

DISEÑO Y CÁLCULO DE MALLAS DE ALAMBRE POSTESADAS PARA LA ESTABILIZACIÓN Y REFUERZO DE TALUDES.

¹Justo, J.L.; ³Castro, D.; ²Morales Esteban, A.; ¹Durand, P.

^{1y2}Departamento de mecánica de medios continuos. Universidad de Sevilla.
Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Av. Reina Mercedes, 2. 41012 Sevilla.

³Departamento de ingeniería de la construcción. Universidad de Cantabria
e-mail: ²ame@us.es

RESUMEN

Una solución barata para la protección de taludes es la utilización de mallas de alambre. Este trabajo muestra el diseño de una malla de alambre de alto límite elástico, postesada con anclajes, para la estabilización y refuerzo de taludes. Es una solución económica que permite actuar en terrenos muy altos y empinados. El impacto visual de la malla y los anclajes, una vez colocados, es moderado debido a que la malla es muy flexible, lo que permite su adaptación a las irregularidades del terreno. Además, se puede colorear lo que favorece su camuflaje y ayuda a evitar la erosión del terreno lo que ayuda a la revegetación. También se presenta un modelo de cálculo para la malla. Para ello se han realizado ensayos de laboratorio sobre mallas normalizadas con el objetivo de obtener sus parámetros en condiciones de campo simuladas. Por último, los resultados de los ensayos se han introducido en las ecuaciones teóricas.

Keywords: malla de alambre de alto límite elástico, talud, revegetación.

1.- Introducción.

Las mallas de alambre ancladas son un método barato para la protección de taludes y para su estabilización [1] y [2]. Para taludes altos y empinados pueden ser, además, la única solución posible. Principalmente existen dos tipos de mallas de alambre ancladas: las redes de cables [3] y las mallas de alambre de alto límite elástico.

1.1.- Mallas de cables.

Contienen los siguientes elementos:

1. Una malla de alambre de acero pentagonal trenzado doble con una apertura de 8 x 10/15 mm y un alambre con un grosor superior a 2 mm. Su tarea es cerrar el espacio entre los cables de la malla.
2. Una red de cable de acero de alta resistencia (1770 MPa) con una apertura de entre 150 y 300 mm, y 8 mm de espesor. Esta red aplica presión a la malla.
3. Cables de acero de 16 a 24 mm de espesor y separados entre 2 y 4 m. que aplican una presión de entre 10 y 20 kPa a la red de cable, a través de anclajes postesados en las intersecciones.
4. Anclajes internos y perimetrales postesados entre 100 y 500 kN.

Este sistema tiene el inconveniente del impacto visual que genera la malla de alambre de acero trenzado doble.

1.2.- Mallas de alambre de alto límite elástico.

Son mallas rómbicas de acero galvanizado, con una apertura de 65 mm (fig. 1), colocadas directamente sobre el terreno. El límite elástico varía entre 1770 y 2020 MPa y el espesor de la malla es de 3 o 4 mm. La presión, p , sobre el talud (10 a 30 kPa) se aplica mediante anclajes postesados aislados o reforzados mediante cables horizontales de 16 a 22 mm de espesor (fig. 2). En este trabajo sólo se consideran las mallas con cables. Los anclajes pueden ser barras GEWI de acero B500S, de 25 a 40 mm de espesor. Los cables anclados de 20 a 24 mm de espesor rodean la zona tratada.

La secuencia constructiva se describe a continuación (ver fig. 2):

1. Colocación de los anclajes perimetrales, las eslingas y los cables.
2. Sujeto al cable superior, cada panel de malla de 3 m de anchura se extiende hacia abajo.
3. Un cable, de 8 mm de espesor, se entrelaza a lo largo del talud cada dos paneles de malla.
4. Si el sistema tiene cables horizontales, éstos se colocan y se tensionan a través de los anclajes laterales.
5. Se taladran los anclajes interiores y se cargan con la tensión de cálculo.

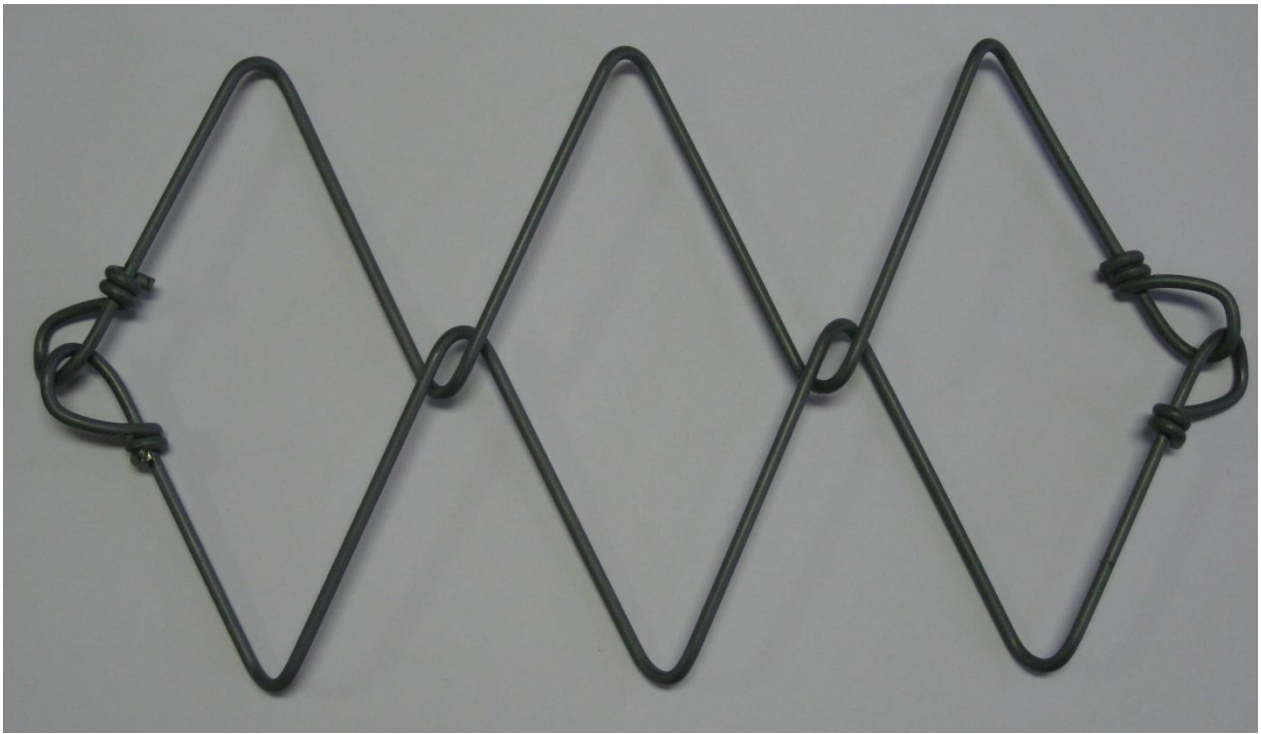


Fig. 1. Fotografía de una malla de alambre de alto límite elástico coloreada.

Fuera de España se han escrito muy pocos artículos sobre mallas de alambre ancladas [4], [5], [6], [7] y [8].

Este artículo se centra en las mallas de alambre de alto límite elástico.

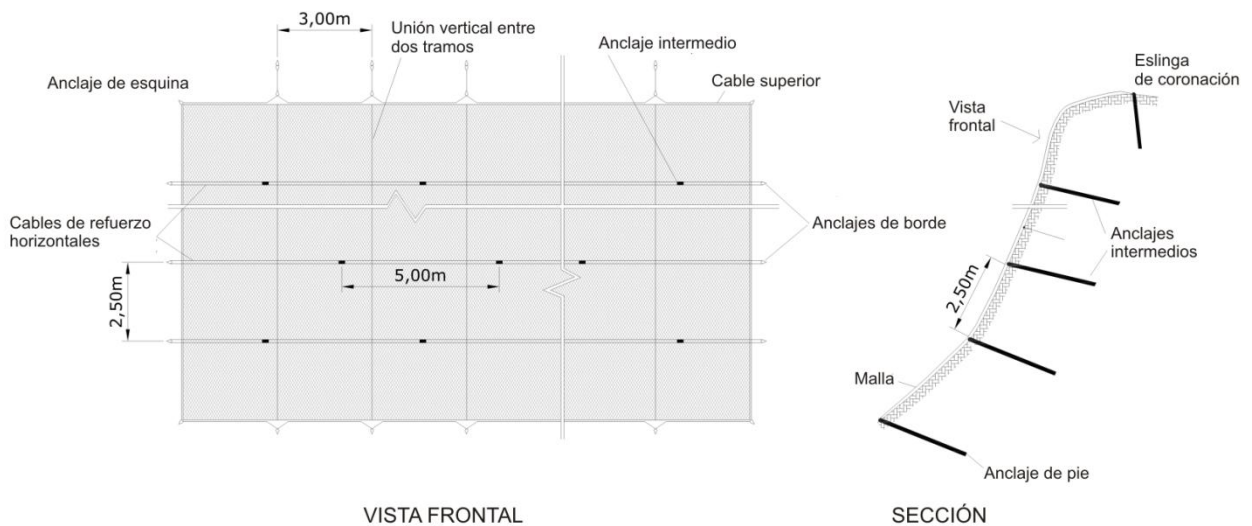


Fig. 2. Esquema constructivo del sistema de colocación de la malla.

2.- Modelo de deformación unitaria plana.

La fig. 3 muestra una membrana anisótropa conectada a un elemento soporte continuo anclado, por ejemplo un cable de acero grueso, colocado en perpendicular a la dirección de deformación de la membrana. Una malla rómbica, como la mostrada en la fig. 1, se considera que es la que mejor se adapta para esta estructura, ya que es más rígida en la dirección principal de deformación de la

membrana (dirección longitudinal). La distancia entre los cables es S_y y el espacio entre anclajes es S_x , que se deben disponer, preferiblemente, de forma escalonada. Si el elemento soporte fuese absolutamente rígido, la deformación de la membrana se correspondería claramente con un cilindro. Sin embargo, el elemento soporte se dobla haciendo la situación más compleja. No obstante, [9] suponen que la rigidez de los cables de refuerzo horizontales es lo suficientemente alta como para admitir un modelo de deformación unitaria plana, tal y como se indica en la fig. 3. Por tanto, se asume que la deformación de la membrana se corresponde con un cilindro circular.

Se supone que una malla no tiene ni deformaciones ni tensiones en la dirección perpendicular a la misma. Las deformaciones unitarias elásticas de una malla anisótropa son:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_x} - \mu_{yx} \frac{\sigma_y}{E_y} \quad (1)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E_y} - \mu_{xy} \frac{\sigma_x}{E_x} \quad (2)$$

donde E_x y E_y son el módulo de Young en la dirección de las diagonales menor y mayor del rombo, respectivamente. μ_{yx} es el coeficiente de Poisson para la deformación en la diagonal menor del rombo debida a un esfuerzo en la dirección de la diagonal mayor. μ_{xy} es igual que el anterior pero intercambiando el menor por el mayor.

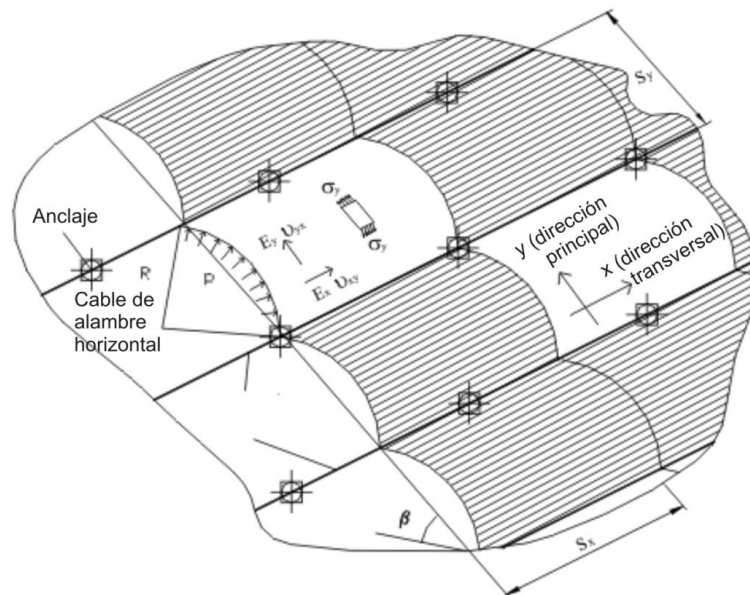


Fig. 3. Modelo de deformación plana.

[10] ha demostrado que:

$$\frac{\mu_{xy}}{E_x} = \frac{\mu_{yx}}{E_y} \quad (3)$$

Si la malla está confinada en la dirección x , sustituyendo $\varepsilon_x=0$ en la ecuación (1), y considerando la ecuación (3), entonces:

$$\sigma_x = \mu_{xy} \sigma_y \quad (4)$$

Por tanto, en condiciones de confinamiento, μ_{xy} es también el ratio entre la tensión en la dirección confinada x y la dirección libre y . Sustituyendo en la ecuación (2) y considerando la ecuación (3):

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E_y} (1 - \mu_{xy}\mu_{yx}) \quad (5)$$

El modulo de deformación con desplazamiento lateral impedido en la dirección libre y será:

$$E_{yc} = \frac{\sigma_y}{\varepsilon_y} = \frac{E_y}{1 - \mu_{xy}\mu_{yx}} \quad (6)$$

Si la malla estuviese confinada en la dirección y, x e y deben intercambiarse en las ecuaciones (4) a (6) para obtener las nuevas ecuaciones.

3.- Características mecánicas de las mallas de alambre de alto límite elástico.

El elemento principal del sistema es la malla rómbica. Su función básica es transmitir la presión aportada por los anclajes y los cables al suelo. [11] realizó ensayos de laboratorio en mallas tipo para determinar sus características mecánicas bajo diferentes condiciones.

3.1.- Resistencia a la tracción directa y carga de deformación de la malla rómbica.

Para determinar los parámetros de carga-deformación en el modelo de deformación unitaria plana, los ensayos han tenido que simular condiciones de campo. Cada membrana de malla se debería deformar en una dirección de carga libre. Se ha diseñado un aparato que permite esta condición. La magnitud de la carga aplicada en ambas direcciones y la deformación de la malla en la dirección libre fueron registradas. Se realizaron ensayos de tracción en las direcciones x e y, se utilizaron las ecuaciones (4), (6), y la correspondiente ecuación para $y=0$ para obtener μ_{xy} , μ_{yx} , y el módulo de deformación en las direcciones x e y. Los resultados obtenidos son gráficos tensión-deformación, carga en rotura y módulo de deformación de la deformación lineal (E_{xc} y E_{yc}) en las direcciones x e y. La tabla 1 muestra un resumen de los resultados de los ensayos de resistencia a tracción simple en ambas direcciones.

DIÁMETRO DE LA MALLA		d = 3	d = 4
TRACCIÓN EN LA DIRECCIÓN Y	Resistencia a tracción con desplazamiento lateral impedido, σ_{ycr} (kN/m)	152	258
	Deformación unitaria de rotura, ε_{ycr} (mm/m)	84	58
	Tensión de servicio para un factor de seguridad de 1,67, σ_{yc} (kN/m)	90	155
	Deformación unitaria de servicio, ε_{yc} (mm/m)	50	25
	Módulo de deformación lineal longitudinal con desplazamiento lateral impedido, E_{yc} (kN/m)	1898	6245
TRACCIÓN EN LA DIRECCIÓN X	Resistencia a tracción con desplazamiento lateral impedido, σ_{ycr} (kN/m)	69	99
	Deformación unitaria de rotura, ε_{ycr} (mm/m)	341	243
	Tensión de servicio para un factor de seguridad de 1,67, σ_{yc} (kN/m)	40	60
	Deformación unitaria de servicio, ε_{yc} (mm/m)	204	146
	Módulo de deformación lineal longitudinal con desplazamiento lateral impedido, E_{yc} (kN/m)	164	443

Tabla 1. Resumen de los resultados de los ensayos a tracción simple en las muestras de malla confinada.

3.2.- Módulo de elasticidad.

La curva de tensión-deformación unitaria se puede aproximar a una línea recta y, por tanto, se puede definir un módulo de elasticidad [12]. El módulo de deformación en la dirección y (ver tabla 1) es casi doce veces superior que el módulo en la dirección x , mientras que el ratio entre las resistencias a tracción es superior a dos.

4.- Modelos elásticos del comportamiento de la membrana.

Se han utilizado dos métodos de cálculo sencillos para el diseño. Ambos métodos llevan prácticamente a los mismos resultados [9] y [13]. El primero de ellos es el modelo de geometría impuesta que consiste en, a partir la tensión de servicio de la malla, σ_{yc} , y el módulo de deformación lineal con desplazamiento lateral impedido E_{yc} (ver tabla 1), obtener la flecha Δz , la capacidad de carga, p , y la carga de servicio del anclaje, Q . El segundo es el modelo elástico que consiste en, a partir de la capacidad portante deseada, p , y obteniendo la flecha, Δz , obtener la tensión permitida de la malla, σ_{yc} , y la carga de servicio del anclaje, Q .

4.1.- Validación de los modelos elásticos.

Se han realizado ensayos para obtener la capacidad de carga de mallas de 3 y 4 mm de diámetro, bajo cargas distribuidas aplicadas en perpendicular al plano de la malla. La fig. 4 muestra el instrumento utilizado en la mayoría de los ensayos, formado por una estructura de acero de 1,74 x 1,80 m que reproduce las condiciones de la fig. 3, permitiendo únicamente los desplazamientos verticales. Los objetivos eran:

- a) Determinar la relación entre la carga aplicada y los desplazamientos verticales de la malla.
- b) Obtener la geometría de la malla bajo diferentes condiciones de carga.

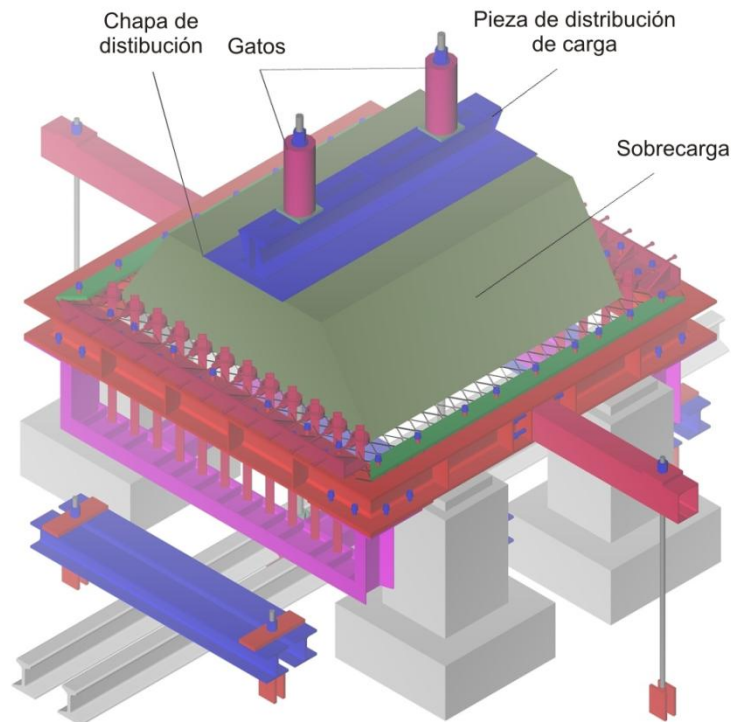


Fig. 4. Aparato para los ensayos de carga distribuida.

Se utilizaron sacos de grava con forma de pirámide truncada como sobrecarga sobre la malla. Una serie de gatos hidráulicos aplicaban la carga continua en dirección perpendicular a la malla. Los extensómetros registraban los desplazamientos verticales en diferentes puntos. Una unidad de registro de datos registraba los valores de carga y desplazamiento. Las cargas de rotura medias (de 3 ensayos) y los desplazamientos verticales en el punto central de la malla para mallas de 3 y 4 mm de diámetro se muestran en la tabla 2. En el caso de deformación plana unitaria, la curva de la malla se produce sólo en la dirección principal (y). Las deformaciones unitarias han sido comparadas en la tabla 2 con las obtenidas de los ensayos de tracción simple. Existen algunas diferencias debidas a que en los ensayos de tracción simple la tensión era constante y en los ensayos de validación eran las deformaciones unitarias medias.

Se han comparado los desplazamientos relativos de la malla en su centro, $\Delta z/S_y$, en función de la carga relativa aplicada, Q/Q_r , expresada como un porcentaje de la carga de rotura de la malla. Se pudo observar que para cargas próximas a la rotura, el desplazamiento relativo de la malla es de aproximadamente un 17%. Para valores de carga aplicada del 60% de la carga de rotura (correspondiente a una coeficiente de seguridad de 1,67), el valor de $\Delta z/S_y$ es del 14%; por tanto, para $S_y = 2,5$ m, el desplazamiento en la dirección de aplicación de la carga será $\Delta z_y = 0,35$ m.

Por tanto, queda claro que utilizar la carga de trabajo únicamente como criterio de diseño es insuficiente, debido a los desplazamientos tan grandes que se producen. El control del desplazamiento de la malla se hace necesario y se debería aplicar una pre-carga inicial. Si se aplican precargas del 10 al 15% de la carga de rotura total se puede eliminar la sección inicial de la curva, donde la malla muestra un mayor desplazamiento, en comparación con la carga. De esta manera, el desplazamiento relativo después de la pre-carga se puede reducir a aproximadamente un 7%. Ajustando una línea al grupo de puntos de las dos series de datos, se obtiene la siguiente expresión:

$$Q/Q_r = 0,0205(\Delta z/S_y)^3 - 0,0754(\Delta z/S_y)^2 + 1,151(\Delta z/S_y) \quad (7)$$

Donde Q/Q_r es la carga relativa aplicada del total de la carga de rotura.

Diámetro de malla (mm)	Desplazamiento vertical en su punto central Δz (mm)	Carga de rotura Q_r (kN)	Deformación unitaria de rotura mm/m		Deformación unitaria de servicio mm/m	
			Ensayo de validación	Ensayo a tracción simple	Ensayo de validación	Ensayo a tracción simple
3	305	246	68	84	47	50
4	309	458	67	58	46	25

Tabla 2. Cargas medias de rotura y desplazamiento vertical en el punto central en los ensayos de validación para mallas de alambre de 3 y 4 mm; comparación con los ensayos a tracción simple.

Esta fórmula caracteriza el comportamiento de una malla rómbica bajo una carga distribuida para cualquier diámetro de malla y distancia entre tirantes, dando por hecho que sus características mecánicas y geométricas se mantienen.

4.2.- Comparación entre los valores calculados y medidos.

La tabla 3 muestra los resultados obtenidos con ambos modelos, el modelo elástico y el geométrico, para el caso unidireccional para membranas de malla rómbica con alambres de 3 mm de diámetro. Se puede observar que los valores, de todos los parámetros incluidos en la tabla, son prácticamente iguales para los dos métodos de cálculo. Las, generalmente, pequeñas diferencias entre los valores calculados y los medidos en los ensayos se pueden deber a la geometría y la manera de aplicación de la carga distribuida.

5.- Aspectos medioambientales y estéticos.

Un aspecto muy importante que se debe tener en cuenta en la colocación de mallas de alambre es el impacto visual que las mismas pueden ocasionar. Especialmente, si se colocan en un entorno urbano o en una ubicación cuyo paisaje se deba preservar. En este sentido todos los elementos estructurales que forman la malla se pueden colorear con tonos ocre y marrón para favorecer su camuflaje con el terreno (fig. 1). De este modo se integran con el suelo, no como las mallas de acero galvanizadas convencionales que son claramente visibles, debido al reflejo de la luz en la pátina de zinc. Otro aspecto positivo es que las mallas se adhieren al perfil original del talud (debido a su alto módulo de elasticidad), que queda, por tanto, sin modificar. Los andamios que se necesitan para la colocación de la malla, los cables y los anclajes, se quitan una vez realizada la instalación por lo que no existe impacto visual a largo plazo. Además, las mallas ayudan a evitar la erosión del suelo y favorecen el anclaje de la vegetación al mismo, lo cual es especialmente importante en taludes empinados. La estructura no afecta al drenaje natural del terreno y no genera restos o sustancias que afecten al medioambiente. Además, la malla actúa, como soporte para las especies que la pueden colonizar de manera espontánea o

forzada, favoreciendo, asimismo, el desarrollo de la fauna local. De esta manera se restauran las partes más erosionadas.

d = 3 mm	Rotura			Carga de servicio		
	Medida	Calculada		Medida	Calculada	
		Modelo de geometría impuesta	Modelo elástico		Modelo de geometría impuesta	Modelo elástico
Capacidad de carga, p (kPa)	79	106	106	47	50	51
Flecha, Δz (mm)	305	319	320	248	242	245
Tensión de la malla a tracción, σ_y (kN/m)	151*	151	151	90*	90	91
Deformación unitaria, ϵ_y (mm/m)	84*	84	82	50*	48	49
Capacidad de carga total, Q (kN)	246	332	332	147	157	160

Tabla 3. Comparación de los valores medidos y calculados en el ensayo de validación para $d=3$ mm.

* De los resultados de los ensayos a tracción simple.

Se ha estudiado el impacto de la malla a una distancia de unos 100 m. La malla es invisible ya que solo tiene 3 mm de espesor. Es muy difícil distinguir los cables y las cabezas de los anclajes parecen puntos lejanos. Si se mantiene la vegetación existente el impacto visual a largo plazo es prácticamente nulo.

6.- Conclusiones.

Las mallas de alambre ancladas son una solución para la estabilización y refuerzo de taludes. Existen dos tipos de mallas: las mallas de cables y las mallas de alambre de alto límite elástico. Este trabajo estudia específicamente las mallas de alambre de alto límite elástico ya que es la solución cuyo impacto visual es menor. Es una solución económica y, tal vez, la única posible para actuar en terrenos altos y empinados. Este método, además, tiene la ventaja de que la malla colocada ayuda a la revegetación del talud, lo que a su vez ayuda a protegerlo de la erosión, a evitar el impacto visual y a la colonización por parte de la fauna local. Este sistema no genera sustancias que afecten al medioambiente y no modifica ni el perfil natural del terreno ni afecta a su drenaje. Se trata, por tanto, de una solución barata, que ayuda a la regeneración natural del talud y cuyo impacto visual es moderado.

Se han determinado las características mecánicas de las mallas de alambre de alto límite elástico mediante ensayos de laboratorio que simulan condiciones de campo. Los valores obtenidos mediante los ensayos de validación y los métodos de cálculo son similares. Los valores obtenidos entre los dos métodos de cálculo utilizados (modelo de geometría impuesta y modelo elástico) son prácticamente idénticos.

REFERENCIAS

- [1] Torres Vila J. A. (1999). Cálculo y diseño de sostenimientos mediante red de cables anclada. Sistema Pentifix. *Jornada Técnica Soluciones Flexibles en el Tratamiento de Taludes, Granada*, Consejería de Obras Públicas y Transporte, Junta de Andalucía, España.
- [2] Muñoz B., y Torres Vila, J.A. (2000). *Sistemas de soporte flexibles en la estabilización de taludes y control de la erosión. Experiencias de aplicación en Andalucía*. Segundo Congreso Andaluz de Carreteras, Cádiz, 2, 1349-1362. Asociación Española de la Carretera, Madrid.
- [3] Geobrugg (1999). Documentación técnica. *Jornada Técnica Soluciones Flexibles en el Tratamiento de Taludes, Granada*. Consejería de Obras Públicas y Transporte, Junta de Andalucía, España.
- [4] Yang, You-Kui (2006). Concepts and methods of slope flexible stabilization system. *Chinese Journal of Rock mechanics and Engineering*, 25(2), 217-225. En chino.
- [5] He, Yong-Mei, Peng, Wei y Yang, You-Kui (2006). Typical cases of slope protection system. *Chinese Journal of Rock mechanics and Engineering* 25(2), 323-328. En chino.
- [6] Farrand, S. y Teen, A. (2008). Seismically induced landslide mitigation using flexible slope stabilisation systems. *2008 New Zealand Earthquake Engineering Conference*, 55.
- [7] Castro-Fresno, D., del Coz-Díaz, J.J., López, L.A. y García Nieto, P.J. (2008). Evaluation of the resistant capacity of nets using the finite element method and experimental validation. *Engineering Geology* 100, 1-10.
- [8] del Coz Díaz, J.J., García Nieto, P.J., Castro-Fresno, D. y Blanco Fernández, E. (2009). Non-linear analysis of cable networks by FEM and experimental validation. *International Journal of Computer Mathematics* 86(2), 301-313.
- [9] Torres Vila, J. A., Torres Vila, M. A. y Castro, D. (2001). Validación de los modelos físicos de análisis y diseño para el empleo de membranas flexibles Tecco G-65, como elemento de soporte superficial en la estabilidad de taludes. *4º Simposio Taludes y Laderas Inestables*, 3, 1107-1118, Granada.
- [10] Love, B.M. (1892). *A treatise on the mathematical theory of elasticity*. Cambridge University Press.
- [11] Castro-Fresno, D. (2001). Estudio y Análisis de las Membranas Flexibles como Elemento de Soporte para la Estabilización de Taludes y Laderas de Suelos y/o materiales sueltos. *Tesis*, Universidad de Cantabria.
- [12] Castro-Fresno, D. y Ballester, F. (2003). Sistema flexible unidireccional para la estabilización de taludes y laderas de suelos o materiales sueltos. *Ingeniería Civil*, 129, 41-50
- [13] Castro-Fresno, D., Torres Vila, J. A. y Torres Vila, M. A. (2001). Modelos físico-matemáticos de análisis y diseño para el empleo de membranas flexibles como elementos de soporte en la estabilización superficial de taludes. *IV Simposio Taludes y Laderas Inestables*, Madrid, 3, 1017-1028.