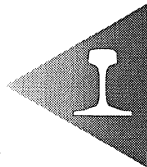


PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS Y DISEÑO PARA LA APLICACIÓN DE REDES DE CABLES DE ACERO EN LA ESTABILIZACIÓN DE TALUDES



Juan Antonio Torres Vila

Director Técnico GEOBRUGG Ibérica

Polígono de Capuchinos, 2 – 20100 Rentería (Guipúzcoa)

Tel: 943 51 31 65; Fax: 943 51 69 38

RESUMEN

Se presenta una síntesis del procedimiento de análisis y diseño que permite el cálculo y dimensionamiento de un elemento flexible (red de cables) para la aplicación de cargas al terreno o la contención de los empujes de éste, actuando en combinación con barras de anclaje.

La modelación matemática del trabajo de las redes, conjuntamente con los resultados de las pruebas de laboratorio bajo cargas distribuidas para los diferentes tipos de redes y el modelo de cálculo, han permitido calcular el empuje que las redes pueden ejercer sobre la superficie del terreno para aplicación activa o recibir de éste para aplicaciones pasivas, partiendo de los esfuerzos a tracción directa que se generan en el elemento de soporte continuo.

El procedimiento de dimensionamiento permite seleccionar el tipo de red más adecuado, tamaño de cuadrícula de anclaje, diámetro de las barras y de los cables de transmisión de cargas para el factor de seguridad que se seleccione.

La posibilidad de solucionar un problema determinado con diferentes combinaciones de elementos, permite en cada caso la obtención de la solución óptima.

El presente trabajo es un resumen de los procedimientos de dimensionamiento, para la utilización de las redes de cables como tecnología de estabilización de taludes elaborados por GEOBRUGG.

RED DE CABLES DE ACERO TECCO-TD COMO SOLUCIÓN DE REPARTO DE CARGAS DEL BULONADO

INTRODUCCIÓN

En múltiples ocasiones durante la estabilización de taludes mediante bulones, se presentan condiciones tales como: rocas blandas, macizos muy fracturados, rocas muy degradables y susceptibles al proceso de meteorización, macizos de rocas sedimentarias donde los planos de estratificación aparecen casi verticales y transversales a la dirección del desmonte, zonas de fuertes plegamientos y alteraciones geológicas, entre otras, donde la aplicación del bulonado ocasiona múltiples problemas de comportamiento de la solución y su estabilidad con el tiempo.

Los problemas principales que se presentan en estas condiciones son los siguientes:

- No se garantiza un apoyo estable en la superficie del terreno para la aplicación de las cargas del bulonado a través de la cabeza de reparto de carga.
- Garantizar un adecuado reparto de las cargas a través de la masa fracturada.
- Deslizamientos o pérdidas de estabilidad del terreno en la zona interior de la cuadrícula de bulonado, anulando el trabajo de las barras.

Tradicionalmente las dificultades anteriores se han tratado de solucionar combinando las técnicas de bulonado con capas de gunita armada y/o con vigas de hormigón para el reparto de cargas, generando un elevado impacto ambiental e interfiriendo el drenaje natural del talud.

Para las citadas condiciones se ha diseñado una nueva tecnología basada en la utilización de redes de cables de acero de Geobrugg tipo TECCO-TD, como elemento de contención y reparto de cargas del bulonado profundo y sustitución de la cabeza de reacción del bulón.



DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA

El sistema está compuesto por paños de red de cables tipo TECCO-TD de diferentes resistencias colocados sobre una malla de alambre galvanizado de triple torsión 8x10/15, unidos vertical y horizontalmente con cables de acero de alma metálica, capaces de ejercer empujes sobre el terreno hasta 53 kN/m². En la intersección de los cables horizontales y verticales se ubican las barras de anclaje. La sujeción de los cables a los anclajes se realiza con placas especiales.

Las cargas ejercidas por los bulones son transmitidas a los cables de acero, los cuales traccionan la red en todo su perímetro. La red funciona como elemento final de transmisión continua de carga del bulonado al terreno (figura 1).

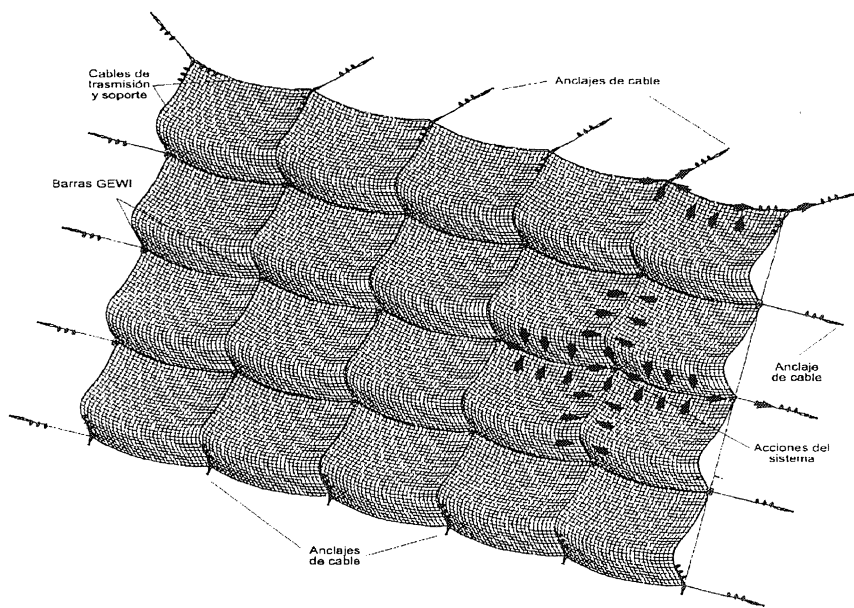


Fig.1. Esquema de funcionamiento. Las flechas indican la dirección de acción de las fuerzas.

El sistema funciona como una superficie continua tensada, la que por una parte, aplica la carga del bulonado al terreno en forma continua, independientemente del estado de la superficie, y por otra parte, recibe del terreno los incrementos de carga producidos por el empuje del monte sobre las redes y los transmite por los cables a la cabeza de los bulones y de aquí a la zona estable del bulbo de anclaje (figura 2).

La tecnología de instalación y el cumplimiento riguroso de la secuencia de montaje, es fundamental para garantizar que las hipótesis tenidas en cuenta durante el diseño, se cumplan en el sistema instalado. Una instalación deficiente puede limitar la efectividad del sistema.

La fijación perimetral del sistema se realizará mediante anclajes de cable Geobrugg (GA-7001) los que garantizan la absorción de las fuerzas de tracción evitando los esfuerzos de cortante en los anclajes extremos.

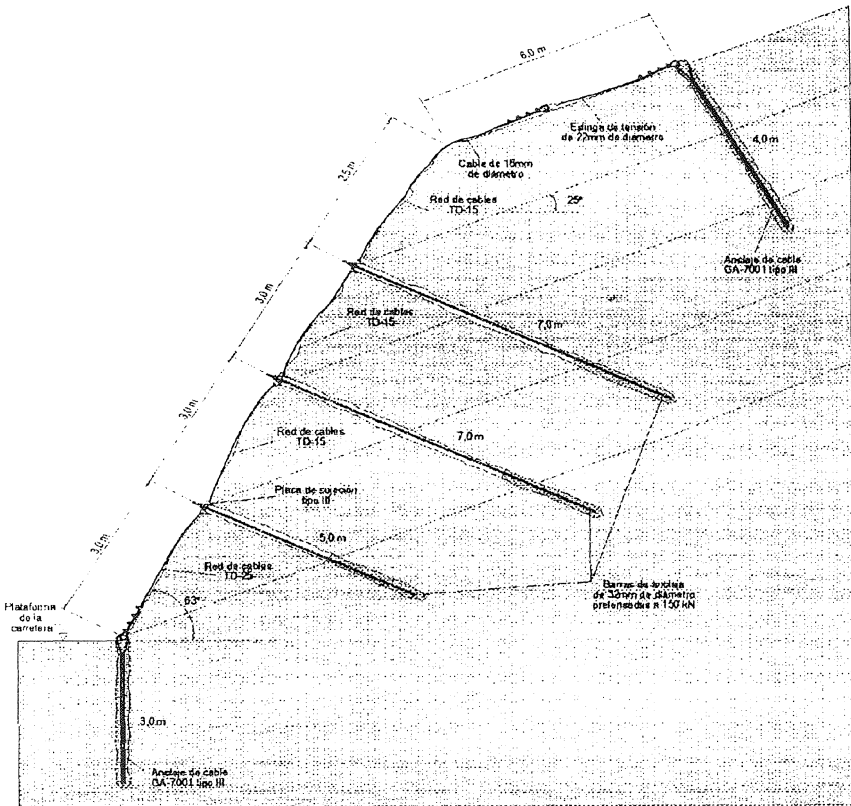


Fig. 2. Corte transversal de solución combinada de bulones activos y redes de cables.

La cuadrícula del bulonado, diámetro de barras, tipo de red de cables y todos los elementos componentes del sistema deben dimensionarse para cada proyecto en específico y dependerán de los cálculos geotécnicos que se realicen. La cuadrícula de an-



claje puede ser de cualquier dimensión desde el punto de vista constructivo, siendo más conveniente adecuarse a los tamaños estándar de los paños de red. Las longitudes de los anclajes interiores dependerán de la posición del plano potencial de deslizamiento con respecto a la superficie del talud.

La carga de los bulones durante la instalación, pone todo el sistema en tensión y efectúa la acción activa del bulonado en toda la superficie, ayudado por las redes y los cables de refuerzo. Se recomienda el *bulonado del tipo mixto*. La reacción máxima que se puede generar en la cabeza de los bulones dependerá del diámetro de los cables utilizados y del ángulo con que éstos tiren de los mismos. El procedimiento de diseño incluye el dimensionamiento de los cables de acuerdo con el diámetro del bulonado utilizado. Se adjuntan tablas para la aplicación práctica.

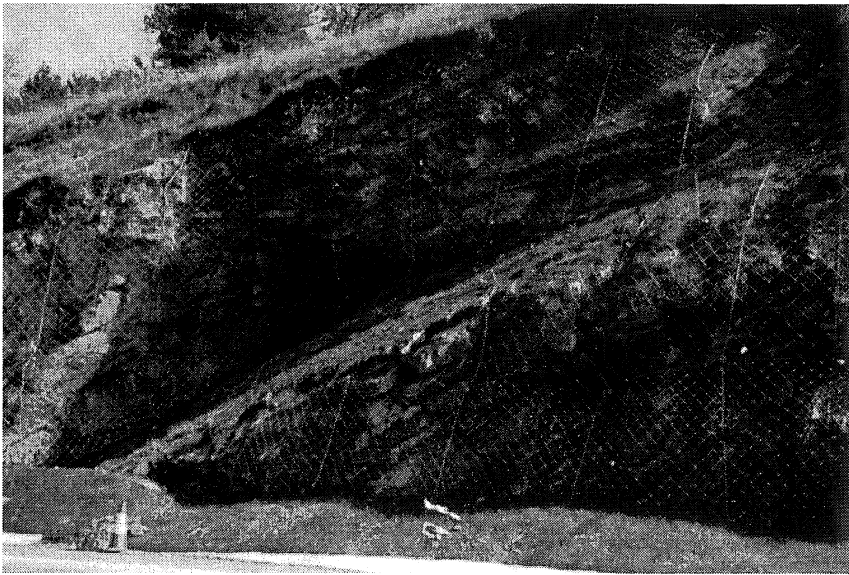


Fig. 3. Red de Cables combinada con bulonado activo de $\phi = 32$ mm en cuadrículas de 3 x 2 m. Precarga de los bulones 150 kN.

Esta solución presenta las siguientes ventajas:

- Asegura una aplicación de carga en forma continua en toda la superficie del terreno independientemente del estado de la misma.
- Es una solución segura, ya que permite el dimensionamiento riguroso del sistema de estabilización y la aplicación de los factores de seguridad que se estimen pertinentes.

- Aumento de la seguridad y fiabilidad del bulonado al prescindir de la cabeza de reacción del bulón en terrenos donde la efectividad de ésta no es garantizable.
- Respeto del medio ambiente, con mínimo impacto ambiental y permitiendo la revegetación de la superficie. No interfiere el drenaje natural del terreno.

En las fig. 3 y 4 aparecen ejemplos de aplicación de la tecnología de aplicación de redes de cables en la estabilización de taludes.

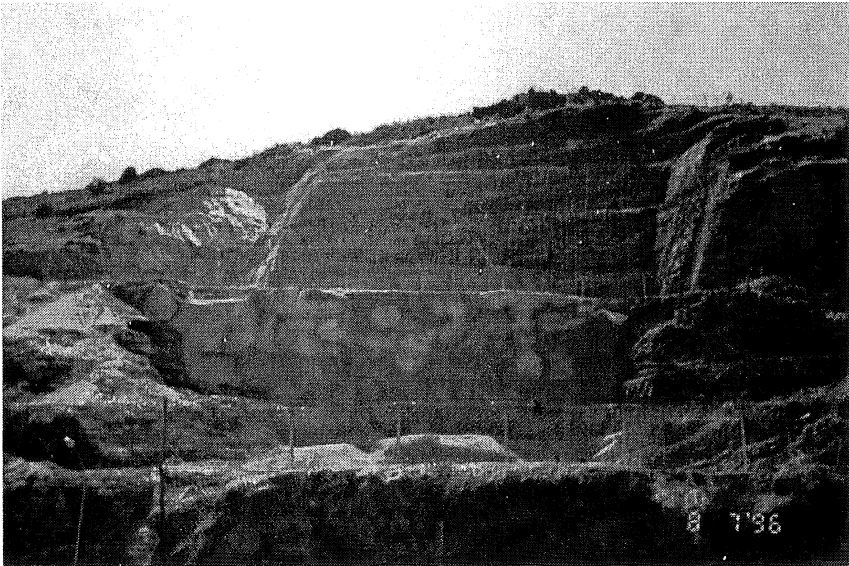


Fig. 4. Gunita combinada con bulones de 12m (zona central). Solución con red de cables y anclajes por debajo de la berma y a la derecha por encima de la barrera superior.

Precarga de los bulones 150 kN.

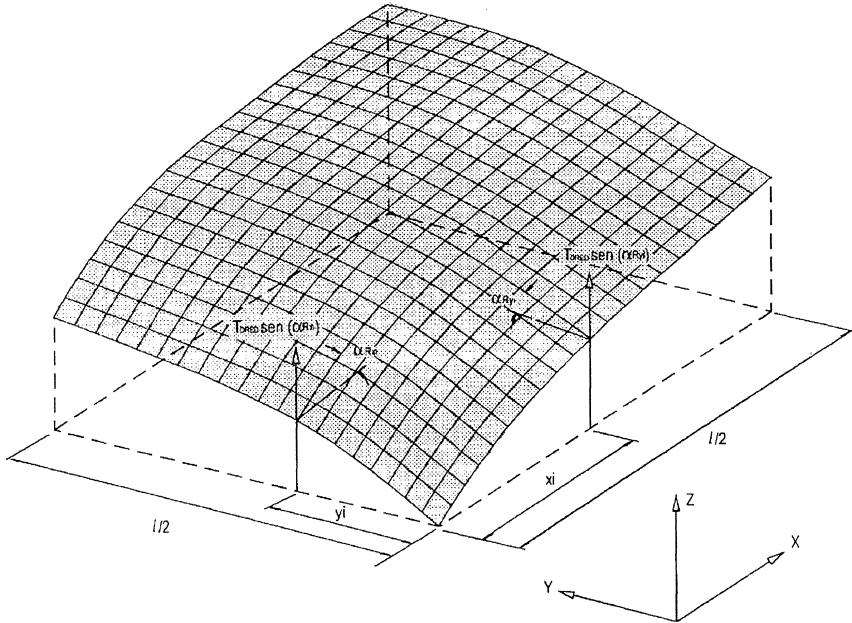
SELECCIÓN DEL TIPO DE RED DE CABLES

El tipo de red de cable a emplear, se seleccionará a partir del empuje unitario (E_u) que sea capaz de ejercer en la dirección del bulonado, un tipo de red de cable, para un tamaño de cuadrícula determinado (espaciamiento entre anclajes o patrón de bulonado). La red seleccionada para un patrón de bulonado y diámetro de bulón, deberá ejercer un empuje total sobre el terreno de magnitud igual o mayor que la carga de trabajo del bulón.



MODELO MATEMÁTICO

El empuje total que ejerce una cuadrícula de red de cable, se ha determinado integrando en todo el perímetro la proyección del valor de la resistencia a tracción directa de la red de cables (kN/m) en la dirección perpendicular al plano medio de la cara del talud.



El modelo utilizado corresponde a una superficie de doble curvatura (parábola cuadrática en el espacio X,Y,Z) denominada *spline bicuadrático*, que tiene la siguiente expresión:

$$z = A_1x^2y^2 + A_2x^2y + A_3x^2 + A_4xy^2 + A_5xy + A_6x + A_7y^2 + A_8y + A_9 \quad (1)$$

donde: z: Dirección de la aplicación del empuje

x,y: Direcciones ortogonales por donde pasan los cables horizontales y verticales.

La inclinación de la fuerza de tracción directa de la red α_R (ángulo de incidencia de la red), es variable a lo largo del perímetro.

El valor de α_R , en cada punto, se obtiene a partir de la derivada parcial de la ecuación (1), a lo largo de los cables de transmisión de las cargas y según la dirección de los ejes X e Y.

$$\frac{\partial z}{\partial x} = 2A_1xy^2 + 2A_2x + 2A_3x + A_4y^2 + A_5y + A_6 \quad (2)$$

$$\frac{\partial z}{\partial y} = 2A_1x^2y + A_2x^2 + A_4xy + A_5x + 2A_7y + A_8 \quad (3)$$

Integrando:

$$Q_{RED} = 4 \int_{y=0}^{y=l/2} T_{DRED} \operatorname{sen} \alpha_{RY} dy + 4 \int_{x=0}^{x=l/2} T_{DRED} \operatorname{sen} \alpha_{RX} dx \quad (4)$$

$$Q_{RED} = 4 \int_{y=0}^{y=l/2} T_{DRED} \operatorname{sen} \left[\operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right) \right] dy + 4 \int_{x=0}^{x=l/2} T_{DRED} \operatorname{sen} \left[\operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right) \right] dx \quad (5)$$

Q_{RED} : Carga total resultante en la dirección Z

T_{DRED} : Tensión a tracción directa de la red

l : Ancho de cuadrícula

La integral anterior ha sido resuelta por métodos numéricos, empleando diferenciales en X (Δx) y en Y (Δy), ambos de 0,25m, quedando:

$$Q_{RED} = 4 \left[\sum_{y=0}^{y=l/2} (T_{DRED} \operatorname{sen} \alpha_{RY} \cdot \Delta y) + \sum_{x=0}^{x=l/2} (T_{DRED} \operatorname{sen} \alpha_{RX} \cdot \Delta x) \right] \quad (6)$$

Esta expresión ha sido resuelta (Tabla 1) para tamaños de cuadrícula entre 2,0 y 4,0 m y para valores crecientes de tensión de tracción en la red de cables desde 46 hasta 176 kN/m.

Las características de los tipos de red utilizados aparecen resumidos en la tabla 2:

Tipo de red TECCO	Soporte total, Qrot, (kN) Redes 3x3m	Carga de rotura a tracción directa de la red, T_{DRR} en (kN/m)		
		Calculada	Laboratorio	Valor utilizado
TD - 15	200	86	87,50	85
TD - 20	250	105	106,94	105
TD - 25	320	130	134,04	135
TD - 30	420	172	-	175

Tabla 2. Características de las redes de cable utilizadas



Carga a tracción Directa (kN/m)	Tipo de red de cables	Carga total resultante en la dirección z, Q _{RED} (kN) para luces de paño l (m) de:					Diámetro de la barra de anclaje (mm)
		2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	
46	TECCO TD-15	95,3	102,5	110,8	124,4	133,1	φ = 25
48		89,4	107,0	115,6	128,8	138,9	
50		103,5	111,4	120,4	135,2	144,7	
52		107,7	115,6	125,2	140,6	150,5	
54		111,8	120,3	130,9	146,0	156,3	
56		115,0	124,6	134,9	151,4	162,1	
58		120,1	129,2	139,7	156,6	167,9	
60		124,3	133,7	144,5	162,2	173,6	
62		128,4	138,2	149,3	167,6	179,4	
64		132,5	142,6	154,1	173,0	185,2	
66		136,7	147,1	159,0	178,4	191,0	
68		140,8	151,5	163,8	183,8	196,8	
70		145,0	156,0	168,6	189,2	202,6	
72		149,1	160,4	173,4	194,6	208,4	
74		153,2	164,9	178,2	200,1	214,2	
76		157,4	169,3	183,0	205,5	219,9	
78	161,5	173,8	187,9	210,9	225,7		
80	165,7	178,3	192,7	216,3	231,5		
82	169,8	182,7	197,5	221,7	237,3		
84	174,0	187,2	202,3	227,1	243,1		
86	178,1	191,6	207,1	232,5	248,9		
88	182,2	195,1	211,9	237,9	254,7		
90	186,4	200,5	216,8	243,3	260,5		
92	190,5	205,0	221,6	248,7	266,3		
94	194,7	209,5	226,4	254,1	272,0		
96	198,8	213,9	231,2	259,5	277,8		
98	202,9	218,4	236,0	264,9	283,6		
100	207,1	222,8	240,8	270,3	289,4		
102	211,2	227,3	245,7	275,7	295,2		
104	215,4	231,7	250,5	281,2	301,0		
106	219,5	236,2	255,3	286,6	306,8		
108	223,7	240,6	260,1	292,0	312,6		
110	227,8	245,1	264,9	297,4	318,4		
112	231,9	249,6	269,7	302,8	324,1		
114	236,1	254,0	274,5	308,2	329,9		
116	240,2	258,5	279,4	313,6	335,7		
118	244,4	262,9	284,2	319,0	341,5		
120	248,5	267,4	289,0	324,4	347,3		
122	252,6	271,8	293,8	329,8	353,1		
124	256,8	276,3	298,7	335,2	358,9		
126	260,9	280,8	303,5	340,6	364,7		
128	265,1	285,2	308,3	346,0	370,4		
130	269,2	289,7	313,1	351,4	376,2		
132	273,4	294,1	317,9	356,9	382,0		
134	277,5	298,6	322,7	362,3	387,8		
136	281,6	303,0	327,6	367,7	393,6		
138	285,8	307,5	332,4	373,1	399,4		
140	289,9	312,0	337,2	378,5	405,2		
142	294,1	316,4	342,0	383,9	411,0		
144	298,2	320,9	346,8	389,3	416,7		
146	302,4	325,3	351,6	394,7	422,5		
148	306,5	329,8	356,5	400,1	428,3		
150	310,6	334,2	361,3	405,5	434,1		
152	314,8	338,7	366,1	410,9	439,9		
154	318,9	343,1	370,9	416,3	445,7		
156	323,1	347,6	375,7	421,7	451,5		
158	327,2	352,1	380,5	427,1	457,3		
160	331,3	356,5	385,4	432,5	463,0		
162	335,5	361,0	390,2	438,0	468,8		
164	339,6	365,4	395,0	443,4	474,6		
166	343,8	369,9	399,8	448,8	480,4		
168	347,9	374,3	404,6	454,2	486,2		
170	352,1	378,8	409,4	459,6	492,0		
172	356,2	383,3	414,3	465,0	497,8		
174	360,3	387,7	419,1	470,4	503,6		
176	364,5	392,2	423,9	475,8	509,4		

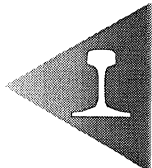


Tabla 1. Relación entre la tracción directa y la carga total resultante en la dirección z

Para la selección de la red se debe cumplir la siguiente condición:

$$Q_{RED} > T_{BR} \quad (7)$$

T_{BR} : Carga de rotura de la barra GEWI

Como $Q_{RED} = f(T_{DRED})$, la red que se seleccione debe cumplir también que:

$$T_{DRED} \geq T_{DRR} \quad (8)$$

T_{DRED} : Tracción directa de la red de cables (tabla 1 col. 1) para el valor de Q_{RED} , seleccionado.

T_{DRR} : Carga de rotura a tracción directa, para la red seleccionada.

En la tabla 1 aparecen en cada columna indicados los valores de carga de rotura (T_{BR}) para diferentes tipos de barra GEWI.

Los resultados que se obtengan con la aplicación de la ecuación (5) ayudados por la tabla anterior no tienen una única solución y puede resultar necesaria la evaluación de diferentes patrones de bulonado, diámetro de barra y tipo de red. La determinación de otra alternativa de solución tiene como condición garantizar el mismo valor de empuje sobre el terreno (kN/m^2).

Sin embargo, el empuje unitario E_u (kN/m^2) no es una característica asociada al tipo de red. Para un mismo tipo de red el valor de E_u , es función del tamaño de la cuadrícula (relación perímetro/área) y de la solución de la ecuación (5).

Para facilitar la utilización del modelo, este se ha expresado en términos de empuje unitario (kN/m^2) para diferentes factores de seguridad de trabajo del sistema.

Diferentes variantes de solución de un ejemplo resuelto, aparecen en la tabla 3.

Empuje unitario sobre el terreno $E_u = 12 \text{ kN/m}^2$ $FS = 1,67$					Diámetro de los cables de transmisión de carga, (mm)
Patrón de anclajes, $l_{(m)}$	Diámetro de la barra GEWI (mm)	Tensión a tracción de la red T_{DRED} (kN/m)	Tipo de Red	FS_{REAL}	
4.0	32	68	TD-25	1,98	18
3.5	28	56	TD-20	1,88	16 y 18
3.0	25	46	TD-15	1,84	14 y 16
2.5	25	24	TD-15	3,54	14 y 16

Tabla 3. Ejemplo de solución de red de cables con bulonado activo.

Las cuatro soluciones anteriores son equivalentes, la selección de una de ellas dependerá de consideraciones de carácter técnico económico.

El manual de dimensionamiento al que se ha hecho referencia, también incluye la solución con redes de cable del tipo TECCO para contención superficial de desmontes, así como un procedimiento simplificado para la determinación del empuje que ejerce el terreno.

