

# Verificación del revestimiento estructural flexible en un Soil Nailing Bios: Best improvement of slopes

**Giorgio GIACCHETTI**, Consultant - Belluno - Italy  
**Roberto MAJORAL**, A. Bianchini Ingeniero, S.A. - España  
**Paola BERTOLO**, Officine Maccaferri SpA - Bologna - Italy

El revestimiento estructural flexible se emplea desde hace muchos años en la consolidación de laderas con vegetación y poca pendiente, pero los proyectistas todavía no disponen de un método de cálculo simple y coherente con la filosofía del Soil Nailing. Para llenar este vacío Maccaferri ha desarrollado el sistema BIOS. Este método de cálculo permite una verificación rápida del revestimiento estructural flexible en la praxis ingenieril.

En los últimos años se han utilizado, cada día con mayor frecuencia, las mallas de alambre para el revestimiento superficial en un Soil Nailing. El sistema, conocido en la literatura como Revestimiento Estructural Flexible (CIRIA, 2005), presenta sin duda ventajas de carácter estético y puede ser utilizado con éxito para reforzar laderas, en general con vegetación. Sin embargo esta tecnología todavía no está madura como lo demuestra la falta de enfoques válidos para el proyecto y, con frecuencia, la utilización a veces inadecuada de las mallas metálicas o redes. Esta nota analiza el comportamiento general del revestimiento estructural flexible y propone un nuevo enfoque para el cálculo: el sistema BIOS (Best Improvement Of Slopes) que ha sido ya ampliamente utilizado por Maccaferri para el diseño de taludes de excavación y la consolidación de laderas naturales.

## El concepto del Soil Nailing

El objetivo del Soil Nailing es mejorar la estabilidad del suelo cuando se presentan

condiciones de estabilidad desfavorables (inestabilidad). La estabilidad se consigue mediante la inserción de barras de refuerzo en el terreno, que se inyectan y así pasan a ser solidarios al terreno en toda su longitud (bulones). Los bulones movilizan las fuerzas de fricción en toda su longitud y contribuyen a mejorar las condiciones de estabilidad cuando se producen deformaciones en el terreno (Schlosser, F. y Al, 2002; R. Soulas, 1991, BS 8006; Byrne, RJ y Al, 1998). Por tanto, las fuerzas de fricción estabilizadoras se generan pasivamente con el inicio de la ruptura del terreno. La frecuencia y la longitud de los bulones deben ser debidamente calculadas de conformidad con la norma EN 1997 I.

La protección de la superficie expuesta del terreno, reforzado por los bulones, se logra mediante el revestimiento superficial (facing), que tiene como objeto contener el terreno comprendido entre los bulones, prevenir la erosión y asumir una función estética. Obviamente, el revestimiento superficial sólo puede colaborar con la acción pasiva de los bulones.

## Aplicación del revestimiento superficial flexible

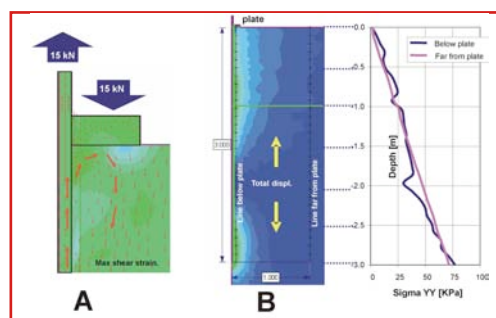
En los frentes de excavación subverticales el recubrimiento superficial siempre se realiza con una estructura rígida (Hard Facing – Por ejemplo: hormigón proyectado (gunita) o elementos prefabricados) que consiguen controlar de manera óptima todas las deformaciones inducidas por las variaciones del estado tensional.

En las laderas inclinadas hasta aproximadamente 60 grados, el revestimiento superficial se puede realizar mediante estructuras flexibles (Flexible Facing – Por ejemplo: malla metálica o geocompuestos con malla metálica). El ámbito de aplicación preferente del revestimiento estructural flexible lo constituyen los taludes naturales o los frentes de excavación de modesta entidad, donde no se esperan variaciones sensibles del estado tensional.

Cuando la ladera es moderadamente empinada y es suficiente una simple protección a corto plazo que favorezca la reaparición de la vegetación, para el recubrimiento superficial se emplean productos geosintéticos, a veces reforzados con mallas metálicas ligeras (Soft Facing).

La experiencia demuestra que, salvo en el caso de taludes con superficie perfectamente plana y lisa, no es posible colocar la malla en perfecta adherencia con el terreno (Ferraiolo y Giacchetti, 2004). Cuando fuera técnicamente posible pretensar la malla, serviría para desarrollar fuerzas tangenciales al plano de la malla. Esto podría desarrollar presiones contra el terreno solo en los puntos de contacto con protuberancias o puntos convexos. En todas las posiciones restantes la presión contra el terreno será nula. Es posible afirmar que, en un cierto sentido, la malla permite ampliar la superficie de la placa del anclaje (Bessegini y Al., 2009), pero este incremento es absolutamente despreciable a causa de la deformabilidad de dicha malla.

Cabe señalar finalmente que en un sistema de soil nailing como el definido antes, el pre-tensionado de la malla mediante las placas de los bulones no aporta ninguna ventaja. Modelos numéricos simples revelan que la precarga de la placa del bulón (Fig. 1 - A) perturba ligeramente el estado tensional del terreno debajo de la placa misma (Fig. 1 - B), pero no genera fuerzas activas



**Fig. 1: Resultado del modelo FEM axial-simétrico del bulón: (A) Campo de esfuerzo máximo y dirección de las deformaciones debajo de la placa; (B) Campo de deformación total y evolución de las presiones verticales YY debajo de la placa (línea azul) y lejos de la placa (línea morada).**

estabilizantes; de hecho, en los bulones falta el tramo libre (presente en el caso de los tirantes) que permite la transferencia de las fuerzas de la superficie (la placa) a un punto distante (la fundación).

## Comportamiento del revestimiento estructural flexible

Sobre el comportamiento de las redes se han realizado diversos estudios y pruebas de laboratorio (Rüegger R., & Flummi D., 2000; Bonati y Galimberti 2004, Torres y Al, 2000; Muhunthan B. y Al, 2005) utilizando muestras (paños de red) de diferentes tamaños, vinculados a bancos de ensayo rígidos, en distintas condiciones de vínculo. Los resultados de la investigación muestran que el desplazamiento en el punto de aplicación de la carga sobre las redes sometidas a punzonamiento, tiene un orden de magnitud que va desde varios decímetros a más de un metro, con una evolución de la respuesta de tipo no-lineal, cuyo desarrollo depende principalmente de la combinación de: el tipo de tejido de la red, el tamaño de la muestra y el tipo de vínculo con el que se fija la muestra. En todas las pruebas, en la fase inicial de aplicación de la carga, se producen grandes deformaciones. Sólo después la red empieza a dar una oposición apreciable a la carga. La red no puede ser modelada como una viga capaz de transmitir una presión uniformemente distribuida sobre la superficie por medio de los bulones y por supuesto debe considerarse un elemento pasivo.

En el caso de las pruebas en bastidores de tamaño 3 x 3 m (Bonati y Galimberti, 2004), se verifica la gran deformación de las redes: por ejemplo, para la misma condición de vínculo (vínculo en todos los lados), la malla de Triple Torsión reforzada con cables de acero - Steelgrid



**Fig. 2 - Campo de pruebas de Pont Boset desarrollado por el Politécnico di Torino en colaboración con Officine Maccaferri (Bertolo y Al. 2009)**

- es muy deformable en comparación con el panel HEA (red de cables), pero mucho más rígida que la malla de simple torsión fabricada con alambre de alta resistencia. Aplicando una carga de 1500 daN (1,5 toneladas, es decir, poco menos de un metro cúbico de tierra), el panel HEA se deforma 15 cm, el Steelgrid 38 cm, y la malla de Simple Torsión 55 cm.

Más recientemente, en Pont Boset, Aosta - Italia, se han realizado pruebas de punzonamiento en verdadera magnitud, reproduciendo un sistema de vínculo frecuentemente utilizado en el revestimiento de taludes rocosos o de tierra, y simulando la carga sobre la red mediante un cilindro hidráulico actuando a 45° en relación al plano de la red. (Fig. 2) (Bertolo y Al. 2007; Bertolo y Al., 2009).

La prueba es particularmente interesante por que reproduce de forma realista los diferentes tipos de punzonamiento que se generan sobre las redes (punzonamiento en el centro de la muestra y punzonamiento en la placa de anclaje). Los resultados, de un lado confirman el comportamiento no lineal de las redes y del otro ponen en evidencia que en realidad las deformaciones son mucho mayores que las previstas en base a pruebas efectuadas sobre muestras a pequeña escala o vinculadas a la perfección (Fig. 3).

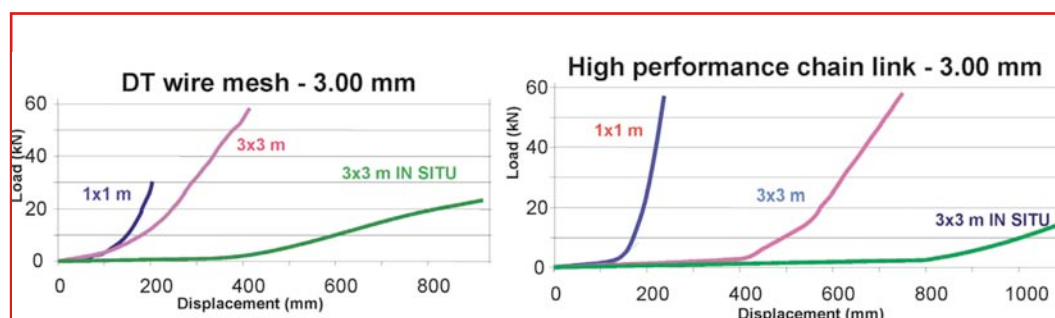
## Modelos de cálculo

Teniendo en cuenta los resultados de las pruebas "in situ", hemos implementado modelos

de cálculo numérico simplificados, que permiten evaluar la eficacia del revestimiento estructural flexible realizado con distintos tipos de redes. A título de ejemplo, se ha usado una ladera natural, con morfología regular, inclinada 54°, altura 14,0 metros, constituida por roca muy degradada de densidad 24,0 kN/m³, la cohesión 20 kPa, ángulo de rozamiento interno de 20°, y Módulo de Young 800 kPa. El cálculo se realizó con una regla "elástico/perfectamente plástico" obteniendo un factor de seguridad global 1,05 (Phase2 7.0, 2009). Insertando exclusivamente la red de anclajes de 3 x 3 m, pero no el revestimiento estructural flexible, al factor de seguridad global de la ladera aumenta a 1,30. La inestabilidad del terreno entre los bulones se manifiesta sólo a largo plazo, como una reacción a los procesos de reblandecimiento (softening). Sólo después de haberse presentado esta nueva condición de inestabilidad, el revestimiento estructural flexible entra en juego y colabora con los anclajes.

La estabilidad a corto plazo del material entre los bulones es una condición necesaria para la instalación del revestimiento estructural flexible.

En los modelos numéricos simplificados el revestimiento estructural flexible se puede representar como una membrana de resistencia y módulo de deformabilidad conocidos, conectada a través de una interfaz de resistencia a la tracción nula (Los módulos de deformabilidad de las redes han podido ser determinados en las pruebas de Pont Boset). Haciendo funcionar el modelo numérico con terreno en condiciones de reblandecimiento y



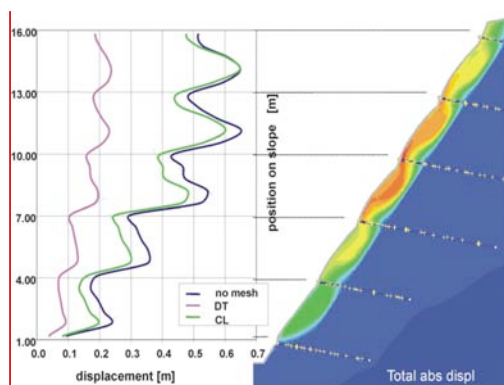
**Fig. 3: Gráficos de las pruebas de punzonamiento sobre muestras de: dimensión 1x1 m en el laboratorio (línea azul), dimensión 3x3 m en el laboratorio (línea morada) y dimensión 3x3 m en campo de pruebas (línea verde), en el caso de malla de Triple Torsión DT (a la izquierda) y malla de Simple Torsión (Chain Link) de alambre de alta resistencia. La ley de deformación depende de la dimensión de la muestra y del vínculo. Se verifica la dramática deformabilidad de la red de Simple Torsión "in situ".**

con un revestimiento estructural flexible, se observa que: (a) la resistencia a la tracción del revestimiento estructural flexible no tiene ninguna influencia sobre el sistema geotécnico y (b) la deformabilidad de la membrana del revestimiento estructural flexible desempeña un papel importante en la estabilidad del terreno reblandecido. En el ejemplo de Fig. 4 se han calculado las deformaciones del talud: sin malla ("no mesh" - línea azul), con una malla de Simple Torsión de alambre de alta resistencia (CL - línea verde) y con enrejado Triple Torsión (DT - línea morada). Los desplazamientos obtenidos muestran que la malla CL, aun teniendo una elevada resistencia a tracción, sustancialmente no contrarresta los desplazamientos del terreno, mientras que la malla DT sí que realmente colabora con los anclajes al contrarrestar la deformación total del talud gracias a su elevada rigidez como membrana. Además, un revestimiento estructural flexible poco deformable minimiza el proceso de "desnudado" (stripping) al que pueden verse sometidos los bulones. El resultado final es que el enrejado DT mantiene el factor de seguridad global del talud (responsabilidad básica de los bulones) cerca de un 10% superior al que se obtiene con la malla CL.

### Metodo simplificado: BIOS

El uso de sofisticados modelos numéricos requiere un esfuerzo y unos tiempos de elaboración no razonables en la práctica para los proyectistas; por ello es preferible la aproximación con el método del equilibrio límite, en el que los modelos de cálculo utilizados son necesariamente muy simplificados. El enfoque conceptual comúnmente utilizado supone que el sistema de red y anclajes tiene, de alguna manera, un papel activo en la consolidación (Cravero y Al, 2004; Saderis A., 2004; Flummi D. & Rüegger, 2001; Castro, 2008). Sin embargo, este enfoque no es congruente ni con el concepto del soil nailing ni con el comportamiento pasivo de las mallas (Fig. 5).

Más recientemente se han propuesto modelos que consideran también la deformación de la red en la consolidación de las paredes rocosas (Bertolo y Giacchetti, 2008, Valfre, 2007). En el caso de soil nailing con revestimiento estructural flexible, una vez dimensionados los bulones con un software especializado, es necesario comprobar separadamente el estado límite de servicio y estado límite último, de acuerdo con la norma EN 1997-1. En el sistema BIOS de Maccaferri, las cargas que el terreno transmite al



**Fig. 4: Ejemplo de uso impropio del revestimiento-estructural flexible.** Después de la aplicación de la malla se ha producido un corrimiento de tierras. El revestimiento estructural flexible en la base del corrimiento se ha deformado ampliamente sin ejercer ninguna presión de contención preventiva y sin colaborar con los bulones

revestimiento estructural flexible son calculadas mediante el "método de las dos cuñas", suponiendo que las fuerzas actúan directamente sobre la malla de acero como una carga distribuida y que las dos cuñas están contenidas en el espacio entre los dos bulones adyacentes.

El análisis del revestimiento estructural flexible se efectúa en 4 fases:

#### Fase 1 – Solución a corto plazo.

En primer lugar se analiza el comportamiento del talud a corto plazo para asegurar que el factor de seguridad del talud entre dos bulones es mayor a 1,0 ( $F > 1,0$ ). Este paso verifica que las hipótesis geotécnicas de partida son correctas.

#### Fase 2 – Verificación a largo plazo.

Se simula el reblandecimiento del terreno que se producirá a largo plazo hipotizando el progresivo deterioro de los parámetros de resistencia  $c'$  (cohesión) y  $\phi'$  (ángulo de rozamiento interno) hasta que se produce la igualación entre las fuerzas actuantes y las fuerzas



**Fig. 5: Ejemplo de uso impropio del revestimiento-estructural flexible.** Después de la aplicación de la malla se ha producido un corrimiento de tierras. El revestimiento estructural flexible en la base del corrimiento se ha deformado ampliamente sin ejercer ninguna presión de contención preventiva y sin colaborar con los bulones.



resistentes ( $FS=1$ ). Este procedimiento permite valorar el volumen de terreno inestable que puede movilizarse entre bulones.

### Fase 3 – Verificación del estado límite último.

Esta fase valora la posibilidad de que la malla metálica, comprendida entre dos bulones adyacentes, se rompa. El problema no puede resolverse utilizando el procedimiento del equilibrio límite. Por ello se compara el volumen inestable de terreno con los parámetros geotécnicos a largo plazo con el máximo volumen de terreno que puede soportar la malla.

El volumen máximo de terreno no es fácil de calcular cuando la malla se deforma tomando la forma característica de un saco más o menos deformado hacia la pendiente. Esta forma depende de la pendiente del talud y de la deformabilidad de la malla. Tendremos que introducir aproximaciones de tipo geométrico en la forma de la malla deformada, con los límites de deformabilidad y de resistencia de la estructura que conocemos a través de las pruebas efectuadas en Pont Boset.

Tomamos las siguientes hipótesis iniciales (Fig. 6-izquierda): La deformada se divide en tres tramos: el primero, recto, de longitud “X” formando un ángulo  $\alpha$  con el talud, que tiene una inclinación  $\beta$ ; el segundo tramo, curvo, de longitud “ $(\pi+\alpha)*r$ ” que caracteriza la forma de saco del material acumulado; el tercer tramo, recto, apoyado sobre el talud, tiene su misma inclinación y una longitud aproximada “X-L”. El segundo tramo es tangente tanto al primer tramo como al tercero.

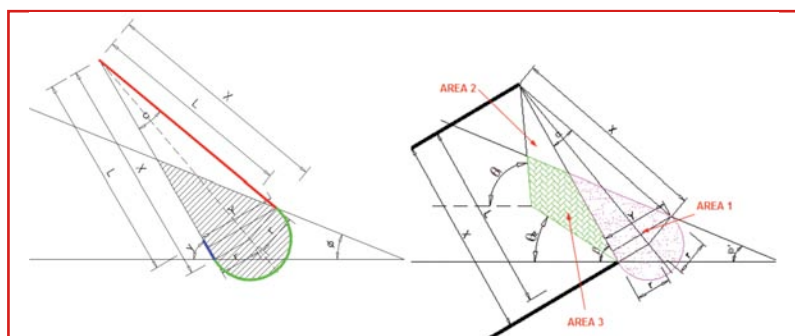


Figura 6: A la izquierda: subdivisión en segmentos de la malla. – A la derecha: modelo de deformación

Si el volumen inestable resulta ser superior al necesario para llegar a la rotura de la malla, el recubrimiento superficial flexible estará en crisis.

### Fase 4 – Verificación del estado límite de proyecto

El proyectista debe verificar si las deformaciones del recubrimiento estructural flexible, producidas por las cargas correspondientes al largo plazo, son aceptables. Tratándose de un problema de carga-deformación, el método de equilibrio límite no permite soluciones directas. Por tanto se usan las curvas carga-deformación obtenidas en las pruebas de punzonamiento de Pont Boset para determinar el volumen de suelo que determina la máxima deformación permitida. Si el volumen así determinado es mayor que el volumen de terreno inestable a largo plazo, el recubrimiento superficial flexible cumple con los requisitos del proyecto.

La máxima deformación admitida es decidida por el proyectista sobre la base de uno o más criterios geotécnicos (efecto de las deformaciones de la malla sobre el “desnudo” (stripping) de los anclajes, inicio de procesos erosivos, efecto de asentamientos inducidos en la parte superior del talud), funcionales (tamaño máximo admitido para el saco de detrito) y estéticos.

### Conclusiones

Hemos propuesto el sistema BIOS desarrollado por Maccaferri para la realización del revestimiento estructural flexible con mallas metálicas. Se ha demostrado que la propiedad fundamental para este tipo de aplicación es la rigidez deformativa de la membrana del revestimiento estructural flexible, mientras que su resistencia a tracción tiene escasa influencia por que las fuerzas en juego son en general muy bajas. Con el sistema BIOS es posible determinar correctamente el revestimiento estructural flexible, minimizando el tiempo necesario para el cálculo y el coste de la intervención. Es esencial sin embargo que el proyectista verifique el contexto donde se aplica el revestimiento estructural flexible, analizando las condiciones de tensiones, estratigrafía del terreno, deformaciones admisibles, agua en el terreno y fenómenos de erosión.