

XIII JORNADAS GEOTECNICAS DE LA INGENIERIA COLOMBIANA Y IV FORO SOBRE GEOTECNIA DE LA SABANA DE BOGOTA

CUBIERTAS PROTECTORAS PARA IMPACTO DE CAÍDOS DE ROCA (Túneles Falsos)

JAIME SUAREZ DIAZ Profesor Universidad industrial de Santander
Albeiro Barbosa ¿? Geotecnología Ltda , Bucaramanga.

RESUMEN

En áreas amenazadas por caídos de roca y donde la estabilización del talud es muy costosa o inviable, se han utilizado cubiertas protectoras o túneles falsos para eliminar el riesgo relacionado con el impacto de los bloques de roca sobre vehículos o personas.

Las cubiertas protectoras construidas en Colombia han sido generalmente de concreto armado diseñadas para resistir el impacto de un bloque de diseño que cae de una determinada altura. El diseño según Wyllie y Mah (2004), debe considerar las fuerzas de impacto transmitidas sobre la cubierta y la estabilidad de la cimentación, especialmente de las columnas exteriores, las cuales generalmente se encuentran en la cresta de taludes de alta pendiente.

En el presente documento se incluyen las metodologías de diseño y construcción y el ejemplo de una cubierta construída por el Instituto Nacional de via INVIAS en la carretera Bucaramanga-Barrancabermeja.

INTRODUCCION

Se han realizado gran cantidad de investigaciones utilizando modelos prototipo con bloques y estructuras de tamaño real (Yoshida y otros 1991, Ishikawa 1999).

La mayoría de las investigaciones han estado destinadas a analizar la efectividad de los diversos materiales de disipación de la energía de impacto.

Un detalle crítico del diseño de las cubiertas son las características de absorción de la energía de los materiales sobre la cubierta. Según Wyllie y Mah (2004), el material ideal debe realizar dos funciones principales: absorber la energía por compresión y dispersar la energía puntual de impacto, en tal forma que esta energía se transmita a la estructura sobre un área relativamente grande. Adicionalmente el material debe permanecer intacto después del impacto, en tal forma que no se requiera reemplazarlo. La efectividad del material se puede expresar como la diferencia entre la fuerza de impacto producida por el caído de roca y la fuerza transmitida que debe ser absorbida por la estructura de concreto armado.

Se han utilizado diferentes materiales para la protección de la cubierta incluyendo grava, arcilla, arena y especialmente llantas de caucho usadas.

La principal crítica a la utilización de llantas usadas es que son muy compresibles y absorben muy poca energía. También se han utilizado productos sintéticos o espumas plásticas, las cuales tienen la gran ventaja de su bajo peso. La gran desventaja de estos productos es su costo comparada con la utilización de materiales de suelo.

Factores que afectan la fuerza dinámica

La fuerza dinámica de los bloques sobre la protección depende de las siguientes características (Descoedres y otros, 1997):

- El peso y forma de bloque, su altura de caída y ángulo de impacto.
- Las características del material de la cubierta, tipo de material, espesor y grado de compactación.
- Las características de la estructura especialmente la rigidez.

Expresiones semiempíricas para el cálculo de las fuerzas dinámicas

La mayoría de las expresiones empíricas tendientes a calcular las fuerzas dinámicas que actúan sobre las cubiertas de contención sobre impactos de rocas, están basadas en la teoría de Hertz de contactos elásticos.

Ecuaciones de Montani Stoffel, 1998. La ecuación más conocida internacionalmente para el cálculo de fuerzas de impacto sobre túneles falsos, es la desarrollada por la Montani Stoffel.

$$F_{acc} = 1.33 \exp(R/1.5e) M^{1/3} (\tan \phi)^{0.2} E^{2/3}$$

Donde

F_{acc} = Fuerza de aceleración

R = Radio de bloque

e = Espesor de la capa protectora de suelo

M = Módulo elástico de la capa protectora de suelo

ϕ = Angulo de fricción de la capa protectora de suelo

E = Energía potencial del bloque sobre la capa de suelo

La fuerza interna es la siguiente:

$$F_{int} = 2.6R^{-0.24} e^{-0.01} \exp(R/2.5e) M^{0.25} E^{0.75}$$

La penetración máxima d del bloque dentro del suelo es la siguiente:

$$d = 1.5 \exp(R/1.5e) (E / F_{acc})$$

La firma suiza Ernst Basler + Partners Ltd., recomienda utilizar la siguiente fórmula:

$$F = 2.8 \cdot e^{-0.5} \cdot R^{0.7} \cdot M E^{0.4} \cdot \tan \phi \cdot \left(\frac{m \cdot v^2}{2} \right)^{0.6}$$

$$d = \left(\frac{m \cdot v^2}{F} \right)$$

Esta última expresión da valores de fuerza significativamente menores a los obtenidos con la fórmula de Montani Stoffel.

Ejemplo: Túnel falso Cerro de San Pablo, carretera Bucaramanga – Barrancabermeja.

Teniendo en cuenta que la fórmula de Ernst Basler + Partners Ltd., es una expresión ampliamente utilizada en Suiza para el cálculo de las fuerzas de impacto sobre cubiertas de protección para el caídas de rocas y que la fórmula de Montani Stoffel es una fórmula teórica desarrollada en ensayos de laboratorio, se decidió para el proyecto en la carretera Bucaramanga-Barrancabermeja utilizar la fórmula de Ernst Basler + Partners Ltd.

Cálculo de las fuerzas de impacto

$$F = 2.8 \cdot e^{-0.5} \cdot R^{0.7} \cdot M_E^{0.4} \cdot \tan \phi \cdot \left(\frac{m \cdot v^2}{2} \right)^{0.6}$$

F = Fuerza de aceleración

R = Radio de bloque

M_E = Módulo elástico de la capa protectora de suelo

ϕ = Angulo de fricción de la capa protectora de suelo

m = masa del bloque

v = velocidad del bloque

Ejemplo: Túnel falso Cerro de San Pablo, carretera Bucaramanga – Barrancabermeja.

Volumen del bloque $V = 100 \text{ m}^3$

Altura de caída = 50 m

Tipo de suelo = arena limosa

$$\phi = 30^\circ$$

Densidad del bloque $\rho = 2400 \text{ Kg/m}^3$

Masa $m = V \cdot \rho$

$$M = 100 \text{ m}^3 \cdot 2400 \text{ Kg/m}^3 = 240000 \text{ kg}$$

Velocidad $v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$

$$v = \sqrt{2 \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 50 \text{ m}} = 31.32 \text{ m/s}$$

Radio $R = 1.0 \text{ m}$

Módulo de elasticidad del suelo $M_E = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$

Para arena limosa $\nu = 0.3$
 $E = 17.25 \text{ MN/m}^2$ } $ME = 23.22 \text{ MN/m}^2$

$$F = 2.8 \cdot e^{-0.5} \cdot (1.0 \text{ m})^{0.7} \cdot (23.22 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2)^{0.4} \cdot \tan 30^\circ \cdot \left[\frac{240000 \cdot (31.32 \text{ m/s})^2}{2} \right]^{0.6}$$

$$F = 60.296 \text{ MN} \cong 6148.5 \text{ Ton}$$

Volumen del bloque $V = 10 \text{ m}^3$

Altura de caída = 50 m

Tipo de suelo = arena limosa

$$\phi = 30^\circ$$

Densidad del bloque $\rho = 2400 \text{ Kg/m}^3$

Masa $m = V \cdot \rho$

$$M = 10 \text{ m}^3 \cdot 2400 \text{ kg/m}^3 = 24000 \text{ kg}$$

Velocidad $v = 31.32 \text{ m/s}$

Radio $R = 1.0 \text{ m}$

Módulo de elasticidad del suelo $M_E = 23.22 \text{ MN/m}^2$

Para arena limosa $v = 0.3$
 $E = 17.25 \text{ MN/m}^2$ } $ME = 23.22 \text{ MN/m}^2$

$$F = 2.8 \cdot e^{-0.5} \cdot (1.0 \text{ m})^{0.7} \cdot (23.22 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2)^{0.4} \cdot \tan 30^\circ \cdot \left[\frac{24000 \cdot (31.32 \text{ m/s})^2}{2} \right]^{0.6}$$

$$F = 15.15 \text{ MN} \cong 1544.43 \text{ Ton}$$

Resultados del cálculo de fuerzas de impacto

Tamaño del bloque (m ³)	Fuerza de impacto (Ton)
100	6148.5
64	4704.3
32	3103.6
10	1544.4
5	1019.0
1	387.9

Material disipador de energía y dispersador de presiones de impacto

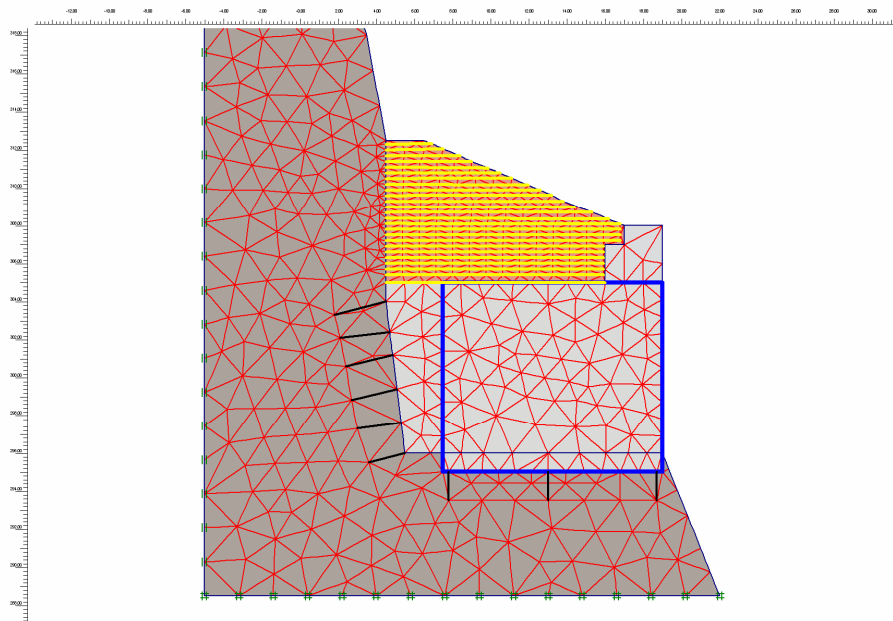
Para el túnel falso en la vía Bucaramanga – Barrancabermeja se utilizaron capas de arcilla arenosa reforzadas con geotextiles tejidos de polipropileno. La arcilla arenosa tiene por objeto disipar la energía y los geotextiles aumentar el área de dispersión de la carga de impacto.

Transmisión de la carga a través del colchón amortiguador.

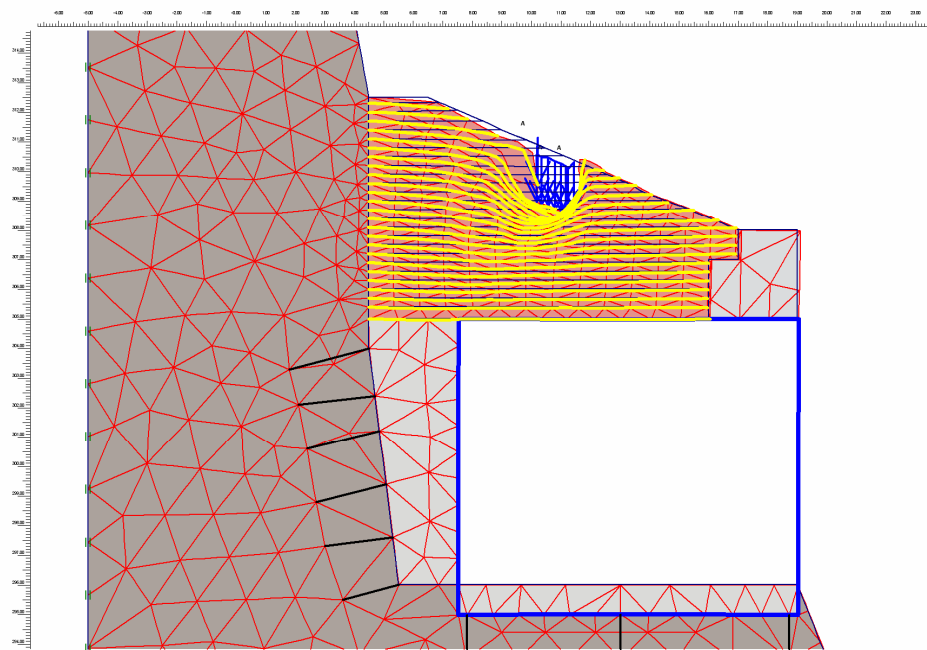
Modelo 1

Se realizaron modelaciones utilizando elementos finitos (Programa Plaxis), insertando la geometría y dimensiones del relleno planteadas en el diseño. Se impusieron cargas puntuales equivalentes al impacto de la roca de 6150 Toneladas.

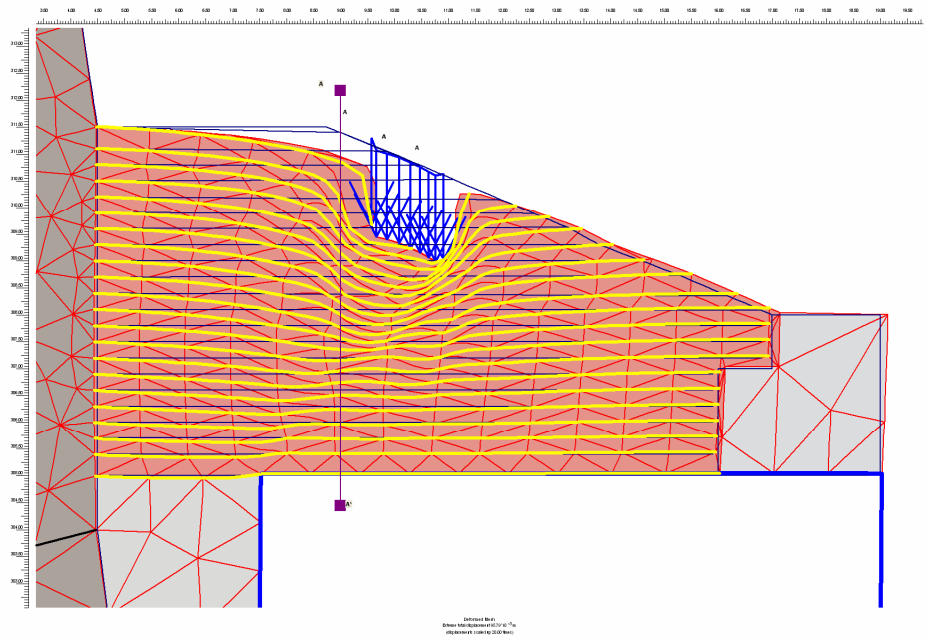
A continuación se presentan los resultados de la modelación:



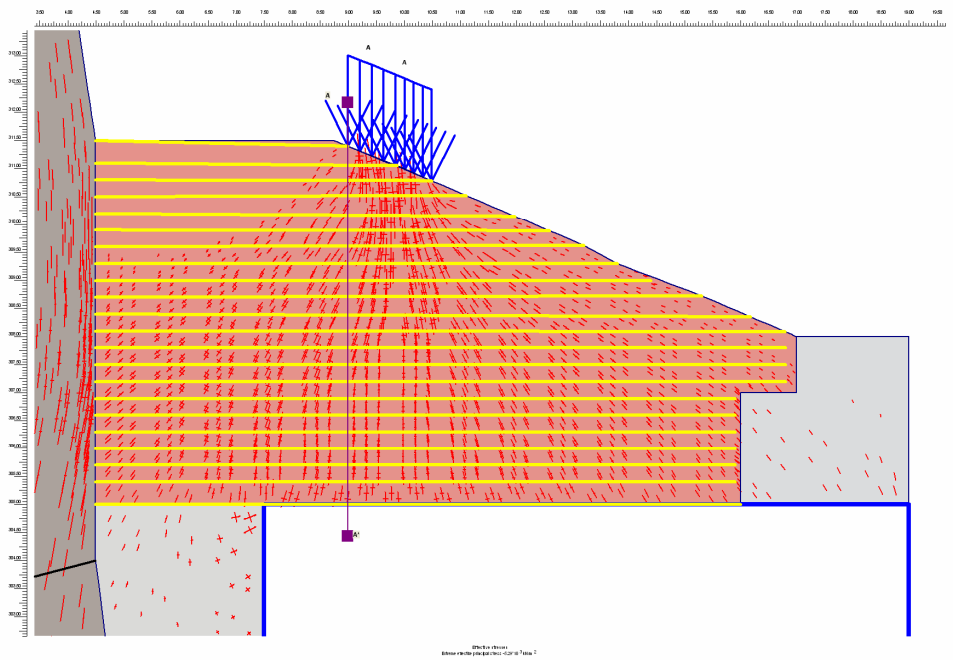
Mallado de elementos finitos para el modelo 1.



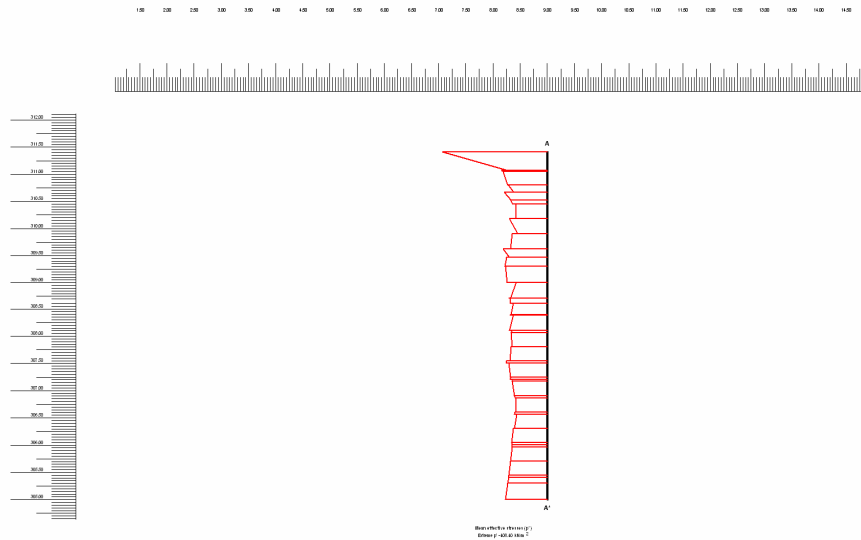
Malla de elementos finitos deformada después de aplicada la carga de 6150 Toneladas.



Desplazamientos dentro del relleno producto del impacto.



Trayectorias de esfuerzos principales dentro del modelo.



Disipación de esfuerzos a través del relleno. Valor superior: 408KN/m². Valor inferior: 100 KN/m².

Sistema de cimentación

Para el diseño de la cimentación generalmente se utilizan vigas corridas transversales a la vía, las cuales cumplen la doble función de cimentación y de cerrar el pórtico estructural para que el sistema funcione integralmente en voladizo en el caso de que se presentaren desplazamientos en la corona del talud inferior de la vía.

Para el cálculo de la capacidad de soporte no se utiliza la carga total de impacto sobre todo el sistema de túnel, teniendo en cuenta que todas las rocas en todos los sitios de todas las vigas no van a impactar al mismo tiempo, y por lo tanto, solo se debe considerar una carga de impacto a la vez aplicada sobre toda la estructura repartiendo las presiones.

Anclaje del sistema a la roca

Para el diseño del túnel falso de la vía Bucaramanga – Barrancabermeja se ancló la cimentación a la roca, pero no se anclaron las columnas ni la superestructura. El objetivo es el facilitar la deformación de la estructura de concreto armado y en esta forma permitir una mayor disipación de energía en el sistema estructural.

Relleno en concreto del espacio entre la estructura y el talud

El espacio entre la estructura de concreto y la estructura se relleno en concreto ciclópeo, unido mediante pernos a la roca. . El objetivo de este relleno es el de generar una continuación del macizo rocoso y mejorar las condiciones de continuidad del pié del talud, en tal forma que no se produzcan presiones laterales del talud sobre la estructura de concreto. Entre la estructura y el relleno en concreto ciclópeo se dejó una junta con icopor.

REFERENCIAS

Geotecnología Ltda ¿???

- Ishikawa N. (1999). Recent progress on rock shed studies in Japan. Proc. Joint Japa-Swiss Sci. Seminar on Impact Loading by Rock Falls and Design of Protection Measures, Japan Soc. Civil Engng, Kanazawa, Japa. Pp 1-6.
- Wyllie D.C. y Mah C.W. (2004). Rock Slope Engineering. Spon Press. London. Pp 318-319.
- Yoshida H., Ushiro T., Masuya H, y Fujii T. (1991). An evaluation of impulsive design load of rock sheds taking into account slope properties. J. Struct. Eng., 37A (March), 1603-16.
- Descoedres F., Montani S., Labiouse V. (1997) "Dynamic action of rock blocks impacting rock sheds covered with damping material." Rock Mechanics Laboratory. Lausanne.
- Ernst Basler + Partners Ltd (1997). "Design Forces of Rockfall Galleries". Reference Project Natural hazards and Safety of Society. Swiss Federal Institut of Technology, Lausanne. Swiss National Railway (SBB) and Swiss Federal Office for Road Construction.
- Montani Stoffel, S., (1998). "Sollicitation dynamique de la couverture des galeries de protection lors de chutes de blocs, Ph. D. Thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne".