

Ciencia Nicolaita 86

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Análisis geotécnico de la estabilidad del talud “El Álamo”, ubicado en la antigua carretera de Mil Cumbres

Geotechnical analysis of the stability of the slope “El Álamo”, located on the old road of Mil Cumbres

Arreygue Rocha J.E.,* Ávila Ambriz G.H. y Hurtado Beltrán A.

Para citar este artículo: Arreygue Rocha J.E., Ávila Ambriz G.H. y Hurtado Beltrán A., 2022. Análisis geotécnico de la estabilidad del talud “El Álamo”, ubicado en la antigua carretera de Mil Cumbres. Ciencia Nicolaita no. 86, 122-135.

DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi86.678>

Historial del artículo:



Recibido: 18 de junio de 2022

Aceptado: 3 de noviembre de 2022

Publicado en línea: diciembre de 2022



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: eleazar.arreygue@umich.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>



Análisis geotécnico de la estabilidad del talud “El Álamo”, ubicado en la antigua carretera de Mil Cumbres

Geotechnical analysis of the stability of the slope “El Álamo”, located on the old road of Mil Cumbres

Arreygue Rocha J.E.,^{1*} Ávila Ambriz G.H.² y Hurtado Beltrán A.¹

¹Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Fac. Ingeniería Civil.

²Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Fac. Ingeniería Civil, Maestría en Infraestructura del Transporte

Resumen

La carretera de Mil Cumbres se construyó en los años 40 para conectar la Ciudad de México con Morelia. En la actualidad, se trata de un camino viejo con poco mantenimiento y conservación, lo que ha generado algunos eventos de inestabilidad de sus taludes con caída de bloques de diferentes tamaños, lo que provoca que en algunas ocasiones se dificulte transitar por esta carretera.

En este trabajo, se estudió el sitio que se ubica en el km 207, llevándose a cabo la caracterización geotécnica de los materiales del talud; asimismo, se aplicaron dos clasificaciones geomecánicas a través de los métodos de Bieniawski (1989) y Romana (1985). Además, se utilizó el software Dips de Rocscience®, el cual permitió realizar el análisis cinemático de los principales mecanismos de rotura del macizo rocoso.

Los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio fueron: para la roca andesítica la densidad fue de 2.37 g/cm³, absorción de 1.42 %, índice de durabilidad de 98.74 % y resistencia a la compresión de 129.38 MPa. Para la brecha, su densidad fue de 1.76 g/cm³, absorción de 17.07 %, índice de durabilidad de 4.83 % y resistencia a compresión de 4.47 MPa. De las clasificaciones geomecánicas, tanto para el RMR como para el SMR, la calidad de la roca resultó ser mala. De la aplicación del Dips se identificaron tres familias y una dispersa, además, el tipo de rotura que prevalece es el de cuña.

Palabras clave: geotecnia, talud, Mil Cumbres, Dips, número de familias

Abstract

The Mil Cumbres Highway was built in the 1940's to connect Mexico City with Morelia. Currently, it is an old road with little maintenance and conservation, which has generated some instability events on its slopes with falling blocks of different sizes, occasionally, it has been challenging to travel along this road. Specifically, the site under study is located at km 207.

In this study, a geotechnical characterization of the slope materials was undertaken. Likewise, two geomechanical classifications were applied through the Bieniawski (1989) and Romana (1985) methods. In addition, the Rocscience® Dips software was used, which allowed a kinematic analysis of the main rock mass failure mechanisms to be performed.

The results obtained from the laboratory tests revealed, for the andesitic rock, a density of 2.37 g/cm³, absorption of 1.42 %, durability index of 98.74 %, and compressive strength of 129.38 MPa. For the breccia, its density was 1.76 g/cm³, absorption of 17.07 %, durability index of 4.83 %, and compressive strength of 4.47 MPa. Based on the geomechanical classifications, both the RMR and the SMR, the rock quality was found to be poor. From the application of Dips software, three families and one disperse were identified, and the type of break that prevails is the wedge.

Keywords: geotechnics, slope, Mil Cumbres, Dips, number of families

1. Introducción

Los procesos de inestabilidad de taludes están relacionados a periodos excepcionales de precipitación y sismicidad. La acción constante de la gravedad y el debilitamiento de los materiales, debido a los procesos de meteorización, hacen que los movimientos de materiales en zonas con morfologías accidentadas sean inevitables. Por lo que, los lugares donde se localizan este tipo de movimientos son áreas de montaña, áreas de modificación antrópica como zonas mineras y cortes de taludes para obras civiles, entre otras.

La construcción de taludes es una tarea compleja que debe abordarse, usualmente, en zonas de laderas o de montañas como parte de la construcción de autopistas, carreteras o caminos vecinales, lo que genera beneficios sociales al permitir la comunicación entre las diferentes regiones del país. No obstante, en algunos casos, estos taludes presentan movimientos de tierra o caídas de fragmentos de roca que pueden provocar grandes pérdidas económicas y hasta de vidas humanas, debido a deficiencias significativas en el proyecto de la obra. Un aspecto importante en el proyecto de taludes, es conocer las propiedades y el comportamiento físico y mecánico de la roca, con el propósito de realizar un diseño mejor sustentado que, además, esté basado en criterios ingenieriles, ya sea para obras temporales o permanentes. Por lo anterior, se deben aplicar las herramientas necesarias para

diseñar, construir y ejecutar acciones que contribuyan a la prevención de cualquier tipo de accidentes, lo que favorecerá la seguridad y el bienestar de los usuarios que circularán por las carreteras, coadyuvando así, a una operación vehicular segura y eficiente.

El tramo de la carretera de Mil Cumbres conecta a Morelia con Ciudad Hidalgo; al ser una zona accidentada se tienen muchos cortes, por lo que se considera que la principal problemática es la inestabilidad de taludes, ya que tiene más de cuarenta años de operación. Se percibe que solo le dan mantenimiento a la carpeta asfáltica, más no a los taludes, razón por la cual constantemente se ven afectados por cualquier tipo de movimiento del terreno. En este sentido, el presente trabajo abordó un talud ubicado en esta carretera para realizar una caracterización geotécnica y buscar mecanismos que ayuden a disminuir estos procesos. En este ámbito, se han hecho algunos estudios geotécnicos en taludes y, en general, todos tienen la misma problemática; dichos estudios han realizado propuestas para su estabilización.

Como mencionamos, en el presente artículo se estudió un talud de 146 m de longitud y 24 m de altura que se localiza en la antigua carretera de Mil Cumbres (MEX-015). La elección de este sitio se debió a que en los últimos años las intensas lluvias han provocado algunos problemas de caídos de bloques con diámetro menor de un metro, cayendo la mayoría de ellos sobre

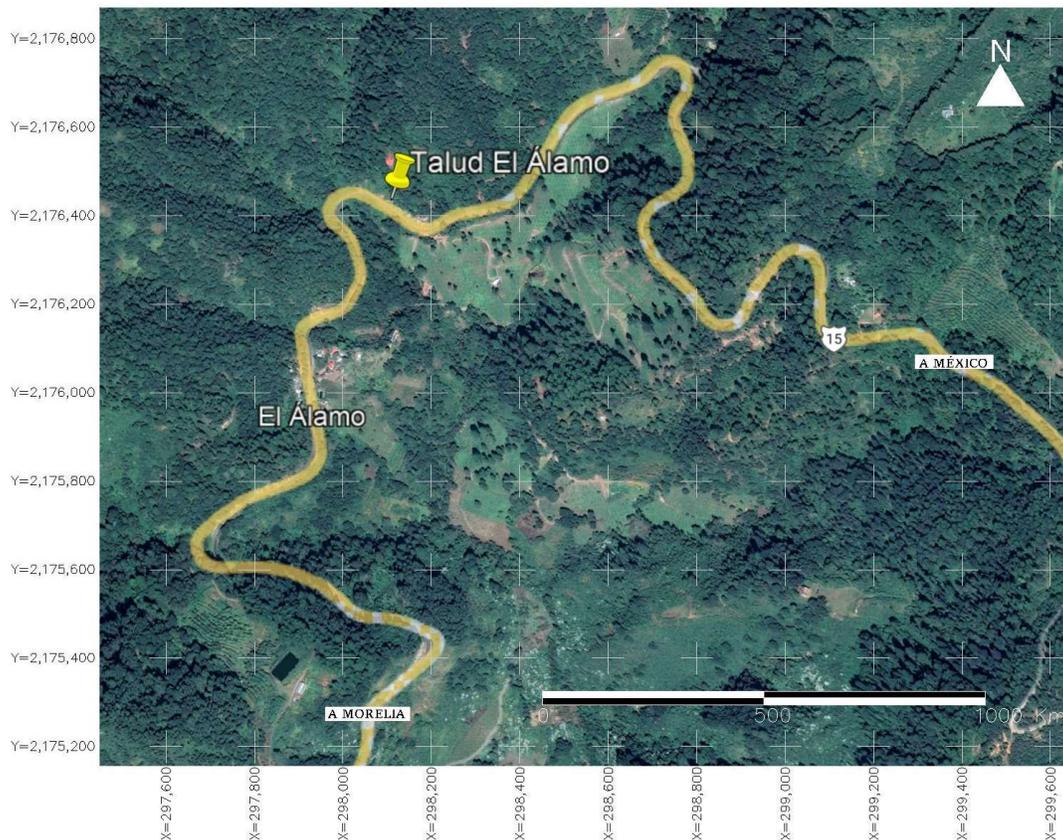


Figura 1. Ubicación del talud “El Álamo” (Google Earth, 2022). Se incluye la dirección a cada localidad, así como el sitio en estudio.

la carpeta asfáltica, cunetas o incluso han atravesado la carretera, quedando en la orilla del acantilado. Además, en el sitio de estudio se observaron antiguos deslizamientos de diferentes dimensiones, estos del tipo rotacional y de caída de bloques, por lo que se considera como una zona inestable. Para el estudio se realizó la caracterización geotécnica y se hicieron algunas recomendaciones para su estabilización.

2. Localización de la zona

El talud se encuentra en la antigua carretera México-Morelia (MEX-015), en el tramo Huajumbaro-Morelia, mejor conocido como carretera Mil Cumbres, ubicado adelante de la población “El Álamo” a 31 Km de la ciudad de Morelia con dirección a México (Figura 1). El sitio de estudio pertenece al municipio de Charo que se localiza al norte del estado de Michoacán, entre los paralelos 19°32' y 19°48' de latitud norte y los meridianos 100°54' y 101°07' de longitud oeste. Este se ubica en la zona sísmica “C”, de acuerdo con la regionalización sísmica de la Comisión Federal

de Electricidad (CFE), donde se registra una baja frecuencia de sismos o son zonas afectadas por altas aceleraciones que no exceden del 70 % de la aceleración del suelo (CFE, 2015). Conforme con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la zona no se encuentra en una falla o fractura geológica, existiendo estas solamente en los alrededores del talud (INEGI, 2000).

El área de trabajo se localiza en el Eje Neovolcánico y la Sierra Madre del Sur, su geología, acorde con el Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2009), está compuesta por rocas ígneas extrusivas: andesita-brecha volcánica intermedia (47.48 %), brecha volcánica intermedia (16.64 %), toba ácida (9.53 %), volcanoclásticas (4.78 %), dacita-toba ácida (4.78 %), andesita (3.67), toba intermedia-brecha volcánica (2.81 %), basalto (0.36 %) y dacita-brecha volcánica ácida (0.33 %). Asimismo, se observan rocas sedimentarias: arenisca-conglomerado (1.69 %), limonita-arenisca (1.42 %), conglomerado (1.16 %), material aluvial (4.33 %) y material lacustre (0.01 %).

En el Atlas Nacional de Riesgos realizado por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), se menciona que el talud se encontró próximo a los límites de la región potencial de deslizamientos de taludes naturales denominada Eje Neovolcánico (CENAPRED, 2014). Además de lo observado en campo, se puede mencionar que hay evidencias de movimientos superficiales de tierra en sitios próximos, incluso es evidente ver sobre la carpeta asfáltica algunos círculos de falla de pequeños deslizamientos (movimiento rotacional) que han estado reparando, pero algunos continúan con su movimiento, incrementando sus desniveles (del tipo escalonamiento). Otro aspecto que se aprecia, y que también es muy frecuente, son los constantes desprendimiento de bloques de diferentes tamaños (menor a un metro de diámetro) que caen directamente sobre la calzada del camino, en algunos casos llegan hasta el lado opuesto y cuando son de menor diámetro, se quedan sobre la cuneta. También se observan algunas zonas erosionadas, esto provocado por las intensas lluvias del lugar y que se catalogan como pequeños flujos de lodo o escombros.

3. Metodología

La metodología empleada se basó en tres fases: la primera se enfocó al trabajo de campo; la segunda a la realización de las pruebas de laboratorio para obtener las propiedades índice y mecánicas de la matriz rocosa; mientras que en la tercera se aplicaron las clasificaciones de Bieniawski y Romana, además de un análisis cinemático para el macizo rocoso. Al término, se analizaron los resultados y, basado en ellos, se hicieron propuestas de estabilización.

3.1. Trabajo de campo

El trabajo de campo consistió en observar el talud para identificar sus principales cambios litológicos, apreciando tres tipos de materiales: suelos, brecha volcánica y roca andesítica, además se midió para obtener su longitud y la altura promedio. Enseguida, se realizó un levantamiento de los principales planos de las discontinuidades utilizando una brújula de geólogo, asimismo, se utilizó el esclerómetro de Schmidt para medir la resistencia aparente de la roca en el lugar. Por último, se tomaron diferentes fragmentos de

roca, procurando recolectar sanas y alteradas, con el propósito de analizarlas en laboratorio a través de las pruebas de densidad, absorción, porosidad, índice de durabilidad y carga puntual. Se realizaron varias visitas al lugar para complementar la información sobre la caracterización de la matriz rocosa, la zonificación con base en criterios litológicos-estructurales y la descripción de las discontinuidades, entre otras.

3.2. Pruebas de laboratorio

En el laboratorio se hicieron las pruebas de densidad y absorción usando la norma ASTM C-127-04, para la porosidad fue la UNE-EN 993-1 y para el peso volumétrico seco en estado natural con la M-MMP-1-08/03 (SCT). En el caso de las propiedades mecánicas, se aplicó la prueba de carga puntual (ASTM D-5731-05), el ángulo de fricción (USBR 6258-09; Barton, 1976), e índice de durabilidad al desmoronamiento (ASTM D4644-04).

3.3. Clasificaciones geomecánicas

Con el objeto de establecer el grado de calidad del macizo rocoso del talud "El Álamo", se aplicó la clasificación geomecánica Rock Mass Rating (RMR), propuesta por Bieniawski (1989), la cual considera cinco factores: a) resistencia de la matriz rocosa; b) el RQD (Rock Quality Designation); c) el espaciado; d) las condiciones de las discontinuidades; y e) las condiciones hidrogeológicas.

El segundo método que se empleó fue el Slope Mass Rating (SMR) de Romana (1985). En este método, es importante considerar el valor del RMR (calculado anteriormente) para poder integrarlo a la fórmula. El autor considera cuatro factores, tres de ellos están basados en la orientación e inclinación de las discontinuidades del propio talud, mientras que el cuarto factor está enfocado al tipo de excavación aplicada al talud.

La aplicación de estos dos métodos permitió valorar el estado del talud, así como la calidad del macizo rocoso, lo que facilitó identificar propuestas de mecanismos para su reforzamiento o, en su caso, estabilización. En adición, se utilizó el software Dips® el cual permitió conocer el número de familias, así como realizar el análisis cinemático para conocer los tipos de rotura presentes en el talud.

4. Resultados

4.1. Geomorfología

El talud en estudio tiene una longitud de 146 m, altura promedio de 24 m, su dirección es de 302° e inclinación de 75°. El material que se observó está definido por tres tipos: roca andesítica, brecha volcánica y un estrato de suelo (en la parte baja), lo que se puede apreciar en la Figura 2. El talud se ubica sobre la Sierra de Mil Cumbres, un área de bosque de pino, encino y matorrales con topografía muy accidentada; la elevación del lugar en estudio es de 2 450 m aproximadamente. En la superficie del talud se aprecia una capa vegetal delgada y en algunos lugares las raíces de los árboles se encuentran entre algunas de las discontinuidades, lo que ha provocado que su abertura sea más grande de lo normal. Sobre el mismo talud también se observó mucha vegetación del tipo matorral. En algunos sitios de rocas se ven plantas y sus raíces están dentro de las discontinuidades, lo que también ha provocado que se abra y debilite el entorno y que ingrese materia fina.

La presencia del agua sobre la superficie del terreno es evidente, ya que se observa circulando entre los planos de las discontinuidades, en algunos casos se aprecia goteando, en otros sitios solo se ve húmedo, mientras que en otros se puede ver un pequeño hilo

de agua. En el caso de la brecha, se pueden identificar zonas alteradas y muy húmedas, incluso lugares donde ya hubo pequeños desprendimientos de material. Los suelos, no son la excepción, pues se ubican algunos sitios irregulares y saturados, lo que permite suponer que se han presentado algunos movimientos de suelo.

En la Figura 3 se aprecia una de las zonas donde se hizo el levantamiento del fracturamiento (en rojo se señalan algunos de los planos de discontinuidad que se consideraron). En la parte baja se aprecia el contacto con un estrato de brecha volcánica. También se puede ver cómo la vegetación está creciendo entre las mismas discontinuidades, las cuales tienen aberturas entre 1 a 5 mm, con rellenos de arcilla o de limos arenosos. Asimismo, se puede observar que en algunos lugares de la pared de roca hacen falta algunos fragmentos de diferentes dimensiones, mismos que posiblemente ya se desprendieron.

En la cuneta que está al pie del corte, se observó material que se desprende del talud (suelo, arenas y gravas) y en algunos casos fragmentos de roca de dimensiones pequeñas; no obstante, del otro lado del camino se pueden ver fragmentos de roca más grandes (en promedio de medio metro de diámetro). De la misma forma, se identificaron sitios sobre el camino



Figura 2. Vista longitudinal del talud "El Álamo". Se aprecia la roca apoyada en un estrato de suelo (a la derecha de la imagen y arriba) y la espesa cobertura vegetal.

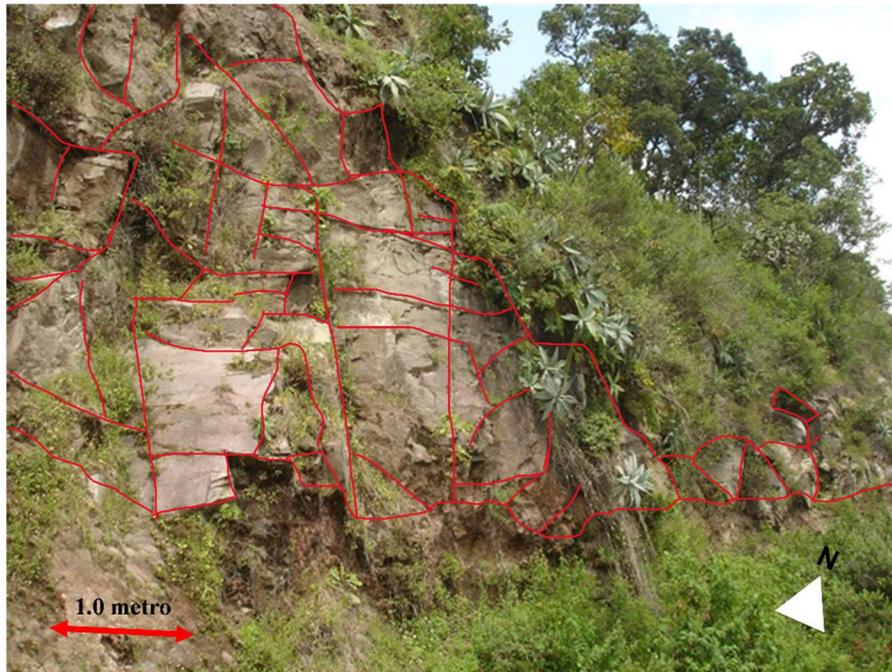


Figura 3. Macizo rocoso con sus planos de discontinuidad (en línea roja). En la parte baja está el contacto con la brecha volcánica y se aprecia la abundante cobertura vegetal.

que evidencian pequeños movimientos de la carpeta asfáltica (hundimientos), e incluso se aprecian los arreglos de mejoramiento de la carretera, así como de las guarniciones que se han movido o roto.

4.2. Trabajo de campo

En esta fase de campo y por facilidad, el talud se dividió en cuatro zonas para poder realizar el levantamiento de los planos de discontinuidad. De cada una de las zonas se obtuvieron los registros de: orientación, abertura, relleno y rugosidad. Las aberturas de las discontinuidades se midieron y son en promedio de 4 mm, con poco relleno proveniente de la capa vegetal y del deterioro de la misma roca. Sus rugosidades están en el rango de 6 a 8, tomando como referencia los perfiles de Barton y Chubey (1977). También se usó el esclerómetro de Schmitt para conocer la resistencia aparente del macizo rocoso, teniendo valores promedio de 110 MPa (las lecturas se tomaron en forma horizontal).

En la Tabla 1 se muestra el formato que se empleó para realizar el trabajo de campo; en la columna de persistencia se tienen dos nomenclaturas: la “r” que quiere decir discontinuidad contra otra roca y la “d” discontinuidad contra otra discontinuidad. En el

mismo formato se describe que la roca estaba decolorada u oxidada y con algo de humedad en su superficie. Algunos de estos valores se utilizaron para la aplicación de las clasificaciones geomecánicas y para el análisis cinemático.

4.3. Caracterización de la matriz rocosa

La caracterización de los materiales se hizo mediante ensayos de laboratorio, de acuerdo con las normas referidas en la metodología. La descripción del talud es la siguiente: en el extremo derecho superior e izquierdo superior, se apreció roca andesita de color rosa claro fragmentada y su rugosidad se valoró en baja. En la parte intermedia superior del talud se presenta brecha volcánica de composición andesítica de color café claro, altamente deteriorada.

En la Tabla 2 se muestra un resumen de los resultados de la caracterización geotécnica del talud, donde se aprecia el tipo de prueba, su valor promedio y se incluyen los valores de la desviación estándar para cada prueba (más adelante se describen). Algunos de estos valores se utilizaron en las clasificaciones de Bieniawski y Romana (que se presentan más adelante).



Tabla 1
Ficha que se utilizó para realizar el levantamiento de discontinuidades (elaboración propia).

Datos generales								Levantamiento							
No. Ficha:	Uno			Realizó:	GHAA - JEAR			Inmersión (°):	302°						
Localidad:	El Álamo			Fecha:	20-sep-14			Inclinación (°):	75°						
Lugar:	km 31 carretera Mil Cumbres			No. Foto:				Altura (m)	24,00						
Intersección			Orientación		Persistencia		Abertura	Rugosidad		Resistencia		Relleno	Filtración		
No.	x	tipo	alfa	beta	termin.	traza	A	tipo	JRC	esclerómetro	degrad.	tipo	tipo	gasto	
	(m)	1)	(°)	(°)	2)	(m)	(mm)	3)	1 a 20	Mpa	orient.	5)	6)	7)	l/min
1	0,55	discon	195	55	d	1,0	4	plana	7	113	horiz	decolor	arcilla	humedo	
2	0,90	discon	276	70	d	0,9	4	plana	7	113	horiz	decolor	arcilla	humedo	
3	1,40	discon	350	88	r	1,2	4	plana	7	113	horiz	decolor	arcilla	humedo	
4	1,95	discon	330	65	r	1,5	3	plana	7	113	horiz	decolor	arcilla	humedo	
5	2,35	discon	190	70	r	1,3	3	plana	7	113	horiz	decolor	arcilla	humedo	
6	2,75	discon	305	50	d	0,7	4	plana	7	125	horiz	decolor	arcilla	humedo	
7	3,20	discon	355	80	d	0,9	3	plana	7	125	horiz	decolor	arcilla	humedo	
8	3,60	discon	253	83	d	0,8	5	plana	7	125	horiz	decolor	arcilla	humedo	
9	4,20	discon	231	82	r	1,3	4	plana	7	125	horiz	decolor	arcilla	humedo	
10	4,95	discon	234	44	d	1,0	6	plana	7	125	horiz	decolor	arcilla	humedo	

4.3.1 Densidad, absorción y porosidad

La obtención de los valores de la densidad y de la absorción se hicieron conforme con lo estipulado por la norma ASTM C-127-04. El valor de la densidad para la andesita está entre 2.61 g/cm³ y 2.70 g/cm³, para la brecha su rango es de 1.95 g/cm³ a 2.04 g/cm³. De la misma forma se aplicó para la absorción y sus rangos fueron los siguientes: para la andesita de 1.12 % a 1.70 % y para la brecha de 16.56 % a 17.38 %.

Para la porosidad se aplicó la norma UNE-EN 993-1 y sus valores fueron: para la andesita se registraron entre 0.31 % y 0.47 %, en cuanto a la brecha quedaron entre 14.23 % y 16.046 %. De acuerdo con lo reportado, se observa que la porosidad de la andesita es muy baja, lo que hace que su densidad sea grande y tenga bajos niveles de absorción. En el caso de la brecha volcánica, su porosidad es muy alta, por lo que no sorprende que su densidad haya resultado baja y tenga una absorción alta.

Tabla 2
Resumen de los resultados de la caracterización geotécnica del talud, incluyendo su desviación estándar

Tipo de Prueba	Roca andesita		Brecha volcánica	
	Promedio	Desvest	Promedio	Desvest
Densidad (g/cm ³)	2.65	± 0.0636	1.98	± 0.0636
Absorción (%)	1.42	± 0.4101	17.07	± 0.5798
Porosidad (%)	0.40	± 0.1131	15.15	± 1.2799
Peso volumétrico seco (g/cm ³)	2.37	± 0.3677	1.76	± 0.1344
Durabilidad (%)	98.74	± 0.4313	4.82	± 0.2192
Resistencia a compresión (Mpa)	129.37	± 69.6854	4.47	± 1.8668
Ángulo de fricción básico (°)	43.00	± 4.9497	45.00	± 4.9497

4.3.2 Peso volumétrico seco en estado natural

La obtención del peso volumétrico seco en estado natural, se hizo por el método de la parafina, siguiendo el procedimiento de la norma SCT M-MMP-1-08/03. Los resultados fueron los siguientes: para la andesita entre 2.09 g/cm³ y 2.61 g/cm³, en cambio para la brecha, se registraron entre 1.69 g/cm³ y 1.88 g/cm³.

4.3.3 Prueba del índice de durabilidad

El índice de durabilidad se determinó mediante el ensayo de sequedad-humedad-desmoronamiento, acorde con la norma ASTM D4644-04. Para este estudio, se efectuaron cinco ciclos por tipo de material (andesitas y brechas). Los resultados registrados para la andesita fueron entre el 98.42 % y 99.03 %, lo que refiere a un índice de durabilidad alto, en cambio para la brecha fue entre 4.71 % y 5.02 %, indicándose como un índice de durabilidad muy bajo. En la Figura 4 se presenta el promedio del índice para cada tipo de material, lo que demuestra la dureza de la andesita y lo suave que es la brecha volcánica, principalmente en los últimos ciclos.

4.3.4 Ángulo de fricción básico

La prueba se aplicó de acuerdo con lo descrito en la norma USBR 6258-09. Para este estudio se analizaron 10 especímenes de cada zona y para cada material, considerando diferentes posiciones para obtener mejores resultados. Los valores obtenidos se registraron entre 40° y 47° para la andesita y para la brecha fue de 38° a 45°.

4.3.5 Carga puntual

Para la resistencia a la compresión uniaxial se tomaron muestras a lo largo del talud, siendo 22 especímenes de roca andesítica e igual número de muestras para la brecha volcánica. Una vez obtenidos los especímenes, se determinaron sus dimensiones y se procedió a ensayarlos, acorde con la norma ASTM D5731-05. Cada espécimen se llevó a la falla y se registró la carga máxima soportada, determinándose su resistencia a compresión uniaxial. La andesita presentó resistencias entre 86.46 MPa y 185.01 MPa, en cambio la brecha volcánica fue en el rango de 3.51 y 6.15 MPa. Con ello, se demuestra que la andesita es un material muy duro, mientras que la brecha volcánica es sumamente blanda y capaz de romperse incluso con un golpe del martillo de geólogo.

5. Clasificaciones geomecánicas

Las clasificaciones geomecánicas son métodos de uso generalizado que se han convertido en una herramienta habitual para el reconocimiento de los macizos rocosos en los que se van a proyectar y construir obras de ingeniería, como lo son taludes, túneles y obras subterráneas. Estas clasificaciones permiten evaluar el comportamiento geomecánico de los macizos rocosos para estimar sus parámetros geotécnicos de diseño y en caso necesario, implementar mecanismos de sostenimiento como, anclajes, concreto lanzado, mallas, marcos metálicos para túneles y obras subterráneas, lo que contribuye a determinar el índice de calidad del macizo rocoso.

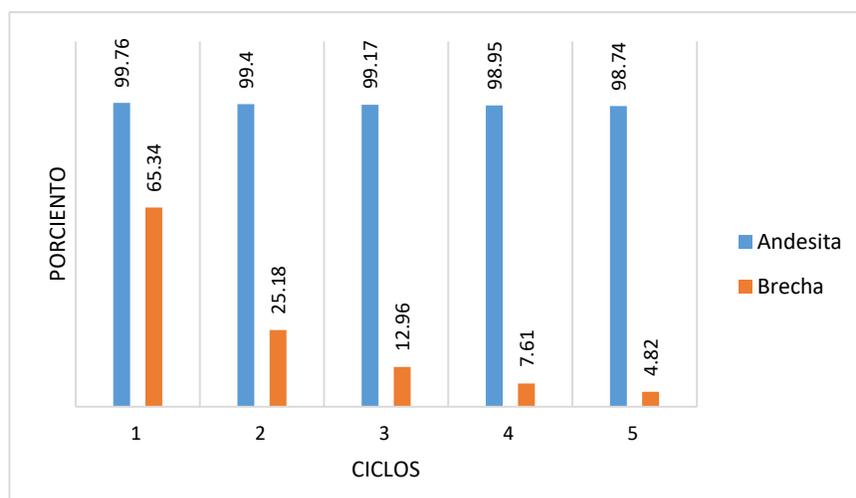


Figura 4. Valores en por ciento del índice de durabilidad para los cinco ciclos. Se aprecia que la andesita tiene una mayor dureza en comparación con la brecha que, después del segundo ciclo, disminuye considerablemente.

El empleo de las clasificaciones geomecánicas tiene como propósito obtener las características geotécnicas del macizo rocoso, lo que permite estimar la calidad y sus parámetros de resistencia, cohesión y ángulo de fricción. Asimismo, se debe considerar el número de familias de discontinuidades, orientación, echado o buzamiento, espaciado, persistencia, rugosidad y su comportamiento hidrogeológico, los cuales proporcionan ciertas propiedades mecánicas del sitio en estudio y que son básicas para estimar el tipo de técnica de excavación en taludes y túneles, así como el tipo de sostenimiento a utilizar.

5.1. Rock Quality Designation (RQD)

La calidad del macizo rocoso es un parámetro necesario que se emplea para realizar la clasificación por el método RMR. El índice de calidad de la roca o Rock Quality Designation (RQD), es un parámetro geomecánico establecido por Deere (1989) que define la correlación existente entre el RQD y la frecuencia del fracturamiento lineal. El RQD se calculó a través de la Ecuación (1).

$$RQD = 100e^{(-0.1\lambda)} (0.1\lambda + 1) \quad (1)$$

donde λ : Número de discontinuidades/longitud de la línea de muestreo.

Para el cálculo del RQD del talud en cuestión, se aplicó la Ecuación 1, considerando un muestreo a lo largo del sitio, dentro del cual se consideró el número de planos de las discontinuidades presentes en las cuatro zonas en las que se dividió el talud, obteniendo que para la zona 1, se tomaron 14 discontinuidades correspondientes a un RQD de 62.70 %; en la zona 2, se obtuvieron 17 discontinuidades equivalente a un RQD de 73.60 %; en la zona 3, se obtuvieron 10 discontinuidades que sería un RQD de 59.20 %; y finalmente, en la zona 4, se obtuvieron 19 discontinuidades correspondientes a un RQD de 73.60 %.

5.2. Parámetros JCS, JRC, ϕ_r y ϕ_b .

La resistencia de la pared de una discontinuidad influye en su resistencia al corte y en su deformación; esto depende del tipo de matriz rocosa, del grado de alteración y de la existencia de relleno. En discontinuidades sanas y limpias, la resistencia sería la misma de

la matriz rocosa, pero generalmente la resistencia es menor debido a la meteorización de las paredes.

El criterio de Barton y Chubey (1977) permitió conocer la resistencia de las discontinuidades en un macizo rocoso. Se trata de un criterio empírico, deducido a partir del análisis del comportamiento de las discontinuidades en ensayos de laboratorio, con el que se logró estimar la resistencia al corte en discontinuidades rugosas a través de la Ecuación (2), su resultado se presenta en la Tabla 3:

$$\tau = \sigma'_n \tan [JRC * \log_{10} (JCS/\sigma'_n) + \phi_r] \quad (2)$$

donde:

τ y σ'_n : esfuerzos tangencial y normal efectivo sobre el plano de discontinuidad.

ϕ_r : ángulo de fricción residual.

JRC: coeficiente de rugosidad de la discontinuidad (Joint Roughness Coefficient).

JCS: resistencia a la compresión de las paredes de la discontinuidad (Joint wall Compresión Strength).

Para determinar el ángulo de fricción residual se consideró que, generalmente, la pared de la discontinuidad estaba alterada, por lo que el ángulo de fricción residual será inferior al ángulo de la roca sana ϕ_b . Para su evaluación se aplicó la Ecuación (3):

$$\phi_r = (\phi_b - 20^\circ) + 20 (r/R) \quad (3)$$

donde:

R: valor del rebote del esclerómetro o martillo Schmidt sobre una superficie de material sano y seco;

(r): valor del rebote del esclerómetro sobre la superficie de la pared de la junta en estado natural, húmedo o seco;

ϕ_b : ángulo de resistencia básico de la roca. Si las paredes de la discontinuidad están sanas, $\phi_r = \phi_b$.

Con los valores mostrados en la Tabla 3 y aplicando la ecuación 3, se obtuvo el ángulo de fricción que es requerido para el análisis cinemático de cada zona. Para esto se trazó una envolvente de falla no lineal que es usada para definir una línea de tendencia con la cual se determinó el ángulo de fricción residual, el cual está entre 24.50° y 36.10°.

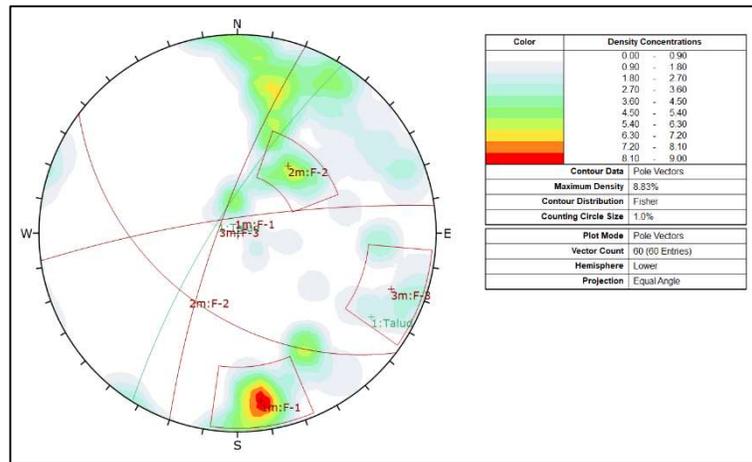


Figura 5. Aplicación de la proyección estereográfica a las discontinuidades del talud. Las líneas indican los planos de falla, además, se integra la dirección del talud.

Para la determinación de la resistencia a compresión simple (JCS) en las paredes de las discontinuidades, se utilizó el peso volumétrico de la roca y la lectura del esclerómetro en la roca alterada (r). Aplicando la Ecuación 4 se determinó el parámetro JCS. Los valores que se obtuvieron oscilan en 56.86 y 60.10 MPa.

$$\log_{10} JCS = 0.00088 * \gamma_{roca} * r + 1.01 \quad (4)$$

Para la determinación del coeficiente de rugosidad de las discontinuidades (JRC) se empleó el peine de Barton, cuya clasificación está en función de los perfiles de rugosidad que varían entre 1 y 20 (Barton y Chubey, 1977). Con ello, se obtuvo el parámetro JRC para cada zona, resultando que fue de 7. En la Tabla 3 se muestra el promedio de los parámetros obtenidos.

Tabla 3

Parámetros de resistencia aparente de los planos de las discontinuidades según el criterio de Barton y Chubey (1977).

Parámetro	Resultado
τ (MPa)	70.32
JCS (MPa)	44.66
JRC	7.00
ϕ_r (°)	31.77

5.3. Análisis cinemático con el Software DIPS

El análisis cinemático está regido por los diferentes tipos de rotura que condicionan el fracturamiento del macizo rocoso, basado en la orientación y la distribución de cada uno de los planos de las discontinuidades

del talud, lo que definió el tipo de rotura de acuerdo con los parámetros de resistencia y de la matriz rocosa. Para este caso, se usó el software Dips de Rocscience®, el cual permitió trabajar con una proyección estereográfica, donde se ingresaron el buzamiento y la dirección de buzamiento de cada discontinuidad del talud.

Para este estudio se consideraron 60 discontinuidades, en la Figura 5 se muestra el resultado del análisis empleando polos y el comando de contornos, lo que da como resultado tres familias más una dispersa que están indicadas con las formas de trapecio, las líneas representan los planos de falla, además, en la leyenda se presenta la densidad de los polos que está representado en colores.

Para conocer los tipos de rotura presentes en el talud, se empleó el mismo programa y con la misma información, por lo que se analizaron tres casos de fracturamiento, estos fueron: planar, cuña y vuelco. En la Figura 6 se muestran los resultados del estudio: en la imagen A se tiene una falla plana, donde se indica que hay dos casos de este tipo; la imagen B corresponde a una falla de cuña, presentándose más de 15 casos; y en la imagen C se representa una falla por vuelco donde se tienen cinco desprendimientos. Estos tres mecanismos de rotura serán empleados en la clasificación SMR de Romana (1985).

5.4. Rock Mass Rating (RMR)

El Rock Mass Rating es un sistema de clasificación de macizos rocosos que permite relacionar índices de calidad con parámetros geotécnicos del macizo ro-

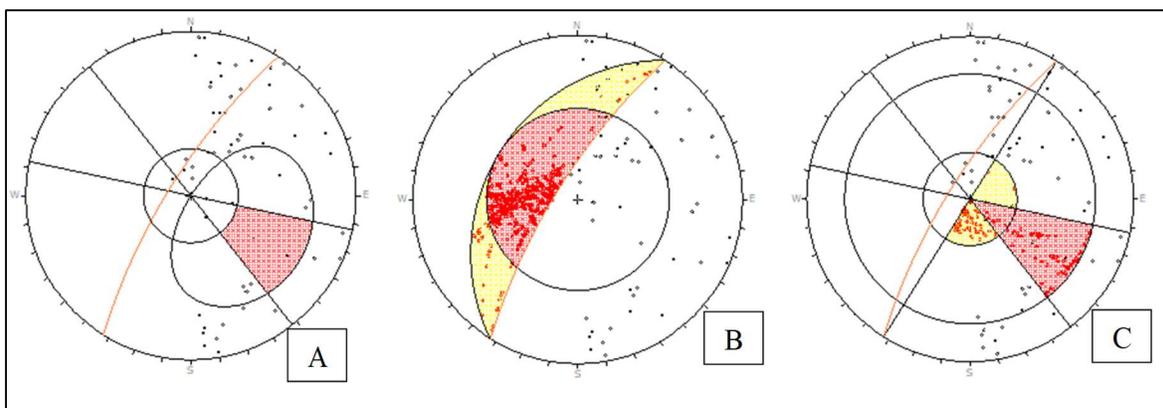


Figura 6. Resultados del fracturamiento del macizo rocoso de acuerdo con los tipos de rotura: A) plana, B) cuña y C) vuelco. Los puntos indican los polos de los planos de discontinuidad.

coso en excavaciones y túneles, lo que permite obtener mecanismos para la estabilización de taludes. La incidencia de sus parámetros en el comportamiento geomecánico de un macizo se expresa por medio del índice de calidad del RMR que varía de 0 a 100.

Para la aplicación de esta clasificación, se dividió el talud en zonas con características geológicas uniformes conforme con lo observado en campo y considerando sus propiedades de la matriz rocosa y de las discontinuidades, por lo que se consideraron cuatro zonas y, de acuerdo con los aspectos mencionados en la metodología y que ya se habían levantado en campo, se procedió a realizar la clasificación geomecánica aplicando la propuesta de Bieniawski (1989). En la Tabla 4 se muestran los resultados para cada zona, apreciándose que, en general, todas las zonas están muy próximas entre ellas, a excepción de la Z-2 que tiene un valor más bajo.

Tabla 4

Valoración del RMR de las cuatro zonas del estudio.

Zona	Z-1	Z-2	Z-3	Z-4
Puntaje	38	33	38	37

El promedio del puntaje fue de 36.5, lo que corresponde a una valoración en el rango de 21 a 40 (conforme con la tabla propuesta por el autor), esto se refiere a que el macizo rocoso tiene una clase IV. Además, el mismo autor proporciona información complementaria para el tipo de roca, como lo es el ángulo de fricción que está entre 15° y 25°, y una cohesión de 1 a 2 Kp/cm². Conforme con lo obtenido de la clasificación, el talud requiere mantenimiento a través de

mecanismos de estabilización tales como anclas, concreto lanzado, malla doble torsión, entre otros.

5.5. Slope Mass Rating (SMR)

La aplicación de las clasificaciones geomecánicas a los taludes permite evaluar empíricamente la estabilidad de una excavación. A partir de la clasificación RMR de Bieniawski (1989), Romana (1997) propuso la clasificación Slope Mass Rating (SMR) aplicada a taludes, considerando que la rotura de un talud rocoso puede ocurrir como consecuencia de su estructura y la litología de la roca. En la mayoría de los casos, la rotura de la masa rocosa está gobernada por los planos de discontinuidad que producen superficies formadas por uno o varios planos de discontinuidades.

Para emplear este método, primero se realizó el análisis cinemático del macizo rocoso para determinar los mecanismos de rotura a través del software Dips (mencionado en el apartado 5.3 de este mismo trabajo), ya que el SMR hace una corrección de los factores basados en estos mecanismos de rotura.

De acuerdo con los resultados, se menciona que todo el talud tiene la misma clase de roca y que corresponde a un tipo III, valorada como roca normal y que se considera el talud parcialmente estable, pero con algunas posibles roturas de cuña, por lo que se sugiere que se empleen algunos mecanismos sistemáticos y un tratamiento ocasional para estabilizarlo. Esta clasificación SMR se considera más realista, ya que toma en cuenta los movimientos de rotura que pueden presentarse en el macizo rocoso.

La Tabla 5 muestra una comparación de los resultados de los dos métodos de clasificación para macizos rocosos, RMR y SMR. En ella se aprecia el valor y

Tabla 5

Comparación de resultados entre la clasificación RMR y SMR del macizo rocoso, donde se indican las clases y sus puntajes. Están referidos a las propuestas de cada autor.

Zona	Bienawski		Romana	
	RMR	Clase	SMR	Clase
1	38	IV	50	III
2	33	IV	58	III
3	38	IV	63	III
4	37	IV	51	III

la clase asignada a cada zona de estudio, es decir, para el RMR se tiene una clase IV que corresponde a un macizo rocoso de mala calidad, en cambio, el SMR presenta una clase III, siendo un macizo rocoso normal. No obstante, en la aplicación de los dos métodos se sugiere que se coloquen mecanismos de sostenimiento para garantizar la estabilidad del talud.

6. Conclusiones

El talud “El Álamo”, con una longitud de 146 m y una altura promedio de 24 m, está compuesto principalmente por dos estratos: uno de roca andesita y el otro de brecha volcánica. En este estudio, se hizo la caracterización del material para cada estrato, dando los siguientes resultados: la roca andesita tiene densidad de 2.65 g/cm³, absorción de 1.42 %, porosidad de 0.40 %, peso volumétrico seco de 2.37 g/cm³, índice de durabilidad de 98.74 %, resistencia a compresión de 129.37 MPa y un ángulo de fricción básico de 43°. En cambio, para la brecha volcánica, los resultados fueron: densidad de 1.98 g/cm³, absorción de 17.07 %, porosidad de 15.15 %, peso volumétrico seco de 1.76 g/cm³, índice de durabilidad de 4.82 %, resistencia de 4.47 MPa y ángulo de fricción básico de 45°. Es importante mencionar que todas las pruebas fueron realizadas según lo establecido en la norma correspondiente.

Con la aplicación de las clasificaciones geomecánicas se obtuvo que para el talud el RMR de Bieniawski (1989), le otorga una calidad de la roca clase IV que indica roca de mala calidad, ángulo de fricción que está entre 15° y 25°, y una cohesión de 1 a 2 Kp/cm². En cambio, el SMR de Romana (1997), le otorga una clase III que corresponde a un talud normal y parcialmente inestable, además se recomienda un tratamiento sistemático.

Los resultados del análisis cinemático permitieron identificar tres familias más una dispersa, así como dos roturas planas, 15 roturas de cuña y cinco roturas por vuelco, por lo que el principal mecanismo será la rotura de cuña.

De acuerdo con los resultados de todo el estudio, se propone considerar para su estabilización el empleo de anclajes en las roturas planares, de cuña y de vuelco, con el propósito de evitar los caídos de bloques. De manera complementaria, también se propone colocar malla de doble torsión y concreto lanzado con colocación de drenes; asimismo, un muro de contención de gaviones, lo que ayudará a detener los fragmentos más pequeños para así impedir que alcancen el arroyo vial de la carretera.

Bibliografía

- American Society for Testing and Materials, C 127-04 Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate, ASTM C127 Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate -- eLearning Course, [consultado el 05 de octubre de 2022].
- American Society for Testing and Materials, D4644-04 Standard Test Method for Slake Durability of Shales and Similar Weak Rocks, ASTM D4644-04 - ASTM International - Standard Test Method for Slake Durability of Shales and Similar Weak Rocks Datasheet | Engineering360 (globalspec.com), [consultado el 05 de octubre de 2022].
- American Society for Testing and Materials, D5731-05 Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock, Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock (astm.org), [consultado el 05 de octubre de 2022].



- Barton N.R. and Choubey V., 1977, The shear strength of rock joints in theory and practice: *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 10, 1-54, (PDF) The shear strength of rock joints in theory and practice (researchgate.net), [consultado el 05 de octubre de 2022].
- Barton, N.R., 1976, The shear strength of rock and rock joints: *International Journal of rock mechanics and mining sciences & Geomechanics abstracts*, 13, 255-279, The shear strength of rock and rock joints - ScienceDirect, [consultado el 05 de octubre de 2022].
- Bieniawski, Z.T., 1989, Engineering rock mass classifications. A complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering: *John Wiley & Sons, Inc.* ISBN: 0-471-60172-1. Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and ... - Z. T. Bieniawski - Google Libros, [consultado el 05 de octubre de 2022].
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), 2014, "Monitoreo de laderas con fines de evaluación y alertamiento", Informe Técnico "Monitoreo de Laderas con Fines de Evaluación y Alertamiento" | Centro Nacional de Prevención de Desastres | Gobierno | gob.mx (www.gob.mx), [consultado el 05 de octubre de 2022].
- Comisión Federal de Electricidad (CFE), 2015, "Manual de diseño de obras civiles; Diseño por sismo, Recomendaciones", Manual de Diseño de Obras Civiles—Diseño por Sismo, notable logro de la ingeniería de México | Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias | Gobierno | gob.mx (www.gob.mx), [consultado el 05 de octubre de 2022].
- Deere, D.U. and Deere, D.W., 1989, Rock quality designation (RQD) after twenty years. Contract Report GL-89-1. US Army Corps of Engineers: *Department of Commerce National Technical Information Service Springfield*, Deere, D.U. and Deere, D.W. (1989) Rock Quality Designation (RQD) after Twenty Years Contract Report GL-89-1. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg. - References - Scientific Research Publishing (scirp.org), [consultado el 05 de octubre de 2022].
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2000, "Carta de Tzitzio E14-A24", 702825649678.pdf (inegi.org.mx), [consultado el 05 de octubre de 2022].
- Normalización Española UNE-EN-993-1:2018, "Método de ensayo para determinar la densidad aparente, la porosidad abierta y de la porosidad total", UNE-EN 993-1:2018 (Ratificada) Métodos de ensayo para producto..., [consultado el 05 de octubre de 2022].
- Rocscience Inc, 2014, "Dips v8.0 – Graphical and Statistical Analysis of Orientation Data", Dips - Graphical and Statistical Analysis of Orientation Data Software (cesdb.com), [consultado el 05 de octubre de 2022].
- Romana M., 1997, El papel de las clasificaciones geomecánicas en el estudio de la estabilidad de taludes: *IV Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables, Granada*, III, pp. 955-1011, (PDF) La clasificación geomecánica SMR: aplicación experiencias y validación (researchgate.net), [consultado el 05 de octubre de 2022].
- Romana, M., 1985, New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes: *International Symposium on the Role of Rock Mechanics, International Society for Rock Mechanics*, pp. 49-53, Romana, M. (1985) New Adjustment Ratings for Application of Bieniawski Classification to Slopes. Proceedings of International Symposium on the Role of Rock Mechanics, International Society for Rock Mechanics, Salzburg, 49-53 - References - Scientific Research Publishing (scirp.org), [consultado el 05 de octubre de 2022].
- Secretaría de Transporte y Comunicaciones (SCT), M-MMP-1-08/03, "Método de muestreo y prueba de materiales, masas volumétricas y coeficientes de variación volumétrica", Microsoft Word - M-MMP-1-08-03.doc (imt.mx), [consultado el 05 de octubre de 2022].
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2009, "Carta geológica de Tzitzio E14-A24", TZITZIO E14-A24 (sgm.gob.mx), [consultado el 05 de octubre de 2022].
- USBR 6258-09, "Procedure for Determining the Angle of Basic Friction Using a Tilting Table Test", Microsoft Word - 6258_formatted.docm (usbr.gov), [consultado el 05 de octubre de 2022].