

BIOS (Best Improvement of Slopes)

El diseño del revestimiento estructural flexible en un Soil Nailing

Officine Maccaferri ha desarrollado el programa BIOS, un sistema simplificado, con un enfoque de diseño realista, para el cálculo del *Revestimiento Estructural Flexible* (CIRIA, 2005) en un *Soil Nailing*. El artículo muestra que la propiedad más importante de la membrana o malla que se aplica en este tipo de soluciones es la rigidez deformativa. Con el sistema BIOS es posible reducir el tiempo de diseño y obtener un coste reducido para la intervención. En cualquier caso, el criterio del proyectista es necesario para la mejor evaluación de los factores críticos como la morfología de la pendiente, los desplazamientos y asentamientos admisibles, la presencia de agua y los procesos de erosión.


Durante años, las mallas de acero han sido frecuentemente utilizadas en *Soil Nailing*. El sistema, conocido en la literatura técnica como *Revestimiento Estructural Flexible* (Phear A., 2005), sin duda ofrece ventajas estéticas y puede ser utilizado con éxito en todas las estabilizaciones de taludes con vegetación. El presente trabajo analiza el comportamiento general de los revestimientos flexibles y propone el nuevo enfoque de cálculo BIOS (*Best Improvement of Slopes*), que ya ha sido utilizado ampliamente por la Officine Maccaferri para el diseño de los taludes, de cortes y naturales.

El concepto de *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). La frecuencia y la longitud de los bulones deben ser debidamente calculadas de conformidad con la norma EN 1997 1.

Los bulones movilizan las fuerzas de fricción en toda su longitud y contribuyen a mejorar las condiciones de estabilidad cuando se produ-

Palabras clave: BULÓN, LADERA, MALLA, REVESTIMIENTO ESTRUCTURAL FLEXIBLE, SOIL NAILING, TALUD.

 **Giorgio GIACCHETTI ⁽¹⁾, Alberto GRIMOD ⁽¹⁾, Robert MAJORAL ⁽²⁾**
⁽¹⁾ALPIGEO CONSULTANTS, Belluno - Italia
⁽²⁾A. BIANCHINI INGENIERO, S.A. - España

cen deformaciones en el terreno (Schlosser, F. y Al, 2002; R. Soulas, 1991, BS 8006; Byrne, R.J y Al, 1998). Por tanto, las fuerzas de fricción estabilizadoras se generan pasivamente con el inicio de la ruptura del terreno.

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, dentro de los límites de su deformabilidad intrínseca, sólo puede colaborar con la acción pasiva de los bulones (Fig. 1).

No es en absoluto comparable a una estructura rígida (por ejemplo: hormigón proyectado o elementos prefabricados), que limita el desplazamiento del suelo en una forma ópti-

ma. El ámbito preferente de aplicación de los revestimientos estructurales flexibles son los taludes naturales, donde no hay variaciones considerables del estado de tensiones y una protección vegetal es factible.

Por lo general, en un talud de 60°, el revestimiento frontal tiene un carácter temporal. De todas maneras, el diseño de los revestimientos estructurales flexibles requiere una cierta atención a fin de minimizar los problemas relacionados con las propiedades intrínsecas de las mallas y los límites de sus aplicaciones (Fig. 2).

Propiedades intrínsecas de las mallas

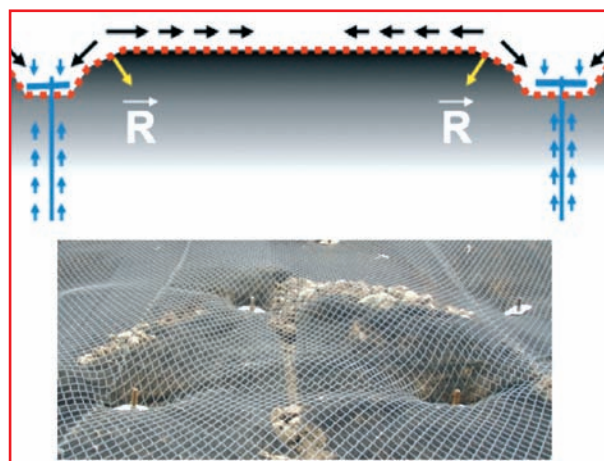
Las pruebas de perforación (*Punch Test*) son fundamentales para modelizar las mallas aplicadas en *Soil Nailing*. Varios autores realizaron pruebas con muestras de diferentes tamaños y en distintas condiciones de vínculo (Ruegger R., & Flumm D., 2000; Bonati y Galimberti, 2004; Muhunthan B. et al., 2005).

Las pruebas más interesantes se han desarrollado en Pont Boset (Aosta - Italia), con vínculos reales a una trama de bulones de 3,0m x 3,0m, a menudo adoptado para la consolidación taludes de roca y de suelo, y un cilindro hidráulico insertado dentro de la roca a 45° en relación al plano de malla (Fig. 3) (Bertolo y



[Fig. 1].- Ejemplo de desplazamiento del frente estructural flexible cargado por el terreno. Los cables reducen el desplazamiento de malla.

[Fig. 2].-Fuerzas "estabilizantes" debidas al tensado previo de la malla, caso de que exista. Los vectores resultantes desarrollados, son absolutamente insignificantes.





[Figura 3] .- Test de Pont Boset desarrollado por el Politécnico di Torino, en colaboración con Officine Maccaferri (Bertolo et al. 2009).

otros, 2007; Bertolo et al, 2009). Los ensayos muestran, tanto el escaso significado de las pruebas de laboratorio con muestras de pequeño tamaño, como la necesidad de reproducir las condiciones de vínculo que se aplican en la realidad a las mallas (Majoral et al., 2008).

En segundo lugar, los resultados muestran que las mallas entran en carga después de un desplazamiento de varios decímetros con carga nula, con resultados muy distintos de una a otra malla. Por ejemplo: la carga solo se inicia con un desplazamiento de 0,4 m en el caso de la malla de Triple Torsión, con diámetro del círculo inscrito de 83 mm y alambre de 500 MPa, y dicho desplazamiento es de 0,8 m en el caso de la malla de simple torsión, con diámetro del círculo inscrito de 65 mm y alambre de 1770 MPa (Fig. 4). Es evidente pues que, si bien los bulones evitan el desplazamiento del terreno (intervención pasiva), el revestimiento superficial no contribuye a la estabilización del talud y solo lo hará cuando los desplazamientos sean de bastantes decímetros (según la malla, como se puede ver).

Límites en la aplicación de las mallas

Con frecuencia se afirma que el pretensado del revestimiento flexible permite desarrollar presiones activas que contribuyen a estabilizar el talud. El ensayo a escala real de Pont Boset no solo no lo confirma, lo contradice.

El pretensado de la malla se consigue, en teoría, o con el pretensado de los bulones, es



[Fig. 4] .- Nuevo SteelGrid HT de Maccaferri. Con gran rigidez deformativa, alcanza los 160 kN/ml cuando se inserta un cable de 8 mm cada 30 cm.

decir apretando la tuerca sobre la placa del bulón, de manera que la malla se introduce en las concavidades del terreno, o tangencialmente, tensando la malla desde los bordes del revestimiento. En el primer caso, el tensado de los bulones no aporta nada, ya que a cualquier presión de la placa en la malla, corresponde necesariamente una reacción igual y contraria que intenta arrancar el bulón (ver figura 2).

En el segundo caso, el pretensado de la malla podrían aplicarse, en principio, en superficies planas, pero si los bulones están ya instalados, o si la superficie del terreno es desigual, en realidad se hace imposible lograrlo debido a las fricciones en las irregularidades (Ferraiolo y Giacchetti, 2004). En ambos casos, la deformación intrínseca de la malla invalida el efecto de la pretensión (ver figura 4).

Finalmente hay que recordar que, incluso si es posible tensar la malla, las fuerzas desarrolladas serán tangentes al plano de la malla, y solo podría desarrollarse un poco de presión contra una protuberancia en la superficie del terreno (ver figura 2). Sin embargo, no son presiones relevantes, ya que es posible levantar la malla del contacto con el terreno simplemente usando los dedos. En cierto modo, la malla permite ampliar la superficie de contacto de la placa de anclaje (Besseghini et al. 2009), pero, siempre, por las razones expuestas, el incremento sigue siendo absolutamente insignificante.

Algunas consecuencias

Algunas consecuencias importantes para el enfoque del diseño del *revestimiento estructural flexible*, que se derivan de lo expuesto anteriormente:

- Desde el punto de vista geotécnico, la malla tiene un comportamiento absolutamente pasivo. No se puede asimilar al hormigón, que sí puede transmitir una presión casi uniforme a la superficie del terreno gracias a unos bulones pretensados (no hormigonados en toda su longitud).
- Teniendo en cuenta el desplazamiento de la malla, el hecho de que los bulones queden descubiertos es una de las principales causas de rotura y uno de los problemas más insidiosos. Es mejor atribuir una capacidad de carga insignificante al sistema de placa y malla. Con mayor razón, la utilización de bulones activos se desaconseja en las mallas: apenas sería funcional por ineficaz.
- La diferencia de comportamiento entre las mallas depende básicamente del tipo de tela (de como está fabricada) y no de la calidad del acero del alambre utilizado. La elección de la malla que se utiliza como revestimiento debe tener en cuenta las propiedades de la malla y no simplemente la resistencia del alambre.
- El esfuerzo de tracción que sufren las mallas es casi siempre 3 veces menor a su resistencia nominal a tracción. Por tanto, la resistencia a tracción tiene una importancia marginal en la elección de la malla.
- La rigidez deformativa de la membrana juega un papel primordial en la elección: cuanto mayor es su rigidez deformativa, mayor es la efectividad del revestimiento estructural flexible.
- La superposición de cables cruzados sobre la malla es siempre recomendable. Esta red formada con los cables, que es mucho más rígida que la malla, reduce la deformabilidad de la membrana y realmente ayuda a distribuir la tensión de la malla a los bulones. Es por eso que una malla con cables insertados en el tejido, sin duda funciona mejor.
- Con un revestimiento estructural flexible, los bulones de un *Soil Nailing* pueden tener una cierta dificultad de cooperar entre ellos en la consolidación. Es por eso que la distancia entre los bulones se debe reducir a no más de 1,0 a 1,5 m (Joshi, 2003). Con más espacio, cada anclaje trabaja aisladamente (Phear A., 2005). La separación no debe ser en ningún caso superior a 3,0 m. Con el fin de controlar la deformabilidad excesiva de la malla, se pueden introducir bulones auxiliares entre los bulones profundos (Phear A., 2005).

Sistema simplificado: BIOS

El diseño de los bulones en un *Soil Nailing* puede realizarse con distintos métodos de cálculo. Una vez los bulones han sido calculados, tendremos que calcular el revestimiento

estructural flexible. Sin embargo, dicha verificación no es en absoluto sencilla, ya que requiere la utilización de complejos modelos numéricos, con esfuerzo y tiempo invertido no razonables en la praxis general de diseño, si está destinado a intervenciones de tamaño modesto.

Por ello, en la actualidad, los *Métodos de Equilibrio Límite* son preferibles, por que son muy simplificados incluso si consideran, en cierto modo, el desplazamiento (Fig. 5).

factor de seguridad del talud entre dos bulones es mayor a 1,0 ($F_s > 1,0$). Este paso verifica que las hipótesis geotécnicas de partida son correctas o, si fuera necesario, corregirlas, ajustando los parámetros geotécnicos o cambiando la distancia entre bulones.

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 ϕ' (ángulo de rozamiento interno) hasta que se produce la igualación entre las fuerzas actuantes y las fuerzas resistentes ($F_s = 1$). Este procedimiento permite valorar el máximo 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. Para ello se compara el máximo volumen inestable de terreno con los parámetros geotécnicos a largo plazo (Fase 2), con el máximo volumen de terreno que puede soportar la malla.

Fase 4 – Verificación del estado límite de servicio

El proyectista debe verificar si las deformaciones del recubrimiento estructural flexible, producidas por las cargas correspondientes al largo plazo, son aceptables. Para ello se utilizan las curvas de carga-deformación obtenidas en las pruebas de punzonamiento de Pont Boset.

El gráfico de la Fig. 6 permite determinar el volumen de terreno en relación con el desplazamiento máximo admisible. 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. El desplazamiento máximo de diseño se asume por uno

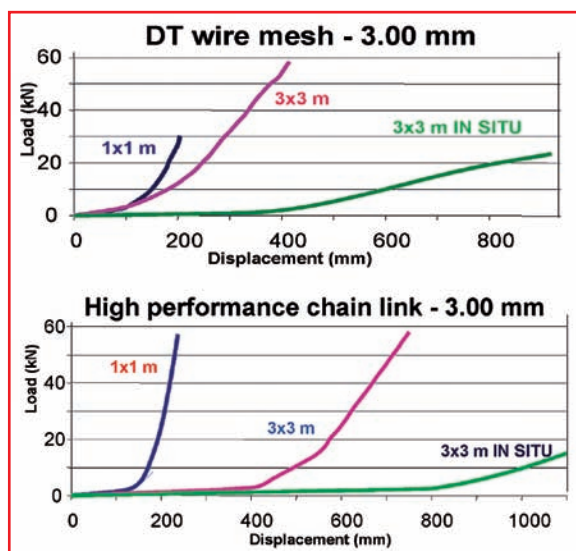
o más criterios geotécnicos (efectos de la deformación de la malla en el *descubierto* de los bulones, procesos de erosión, los efectos de asentamientos inducidos en la cercanía), funcionales (carga máxima de las bolsas con desprendimientos) y la estética.

Próximos desarrollos

El *revestimiento estructural flexible* representa una solución muy interesante, ya que ofrece buenas ventajas tecnológicas y medioambientales. Las pruebas *in situ* mostraron las limitaciones en la aplicación de los revestimientos estructurales flexibles y permiten el desarrollo de un método de cálculo simplificado. Son necesarias nuevas investigaciones para una mejor comprensión de la interacción entre el bulón y la malla y para la aplicación de modelos de comportamiento del revestimiento flexible más precisos.

Bibliografía

- BERTOLO P., FERRAILO F., GIACCHETTI G., OGGIERI C., PEILA D., E ROSSI B., (2007). *Metodologia per prove in vera grandezza su sistemi di protezione corticale dei versanti*. GEAM Geoingegneria Ambientale e mineraria, Anno XLIV, N. 2, Maggio-Agosto 2007.
- BERTOLO P., OGGIERI C., PEILA D. (2009). *Full scale testing of draped nets for rock fall protection*. Canadian Geotechnical Journal, No. 46 pp. 306-317.
- BERTOLO P., GIACCHETTI G. (2008). *An approach to the design of nets and nails for surficial rock slope revetment*. in Interdisciplinary Workshop on Rockfall Protection, June 23-25 2008, Morshach, Switzerland.
- BESSEGHINI F., DEANA M., DI PRISCO C., GUASTI G. (2008). *“Modellazione meccanica di un sistema corticale attivo per il consolidamento di versanti di terreno*. Rivista GEAM Geoingegneria ambientale e Mineraria, Anno XLV, N. III dicembre 2008 (125) pp. 25-30 (in Italian).
- BONATI A., E GALIMBERTI V. (2004). *Valutazione sperimentale di sistemi di difesa attiva dalla caduta massi*. In atti “Bonifica dei versanti rocciosi per la difesa del territorio” - Trento 2004, Peila D. Editor.
- BS 8006 (1995). *Code of practice for Strengthened/reinforced soils and other fills*.
- BYRNE R.J., COTTON D., PORTERFIELD J., WOLSHLAG C., E UEBLACKER G.,(1998). *Manual for design & construction monitoring of soil nail walls*. U.S. Department of transportation – Federal Highway Administration. FHWA A-SA-96-06R – Washington D.C.
- Castro D. (2008). *“Proyectos de investigación en la Universidad de Cantabria. II Curso sobre protección contra caída de rocas – Madrid, 26 – 27 de Febrero. Organiza STMR Servicios técnicos de mecánica de rocas.*



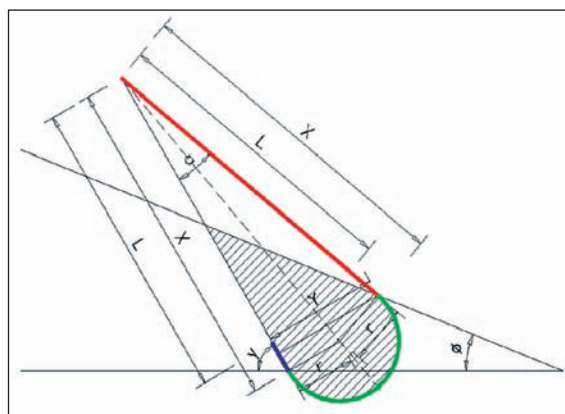
[Fig. 5] .- Gráficos de las pruebas de Punch Test (a) en muestras de tamaño 1x1 m en el laboratorio, (b) en muestras de tamaño 3x3 m en el laboratorio, y (c) en muestras de 3x3 m en las instalaciones de campo. Para malla DT = Triple Torsión de malla hexagonal (gráfico superior) y para malla Simple Torsión de alambre de alta resistencia (gráfico inferior). El desplazamiento depende tanto del tamaño de la muestra como del tipo de vínculo. A destacar la dramática deformación de la malla de Simple Torsión IN SITU, que hace que sea casi inútil.

En el enfoque de *Best Improvement of Slopes (BIOS)* las cargas transmitidas por el terreno sobre la malla se han calculado con el método de las dos cuñas, mientras que los desplazamientos se han extrapolado a través de los resultados experimentales de las pruebas de *Punch Test*. La solución requeriría un análisis de elementos finitos, pero una solución realista se puede encontrar maximizando las fuerzas que actúan en el sistema geotécnico. Es evidente que el procedimiento tiene cierto riesgo, pero es más que suficiente teniendo en cuenta el nivel de baja precisión de los datos de entrada, la fiabilidad de los resultados y la velocidad de cálculo.

BIOS desarrolla el análisis del revestimiento estructural flexible en 4 fases:

Fase 1 – Verificación de los datos de entrada.

En primer lugar se analiza el comportamiento del talud a corto plazo para asegurar que el



[Figura 6] .- Modelo de deformación y subdivisión en segmentos de la malla.

• CRAVERO M., IABICHINO G., ORESTE P.P., E TEODORI S.P. (2004). **Metodi di analisi e dimensionamento di sostegni e rinforzi per pendii naturali o di scavo in roccia**. In atti "Bonifica dei versanti rocciosi per la difesa del territorio" – Trento 2004, Peila D. Editor.

• EN 1997 1, (2005). **Eurocode 7: Geotechnical design. Part 1: General rules**.

• Ferraiolo F., e Giacchetti G., (2004). **Rivestimenti corticali: alcune considerazioni sull'applicazione delle reti di protezione in parete rocciosa**. In atti "Bonifica dei versanti rocciosi per la difesa del territorio" – Trento 2004, Peila D. Editor.

• FLUMM D., RUEGGER R. (2001). **Slope stabilization with high performance steel wire meshes with nails and anchors**. International Symposium Earth reinforcement, Fukuoka, Japan.

• GIACCHETTI G., MAJORAL R. BERTOLO P., (2009). **Verificación del revestimiento estructural flexible en un soil nailing – BIOS: best improvement of slopes**. VII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables - Barcelona, 27 – 30 de Octubre de 2009.

• GIACCHETTI G., BERTOLO P. (2010). **Approccio al calcolo dei sistemi di reti con chiodi per il consolidamento delle pareti rocciose**. Rivista GEAM geoingegneria Ambientale e Mineraria Anno XLVII, April 2010 – pp 23 – 35.

• JOSHI B. (2003). **Behaviour of calculated nail**

head strength in soil nailed structures. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, ASCE, pp. 818 – 819.

• LOPC (2001). **Parades contre les instabilités rocheuses**. Guide technique - Paris.

• MAJORAL R., GIACCHETTI G., BERTOLO P. (2008). **Las mallas en la estabilización de taludes**. II Curso sobre protección contra caída de rocas – Madrid, 26 – 27 de Febrero. Organiza STMR Servicios técnicos de mecánica de rocas.

• MUHUNTHAN B., SHU S., SASIHARAN N., HATTAMLEH O.A., BADGER T.C., LOWELL S.M., DUFFY J.D. (2005). **Analysis and design of wire mesh/cable net slope protection - Final Research Report WA-RD 612.1**. Washington State Transportation Commission Department of Transportation/U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration.

• PHEAR A., DEW C., OZSOY B., WHARMBY N.J., JUDGE J., E BARLEY A.D. (2005). **"Soil nailing – Best practice guidance**. CIRIA C637, London, 2005.

• RUEGGER R., E FLUMM D. (2000). **High performance steel wire mesh for surface protection in combination with nails and anchors**. Contribution to the 2nd colloquium Construction in soil and rock-Academy of Esslingen (Germany).

• SADERIS A., (2004). **Reti in aderenza su versanti rocciosi per il controllo della caduta massi: aspetti tecnologici e progettuali**. Tesi di Laurea in

Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio, non pubblicata, Politecnico di Torino.

• SCHLOSSER F., (Chairman) (2002). **"Additif 2002 aux recommandations clouterre 1991 pour la conception, le calcul, l'exécution et le controle des soustènements realises par cluage des soil**. Presses Ponts et chaussées.

• SOULAS R., (Chairman) (1991). **Recommandations clouterre 1991 pour la conception, le calcul, l'exécution et le controle des soustènements realises par cluage des soil**. Presses Ponts et chaussées.

• VALFRÈ A. (2006). **Dimensionamento di reti metalliche in aderenza per scarpate rocciose mediante modellazioni numeriche**. GEAM Geoingegneria Ambientale e mineraria, XLIII: 47-53.



BIANCHINI INGENIERO

Diputación, 279 - 1º •
080007 Barcelona.

☎: 934 961 300

Fax: 934 961 301

Web: www.bianchini.es