



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE FOMENTO

MINISTERIO
DE MEDIO AMBIENTE
Y MEDIO RURAL
Y MARINO

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS



TERRAPLENES REFORZADOS SOBRE COLUMNAS DE MORTERO. MÉTODO ALEMÁN (EBGEO). ANÁLISIS PARAMÉTRICO

Mario SEVILLANO MORO

Ingeniero Geólogo y Licenciado en Geología - Universidad de Salamanca

Máster Internacional en Explotación y Seguridad de Presas – SPANCOLD - UPM

Máster en Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica – CEDEX - UPM

Máster en Túneles y Obras Subterráneas – AETOS

URIEL & ASOCIADAS S.A. DE INGENIERÍA GEOTÉCNICA.

RESUMEN

Existen diferentes métodos analíticos de diseño de terraplenes reforzados sobre columnas de mortero.

Sobre la transferencia de cargas se puede diferenciar de una manera generalizada dos líneas; que se considere o no la disposición de refuerzo geosintético. Los métodos que no presentan refuerzo geosintético plantean la transferencia de carga a través de un colchón granular transmitiendo carga a las columnas directamente, y por el efecto de rozamiento negativo que se produce por el asiento del terreno circundante. Mientras que los métodos que presentan refuerzo geosintético plantean la transferencia de carga a las columnas directamente por el denominado “efecto arco”, y a través del refuerzo geosintético.

Una diferencia fundamental de los métodos que presentan refuerzo geosintético, es tener o no en cuenta la aportación del terreno circundante. Se realiza un análisis paramétrico del método que tiene en cuenta el aporte del terreno circundante, denominado método Alemán EBGEO (German Recommendations for Geosynthetic Reinforced Earth Structures) para estudiar la importancia que presentan la variación de los parámetros de diseño en cuanto a la reducción de los asientos y la disposición mínima de refuerzo geosintético.

PALABRAS CLAVE: Terraplenes reforzados, columnas de mortero, geosintéticos.

1. INTRODUCCIÓN

El tratamiento de los suelos y las técnicas de refuerzo han experimentado un desarrollo significativo, especialmente como resultado de la necesidad de construir sobre terreno blando proporcionando soluciones económicas.

En el diseño de terraplenes que se asientan sobre terrenos blandos, surgen una serie de problemas geotécnicos ligados a la necesidad de altura, como son: una baja resistencia al corte y una alta deformabilidad. Características que para los rellenos en terraplenes suponen a su vez problemas de capacidad de carga, de asientos intolerables, inestabilidad global o local y en general, deformaciones potencialmente excesivas para las infraestructuras viarias.

Para hacer frente a las preocupaciones mencionadas se pueden utilizar varias técnicas: como la precarga, procedimiento de provocación anticipada de asientos o de mejora de suelos blandos que resulta a veces inaplicable porque hace falta demasiado tiempo para lograr el efecto perseguido. Con frecuencia, el gran espesor de la capa de terreno blando a precargar, y su muy baja permeabilidad, o la combinación de ambos factores, hacen que el proceso de consolidación sea excesivamente lento. Para evitar o paliar este inconveniente se recurre a la construcción de drenes verticales, que aceleran notablemente la consolidación. Otras técnicas son el uso de columnas de gravas, el uso de rellenos ligeros o la realización de la sustitución del terreno blando.

Una técnica en auge para el tratamiento del terreno blando son las columnas de mortero que se engloba dentro de las técnicas de mejora del terreno, teniendo todas ellas como fin último modificar el funcionamiento tenso - deformacional de un material geotécnico preexistente de forma que su comportamiento sea compatible con los requerimientos de la estructura a soportar. Una utilidad de esta técnica es la construcción de terraplenes reforzados sobre columnas de mortero, que permite una rápida construcción del terraplén sobre terrenos blandos y comprensibles. Una capa de material granular reforzado o no con geosintético se coloca a menudo entre las columnas de mortero y el relleno del terraplén. Esta capa de material granular aumenta la transferencia de cargas a las columnas y reduce la proporción de área de sustitución necesaria de las columnas.



2. METODO ALEMÁN (EBGEO). GENERALIDADES

Partimos de la idea básica de que las recomendaciones alemanas para estructuras de tierra reforzadas con geosintético EBGEO (German Recommendations for Geosynthetic Reinforced Earth Structures), está desarrollada desde el punto de vista del geosintético.

El diseño de terraplenes reforzados con columnas de mortero depende de la geometría, del mecanismo de transmisión de carga y de la estabilidad. El método alemán da respuesta a la geometría y a la transmisión de carga. La estabilidad del terraplén se puede evaluar con los métodos tradicionales.

La geometría del conjunto se define de manera que satisfaga una serie de recomendaciones geométricas impuestas por el propio método. En el supuesto de que la geometría definida no cumpliera estas recomendaciones sería necesaria la realización de un estudio específico.

2.1. Mecanismo de transferencia de carga

El mecanismo de transmisión de carga considerado por el método se basa en la idea de la generación del “efecto arco” en el terraplén. La carga del terraplén tiende a ser transferida directamente a las columnas de mortero por el “efecto arco”, parte de la carga remanente es soportada por el refuerzo geosintético que trasfiere a las columnas por el “efecto membrana”, y parte por el terreno circundante.

La transferencia de carga a las columnas se debe a dos efectos, al “efecto arco” que se produce en el terraplén y al “efecto membrana” que se produce en el refuerzo geosintético. Debido a la mayor rigidez de las columnas en relación con el terreno blando circundante, parte de las cargas se concentran en las columnas; además, debido a los asentamientos diferenciales entre suelo - columna se produce un “efecto arco” en el terraplén.

El método asume que el “efecto arco” es completo una vez que el terraplén presente una cierta altura. Es decir, todo el peso del terraplén o carga adicional por encima de esta altura se supone que es transferida directamente a las columnas, mientras que las cargas del terraplén por debajo de la altura son soportadas por el geosintético y

redirigidas a las columnas por el “efecto membrana”, tal como se representa la idea de la transferencia de cargas en la Figura 2.1.

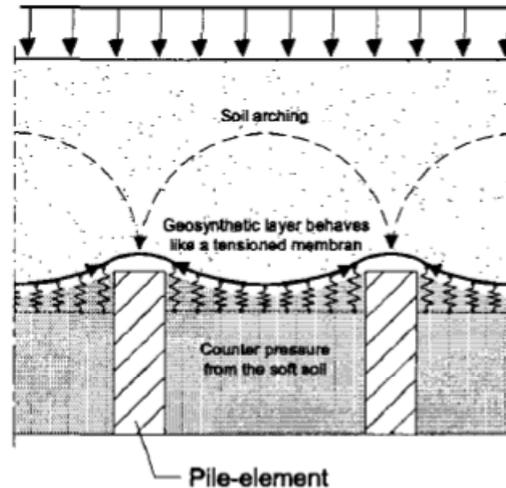


Figura 2.1: Idea del mecanismo de transferencia de cargas

La redistribución de cargas en el terraplén depende de la geometría, de la carga del terraplén y de la rigidez de las columnas.

La idea de este método es que parte de la carga transmitida al suelo será captada por el geosintético, que tenderá a traccionarse, y de este modo reducir más aún los asentamientos del terreno comprensible.

2.2. Tensiones determinadas por el método

La metodología del método se basa en la determinación de las tensiones necesarias para el diseño estructural del conjunto. En concreto, se obtienen las tensiones características sobre el terreno circundante $\sigma_{zo,k}$ y las tensiones características sobre las columnas $\sigma_{zs,k}$. Se considera que ambas presentan una distribución uniforme.

El método considera la siguiente hipótesis simplificadora: las tensiones $\sigma_{zo,k}$ y $\sigma_{zs,k}$ son iguales tanto en el plano de contacto como en el plano del refuerzo, de modo que para determinar la tracción sobre el refuerzo geosintético $E_{M,k}$, se aplica en él la tensión sobre el terreno $\sigma_{zo,k}$.



2.3. Parámetros que intervienen en el desarrollo del método

Analizando la metodología de cálculo en la Tabla 1 se definen los diferentes parámetros que intervienen en el desarrollo del método.

Tabla 1: Parámetros que intervienen en el desarrollo del método

| Variable | Designación |
|--------------|--|
| γ_k | Peso específico del terraplén |
| φ'_k | Ángulo de rozamiento interno del material granular |
| $E_{s,k}$ | Módulo edométrico del terreno blando |
| t_w | Espesor del estrato de terreno blando |
| h | Altura del terraplén |
| $S_{x,y}$ | Separación axil en una dirección entre columnas de una malla rectangular |
| d | Diámetro de la columna |
| $R_{b,k}$ | Resistencia a tracción del geosintético |

3. ANÁLISIS PARAMÉTRICO

La finalidad del análisis paramétrico es la cuantificación de la influencia de los diferentes parámetros necesarios para el diseño del terraplén reforzado con columnas de mortero (EBGEO), definidos en la Tabla 1.

Se definen unos rangos de valores de los parámetros en base a la experiencia obtenida en los diversos trabajos realizados sobre cimentación de terraplenes en suelos blandos que se pueden observar en la Tabla 2.

Para la realización del análisis paramétrico se ha definido un diseño base de terraplén reforzado con columnas de mortero, que presenta los parámetros que se pueden observar en la Tabla 3.

Tabla 2: Rango de valores de los parámetros que intervienen en el diseño

| Variable | Rango | Unidad |
|--------------|------------------------------|-------------------|
| γ_k | 20 | kN/m ³ |
| φ'_k | 35 – 40 - 45 | ° |
| $E_{s,k}$ | 5000 – 10000 – 20000 - 30000 | KN/m ² |
| t_w | 3 – 5 – 8 – 10 - 12 | m |
| h | 4 – 8 – 10 - 12 | m |
| $S_{x,y}$ | 1.25 – 1.75 – 2.25 – 2.75 | m |
| d | 0.2 – 0.4 – 0.6 – 0.8 | m |
| $R_{b,k}$ | 100 – 200 – 300 | kN/m |

Tabla 3: Valores de los parámetros del diseño base

| γ_k (kN/m ³) | φ'_k (°) | $E_{s,k}$ (kN/m ²) | t_w (m) | h (m) | $S_{x,y}$ (m) | d (m) | $R_{b,k}$ (kN/m) |
|------------------------------------|------------------|-----------------------------------|--------------|------------|------------------|------------|---------------------|
| 20 | 38 | 20000 | 8 | 6 | 1.75 | 0.65 | 200 |

Para el diseño de un terraplén reforzado se realiza el cálculo en ambas direcciones, es decir, un análisis longitudinal en sentido del eje del terraplén y otro transversal al eje del terraplén.

En el análisis de la sección transversal, el método indica que como resultado de la ausencia de soporte lateral por la inclinación del talud se generan tracciones adicionales en el plano de contacto debajo de los taludes del terraplén. Estas tracciones adicionales deberán ser soportadas por el geosintético para transferirlas hacia el eje del terraplén. Es decir, además de la tracción debida al “efecto membrana”, los geosintéticos deben soportar estas tracciones adicionales. Para la determinación de la tracción adicional sobre el geosintético utilizamos el procedimiento que define el método cuando el terraplén se dispone sobre el terreno blando.

3.1. Recomendaciones geométricas

La geometría del conjunto se define de manera que satisfaga una serie de recomendaciones geométricas impuestas por el propio método.

En los primeros cálculos preliminares se observaba una limitación importante en cuanto a la distribución geométrica debida a dichas recomendaciones.

Para definir estas limitaciones se analiza la influencia del diámetro de las columnas con respecto a la separación máxima entre ejes de columnas permitida por el método al aplicar las recomendaciones geométricas. En la Figura 3.1 se representa la relación entre el diámetro de las columnas y la separación máxima entre ejes de columnas para una malla rectangular, donde se interpreta que para diámetros mayores de 0.65 m la ganancia de separación máxima es inapreciable. Por ello podemos decir que el mayor diámetro con cierta eficacia en consideración a la distribución geométrica es el de 0.65 m.

El método considera que la tensión máxima en el refuerzo se concentra en una banda entre dos columnas de mortero próximas de anchura b_{Ers} , donde b_{Ers} es el ancho de la columna que se supone cuadrada. Para columnas redondas de diámetro d se utiliza su ancho equivalente b_{Ers} .

Por lo tanto, este planteamiento abre la posibilidad de la utilización de capiteles sobre las columnas de mortero que presenten el ancho b_{Ers} necesario, pudiéndose ejecutar columnas de menor diámetro siempre que cumplan estructuralmente.

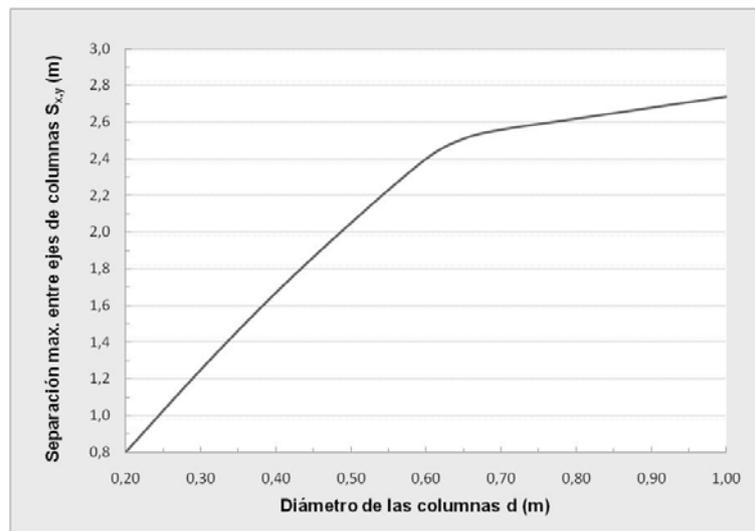


Figura 3.1: Separación máxima entre columnas en función del diámetro de la columna

3.2. Altura del terraplén

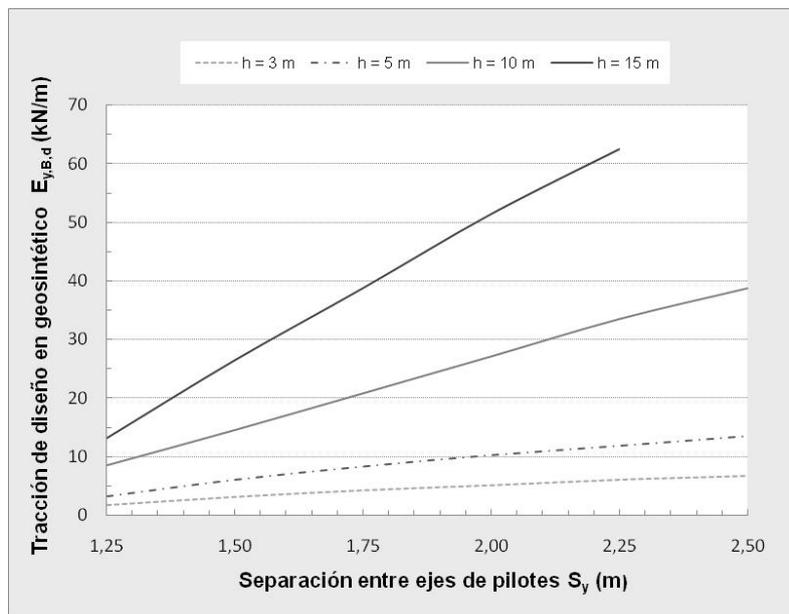
La altura del terraplén equivale a considerar la carga actuante sobre el sistema de tratamiento del terreno, es decir, la carga actuante sobre el geosintético y las columnas de mortero. La distribución de la carga actuante se encuentra influenciada tanto por la separación entre ejes de las columnas como por la resistencia a tracción del geosintético.

Se ha realizado el cálculo con los parámetros de diseño definidos en la Tabla 3, tanto para la sección longitudinal como la transversal. Como se puede observar en la Figura 3.2, en la sección transversal la tracción de diseño que se produce en el geosintético es muy elevada respecto a la sección longitudinal para la misma altura de terraplén. Esto es debido a la consideración de la tracción adicional sobre el geosintético como resultado de la ausencia de soporte lateral por la inclinación del talud. También se puede observar en la Figura 3.2(b) que para una separación entre ejes de columnas de 2,5 m la altura máxima del terraplén es de 5 m, debido a que para dicha altura se genera una tracción de diseño muy cercana a la resistencia de diseño del geosintético que es de 92.48 kN/m.

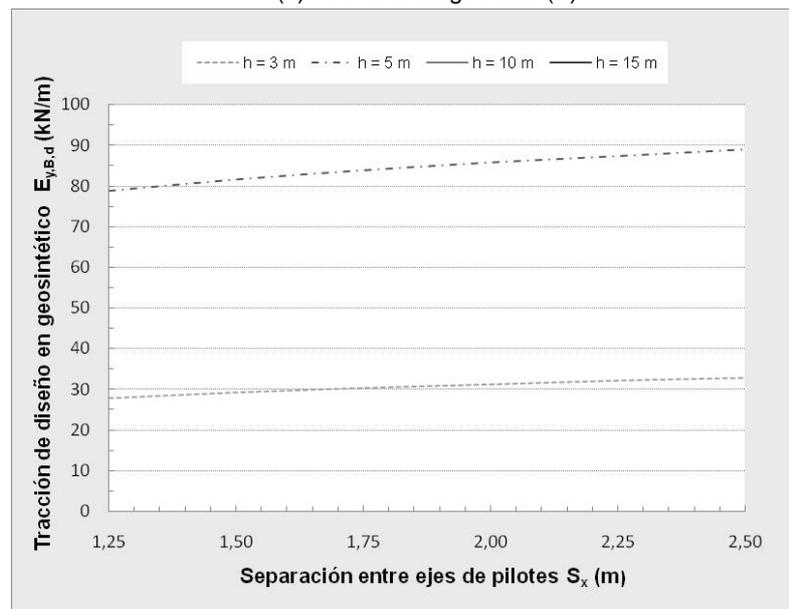
En la sección longitudinal Figura 3.2(a) podemos interpretar que para alturas bajas de terraplén la separación entre ejes de las columnas apenas afecta a la tracción de diseño del geosintético, pero sin embargo, a medida que se aumenta la altura del terraplén (carga) se produce un incremento importante en la tracción de diseño del

geosintético para un mismo rango de separación entre ejes. En base a que la tracción producida para un terraplén de 15 m, que se encuentra lejos de la resistencia del diseño del geosintético, se podrían diseñar terraplenes de mayor altura. Esto es solo a nivel teórico porque nos encontramos limitados por el cálculo en sección transversal.

La máxima separación entre pilotes considera ha sido de 2.50 m, pues es la máxima posible para el diámetro de columna de 0.65 m, como se puede extraer de la Figura 3.1.



(a) Sección longitudinal (Y)



(b) Sección transversal (X)

Figura 3.2: Altura del terraplén en función de la tracción de diseño del geosintético y separación entre ejes de columnas.

De los resultados obtenidos en los cálculos se puede decir que el efecto de la tracción adicional que se genera en el geosintético, como resultado de la ausencia de soporte lateral por la inclinación del talud, es muy condicionante para el diseño del terraplén sobre la resistencia de tracción del refuerzo geosintético.

El método considera la tracción adicional como un empuje activo, sin ningún tipo de apoyo por los pilotes o el terreno blando, que se produce en la altura comprendida entre la parte superior del terraplén y el geosintético, considerando la posible existencia de una sobrecarga sobre el terraplén. El empuje activo se aplica al geosintético directamente como un incremento de tracción ΔE_k . Es un procedimiento muy conservador penalizando en gran medida a la resistencia a tracción del geosintético.

Sería interesante la realización de un estudio en mayor profundidad sobre el procedimiento de cálculo de la tracción adicional que se encuentra fuera del alcance del presente documento, pudiéndose analizar las siguientes hipótesis:

- 1) La consideración de una cierta cohesión en el terraplén.
- 2) La consideración del empuje que ejerce las tierras del talud.
- 3) La definición del tipo de empuje que se produce realmente en ambas caras.

3.3. Ángulo de rozamiento interno de la capa de material granular

Sobre las columnas de mortero se dispone una capa de material granular donde se dispone el refuerzo geosintético. Analizamos la influencia que presenta el ángulo de rozamiento interno de la capa de material granular respecto al refuerzo geosintético.

Se ha realizado el cálculo en la sección longitudinal con los parámetros de diseño definidos en la Tabla 3. Como se puede observar en la Figura 3.3, el ángulo de rozamiento interno del material granular presenta una influencia sobre la tracción de diseño que se produce en el refuerzo geosintético: al aumentar el ángulo de rozamiento interno se reduce la tracción de diseño en el geosintético en un orden del 30%.

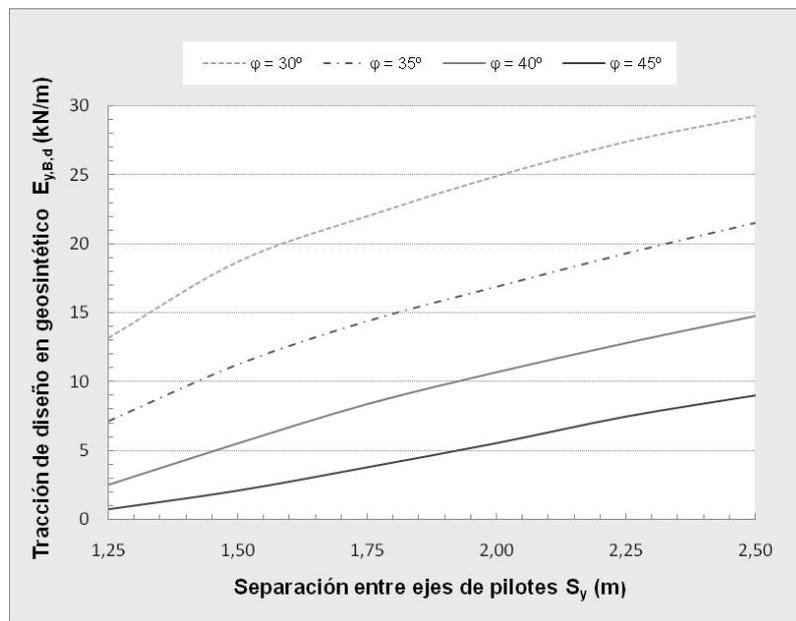


Figura 3.3: Influencia del ángulo de rozamiento interno del material granular

3.4. Coeficiente de balasto del estrato de terreno blando

Según el procedimiento de cálculo, la tensión que se lleva el terreno entre las columnas y el refuerzo geosintético está condicionada por el coeficiente de balasto.

El método estima el coeficiente de balasto para un estrato de terreno blando homogéneo a partir del módulo edométrico del terreno E_s y del espesor de estrato t_w , usando la ecuación (1).

$$-k_s = \frac{\sigma}{s} = \frac{E_{s,k}}{t_w} ; \text{ con } s = \frac{\sigma t_w}{E_{s,k}} \quad \text{Ec. (1)}$$

Se ha realizado el cálculo en la sección longitudinal con los parámetros definidos en la Tabla 3. De la interpretación de la Figura 3.4, se puede deducir que cuanto mayor es el coeficiente de balasto del terreno blando, menor es la tracción de diseño que se produce en el refuerzo geosintético.

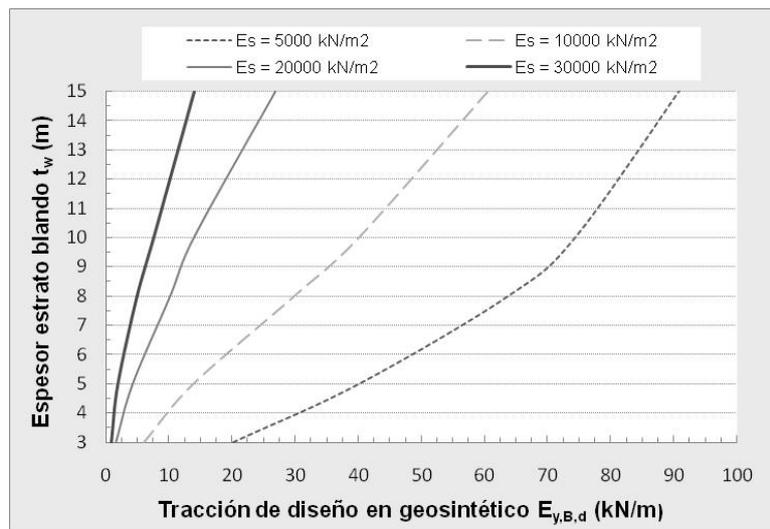


Figura 3.4: Influencia del coeficiente de balasto en la tracción del geosintético

Según cómo define el método la determinación del coeficiente de balasto, el espesor del estrato de terreno blando es muy importante, cuando mayor espesor del terreno blando menor es el coeficiente de balasto.

En cimentaciones se utiliza el siguiente planteamiento: el incremento de presión transmitido al terreno por una cimentación directa disminuye progresivamente en profundidad. A efectos de cálculo, se podrá suponer que la profundidad de interés se circunscribe a puntos del terreno en los que el incremento de la presión vertical resulte mayor o igual al 10% de la presión media, lo que equivale a una profundidad entre 1,5 – 2,5 del ancho de la cimentación.

El lugar geométrico del espacio de suelo así definido se denomina habitualmente “bulbo de tensiones”. El incremento de presión recibido por el suelo más allá de este bulbo será, en la mayoría de los casos, lo suficientemente pequeño como para que sus efectos sean comparativamente despreciables.

Si aplicáramos el “bulbo de tensiones” en nuestro caso, podríamos acotar la profundidad máxima de afección por la carga entre las columnas a una profundidad entre 1,5 - 2,5 veces la separación entre columnas. De esta manera la profundidad de afección se limita a un valor máximo, de modo que para profundidades del estrato mayores el coeficiente de balasto se determina con ese valor máximo, eliminando el efecto que produce una gran profundidad del estrato sobre la determinación del coeficiente de balasto. Es decir, que para mayores profundidades del terreno blando no se reduce el coeficiente de balasto.

4. DETERMINACIÓN DE LA CARGA EN EL GEOSINTÉTICO Y EL TERRENO BLANDO

Una idea básica en el diseño del refuerzo geosintético es la suposición de que existe el “efecto arco” en el terraplén. La carga del terraplén tiende a ser transferida directamente a las columnas de mortero, por lo tanto, la carga en el terreno se reduce. Parte de la carga que no es transferida a las columnas se supone que es llevada por el refuerzo geosintético, llamado “efecto membrana” y parte por el terreno blando como representa el esquema de la Figura 4.1.

El método asume que el “efecto arco” es completo una vez que el terraplén presente una cierta altura. Es decir, todo el peso del terraplén o carga adicional por encima de esta altura se supone que es transferida directamente a las columnas. Por lo tanto, el geosintético no está afectado por estas cargas.

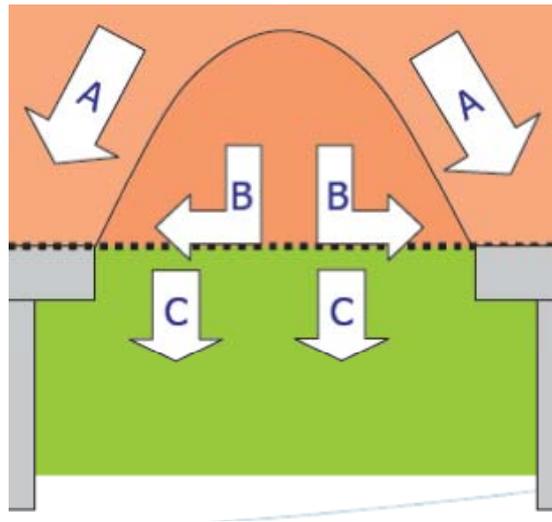


Figura 4.1: Esquema de reparto de cargas

Según el esquema de la Figura 4.1, podemos diferenciar el reparto de la carga total del terraplén en tres cargas parciales:

- 1) Carga A: de la carga total actuante es la que se llevan directamente las columnas de mortero por el “efecto arco” que determina el método ($\sigma_{zs,k}$).
- 2) Carga B: de la carga restante, es la que se lleva realmente el geosintético que trasfiere a las columnas. Esta carga no es determinada por el método.

- 3) Carga C: la carga que se lleva el terreno blando. El método no define un procedimiento específico de cómo debe ser calculada.

El método determina la tensión ($\sigma_{zo,k}$) sobre el terreno por el “efecto arco” sin considerar el geosintético. Esta tensión es la suma de las cargas B y C.

Sería primordial poder determinar la carga real que se lleva el terreno blando (carga C), para poder realizar los estudios de consolidación y la determinación de los asentos que pudiera sufrir el terreno por la tensión actuante sobre él.

Analizando la metodología de cálculo, la determinación de la tracción sobre el geosintético se basa en la deformación que se produce en él. Dicha deformación se multiplica por la rigidez axial del geosintético y obtenemos la fuerza de tracción.

La deformación que se produce en el geosintético depende de la aportación del terreno blando que se encuentra definido en el método por el coeficiente de balasto. La deformación que sufra el geosintético estará en función de la carga que realmente soporta, que dependerá de la carga que soporta el terreno.

Se define un procedimiento para la determinación de la carga que realmente actúa sobre el geosintético (carga B) y la carga que soporta el terreno (carga C):

- 1) Si consideramos que no hubiera suelo, la tensión $\sigma_{zo,k}$ sería soportada por el geosintético produciendo una deformación máxima ε_{max} . Es decir, con un coeficiente de balasto $K_{s,k} = 0$.
- 2) Si consideramos que hubiera suelo, la tensión $\sigma_{zo,k}$ sería soportada una parte por el geosintético y otra parte por el terreno, produciéndose una deformación en el geosintético que estará en función del coeficiente de balasto del terreno $K_{s,k} \neq 0$.
- 3) Con una relación entre deformaciones y tensiones podemos determinar la tensión que realmente se lleva el geosintético.
- 4) La tensión que se lleva el terreno sería la diferencia entre la tensión $\sigma_{zo,k}$ y la tensión que se lleva el geosintético, considerándola como una tensión media.

Se ha realizado el cálculo para la sección longitudinal con los parámetros definidos en la Tabla 3 aplicando el procedimiento descrito antes, obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 4. Para obtener la deformación máxima del geosintético no se tiene en consideración el efecto del terreno $K_{s,k} = 0$, siendo necesario disminuir la altura del terraplén hasta 2.80 m para que el geosintético cumpliera a tracción.

Tabla 4: Resultados obtenidos de los cálculos aplicando el procedimiento descrito para la determinación de la carga actuante sobre el terreno.

| E_s (kN/m^2) | t_w (m) | K_s (kN/m^3) | $E_{M,k}$ (kN/m) | $\sigma_{z,o}$ (kN/m^2) | ϵ (%) | Carga B (kN/m^2) | Carga C (kN/m^2) |
|-----------------------|--------------|-----------------------|-------------------------|--------------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------------|
| - | - | 0 | 66.94 | 20.62 | 3.55 | 20.62 | 0 |
| 10000 | 3 | 3333 | 1.63 | 20.62 | 0.09 | 0.52 | 20.10 |
| | 5 | 2000 | 4.40 | 20.62 | 0.23 | 1.34 | 19.28 |
| | 8 | 1250 | 9.51 | 20.62 | 0.50 | 2.90 | 17.72 |
| | 10 | 1000 | 12.49 | 20.62 | 0.66 | 3.83 | 16.79 |
| | 12 | 833 | 15.74 | 20.62 | 0.83 | 4.82 | 15.80 |
| | 15 | 667 | 22.18 | 22.18 | 20.62 | 1.17 | 6.80 |

De una manera más visual se puede observar en la Figura 4.2 que a mayor coeficiente de balasto que presente el terreno blando se reduce la carga sobre el geosintético, a la vez que aumenta la carga sobre el terreno blando.

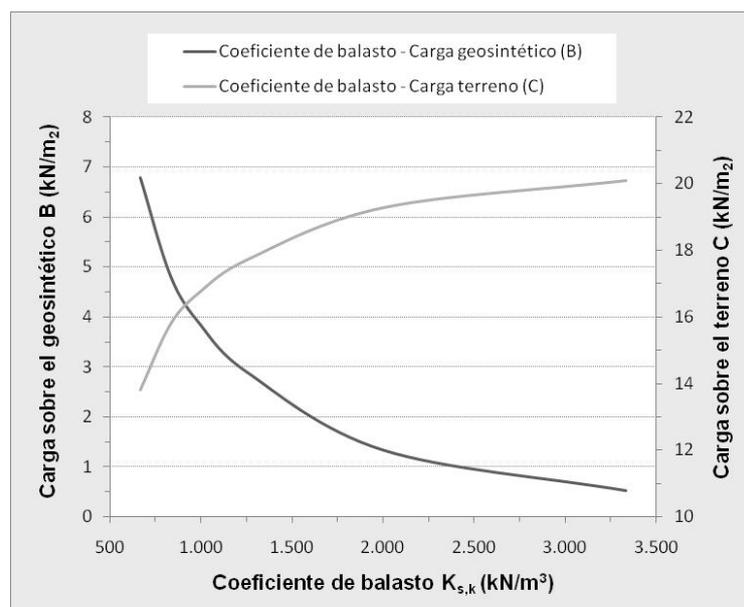


Figura 4.2: Influencia del coeficiente de balasto en la tensión sobre el geosintético y el terreno

5. CONCLUSIONES

A lo largo de este documento se analiza el método analítico de diseño de terraplenes reforzados sobre columnas de mortero, denominado método alemán EBGeo. De su análisis podemos extraer una serie de conclusiones que a continuación paso a exponer:

La geometría del conjunto se define de manera que satisfaga una serie de recomendaciones geométricas, que definen para diámetros mayores de 0.65 m que la ganancia de separación máxima es inapreciable, siendo el mayor diámetro con cierta eficacia.

En función del planteamiento que presenta el método es posible la utilización de capiteles sobre columnas de mortero de menor diámetro siempre que cumplan estructuralmente.

El efecto de la tracción adicional que se genera en el geosintético en la sección transversal, como resultado de la ausencia de soporte lateral por la inclinación del talud, es muy condicionante para el diseño del terraplén sobre la resistencia de tracción del refuerzo geosintético, limitando la ganancia de altura del terraplén.

Según se desarrolla en el método la carga que se lleva el terreno entre las columnas y el refuerzo geosintético está condicionada por el coeficiente de balasto. Del análisis podemos extraer que cuanto mayor es el coeficiente de balasto del terreno blando, menor es la tracción de diseño que se produce en el refuerzo geosintético.

Aplicando el concepto de “bulbo de tensiones” podríamos acotar la profundidad máxima de afección por la carga entre las columnas. De esta manera, limitaríamos la reducción del coeficiente de balasto del terreno blando para mayores profundidades, reduciendo la tracción de diseño en el refuerzo geosintético.

En el presente documento se ha definido un procedimiento para determinar la carga real que se lleva el terreno, para poder realizar los estudios de consolidación y la determinación de los asientos.

BIBLIOGRAFIA

Alexiew, D., 2002: *Piled embankments design: methods and case studies. (Progettazione di rilevati poggianti su pali: metodologie ed esempi di casi reali)*. Proc. XV Italian Conference on Geosynthetics, Bologna, 16 October 2002

BS 8006, 1995: *Code of Practice for Strengthened/Reinforced Soils and Other Fills*. British Standard Institution.

Cahier des charges particulier d'inclusions rigides réalisées par Soletanche-Bachy-Pieux. (2009).

Combarieu, O. (1988). "*Fondations superficielles sur sols améliorés par colonnes rigides verticales*", publié dans le n° 53 de la Revue Francaise de géotechnique et "Calcul d'une fondation mixte" publié en 1988 par le LCPC.

Combarieu, O. (1988). *Amélioration des sols par inclusions rigides verticales. Application à l'édification de remblais sur sols mediocre*. Revue Francaise de Géotechnique, vol. 44.

Hewlett, W. J., Randolph, M. F., Aust, M. I. E. (1988): *Analysis of piled embankments*. Ground Engineering Vol. 21, pp. 12-17.

Huat, B. B. K., Craig, W. H. and Ali, P. (1994) *The Mechanics of Piled Embankment*. Proceedings, International Conference on Design and Construction of Deep Foundations, 1069-82.

Jiménez Salas, J. A, (1976). *Geotecnia y Cimientos II. Mecánica del Suelo y de las Rocas*. Ed. Rueda.

Jiménez Salas, J. A. (1989). *Introducción al proyecto de pilotajes. Curso sobre pilotes y cimentaciones profundas*. Centro de estudios y experimentación de obras publicas.

Jones, C.J.F.P., Lawson, C.R., Ayres, D.J. 1990, *Geotextile reinforced piled embankments, Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, Den Hoedt (ed.) © 1990 Balkema, Rotterdam, ISBN 90 6191 119 2, pp 155-160

Kempton. G., Russell, D., Pierpoint, N. D. and Jones, C. J. (1998). *Two – and three-dimensional numerical analysis of the performance of piled embankments*. 6th ICG, Atlanta, pp. 767-772.

Kempfert, H.-G., Zaeske, D., Alexiew, D., 1999: *Interactions in reinforced bearing layers over partial supported underground*. Proc. of the 12th ECSMGE, Amsterdam, 1999. Balkema, Rotterdam, 1999, pp. 1527-1532

Kempfert, H.-G., Göbel, C., Alexiew, D., Heitz, C. (2004): *German Recommendations for Soil Reinforcement above Pile-Elements*. EuroGeo3, Third Geosynthetics Conference, Munich, Volume I , pp. 279-283.

Kempfert, H.-G, Göbel, C., Alexiew, D., Heitz, C., 2008: *German Recommendations for reinforced embankments on pile-similar elements*. Preceeding of the 4^o Asian Regional Conference on Geosynthetics, Shanghai China, 17-20 June 2008.

Lorente de Nó, C. *Cimentaciones con pilotes pasivos*. Curso sobre métodos modernos de mejora del terreno.

Marston, A. and Anderson, A. O. (1913). *The theory of loads on pipes in ditches and test of cement and drain tile and sewer pip*. Bulletin No. 31, Iowa engineering Experiment Station, Ames, Iowa

Ooi, T. A., Chan, S. F., and Wong, S. N. (1987) *Design, Construction, and Performance of Pile Supported Embankments*. 9th Southeast Asian Geotechnical Conference: 2-1 to 2-12.

Ortuño, L y Murillo, T., *“Vibroflotación. Columnas de grava”*, Curso de mejora del terreno de cimentación y compensación y control de asentos. Intevia, 2010.

Priebe, H. J. (1976). *An evaluation of settlement reduction in soil improved by vibro replacement*. Bautechnik, nº 53.

Priebe, H. J. (1995). *The design of vibro replacement*. Ground Engineering

Reid, W. M. and Buchanan, N. W. (1984). *Bridge approach support piling. Piling and Ground Treatment*, Thomas Telford, London: 267-74.

Satibi, S., Van der Meij, R., and Leoni, M. (2007). *Piled embankments literatura review and required further research using numerical analysis*. Report No. 34, IGS, Universität Sututtgart.

Smith, Miriam E, (2005). *Design of bridging layers in geosynthetic-reinforced column-supported embankments*. Doctoral Thesis. The Virginia Polytechnic Institute and State University. Chapter 3.

The German Geotechnical Society's. Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements – EBGeo. Wiley-VCH Verlag GmbH, 2011.

Van Eekelen, S., Bezuijen, A. & Alexiew, D. (2008). *Piled embankments in the Netherlands, a full-scale test, comparing 2 years of measurements with design calculations*. EuroGeo4: 4th European Geosynthetics Conference, Paper No. 264.

Zaeske, D. (2001): *Zur Wirkungsweise von unbewehrten und bewehrten mineralischen Tragschichten über pfahlartigen Gründungselementen*. Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, Heft 10.

Zaeske, D., Kempfert, H.-G. (2002): *Berechnung und Wirkungsweise von unbewehrten und bewehrten mineralischen Tragschichten auf punkt- und linienförmigen Traggliedern*. Bauingenieur, Volume 77, February 2002.