



REVISTA TÉCNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Una Revista Internacional Arbitrada
que está indizada en las publicaciones
de referencia y comentarios:

- SCOPUS
- Compendex
- Chemical Abstracts
- Metal Abstracts
- World Aluminium Abstracts
- Mathematical Reviews
- Petroleum Abstracts
- Current Mathematical Publications
- MathSci
- Revencyt
- Materials Information
- Periódica
- Actualidad Iberoamericana

UNIVERSIDAD DEL ZULIA



REVISTA TÉCNICA
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Hacia los 130 años de creación de la Universidad del Zulia

"Buscar la verdad y afianzar
los valores trascendentales",
misión de las universidades en
su artículo primero, inspirado
en los principios humanísticos.
Ley de Universidades 8 de
septiembre de 1970.

Geomechanical characterization of basaltic rock slopes on the southern coast of Ecuador: implications on its stability

Kervin Chunga^{1*} , David Stay Coello², María Quiñónez Macias³, Néstor Cahuana⁴, Isela Salinas Baquero⁵, Carlos Villacreses Viteri¹

¹Universidad Técnica de Manabí, Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas, Departamento de Construcciones Civiles, Av. José María Urbina, Portoviejo 130111, Ecuador

²Universidad de Guayaquil, Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas, Cda. Universitaria "Salvador Allende", Guayaquil 090514, Ecuador

³Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias, Dirección de Análisis de Riesgos, km 0,5 vía La Puntilla, Samborondón 092301, Ecuador

⁴GEAS Geophysical Services, Guayaquil 090514, Ecuador

⁵Universidad Estatal Península de Santa Elena, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, km 1 vía La Libertad 240350, Ecuador

*Autor de correspondencia:kchung@utm.edu.ec

<https://doi.org/10.22209/rt.ve202020n2a09>

Recepción: 13/03/2020 | Aceptación: 05/06/2020 | Publicación: 31/07/2020

Abstract

A high amount of slope failures along hill cut road slopes is located in the Daule canton. For the current study, a 32 m high, basaltic road cut hill slope at the Cerro San José site, which is situated close to the city of Guayaquil, has been considered for assessment of the slope stability. This has been based on the inherent rock strength parameters, discontinuity orientation, and stereographic projection technique. Seismic accelerations of 0.21-0.33 g were determined from local active geological faults. The geotechnical parameters were given for basalt rock according to the Mohr-Coulomb and Hoek-Brown criteria, with a friction angle of 37 degrees, cohesion between 4.5-7.8 Mpa, an unconfined compressive strength of intact rock of 110-240 Mpa and P-wave velocity of 4 to 6.8 km/s. Within the rock mass, the slope angle tends to be unfavorable to the discontinuities, establishing unstable and partially stable slopes of class III/IV. Therefore, it is suggested to modify the slope angle up of 55 degrees, which increased the safety factor and reduces failure probability. The obtained analyses provided fundamental information in basalt slope stability studies and suggest the employment of instant preventive measures in order to alert further risk of damage to transients and buildings.

Keywords: slope stability analysis; stereographic projection; rock slope; basalt.

Caracterización geomecánica de taludes de roca basáltica en la costa sur de Ecuador: implicaciones en su estabilidad

Resumen

Los cortes de taludes en rocas basálticas afectan algunos tramos de carreteras en el cantón Daule. Este estudio comprende un corte de talud de 32 m de altura en el cerro San José (norte de Guayaquil), resistencia a la comprensión uniaxial, medición de discontinuidades y técnicas de proyección estereográfica han sido consideradas para la evaluación geomecánica de la estabilidad del talud. La aceleración sísmica de 0,21-0,33 g fueron determinadas desde análisis de fallas activas cercanas al sitio. Los parámetros geotécnicos fueron obtenidos desde los criterios de Mohr-Coulomb y Hoek-Brown, con ángulo de fricción de 37°, cohesión entre 4,5-7,8 Mpa, resistencia a la roca intacta de 110-240 Mpa, y velocidades de ondas P de 4,0 a 6,8 km/s. En el macizo rocoso, el ángulo del talud tiende a ser desfavorable con las discontinuidades, estableciendo pendientes inestables y parcialmente estable de Clase III/IV, sugiriendo así modificar el talud hasta 55°, incrementando el factor de seguridad y reduciendo la probabilidad de falla. Todos estos análisis proporcionaron información valiosa para la evaluación de estabilidad de taludes en basalto, sugiriendo el empleo de medidas preventivas para evitar mayores riesgos de daños en la infraestructura vial y en la vida de los transeúntes.

Palabras clave: estabilidad de talud; proyección estereográfica; talud de roca; basalto.

Introducción

Los basaltos cretácicos de la costa ecuatoriana reconocidos como formación geológica Piñón, tienen características geotécnicas favorables para la construcción, sin embargo, los sistemas de fracturamientos evidenciados en los macizos rocosos a lo largo de cortes de carretera, determinan una serie de inestabilidades para esos taludes. La frecuencia de estos escenarios de inestabilidad es mayor durante la ocurrencia de eventos sísmicos o en los períodos de altas precipitaciones, con lo cual, los deslizamientos en cuña, planares y las caídas de rocas incrementan el riesgo de los transeúntes y viviendas [1].

A fin de interpretar los parámetros geotécnicos de estas unidades volcánicas, se seleccionó un sitio en la costa sur de Ecuador (ver Fig. 1), cuyas características petrográficas y geomecánicas son similares al resto de los afloramientos basálticos en los cantones Daule y Guayaquil, costa sur del Ecuador. Entre los objetivos específicos de este estudio, se considera: (i) caracterizar el macizo rocoso midiendo las discontinuidades, el comportamiento geomecánico y la calidad de la roca, teniendo en cuenta los parámetros RMR (Rock Mass Rating) [2] [3], RQD (Rock Quality Designation), condición de juntas, y SMR (Slope Mass Rating) [4] [5]. Con base en los criterios de Mohr-Coulomb y de Hoek-Brown, se obtuvieron los parámetros geotécnicos GSI (Geological Strength Index), ángulo de fricción y cohesión del basalto, utilizando el programa Rocdata[6] [7] [8]. El factor de disturbancia (D) usado fue de 0,7 para taludes naturales. En adición, para los análisis cinemáticos de potenciales deslizamientos en cuñas y planares, se utilizaron los softwares dips, swedge, rocplane y slide de rosciences [8]. (ii) determinar parámetros geosísmicos a través de sísmica de refracción, para obtener velocidades de onda P y UCS (Unconfined Compressive Strength), en basaltos moderadamente duros a extremadamente duros. (iii) diseñar un modelo geotécnico-geosísmico para el factor de seguridad (FS) considerando valores de PGA-h y magnitudes sísmicas (subducción y de fallas geológicas). Esta información proporcionará parámetros geotécnicos para macizos rocosos de basalto, así como alternativas de técnicas para la estabilidad de taludes, útiles en la proyección de planificaciones y para la reducción de riesgos por deslizamientos en carreteras.

Área de Estudio y Geología

La información litológica de las unidades o formaciones geológicas de interés en este estudio, es referida del mapa geológico de la costa de Ecuador [9] [10] [11][12]. La formación Piñón es el basamento ígneo cretácico del Ecuador occidental, conformada por basaltos toleíticos, basaltos-andesíticos almohadillados y flujos massivos [13] [14] [15] [16], asociados localmente con brechas de almohada, hialoclastitas y sedimentos silícicos subordinados (Fig. 2). Estos afloramientos homoclinales constituyen la cordillera Chongón - Colonche en sus estribaciones septentrionales (Fig. 1).

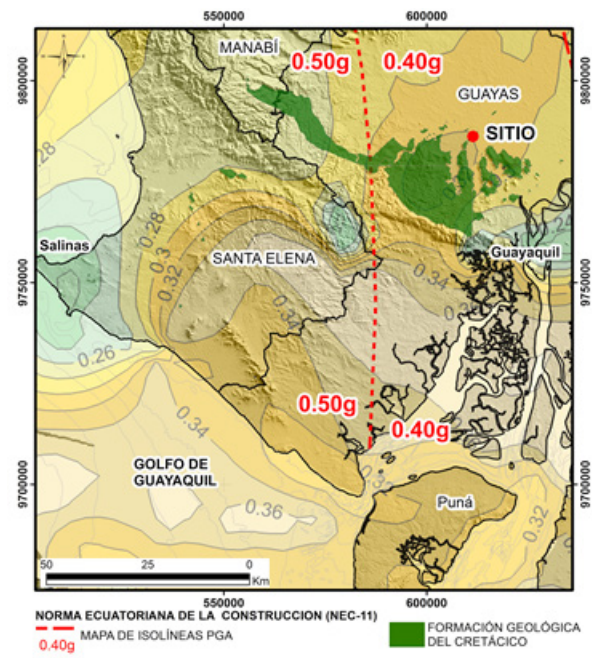


Figura 1. Formaciones cretácicas en la costa sur de Ecuador y su relación con valores PGA-h, según [20] [21]. Sitio de estudio del cerro San José (ver Figura 2), coordenadas UTM, 611435mE y 9786217mN.



Figura 2. Estaciones geomecánicas en el cerro San José, Daule, norte de Guayaquil. Las estaciones T4 y T5 son localizadas en la base del corte de talud.

El área de estudio seleccionada se encuentra a 18 km al noroeste de la ciudad de Guayaquil, en el sitio conocido como cerro San José del cantón Daule (provincia Guayas) (Fig. 2). Este cerro está conformado por rocas basálticas, de características petrográficas similares a los restantes afloramientos de la región. En el sitio se evidencian fracturamiento local y patrones de diaclasas, así como roca in-situ de textura afanítica con presencia de vetillas de cuarzo que oscilan entre 0,2 mm y 2 cm, de color blanco lechoso. Además, se observan diseminaciones de minerales como piritita, marcasita, pirrotina y cloritita (Fig. 2). El macizo rocoso presenta dos fases hidrotermales: la primera con presencia de cuarzo, y la segunda que rellenó las fracturas con cuarzo y mineralizaciones de piritización,

pirrotina, marcasita, producto de la oxidación que provocan las aguas meteóricas al infiltrarse, provocando a largo plazo, factores químicos que alteran la resistencia de la roca [17] [18].

Las discontinuidades principales, de manera general, se pueden describir que son poco abiertas, con rellenos poco meteorizados y secos y puntualmente húmedos en época lluviosa; su continuidad varía entre 60 cm y 20 m, el espaciado está comprendido entre 10 cm y 2 m, demostrando que las condiciones geológicas y estructurales existentes en el sector San José, presentan un esfuerzo mecánico de inestabilidad en el macizo, que condiciona la probabilidad de ocurrencia de potenciales deslizamientos planares y en cuñas.

Metodología

La investigación se estructuró en dos fases: una de caracterización geomecánica de talud en roca, y otra de diseño de estabilidad considerando parámetros litológicos, geotécnicos y de factor de seguridad. La primera fase, orientada a la caracterización de la geología del terreno y la medición de discontinuidades, permitió obtener datos del macizo rocoso, medición estructural de diaclasas y fallas geológicas, que determinan condiciones para la ocurrencia de potenciales deslizamientos y fallamientos superficiales en roca. Los afloramientos rocosos delimitaron las principales unidades litológicas predominantes en el sitio. Los datos estructurales considerados en las mediciones son dip-direction/dip, obtenidos con una brújula geo-brunton. Posteriormente, estas mediciones se proyectaron en una estéreo-falsilla de Wulff por medio del software dipv de rocsciences [8], el cual permitió identificar potenciales deslizamientos planares y en cuñas.

El análisis de la calidad del macizo en el talud en roca fue evaluado considerando los parámetros RMR [3] [19] y SMR [4] [5]. Los deslizamientos en cuña fueron analizados con el software swedge, mientras que los planares se evaluaron con el software rocplane. Los parámetros geotécnicos desde los criterios de Mohr-Coulombs y Hoek-Brown, fueron obtenidos con el software rocdato de rocsciences [7] [8].

Para el cálculo del SMR se utilizó la herramienta libre SMR-Tools desarrollada por [5] (disponible en <http://personal.ua.es/es/ariqueme/smrtool.html>). En este análisis se incluyeron los valores de $RMR_{básico}$ para cada talud, las medidas estructurales del talud (dip-direction/dip) y el tipo de deslizamiento potencial (cuña o planar). Con estos valores se determinó la clasificación geomecánica SMR [4] [5]. Para el ensayo geofísico por sísmica de refracción, se realizó un tendido sísmico de 110 m de longitud (ver Figura 2, línea roja), a partir del cual se determinaron la velocidad de onda P y el UCS. Tal variante fue asumida sobre la base de la finalidad de la prospección geofísica en objeto, que consideró la caracterización

litoestratigráfica, la profundidad de la roca alterada y dura, y la identificación de posibles zonas de fracturamientos definiendo un modelo geológico en sección bidimensional del sitio.

La segunda fase, evaluación y diseño de estabilidad del talud, caracterizó a las zonas geotécnicas del sitio, proponiendo modelos de análisis para la estabilidad de talud, y contemplando parámetros sísmicos y geotécnicos con afectación al macizo rocoso (Tabla 1). El análisis de los planos de deslizamiento y de factores de seguridad permitió obtener parámetros geotécnicos para los modelos de estabilidad; considerando el cálculo de la inclinación del talud y la estabilización de los deslizamientos por reducción de resistencia al corte.

Resultados y Discusión

Parámetros sísmicos (subducción y fallas geológicas)

La costa sur de Ecuador se caracteriza por dos tipos de amenazas sísmicas. Sismos de subducción lejanos donde las magnitudes alcanzan rangos entre $6,9 \leq Mw \leq 8,2$; y sismos moderados locales desde fallas geológicas con magnitudes entre $5,9 \leq Mw \leq 6,8$ (ver catálogo de fallas para la costa sur de Ecuador [20]). Según la NEC-11, el sitio de estudio se encuentra en la zona sísmica de nivel moderado-alto [21], con $PGA \geq 0,4g$ en roca (Fig. 1).

Un método determinístico fue aplicado en esta sección para estimar con más precisión los niveles de sismicidad. Esta técnica comprende la aplicación de ecuaciones de regresión aplicadas a los parámetros geométricos y cinemáticos de fallas, determinando máximas magnitudes [22] [23] [24] [25] y máximas aceleraciones en roca [26], PGA, Peak Ground Acceleration. Este análisis para el sitio seleccionado, permitió la construcción de un catálogo de fallas que consta de 17 segmentos activos y capaces (Fig. 3). Los lineamientos estructurales fueron cartografiados a partir de un análisis morfométrico, utilizando imágenes de ortofotos y modelos de elevación digital de alta resolución. La información existente del mapa de fallas activas fue consultada desde [20] [27] [28].

Este análisis de riesgo sísmico determinístico indicó que las fallas activas F-04 a F-07 son las más propensas a causar daños en el sitio de estudio, con magnitudes que varían en el rango de $6,17 \leq Mw < 6,64$ y los PGA entre $0,25g \leq PGA \leq 0,33g$ (Fig. 3). La falla F-06 de 12 km de longitud es la más cercana al sitio de interés, ubicada a 10 km de distancia al suroeste de éste, y puede generar sismos entre 6,29 y 6,34 y PGA en el orden de 0,25g. La falla más grande es la F-07, localizada a 35 km al este del sitio de estudio, con 36 km de longitud puede generar sismos por el orden de 6,74 y PGA de 0,33g. Las fallas F-04 y F-05, de 12 km y 27 km de longitud respectivamente, están localizadas al sur del sitio de estudio, y pueden generar sismos entre 6,17 a 6,64 y PGA en el orden de 0,3g.

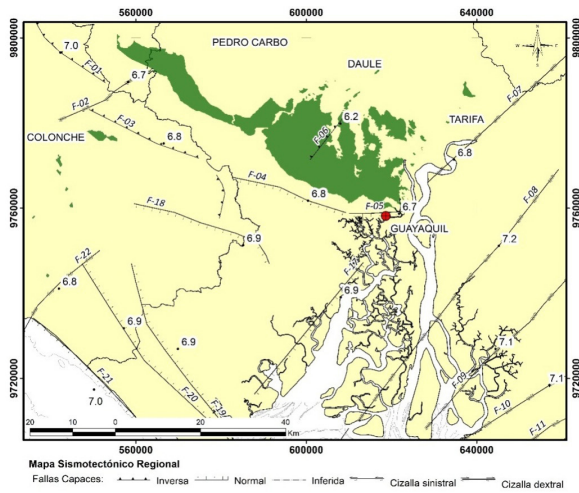


Figura 3. Fallas activas a escala regional para la obtención de parámetros sísmicos. Las unidades volcánicas cretácicas son resaltadas en color verde[11] [15].

van desde 2.000 m/s hasta 6.500 m/s, prospectando las velocidades hasta una profundidad de 16 metros. A partir de las mediciones de velocidades sísmicas, y usando el método de sísmica de refracción, se obtuvo un modelo simplificado y tomográfico del subsuelo, tal como se puede observar en la figura 4.

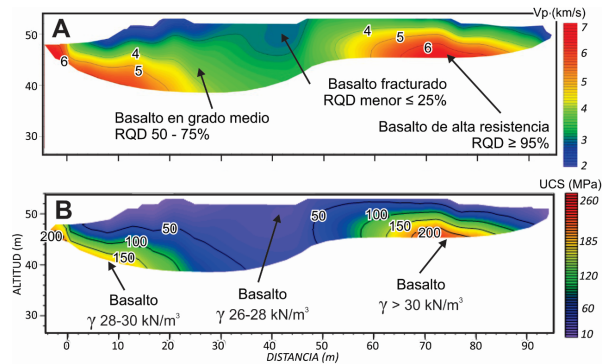


Figura 4. Modelos tomográficos: (A) de velocidades de onda P, y (B) de resistencia a la compresión uniaxial.

Tabla 1. Estimación de parámetros de resistencia al corte, desde la aplicación de rocdato. Los valores de UCS fueron determinados desde análisis geofísicos de refracción.

Altura Talud (metros)	σ_{ci} (Mpa)	GSI	mi	D	mb	s	a	Ángulo fricción (grados)	Cohes. (MPa)
32	135-240	65	25	0,7	3,654	0,0063	0,502	37	4,5-7,8

Condiciones geotécnicas de basaltos

Los parámetros geotécnicos sustentados en los criterios de Morh-Coulombs y Hoek - Brown, permitieron calcular el GSI y los parámetros de resistencia al corte. El valor de ángulo de fricción fue confirmado con datos de literatura para macizos rocosos similares [29], así como el UCS (MPa) y la cohesión para basaltos. El modelo de Hoek y Brown requirió del conocimiento de tres parámetros: (i) la resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta “ σ_{ci} ”, para el basalto es calculado de 200 a 240 MPa, (ii) la constante “mi” que define el carácter friccionante de la roca, es de 25, y (iii) el Índice de Resistencia Geológica “GSI” del macizo rocoso, de 65; “mb” es un valor reducido de la constante del material de 3,654; “s” y “a” son constantes del macizo rocoso, de 0,0063 y 0,502, respectivamente[7] [8]. El ángulo de fricción de 33 a 37° y la cohesión de 4,5 a 7,8 Mpa son establecidos para la roca basalto.

Parámetros geofísicos (Vp y UCS)

La línea sísmica de refracción LSR-01 con una orientación de N85°E, en el cerro San José, permitió obtener un modelo de subsuelo con un rango de velocidades que

En el modelo simplificado se evidencia dos capas, una superficial de suelo residual y roca alterada hasta 2 m, con velocidades sísmicas entre 2000 m/s y 3000 m/s; y una segunda capa con velocidades Vp en el rango de 4.000 m/s y 6500 m/s, se observa un contraste lateral entre los 25 m y 45 m de distancia horizontal donde las velocidades no superan los 4.200 m/s, lo que podría ser asociado a una zona de fracturamiento (Fig. 4 y 5). La correlación entre los valores de Vp por sísmica de refracción con parámetros geomecánicos, se presenta como resultado de una sección del subsuelo, con la distribución de magnitudes de la resistencia a la compresión uniaxial (UCS). Dicha sección fue calculada desde la relación empírica Kilic y Teymen, la cual relaciona la velocidad de onda compresional (Vp) con la UCS para diferentes tipos de rocas ígneas-volcánicas[30]. La curva de relación empírica planteada expresa la siguiente ecuación:

$$UCS = 2,304V_p^{2,4315} \tag{1}$$

Donde, UCS es la resistencia a compresión uniaxial (MPa), y Vp es la velocidad de onda compresional P (enkm/s).

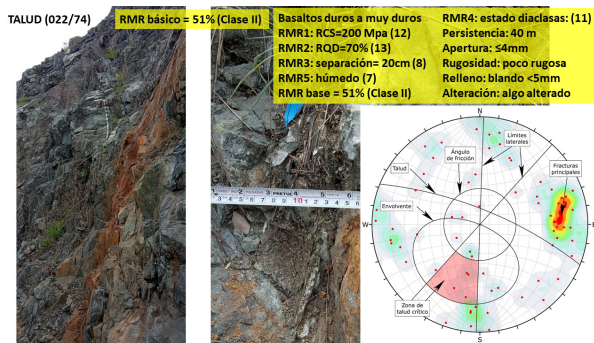


Figura 5. Análisis determinístico de deslizamientos planar, referido para el talud 022/74, la intersección del deslizamiento es 022/65.

Para el macizo rocoso de basaltos se establecieron valores de UCS entre los 10 MPa y 220 Mpa. Para la zona con menores velocidades de onda P, se reporta valores de UCS entre 20 MPa y 50 MPa, mientras que, donde el basalto es más sano, se alcanzaron valores mayores a 100 MPa (Fig. 6 y 7).

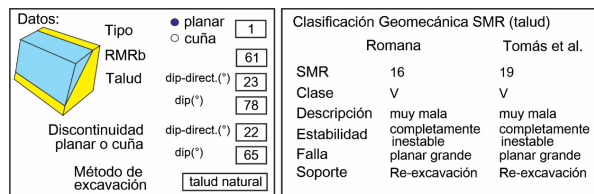


Figura6. Análisis SMR-Tool[5] para la zona de corte de carretera, indicando un valor de 19, clase V, malo e inestable. Para este análisis se consideró la discontinuidad del plano de estrato 022/65 para deslizamiento planar.

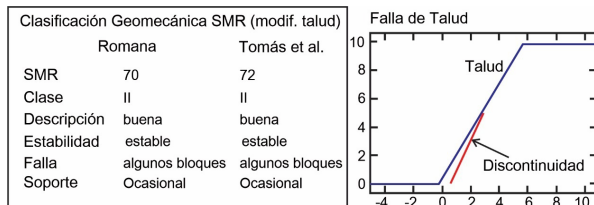


Figura7. Corrección de análisis SMR-Tool desde la figura 6, modificando el talud desde 78° a 60°, clase II buena y estable.

Características geomecánicas

Para el cerro San José, se delinearono cinco zonas de taludes, donde sus discontinuidades son proyectadas espacialmente en el macizo rocoso. Las zonas T1 a T3 (referida al talud) están encima del cerro y las zonas T4 y T5 en la parte inferior del corte de talud de carretera. La roca volcánica de basalto tiene consistencia dura a

muy dura, y el talud principal de 026/78 tiene sistemas de diaclasamientos con tres principales familias. El esfuerzo estimado a la compresión uniaxial, para la roca basalto es de 200 Mpa, sin embargo el ensayo geofísico asigna un valor de 240 MPa. El RQD promedio medido es de 66%, y el espaciamento promedio de discontinuidad es 0,2 m (Fig. 5). Las condiciones de discontinuidades, tienen persistencias de 3 m a 4 m, con abertura de 1 mm en la fractura más crítica, con superficie rugosa, sin relleno en algunos tramos donde los espaciamento de abertura es menor de 5 mm, la alteración en las paredes de las discontinuidades es media. La condición geohidrológica considerada en este talud es húmeda. Con todas estas características se calcula para el talud principal un RMR_{básico} de 61% con clase II (Tabla 2).

Para analizar la dinámica y cinemática de las discontinuidades, se empleo el software “dips-v6” de rocscience [8], determinando zonas críticas en el talud que pueden formar deslizamientos planares, y menores desprendimientos en cuña. En éste análisis se proyectaron espacialmente el plano y el polo del talud 022/74, seguido de los polos de todas las discontinuidades medidas en el macizo rocoso. El ángulo de fricción empleado en este analisis es de 37° para el basalto, la delimitación del talud y la intersección de las descontinuidades pueden formar un deslizamiento planar con valor estructural de 022/65.

Tabla 2. Resultados de análisis geomecánico y estabilidad de talud.

Talud	Litología	Falla	RMR _{básico}	SMR _{actual}	Clase	SMR _{corregido}
T-01	Basalto, duro	planar	64	39	IV. Mala, inestable	41 clase III
T-02	Basalto, duro	ninguna	66	67	II. Estable	80 clase II
T-03	Basalto, duro	planar	64	50	III. Parcial estable	76 Clase II
T-04	Basalto, duro	planar	57	21	IV. Mala, inestable	46 clase III
T-05	Basalto, duro	planar	61	19	V. Muy mala	72 clase III
T-total	Basalto, duro	planar y cuña	60	-	IV. Parcial estable	53 clase III

Con todos los parámetros geofísicos, geomecánicos y geotécnicos se procede al cálculo del SMR, empleando la herramienta libre SMR-Tools desarrollada por [5]. La evaluación geomecánica de los taludes permitió indicar que, para taludes de clase III parcialmente estables, se sugiere modificar la pendiente reduciendo a 55 grados (clase III), con estos cálculos se disminuye el riesgo de deslizamiento planar (Figuras 6 y 7). Otra alternativa es colocar cortinas de acero de alta resistencia con anclajes en la parte alta del talud, que permitirá reducir caídas de bloques de menores deslizamientos en cuñas. En la

Tabla 2, se indica los tipos de potenciales deslizamientos, los cálculos de $RMR_{básico}$ y el SMR corregido para un mejoramiento en la estabilidad del talud. Para el cálculo del factor de seguridad en el talud, desde un análisis determinístico, se empleó el programa rocplane (para deslizamientos planares) y el swedge (para análisis en cuña). Los parámetros geotécnicos calculados desde el rocdat, y la aceleración sísmica asignada de 0,21 g, permitieron estimar un FS 0,83, por lo que las alternativas de diseños establecidas mejorarían e incrementarían el FS mayor a 1,2.

Conclusiones

Para las rocas cretácicas de basaltos en este estudio, se establece una aceleración entre 0.21 a 0.33 g, aplicable para obras de ingeniería, estos valores de PGA son recomendables y en contraposición a los valores recomendados por la NEC-11 (0,4 g y 0,5 g) para aceleraciones en roca. El coeficiente sísmico obtenido para el diseño de taludes propone la expresión $ka=0,60ZFa$ que, en el caso de rocas duras como los basaltos, sería de 0,21g.

Los ángulos de fricción entre 31 a 37° representan la mayor resistencia en confrontación con las otras rocas aflorantes en el área de estudio. La determinación de velocidades de ondas P de 4,0 a 6,8 km/s son correlacionables con la resistencia a la roca intacta de 110-240 Mpa. La aplicación de la técnica del esclerómetro no es recomendable para estos tipos de rocas volcánicas, debido a su limitación en la medición de la resistencia y dureza. Los basaltos cretácicos en esta zona son resistentes a la meteorización, por lo que, los parámetros geotécnicos calculados en este estudio, se consideran invariables por el tiempo de exposición.

En el macizo rocoso, el ángulo del talud tiende a ser desfavorable con las discontinuidades, estableciendo pendientes inestables y parcialmente estable de Clase III/IV. La primera alternativa de estabilidad es modificar el talud hasta 55°, incrementando el factor de seguridad y reduciendo la probabilidad de falla. La segunda alternativa y más adaptable en la estabilidad del talud, es colocar la cortina de acero de alta resistencia, donde los anclajes deben ser realizados en la parte alta, y los pernos con distancia de 5 metros. Anclajes en la pared frontal del talud, no es recomendable por la posibilidad de un potencial colapso, aún si se encuentra posicionado la cortina de acero. Todos estos análisis proporcionan información valiosa para la evaluación de estabilidad de taludes en basalto, sugiriendo el empleo de medidas preventivas para evitar mayores riesgos de daños en la infraestructura vial y en la vida de los transeúntes.

Agradecimientos

Este trabajo es direccionado por el Grupo de Investigación de Geotecnia de la Universidad Técnica de

Manabí (UTM). Los Autores agradecen a la Consultora GEAS Geophysical Services, en Guayaquil.

Referencias Bibliográficas

- [1] Torres-Hoyer R., Torres-Hoyer J., Bongiorno F., Peña J., Peña O., Gonzalez L., Picón R. Barreto W. Evaluation of vehicular risk of rockfalls in Rafael Caldera Road, Mérida, Venezuela. Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia. Volumen Especial, No. 1, (2019) 203-208.
- [2] Bieniawski, Z. T. Determining rock mass deformability. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. pp. Vol. 15, (1978) 335-343.
- [3] Bieniawski, Z. T. Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. Wiley-Interscience, (1989) 40-47pp. ISBN 0-471-60172-1.
- [4] Romana M. New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. Proc. Int. Symp. on the Role of Rock Mechanics, (1985) 49-53.
- [5] Riquelme, A., Tomás, R., Abellán A. SMRTool beta. A calculator for determining Slope Mass Rating (SMR). Universidad de Alicante. (2014). <http://personal.ua.es/es/ariquelme/smrtool.html>
- [6] Hoek E, Brown ET. Empirical strength criterion for rock masses. Journal of Geotechnical Engineering Division Vol. 106(1980)9-1013e25.
- [7] Hoek, E., Brown, E.T. Practical estimates of rock mass strength. Int. J. Rock Mech. Min. No. 34 (8), (1997) 1165-1186.
- [8] RocScience. ed. «Rocscience understands» (2017) (en inglés).
- [9] Bristow, C.R., Hoffstetter. R. Lexique Stratigraphique International 5, Fax. 5a. I (2nd ed.). Centre National de la Recherche Scientifique (1977) Paris.
- [10] Feininger. T. and Bristow. C.R. Cretaceous and Paleogene geologic history of coastal Ecuador. Geol. Rundach No. 69 (3), (1980) 49-874.
- [11] DGGM, Dirección General de Geología y Minas. Mapa geológico de la República del Ecuador. 1: 1.000.000. Ministerio de Recursos Naturales y Energéticos (1982) Quito.
- [12] Reyes P, Michaud F. Mapa Geológico de la Margen Costera Ecuatoriana (1:500000). EP PetroEcuador - IRD (Eds.) (2012) Quito, Ecuador.

- [13] Sauer. W. Geology of Ecuador (Contributions to the Regional Geology of the Earth). Borntraeger (1971) Berlin.
- [14] Goossens.P.J. and Rose. W-J.. Jr. Chemical composition and age determination of tholeiitic rocks in the Basic Igneous Complex. Ecuador. Geol. Sot. Am. Bull. Vol. 84 (1973): 1943-1052.
- [15] Wallrabe-Adams, H.-J. Petrology and geotectonic development of the Western Ecuadorian Andes: the basic igneous complex. Tectonophysics Vol. 185, (1990)163-182.
- [16] Luzieux, L.D.A., Heller, F, Spikings, R., Vallejo, C.F, Winkler, W. Origin and Cretaceous tectonic history of the coastal Ecuadorian forearc between 1°N and 3°S: Paleomagnetic, radiometric and fossil evidence. Earth and Planetary Science Letters Vol. 249, (2006) 400-414.
- [17] Moreira, A. Caracterización petrográfica y caligrafía del afloramiento ígneo asignado al Jurásico, ubicado en la perimetral del cantón Nobol - Ecuador. Tesis de Grado, Universidad de Guayaquil, (2017), Guayaquil, Ecuador.
- [18] Burgos R. Caracterización y clasificación geomecánica del cuerpo intrusivo ubicado en la vía Perimetral de los cantones Nobol y Daule de la provincia de Guayas. Tesis de grado, Universidad de Guayaquil, (2018) 127 páginas.
- [19] ASTM F2122-13, Standard Practice for Treestand Safety Devices (Withdrawn 2017), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, www.astm.org. DOI: 10.1520/F2122-13
- [20] Chunga K., Ochoa-Cornejo F, Mulas M., Toulkeridis T., Menéndez E. Characterization of seismogenic crustal faults in the gulf of Guayaquil, Ecuador. Andean Geology, (2019) 46 (1): 66-81. DOI: <http://dx.doi.org/10.5027/andgeoV46n1-2991>
- [21] NEC-11. Norma Ecuatoriana de la Construcción, Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, MIDUVI, (2015) Quito.
- [22] Leonard, M. Earthquake fault scaling: Self consistent relating of rupture length width, average displacement, and moment release. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 100 (5A),(2010) 1971-1988.
- [23] Stirling, M.; Goded, T.; Berryman, K.; Litchfield, N. Selection of earthquake scaling relationships for seismic-hazard analysis. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 103 (6),(2013) 2993-3011. doi:10.1785/0120130052.
- [24] Wells, D.L.; Coppersmith, K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. Bulletin of the Seismological Society of America Vol. 84,(1994) 974-1002.
- [25] Wesnousky, S. Displacement and geometrical characteristics of earthquake surface ruptures: issues and implications for seismic-hazard analysis and the process of earthquake rupture. Bulletin of the Seismological Society of America Vol. 98, (4) (2008) 1609-1632. doi: 10.1785/0120070111
- [26] Fukushima, Y.; Tanaka, T.A New Attenuation Relation for Peak Horizontal Acceleration of Strong Earthquake Ground Motion in Japan. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 80 (4): (1990) 757-783.
- [27] Eguez, A.; Alvarado, A.; Yepes, H.; Machette, M.N.; Costa, C.H.; Dart, R.L.; Bradley, L.-A. Database and map of Quaternary faults and folds of Ecuador and its offshore regions. U.S. Geological Survey Open-File Report: (2003) 03-289.
- [28] Chunga K. Shallow crustal earthquakes and seismic zonation for Ecuador through the integration of geological, seismological and morphostructural data. University of Insubria. Ph.D. Thesis, (2010), 165. (Italian version).
- [29] Kainthola A. Singh P.K., Singh T.N. Stability investigation of road cut slope in basaltic rock-mass, Mahabaleshwar, India. Geoscience Frontiers. Vol. 6, (2015), <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2014.03.002>
- [30] Kilic, A. y Teymen, A. Determination of mechanical properties of rocks using simple Methods. Bull Eng Geol Environ Vol. 67, (2008)237-244.



UNIVERSIDAD
DEL ZULIA

REVISTA TECNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DEL ZULIA

Volumen Especial, 2020, No. 2, pp. 04 - 110 _____

*Esta revista fue editada en formato digital y publicada en Julio de 2020, por el **Fondo Editorial Serbiluz**, Universidad del Zulia. Maracaibo-Venezuela*

www.luz.edu.ve
www.serbi.luz.edu.ve
www.produccioncientifica.org