



Diseño de muros en macizos rocosos

En el marco del Curso internacional o diplomado titulado:

Estructuras de contención

Celebrado en la ciudad de Cajicá entre el 20 de septiembre del año 2021 y el 30 de octubre del año 2021.

Presentado por:

Sebastián Rodrigo Romero Ballén

Universidad Militar Nueva Granada
Facultad de Ingeniería Campus Nueva Granada
Programa Académico de Ingeniería civil
Cajicá, Colombia

Enero 2022

Diseño de muros en macizos rocosos

Sebastián Rodrigo Romero Ballén

Ensayo científico-académico para obtener el título de:
Ingeniero civil

Línea de Investigación:
Obras de estabilización de taludes

Universidad Militar Nueva Granada
Facultad de Ingeniería Campus Nueva Granada
Programa Académico de Ingeniería civil
Cajicá, Colombia

Enero 2022

INTRODUCCIÓN

Para la ejecución de estructuras de contención se han utilizado diferentes metodologías tales como métodos convencionales, métodos empíricos y semi-empíricos y el método de elementos finitos, que han permitido el desarrollo de diferentes estructuras partiendo de la tipología de suelo que se encuentre. La mayoría de muros se construyen en terrenos donde hay suelos, por lo anterior, es bastante común el estado de conocimiento sobre el diseño de muros en este tipo de condiciones, no obstante, es poco conocida la teoría para el diseño de muros cuando se presenta un macizo rocoso en estado fracturado.

Si bien un macizo rocoso con un bajo grado de fracturación, permite una buena estabilidad para un talud, cuando el grado de fracturación ya es importante se puede generar desprendimientos del material en una cantidad perjudicial para el servicio de alguna obra civil.

En el presente documento se va a indicar de una forma organizada el procedimiento para evaluar la calidad del macizo rocoso, la estabilidad del macizo (en caso de que sea un problema de cuñas deslizantes) y el dimensionamiento del muro a partir del análisis geotécnico.

PLANETAMIENTO DE LA TESIS

A través de la realización del diplomado de estructuras de contención, se comprendieron algunos conceptos y conocimientos acerca del comportamiento del suelo cuando está en estado activo, pasivo o en reposo, su influencia en el diseño geotécnico de un muro de contención.

Durante el diplomado tuve la oportunidad de profundizar sobre el tema, realizando mi proyecto final en un caso particular, donde el material retenido era una sucesión de estratos, pasando de arena gravosa a suelo saprolito y finalmente a roca casi intacta. Teniendo en cuenta la anterior realización de este proyecto me encontré en la necesidad de indagar y conocer más acerca de los diferentes conceptos que tiene un macizo rocoso tanto en su estado intacto como alterado. Dentro de estos conceptos tenemos el RQD, GSI, CR que están relacionados con el grado de fracturación del macizo, el criterio de Hoek & Brown para determinar la resistencia al corte en discontinuidades del macizo. También es importante el analizar la estabilidad de una ladera constituida por bloques (cuñas) que se deslizan entre sí y a través de un plano de falla en el macizo, esto con la teoría de cuña simple, cuña doble y triple, para luego determinar si es necesario construir un muro.

DISCUSIÓN

Debido a que la caracterización de la masa rocosa depende del estado en que se encuentre, ya sea inalteradas o fracturadas, se puede establecer la calidad de esta misma por medio de diferentes ensayos, los cuales darán a conocer la necesidad de implementar un muro de contención, por lo tanto, la determinación del índice de calidad de la roca o RQD es fundamental para “identificar el grado de unión de la masa rocosa. Se calcula hallando la sumatoria de trozos de roca intacta de más de 10 cm de longitud divididos por la longitud total del tramo perforado” (Borettek S.A.C, 2021). Con base a lo anterior, la calidad de la roca será determinada por medio de un rango porcentual, en el cual al estar por encima del 50% determina un índice de calidad entre regular, muy buena y excelente si esta se encuentra cerca al 100%,

así mismo tener un RQD por debajo del 50% equivale a una mala calidad del macizo rocoso.

Partiendo con lo estipulado anteriormente se identifica como uno de los parámetros que compone el RMR, el cual es el índice que evalúa que tan competente puede llegar a ser el macizo rocoso, a su vez este índice clasifica el macizo a través de zonas delimitadas donde la identificación de discontinuidades geológicas tales como un “conjunto de fallas, diaclasas, pliegues y demás características geológicas propias de una determinada región” (Ramirez & Alejano, 2004), permiten dar inicio a la determinación del RMR. No obstante, para dicho cálculo, se tendrá en cuenta la resistencia al corte simple de la muestra del macizo, la determinación del RQD, el espaciado de las juntas, las cuales establecen la resistencia del macizo dependiendo de la cantidad de juntas que esté presente, también se tendrá en cuenta la naturaleza que presenten las juntas con base a la rugosidad, relleno, apertura entre otras características. Así mismo, la presencia de agua y la orientación de las discontinuidades, son esenciales para realizar la respectiva categorización del macizo rocoso y finalmente calcular el RMR con base a los parámetros anteriormente mencionados.

Sin embargo, al tener taludes con una alta presencia de rocas débiles, se lleva a cabo una clasificación geomecánica o GSI, que consta de observaciones geológicas en campo, donde el primordial objetivo es la identificación de erosión en la roca como también si presenta alteraciones y cambios en su textura, así mismo, la calidad partiendo del GSI varía entre 1 a 100. Al presentarse valores cercanos a 1 se observan situaciones en el que hay un macizo rocoso de menor calidad, es decir

con un alto predominio de la erosión en la superficie, con presencia de arcilla en las juntas, y que, al tener una forma redondeada, esta manifestara una estructura poco resistente además de una alta fragmentación que sufre el macizo. Así mismo, los “valores de GSI cercanos a 100, implican macizos de gran calidad, ya que significa una estructura marcada por una pequeña fragmentación en la que abundan las formas prismáticas y superficies rugosas sin erosión” (Ros Avila, 2008), esto con el fin de suplantar los valores obtenidos del RQD específicamente a los macizos de mala y muy mala calidad.

Por otra parte, la implementación del criterio de Hoek & Brown es fundamental para determinar las propiedades de los macizos con discontinuidades, como a su vez, la resistencia de las rocas del macizo, por medio de ensayos de laboratorio como la resistencia a la compresión simple y constante de material rocoso, ensayos de laboratorio que son aplicados cuando se presentan macizos rocosos inalterados, no obstante al presentarse alteraciones en el macizo a causa de excavaciones o por la utilización de voladuras se deben llevar a cabo otro tipo de ensayos partiendo del criterio de Hoek & Brown tales como ensayos de corte directo y ensayos de inclinación en laboratorio.

De igual importancia, para el criterio de Hoek & Brown se planteó la utilización de un factor denominado D “que depende del grado de perturbación al que haya sido sometido el macizo rocoso debido a los daños originados por la voladura y relajación tensional” (Ramirez & Alejano, 2004). Este factor tiene valores entre cero y uno, por lo cual, para macizos rocosos intactos, D tendrá un valor de cero, de este modo si se presentan alteraciones en el macizo, D estará sujeto a diferentes casos de

perturbaciones tales como excavación mecánica o manual y el uso de voladuras, dando así, valores superiores a cero con un máximo valor de uno, sin embargo, D al ser un factor que abarca de manera general diferentes tipos de perturbaciones en el macizo y que a su vez depende de varios factores, la cuantificación de los valores que puede tomar D son estimados, por tal razón, se debe realizar un análisis detallado con base sea el caso particular que se presente. Finalmente, se tiene en cuenta que el criterio de Hoek & Brown podrá ser utilizado en " macizos rocosos fracturados que puedan ser considerados homogéneos e isotrópicos" (Ramirez & Alejano, 2004), es decir, que si se tiene la existencia de un solo tipo de discontinuidades, el criterio no podrá ser aplicado, por lo cual, se llevará a cabo el uso de criterios con mayor relevancia para dicha situación, igualmente al contemplar dos o más tipos de discontinuidades en el macizo, ninguna de estas puede sobreponerse de las demás ya que al darse este acontecimiento, el criterio de Hoek & Brown no podrá ser utilizado.

Es posible aplicar un análisis de discontinuidades, utilizando el método de la red estereográfica, con ello se identificaría el tipo de falla que se produce en el talud rocoso. En la identificación de este tipo de fallas se encuentra la falla planar o falla en cuña a favor de discontinuidades, en donde aspectos como la altura, la posición del nivel freático en el talud como también los reposos de agua que se pueden presentar en el talud, así mismo la dirección que este tenga será una de las principales razones para que ocurra esta falla, debido a las fracturas que resalten en la roca y así mismo sean predominantes conllevara a una falla en una superficie plana única. Otra falla que se puede identificar en taludes rocosos son las fallas en

cuña, las cuales se generan al tener presencia de dos planos de discontinuidades en rumbos diferentes, produciendo una línea de inmersión la cual presenta una inclinación a favor del talud dando así lugar a esta falla, así mismo los taludes rocosos presentan fallas por volcamiento, las cuales son masas de roca que se encuentran subdivididas en una serie de cuerpos rocosos en forma de columna con un declive a favor de las discontinuidades y que a su vez se encuentran paralelamente aproximado a la dirección del talud, no obstante las condiciones para que este tipo de falla se produzca se debe a una altura excesiva presentada por el talud, como también a la presencia de acciones sísmicas y a la aparición de fuertes presiones generadas por el agua en el macizo (Acevedo & Poblete, 2015), por lo tanto verificar este tipo de discontinuidades en el terreno es esencial para tener un amplio margen de las dificultades presentes en presencia de este tipo de suelos.

La notoriedad de un macizo rocoso, no significa una estabilidad total del terreno, se da la casualidad de tener suelos blandos o macizos de baja calidad que da como origen a el método de bloque deslizante, el cual ha sido utilizado movimientos en masa y obtener una medida aproximada de distancias de viaje (Prieto, Cantor, & Rodriguez, 2020). Por lo anterior y para conocer la estabilidad de la ladera, se dan a conocer el método de cuña simple, cuña doble y triple. Si se presenta un tramo de superficie recta, se realiza un análisis por medio del método de la cuña simple, en el cual se tendrá la superficie de falla a un ángulo establecido con respecto a la horizontal, así mismo este método brinda un apropiado análisis cuando hay una superficie de falla alusivamente recta a lo largo de un material que puede tender a ser prácticamente o variar a un material prácticamente blando (Agudelo, 2018), de

igual manera, si se tiene superficies de falla en dos tramos rectos, será aplicado el método de cuña doble, en el cual, la cuña que se encuentra en la parte superior tendrá una pendiente más fuerte comparada con la que tendrá la cuña ubicada en la parte inferior, así mismo, la cuña inferior dispondrá de la capacidad de resistir la fuerza de empuje generada por la cuña superior. Además del método de la cuña doble, se dispondrá del método de la cuña triple que es detallado por aspectos geológicos como la formación de roca o la presencia de mantos blandos, este método se aplica comúnmente en grandes deslizamientos, no obstante, para el método de la cuña triple se realiza un análisis de las fuerzas que son aplicadas en cada bloque, teniendo en cuenta la determinación de los ángulos de falla para la cuña tanto superior como inferior, pues la fuerza de empuje de las dos cuñas superiores sobre la inferior, genera un levantamiento.

Al darse a conocer los parámetros de los que depende la calidad que pueden albergar los macizos rocosos, como también las deficiencias de este a causa de las superficies de falla relacionadas a la presencia de una cuña simple, cuña doble o triple, se establece la elaboración de una estructura de contención con el fin prevenir accidentalidades en disposición de este tipo de suelos, por lo cual, se da inicio al diseño geotécnico de esta estructura, cumpliendo con las respectivas necesidades y previniendo riesgos al consumidor.

Al tener presente la causa o la necesidad, se lleva a cabo los estudios pertinentes partiendo de ensayos in situ y de laboratorio, los cuales, indicaran la calidad del macizo rocoso y los aspectos predominantes de este, así mismo, se lleva a cabo la determinación de los coeficientes de presión de tierras (presión activa, presión

activa), las cuales dependiendo de parámetros como los ángulos de inclinación tanto del terreno como del talud, cohesión del suelo, peso del suelo, ángulo de fricción, partiendo de esto, se verifican las especificaciones de los métodos de determinación estipulados en la NSR-98 para estos coeficientes, con base a los resultados obtenidos a los ensayos de laboratorio y a las condiciones del terreno.

Consecuente a esto se lleva a cabo un pre dimensionamiento del muro que, en donde se tendrá como punto de partida las dimensiones mínimas como también la selección de la mejor opción de muro a implementar, tales como muros en gavión, mecánicamente estabilizado o muros en cantiléver, que partiendo de las condiciones obtenidas del terreno y de las limitaciones que tienen cada uno de los muros propuestos se toma el más eficiente con base a lo mencionado anteriormente.

No obstante, dependiendo el tipo de obra que se ejecute ya sea infraestructura vial o estructuras de cualquier otra índole, se tendrá como documento de guía la Norma Colombiana de Diseño de Puentes (CCP-14) o la Norma Sismo Resistente de Colombia (NSR-10), las cuales brindaran la información necesaria para la determinación de los diferentes factores de seguridad de falla, que llegan a presentar las estructuras de contención, dando así valores mínimos para estos factores con base a las normativas ya mencionadas, estos factores de falla son el factor de seguridad por volcamiento (FSV) en donde se ven involucrados parámetros como el momento actuante y el momento resistente, como base del calculo de este factor de seguridad, así mismo se tendrán en cuenta el peso que tendrá la estructura, los coeficientes de presión de tierras específicamente la presión

pasiva como también los parámetros determinados con los ensayos de laboratorio, a su vez se tendrá como referencia los valores establecidos por la norma colombiana de diseño de puentes y la norma sismo resistente, donde se establece que los valores para este factor de seguridad son de 1.1 y 3.0 respectivamente para el cumplimiento de estas normativas.

Al verificar el cumplimiento del factor de seguridad por volcamiento a través de las normativas, se prosigue con la verificación del factor de seguridad por deslizamiento, el cual estará influenciado por la presión pasiva ejercida por el suelo, la fuerza normal ejercida por el peso de la estructura y el factor de rozamiento generado entre la parte embebida del muro y el suelo, cabe recalcar que este factor será influenciado en caso de cohesión, por lo cual el análisis de muestras en los ensayos de laboratorio son esenciales para determinar esta influencia, al calcular cada uno de estos parámetros se determina el factor de seguridad por deslizamiento, el cual según las normativas mencionadas anteriormente debe tener un valor mínimo de 1.6 para NSR-10 y un valor de 1.0 para el CCP-14, para que posterior se verifique el cumplimiento para este factor de seguridad.

Al obtener cada uno de los factores de seguridad, se lleva a cabo el cálculo de la capacidad portante del suelo, basándose nuevamente en la normativa que rige la construcción de estos muros como de otro tipo de estructuras, para este caso, se determinara la carga ultima y será comparada con la carga máxima y mínima con el fin de que esta sea superior a las cargas ya mencionadas, dando así el cumplimiento con base a las especificaciones de la NSR-10 y del CCP-14, para esto se debe tener en cuenta que el cálculo de la capacidad portante dependerá de la normativa a

utilizar. Es decir que si se implementa el uso de la NSR-10 se utilizara la siguiente ecuación

$$q_u = cN_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} + qN_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma i} \text{ (Meyerhof, 1953),}$$

teniendo en cuenta que los factores de capacidad de carga fueron establecidos por Terzaghi. Por otra parte, al determinar la capacidad de carga por medio de la Norma Colombiana de Diseño de Puentes se tendrá en cuenta la siguiente ecuación postulada por la normativa, tomando como referencia a Brinch – Hansen (1970) y a Vesic (1973) como autores de los factores de corrección

$$q_n = cN_{cm} + \gamma D_f N_{qm} C_{wq} + \frac{1}{2} \gamma B N_{\gamma m} C_{w\gamma}$$

donde los factores de carga son estipulados por el mismo CCP-14, de tal manera al realizar la comparación da cumplimiento con lo estipulado anteriormente se obtendría el diseño geotécnico de la estructura de contención.

Con base al proceso que se lleva a cabo para el diseño geotécnico y a los respectivos factores de seguridad que conlleva este mismo, se brinda un análisis al estar en presencia de un macizo rocoso, en donde la calidad del macizo y la construcción del muro son fundamentales para poder determinar los coeficientes de tierras, por lo que si se presenta un macizo de mala o muy mala calidad se deben incluir dispositivos de unión como son los anclajes, los cuales permitirán una mejor eficiencia del muro respecto a la problemática generada por el suelo y así mismo permitir un adecuado cálculo tanto de los coeficientes de tierras como también de los factores de seguridad de falla.

Sin embargo, se deben tener en cuenta las especificaciones para llevar a cabo la elaboración del anclaje, tales como la inclinación de la perforación, la longitud libre entre el bulbo y el anclaje, la forma de inyección, la cual puede ser única, repetitiva o repetitiva selectiva, estas estarán relacionadas a las condiciones del suelo, que dependiendo su composición este tendrá una adherencia límite, la cual permitirá determinar la longitud del bulbo por medio de la siguiente ecuación

$$L_b = \frac{P_{nb}}{A_{adm}\pi\phi}$$

de igual forma se tendrá en cuenta el tipo de anclaje que se utilice ya sea permanente o provisional, entre otros aspectos que permitirán brindar el soporte necesario hacia el muro de contención, no obstante, los anclajes se deben evaluar según tu capacidad de carga, el número de torones que compondrá cada anclaje y el tipo de tirante que este tendrá como cables o barras DW. Además, se tendrá las respectivas verificaciones de cumplimiento de los anclajes, en donde se debe cumplir con la comprobación de la tensión admisible del acero como también el respectivo cumplimiento a el deslizamiento del tirante en la lechada dentro del bulbo, esto con el fin de obtener el comportamiento idóneo de los anclajes con base a los requerimientos tanto del muro como de las condiciones presentes en el suelo.

CONCLUSIÓN

Tras el análisis de las características y fundamentos que implica tener un macizo rocoso como base de una construcción y a su vez las eventualidades en las que se puede diseñar geotécnicamente un muro de contención, son el resultado de la prevención de accidentalidades. Así mismo se comprende conceptos, teorías y

ensayos que han sido aplicados varios años atrás y que hoy en día son aún muy utilizados, tal y como es el criterio de Hoek & Brown, que al ser un criterio aplicado a rocas intactas ha sido implementado en macizos rocosos alterados, dando a entender que diferentes criterios y teorías son el punto de origen para dar un análisis certero al comportamiento que pueden tener este tipo de suelos al estar expuestos a una carga aplicada.

Debido a esto y a lo aprendido en el diplomado estructuras de contención, se apreció la funcionalidad de estos muros en presencia de suelos gravosos o arenosos como también en suelos cohesivos, por tal razón se realizó el debido estudio para el diseño de un muro de contención al tener un suelo rocoso, teniendo en cuenta que tanto ensayos como criterios y teorías abarcan diferencias en la obtención de los parámetros necesarios para la ejecución del respectivo diseño geotécnico. De esta forma se consagro llevar a cabo un análisis exitoso al estar en presencia de un macizo rocoso, donde la índole en la cual será utilizado el muro es fundamental para cumplir con los criterios de falla, los cuales son la razón para el adecuado funcionamiento de dicha obra civil.

Añadiendo a lo anterior, se logró percatar que partiendo de la calidad del macizo como de la pendiente que puede tener el terreno es necesario la aplicación de anclajes para tener como resultado un muro que cumpla con las condiciones anteriormente descritas, no obstante se debe ser minucioso con la utilización de estos, ya que tanto el dimensionamiento como materiales y proceso constructivo de los anclajes dependerán del mantenimiento que se requiera y a su vez brindara la estabilidad necesaria en el muro para cumplir con su propósito de diseño. Así mismo

la utilización o no utilización de los anclajes en las estructuras de contención estarán altamente relacionados en presencia de fuertes deslizamientos del terreno, también conocidas como cuñas, por lo cual la ejecución de una estructura de contención para este tipo de casos es fundamental, partiendo de las condiciones del macizo.

Finalmente lograr identificar como los ensayos que se realizan en el macizo rocoso, las teorías y criterios que componen estos, dan un amplio margen para determinar la calidad y características que estos poseen, por lo tanto los riesgos que pueden causar al consumidor estos tipos de suelos, permiten elaborar una estructura que evite este tipo de incidentes, partiendo del comportamiento que puede tener el suelo, como de la comprensión que se le puede dar a este para llegar a cumplir con las necesidades que se presenten.

Bibliografía

- Acevedo, J., & Poblete, C. (08 de Julio de 2015). *Prezi*. Obtenido de Fallas en talud de roca: <https://prezi.com/kftnzmjzx73e/fallas-en-talud-de-roca/>
- Agudelo, C. (13 de Marzo de 2018). *Metodo de la cuña simple, doble y triple* . Obtenido de Prezi: <https://prezi.com/p/iuh638opvfwfwd/metodo-de-la-cuna-simple-doble-y-triple/>
- Boretek S.A.C. (2021). *Determinacion del RQD*. Recuperado el 14 de 5 de 2021, de <https://boretek.pe/geotecnia-y-geomecanica/determinacion-del-rqd>
- Meyerhof. (1953).
- Prieto, A., Cantor, L., & Rodriguez, C. (14 de Abril de 2020). Modelo de bloque deslizante para analizar el comportamiento cinemático de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite. *Obras y Proyectos* 27, 64-77. Obtenido de <https://scielo.conicyt.cl/pdf/oyp/n27/0718-2813-oyp-27-0064.pdf>
- Ramirez, P., & Alejano, L. (2004). *Mecanica de rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes*. Madrid.
- Ros Avila, J. (Noviembre de 2008). *Universitat Politècnica de Catalunya Barcelona TECH*. Obtenido de UPCommons: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/6529>