

Refuerzo de muros de escollera con una red de cables anclada con bulones

CASTRO FRESNO, DANIEL (*); TORRES VILA, JUAN A. (**)

RESUMEN En el presente artículo se presenta el diseño de una solución para el refuerzo de un muro de escollera con una red de cables anclada al terreno con bulones. En primer lugar se describen las deficiencias más usuales en los muros de escollera y las manifestaciones de fallos que originan. A continuación se expone el modelo de análisis y diseño empleado para este sistema. Finalmente se presenta una aplicación concreta en un muro situado en la provincia de Cantabria. En esta parte se exponen el proceso de cálculo seguido a partir de los datos del emplazamiento así como la solución constructiva adoptada.

STONE WALL REINFORCED WITH CABLE NET ANCHORED WITH BOLTS

ABSTRACT *The current article presents the design of the solution to reinforce a stonewall with a cable net anchored to the ground with bolts. First, the commoner deficiencies in stonewalls and the signs of failings that they originate are described. Next the physical and design model for this system in the province of Cantabria is presented. In this part, the process of calculus followed starting from the site characteristics as well as the adopted constructive solution are exposed.*

Palabras clave: Refuerzo; Muros; Escollera; Red.

1. INTRODUCCIÓN

Los muros de contención, muros de sostenimiento y revestimientos de desmontes realizados con bloques de escollera de piedra, son una técnica muy generalizada y ampliamente aceptada en el sector de la construcción, en cualquier tipo de obras, tanto de obra civil como en edificaciones.

La sencillez y efectividad de este tipo de estructuras y lo relativamente sencillo de su ejecución ha promovido el empleo indiscriminado de las mismas, existiendo muchos emplazamientos ejecutados sin el adecuado diseño. Las deficiencias que dan lugar al fallo de estas estructuras y que más comúnmente se encuentra son las siguientes:

- Soluciones empíricas.
- Empleo de revestimiento de escollera en lugar de muros.
- Ejecución de muros con falta de sección.
- Geometría inadecuada y masa insuficiente, en muchas ocasiones por ajustar el muro a las condiciones de espacio, etc.

Todas estas circunstancias han dado como resultado la existencia de un conjunto de muros que se encuentran en condiciones de estabilidad precarias.

Tradicionalmente se han empleado dos soluciones para la reparación de estos defectos:

- a) Excavación y reposición del muro de escollera fallado por uno nuevo con la sección correcta.

- b) Construcción de un nuevo muro por delante del fallado a modo de estructura de refuerzo para que supla la falta de capacidad de soporte del antiguo

En muchos casos las obras de excavación para la reconstrucción del muro pueden llegar a ser un impedimento ya que compromete la estabilidad del terreno soportado y en el caso de carreteras puede provocar el cierre de las mismas durante las obras por falta de espacio.

2. DEFICIENCIAS DE LOS MUROS DE ESCOLLERA

Algunas de las insuficiencias más comunes que se presentan en este tipo de construcción, que provocan el fallo y que pueden ser susceptibles de solucionarse con un refuerzo, son las siguientes:

- a) Insuficiente sección del muro. Las manifestaciones del fallo pueden ser:
 - Desplazamiento de los bloques de escollera
 - Formación de "panza". El muro se deforma normalmente a media altura
 - Giro del muro
 - Desplazamientos de todo el conjunto
- b) Geometría inadecuada. Las manifestaciones de fallo pueden ser:
 - Desplazamiento de bloques en el cambio de sección.
 - Formación de panza en la cara interior del muro.

En este caso se modifica la sección racional del muro por no excavar los terrenos inestables del monte, en una zona de desmonte ejecutable y con vía abierta al tráfico de vehículos.

(*) Doctor Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. Profesor Asociado del Departamento de Transportes y Tecnología de Procesos y Proyectos. Universidad de Cantabria

(**) Ingeniero Civil. Geobruigg.



FIGURA 1. Desplazamiento de bloques de escollera.



FIGURA 2. Formación de panza y desplazamiento de horizontal del muro.

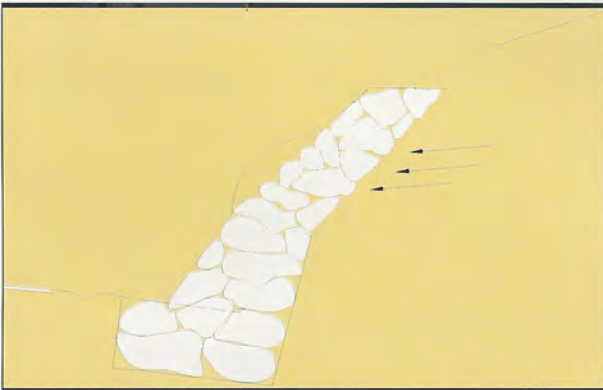


FIGURA 3. Formación de panza y desplazamiento de horizontal del muro.

c) Sobrecarga excesiva o no considerada adecuadamente durante el diseño. Manifestaciones de fallos:

- Desplazamientos de bloques de escollera en la sección central.
- Movimientos del pié.
- Colapso del muro.

d) Revestimiento de escollera

En muchos sitios al presentarse problemas en los desmontes de carreteras fundamentalmente, se coloca un revesti-

timiento de escollera como medida correctora. En el caso que esta solución resulte insuficiente fallará. Las manifestaciones de fallo serán:

- Desplazamiento de bloques de escollera.
- Formación de panzas
- Grietas en el monte
- Colapso del revestimiento

1.1. SOLUCIONES DE REFUERZO

El presente artículo tiene como objetivo mostrar las posibilidades de empleo de una membrana flexible (red de cables de acero), combinada con un sistema de anclajes profundos para el refuerzo de estas estructuras. Este sistema es capaz de aportar el complemento de capacidad de carga insuficiente en el muro o revestimiento de escollera fallado.

Las posibilidades que presenta este tipo de soluciones son las siguientes:

- Flexibilidad del sistema con posibilidad de adaptarse y admitir los movimientos de la escollera, sin que esto sea un síntoma de fallo.
- Ausencia de obras de excavación y movimiento de tierras.
- Aprovechamiento de la construcción existente.
- No se requiere espacio físico para el establecimiento de la solución de refuerzo.

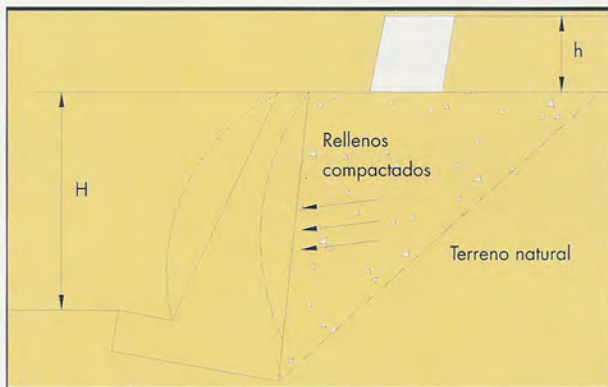


FIGURA 4. Esquema de fallo de muro con sobrecarga excesiva.



FIGURA 5. Esquema de fallo en un revestimiento de escollera.

- No se altera sensiblemente el aspecto de la construcción existente.
- Permite el crecimiento de vegetación.

Las limitaciones de esta solución son las siguientes:

- Capacidad de refuerzo limitada a las posibilidades de los elementos del sistema.
- Necesidad de existencia de estratos competentes para empotrar los anclajes.
- Dificultad de perforación al atravesar material de relleno detrás de la escollera.

De acuerdo con las posibilidades actuales, se pueden emplear dos tipos de materiales para el refuerzo de escolleras con soluciones flexibles:

- Red diagonal de cables de acero combinada con cables de refuerzo horizontales y verticales y anclajes activos.
- Malla romboidal de simple torsión de alambre de alto límite elástico combinada con cables de acero y anclajes activos.

En cualquier solución flexible el tensado de los bulones es necesario para adosar el sistema de refuerzo a la escollera y reducir la deformación en carga.

3. MODELO DE ANÁLISIS Y DISEÑO DEL SISTEMA

El modelo físico de análisis y diseño del sistema, se basa en el análisis del equilibrio de fuerzas actuantes sobre el elemento de contención existentes (muro o revestimiento de escollera), teniendo en cuenta la existencia de un empuje distribuido en el intrados del muro, de magnitud tal que sea capaz de estabilizar el conjunto hasta obtener un valor del factor de seguridad exigido.

El sistema de refuerzo se considera compuesto por una membrana flexible capaz de aplicar al muro un soporte distribuido en toda la superficie de actuación, la cual es anclada al terreno mediante bulones que transmiten la carga soportada por esta a la zona estable del macizo.

En el caso de que se empleen redes de cables como membrana de soporte, el diseño del sistema de refuerzo se realizará siguiendo el manual de diseño de cada fabricante.

1.2 CÁLCULO DEL EMPUJE DEL TERRENO

De acuerdo con el esquema del fallo del terreno en la parte posterior del muro, se determina el empuje que la masa de terreno inestable ejerce sobre el elemento de contención.

Para la determinación del empuje del terreno, lo más recomendable es el empleo de programas de cálculo por ordenador, utilizando el programa adecuado al tipo de fallo tomado como hipótesis de movimiento del terreno.

Al determinar la hipótesis de fallo, deben tenerse en cuenta lo siguiente:

- Existencia o no de una masa de terreno uniforme por detrás de la escollera.
- En caso de suelos no uniformes, estratigrafía del terreno, buzamiento de los estratos.
- Posibilidad de existencia de planos de deslizamiento resistencia cortante reducida. Buzamiento y orientación de los mismos.

1.3 CÁLCULO DEL SOPORTE DEL MURO EXISTENTE Y DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD

Para determinar el soporte del muro, se realiza una revisión o recálculo del mismo, para lo cual es necesario previamente determinar los siguientes parámetros:

- Geometría del muro (sección transversal).
- Densidad aparente de la escollera.

- Ángulo de rozamiento interno de la escollera.
- Características geotécnicas del terreno de la cimentación, (c, ϕ) .

En primer lugar, se debe calcular la estabilidad interna del muro para comprobar que realmente la estructura funciona como un muro de escollera y no como un revestimiento, con lo cual se pueden emplear los criterios y formulas tradicionales de diseño de muros para el análisis del mismo.

Partiendo del cumplimiento de la condición de estabilidad interna del muro, se revisan las siguientes condiciones:

- Estabilidad al vuelco (factor de seguridad al vuelco).
- Estabilidad al deslizamiento, (factor de seguridad al deslizamiento).
- Comprobación de existencia de tracciones en la base del muro.

A la vista de los valores obtenidos para las condiciones de estabilidad anteriores se debe calcular el incremento de soporte necesario a aplicar superficialmente el muro. En el caso que el factor de seguridad al deslizamiento sea el valor crítico, el incremento del soporte se calculará como sigue:

$$F_B = E \times (FS_{REQUERIDO} - FS_{ACTUAL}) \text{ kN/m}$$

Donde:

F_B	Resultante del incremento del soporte proyectado en la dirección horizontal.
E	Empuje del terreno proyectado en la dirección horizontal.
FS_{ACTUAL}	Factor de seguridad actual al deslizamiento.
$FS_{REQUERIDO}$	Factor de seguridad al deslizamiento requerido.

En el caso que el factor de seguridad al vuelco sea el valor crítico, el incremento del soporte se calculará como sigue:

$$F_B \times \chi_{BULONADO} = W \times \chi_w (FS_{REQUERIDO} - FS_{ACTUAL}) \text{ kN/m}$$

Donde:

F_B	Resultante del incremento del soporte.
χ_w	Distancia de la resultante del incremento de soporte al pie del muro.
W	Resultante del peso del muro.
χ_w	Distancia de la resultante del peso del muro al pie del muro.
FS_{ACTUAL}	Factor de seguridad actual al vuelco.
$FS_{REQUERIDO}$	Factor de seguridad al vuelco requerido.

Con el valor de incremento de soporte calculado se vuelve a comprobar las condiciones de estabilidad del conjunto muro más membrana anclada.

Una vez encontrada la solución que cumpla con los criterios anteriores, se debe de calcular la carga de hundimiento del muro y comprobar que el terreno de la cimentación la va a soportar.

El ángulo de bulonado del refuerzo, el cual estará dentro de un rango constructivo (15-30° respecto de la horizontal), se recomienda seleccionarlo en función del tipo de fallo. Para los dos primeros casos, falta de estabilidad al vuelco y al deslizamiento, el ángulo de bulonado será lo más horizontal posible, por el contrario, para el último caso deberá aportar una componente vertical lo mayor posible.

Para el caso de que el muro no tenga estabilidad interna, los cálculos pueden realizarse con la ayuda de un software de cálculo general de estabilidad de taludes, teniendo en cuenta en la sección transversal de cálculo tanto el terreno natural como la sección del revestimiento colocado.

Dependiendo de la forma de fallo del muro, el análisis puede realizarse a diferentes alturas.

4. APLICACIÓN A ESCALA NATURAL

1.4. LOCALIZACIÓN DEL EMPLAZAMIENTO (ESCOLLERA BORLEÑA)

El primer emplazamiento seleccionado para el refuerzo de un muro de escollera fallado con una membrana flexible anclada, se localiza en la carretera N-623 Burgos-Santander (por el Puerto del Escudo) en el PK 118+900, cercano a la localidad de Borleña.

1.5. DESCRIPCIÓN DEL EMPLAZAMIENTO

La zona de actuación corresponde a un muro de escollera realizado durante las obras de mejora de la traza y ampliación de la calzada.

Esta zona en específico corresponde a una rectificación de curva, con abandono del trazado antiguo y emplazamiento de la plataforma de la carretera a media ladera.

El muro ejecutado tiene una longitud de 120-130 m y una altura de 6-7 m con 1.4 m de ancho en coronación. La solución de refuerzo fue aplicada en una longitud de 96 metros.

Producto de los empujes del terreno, el muro presenta síntomas de falla. En la medida que se avanza de los extremos al centro (zona de mayores empujes), el paramento exterior va aumentando la pendiente debido al giro (vuelco) del muro, en la zona más cercana al centro aparecen desplazamientos de los bloques de escollera ubicados a media altura del muro y en la zona de mayor empuje además se aprecia el desplazamiento de la cimentación hacia la calzada, con movimientos, fractura de bloques y pérdida de material del muro.

En las (Figura 1 y Figura 2) se aprecian detalles del estado del muro antes de la aplicación del refuerzo y en la Figura 6 se aprecia un montaje fotográfico del muro.

En la zona de la ladera natural a diversas alturas, se observan grietas por desplazamiento del terreno, estando la zona de mayores desplazamientos limitada por grietas a 45-55 m de la cabeza del muro.

La profundidad del movimiento está limitada por la altura de la escollera ya que no se apreció indicio de movimientos del terreno en la zona de la cuneta y calzada.

1.6. EVALUACIÓN GEOTÉCNICA

El terreno del desmonte está compuesto de calacarenitas estratificadas de aspecto uniforme. En la parte superior del terreno afloran arenas limosas y areniscas de muy bajo nivel de cementación, adquiriendo una consistencia rocosa en la medida que aumenta la profundidad.

No se ha tenido en cuenta la disposición de los estratos y planos de discontinuidad singulares del desmonte, debido a que la profundidad del movimiento afecta fundamentalmente a los suelos alterados.

1.6.1. Hipótesis de fallo

Se ha considerado que el fallo se produce debido al empuje producido a lo largo de una superficie de fallo circular que pasa por el pie de la escollera. La masa de la escollera y el cortante generado en la base de la misma son insuficientes para la estabilización de la ladera.

1.6.2. Cálculo de las condiciones de estabilidad

Para el cálculo de la estabilidad del desmonte + escollera se realizó un levantamiento del monte, determinándose el perfil transversal de la ladera y la posición de las grietas existentes.

En la composición fotográfica (Figura 7) se observa la ubicación de los perfiles transversales tomados como secciones de cálculo.

El perfil N. 1 corresponde con la zona de mayores empujes donde la escollera está reventada, mayor distancia a la grieta en la ladera y mayor pendiente del terreno excavado (40°). La inclinación de la ladera natural es de 30° .

El perfil N. 2 corresponde con una zona intermedia representativa de la mayor parte del muro. La distancia del muro a la grieta es menor (44 m) y la inclinación del talud excavado por encima del muro también es menor ($35-37^\circ$), siendo igual la inclinación de la ladera natural (30°).

Los cálculos de estabilidad se realizaron con un programa clásico de ordenador para el análisis de movimientos con superficies circulares.



FIGURA 6. Vista general del muro.



FIGURA 7. Ubicación de los perfiles transversales.

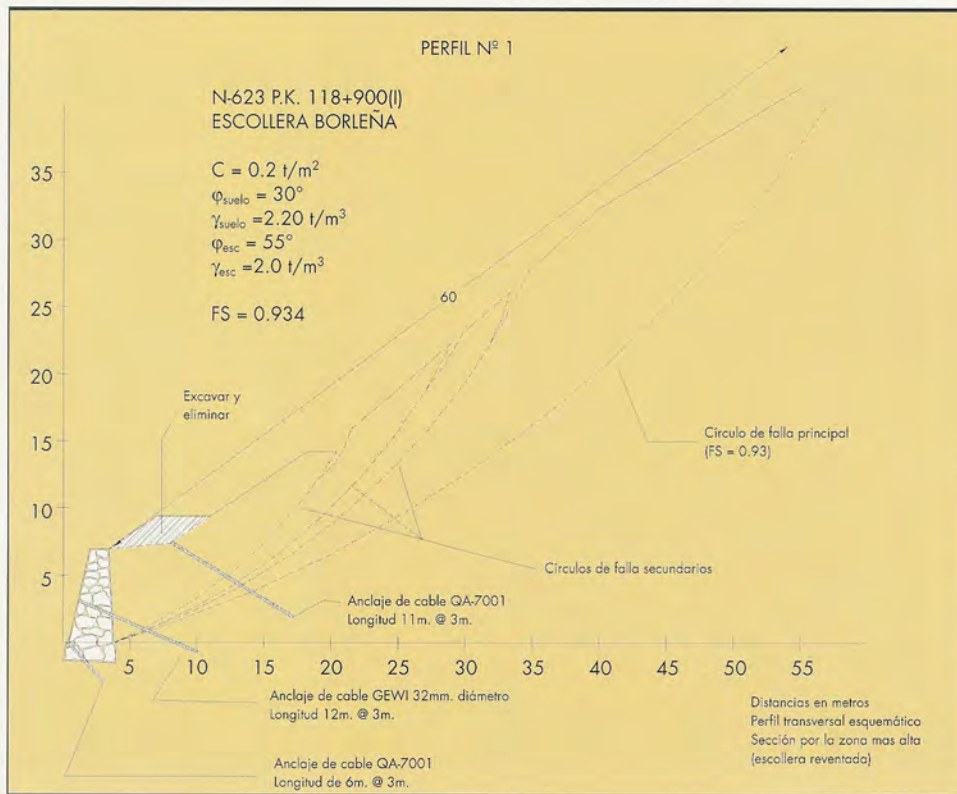


FIGURA 8. Perfil Nº 1.

Los parámetros utilizados para los cálculos son los siguientes:

- Suelos de arenisca de la ladera:
 - $C = 0,2 \text{ t/m}^2$ (2 kN/m^2)
 - $\phi = 30^\circ$
 - $\gamma_{\text{suelo}} = 2,2 \text{ t/m}^3$ (22 kN/m^3)
- Material de la escollera:
 - $C = 0$
 - $\phi = 55^\circ$
 - $\gamma_{\text{escollera}} = 2 \text{ t/m}^3$ (20 kN/m^3)

En las Figura 8 y Figura 9 se muestran las secciones correspondientes a los perfiles 1 y 2. En ambos casos el cálculo de falla principal (círculo de menor factor de seguridad corresponde al círculo que pasando por el pie de la escollera sale en la superficie cerca de la grieta más alejada).

Los factores de seguridad de las circunferencias pésimas resultantes del cálculo de la estabilidad son los siguientes:

- Perfil N. 1 $FS = 0,934$ (Escollera reventada y desplazada)
- Perfil N. 2 $FS = 1,01$ (Escollera deformada por pandeo)

Para evaluar la sensibilidad de la variación de la cohesión del suelo (parámetro estimado) en los cálculos del Factor de Seguridad, se calculó nuevamente el perfil 2 con cohesión del suelo de la ladera $C = 10 \text{ kN/m}^2$, obteniéndose un valor del $FS = 0,975$. Los valores de F.S. son del mismo orden, obteniéndose una reducción del 3,4% solamente.

1.7. DETERMINACIÓN DEL REFUERZO NECESARIO

En el modelo de cálculo, la fuerza estabilizadora se introduce como un soporte uniforme en la cara exterior de la es-

collera (kN/m^2) o como una fuerza total concentrada en kN/m , para obtener un Factor de Seguridad global del desmonte mayor de 1,7

Repitiendo el análisis de estabilidad global para estas condiciones se obtiene:

Soporte necesario = 150 kN/m para $FS > 1,7$

El sistema de soporte debe proporcionar un refuerzo de al menos $21,4 \text{ kN/m}^2$.

1.7.1. Solución aplicada.

Para el refuerzo de la escollera se empleó, en calidad de membrana flexible, la red diagonal de cables de acero tipo, combinada con anclajes activos.

Para la selección de los elementos de soporte se empleó el manual de diseño de la empresa fabricante. Se tomó una cuadrícula de bulonado de $3 \times 3 \text{ m}$, con una banda inferior de red compuesta por paños de $3 \times 3 \text{ m}$ y una banda superior de paños de $4 \times 4 \text{ m}$, así se colocará una fila de anclajes en el pie, otra al centro de la escollera y una tercera en coronación por detrás de la escollera.

Solución obtenida:

Red diagonal de cables de acero (diámetro del cable 8 mm y lado de los rombos 200 mm).

Anclajes de coronación y pie:

Anclaje de cable flexible. Longitud de 11 m.

Carga de trabajo Prot = 195 kN .

$FS = 2$.

Anclajes en el paramento de la escollera:

Anclaje de barra de acero (GEWI $\phi 32 \text{ mm}$). Longitud de 12 m.

Anclaje activo.

Bulbo mínimo de anclaje de 5 m.

Soporte unitario del sistema: $21,4 \text{ kN/m}^2$

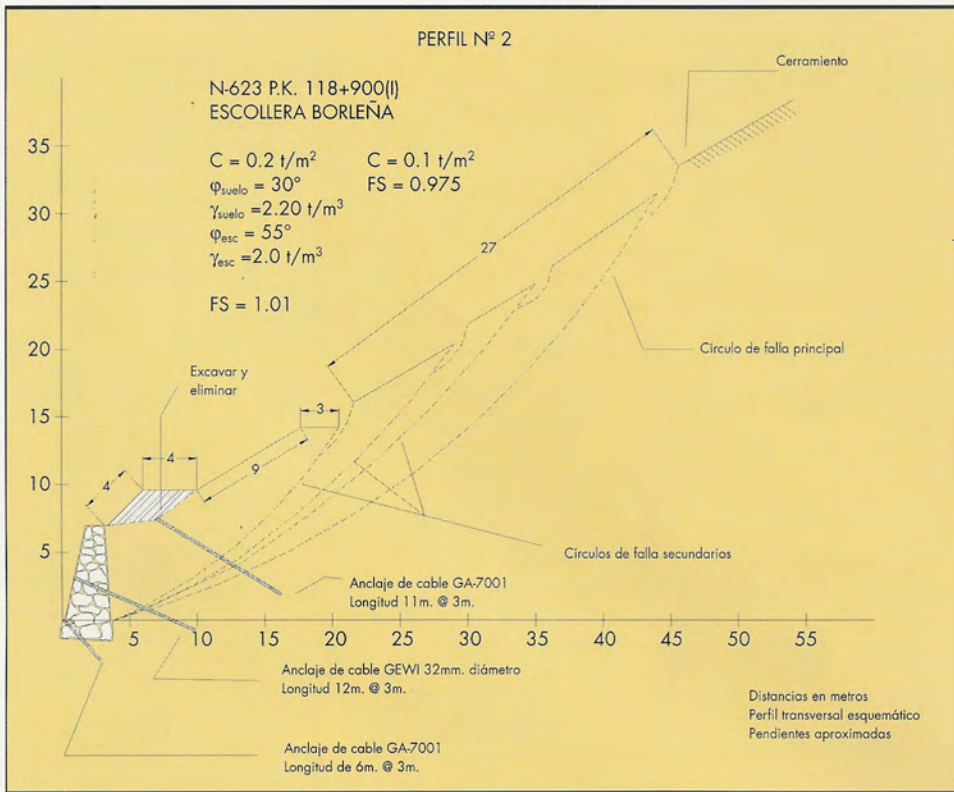


FIGURA 9. Perfil N° 2.

Factor de seguridad del sistema: 1,67

El esquema de la solución de refuerzo aplicada aparece detallado en la Figura 11.

1.8. SOLUCIÓN CONSTRUCTIVA

El procedimiento de construcción seguido en el siguiente orden:

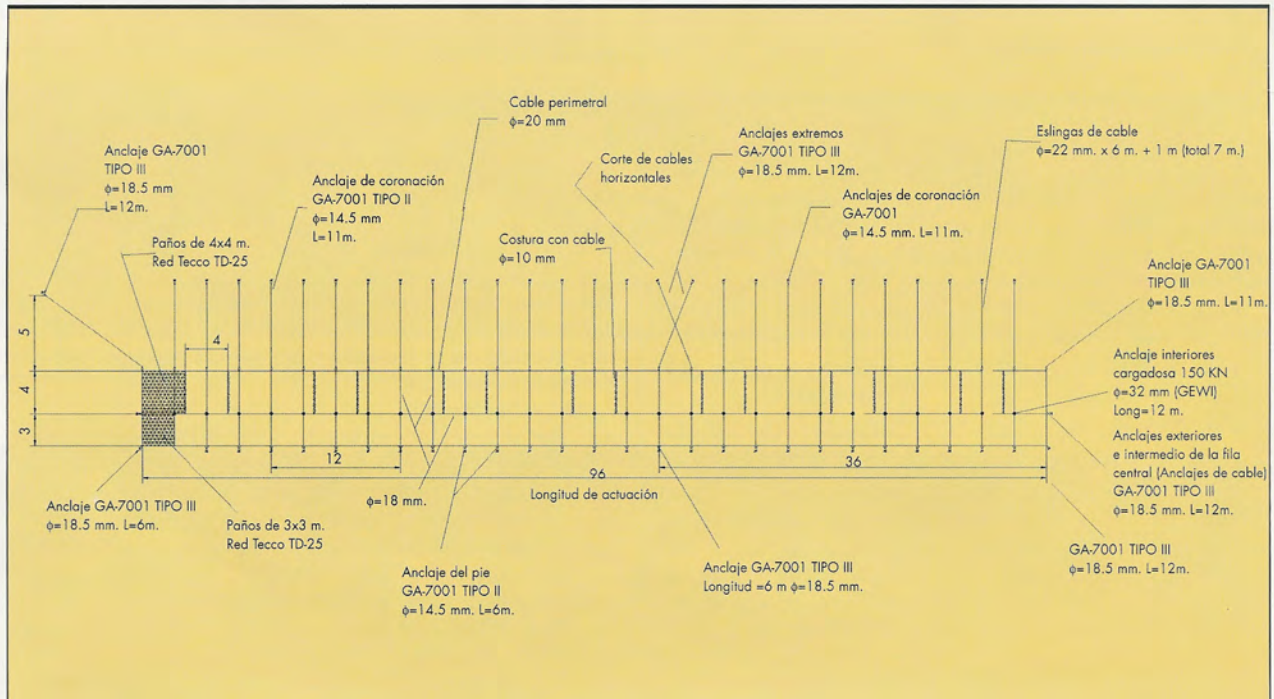


FIGURA 10. Desarrollo en planta de la solución de refuerzo.



FIGURA 11. Esquema de la solución de refuerzo.



FIGURA 12. Zona de coronación. Vista de la zona excavada, para la colocación retirada de los anclajes de coronación.

- Retirada del suelo de relleno por encima de la escollera, para retirar el anclaje de coronación y lograr un ángulo de tracción adecuado (Figura 12).
- Cubierta de la zona a tratar con malla de triple torsión para fijar la red de cables.
- Colocación y cosido de los paños de red con cable de acero de cosido y/o transmisión de cargas.
- Replanteo y ejecución de los anclajes. Los anclajes se perforaron con carro de perforación sobre orugas y diámetro de 125 mm.
- Instalación de cables perimetrales y conexión a los anclajes flexibles (Figura 13).



FIGURA 13. Zona del pie.



FIGURA 14. Tensado de anclajes I. Colocación del gato en la fila central de barras GEWI.



FIGURA 15. Tensado de anclajes II. Aplicación de precarga de 150 kN en el nudo de anclaje (intersección de los cables horizontales y verticales).

- Tensado de los anclajes centrales. La carga de pretensado aplicada fue de 150 kN, correspondiente al 60% de la carga de trabajo de las barras GEWI de 32 mm. En este caso la pretensión de los anclajes tiene como objetivo principal poner en carga la red, lograr un perfecto adosado y en consecuencia reducir a un mínimo las deformaciones interiores de la escollera. Como ventaja complementaria, la pretensión logrará un incremento del cortante en la zona comprimida de la superficie de deslizamiento (Figura 14, Figura 15, Figura 16 y Figura 17).

Notas:

La actuación se realizó con mínima incidencia en el tráfico, afectando sólo la calzada durante los trabajos de perforación.

Los trabajos se realizaron sin poner en riesgo la estabilidad de la ladera. El empleo de métodos tradicionales hubiera requerido la remoción de la escollera existente y la excavación en la ladera para acomodar un muro nuevo de mayores dimensiones, todo ello en una ladera en equilibrio límite.

El espacio ocupado por el sistema de refuerzo es nulo.

La flexibilidad del sistema permite el acomodo de los desplazamientos de la escollera sin pérdida de las características de soporte del sistema.

El impacto ambiental del sistema es prácticamente nulo, ya que la red de cables colocada transparente y se mantiene el efecto visual provocado por el muro de escollera original.

En las siguientes fotos se presentan detalles del emplazamiento al finalizar los trabajos de refuerzo de la escollera



FIGURA 16. Tensado de anclajes III.



FIGURA 17. Tensado de anclajes IV.



FIGURA 18. Vista general de la solución de refuerzo terminada.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se enmarca dentro del proyecto “Desarrollo de nuevas tecnologías de refuerzo y estabilización de desmontes en suelos y materiales sueltos” (Ref. 1FD97-0757) cofinanciado con fondos FEDER cuyo responsable es D. Francisco Ballester Muñoz. En dicho proyecto participan el Area de Ingeniería de la Construcción, la División de Ingeniería del Terreno y el Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria, junto con las empresas Geobrugg Ibérica S. A. y Malla Talud Cantabria S.L.

Esta actuación fue realizada gracias al interés mostrado por el Servicio de Conservación y Explotación de Carreteras de la Demarcación de Carreteras del Estado en Cantabria, y en especial en la persona de D. Juan Carlos Más Bahillo, Jefe de este servicio en Cantabria.

La obra fue ejecutada con tecnología y bajo la dirección de Geobrugg Ibérica S.A. y la instalación del sistema fue ejecutada por la empresa Malla Talud Cantabria (MTC), ambas participantes en este proyecto FEDER.

La perforación y ejecución de los anclajes fueron realizadas por la empresa TESINSA de Guipúzcoa.



FIGURA 19. Detalle del extremo derecho de la zona de la zona tratada. Se observa como el efecto del tratamiento no cambia prácticamente en nada el aspecto inicial de la construcción.