



SANTA FE - ARGENTINA- 2016

Muros para control de caída de bloques: Diseño y experiencia de comportamiento.

Marcelo Zeballos⁽¹⁾, Carlos Gerbaudo⁽¹⁾⁽²⁾

marcelo.zeballos@unc.edu.ar, cgerbado@hotmail.com

(1) Universidad Nacional de Córdoba, F.C.E.F.yN.V. Sarsfield 1601. Córdoba (5000), Argentina.

(2) INGROUPO – Oficina de Proyectos, www.ingroup-op.com.ar

Raúl Ana⁽³⁾, Ramiro Suárez⁽³⁾

raul_ana00@yahoo.com.ar, stramiro@yahoo.com.ar

(3) Paolini HnosSA, Hipólito Yrigoyen 935, (7240), Lobos, Buenos Aires, Argentina-

RESUMEN: Los fenómenos de inestabilidad de ladera constituyen una de las acciones de mayor incidencia en la operatividad de las carreteras en zona de montaña. En particular, los procesos de caída de bloques afectan las condiciones generales de circulación y con frecuencia constituyen fenómenos que generan riesgos de importancia sobre los usuarios de la calzada y, en otras oportunidades ocasionan la obstrucción del camino. Algunos tramos de la Ruta Nacional N° 40 han registrado este tipo de procesos, con importantes daños materiales y pérdida de vidas humanas, en particular en el sector de la denominada Cuesta de Miranda, en la Provincia de La Rioja. El presente trabajo muestra los estudios efectuados en el sector a través de la disposición de barreras de tipo rígidas, con el objeto de mitigar estos fenómenos. Se describen los estudios de caída de bloque realizados en el sector para la identificación de las sollicitaciones actuantes sobre los muros, y la formulación de un modelo resistente de estado límite último utilizado para el diseño de las estructuras de hormigón armado, que permiten concluir en las soluciones adoptadas. Finalmente, en esta presentación se muestra el comportamiento de algunas de las estructuras propuestas, construidas y solicitadas por la caída de bloques, permitiendo validar las hipótesis de comportamiento previstas en las etapas de proyecto construcción.

Palabras clave: MUROS DE SOSTENIMIENTO – CAIDA DE BLOQUES – MITIGACION - TALUDES

ABSTRACT: Slope instability is one of the most important phenomena in the design of roads in mountain areas. Falls blocks affect the general conditions of circulation. Often, they are phenomena that generate major risks, causing road blockage or damage to the road users. Some sections of National Route 40, in the Cuesta de Miranda, province of La Rioja, have recorded such instabilities, causing substantial material damage, and even the deaths of users of the road. This paper shows the mitigation studies carried out in the sector. These have been based on the construction of rigid barriers. The analysis are presented to identify the acting forces on the walls, and the formulation of a resistant model of ultimate limit state used for the design of reinforced concrete structures, which can be concluded in the described solutions adopted. Finally, the behavior of the proposed structures is shown. These were constructed and applied by falling blocks. This event allowed us to validate the hypothesis and the structural behavior under project stages.

KEY WORDS: RETENTION WALLS – FALLING BLOCKS - MITIGATION.

1. INTRODUCCIÓN

Dentro de los componentes a tener en consideración en el dimensionado de un camino en zona de montaña, la evaluación de los fenómenos de inestabilidad de ladera que pueden afectarlo tiene una especial incidencia. En particular, dentro de este conjunto de inestabilidades, las caídas de bloques sobre el sector de calzada puede mostrar diversos niveles de consecuencias, que van; desde la presencia del material caído sobre la calzada, la oclusión de la calzada, su destrucción o, finalmente, la generación de daños de diverso orden sobre los usuarios de la vía.

En el contexto de la elaboración del proyecto del nuevo camino de montaña “Cuesta de Miranda” en la Ruta Nacional Nº 40, en la Provincia de La Rioja, fue necesario atender en algunos sectores la problemática de los desprendimientos de material de la ladera adyacente al camino. Como antecedente a la solución planteada, en algunas porciones del tramo, se ha observado la caída de grandes bloques, de tamaños métricos, registrándose importantes daños materiales y de vidas humanas.

En particular, se detectaron fenómenos de caída de bloques en el tramo de camino, en una extensión del orden de 6.500 metros. Las características de los fenómenos observados, demandó la realización de obras de mitigación o de control con el objeto de atenuar o reducir los daños ocasionados por los desprendimientos de roca de la ladera adyacente al camino.

En la forma clásica de tratamiento de este tipo de problemas, las características de las obras que se pueden emprender puede ser variadas y, en cada caso, los efectos de mitigación son graduales y más importantes en función de las inversiones realizadas en cada una de las posibles obras de control. En este caso, y acotando las inversiones disponibles, se previó el análisis de acciones de control de la caída de bloques a través de la disposición de muros o barreras rígidas de hormigón armado. La solución se completa con un relleno posterior, formado por suelos con bajo nivel de compacidad, de forma de conferirle a la zona de atrape de los bloques una alta flexibilidad. La solución dispuesta debe permitir la generación de un espacio, aguas arriba de la calzada, sobre el cual se permite la recepción de determinado tipo de bloques y su acumulación en el sector.

El presente trabajo, muestra las condiciones generales de implantación de este tipo de acciones, la tipología de soluciones adoptadas y las hipótesis de operación consideradas. Dentro de estas últimas, se muestran las respuestas que se han considerado para distintas formas de recepción de los bloques caídos, considerando que el sector de recepción presenta o no un material de relleno. Finalmente, y una vez puesto en operación el sistema propuesto en obra, la estructura ha sido impactada por bloques que pueden ser considerados ligeramente superiores a los adoptados en el diseño y en las condiciones más desfavorables de recepción, es decir con un relleno reducido o nulo. Esto ha permitido someter a la estructura a niveles de sollicitaciones superiores a los originalmente previstos, mostrando el grado de daño que puede ejercerse sobre la estructura, pero al mismo tiempo permitiendo apreciar la forma en que la estructura cumple con su objetivo final de evitar daños mayores sobre los usuarios de la vía.

2. AMBIENTE GEOLÓGICO – GEOTÉCNICO

La Cuesta de Miranda, constituye un ambiente geológico dentro del cual se implanta una fracción de la Ruta Nacional 40, en la Provincia de La Rioja, Argentina. La Figura 1 presenta una vista del área en la cual se localiza el tramo de obra bajo estudio. En este sector, el camino se caracteriza por su complejidad de trazado, mostrado con anterioridad a los trabajos realizados, un camino angosto, de cornisa sobre las abruptas paredes de la quebrada del río Miranda.

El Sistema de Famatina comprende un conjunto de unidades orográficas de rumbo submeridional, que se extiende ininterrumpidamente a lo largo de 350 km (con un ancho máximo de 40 km) desde los 27º hasta algo más de los 30º de latitud sur, abarcando el sector central de la provincia de La Rioja y el centro-sur de la provincia de Catamarca. Es una región geológicamente compleja, ubicada en el

antepaísandino, que ha sido parte del margen acrecional construido sobre el borde oeste de Gondwana durante el Paleozoico inferior.



Figura 1. Ubicación de la traza en estudio

La región de Famatina se caracteriza por constituir un conjunto de elevaciones prominentes sobre el área circundante, con diferencias de altura de hasta más de 5000 m con respecto al nivel de base. Pequeñas depresiones o valles no alcanzan a interrumpir su continuidad N-S, aunque llegan a diferenciarse varios cuerpos de sierra en sentido E-W¹. En la vertiente oriental, los sistemas de acumulación cuaternaria más importantes son los construidos por los cursos de los ríos Miranda, del Oro-Amarillos-Sarmientos, Capayán, Achavil y Blanco-El Durazno-Chañarmuyo.

En zonas de altura se presentan geofomas relacionadas con la actividad glaciaria pleistocena y holocena, como así también geofomas derivadas de procesos gravitacionales producidos por las pendientes extremas. Por encima de la línea de vegetación y en áreas desprovistas de acarreo, se expone la roca viva, en general de naturaleza granítica, lo que confiere una mayor facilidad para generar depósitos de tectónica gravitacional. Los cordones más elevados han sido, en general, alcanzados por erosión retrocedente, dando lugar a morfologías de “cercos” erosivos.

En el sector afloran granitoides del complejo Ñuñorco, atravesados por un enjambre de diques básicos, y sedimentitas del Paleozoico superior correspondientes al grupo Paganzo.

La morfología del sector está fuertemente dominada por las características estructurales del área, principalmente por la falla transversal Miranda que produce un fuerte levantamiento hacia el norte de la sierra de Famatina, interrumpiendo la continuidad de las cumbres y provocando la formación de esta profunda quebrada que es la Cuesta de Mirada. Se generan valles en V cerrados y profundos, laderas largas (en la mayoría de los casos superan los 500 m), rectas y convexo-rectas y de fuerte pendiente (hasta 220%), provocando un ambiente de alta energía donde el principal proceso es la caída de materiales en forma de coluvios que incluyen grandes bloques escindidos del cuerpo de ladera.

La formación La Cuesta, está constituida por conglomerados, areniscas y pelitas rojizas, localmente intercalados con horizontes de yeso, con afloramientos que se expanden de manera continua, registrando una suave tendencia grano decreciente.

Para el sector de interés en este estudio, se ha efectuado una sectorización del tramo². Sus principales características son las siguientes:

- Entre progresivas 17500 a 19200. En este sector las laderas son largas pero de pendiente suave. La litología a lo largo de todo el tramo corresponde a areniscas de la Formación De La Cuesta, las cuales se encuentran con un cierto grado de alteración mecánica. Las mismas son intercaladas por grandes espesores de coluvios con rodados cristalinos de tamaño variable (de medianos a muy grandes). Los taludes, que se encuentran en sectores puntuales, principalmente en el último tercio del tramo, son bajos y de pendientes medias a altas (40° a 75°).
- Entre progresivas 19200 y 21300. Se caracteriza por presentar una fuerte escarpa, en laderas largas y de gran pendiente. Todo el tramo presenta litología compuesta por areniscas de la Formación De La Cuesta, con un bajo grado de alteración química, aunque con sectores muy tectonizados y alteración mecánica variable, intercalando con sectores de Coluvios con grandes bloques de arenisca masiva. Siendo uno de los sectores más característicos de la problemática estudiada, la Figura 2 muestra una vista del ambiente local.
- Entre progresivas 21300 y 23600. Se caracteriza por presentar laderas generales largas y de pendiente suave. La litología corresponde en su totalidad a la Formación De La Cuesta, mostrando bancos de areniscas gruesas con intercalaciones pelíticas con disloque estructural.



Figura 2. Vista general del ambiente de emplazamiento de la obra. Fuente: Velasco y Vendramini (2014)

3. MARCO TEÓRICO

Los métodos de análisis de inestabilidad de laderas por fenómenos de caídas de bloques, constituyen procesos de uso frecuente en la mecánica de rocas. La definición de las acciones de mitigación, demanda la ejecución de dos tareas:

- La identificación de la cinemática de la caída del bloque, junto al establecimiento de las variables de interés para el tratamiento del tema: velocidad de movimiento de los bloques, energía cinemática total, etc.
- Definición de los parámetros de diseño a aplicar en el cálculo de la estructura a partir de las condiciones en las que el bloque llega al punto de contención.

A modo de referencia de aplicación, se presenta la Figura 3, correspondiente a recomendaciones de reglamentaciones Suizas [3][4], donde se establece una relación entre la energía generada por la caída de bloque y la tipología de acción a aplicar. Esta recomendación ha sido considerada como una referencia global en las etapas iniciales de los estudios.

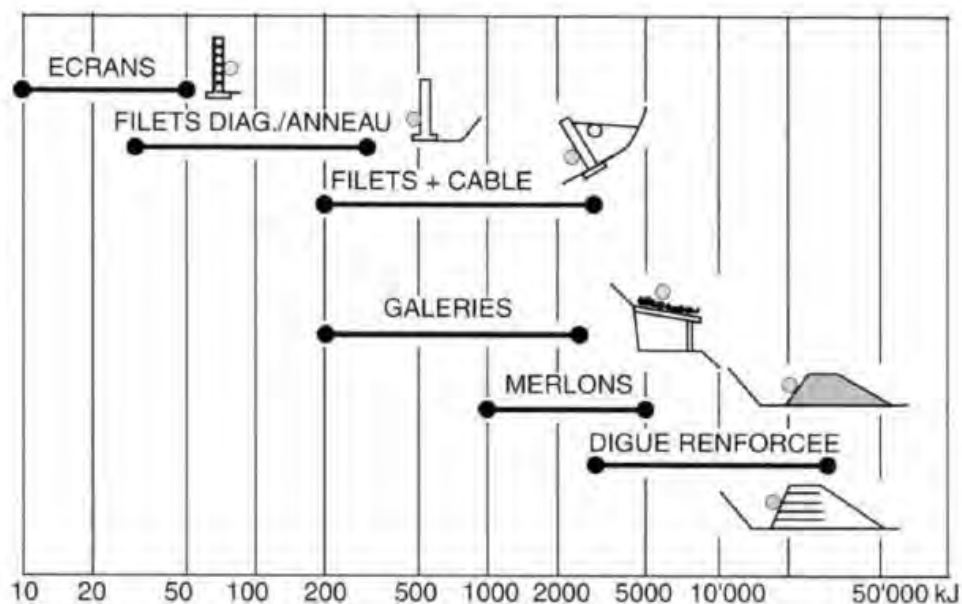


Figura 3. Capacidad de absorción de energía para diferentes sistemas de protección.
Fuente: OFROU (1998, 2003)

3.1. Caída de bloques

Para la simulación de la caída de bloques, como elemento fundamental en el diseño de este tipo de obras de mitigación, se ha empleado una metodología de uso frecuente en el diseño estructural de falsos túneles o cobertizos. El método de análisis se inicia con la caracterización, en primera instancia, de los materiales que pueden movilizarse en cada emplazamiento. Los conceptos generales sobre los que se basa la modelación aplicada son los siguientes:

- En el modelo empleado los parámetros que determinan el comportamiento en la caída de bloques son la geometría y las propiedades físicas del talud, así como la geometría y las propiedades físicas de la roca desprendida. De todos estos parámetros, el factor más importante en la trayectoria de la roca es la geometría del talud.
- La geometría del talud (pendiente, rugosidad) y las propiedades de los materiales que lo forman (los cuales se caracterizan a través de coeficientes de restitución, expresados como forma de respuesta elástica del golpe del bloque, en sentido normal y tangencial a la superficie) tienen una gran variabilidad en función de la geomorfología de la zona. Por otro lado, la geometría de la roca desprendida (forma, tamaño) y la zona de salida son factores que no pueden conocerse a priori con exactitud.

- Los tipos de movimientos que pueden tener los bloques durante su descenso ladera abajo son: Caída libre, Rebotes, Rodadura, Deslizamiento. El paso de uno a otro tipo de movimiento se produce en función del ángulo de inclinación del talud, tal y como puede observarse en la Figura 4.

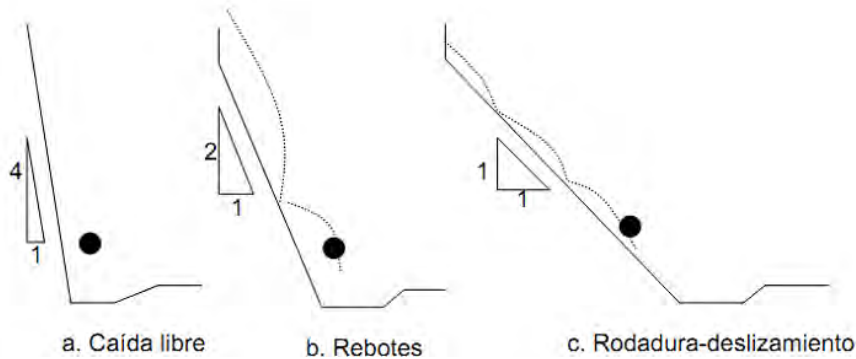


Figura 4. Esquema de la caída del bloque en función de la pendiente del talud

Estos movimientos no se producen por separado, sino que se dan combinaciones entre sí, como por ejemplo: rodadura y deslizamiento, rodadura, deslizamiento y rebote, caída libre y rodadura, etc. pero deben simplificarse para poder introducirlos en el modelo de simulación.

Tal y como afirman varios autores[5], la caída de rocas desde un mismo sector inicial puede tener comportamientos muy distintos. En efecto, una pequeña variación en alguno de los parámetros (forma de la roca, tamaño, ángulo de impacto, pendiente, etc.) originan trayectorias, saltos y energías distintas entre dos situaciones inicialmente similares. Es decir, una misma roca nunca seguirá la misma trayectoria exacta, por lo que con objeto de poder simular esta variabilidad de resultados se considera un rango de valores de los parámetros, en lugar de un valor único o medio. Este rango de valores puede ser más o menos acotado en función de los datos disponibles y de la precisión deseada.

3.2. Fuerzas de impacto

Si bien existen numerosas fuentes de consulta para el establecimiento de las características de la fuerza de impacto (F_{imp}) y de la fuerza transmitida a la estructura ubicada a continuación del relleno (F_{trans}), se han adoptado las expresiones de Montani [6], como las de uso más frecuente. Montani, conforma un modelo analítico a partir de los resultados obtenidos en una campaña experimental, junto con análisis teóricos a través de modelos de elementos finitos. El modelo de elementos finitos que desarrolla le permite estudiar la influencia de parámetros complementarios cuyo efecto no puede ser estudiado a partir de los ensayos. Entre otras cosas, este modelo le permite determinar que el exponente característico de la influencia del módulo de elasticidad es 0.4 (coincidiendo con la teoría de Hertz/Goldsmith) y que el del ángulo de rozamiento 0.2 es valor de aplicación para la definición de la fuerza de impacto. Este autor indica que, tras un análisis cuantitativo de la influencia de diferentes parámetros en los esfuerzos, se pueden conformar las expresiones de cálculo dadas por las ecuaciones (1) y (2).

$$F_{imp} = 1.33 \cdot \exp\left(\frac{R}{1.5 \cdot e}\right) \cdot M_E^{1/3} \cdot (\tan \varphi)^{0.2} \cdot E_{pot}^{2/3} \quad (1)$$

$$F_{trans} = 2.6 \cdot R^{-0.24} \cdot e^{-0.01} \cdot \exp\left(\frac{R}{2.5 \cdot e}\right) \cdot M_E^{0.25} \cdot E_{pot}^{0.75} \quad (2)$$

Donde: F_{trans} , es la fuerza transmitida sobre la losa de la cubierta (N); F_{imp} , es la fuerza transmitida sobre el relleno (N); R, es el radio del bloque (m); e, es el espesor del material de la cubierta (m); M_E , es el

módulo de compresibilidad del material sobre cubierta (N/m^2); ϕ , es el ángulo de fricción de la capa protectora ($^\circ$); E_{pot} , es la energía potencial del bloque sobre el relleno (J).

La Figura 5 muestra esquemáticamente las características físicas de las fuerzas a las que se hace referencia. A los fines de la interpretación de los resultados debe entenderse cada uno de estos componentes según el siguiente criterio:

- La fuerza de impacto, es la expresión relacionada con la ecuación de equilibrio de la energía, de la forma $F_{imp} \times d = E_{pot} = E_{cin}$. Siendo d el desplazamiento que se origina en el relleno para la absorción de la energía, y E_{cin} , la energía cinemática medida un instante antes de que el bloque impacte contra el relleno.
- La fuerza transmitida, implica la movilización del bloque y del relleno en el sector en que se ejerce la presión sobre la estructura. Debe interpretarse, en consecuencia, como la integral de las presiones de contacto en el área de influencia generado por la caída.

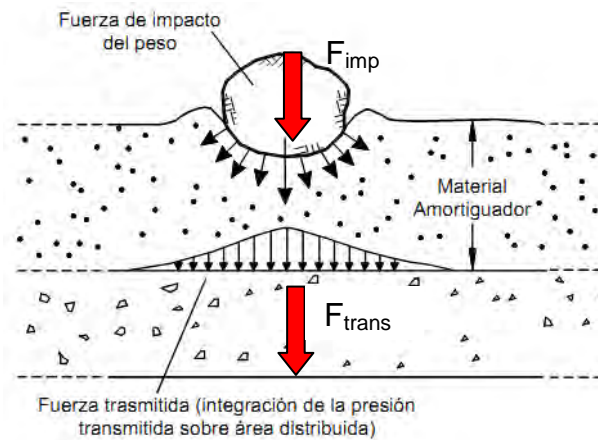


Figura 5. Esquema de disposición de las fuerzas de impacto y transmitida

4. MODELACIONES REALIZADAS

4.1. Escenarios analizados

Para el tratamiento del problema que aquí se presenta, se ha formulado el análisis para una combinación de casos, en los cuales las variables intervinientes han sido las siguientes:

- Perfil del terreno. Se han considerado tres (3) casos representativos del terreno, con alturas aproximadas de 60 m, 16 m y 23 m, respectivamente, según su ubicación en la traza y los esquemas de perfiles transversales característicos, que se muestran en las Figuras 6. Las pendientes han sido representadas mediante una polilínea, copiando la forma de los perfiles naturales, en la que se han considerado dos tipos de superficies componentes: por un lado, el afloramiento rocoso sin la presencia de coluvios en superficie, lo cual genera una superficie libre para el contacto con el bloque, y por otro lado, sectores en los que se produce el depósito previo de coluvios y suelo, lo cual genera efectos de disipación parcial de la energía de caída del bloque.
- Altura del muro de protección a considerar. Para el Caso 1 se evaluará un muro de 4 m de altura, y para el Caso 2 y 3 un muro de 3 m de altura, en ambos casos, las alturas indicadas no incluyen el espesor de la zapata o base de fundación del muro.
- Disposición del relleno detrás del muro. Se consideran tres (3) disposiciones de relleno detrás del muro a saber: i) Muro sin relleno, ii) muro con un relleno con pendiente comprendida entre 45° y

30° respecto de la horizontal, y aplicado a partir del nivel de coronamiento del muro, iii) muro con un relleno con pendiente comprendida entre 30° y 10°, en similares condiciones al caso anterior.

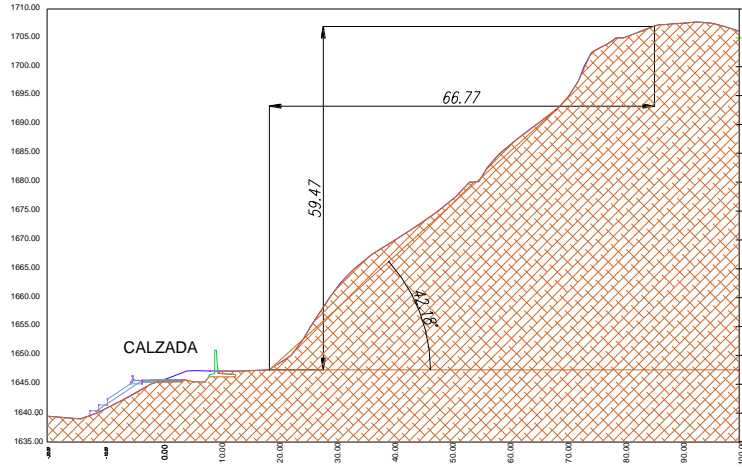


Figura 6.a. Esquema del perfil transversal del terreno del Caso 1

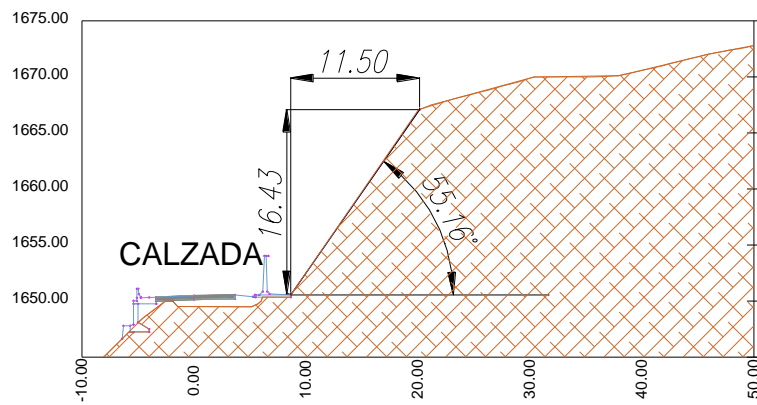


Figura 6.b. Esquema del perfil transversal del terreno del Caso 2

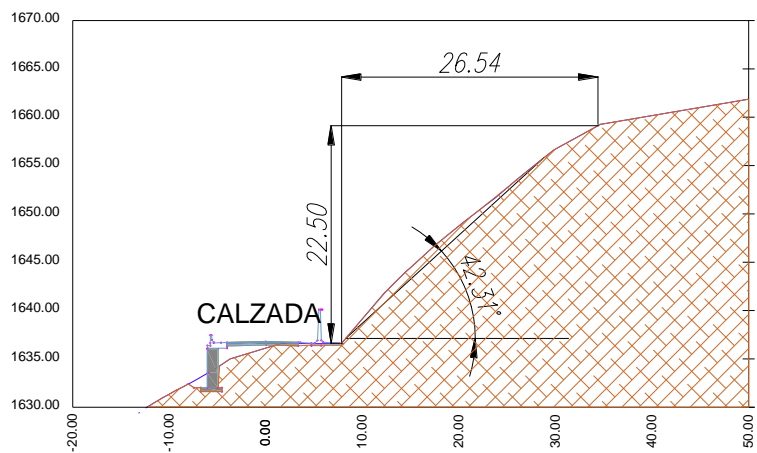


Figura 6.c. Esquema del perfil transversal del terreno del Caso 3

4.2. Efectos de la caída de bloques.

A los fines de la simulación del movimiento de los bloques en el perfil transversal se han empleado los parámetros indicados en la Tabla 1. Los mismos fueron establecidos en forma combinada sobre la base de información bibliográfica antecedente, según los tipos de materiales afectados, y a partir de la observación del comportamiento de bloques caídos en la zona de emplazamiento.

| Parámetro | | Roca Sana | Roca con coluvios | Rellenos | Hormigón | Calzada |
|--|------------|-----------|-------------------|----------|----------|---------|
| Coeficiente de Restitución Normal (RN) | Medio | 0,53 | 0,35 | 0,32 | 0,58 | 0,40 |
| | Desviación | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |
| Coeficiente de Restitución Tang (RT) | Medio | 0,99 | 0,85 | 0,82 | 0,99 | 0,90 |
| | Desviación | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |
| Angulo de Fricción | Media | 30 | 35 | 30 | 45 | 30 |
| | Desviación | 5 | 3 | 5 | 5 | 2 |
| Desv. de Rugosidad | | 5 | 5 | 5 | 0 | 0 |

Tabla 1. Parámetros empleados en ecuaciones de movimiento de bloques

Las fuerzas que se consideran de interés para la definición de acciones sobre el sistema de sostenimiento son aquellas que actúan en forma perpendicular al muro. En tal sentido, las fuerzas F_{trans} son transformadas en el componente de fuerza que actúa en el sentido perpendicular sobre la estructura, bajo la denominación F_{incl} , según se indica en la Figura 7. Este valor de fuerza, ubicado en el extremo superior del muro, ha sido adoptado como la acción resultante del impacto sobre el muro, y es la que se utiliza en el cálculo estructural del muro de contención. La componente vertical de la fuerza transmitida no se ha tenido en cuenta en los cálculos, ya que su acción es estabilizante para la estructura del muro.

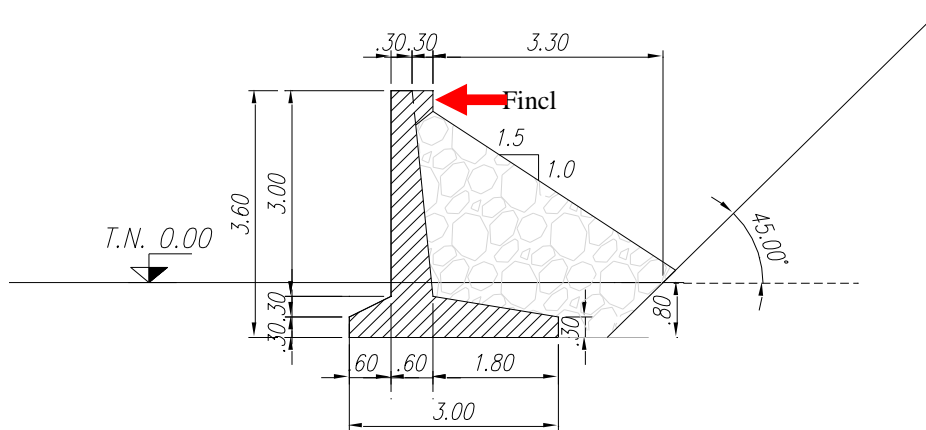


Figura 7. Esquema de disposición de la fuerza para cálculo del muro

4.3. Resultados las modelaciones

Los datos fundamentales empleados en la modelación de alternativas de estructuras de contención, han sido reproducidos en la Tabla 2. Como referencia general, vale aclarar que las características del bloque arrojado, tanto a nivel de las dimensiones geométricas, como de la velocidad de inicio del movimiento se han caracterizado a través de un valor medio y una desviación estándar de este valor. En particular, en el caso de los bloques se ha efectuado una simulación empleando bloques con un volumen medio de 1 m^3 , es decir con un peso de 25 kN, lo cual equivale a esferas con un radio de 0.60 m. Estos volúmenes han sido considerados con una desviación estándar de su peso de 5 kN.

| Denominación | | Espesor relleno (e) | Modulo M_E | Características |
|-------------------|-------|---------------------|------------------|--|
| Sección | Alter | m | kPa | |
| 21250 (Caso 1) | 0 | | | Sección sin elementos de contención |
| | 1 | 0.05 | 30×10^6 | Sólo el muro, sin relleno en trasdós |
| | 2 | 3.50 | 2,000 | Muro y relleno con pendiente entre 45° y 30° |
| | 3 | 6.00 | 2,000 | Muro y relleno con pendiente entre 30° y 0° |
| 21750 (Caso 2) | 0 | | | Sección sin elementos de contención |
| | 1 | 0.05 | 30×10^6 | Sólo el muro, sin relleno en trasdós |
| | 2 | 2.40 | 2,000 | Muro y relleno con pendiente entre 45° y 30° |
| | 3 | 3.70 | 2,000 | Muro y relleno con pendiente entre 30° y 0° |
| 22000 (Caso 3) | 0 | | | Sección sin elementos de contención |
| | 1 | 0.05 | 30×10^6 | Sólo el muro, sin relleno en trasdós |
| | 2 | 2.50 | 2,000 | Muro y relleno con pendiente entre 45° y 30° |
| | 3 | 4.60 | 2,000 | Muro y relleno con pendiente entre 30° y 0° |

Tabla 2. Datos de la modelación para la caída del bloque de diseño

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3, donde se indican los valores obtenidos en relación con el tipo de fuerza calculada a partir de la energía con la que llega el bloque al sector de localización de la obra de control.

| Denominación | | Veloc | Energía (E) | Alfa | Esp. Rell (e) | Modulo M_E | F_{imp} | F_{trans} | F_{incl} |
|-------------------|-------|-------|-------------|--------------|---------------|--------------|-----------|-------------|------------|
| Sección | Alter | m/seg | (kJ) | ($^\circ$) | (m) | (kPa) | (kN) | (kN) | (kN) |
| 21250 (Caso 1) | 0 | 7.83 | 68.94 | | | | | | |
| | 1 | 5.02 | 103.03 | 60.00 | 0.05 | 30e6 | 22.9e6 | 1.03e6 | 771,159 |
| | 2 | 6.53 | 114.61 | 50.00 | 3.50 | 2,000 | 295 | 724 | 425 |
| | 3 | 5.66 | 64.85 | 45.00 | 6.00 | 2,000 | 199 | 456 | 228 |
| 21750 (Caso 2) | 0 | 7.58 | 103.85 | | | | | | |
| | 1 | 7.51 | 101.98 | 60.00 | 0.05 | 30e6 | 22.8e6 | 1.02e6 | 765,229 |
| | 2 | 2.02 | 24.90 | 45.00 | 2.40 | 2,000 | 124 | 239 | 119 |
| | 3 | 1.97 | 14.58 | 45.00 | 3.70 | 2,000 | 85 | 154 | 77 |
| 22000 (Caso 3) | 0 | 8.15 | 137.57 | | | | | | |
| | 1 | 9.39 | 138.10 | 90.00 | 0.05 | 30e6 | 27.3e6 | 1.28e6 | 1,280,858 |
| | 2 | 1.48 | 19.13 | 45.00 | 2.50 | 2,000 | 105 | 195 | 98 |
| | 3 | 2.09 | 18.33 | 45.00 | 4.60 | 2,000 | 95 | 180 | 90 |

Tabla 3. Resultados de la modelación para la caída del bloque de diseño

Los resultados obtenidos permiten formular algunas observaciones:

- En todas las alternativas 0, el bloque concluye su recorrido aguas abajo de la calzada, lo cual verifica la condición de inestabilidad y de riesgo para la calzada.
- En las alternativas 1, con el bloque golpeando contra el muro rígido, la energía que debe disiparse resulta de una magnitud importante como para pretender que la deformación del muro logre mitigarla. En tal sentido, sería poco recomendable que el sistema se integre exclusivamente con el muro de contención. Aun en esta condición, el diseño estructural planteado debería ser capaz de permitir evitar que el bloque alcance la calzada, aun cuando esto implica una rotura parcial del muro.
- En el caso de las alternativas 2 y 3, con presencia de relleno suelto por detrás del muro, este elemento actúa como un atenuador o amortiguador de la energía recibida, y en tal caso, los esfuerzos que llegan a la estructura de contención resultan compatibles con dimensiones convencionales del muro.

Las Figuras 8 muestran, a modo de ejemplo, resultados de la modelación en uno de los perfiles analizados para las Alternativas 0, 1.

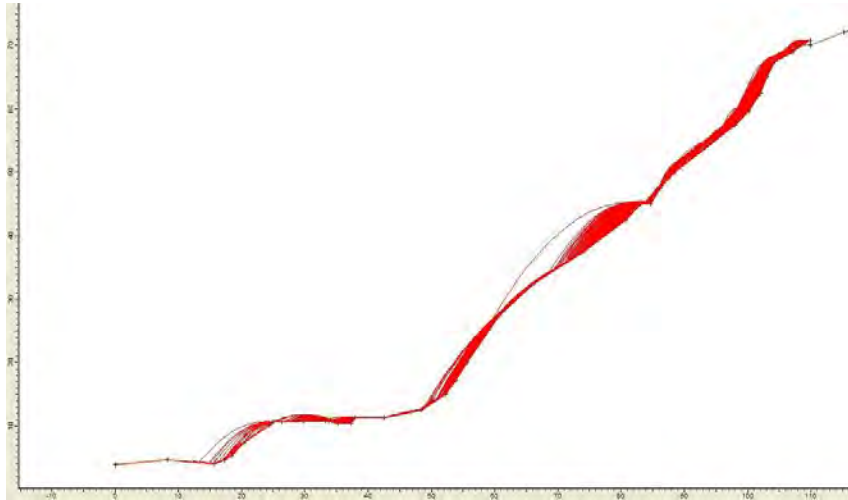


Figura 8.a. Caída de bloques. Perfil 1, sin elementos de contención. Alternativa 0.

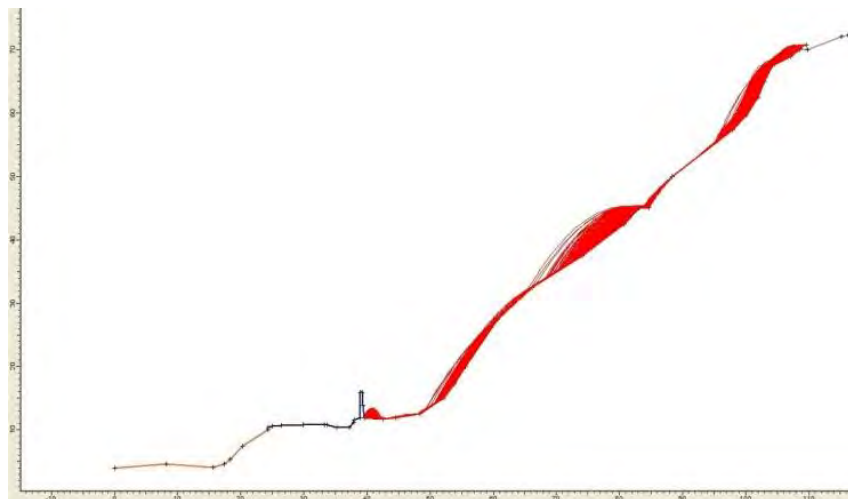


Figura 8.b. Caída de bloques. Perfil 1, con elementos de contención. Alternativa 1.

4.4. Solución estructural

En el siguiente apartado se presentan los criterios de diseño estructural de los muros contra caídas de bloques, y los resultados obtenidos del cálculo estructural. Los estados de carga para el diseño de los muros han comprendido las siguientes variantes: E1: Peso propio del muro y cargas permanentes; E2: Empuje activo del suelo del relleno posterior; E3: Fuerzas de impacto por caídas de bloques y E4: Fuerzas sísmicas.

Las fuerzas de impacto por caídas de bloques se obtuvieron del estudio cinemático de la caídas de bloques. Para el diseño específico de la estructura se emplearon las fuerzas correspondientes a la alternativa 2, de relleno posterior del muro con un ángulo comprendido entre 45° y 30° respecto a la horizontal. Las estructuras fueron diseñadas con la aplicación de esfuerzos comprendidos entre 120 kN (para los casos 2 y 3), hasta 425 kN (caso 1). Adicionalmente, el sistema fue diseñado considerando fuerzas sísmicas de uso convencional para este tipo de estructuras.

Las combinaciones de estados de carga que se utilizaron en el cálculo estructural de los muros, teniendo en cuenta que no se considera simultaneidad de las acciones de impacto de bloques con la acción del sismo.

El diseño de secciones de hormigón armado se realizó según el Reglamento CIRSOC 201, 1982. El coeficiente de seguridad estructural se fijó en 1,75 para la combinación de cargas normales, correspondiente al funcionamiento en servicio del muro, y de 1,30 para la combinación de cargas correspondientes a eventos extremos que incluye el impacto de caída de bloque y el sismo, respectivamente. Además de la verificación clásica de resistencia del muro de hormigón armado, se ha realizado una verificación estructural en la condición de impacto de bloques mediante la teoría de Líneas de Fluencia, verificándose que la resistencia última del muro es superior a la fuerza de impacto prevista por la caída del bloque de diseño.

El diseño del muro es un perfil clásico con forma de "L", formado por una pantalla o muro frontal de espesor variable empotrado en una base de fundación de espesor variable. Para el Caso 1, la altura total de muro es de 5.00 m, y la altura libre por sobre la base es de 4.00 m, mientras que en los Casos 2 y 3, la altura total del muro es de 3.60 m, y 3.00 m de altura libre por sobre la base.

La fundación de los muros se prevé apoyar sobre el terraplén actual de la ruta o sobre el techo de roca. Los muros proyectados mostraban condiciones de apoyo variables entre el material propio de la calzada y el basamento rocoso local. En todos los casos, se aplicó una limpieza y nivelación de 10 cm de espesor. En el caso de cimentación en medio rocosos, la superficie lograda fue cuidadosamente tratada para garantizar la eliminación de materiales sueltos, en forma previa a la realización del hormigón de limpieza.

La solución propuesta, diseñada con factores de seguridad de uso frecuente para este tipo de solicitaciones, muestra un comportamiento satisfactorio dentro de los siguientes lineamientos:

- Relleno de trasdós, talud máximo. El relleno se debe disponer por detrás del muro, conformado con materiales friccionales, con bajo nivel de compactación. El sistema mantiene condiciones adecuadas de funcionamiento mientras el relleno genere una estructura de transición relativamente deformable entre la estructura de contención y el bloque caído. Para este condicionante, la pendiente máxima a conformar, desde el coronamiento del muro, no debe ser superior a 1V:1H, preferentemente se recomienda una pendiente del relleno 1V:1.5H.
- Relleno de trasdós, talud mínimo. El relleno del trasdós del muro se fija en función de permitir que el sistema cumpla el objetivo de contar con un área posterior al muro para el depósito de los bloques caídos, hasta el momento de su recolección, como parte de las tareas indispensables de mantenimiento. En tal sentido, se considera que la pendiente a conformar, desde el coronamiento del muro, no debería ser inferior a 1V:4H. Cuando el almacenamiento de los bloques caídos por detrás del muro torne la pendiente en un valor inferior al indicado, se deberán realizar las tareas de mantenimiento correspondiente para el retiro de los bloques caídos. Para este fin, se prevé un

conjunto de puertas de ingreso para el acceso de una pala cargadora de pequeño porte que realizará las tareas de retiro de bloques y reperfilado del talud según lo proyectado.

- Efectos de bloques de mayor dimensión. Se ha evaluado las dimensiones de los bloques que pueden generar transferencias de energía en el límite de lo tolerable para las estructuras propuestas. Este valor ha sido definido a partir de la determinación de las fuerzas de impacto que produce un mecanismo de rotura parcial de la estructura mediante la utilización de la Teoría de Líneas de Fluencia. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4.

| Denominación | | Peso | Volumen | Radio | Veloc | Energía (E) | F _{imp} | F _{trans} | F _{incl} |
|--------------|-------|------|---------|-------|---------|-------------|------------------|--------------------|-------------------|
| Sección | Alter | (kN) | (m3) | (m) | (m/seg) | (kJ) | (kN) | (kN) | (kN) |
| 21250 | 2 | 50.0 | 2.0 | 0.80 | 6.33 | 212.5 | 413 | 1,062 | 531 |
| 21750 | 2 | 45.0 | 1.8 | 0.75 | 2.98 | 27.5 | 127 | 239 | 120 |
| 22000 | 2 | 45.0 | 1.8 | 0.75 | 2.28 | 26.0 | 131 | 239 | 120 |

Tabla 4. Resultados de la modelación para la caída del bloque máximo

- Capacidad de mitigación. Los análisis realizados se han basado en comportamientos de carácter probabilísticos. Bajo esta condición es posible encontrar situaciones no contempladas en el estudio, que pueden derivar en sollicitaciones superiores a las aquí contempladas. Como toda obra de mitigación ante fenómenos de inestabilidad, es posible considerar que la estructura proyectada cubre un rango de posibles acontecimientos.

En función de los análisis y cálculos estructurales las geometrías finalmente empleadas han sido las indicadas en las Figuras 9.

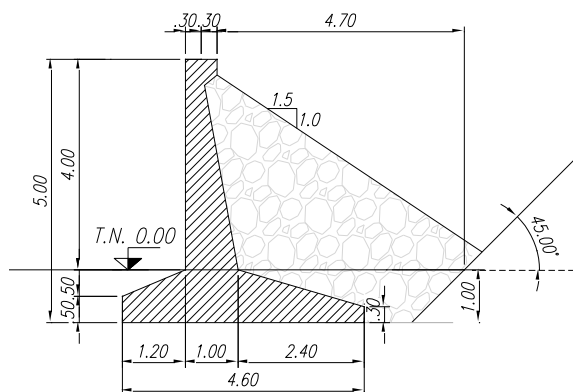


Figura 9.a. Diseño del muro del Caso 1

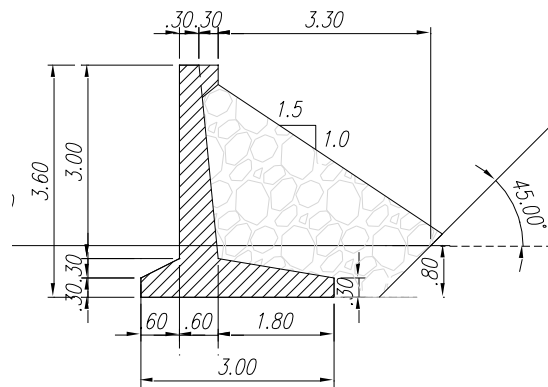


Figura 9.b. Diseño del muro de los Casos 2 y 3

5. SOLICITACIÓN EXTREMA SOBRE LA ESTRUCTURA

Con posterioridad a la construcción de la obra, se produjo un evento de deslizamiento de bloques con un espécimen que impacto directamente sobre uno de los muros recientemente construido. Las Figuras 10 son ejemplificadoras de las características del bloque que actúo sobre la estructura y de la forma de respuesta de la misma.



Figura 10.a. Vista de las dimensiones de los bloques caídos sobre la estructura de contención, sin relleno en el trasdós



Figura 10.b. Vista del efecto de rotura ocasionado por la caída de bloques sobre el trasdós del muro

Se puede apreciar que los bloques incidentes tienen dimensiones similares a aquellas que han sido definidas para la condición de comportamiento extremo de la estructura. Ante la acción de los mismos, la estructura ha sido capaz, sin la presencia del material de relleno posterior, de evitar que el bloque alcance la calzada, aun cuando el impacto ha producido un daño local sobre la estructura de hormigón armado del muro.

6. CONCLUSIONES

En función de los estudios, modelación, diseños estructurales y la experiencia de funcionamiento registrada en obra, se pueden formular las siguientes conclusiones y recomendaciones sobre el diseño de muros de control de caídas de bloques:

- De acuerdo a los estudios realizados es posible concluir que es necesario contar con un relleno de material suelto por detrás del muro que actúa como un atenuador o amortiguador de la energía recibida por el impacto del bloque, de manera que la fuerza de impacto sobre el muro resulte de valor compatible con dimensiones y armaduras convencionales para un muro de sostenimiento.
- Los resultados de los cálculos realizados muestran que para la caída del bloque de diseño de 1 m^3 la energía generada por la caída del bloque es del orden de 115 KJ para el Caso 1 y entre 20/25 KJ para el Caso 2 y 3, siguiendo las recomendaciones internacionales para estos niveles de energía son apropiadas soluciones con muros de sostenimiento.
- Para valores de energía mayor, las recomendaciones internacionales incluyen estructuras con cables, cobertizos o sistemas de terraplenes reforzados con armaduras o geotextiles.
- Es importante destacar que el sistema propuesto mantiene condiciones adecuadas de funcionamiento mientras el relleno genere una estructura de transición relativamente deformable entre la estructura de contención y el bloque caído. Para este condicionante, la pendiente máxima a

conformar, desde el coronamiento del muro, no debe ser superior a 1V:1H, preferentemente se recomienda una pendiente del relleno 1V:1.5H. Es decir, luego de la ocurrencia de varios eventos de caída de bloques será necesario realizar tareas de mantenimiento para retirar el material acumulado por detrás del muro y reponer las condiciones de diseño del relleno del trasdós del muro.

- Se ha logrado observar un caso correspondiente a la condición de funcionamiento extremo de la estructura. El mismo ha mostrado como la misma desarrolla un comportamiento satisfactorio ante la caída de bloques con dimensiones superiores a las consideradas inicialmente en el diseño de recurrencia aplicable al medio.

7. AGRADECIMIENTOS.

Los autores agradecen a la Dirección Nacional de Vialidad y a la Empresa Paolini Hnos SA por haber encomendado la realización de los estudios y diseños propuestos para la obra Cuesta de Miranda de la Ruta Nacional Nº 40 en la República Argentina.

8. REFERENCIAS.

-
- [1] Candiani, J.C.; Astini, R.; Dávila, F.; Collo, G.; Ezpeleta, M.; Alasino, P.; Dahlquist, J. y Carrizo, R. (2011). Hojas geológicas 2969-18, Famatina y 2969-24, Sañogasta, 1:100.000. Boletín 379. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Buenos Aires.
- [2] Velasco, M. y Vendramini, N. (2014). Caracterización y zonificación geológico - geotécnica en un tramo de la R.NNº 40, sector Cuesta de Miranda (Prov. de La Rioja), aplicada a problemáticas de inestabilidad y condición de taludes, en el tramo entre progresivas 23.628 – 12.880. Tesis de Grado Carrera de Geología. Universidad Nacional de Córdoba.
- [3] Office federal des routes (OFROU), "Actions sur les galleries de protection contre les chutes de pierres". Directive (1998).
- [4] Office federal des routes (OFROU), "Danger naturel <Chutes de pierres> pour les routes nationales". Rapport (2003).
- [5] Suarez, J. (2012). Curso de Estabilidad de taludes. Capítulo 10. Control de caídos y deslizamientos en rocas. www.erosion.com.co.
- [6] Montani, S. (1998). Sollicitation dynamique de la couverture des galleries de protection lors de chutes de blocks". Ph.D. Thesis, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne".