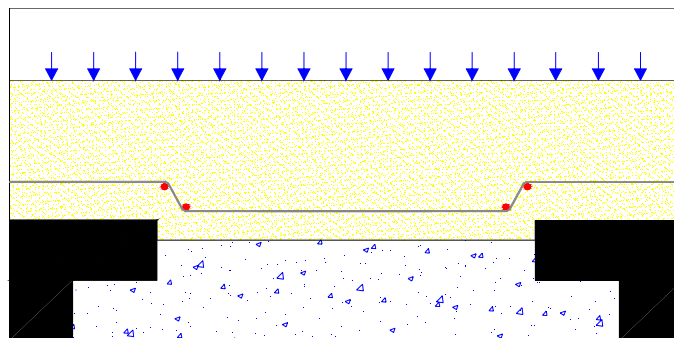


Figura N° 13 b: geogrilla cercana a los pilotes.

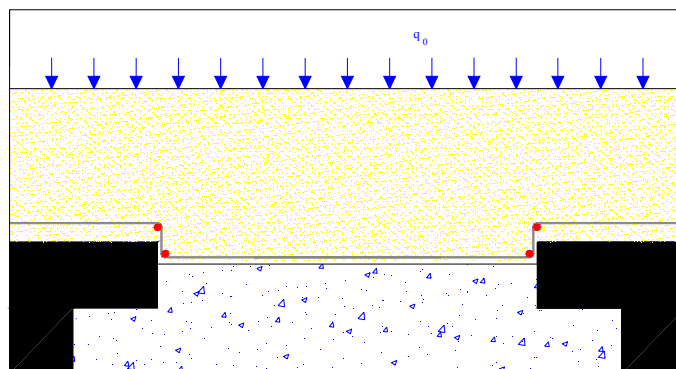


Figura N° 13 a: geogrilla sobre los pilotes.

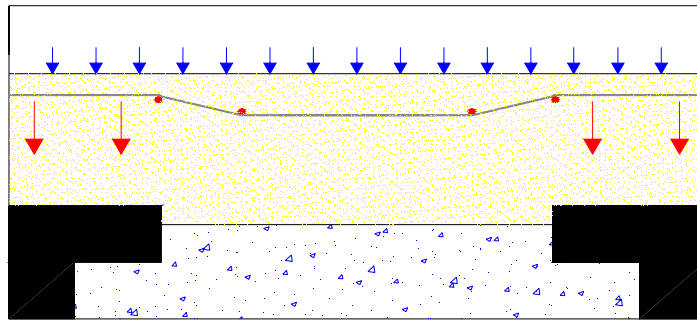


Figura N° 13 c: geogrilla alejada de los pilotes.

La situación planteada en la figura N° 13 c, hace que la geogrilla pierda lo esencial para lo cuál ha sido colocada, que es, entrar en tracción y transmitir cargas adicionales a los pilotes y con esto su influencia dentro del esquema estructural del relleno conformado, pierde eficacia.

Por lo comentado anteriormente y por las experiencias deducidas de los ensayos, se optó por definir la deformación de la geogrilla en función de su posición, a partir de la siguiente formulación matemática:

$$t = \frac{(s - \psi \times s)}{H} \times (H - X) + \psi \times s \quad (17)$$

En la cual los parámetros son:

“t” representa el asentamiento de la geogrilla (ver figura 8)

“s” es la deformación propuesta.

“H” es la altura del manto granular usado en el ensayo.

“X” marca la altura de ubicación de la geogrilla dentro del relleno a partir del cabezal de los pilotes.

“Ψ” es el parámetro adimensional que tiene en cuenta todos los comportamientos antes comentados con referencia a la geogrilla y su posición dentro del manto granular.

Los valores adoptados para estimar el valor de “Ψ” fueron interpretados con la siguiente relación:

$$\psi = 1 - \frac{X}{H} \quad (18)$$

10.- CARGA FINAL APORTADA POR LA GEOGRILLA A LOS PILOTES

Una vez que se conoce la tensión de la geogrilla con las expresiones matemáticas vistas anteriormente y a los efectos de calcular la carga que la misma le transfiere a la cabeza de los pilotes, debemos multiplicar dicha tensión por dos (2) veces el diámetro de la cabeza del pilote y por el $\text{sen}(\theta)$. Con esto obtendremos la carga ΔQ_p (tercer sumando de la ecuación (6)), que transmite la geogrilla al pilote como se aprecia en la figura N° 12.

$$\Delta Q_p = 2 \times D_x \times T_G \times \text{sen}(\theta)$$

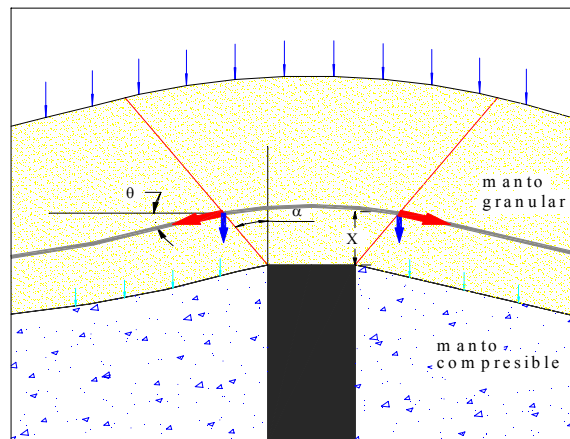


Figura N° 14: Esquema de distribución de las cargas sobre el pilote, por tensión y deformación de la geogrilla.

El aporte de la geogrilla a aumentar la carga de los pilotes, provocará una disminución en la tensión que actúa sobre la superficie del manto compresible. Aplicando la fórmula (8), se puede observar que al crecer “ Q_p ”, debido al aporte de la geogrilla, disminuye la tensión que actúa sobre el manto compresible “ q_1 ”, y por lo tanto, habrá una menor deformación del manto ubicado entre las cabezas de los pilotes lo cual nos permitirá aumentar el valor de la carga aplicada en la superficie del relleno “ q_0 ”.

$$q_1 = \frac{q_0 \times (n \times D)^2 - Q_p + \gamma \times H}{(n \times D)^2 - A_p} \quad (13)$$

11.- METODOLOGÍA DE CALCULO

Para proceder al cálculo del estado de equilibrio del sistema, lo más apropiado es volcar los valores en una planilla de cálculo de una computadora y proceder por iteraciones sucesivas de acuerdo al siguiente detalle.

1°) Para cada valor de “ q_0 ” calculamos con la ecuación (1) el valor del ángulo “ α ” suponiendo inicialmente un valor de asentamiento nulo ($\delta = 0$)

2°) Con este valor de “ α ” calculamos el área de carga del pilote “ A_c ”, el área lateral del tronco de cono “ A_L ”, la tensión de corte “ τ ” con las ecuaciones (2), (3), (4), (5).

3°) Calculamos el aporte de la geogrilla, primeramente se calcula su longitud inicial a través de la ecuación (16), el asentamiento de la geogrilla, el $\sin(\theta)$ la deformación específica de la misma y su tensión a partir de las ecuaciones 8, 9, 10, 11, 17 y 18 respectivamente.

4°) calculamos la carga en los pilotes “ q_p ” con la ecuación (6)

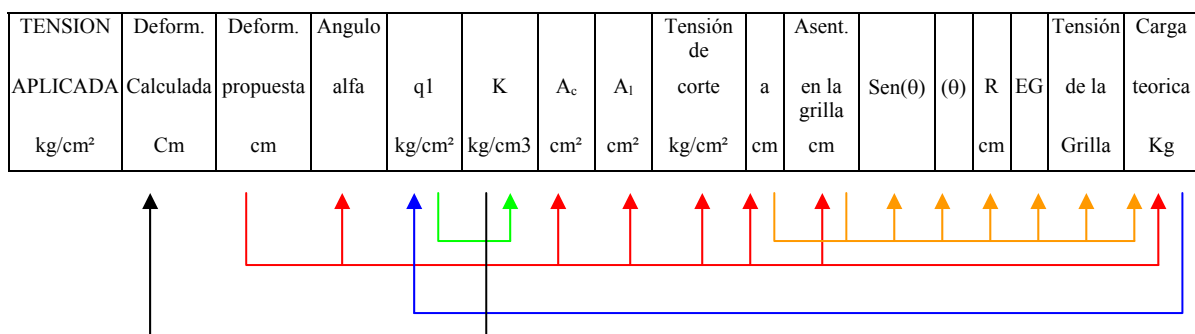
5°) A través de la ecuación (13) obtenemos el valor de la tensión que transmite el relleno granular al terreno natural, “ q_1 ”.

6°) Con el valor de “ q_1 ” calculamos el coeficiente de balasto “ K ” del material que conforma el suelo natural, mediante el auxilio de la ecuación (15). Para ello, previamente, tenemos que calcular el valor de “ K_i ” mediante la ecuación:

$$K_i = 1.7 \times E / (n.D).$$

7°) Con el valor de “ q_1 ” y de “ K ” podemos obtener el primer valor de δ mediante la ecuación (14). Este valor de deformación será colocado como primer valor de “ s ” y se reiniciará el procedimiento indicado desde el punto 1° y 6° hasta que el valor de la deformación calculada coincida con la deformación de partida, o sea que resulte $\delta = s$.

Se muestra, a continuación, un esquema que representa los pasos a seguir para la confección de una planilla de cálculo.



12.- ENSAYOS REALIZADOS Y CONCLUSIONES

Como conclusión de todo lo expuesto, hemos realizado ensayos en el modelo variando la distancia entre los ejes de los pilotes y el espesor del relleno, de manera que la relación entre $H/n.D$ tomara sucesivamente los valores de 0,3, 0,4 y 0,5 respectivamente.

Además y para cada una de las relaciones mencionadas, se varió la ubicación de la geogrilla dentro del relleno granular, posicionándola sucesivamente a:

- 1°) Sobre la cabeza del pilote (Geogrilla abajo)
- 2°) A una distancia $X = 0,25$ de H sobre la cabeza del pilote
- 3°) A una distancia de 2 cm de la superficie del relleno (Geogrilla arriba)
- 4°) Sin geogrilla.

En todos los casos se utilizaron cabezas de los pilotes de $D = 4,40$ cm de diámetro, y los rellenos granulares tomaron un espesor “ H ” de 5,40 cm a 8,00 cm, con lo cuál se armó el siguiente cuadro geométrico:

H/n.D	H cm	D cm	n	n.D cm
0.3	5.40	4.40	4.09	18
0.4	6.40	4.40	3.63	16
0.5	8.00	4.40	3.63	16

En todos los casos se utilizó como elemento compresible, poliestireno expandido de 15 kg/m^3 de densidad y la misma geogrilla resistente.

Para efectuar las lecturas, tanto de las cargas de los pilotes como de las deformaciones experimentadas por el manto compresible, se aplicaba una presión constante sobre el relleno granular y se la mantenía durante 30 minutos, efectuando lecturas sucesivas durante este período de tiempo para luego efectuar el siguiente escalón de carga.

Se dan a continuación a título de ejemplo, los resultados de dos ensayos ejecutados en los que se representan en el primer gráfico las deformaciones obtenidas medidas como promedio de tres (3) puntos ubicados sobre el material compresible y las deformaciones calculadas con el modelo matemático desarrollado.

H/n.D = 0,40 Con geogrilla abajo (X = 0 cm)

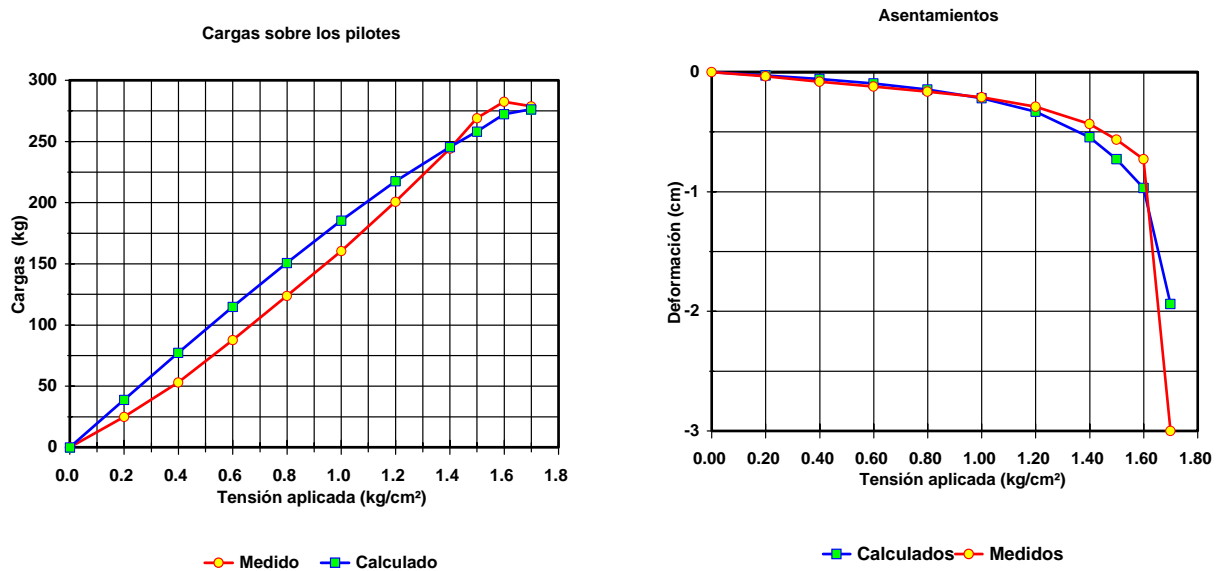


Figura N° 15: Resultados de un ensayo en el modelo, las cargas y las deformaciones son el promedio de tres (3) mediciones

H/n.D = 0,50 Con geogrilla abajo (X = 0 cm)

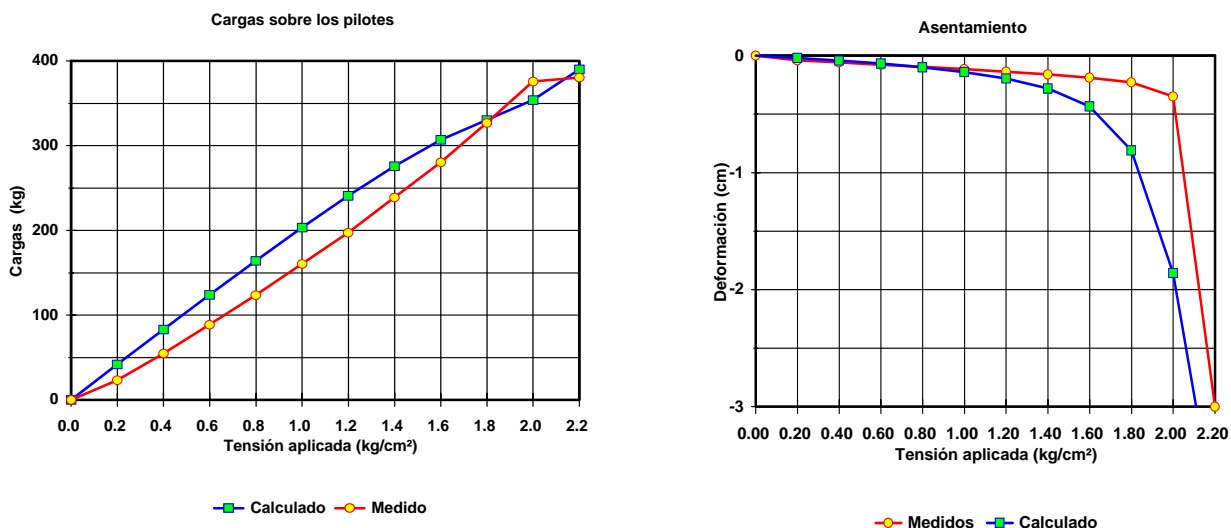


Figura N° 16: Resultados de un ensayo en el modelo, las cargas y las deformaciones son el promedio de tres (3) mediciones

Se notan en estos cuadros de resultados que se observan en las figuras 15 y 16, una muy buena aproximación entre los resultados medidos y los resultados obtenidos a través del modelo matemático desarrollado.

A los efectos de poder resumir los resultados de los ensayos ejecutados, hemos resumido en los gráficos de la figura 17 que se adjuntan a continuación, los valores de las cargas medidas de los pilotes en función de las distintas relaciones de $H/n.D$ que se utilizaron y para las distintas ubicaciones de la geogrilla dentro del relleno granular. Esta relación se realizó tanto para las mediciones efectuadas en el modelo como para los resultados teóricos obtenidos del modelo matemático. Se pueden apreciar la perfecta correlación existente entre ambos resultados.

Un objetivo primordial que se busca en una configuración como la que estamos estudiando, es la de aumentar la carga que toman los pilotes para una misma configuración geométrica del conjunto de pilotes y del espesor del relleno granular, expresado por la relación $H/n.D$ con la inclusión de una geogrilla.

Se puede apreciar como primera conclusión que para cualquier valor de $H/n.D$ la colaboración de la geogrilla, siempre depende de su ubicación dentro del relleno granular, aportando su máxima influencia cuando la misma se ubica en las cercanías de la cabeza de los pilotes y disminuyendo a medida que la misma se aleja de este nivel o sea cuando se la coloca en la parte superior del relleno.

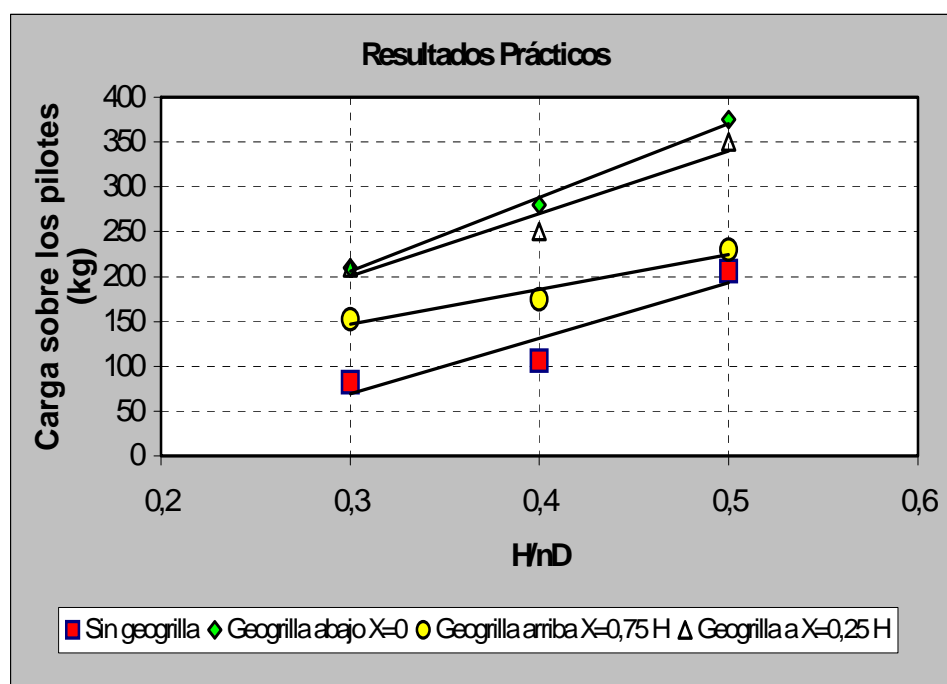
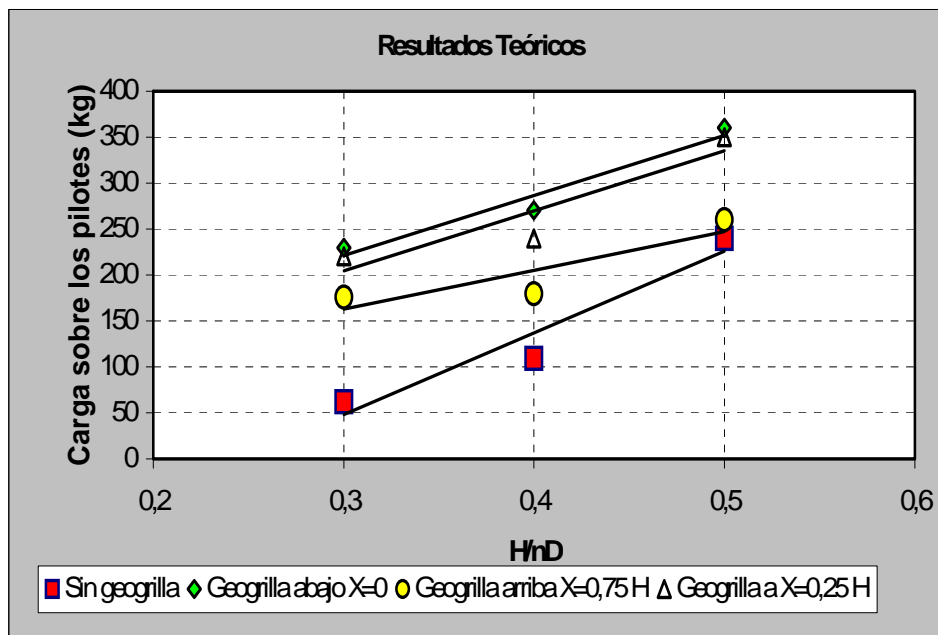


Figura N° 17: Variación de la carga que toman los pilotes para distintas posiciones de la geogrilla y para distintas relaciones de $H/n.D$ adoptadas. Resultados prácticos y teóricos

Como segunda conclusión se nota que para relaciones de $H/n.D$ mayores, es decir para espesores del relleno granular más grandes o para separación entre ejes de pilotes más chicas, la carga que toman los pilotes es cada vez mayor.



Otro de los cuadros de resultados que podemos presentar, es el que se refiere al aporte de la geogrilla a la carga de los pilotes, en función de la ubicación de la misma dentro del relleno granular y de la relación H/n.D que se muestra en el cuadro de la Figura N° 18.

Este cuadro es teórico y ha sido construido con los valores máximos de las cargas de los pilotes deducidos de los ensayos calculados, separando el último término de la ecuación 6 .

Se nota claramente también que el aporte de la geogrilla a la carga de los pilotes es mayor cuando más cerca se coloca ésta de la cabeza de los pilotes y que disminuye para altas relaciones de H/n.D, notándose que prácticamente la tendencia es a anular su influencia para valores superiores a 0,6.

Esto es muy lógico, ya que a partir de este valor de H/n.D, empezaría a producirse el “efecto arco” y la transmisión de la carga a los pilotes se realizaría totalmente a través del relleno granular y no tendría sentido colocar una geogrilla.

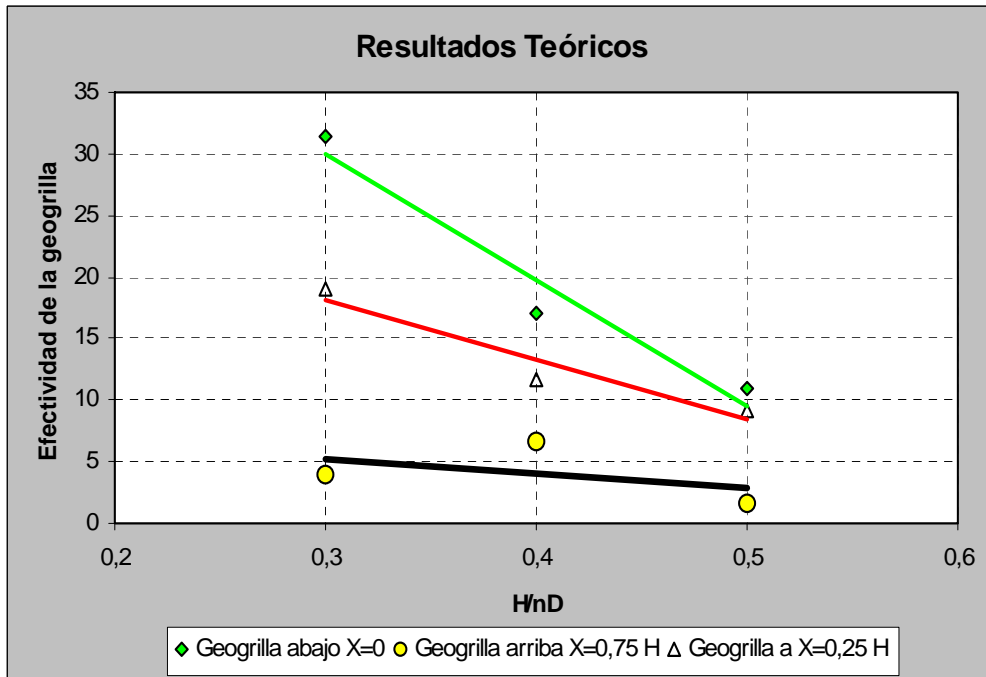


Figura N° 18: Aporte teórico de la geogrilla a la carga que toman los pilotes

Finalmente y tratando de representar la eficiencia del sistema conformado por el relleno granular, la geogrilla y los pilotes, en su conjunto, hemos definido el siguiente coeficiente de eficiencia “B” que representa la carga que toma un (1) pilote con relación a la carga aplicada en la parte superior del relleno en un área tributiva correspondiente a cada pilote, definida como el cuadrado de “n.D” (ver Foto N° 6 página 9).

A modo de resumen podemos decir que, un valor unitario del Coeficiente de Eficiencia ($B = 1$) significaría que toda la carga aplicada sobre el relleno es transferida al pilote por el efecto arco, o por la presencia de una losa de hormigón armado, con lo cual el suelo entre pilotes no recibiría carga alguna.

Por otra parte, un valor reducido del Coeficiente de Eficiencia “B” indicaría la baja o poca efectividad del relleno para transferir cargas a los pilotes.

$$B = \frac{Q_p}{q_o \cdot (n \cdot D)^2}$$

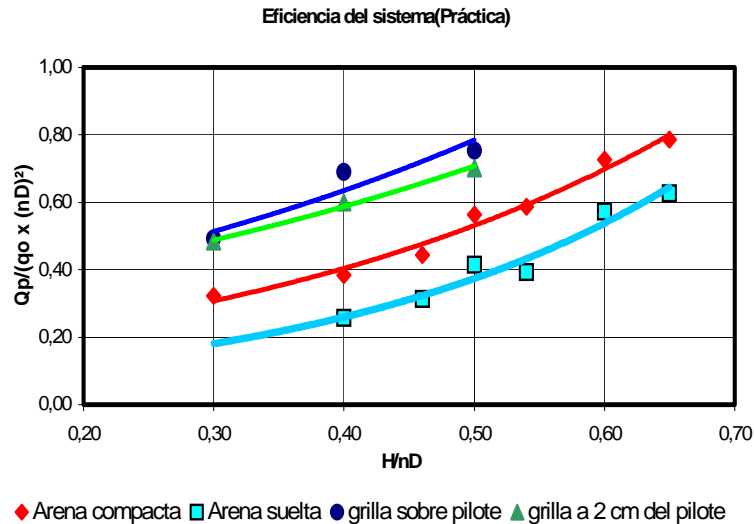


Figura N° 19: Eficiencia del sistema medido a través de los ensayos ejecutados

En este gráfico se han incluido, resultados de los ensayos realizados con rellenos granulares sin geogrietas, donde el relleno de arena se ha colocado en un caso en forma totalmente suelta y en el otro caso con una fuerte compactación, además de los ensayos realizados con geogrietas

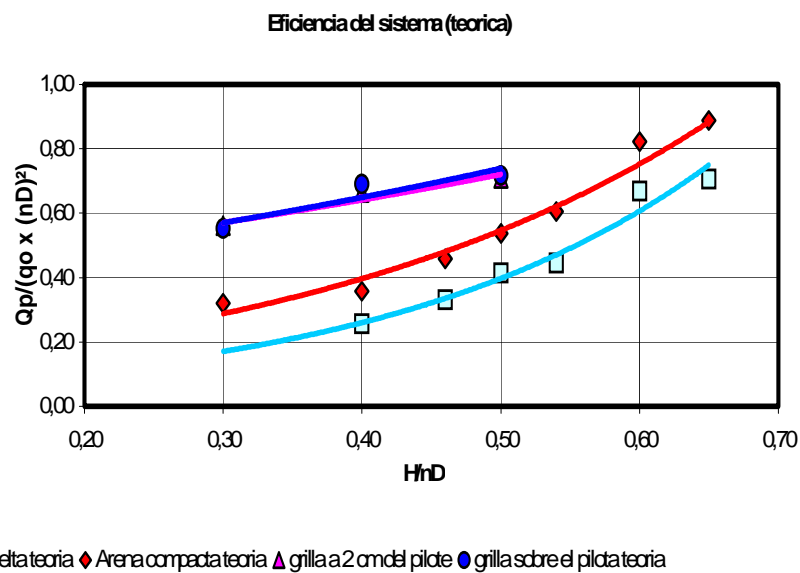


Figura N° 20: Eficiencia del sistema calculado a través de la formulación matemática.

En la última figura se muestra la eficiencia del sistema que se obtuvo de la observación de los resultados teóricos.