

# Soil Nailing Verde

**P. Salvá**

Ing. Civil, VIECO Ingeniería de Suelos Ltda., Medellín

**J. F. Mesa**

Ing. Civil, ICC Ltda., Medellín

## Resumen

El “soil nailing verde” o “suelo pernado verde” es una alternativa al sistema convencional de suelo pernado, en el cual, en lugar de emplear una piel en concreto, se vinculan los pernos a través de vigas y mallas de geotextil, para permitir un engramado posterior. De esta forma se obtiene un menor impacto visual de los cortes y una mejor estética en áreas urbanas. Sin embargo, esta modificación al sistema convencional implica cambios en la interacción entre pernos, suelo y piel que modifica las fuerzas y empujes considerados en el diseño. En este trabajo se analiza un caso típico empleando modelos de elementos finitos, con base en cuyos resultados se establecen una serie de criterios para el diseño, resumiendo los aspectos que diferencian este sistema alternativo con relación a los construidos con piel de concreto.

## Introducción

El suelo pernado o “soil nailing” es una técnica de refuerzo in situ de suelos que ha sido empleada en cortes y estabilización de terrenos inestables, con la primera experiencia en Versalles, Francia en 1972, seguida por Alemania y Reino Unido. En Estados Unidos la FHWA propició su difusión para contenciones en autopistas, publicando una serie de traducciones de las investigaciones europeas en los 90s. En Colombia, las primeras experiencias fueron reportadas en Bogotá por Moya (1993), y desde 1995, en Medellín se han construido un número significativo de este tipo de contenciones.

Consiste en el refuerzo del terreno mediante inclusiones pasivas, separadas a cortas distancias, en un procedimiento de excavación o corte descendente. De esta forma se crea una sección reforzada que es estable por sí misma y que es capaz de atender los empujes del suelo posterior.

Tradicionalmente consta de una serie de pernos distribuidos a distancias variables entre 1 y 3 m, vinculados a una placa de concreto (piel) de espesores variables entre 10 y 25 cm. El sistema constructivo consiste en adelantar cortes por fajas de alturas moderadas, en las que el suelo se presente estable, al menos temporalmente, y en las cuales se perforan e instalan los refuerzos, construyendo el tramo de piel, y continuando en forma similar en un proceso descendente.

De esta forma se restringen los esfuerzos del desconfinamiento lateral producido por la excavación, situación que limita las deformaciones.

Aunque se han desarrollado una serie de pieles vistosas, la alternativa de reemplazar el concreto por engramados se presenta como la más conveniente en términos estéticos.

### **Características Particulares del “Soil Nailing Verde”**

El soil nailing verde tiene su aplicación en la estabilización de cortes de alturas importantes, en los cuales se puede tender el talud para permitir el engramado. Esta situación es muy común hacia los linderos de urbanizaciones en la zona de laderas, o entre viviendas, donde la habilitación de áreas verdes planas para cada una de ellas, origina taludes que requieren algún sistema de contención para garantizar su estabilidad.

El aspecto particular del soil nailing verde es la eliminación de la piel de concreto, que se cambia por una serie de vigas y mallas de refuerzo en geotextil o geomalla. Adicionalmente se requieren pendientes menores en la cara del talud, debido a la necesidad de su posterior engramado, con pendientes máximas hasta del 1h:2v.

La falta de una piel y taludes con menor pendiente, hacen que los criterios de diseño tengan sus particularidades, aspectos que se investigan en este trabajo para un caso típico.



**Figura 1 – Vistas de dos ejemplos de soil nailing verde. Izquierda terminado y a la derecha en proceso de construcción.**

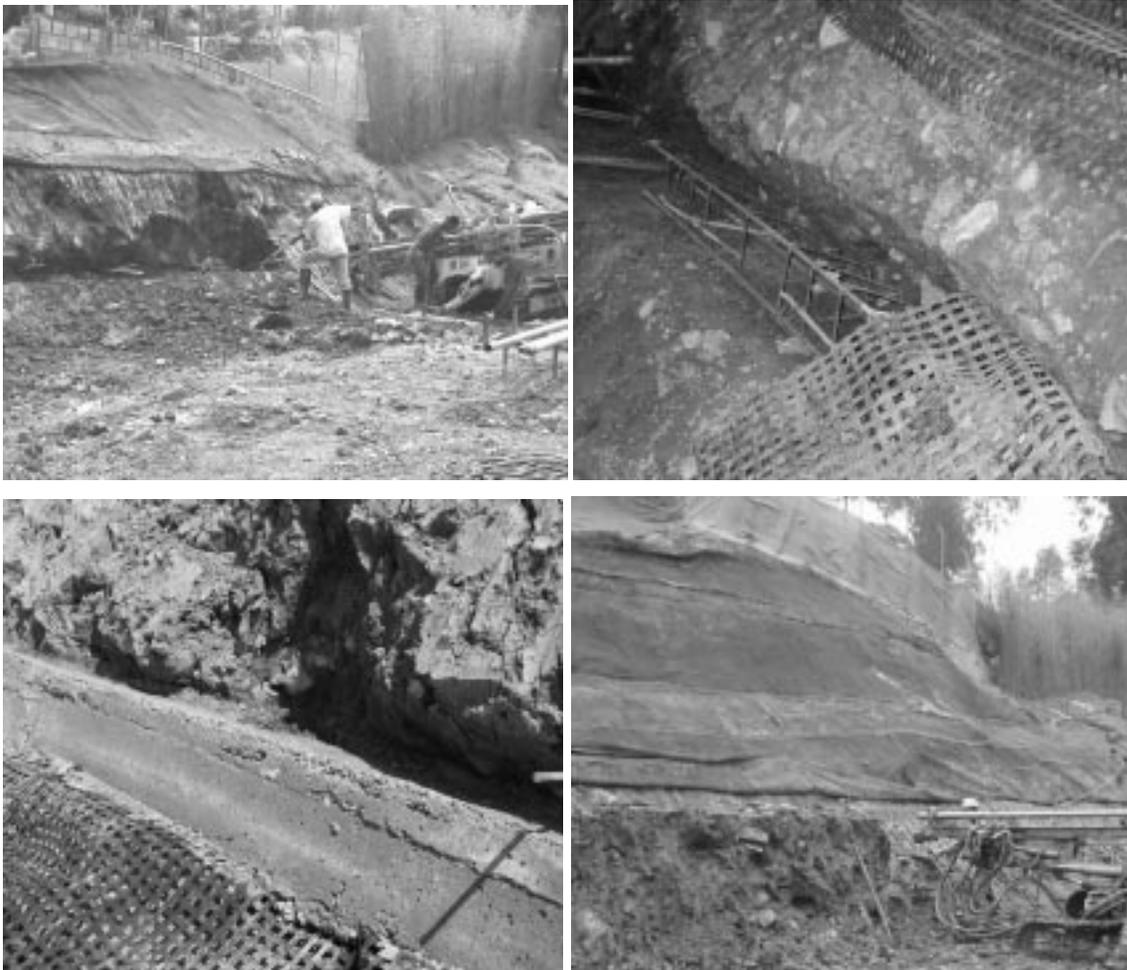
### **Sistema Constructivo**

El proceso constructivo del suelo pernado verde consta de las siguientes etapas:

1. Se inicia la excavación con pequeños cortes, de 1.5 a 2.5 m de altura, y pendientes entre 1h:1v hasta 1h:2v, con el fin de permitir su futuro engramado.
2. A continuación, se perforan pequeños orificios en el terreno, (diámetros entre 10 y 15 cm) con longitudes del orden del 70 al 90% de la altura total de la excavación, con inclinaciones entre 10 y 15° con la horizontal. Estas

perforaciones se realizan a distancias entre 1 y 2 m, en función de las características del suelo y las cargas por encima del talud.

3. Instalación del refuerzo, normalmente barras de acero corrugado en diámetros que van desde #4 a #8 (12 y 25 mm). La cantidad de refuerzo depende de las fuerzas obtenidas en los análisis.
4. Vaciado de una lechada de cemento, normalmente con relaciones agua-cemento entre 0.4 y 0.6.
5. Instalación del drenaje, mediante drenes de penetración horizontal, en general, de la misma longitud de los pernos.
6. Se labra en coincidencia con los ejes de pernos una viga que los vincule, instalando del refuerzo, formateado y vaciado del concreto. Se deja anclada a la viga la malla entre vigas.



**Figura 2 – Proceso constructivo del soil nailing verde**

El proceso se continúa en forma similar, cortando hacia abajo en fajas hasta alcanzar el nivel final de excavación. El engramado se realiza al alcanzar el nivel inferior de excavación.

## Geometría de Análisis

Se analiza una geometría típica para estos cortes, que considera una excavación de 9 m de altura con talud 1h:2v (63.4° con la horizontal), y una corona plana. Se considera un suelo limoso con ángulo de fricción 27° y cohesión 5 kPa, peso unitario de 18 kN/m<sup>3</sup> y una capacidad de extracción de 30 kN/ml que representa una capacidad admisible por fricción en los pernos de 40 kPa (diámetro 0.12 m y factor de seguridad 2).

De acuerdo con las condiciones de resistencia al corte y geometría del talud, éste sería inestable, con falla aproximadamente a los 5 m de altura, por lo tanto se diseña un refuerzo en suelo pernado.

**Sh=1.5m**

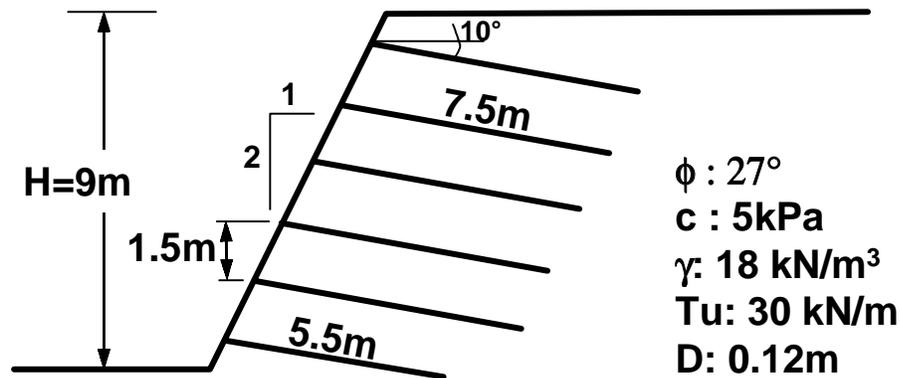


Figura 3 - Geometría y características del suelo pernado evaluado.

Para seleccionar la longitud de los pernos y su distribución, se empleó el programa GStabl7, variante del tradicional programa de estabilidad Stabl5, Carpenter (1985), que permite calcular factores de seguridad en superficies de falla poligonales y circulares, incorporando el efecto estabilizador de los pernos, considerando la capacidad por fricción, capacidad estructural (sección de acero y esfuerzo admisible) y la capacidad nominal del nudo perno-piel. Para estos análisis se consideró nula la capacidad nominal en el nudo.

## Análisis Numéricos

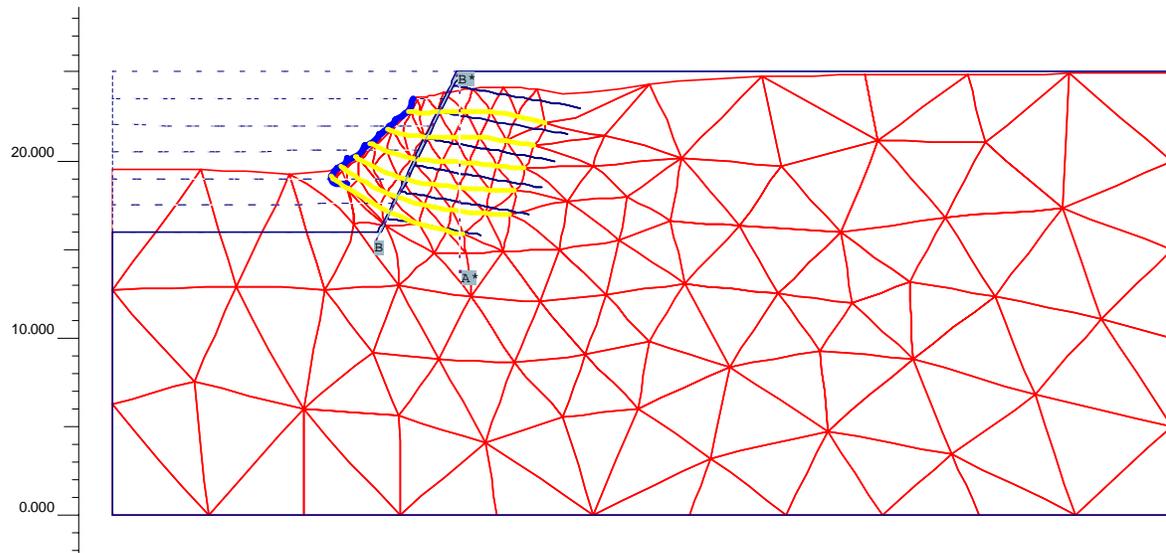
Para evaluar las fuerzas en los pernos y los empujes se elaboró un modelo en 2D de elementos finitos empleando el programa PLAXIS v7.2. Este modelo se orientó a comparar los resultados obtenidos considerando la piel en concreto y eliminándola completamente.

Los análisis se adelantaron en forma paramétrica variando entre la condición sin piel hasta una piel de 25 cm.

Se empleó la malla de la Figura 4 y los parámetros de la Tabla 1. En el cálculo se simuló el proceso constructivo en fajas, correspondiendo cada fase de cálculo a: 1) excavación, 2) instalación del perno y piel (en los casos con piel), 3) excavación siguiente, y así sucesivamente hasta alcanzar la excavación de 9 m. Además, se incluyó una fase adicional para evaluar el factor de seguridad al final de la excavación.

**Tabla 1- Parámetros análisis con elementos finitos**

Descripción	Elemento	Ripo	Parámetros								
suelo limos	continuo	modelo HR	$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$	$E_{50ref} = 20000 \text{ kPa}$	$E_{oedref} = 32100 \text{ kPa}$	$m = 0.5$	$C = 5 \text{ kPa}$	$\phi = 27^\circ$	$\delta = 6^\circ$	$\nu = 0.25$	$R_{inter} = 1$
piel (16cm)	vigas	elástico	$EA = 4.5E6 \text{ kN/m}$	$EI = 10000 \text{ kPa/m}$	$w = 3.84 \text{ kN/m/m}$	$\nu = 0.20$					
pernos	geotextil	elástico	$EA = 6.8E4 \text{ kN/m}$	$\nu = 0$							

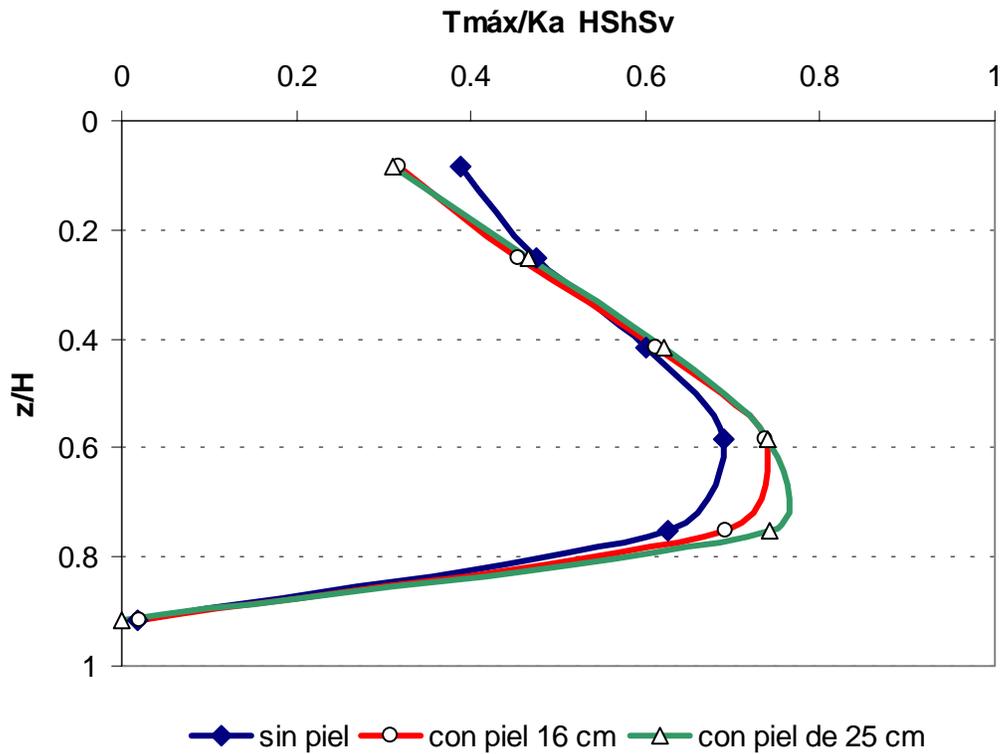


**Figura 4 – Malla deformada del modelo de EF al final de la excavación**

### **Análisis de fuerzas**

Se observa una mayor concentración de las fuerzas hacia los 2/3 la altura de la excavación, aumentando en función de la rigidez de la piel. Sin embargo, las variaciones en las condiciones de borde del talud no implican cambios substanciales en las solicitaciones de los pernos.

La Figura 5 ilustra las fuerzas normalizadas (fuerza máxima del perno relacionada por el coeficiente de empuje activo, el peso unitario del suelo y la separación horizontal y vertical de los pernos) con relación a la profundidad normalizada (relación profundidad-altura máxima de excavación).

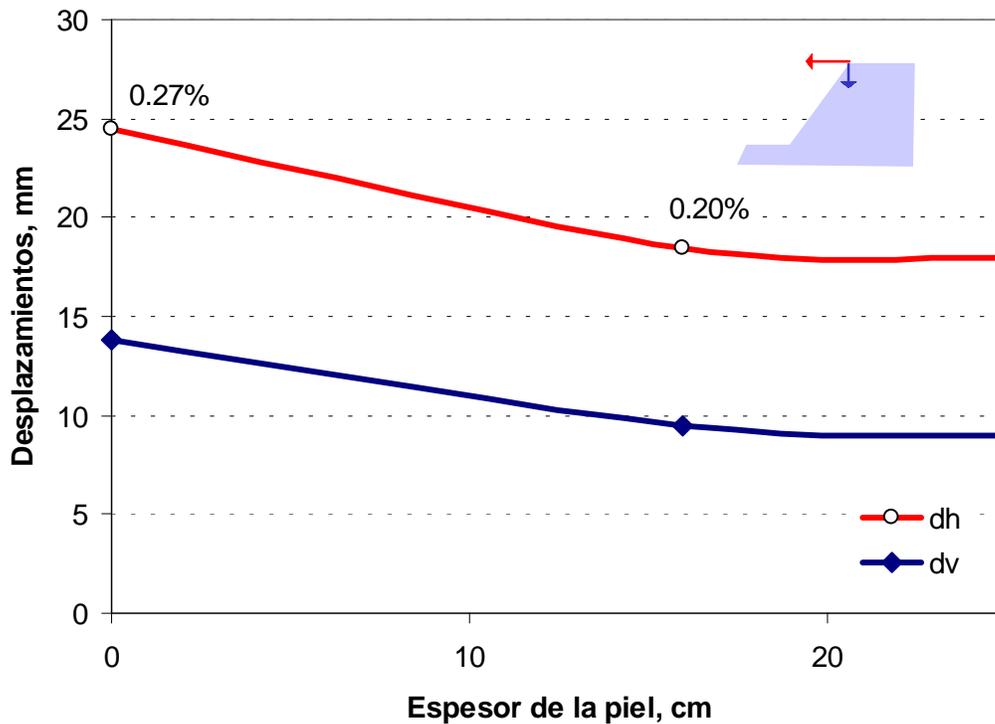


**Figura 5 – Distribución de fuerzas normalizadas con relación a la profundidad de los pernos.**

Estos resultados muestran una distribución de fuerzas algo diferente a las presentadas en mediciones realizadas para suelo pernado vertical (FHWA, 1996), aunque los valores se encuentran dentro de los rangos del 40 al 100% del empuje activo.

### **Efecto de la piel en los desplazamientos**

Los desplazamientos horizontales calculados en la corona del muro se encuentran entre el 0.2 y 0.3% de la altura máxima de excavación siendo mayores en el caso de construcción sin piel. Los desplazamientos verticales en la corona representan aproximadamente el 50% del desplazamiento horizontal.

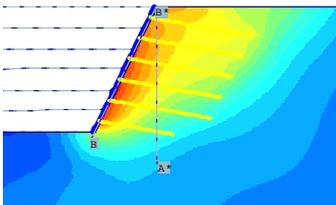
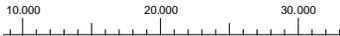
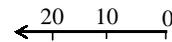


**Figura 6 – Desplazamientos calculados en la corona del corte en función del espesor de piel**

Un aspecto evidenciado en el modelo y observado en la práctica, es la generación de una depresión en coincidencia con la finalización de los pernos (Véase Figura 4 – Malla deformada).

Otro aspecto, de buena coincidencia con las observaciones de campo, es que las deformaciones horizontales medidas con inclinómetros muestran desplazamientos ligeramente por debajo del nivel de excavación, y con un mayor desplazamiento hacia la parte alta, disminuyendo hacia la zona inferior del corte (Figura 7).

Desplazamiento  
horizontal, mm



Nivel  
excavación

Figura 7 – Simulación de desplazamientos horizontales medidos con inclinómetro

## Diseño de Mallas

El sistema de pernos pasivos debe satisfacer la estabilidad global del talud, sin embargo la estabilidad local dentro de la retícula de pernos debe ser garantizada por las mallas entre vigas.

La determinación de la fuerza de tracción para el diseño de las mallas en geotextil se debe evaluar a partir de la estabilidad local entre pernos, que evaluada en los modelos de elementos finitos indica solicitaciones crecientes hacia la parte inferior del talud, con valores máximos del 20% de empuje activo o del 26% de la tensión máxima de los pernos.

Torres Vila (2003) propone un modelo simplificado para la evaluación de estos empujes, de acuerdo con la Figura 8. Consiste en evaluar el equilibrio de una cuña de terreno ( $n$ ) limitada por la cuadrícula de pernos y el plano de deslizamiento con ángulo  $\alpha_{sd}$ , teniendo en cuenta las acciones que ejercen sobre tal cuña el bloque superior de espesor  $h$  (entre el 0.3 y 0.35H, siendo H la altura del talud), altura  $S_y$  y ancho  $S_x$ , con lo cual se obtiene un valor de  $Q_n$ . El proceso se repite para las cuñas inferiores hasta que el valor de  $Q_{n+i}$  se estabiliza, siendo éste el soporte necesario que debe proveer la malla combinada con los pernos pasivos.

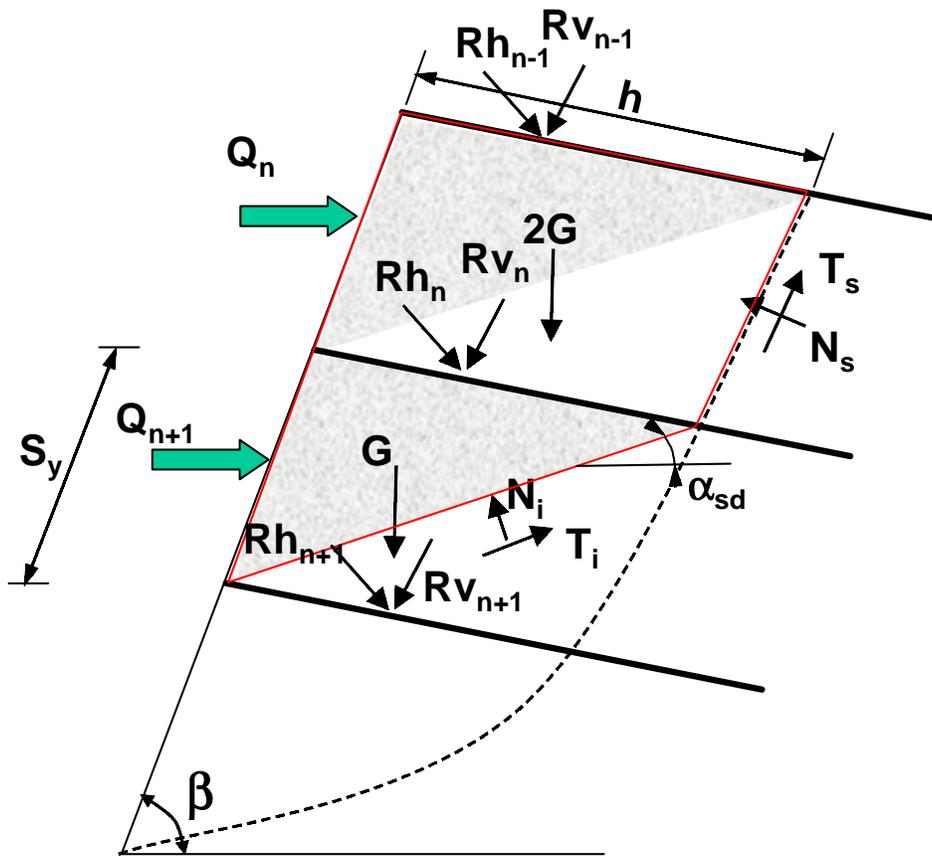
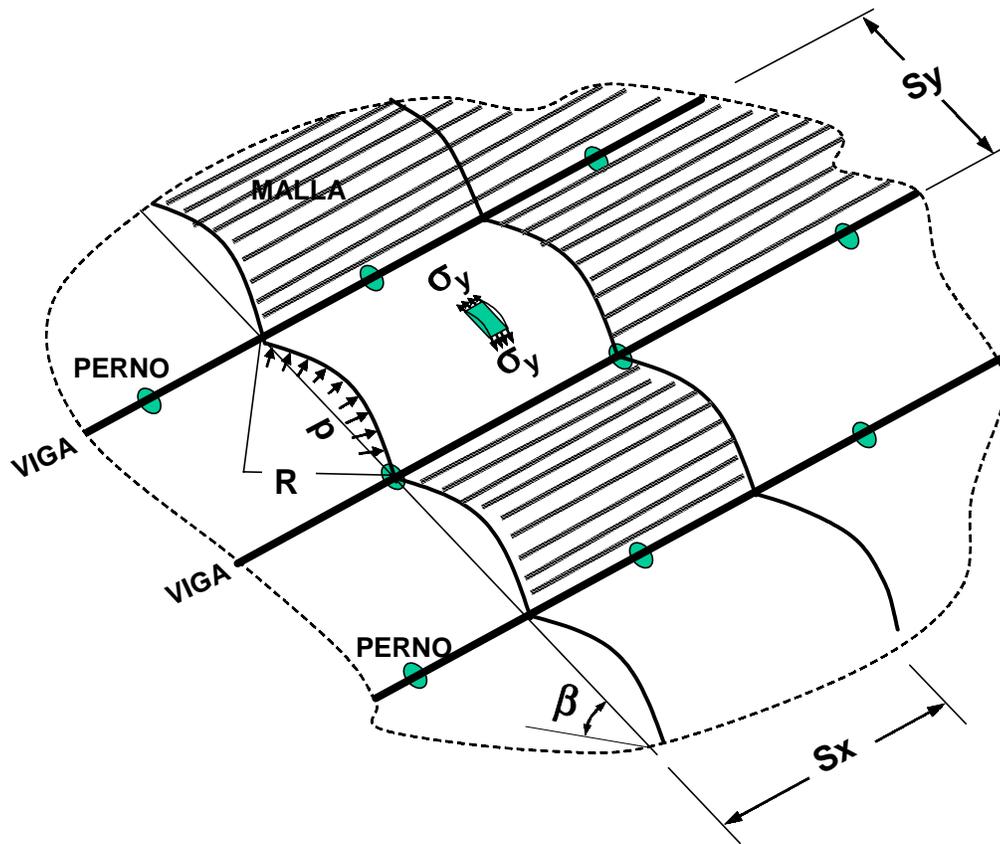


Figura 8 – Esquema de análisis obtención de empujes sobre la malla

Las mallas se encuentran arriostradas transversalmente a su dirección principal por medio de las vigas continuas que enlazan los pernos, y hacia donde se transfieren las tensiones  $\sigma_y$ . La deformada de las mallas corresponde a un sector cilíndrico, como se indica en la Figura 9.



**Figura 9 – Esquema del modelo de análisis**

Si se asume una distribución radial y uniforme de la carga  $Q_n$  transmitida por el terreno entre vigas, se puede recurrir a soluciones de la teoría de elasticidad, donde el desplazamiento  $\Delta_z$  es función de la presión unitaria aplicada por el terreno, de la separación entre pernos y el módulo elástico de la malla, como se expresa en la ecuación (1).

$$\Delta_z := \sqrt{\frac{S_y^2 \cdot \left( \frac{24 p \cdot S_y}{E_{yc}} \right)^{\frac{2}{3}}}{64 - \left( \frac{96 \cdot p \cdot S_y}{E_{yc}} \right)^{\frac{2}{3}}}} \quad (1)$$

Donde:

$p$ : empuje en dirección perpendicular a la membrana ( $\text{kN/m}^2$ )  
 $\Delta_z$ : desplazamiento en el centro del sector de membrana analizado (m)  
 $E_{yc}$ : módulo de elasticidad confinado ( $\text{kN/m}^2$ )  
 $S_y$ : separación entre vigas de refuerzo (m)

Una vez calculado el desplazamiento  $\Delta_z$  por relaciones geométricas de la Figura 10, es posible determinar los esfuerzos de tracción  $\sigma_y$  en el geotextil.

$$\varepsilon_y := \frac{(A - S_y)}{S_y} \quad (2)$$

$$\sigma_y := E_{yc} \cdot \varepsilon_y \quad (3)$$

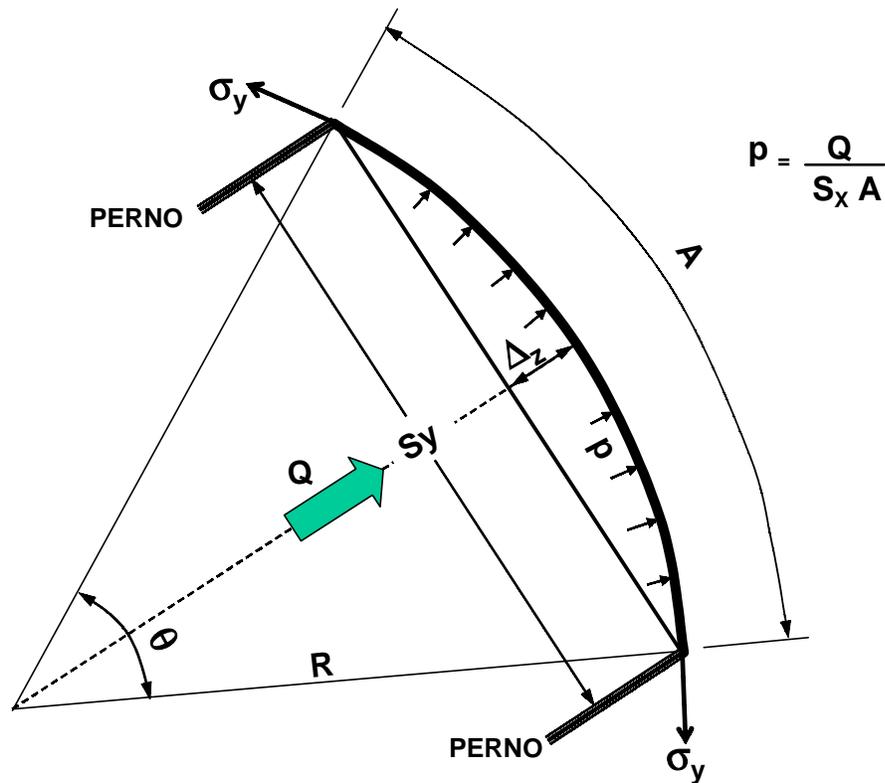


Figura 10 - Geometría de distribución de fuerzas en una sección

## Conclusiones

- En este artículo se presentaron las características particulares de construcción y diseño del soil nailing verde, como una alternativa válida al sistema tradicional de soil nailing con piel en concreto.
- La eliminación de la piel de concreto no implica cambios significativos en las fuerzas de los pernos. Estas fuerzas se mantienen dentro de los rangos recomendados para soil nailing en la literatura y manuales de diseño (entre el 40 y 100% el empuje activo).
- La falta de una piel de concreto continua, incrementa las deformaciones cerca del 0.1%H en la corona del talud. Este aspecto es sensible a las condiciones particulares del terreno, y debe evaluarse en cada situación.
- En principio, los empujes para el diseño de mallas entre vigas alcanzan el 20% del empuje activo. Se presentó una metodología simplificada para la evaluación de estos empujes y el diseño de la malla.
- El sistema de "soil nailing verde" presenta ventajas estéticas respecto al convencional, sin cambios importantes en las condiciones de diseño, con una reducción de costos debido a que no se requiere la construcción de la piel de concreto.

## Referencias

- Byrne, R. J., Cotton, D., Porterfield, J., Wolschlag, C. y Ueblacker, G. (1996). "Manual for design and construction monitoring of soil nail wall" Report No FHWA-SA-96-069, U.S. Department of Transportation.
- Carpenter, J. R. (1985). "STABL5 – The Spencer Method of Slices: Final Report", Joint Highway Research Project No JHRP-85-17, School of Civil Engineering, Purdue University, West Lafayette, Indiana.
- Gässler, G. (1993). "Discussion leader's report: Slope and excavations" Earth Reinforcement Practice (Edited by Ochiai, Hayashi and Otami). Calkema, Rotterdam, 955-960.
- Gregory, G. H. (2001). "Program Manual GSTABL7", Oklahoma, USA.
- Recommendations Clouterre (1991). "Soil nailing recommendations" – 1991 (English translations by Federal Highway Administration). Report No FHWA-SA-93-093.
- Moya, J. (1993). "Sistemas de contención con suelo empernado", Segundo Encuentro Nacional de Ingenieros de Suelos y Estructuras, Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá
- Salvá, P. (1996). "Experiencias de soil nailing en Medellín", 1er Seminario-Taller Internacional de Túneles y Excavaciones en Suelos Blandos", Universidad Nacional de Colombia, Santafé de Bogotá.
- Torres Vila, J. A. (2003). "Flexible membranes of high strength steel for slope stabilization", Proceedings 12<sup>th</sup> Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Cambridge, MA, USA.
- Vieco, B., Salvá, P. (1998). "Soil nailing: Alternativa de contención para excavaciones", VII CCG 1998, Sociedad Colombiana de Geotecnia, Santafé de Bogotá.