

UNIVERSIDAD DE CUENCA



FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

**EVALUACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO
ROCO EN LA CANTERA DE MATERIALES
DE CONSTRUCCIÓN “LAS VICTORIAS”**

AUTORES:

VLADIMIR ERNESTO GUAMÁN GARCÍA
FRANCISCO ANTONIO MENDIETA GIRÓN

TESINA QUE PRESENTAN:

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

TUTOR:

ING. ROBERTO CIPRIANO BLANCO TORRENS, PhD

CUENCA – ECUADOR

OCTUBRE DE 2013



RESUMEN

Este estudio investiga las propiedades geomecánicas y la calidad del macizo rocoso en la cantera Las victorias sector El Descanso, cuyos resultados permiten obtener una visión realista del estado actual del macizo rocoso. Consiste en emplear una metodología de investigación que consta de trabajos analíticos y experimentales. Para su elaboración se realizaron investigaciones de campo, ensayos de laboratorio, procesamiento y análisis de los parámetros geomecánicos.

Basados en el estudio de los sistemas de clasificación geomecánica: Rock Quality Designation (RQD), Rock Mass Rating (RMR), sistema Q, Slope Mass Rating (SMR) y Geological Strength Index (GSI) se determinó la calidad del macizo rocoso. La calidad del macizo rocoso está controlado por variables litológicas, esfuerzos in situ, meteorización, resistencia a la compresión uniaxial y las múltiples familias de discontinuidades. El RMR clasifica al macizo rocoso como Bueno, el SMR clasifica al macizo rocoso de Malo y Bueno, mientras el sistema Q clasifica la calidad del macizo como Mala. El criterio de falla de Mohr-Coulomb fue aplicado para estimar la resistencia del macizo rocoso en la cantera Las Victorias y determinar el máximo esfuerzo de corte, los parámetros de resistencia como cohesión y ángulo de fricción.

Palabras Claves: Clasificación macizos rocosos, Clasificaciones geomecánicas, Sistema SMR, Sistema RMR, Sistema GSI, RQD, Índice Q, Proyecciones estereográficas, Criterios de falla, Mohr-Coulomb.



ABSTRACT

This study investigates the geomechanical properties and rock mass quality at Las Victorias quarry, the results allow to obtain a realistic view of the current state of the rock mass. It consists in employ a research methodology comprising analytical and experimental work, for processing was performed field investigations, laboratory testing, processing and analysis of geomechanical parameters.

Based on the study of geomechanical classification systems: Rock Quality Designation (RQD), Rock Mass Rating (RMR), Q-system, Slope Mass Rating (SMR) and Geological Strength Index (GSI) was determined rock mass quality. Rock mass quality is controlled by variable lithology, in situ strength, weathering, uniaxial compressive strength, and the multiple families of discontinuity. The RMR system classifies the rock mass into Good, the SMR system classifies the rock mass into Bad and Good, while the Q system classifies the rock quality into Bad. The Mohr-Coulomb failure criterion was applied to estimate the strength of the rock mass at Las Victorias quarry and determine maximum shear stress, strength parameters cohesion and friction angle.

Keywords: Rock mass classification, Geomechanical classification, SMR system, RMR system, GSI system, RQD, Q system, Stereographic projection, Failure Criterion, Mohr-Coulomb.



ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	4
ÍNDICE DE TABLAS	10
ÍNDICE DE FIGURAS	11
INTRODUCCIÓN	16
CAPÍTULO I. ESTADO DEL ARTE	20
1.1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	20
1.2. ESTADO ACTUAL DE LA TEMÁTICA EN EL MUNDO.	30
1.3. ESTADO ACTUAL DE LA TEMÁTICA EN EL ECUADOR.	34
CAPÍTULO II. SITUACIÓN ACTUAL DE LA CANTERA “LAS VICTORIAS”	36
2.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA Y VÍAS DE ACCESO	36
2.2. GEOLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA	38
2.3. ACTUALIDAD MINERA	44
CAPÍTULO III. CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA	46
3.1. DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS DE EVALUACIÓN GEOMECÁNICA REALIZADOS EN LA CANTERA “LAS VICTORIAS”	46
3.2. EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS MECÁNICO-ESTRUCTURALES DEL MACIZO ROCOSO	51
3.3. IDENTIFICACIÓN DE LAS PRINCIPALES FORMAS DE PÉRDIDA DE ESTABILIDAD	54
3.4. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA ROCA QUE CONFORMA EL MACIZO ROCOSO	57



3.5. CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO	62
3.6. ESTIMACIÓN DEL COMPORTAMIENTO GEOMECÁNICO DEL MACIZO ROCOSO	74
CONCLUSIONES	78
RECOMENDACIONES	79
ANEXOS	80
A. Tablas de las clasificaciones geomecánicas	81
B. Ensayos de Laboratorio	89
BIBLIOGRAFÍA	92



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, **Vladimir Ernesto Guamán García**, autor de la tesis "EVALUACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO EN LA CANTERA DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN "LAS VICTORIAS"", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 03 de septiembre de 2013

Vladimir Ernesto Guamán García
C.I: 0104080874

Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316
e-mail cdjbv@ucuenca.edu.ec casilla No. 1103
Cuenca - Ecuador



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, **Francisco Antonio Mendieta Girón**, autor de la tesis "EVALUACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO EN LA CANTERA DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN "LAS VICTORIAS"", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 03 de septiembre de 2013

Francisco Antonio Mendieta Girón

C.I: 0104254743



UNIVERSIDAD DE CUENCA
Fundada en 1867

Yo, **Vladimir Ernesto Guamán García**, autor de la tesis "EVALUACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO EN LA CANTERA DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN "LAS VICTORIAS"", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 3 de septiembre de 2013



Vladimir Ernesto Guamán García
C.I. 0104080874

Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316
e-mail cdjbv@ucuenca.edu.ec casilla No. 1103
Cuenca - Ecuador



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, **Francisco Antonio Mendieta Girón**, autor de la tesis "EVALUACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO EN LA CANTERA DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN "LAS VICTORIAS"", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 3 de septiembre de 2013

Francisco Antonio Mendieta Girón

C.I: 0104254743



ÍNDICE DE TABLAS

1.1. Clasificación de Rocas Meteorizadas (Modificado de Waltham,1994).	25
1.2. Métodos de clasificación de macizos rocosos	26
1.3. Clasificación de las rocas índice “RQD”	28
1.4. Rango de variación de los parámetros	29
2.1. Ubicación geográfica	36
3.1. Información recopilada en campo (Morocho et al., 2010)	47
3.2. Estimación del RQD mediante la ecuación de Palmstrom (Morocho et al., 2010)	47
3.3. Valoración RMR de Bieniawski (1989) (Morocho et al., 2010)	48
3.4. Valoración SMR de Romana (Morocho et al., 2010)	50
3.5. Familias de discontinuidades presentes en el macizo rocoso de la cantera “Las Victorias”. (Merchán y Sánchez,. 2013)	51
3.6. Resultados de los ensayos a compresión simple en las muestras . .	58
3.7. Resultados de los ensayos a tracción en las muestras	61
3.8. Características de las discontinuidades del macizo rocoso	64
3.9. Valoración total del macizo rocoso	65
3.10. Índice “SMR” macizo rocoso de la cantera “Las Victorias”	67
3.11. Parámetros y estimación del comportamiento geomecánico	76



ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Trabazón en las rocas. Fuente: http://enciclopedia.us.es	22
1.2. Estratificación en las rocas. Fuente: http://www.geoturismo.es	23
1.3. Estructuras secundarias, Fuente: Engineering Rock Mechanics: An Introduction to the Principles. John A Hudson	23
2.1. Ubicación regional y local	37
2.2. Acceso a la cantera “Las Victorias” (Google Earth, 2013).	38
2.3. Mapa geológico de la cantera “Las Victorias” (IGM, NV-E AZOGUES HOJA 73)	40
2.4. Leyenda y símbolos geológicos (IGM, NV-E AZOGUES HOJA 73)	41
2.5. Formaciones geológicas de la cantera “Las Victorias”	42
3.1. Rugosidad, espaciamiento y alteración en las discontinuidades del macizo rocoso de la cantera “Las Victorias”	52
3.2. Familia de discontinuidades (dos y tres) del macizo rocoso de la cantera “Las Victorias”	53
3.3. Proyección estereográfica. (Merchán y Sánchez, 2013)	54
3.4. Línea de intersección de los planos A y B (Hoek y Bray, 1974).	55
3.5. Análisis cinemático o Test de Markland (1976)	56
3.6. Desprendimientos de roca en la cantera	57
3.7. Ensayos de compresión simple realizados en el laboratorio	59
3.8. Ensayo de tracción	60
3.9. Estimación del GSI, basado en observaciones de campo (Hoek et al., 2002)	72



3.10. Representación de la envolvente de Mohr-Coulomb en el espacio de tensiones normal y tangencial. Fuente: Geomecánica aplicada a la pequeña minería, Córdoba-Argentina, 2005.	75
3.11. Estimación del comportamiento geomecánico	76



AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer: a Dios por ser nuestro guía y protector en el camino recorrido. A nuestras FAMILIAS, por su constante apoyo y amor, por ser el pilar fundamental para alcanzar nuestro objetivo.

A la Universidad de Cuenca y nuestra querida Facultad de Ingeniería Civil, por habernos permitido alcanzar una meta y ser profesionales con éxito.

Y un agradecimiento especial al Ing. Roberto Blanco Torrens, PhD y la Ing. Maday Cartaya Pire, PhD, que con paciencia nos han sabido guiar en el desarrollo de nuestro trabajo investigativo, que con su sabiduría y responsabilidad supieron encaminarnos para la culminación de un proyecto tan anhelado.

Vladimir Guamán y Francisco Mendieta



DEDICATORIA

Este trabajo que es el culmen de una etapa va dedicado a mi familia, en especial a mis Padres Luis y Ayda que son el pilar fundamental de mi vida, quienes con amor, paciencia y sacrificio nunca me dejaron solo, me enseñaron lo grandioso de amar y ser fiel a mis principios. Pero este no es un triunfo solo mío les dedico a mis hermanos Kathe, David y José quienes han sido incondicionales, unos verdaderos amigos y hermanos, que con sus palabras y sus gestos de cariño han sabido animarme y compartir conmigo mis triunfos, mis alegrías y mis derrotas pero siempre han estado para acompañarme en este proceso que llega ya a su fin.

Quiero agradecer a cada persona de mi familia, a mis amigos con quienes hemos disfrutado buenos momentos y finalmente este trabajo y agradecimiento es para mi compañero de tesis Francisco con quien hemos podido alcanzar un objetivo en nuestra formación.

Vladimir Ernesto Guamán García



DEDICATORIA

A Dios, a mis Padres y Hermanos, porque durante este largo viaje de mi carrera universitaria siempre estuvieron conmigo y por las mil maneras de expresarme su apoyo, confianza y por creer en mí.

Francisco Antonio Mendieta Girón



INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se refiere a la evaluación geomecánica de la cantera de materiales de construcción “Las Victorias”, ubicada en la provincia del Azuay, con el propósito de determinar el comportamiento geomecánico y la calidad del macizo en la zona de estudio. Para tales fines esta monografía, se sustenta en ensayos de laboratorio para obtener las propiedades físico-mecánicas y el análisis *in situ* de los parámetros geomecánicos.

A nivel nacional el desarrollo en los últimos años, en la construcción de obras civiles, ha incrementado la demanda de materiales de construcción, lo que ha llevado, a que se busquen cada vez más fuentes de estos materiales. Para una explotación intensa, es necesario caracterizar el macizo rocoso y en base a su comportamiento geomecánico determinar las técnicas de voladura y explotación más adecuadas. Los métodos empleados actualmente en la caracterización del macizo rocoso, corresponden a los criterios dados por (Deere, Bieniawski, Hoek y Brown, entre otros).

Independientemente de esto todavía persisten problemas en las evaluaciones geomecánicas, lo que hace que los trabajos de extracción minera no reúnan los niveles de exigencia planteados. El problema que se pretende resolver con esta investigación, es la necesidad de realizar una caracterización geomecánica del macizo rocoso de la cantera “Las Victorias”, ubicado en el sector “El Descanso”.



OBJETO DE ESTUDIO

El macizo rocoso de la cantera “Las Victorias”, ubicado en el sector El Descanso, cantón Paute.

PROBLEMA

La necesidad de realizar la caracterización geomecánica del macizo rocoso de la cantera “Las Victorias”, ubicado en el sector “El Descanso”, debido a la escasez de datos geológicos y físico-mecánicos que permitan conocer el comportamiento geomecánico de este macizo.

Ofrece la posibilidad de utilizar los resultados de la investigación, como base para estudios de voladura y estabilidad de taludes. La caracterización geomecánica del macizo rocoso; que se realizó previo a la explotación en la cantera, se basó en descripciones *in situ* de parámetros geomecánicos y la determinación de las propiedades físico-mecánicas del macizo rocoso, obtenidos mediante tablas, que llevan a resultados preliminares.

HIPÓTESIS

Si se determinan las características ingeniero geológicas y las mecánico-estructurales del macizo, se podrá realizar la evaluación geomecánica del macizo rocoso de la cantera “Las Victorias”.

OBJETIVO GENERAL

Realizar la evaluación geomecánica del macizo rocoso de la cantera “Las Victorias”.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Describir las características geológicas de la zona objeto de estudio.



- Determinar las características mecánico-estructurales del macizo rocoso en la zona.
- Estudiar la calidad del macizo rocoso en la cantera “Las Victorias”.

RESULTADOS ESPERADOS

- Determinación de las propiedades físico-mecánicas del macizo rocoso en la obra estudiada
- Definir el comportamiento geomecánico del macizo.
- Conocer la calidad del macizo rocoso estudiado, mediante las clasificaciones geomecánicas.

PLANIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Para lograr el objetivo planteado se emplea una metodología de investigación que consta de trabajos analíticos y experimentales.

Primera etapa:

Se estableció el área de investigación, que estuvo condicionada por la presencia de minas o canteras a cielo abierto. Como objeto de la investigación se definió el macizo rocoso de la cantera “Las Victorias”.

En esta etapa se realizó la investigación bibliográfica del tema, en la que se analiza el estado actual de la temática en el país y en el resto del mundo. Los trabajos de investigación realizados en el Ecuador, relacionados con la temática, no aportan información significativa para caracterizar el objeto de estudio.

Segunda etapa:

Se realiza la parte experimental de la investigación, que permitió obtener los datos



necesarios, para realizar la caracterización geomecánica. Incluyó los siguientes aspectos:

1. Estudio y evaluación de las condiciones geológicas del macizo rocoso de la cantera “Las Victorias”.
2. Con el empleo de métodos de laboratorio se determinaron las propiedades físico-mecánicas de las rocas.
3. Con el empleo del método geológico se realizó el estudio del agrietamiento de los macizos rocosos, que incluye las superficies de debilitamiento, la abertura de las discontinuidades, el espaciamiento, rugosidad, alteración, la afluencia de agua, dirección y ángulos de buzamientos.
4. Se determinan las principales formas de pérdidas de estabilidad y el mecanismo con que ellas se manifiestan en los macizos rocosos, así como las causas que las provocan.

Tercera etapa:

En esta etapa se procedió a la interpretación y procesamiento de la información, realizando la evaluación integral del macizo rocoso, necesarios para la caracterización geomecánica y la estimación de la resistencia de la roca, a partir del criterio dado por Mohr-Coulomb.



CAPÍTULO I ESTADO DEL ARTE

1.1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

ASPECTOS A CONSIDERAR EN LA CARACTERIZACIÓN DE UN MACIZO

MACIZO ROCOSO

El macizo rocoso puede estar constituido por diferentes tipos de rocas, confiriéndole características homogéneas o heterogéneas. Blanco (2013) señala que:

La clasificación de rocas y del macizo rocoso más utilizada hoy en día en minería es la siguiente:

- a) Clasificación del macizo de acuerdo a las características del enlace.

De acuerdo con las características del enlace, entre las partes componentes se pueden diferenciar:

- **ROCAS FUERTES**

Poseen enlaces elásticos entre las partículas minerales componentes (areniscas, granitos y otras). Estas rocas se caracterizan por su alta resistencia y por su incompresibilidad. Ellas solo permiten el paso del agua a través de los poros, grietas y otros vacíos que posean. Las propiedades de mayor interés, de este tipo de rocas, desde el punto de vista de la Mecánica de las Rocas son: su resistencia, su estoicidad o tesura y la presencia en ellas de zonas de debilitamiento estructural o fracturación. Las rocas fuertes en el macizo pueden presentar características preponderantemente elásticas y elastoplásticas siendo este último estado el más representativo. En dependencia del carácter de aplicación de las cargas



estas rocas pueden comportarse como un cuerpo frágil o plástico.

- **ROCAS LIGADAS**

Representantes de este tipo de roca son las arcillas, margas, carbón de piedra, turba, esquistos y otros. Estas rocas están compuestas por partículas, cuyos diámetros oscilan desde 0,0001 a 0,05 mm. En las rocas arcillosas las dimensiones de las partículas son menores de 0,005 mm. Las rocas ligadas (las arcillosas) en dependencia de su contenido de agua libre pueden encontrarse en estado sólido, plástico o fluido.

- **ROCAS DESLIGADAS**

A diferencia de las rocas ligadas, en las que existe una gran cohesión entre las partículas componentes, en las rocas desligadas esto no se observa, sino que este tipo de roca se caracteriza por la acumulación de partículas minerales entre las cuales la fuerza de cohesión es muy pequeña o nula. En este tipo de roca la forma se conserva debido al peso de las partículas componentes y a la fuerza de fricción que existe entre ellas.

- **ROCAS MOVEDIZAS**

Durante los trabajos de construcción subterránea se presta una especial atención a este tipo de macizo, por las características que él posee que dificultan en gran medida los trabajos subterráneos. Están conformadas por una fase sólida y otra líquida y poseen la propiedad de moverse. Su movilidad y el empuje del agua, es la causa de que se produzcan grandes afectaciones sobre las obras subterráneas. Los terrenos movedizos se dividen en no desecables (terrenos movedizos típicos) y desecables (pseudomovedizas). Los primeros contienen partículas arcillosas y coloidales además de agua combinada, en tanto que los pseudomovedizos se forman por la mezcla de arenas homogéneas sin partículas arcillosas y es por ello que son fácilmente secables aumentándose

con esto su estabilidad. (pp. 1-5).

ESTRUCTURA DEL MACIZO ROCOSO

El macizo rocoso está determinado por cuerpos de roca sana y la estructura geológica (primaria y secundaria). La interacción entre estos elementos constituyentes, dictara el comportamiento y las propiedades del macizo rocoso. El peso de estos factores depende de la escala de la obra a realizar. Las rocas ígneas son resistentes debido al enlace entre los cristales (diferente grado de cristalización y tamaño de los cristales) y minerales componentes de las mismas, como se muestra en la figura 1.1.



Figura 1.1.: Trabazón en las rocas. Fuente: <http://enciclopedia.us.es>

Los macizos rocosos compuestos principalmente de rocas sedimentarias, donde se aprecia claramente los planos de estratificación que se forman por el depósito y la posterior consolidación de los sedimentos. Al no existir enlaces fuertes entre las partículas, en la estructura de las rocas sedimentarias, se genera macizos que presentan planos de debilidad, como se muestra en la figura 1.2.



Figura 1.2.: Estratificación en las rocas. Fuente: <http://www.geoturismo.es>

En un macizo rocoso de acuerdo a su estructura geológica se presentan dos tipos de estructuras denominadas estructura primaria y secundaria. La estructura primaria está dada por la génesis de las rocas. Las estructuras secundarias en cambio son el producto de la acción de esfuerzos desarrollados en la masa rocosa debidas a los esfuerzos tectónicos. Estas estructuras se pueden presentar aisladas o sobrepuestas entre sí. Las estructuras secundarias se manifiestan localmente en discontinuidades, ver figura 1.3 y regionalmente como fallas, pliegues, que constituyen planos de debilitamiento en el macizo rocoso (“Cátedra de Geotecnia I”, 2010).

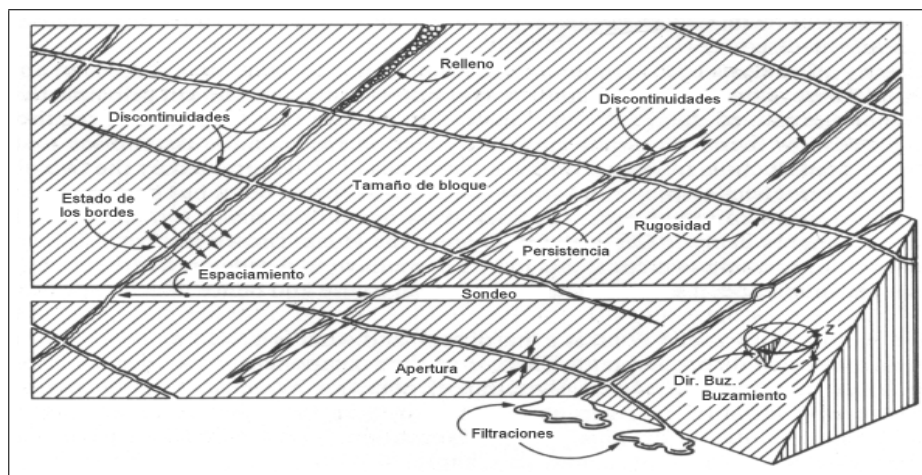


Figura 1.3.: Estructuras secundarias, Fuente: Engineering Rock Mechanics: An Introduction to the Principles. John A Hudson



Al constituir planos de debilidad, las estructuras secundarias influyen en gran medida en las condiciones geomecánicas de los macizos rocosos. Y su efecto global sobre los macizos rocosos está en función de su posición espacial, rumbo y buzamiento (“Cátedra de Geotecnia I”, 2010).

ESTADO DE CONSERVACIÓN DE LA ROCA

La meteorización en los macizos rocosos consiste en el cambio, de su composición o textura (ver tabla 1.1), que afectan a las rocas expuestas en la superficie o cerca de esta, debido a actividad de agentes atmosféricos .

Determinar el grado de meteorización en el macizo rocoso, es de suma importancia en la caracterización geomecánica del mismo, debido a que afecta negativamente a sus propiedades físico-mecánicas. Los índices más usados para determinar el grado de meteorización son: químico, micropetrográfico y físico, siendo el ultimo el más empleado en la práctica debido a lo económico que resulta y la fiabilidad de los resultados si son realizados correctamente.

La meteorización química y física, son las formas de meteorización que afectan al macizo y la roca que lo compone. El factor de mayor influencia en el tipo de meteorización es el clima. Los macizos rocosos subterráneos, son afectados cuando son excavados debido a actividades mineras y construcciones en el ámbito civil. No así los macizos rocosos en la superficie que son afectados inmediatamente por agentes atmosféricos.

El estudio del efecto de la meteorización con el tiempo debe ser tomado en cuenta tanto en macizos rocosos subterráneos o de superficies, ya que puede ocasionar la pérdida de estabilidad con el pasar del tiempo (Blanco, 2013).



Tabla 1.1.: Clasificación de Rocas Meteorizadas (Modificado de Waltham, 1994).

Grado	Descripción	Litología
VI	Suelo residual	Algún contenido orgánico, no se preserva estructura original, todos los minerales están descompuestos, excepto el cuarzo
V	Completamente meteorizada	Suelo, aún se reconoce estructura original
IV	Intensamente meteorizada	Parcialmente transformada a suelo, predomina suelo sobre roca
III	Moderadamente meteorizada	Parcialmente transformada a suelo, predomina roca sobre suelo
II	Ligeramente meteorizada	Roca fracturada, pátinas de alteración, feldespatos parcialmente alterados
I	Roca fresca	Roca limpia

MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN DE LOS MACIZOS ROCOSOS

Para valorar la calidad del macizo rocoso, se emplean diferentes métodos de estudio, actualmente los métodos basados en las clasificaciones geomecánicas, son los que han tenido gran difusión. Los criterios utilizados están basados en parámetros cualitativos y cuantitativos, dando como resultado diferentes métodos de evaluación y valoración, como se muestra en la tabla 1.2.



Tabla 1.2.: Métodos de clasificación de macizos rocosos

Métodos Cualitativos	Terzaghi (1946)
	Lauffer (1958)
	Deere "RQD" (1963)
Métodos Cuantitativos	Wickham et al. "R.S.R" (1972)
	Bieniawski "R.M.R" (1973,1989)
	Barton et al. "Q" (1974)
	González de Vallejo "S.R.C"(1982)

CLASIFICACIÓN RMR (1989)

Propuesta por Bieniawski en 1973, última actualización en 1989, utilizado en la caracterización geomecánica de macizos rocosos en obras a cielo abierto y subterráneas. Para aplicar la clasificación se divide al macizo rocoso en zonas de estructura geológica similar. Esta clasificación se basa en los siguientes parámetros geomecánicos:

- Resistencia a compresión uniaxial de la matriz rocosa.
- Grado de fracturación de la roca "RQD".
- Espaciado de las discontinuidades.
- Condiciones de las discontinuidades.
- Condiciones hidrogeológicas.
- Orientación de las discontinuidades con respecto a la obra.

Con la suma de los cinco primeros parámetros, se obtiene el valor del RMR *basico*. La corrección por orientación de discontinuidades, depende del tipo de obra ingenieril (túneles, taludes), una vez sumado este parámetro se obtiene el RMR ⁸⁹



(varía de 0 a 100) con el que se le asigna la calidad macizo rocoso (a mayor RMR, mayor calidad del macizo rocoso). El RMR está dividido en cinco tipos de calidad y con su rango de características geotécnicas. Las tablas estandarizadas para la valorización de los parámetros se muestran en el Anexo A.

CLASIFICACIÓN DE DEERE “RQD” (1968)

La clasificación de Deere o del índice **RQD** (*RQD = Rock Quality Designation*) se fundamenta en el grado de fracturación de la roca para valorar la calidad del macizo rocoso. Para obtener el índice RQD, se realizan perforaciones con diámetro mínimo de 54 mm, los tramos de testigo obtenidos de la perforación se miden y se contabilizan para aplicarlos en la fórmula 1.1. Para ser contabilizadas la longitud de los tramos debe ser mayor de 10 centímetros.

Es un índice de obtención rápida y forma parte de otras clasificaciones, hay que tener precaución en la calidad del macizo obtenida, debido a que en la perforación influyen factores, como son: la mecánica del sondeo y forma en que se lo ejecutó, que pueden producir roturas en el testigo.

La fórmula a aplicar para determinar el RQD es:

$$RQD = \frac{\text{Longitud recuperada en piezas} \geq 0.1m \cdot 100}{\text{Longitud del sondeo}} \quad (1.1)$$

Cuando no se dispone de sondeos, una aproximación del RQD se obtiene por la expresión dada por Palmstrom.

$$RQD = 115 - 3.3J_v \quad (1.2)$$

Siendo J_v el número total de juntas que se encuentran en un metro cúbico del macizo rocoso, si hay dificultad en observar, se lo puede obtener contando las discontinuidades de cada familia que hay en una longitud determinada.

En función del R.Q.D se establece la clasificación de las rocas en los siguientes tipos, ver tabla 1.3.



Tabla 1.3.: Clasificación de las rocas índice “RQD”

R.Q.D. (%)	Calidad de roca
90 - 100	excelente
75 - 90	buena
50 - 75	regular
25 - 50	mala
< 25	muy mala

Esta clasificación da resultados válidos en rocas masivas y resistentes, en rocas de baja resistencia o estratificadas, es poco práctica y debe tenerse en cuenta otros factores como: inclinación de los estratos, génesis de las rocas.

CLASIFICACIÓN DE BARTON (1974)

Barton et al. (1974) proponen una clasificación geomecánica de las rocas, mediante el índice de calidad “Q” que se obtiene al sustituir en la fórmula 1.3 los seis parámetros que se observan en el macizo rocoso y se encuentran descritos a continuación.

Determinación del índice Q

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \quad (1.3)$$

Siendo:

- **RQD**: Índice de Calidad de la Roca.
- J_r : Índice que contempla la continuidad y rugosidad de las superficies de las grietas.
- J_n : Índice que se toma según la cantidad de sistemas de grietas.



- J_a : Índice que depende del grado de alteración de las grietas y de las características de su relleno.
- J_w : Índice que caracteriza la humedad de las rocas.
- **SRF**: (Stress reduction factor) coeficiente que tiene en cuenta la influencia del estado tensional en el macizo rocoso.

Los tres grupos formados con estos parámetros son:

- $\frac{RQD}{J_n}$ Representa el tamaño de los bloques.
- $\frac{J_r}{J_a}$ Representa la resistencia al corte entre los bloques.
- $\frac{J_w}{SRF}$ Representa la influencia del estado tensional.

El rango de variación de los parámetros se muestra en la tabla 1.4.

Tabla 1.4.: Rango de variación de los parámetros

RQD	0 - 100
J_n	0.5 - 20
J_r	0.5 - 4
J_a	0.75 - 20
J_w	0.05 - 1
SRF	0.5 - 20

El índice **Q** varía de **0.001 a 1000** y el macizo rocoso puede ser clasificado en nueve clases. La tabla estandarizada para la clasificación del macizo rocoso se muestra en el anexo A. En las tablas, se reflejan los criterios de valoración de estos parámetros.



1.2. ESTADO ACTUAL DE LA TEMÁTICA EN EL MUNDO.

La ingeniería geotécnica fue desarrollada como ciencia desde los años 1700, en función de métodos empíricos, empleando técnicas de ensayo y error documentadas, que son la base actual de la mecánica de rocas.

La variación en las características de las rocas, hacen que sea difícil determinar propiedades únicas en macizos rocosos semejantes, debido a que dependen de factores y condiciones externas a las que han estado sometidas.

En el siglo XVIII, Charles A. de Coulomb publico sus estudios sobre la presión lateral que ejerce el suelo en muros laterales. Aplicó a los suelos los principios de la mecánica, basándose en el concepto de cohesión y fricción. Christian Otto Mohr (1882) elaboró el círculo de esfuerzos, que forma parte de su teoría de resistencia de materiales, al combinar éstas teorías e introducirlas al estudio de los suelos y rocas, nace la teoría de Mohr-Coulomb, que se utiliza para construir el pasaporte de resistencia en suelos y rocas.

Con el empleo de las clasificaciones geomecánicas se caracteriza al macizo rocoso geomecánicamente, al reunir las observaciones, ensayos y datos tomados in situ o en laboratorio bajo un mismo criterio. Permittiéndonos evaluar el comportamiento geomecánico de los macizos rocosos y proporcionándonos una estimación de los parámetros geotécnicos necesarios para el diseño en canteras y minas a cielo abierto.

Entre los sistemas de clasificaciones propuestos, más utilizados están:

TERZAGUI (1946), clasifica al macizo rocoso cualitativamente en diez categorías a partir del criterio de la formación de una zona de roca destruida por el techo de la excavación, “atendiendo esencialmente a las condiciones de fracturación en las rocas y a la cohesión o expansividad en los suelos” (Cartaya,2006).



Analizado por González de Vallejo (1998), el problema que presenta esta clasificación es que no toma en cuenta la información acerca de las propiedades del macizo rocoso, clasifica al macizo rocoso de forma global, pudiendo este presentar zonas muy diferenciadas y no permite una evaluación objetiva.

LAUFFER (1958) propone una clasificación, de carácter cualitativo. La clasificación se efectúa atendiendo a los siguientes parámetros:

- Longitud libre: que es la menor de las dos dimensiones, diámetro o altura de la excavación abierta sin revestimiento.
- Tiempo de estabilidad: es el tiempo que permanece sin desmoronarse la longitud libre anteriormente definida.

La crítica, es el impedimento para determinar los dos parámetros necesarios para el uso de esta clasificación, si las excavaciones en la obra (de diferente longitud libre) no están despejadas, el lapso de tiempo que las rocas son estables en el contorno de la excavación. “Difícilmente utilizable en la fase de proyecto. Parece excesivamente conservadora”. (“El sostenimiento de túneles”, n.f.)

PROTODYAKONOV (1962) propuso una clasificación de carácter cualitativo, esta clasificación geomecánica define la calidad del macizo rocoso mediante el parámetro “*f*”, que se denomina coeficiente de fortaleza. Este coeficiente depende de la resistencia a compresión simple, de tal forma que el valor de “*f*” corresponde a una décima parte de la resistencia a compresión simple (en *MPa*). Este sistema no considera parámetros como el estado de las discontinuidades, su rugosidad, el tamaño de los bloques y la presencia de agua que influyen en el comportamiento de un macizo rocoso (Blanco, 1998).

DEERE (et al. en 1968) propuso un índice de la calidad de las rocas, basado en la recuperación de testigos, denominado como el sistema Rock Quality Designation (**RQD**), este índice se ha usado en todo el mundo, debido a que es fácil de



determinar, después de la extracción de testigos.

El índice RQD no describe las condiciones en las que se encuentra el macizo rocoso y los esfuerzos que actúan sobre él. No se consideran las familias presentes, el estado de las discontinuidades, el tamaño de los bloques, la resistencia al corte que se produce en las discontinuidades y la presencia de agua que modifican el comportamiento geomecánico del macizo rocoso.

BOLUCHOF en la década de los años 80 elaboró un sistema que valora la estabilidad en el macizo rocoso y está determinada por el índice -S-; que depende del coeficiente de fortaleza de las rocas "f", de los coeficientes K_m , K_t y K_a , que a su vez definen la fracturación del macizo y la resistencia al cortante de las discontinuidades. Para aplicarla se necesitan realizar excavaciones y está desarrollada solo para proyectos subterráneos (Blanco, 2013).

WICKHAM, TIEDEMANN Y SKINNER (1972) propusieron una clasificación basada en el índice RSR (Rock Structure Rating). Este método parte de datos cuantitativos de la roca para determinar el índice RSR. Se obtiene de la suma de tres términos relacionados con la geología, fracturación y dirección de avance, condiciones de agua y de las juntas (El sostenimiento de túneles, n.f.).

La afluencia del agua en las excavaciones según esta clasificación, dentro del macizo rocoso depende únicamente de parámetros litológicos y estructurales, debiéndose caracterizar al macizo para determinar qué factores permiten que el agua llegue a la excavación (Cartaya, 2006).

BARTON (1974) planteó el sistema de clasificación que divide al macizo rocoso según el índice de calidad "Q" basado en seis parámetros (RQD, número de familias de juntas, rugosidad de las juntas, meteorización de las juntas, presencia de agua y SRF (Stress Reduction Factor)). En el caso de tener más de dos familias de discontinuidades, se evalúa la familia más desfavorable, pero no se considera el rumbo y buzamiento de las discontinuidades en este sistema. Para determinar



el índice SRF, se debe conocer el estado tensional que está sometido el macizo rocoso en estudio (El sostenimiento de túneles, n.f.).

BIENIAWSKI (1979, 1989), planteó el sistema de clasificación geomecánica basado en el índice RMR (Rock Mass Rating). Este índice se obtiene mediante cinco parámetros básicos (resistencia a compresión simple, RQD, estado de las juntas, frecuencia de las juntas y presencia de agua). Luego este valor se ajusta en función de la orientación de las discontinuidades. Existen correlaciones entre el RMR y el módulo de deformación, así como correlaciones entre el RMR y el sistema Q de BARTON.

Según (Kirsten, 1988) a esta clasificación se le señalan los siguientes aspectos:

- El sistema de cálculo (suma de contribuciones de rango limitado) tiende a favorecer los índices medios de calidad.
- Cambios extremos en un solo parámetro (que pueden afectar en gran medida el comportamiento del macizo rocoso) afecta poco al índice global, debido a la estructura del índice como suma de contribuciones.
- El espaciamiento entre juntas parece sobrevalorado (aparece dos veces: de forma explícita e indirectamente en el RQD).

HOEK Y BROWN (2002) mediante ensayos realizados en muestras de matriz rocosa y correcciones en función del RMR obtenidas mediante estadísticas en diferentes tipos de macizos plantean un criterio de rotura. Además con su estudio incluyen en el criterio macizos rocosos estratificados.

En (1994 y 1997) se propone el parámetro GSI (Geological Strength Index), el cual incluye factores como la foliación, rellenos, forma de los bloques y el contenido de finos. Con ello, este parámetro es aplicable en macizos rocosos de mala calidad.

Hoy en día, se siguen empleando las clasificaciones geomecánicas, luego de un



reconocimiento de campo y la toma de parámetros geomecánicos. En proyectos de gran magnitud se emplean formulaciones más exactas mediante elementos finitos (PLAXIS) o diferencias finitas (FLAC), (Montalar, 2009).

1.3. ESTADO ACTUAL DE LA TEMÁTICA EN EL ECUADOR.

La actividad minera en el Ecuador se ha desarrollado en dos campos: la minería metálica y la minería no-metálica (incluye la minería de materiales de construcción). En Ecuador, la minería de materiales de construcción es realizada a pequeña escala (incluye prácticamente todas las fases de la actividad: prospección, exploración, explotación, beneficio y comercialización).

En vista de la gran construcción de obras civiles, especialmente en el ámbito vial que se ha realizado en estos últimos años, se requiere cada vez más de fuentes de materiales pétreos. Generalmente, se buscan lugares cercanos a las obras viales que tengan materiales que puedan ser utilizados en la construcción de las mismas. Para ello se estudia la ubicación, investigación y comprobación física de los materiales agregados.

La caracterización geomecánica de los macizos rocosos en Ecuador no ha sido un tema muy estudiado o investigado, por lo tanto, no se ha propuesto ninguna clasificación geomecánica. El estudio del tema se ha limitado a la aplicación de los sistemas de clasificación existentes, siendo los sistemas más utilizados el RMR de Bieniawski, el índice Q de Barton y el GSI de Hoek y Brown. Estos sistemas se emplean principalmente en obras hidroeléctricas, tal es el caso de las centrales hidroeléctricas HIDROPAUTE, COCA CODO SINCLAIR, y el proyecto hidroeléctrico SAN FRANCISCO, en este se hace uso de la clasificación Q_{TBM} , que es la combinación de los parámetros del sistema de clasificación geomecánica de macizos rocosos Q, con parámetros mecánicos de la máquina excavadora (TBM). Además se utilizan en túneles como el túnel Chisinche, en donde se emplea la clasificación de Bieniawski. El uso de las clasificaciones se ha desarrollado ini-



cialmente para el sostenimiento de obras subterráneas y poco a poco su uso se ha extendido a obras a cielo abierto, especialmente en taludes de canteras. En la cantera “Las Victorias” se emplean las clasificaciones RMR de Bieniawski y SMR de Romana para caracterizar el macizo rocoso. Actualmente el uso de estas clasificaciones en Ecuador ha tenido mayor difusión especialmente por la ejecución de proyectos de generación hidroeléctrica y mineros.



CAPÍTULO II SITUACIÓN ACTUAL DE LA CANTERA “LAS VICTORIAS”

2.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA Y VÍAS DE ACCESO

El área minera “**LAS VICTORIAS**” se encuentra ubicada al sur del Ecuador, en la provincia del Azuay, cantón Paute, parroquia San Cristóbal, sector El Descanso y localizada en el curso superior de la cuenca del Paute.

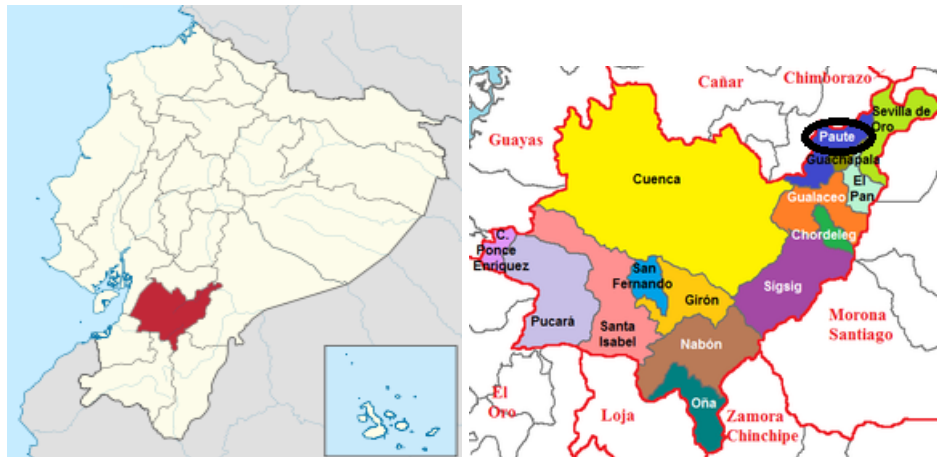
El área del proyecto, cubre una superficie de 10 hectáreas, su ubicación en coordenadas UTM se muestra en la tabla 2.1. En la zona dominan lomas redondeadas con lechos de quebradas no profundos, cuya parte más elevada alcanza cotas que llegan a los 2600 msnm.

Tabla 2.1.: Ubicación geográfica

Coordenadas UTM	
Elipsoide:	WGS - 84
Zona:	17 M
736578 E	9686350 S

La mayoría del territorio de El Descanso corresponde a terrenos bastante irregulares, cubiertos por pastizales, morfología que ayuda a disponer una zona apta para la ubicación del proyecto minero.

La ubicación geográfica de la cantera de materiales de construcción “Las Victorias” en el Ecuador se ilustra en la siguiente figura 2.1.



(a) Ubicación Azuay.
<http://es.wikipedia.org>

Fuente: (b) Ubicación Paute.
<http://www.zonu.com>

Fuente:



(c) Ubicación San Cristóbal.
<http://www.eruditos.net>

Figura 2.1.: Ubicación regional y local

VÍAS DE ACCESO

Al área minera “Las Victorias”, se puede acceder de la siguiente manera:

- a) Desde la ciudad de Cuenca, se toma la autopista troncal sur E35 dirección norte, hasta el sector de Jadan, se desvía hacia la vía panamericana se continúa, hasta la intersección con la vía El Descanso–Gualaceo, se avanza por ésta vía unos 200 metros hasta la cantera ubicada a la izquierda. En la figura 2.2 se

puede observar el acceso a la cantera desde la autopista troncal sur E35.

- b) Partiendo de la ciudad de Guayaquil, se toma hacia el este por la E40, luego tomar la ruta E25 dirección sur hacia Machala, luego avanzar por la vía colectora E582, hasta llegar a Cuenca desde allí seguir la ruta ya descrita en el apartado anterior.



Figura 2.2.: Acceso a la cantera “Las Victorias” (Google Earth, 2013).

2.2. GEOLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA

GEOLOGÍA REGIONAL

El área minera “Las Victorias” está ubicada en el ámbito regional, dentro de las formaciones geológicas: Yunguilla, Biblián y Azogues, como se muestra en el plano geológico de la zona en estudio (figura 2.3), con su respectiva leyenda y símbolos geológicos (figura 2.4). A continuación se presenta una descripción geológica general de estas formaciones tomadas del mapa geológico del IGM, NV-E AZOGUES HOJA 73:

Formación Yunguilla (Cretáceo Superior (Maestrichtiano))



Litológicamente hay predominancia de argilita negra, pasando a arcillas café obscuras o negras. La silicificación es común en varios niveles, encontrándose depósitos de caliza y concreciones carbonatadas en toda la secuencia. Areniscas y capas guijarrosas fosilíferas son observadas en varias localidades, así como lavas andesíticas. En general esta formación se inclina hacia el occidente, pero la base no está expuesta y el tope es erosional. En el área de San Marcos parece haber un espesor de 1200 m estimados de afloramientos. En los estudios de Sigal (1968); Savoyat et al. (1970) han establecido la edad maestrichtiana de esta formación.

Formación Biblián. (? Mioceno Inf.)

La formación Biblián descansa en discordancia sobre la Formación Yunguilla. El depósito basal es de guijarro grueso, a menudo con cantos de la Formación Yunguilla. Esta litología se repite en muchos niveles dentro de arcillas limosas, arenosas finas café-rojizas, y areniscas tobáceas gruesas. Aglomerados volcánicos rojos parecen formar la base local de la formación. Se estima que más de 1000 m de potencia afloran en el área de Santa Ana. Estudios realizados por Marshall y Bowles (n.f) establecen al Mioceno Inferior como edad de esta formación.

Formación Azogues (Mioceno ?Medio)

Hay una integración en la base con la Formación Loyola. La secuencia esta predominada por areniscas tobáceas, gruesas, de color café, pero los depósitos de limolita y arcilla generalmente no tienen más de 1 m de espesor. Un conglomerado basal bien desarrollado puede encontrarse donde la formación ha propasado los subyacentes. La unión superior con la Guapán es gradacional. El espesor máximo se ha estimado en 280 m. La ocurrencia de esta última forma eslabones de la Formación Azogues a la Loyola (Liddle y Palmer, 1941), y en vista de su base gradacional, se le considera por lo menos de edad Mioceno ?Medio.

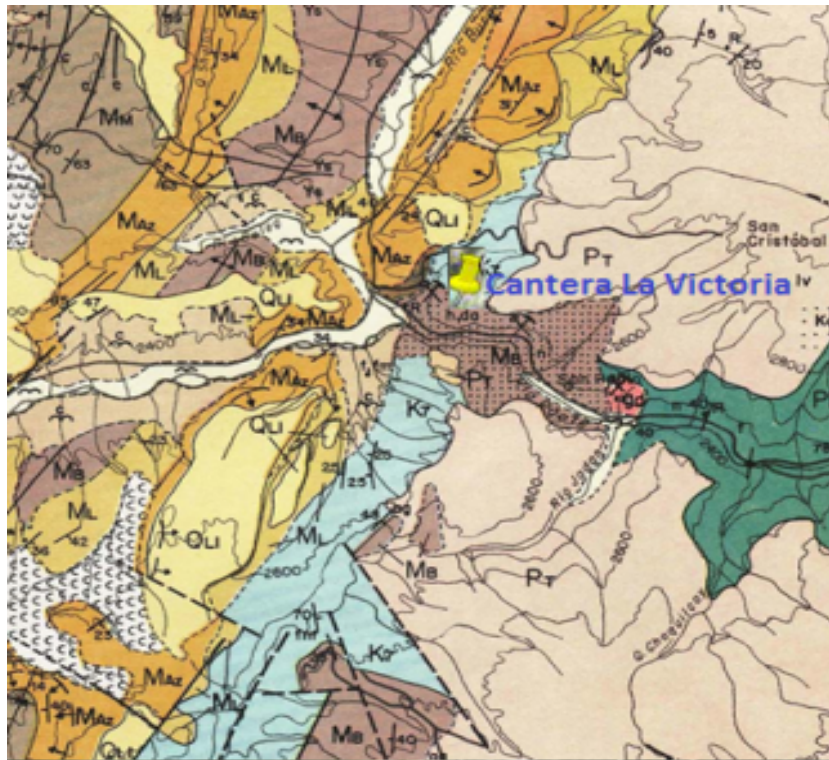
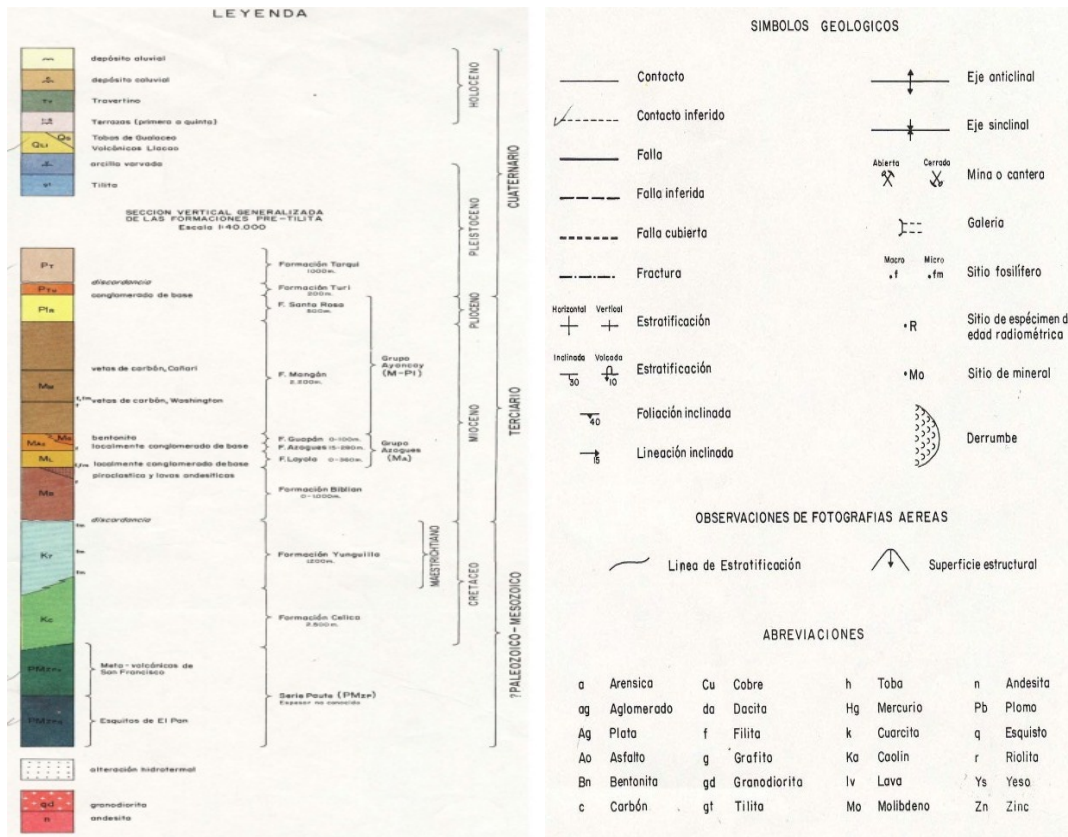


Figura 2.3.: Mapa geológico de la cantera “Las Victorias” (IGM, NV-E AZOGUES HOJA 73)



(a) Leyenda

(b) Símbolos Geológicos

Figura 2.4.: Leyenda y símbolos geológicos (IGM, NV-E AZOGUES HOJA 73)

GEOLOGÍA LOCAL

En la zona minera “Las Victorias” las formaciones geológicas presentes en el área de estudio son las unidades Yunguilla y Biblián (Figura 2.5), descritas a continuación por Morocho et al. (2010):

Formación Yunguilla

Litológicamente hay predominancia de argilita negra meteorizada pasando a arcillas café obscuras a negras. La silicificación es común en algunos niveles encontrándose láminas carbonatadas y concreciones en toda la secuencia. En general esta formación se inclina hacia el occidente, con un espesor estimado de aflor-

ramiento de 150 m en el sector del Tاهual.

Formación Biblián

La formación Biblián descansa en discordancia sobre la formación Yunguilla. El cerro Tاهual perteneciente a esta formación está conformado por Andesitas, los colores claros y oscuros de la misma dependen de su grado de meteorización. En la superficie el macizo rocoso se encuentra muy fracturado, apreciándose separaciones laminares y columnares. La potencia de la formación alcanza los 200 m.

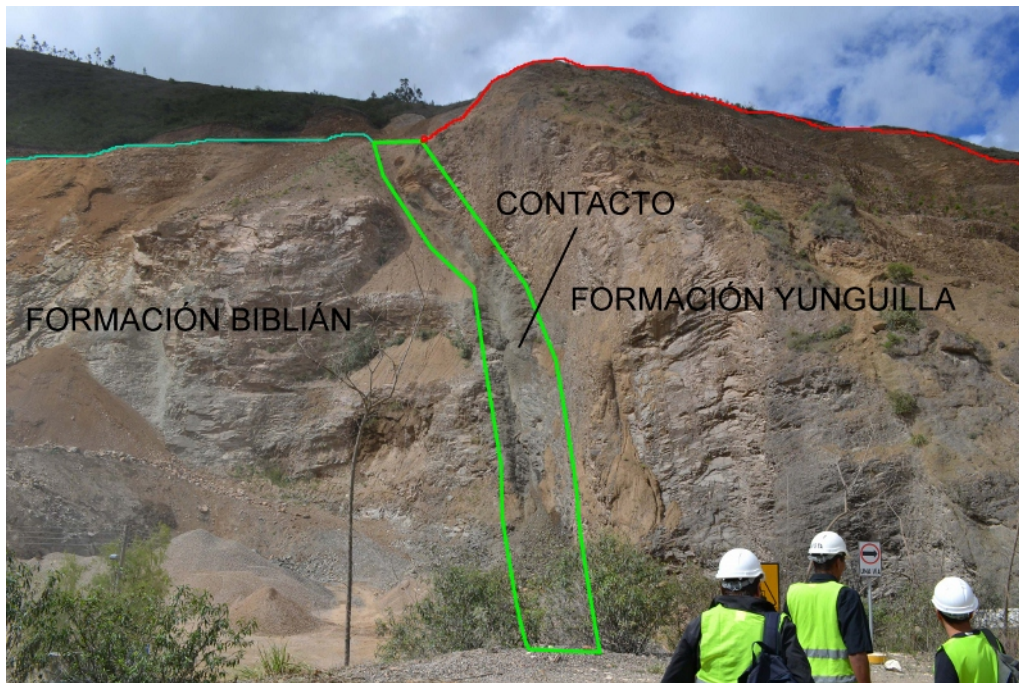


Figura 2.5.: Formaciones geológicas de la cantera “Las Victorias”

HIDROGEOLOGÍA

La hidrogeología regional corresponde a la cuenca del Río Paute. Que es el drenaje principal de la zona, el sistema fluvial posee bordes accidentados con pendientes superiores a 40°. La cuenca tiene una extensión cercana a los 5.100,00 km², sus altitudes varían desde 1824 m.s.n.m. hasta 4680 m.s.n.m.(Parque Na-



cional El Cajas), no se encuentran nieves perpetuas, nevados o glaciares, esto es debido a su proximidad a la línea ecuatorial, siendo invierno y verano las estaciones que se dan, pero con las características únicas al estar ubicada la cuenca en la cordillera de los Andes (“Cuenca del Río Paute”, 2011).

En el sector de El Descanso, a unos 800 m aguas arriba de la concesión se unen el río Deleg con el río Burgay para formar el río Paute que posee angostos cañones y elevados taludes de roca, en la zona de estudio. Aguas abajo el río Tomebamba se une al Paute. La concesión se encuentra en la unión de las quebradas Huachun y Tahual, las cuales son de tipo intermitentes, lo que sugiere, que ante la presencia de lluvias pueda existir una pequeña escorrentía superficial. La escorrentía superficial posee una baja permeabilidad, en las rocas que no son porosas por lo que el transporte de agua a través de esta es nulo, sin embargo, la presencia de discontinuidades puede originar que el agua se filtre a través de estas.

Sobre la base de las características litológicas, morfológicas, se pueden diferenciar dos grupos, los cuales se indican a continuación:

- Formaciones Permeables

Los materiales no granulares pueden adquirir permeabilidad si se producen fracturas que atraviesen a estos materiales, en este caso la permeabilidad resultante es secundaria y por esta razón estos materiales también pueden constituir acuíferos. De las formaciones antes descritas, solo la formación Azogues puede adquirir esta propiedad.

- Formaciones Impermeables

Los macizos rocosos no fracturados pueden tener porosidad, sin embargo sus poros no están interconectados por lo cual sus permeabilidades son muy bajas a totalmente impermeables, en este caso esas formaciones se denominan acuitardos.



TECTÓNICA

En Ecuador se presentan sismos y vulcanismo debido al choque permanente entre la placa tectónica sudamericana, que se desplaza hacia el oeste, y la placa de Nazca que se mueve hacia el este. Otro efecto de este choque entre placas es la formación de fallas y pliegues encontrados a lo largo de la cordillera de los Andes.

La cantera de materiales de construcción “Las Victorias”, está ubicado en la zona de influencia del sistema de fallas Girón. Conocida y estudiada desde 1960, se sabe que está activa por investigaciones realizadas para el Proyecto Hidroeléctrico Jubones, se interna hacia el norte por el valle del río Tarqui, donde se ramifica en varias fallas con dirección norte (TRANSELECTRIC S.A., 2003). Las fallas identificadas, son las que afectan a la zona circundante de El Descanso, de dirección N-S y se encuentran al Este del lugar de estudio, localizadas en cada margen del río Burgay, terminando en las poblaciones de Azogues (falla sinclinal) y Cojintambo (falla anticlinal). Generalmente los estratos están en dirección Este- Oeste. En la zona de estudio, el contacto (vertical) existente entre la formación Biblián y Yunguilla se puede apreciar a simple vista (Figura 2.5), evidencia de la actividad tectónica en la zona.

2.3. ACTUALIDAD MINERA

Estupiñan (2013) considera que la cantera de materiales de construcción “Las Victorias” (base, subbase, mejoramiento, relleno, agregados de hormigón) se encuentra en condiciones ideales para su explotación. Se encuentran áridos producto de la meteorización (áridos naturales), cuyo laboreo es por medios mecánicos, utilizados como material de mejoramiento y como relleno en terraplenes. Los áridos artificiales son el producto de técnicas de perforación y voladura, para su posterior trituración (mediante mandíbulas) y tamizado. Obteniéndose áridos de diferentes tamaños que serán utilizados en hormigones y en la construcción vial.



Al ser una concesión minera a cielo abierto, la forma de laboreo será por banqueo, desde la parte superior hasta la altura mínima que está permitida en la explotación (de arriba hacia abajo), con bancos intermedios como medida de seguridad.

El laboreo en la cantera de material de construcción “Las Victorias” se la realizará de la siguiente forma:

- Preparación
- Arranque
- Perforación
- Voladura
- Carga y Transporte



CAPÍTULO III CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA

3.1. DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS DE EVALUACIÓN GEOMECÁNICA REALIZADOS EN LA CANTERA “LAS VICTORIAS”

A continuación se presenta un resumen del estudio realizado en el año 2010, referido a la evaluación geomecánica del macizo rocoso en la cantera de materiales de construcción “Las Victorias”, que está basado en el artículo científico “Determinación del Factor de Seguridad para Taludes Anisotrópicos en las áreas mineras “Victoria I” y “Victoria II”, utilizando los sistemas de evaluación de Bieniawski y Romana y método de cálculo de Li, Merifield y Lyamin”, realizado por Morocho et al. (2010) y facilitados por el Ing. Julio Jaramillo R. representante de la empresa Hormicroto Cía Ltda.

SISTEMA RMR DE BIENIAWSKI (1989)

En la tabla 3.1 se presentan los resultados que se utilizaron para obtener el valor del RMR en la cantera “Las Victorias”, del estudio realizado por Morocho et al. (2010):



Tabla 3.1.: Información recopilada en campo (Morocho et al., 2010)

Zona	Rumbo	Buzamiento	Espaciado entre discontinuidades	Número de discontinuidades por m^2	Condición de las discontinuidades	Presencia de Agua
1	N55W	N35W	35 cm	7 horizontales 5 verticales TOTAL: 12	Grietas ligeramente rugosas. Paredes altamente meteorizadas	Húmedo
2	N30E	S83E	15 cm	16 horizontales 10 verticales TOTAL: 26	Grietas pulidas, con separación (1-5) mm meteorizadas	Húmedo
3	S20E	S80W	30 cm	4 horizontales 2 verticales TOTAL: 6	Grietas ligeramente rugosas. Paredes altamente meteorizadas	Húmedo

El RQD se obtuvo por la ecuación de Palmstrom (1.2), (Blanco, 2013) encontrándose rocas de calidad: mala, buena y excelente. En la tabla 3.2 se presentan los resultados de la estimación del RQD mediante la correlación de Palmstrom (1982) para cada una de las zonas de estudio.

Tabla 3.2.: Estimación del RQD mediante la ecuación de Palmstrom (Morocho et al., 2010)

Valor del RQD			
Zona 1	75.4 %	buena	17
Zona 2	29.2 %	mala	8
Zona 3	95.2 %	excelente	20

Con excepción de la resistencia a la compresión uniaxial y el RQD, los demás parámetros (espaciamiento de las discontinuidades, condición de las discontinuidades y presencia de agua), han sido determinados en el campo. Los valores obtenidos mediante la clasificación RMR de Bieniawski (1989), para cada zona se muestran en la tabla 3.3.



Tabla 3.3.: Valoración RMR de Bieniawski (1989) (Morocho et al., 2010)

	PARÁMETRO	VALOR	RESULTADO
ZONA 1	Resistencia de la Roca Intacta (MPa)	12	
	RQD (%)	17	Puntaje Total: 69
	Espaciado de las discontinuidades (cm)	10	Tipo de Roca: 2
	Condición de las discontinuidades	20	Descripción: Buena
	Presencia de agua	10	
ZONA 2	Resistencia de la Roca Intacta (MPa)	12	
	RQD (%)	8	Puntaje Total: 48
	Espaciado de las discontinuidades (cm)	8	Tipo de Roca: 3
	Condición de las discontinuidades	10	Descripción:
	Presencia de agua	10	Regular
ZONA 3	Resistencia de la Roca Intacta (MPa)	12	
	RQD (%)	20	Puntaje Total: 72
	Espaciado de las discontinuidades (cm)	10	Tipo de Roca: 2
	Condición de las discontinuidades	20	Descripción: Buena
	Presencia de agua	10	

Para determinar la resistencia de la roca intacta, se asumió que la Andesita se encuentra en el rango de 100 – 250 MPa, asignando el valor de 12 para todas las zonas. Al índice RQD se le asigna el valor de 17, 8 y 20 de acuerdo a la clasificación RMR, que está definido por el valor encontrado en cada zona, como se muestra en la tabla 3.2.

El espaciado de las discontinuidades está definido como moderadamente junto, las mediciones efectuadas están en el rango de 15 – 35 cm, su valor en el parámetro tres de la tabla (RMR) es de 10 (zona 1, 3) y 8 (zona 2). En el parámetro que describe las condiciones de las juntas no se detallan los datos como: longitud de la discontinuidad, abertura, rugosidad, relleno y meteorización para cada zona; estos se describen en forma general, zona 1 y 3 como : Ligeramente rugosa, separación < 1mm, muy meteorizada, valor tabla (RMR) igual a 20, para la zona 2 se asigna el



valor de 10 con las siguientes características: espejo o falla, con relleno de espesor < 5 mm, o juntas abiertas 1 – 5 mm.

La clasificación RMR presentada en la tabla 3.3 no considera los factores de ajuste para taludes, debido a que esta se la realizó mediante la clasificación de Romana. La clasificación RMR para las diferentes zonas es la siguiente:

- Zona 1 y 3, rocas de calidad Buena, tipo II, cohesión estimada de 300 – 400 (*KPa*) y un ángulo de fricción de 35° – 45°.
- Zona 2, roca de calidad Media, tipo III, cohesión estimada de 200 – 300 (*KPa*) y un ángulo de fricción de 25° – 35°.

SISTEMA SMR DE ROMANA (1985)

La clasificación de Romana es un método desarrollado en base del RMR de Bieniawski (1973,1976 y 1989) que permite determinar la estabilidad, el tipo de falla y el soporte requerido en los taludes.

Este sistema considera las condiciones de yacencia del talud, las familias de discontinuidades, el RMR básico y el método de excavación, esta expresado por la fórmula 3.1 (Romana, 1985). Los parámetros considerados son:

$$SMR = RMR + (F_1 \cdot F_2 \cdot F_3) + F_4 \quad (3.1)$$

- **F₁**: relación entre el rumbo del talud y el rumbo de las discontinuidades
- **F₂**: dependiente del buzamiento de las discontinuidades, se supone rotura planar
- **F₃**: relación entre el buzamiento del talud y el buzamiento de las discontinuidades



- F_4 : factor empírico que depende del método de arranque empleado, que es voladura ordinaria cuyo valor es de 8 para todas las zonas

El valor asignado a cada uno de los factores (F_1 , F_2 , F_3 y F_4) para cada zona se muestra en la tabla 3.4, las tablas de la clasificación SMR de Romana se muestran en el anexo A.

Tabla 3.4.: Valoración SMR de Romana (Morocho et al., 2010)

	FACTOR DE AJUSTE	VALOR	RESULTADO
Zona 1	$F_1: a_s - a_j : 30^\circ$ Favorable	0.40	$SMR = 66 - 16.8 + 8 = 60.20$
	$F_2: b_j : 35^\circ$ Regular	0.70	Tipo de roca: III
	$F_3: b_j - b_s : - 48^\circ$ Muy Desfavorable	- 60	Descripción: Regular
	F_4 : Voladura ordinaria	8	Estabilidad: Parcial
Zona 2	$F_1: a_s - a_j : 55^\circ$ Muy Favorable	0.15	$SMR = 48 - 0.56 + 8 = 55.44$
	$F_2: b_j : 30^\circ$ Muy Favorable	0.15	Tipo de roca: III
	$F_3: b_j - b_s : 0^\circ$ Regular	- 25	Descripción: Regular
	F_4 : Voladura ordinaria	8	Estabilidad: Parcial
Zona 3	$F_1: a_s - a_j : 5^\circ$ Desfavorable	0.85	$SMR = 72 - 23.15 + 8 = 56.85$
	$F_2: b_j : 80^\circ$ Muy Desfavorable	1.00	Tipo de roca: III
	$F_3: b_j - b_s : - 25^\circ$ Regular	-25	Descripción: Regular
	F_4 : Voladura ordinaria	8	Estabilidad: Parcial

Con la clasificación de Romana la calidad y la estabilidad del macizo rocoso en el talud de la cantera “Las Victorias” se muestran en la tabla 3.4 y se resume a continuación:

- Las tres zonas al aplicar la clasificación SMR se califican como rocas de calidad “Media” con “Estabilidad Parcial”.



3.2. EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS MECÁNICO-ESTRUCTURALES DEL MACIZO ROCOSO

EVALUACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES

Las discontinuidades condicionan las propiedades y el comportamiento resistente, deformacional e hidráulico de los macizos rocosos; por ello es importante definir las características y propiedades de los planos de discontinuidad.

Elementos De Yacencia

Se midieron tres sistemas de discontinuidades (denominados familia 1, 2 y 3) que corresponden únicamente a diaclasas, no se contabilizaron las grietas formadas por acción de la voladura. El buzamiento y la dirección de buzamiento de las discontinuidades se resumen en la tabla 3.5. Su medida se realizó mediante brújula tipo Brunton.

Tabla 3.5.: Familias de discontinuidades presentes en el macizo rocoso de la cantera “Las Victorias”. (Merchán y Sánchez,. 2013)

Familia	Dirección de buzamiento	Ángulo de buzamiento	Espaciamiento de discontinuidades (cm)
1	342 °	N 41 W	27
2	112 °	S 32 E	79
3	160 °	S 10 E	24

Rugosidad

Se ha medido en campo por comparación visual de las discontinuidades con los perfiles estándar de rugosidad (Bieniawski), colocando una regla sobre las rugosidades. La rugosidad se ha clasificado como PLANA-LISA para todas las discon-

tinuidades.



Figura 3.1.: Rugosidad, espaciamiento y alteración en las discontinuidades del macizo rocoso de la cantera “Las Victorias”

Continuidad

La continuidad de la familia uno se estimó con observaciones in situ, debido a que buza en dirección contraria al talud de la cantera. La medida de la continuidad en las familias dos y tres se la realizó con cinta métrica. Su valor está en el rango de 10 – 20 m (Figura 3.2), las tres familias presentan una CONTINUIDAD ALTA.

Abertura

Las aberturas de las discontinuidades se midieron directamente con el calibrador pie de rey. Éstas se encuentran en el rango de 0.1 – 1mm. De acuerdo con las tablas (Bieniawski 1989), se trata de una abertura que varía de PARCIALMENTE ABIERTA a ABIERTA. Se observaron grietas producto de la voladura con abertura mayor a 5 mm, que no se consideran en el análisis (Figura 3.1).

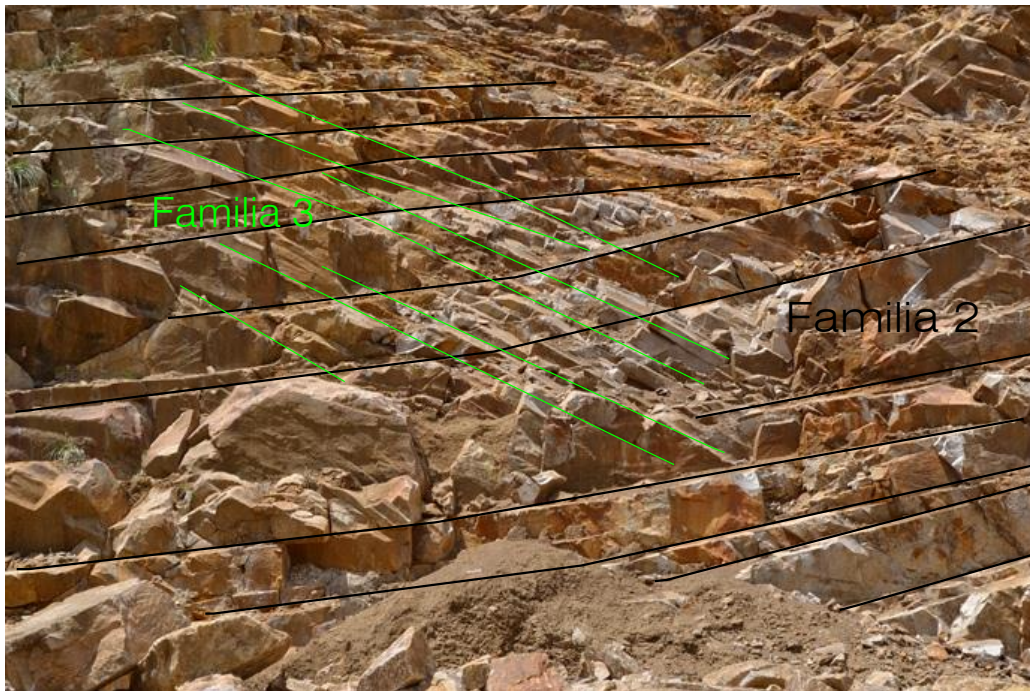


Figura 3.2.: Familia de discontinuidades (dos y tres) del macizo rocoso de la cantera “Las Victorias”

Espaciamiento

El espaciado entre los planos de discontinuidad condicionan el tamaño de los bloques de matriz rocosa y, por lo tanto, define el papel que ésta tendrá en el comportamiento mecánico del macizo rocoso. La medida del espaciado se realizó con una cinta métrica y con la ayuda de una estadia. El espaciado medio de cada familia se muestra en la tabla 3.5, siendo el más desfavorable el obtenido para la familia tres.

Relleno

El relleno proviene de la alteración del material en las paredes de las discontinuidades, debido a la fricción que existe entre ellas y al arrastre de finos por el agua que se filtra por las mismas, encontrándose rellenas de ARCILLA SECA, con tamaño menor a $0,06 \text{ mm}$ de grano en promedio.

Alteración

Se observó que en las paredes de las discontinuidades hay cambios en el color original de la matriz rocosa debido a la oxidación de los minerales que componen la roca, el color observado es: Crema rojizo claro. Al presentar dichos cambios se ha clasificado como LEVEMENTE METEORIZADA de GRADO II (Tabla 2: Grado de meteorización ISRM (1981)).

3.3. IDENTIFICACIÓN DE LAS PRINCIPALES FORMAS DE PÉRDIDA DE ESTABILIDAD

La pérdida de estabilidad, en la cantera “Las Victorias”, se debe a la presencia de tres familias de discontinuidades (tabla 3.5), su orientación con respecto a la cara del talud de la cantera condiciona la presencia de inestabilidad y zonas de rotura. Para identificar las formas de pérdida de estabilidad, se utilizó la proyección estereográfica de las tres familias como se muestra en la figura 3.3 y mediante el análisis o Test de Markland (1976) se determina si se produce la falla.

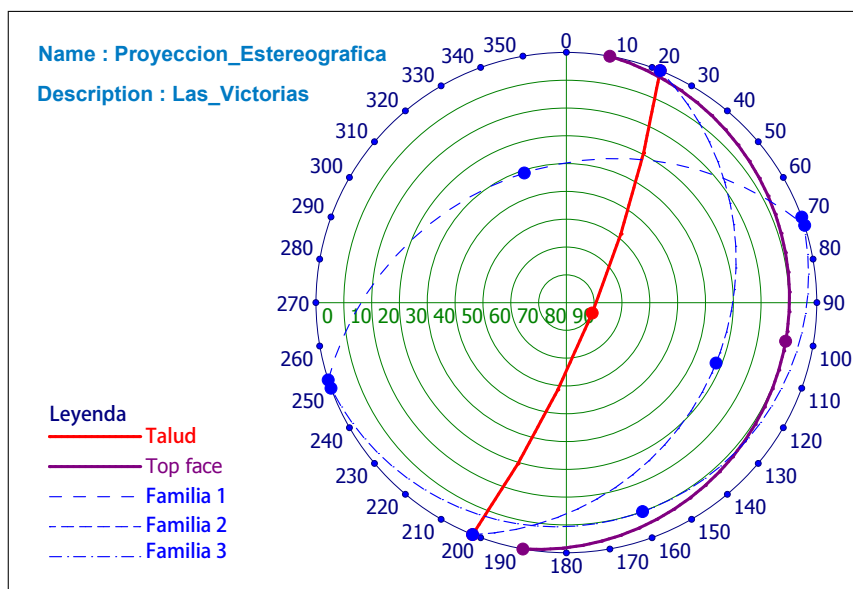


Figura 3.3.: Proyección estereográfica. (Merchán y Sánchez, 2013)

La principal forma de pérdida de estabilidad, es la formación de cuñas que se producen al existir dos planos cuya intersección queda fuera de la superficie abarcada por el plano del talud en la proyección estereográfica como se muestra en la figura 3.4.

La dirección de buzamiento de los planos de discontinuidad está indicada con las letras mayúsculas A, B, C y T para la cara del talud (Figura 3.4). La línea de intersección de los planos de discontinuidad, sobre los que se podría deslizar la cuña, se denomina I y las intersecciones de los planos de discontinuidad con la cara del talud (T), se denominaron Ta y Tb.

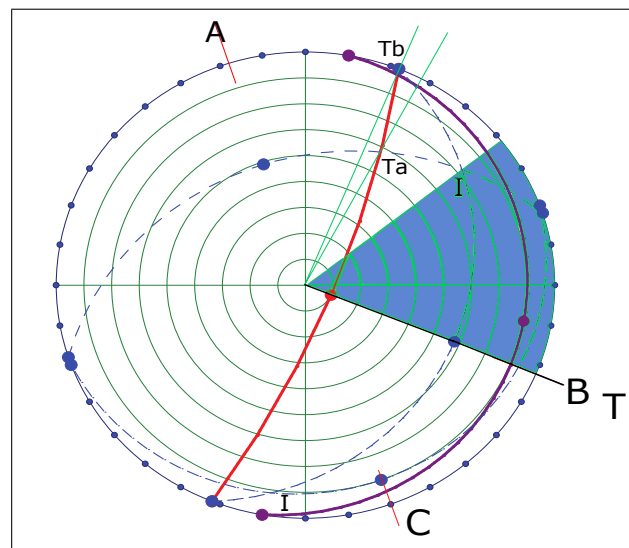


Figura 3.4.: Línea de intersección de los planos A y B (Hoek y Bray, 1974).

Para saber si una cuña se desliza a través de los dos planos de discontinuidad que la forma, o sólo por uno de ellos se utilizó la proyección estereográfica. Diferentes documentos tratan sobre el tema, se ha tomado como base el artículo realizado por Öcal & Özgenoğlu (1997). Según estos autores, para el análisis se sombrea el sector circular comprendido entre la dirección de buzamiento del talud T y la línea de intersección I_{1-2} entre los planos de discontinuidad (Figura 3.4). La dirección de la discontinuidad B está dentro del sector circular sombreado, por lo tanto, se puede producir el deslizamiento plano a través del plano de discontinuidad B.

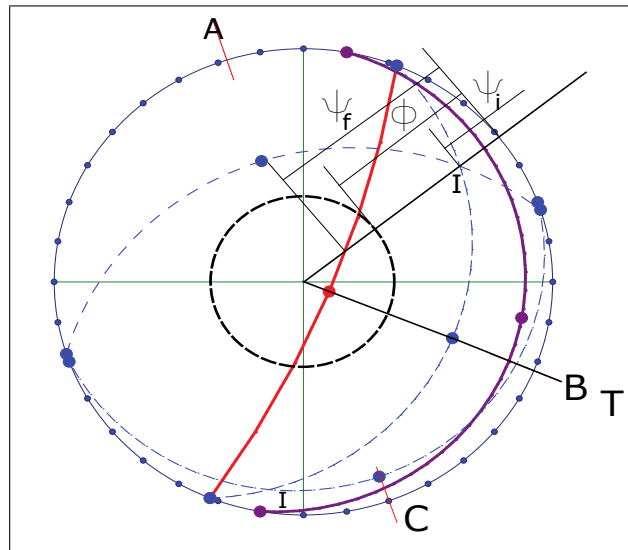


Figura 3.5.: Análisis cinemático o Test de Markland (1976)

Mediante análisis cinemático o Test de Markland (1976) la línea de intersección I_{1-2} no pasa la prueba cinemática, debido a que no se cumplen todos los criterios para que se produzca la falla en el talud, $\psi_f > \psi_i$ ($70^\circ > 18^\circ$). Existen posibilidades de falla pero no necesariamente van a ocurrir. En la figura 3.5 se representa el círculo de fricción interna para un ángulo ($\phi = 57^\circ$), la línea de intersección no se encuentra en la zona formada por la cara del talud y el ángulo de fricción, no se cumple que $\psi_f > \psi_i > \phi$, se dice que el talud es estable.

Otra forma de pérdida de estabilidad se debe a posibles desprendimientos en el macizo rocoso debido al método de arranque por voladura, como se observa en la figura 3.6.



Figura 3.6.: Desprendimientos de roca en la cantera

3.4. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA ROCA QUE CONFORMA EL MACIZO ROCOSO

La resistencia de las rocas, es la propiedad que poseen de asimilar dentro de determinados límites, la acción de esfuerzos y fuerzas exteriores sin destruirse. El valor de la resistencia a compresión uniaxial de las rocas es mayor que la resistencia a la tracción, encontrándose esta en el orden del 1%-12% de la resistencia a compresión.

Las muestras de roca colectadas durante la investigación fueron ensayadas en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad de Cuenca; para determinar las propiedades de resistencia (compresión simple y tracción) de la roca intacta en la cantera "Las Victorias". A partir de las muestras de roca extraídas durante la investigación geotécnica se efectuaron los siguientes ensayos de laboratorio:

- Compresión no confinada en roca intacta
- Ensayo Brasileño (tracción)



Resistencia a compresión

La resistencia a la compresión uniaxial se realiza sobre probetas de roca, este método es el más utilizado para determinar la resistencia a la compresión simple. El ensayo se realizó con muestras cúbicas de 5 cm de arista, ver figura 3.7. Relaciona la carga máxima sobre la muestra (en el momento de su destrucción) y el área transversal de la misma; se determina con la siguiente expresión:

$$R_C = \frac{P_R}{F}$$

R_C : Resistencia a compresión uniaxial de la roca intacta (kgf/cm^2)

P_R : Fuerza de ruptura de la muestra de roca (kgf)

F : Superficie de la sección transversal (cm^2)

Se realizaron cinco ensayos en las muestras de roca intacta sin signos de meteorización, los resultados se observan en la tabla 3.6, donde el valor promedio de la resistencia a compresión uniaxial es 117.25 (MPa) .

Tabla 3.6.: Resultados de los ensayos a compresión simple en las muestras

Código	Sección (cm^2)	Carga Máxima (kgf)	Resistencia a la Compresión (kgf/cm^2)	Resistencia a la Compresión (MPa)
1	24.78	26374	1079.05	105.82
2	24.60	30044	1221.35	119.78
3	24.85	42740	1719.91	168.67
4	25.68	25588	996.32	97.71
5	25.95	24956	961.36	94.28
PROMEDIO			1195.59	117.25



(a) Muestras de roca

(b) Aplicación de la carga



(c) Destrucción de la muestra

Figura 3.7.: Ensayos de compresión simple realizados en el laboratorio

Resistencia a tracción

Para determinar la resistencia a tracción se empleó el **Método brasiliano**, que consistió en ensayar una muestra cilíndrica comprimiéndola por sus generatrices opuestas.

La relación de la longitud de la muestra (l), con su diámetro (d) es igual a 2,0. Se utilizaron testigos de 50 mm de diámetro y 100 mm de longitud.

La resistencia a Tracción se determina mediante la fórmula:

$$R_T = \frac{2 \cdot P_R}{\pi \cdot l \cdot d}$$

R_T : Resistencia a tracción de la roca (kgf/cm^2)

P_R : Fuerza de ruptura de la muestra de roca (kgf)

d : Diámetro de la muestra de roca (cm)

l : Longitud de la muestra de roca (cm)

Se realizaron 6 ensayos, los resultados se muestran en la tabla 3.7, las primeras 3 muestras ensayadas en el laboratorio se encuentran meteorizadas. Se realizaron tres nuevos ensayos donde el valor promedio de la resistencia a tracción es de 10.00 (MPa), en la destrucción de las muestras se pudo constatar el estado intacto de la roca.



(a) Muestras de roca



(b) Aplicación De La Carga



(c) Destrucción De La Muestra

Figura 3.8.: Ensayo de tracción



Tabla 3.7.: Resultados de los ensayos a tracción en las muestras

	Código	Diámetro (<i>cm</i>)	Longitud (<i>cm</i>)	Carga de ruptura (<i>kgf</i>)	Resistencia a la tracción (<i>kgf/cm²</i>)	Resistencia a la tracción (<i>MPa</i>)
Roca sana	T4	5.02	10.07	5252	100.70	9.88
	T5	5.01	9.93	5204	101.34	9.94
	T6	5.04	10.05	5400	103.41	10.14
PROMEDIO					101.82	10.00

Estimación del módulo elástico de Young (E_M)

Debido a la dificultad de obtener el módulo de Young del macizo rocoso, mediante ensayos de laboratorio, por el comportamiento frágil de las muestras de roca, este se ha estimado mediante fórmulas empíricas que lo relacionan con la calidad geotécnica de los macizos rocosos.

Mediante las correlaciones de E_M y RMR de Bieniawski (1978); Serafim y Pereira (1983) que se expresan por las siguientes ecuaciones:

$$E_M(GPa) = 2 \cdot RMR - 100 \quad \text{Bieniawski (1978)} \quad (3.2)$$

$$E_M(GPa) = 10 \frac{RMR - 10}{40} \quad \text{Serafim y Pereira (1983)} \quad (3.3)$$

La ecuación 3.2 tiene validez para $55 < RMR < 100$ y la ecuación 3.3 tiene validez para $10 < RMR < 50$, Ramírez y Alejano (2004) señalan que la ecuación 3.3 esta “basada en la recopilación de resultados de ensayos de placa de carga en un buen número de macizos rocosos de distintas calidades” (p. 116).

Para estimar el módulo de Young en el macizo rocoso estudiado, ocupamos la ecuación 3.2 el valor del RMR se ha obtenido de la tabla 3.9, se debe mencionar que el valor del RMR corresponde al RMR Básico sin considerar el factor de ajuste,



que depende del rumbo y buzamiento de las discontinuidades.

$$E_M(GPa) = 2 \cdot 66 - 100$$

$$E_M(GPa) = 32$$

Estimación del coeficiente de Poisson del macizo rocoso (μ_M)

El valor del coeficiente de Poisson se ha tomado de la Tabla 2.3 del libro “Mecánica de rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes” que se encuentra en el anexo A y que corresponde a la estimación en la roca Andesita.

$$\mu_M = 0.11 - 0.20$$

No se realizaron pruebas en el laboratorio, al no disponer de equipos para medir las deformaciones longitudinales y transversales. Las deformaciones que se producen son pequeñas en las muestras, al llegar los testigos de roca a la resistencia última, su destrucción es de forma frágil.

3.5. CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO

ÍNDICE DE CALIDAD DE LA ROCA “RQD” (1968)

El RQD se ha estimado mediante el parámetro J_v , que representa el número total de discontinuidades que interceptan una unidad de volumen ($1 m^3$) del macizo rocoso. Ante la dificultad de observar tridimensionalmente un afloramiento, el valor de J_v se determinó contando las discontinuidades de cada familia que interceptan una longitud determinada. Su valor fue determinado usando la fórmula 1.2:

$$RQD = 115 - 3.3J_v$$



En donde:

$$J_v = \frac{n^0 J_1}{L_1} + \frac{n^0 J_2}{L_2} + \frac{n^0 J_3}{L_3}$$

$n^0 J_i =$ Número de discontinuidades

$$J_v = \frac{7}{4.71} + \frac{9}{1.92} + \frac{6}{1.34}$$

$L_i =$ Longitud medida

$$J_v = 10,6 \quad \frac{\text{Grietas}}{\text{m}^3}$$

$$RQD = 115 - 3.3 \cdot 10.6$$

$$RQD = 80\%$$

De acuerdo con la clasificación de Deere (1964), la calidad de la roca se considera **BUENA** (80 %).

ROCK MASS RATING "RMR" (1989)

Este sistema de evaluación diseñado por Bieniawski entre 1972 – 1973, modificado en 1989, se sigue utilizando por la precisión y calidad en los resultados que ofrece. Los parámetros que se consideran para este método son:

Resistencia a la compresión uniaxial de la roca

De los ensayos de compresión uniaxial de las muestras (Tabla 3.6). El valor promedio de resistencia a compresión uniaxial de la andesita es de 117.25 MPa, lo que corresponde a una Roca muy Fuerte con una valoración de 12.

Índice de Calidad de la Roca, RQD

De acuerdo al índice de calidad de la roca "RQD" descrita anteriormente, la calidad de la roca se considera Buena (80 %) y su valoración es de 17.

Espaciamiento de las discontinuidades

El espaciamiento de las discontinuidades para cada familia se muestra en la tabla 3.5. La valoración del espaciamiento entre las discontinuidades es de 10, con-



siderando la familia tres como la más desfavorable para la estabilidad del talud (se presenta cada 24 *cm* en el macizo).

Condición de las discontinuidades

La tabla 3.8, contiene las características de las tres familias de discontinuidades observadas, en el acápite 3.3 se encuentran detallados cada uno de los parámetros descritos.

Tabla 3.8.: Características de las discontinuidades del macizo rocoso

Parámetro	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3	Valoración
Long. discont (<i>m</i>)	10 - 20 <i>m</i>	10 - 20 <i>m</i>	10 - 20 <i>m</i>	1
Apertura (<i>mm</i>)	0.1 - 1.0 <i>mm</i>	< 0.1 <i>mm</i>	0.1 - 1.0 <i>mm</i>	4
Rugosidad	Suave	Suave	Suave	0
Relleno	Relleno blando < 5 mm	Relleno blando < 5 mm	Relleno blando < 5 mm	2
Meteorización	Ligeramente alterada	Ligeramente alterada	Ligeramente alterada	5
TOTAL				12

Condiciones del agua subterránea

El macizo rocoso se presenta totalmente seco, por lo tanto su valoración es de 15, según el parámetro cinco de la clasificación geomecánica RMR_{89} .

La valoración total del RMR_{basico} en el macizo rocoso es de 66 y en la tabla 3.9 se muestran los parámetros estudiados con sus respectivos valores.



Tabla 3.9.: Valoración total del macizo rocoso

Resistencia a la compresión uniaxial de la roca	12
RQD	17
Espaciamiento de las discontinuidades	10
Longitud de las discontinuidades	1
Apertura	4
Rugosidad	0
Relleno	2
Alteración	5
Condiciones del agua subterránea	15
TOTAL (RMR)	66

Los resultados que se observan en la Tabla 3.9 dan solamente la valoración RMR_{basico} , sin considerar los factores de ajuste para taludes que se realizarán por la clasificación de Romana SMR.

El RMR, clasifica al macizo rocoso en la categoría II, el cual posee las siguientes características:

- La calidad del macizo rocoso se considera BUENA.
- Se estima una cohesión 300–400 kPa y un ángulo de fricción de 35° – 45° .

ÍNDICE SMR DE ROMANA (1985)

La clasificación SMR se obtiene restando del RMR básico los factores de ajuste como se muestra en la ecuación 3.1.

La dirección de buzamiento y ángulos de buzamiento de las tres familias de discontinuidades se muestran en la tabla 3.5. En base a esta información se han obtenido los factores de ajuste (F_1 , F_2 , F_3) las tablas de la clasificación SMR de Romana se



muestran en el anexo A, para el factor F_4 se consideró que el talud realizado en el macizo rocoso se ha excavado con técnicas de voladura bien ejecutadas = +8. La tabla 3.10 muestra para cada familia los valores de los factores desglosados y el cálculo del SMR para cada familia.

La calidad Buena del macizo rocoso obtenida del índice RMR, al realizar la corrección en las familias se divide en:

- Las familias 1 y 3 en la clasificación SMR se califican como rocas de calidad “Buena” y “Estables”.
- La familia 2 se clasifica como roca de calidad “Mala” e “Inestables”, la mala calidad del macizo rocoso se debe a la dirección de buzamiento de esta familia, que es paralela a la dirección de buzamiento del talud.



Tabla 3.10.: Índice “SMR” macizo rocoso de la cantera “Las Victorias”

	FACTOR DE AJUSTE	VALOR	RESULTADO
Familia 1	F ₁ : $a_a - a_j - 180^\circ : 50^\circ$ Muy Favorable	0.15	$SMR = 66 - 3.75 + 8 = 70.25$
	F ₂ : $b_j : 41^\circ$ Desfavorable	1	Tipo de roca: II
	F ₃ : $b_j - b_s : 121^\circ$ Normal	- 25	Descripción: Buena
	F ₄ : Voladura ordinaria	8	Estabilidad: Estable
Familia 2	F ₁ : $a_a - a_j : 0^\circ$ Muy desfavorable	1	$SMR = 66 - 42 + 8 = 32$
	F ₂ : $b_j : 32^\circ$ Normal	0.7	Tipo de roca: IV
	F ₃ : $b_j - b_s : - 48^\circ$ Muy Desfavorable	- 60	Descripción: Mala
	F ₄ : Voladura ordinaria	8	Estabilidad: Inestable
Familia 3	F ₁ : $a_a - a_j : 48^\circ$ Muy Favorable	0.15	$SMR = 66 - 1.35 + 8 = 72.65$
	F ₂ : $b_j : 10^\circ$ Muy favorable	0.15	Tipo de roca: II
	F ₃ : $b_j - b_s : - 70^\circ$ Muy Desfavorable	- 60	Descripción: Buena
	F ₄ : Voladura ordinaria	8	Estabilidad: Estable



CLASIFICACIÓN DE BARTON, ÍNDICE “Q” (1974)

En esta clasificación se catalogan los macizos rocosos según el denominado índice de calidad Q, basado en los 6 parámetros siguientes:

Índice de calidad de la roca (RQD)

El macizo rocoso posee un *RQD* de **80 %**.

Número de sistemas de fisuras (J_n)

Se midieron tres sistemas de discontinuidades, que corresponden únicamente a las familias. De acuerdo a la tabla del índice de diaclasado J_n , esto representa una valoración de **9.0**.

Rugosidad de las fisuras (J_r)

La tabla del índice de rugosidad de las discontinuidades J_r , muestra las características de las discontinuidades observadas en el macizo rocoso, descritas a continuación:

- Contacto entre las dos caras de la discontinuidad: La rugosidad que se observa es suave plana, lo que corresponde con una valoración de **1.0**.

Alteración de las fisuras (J_a)

Las fisuras se caracterizan por presentar, contactos entre los planos de la discontinuidad (sin minerales de relleno intermedios). Con recubrimientos de arcillas limosas, roca desintegrada; con una fracción pequeña de arcilla (no blanda). Asignándole una valoración de **3.0**.

Factor de reducción por agua en las fisuras (J_w)

El macizo rocoso se presenta totalmente seco, por lo tanto su valoración es de **1.0**.



Factor de reducción por esfuerzos (SRF)

Consideramos que la roca es competente, por lo tanto se determinará el factor SRF a partir de: σ_1 (tensión efectiva normal) y σ_c (resistencia a compresión de la roca).

La tensión efectiva normal puede estimarse como el peso de la columna litostática que actúa sobre la discontinuidad en la cantera. Si se asume un peso específico de $\gamma = 2550 \text{ kg/m}^3$, y una profundidad $Z = 15 \text{ m}$, se obtendrá la tensión efectiva normal que actúa:

$$\sigma_1 = \gamma \cdot g \cdot Z$$

$$\sigma_1 = 2550 \cdot 9.81 \cdot 15$$

$$\sigma_1 = 375232 \text{ N/m}^2 = 0.38 \text{ MPa}$$

$$\sigma_c = 121.87 \text{ MPa}$$

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_1} = 320.71$$

El cociente se encuentra en el rango de tensiones pequeñas cerca de la superficie, por tanto el factor SRF es **2,5**.

El valor del índice Q, se obtiene sustituyendo los siguientes valores:

- $RQD = 80\%$
- $J_r = 1.0$
- $J_n = 9.0$
- $J_a = 3.0$
- $J_w = 1.0$
- $SRF = 2.5$



En la ecuación 1.3:

$$Q = \frac{80}{9.0} \cdot \frac{1.0}{3.0} \cdot \frac{1.0}{2.5}$$

$$Q = 1.18$$

El valor se encuentra en el rango de (1 - 4). De acuerdo a la clasificación de Barton, la calidad del macizo rocoso es Mala.

Correlaciones entre RMR y Q

Las correlaciones entre el RMR y Q obtenidas por diferentes autores, se muestran a continuación:

$$RMR = 9 \cdot \ln Q + 44 \qquad \text{Bieniawski (1976)} \qquad (3.4)$$

$$RMR = 13.5 \cdot \log Q + 43 \qquad \text{Ruteledge (1978)} \qquad (3.5)$$

$$RMR = 12.5 \cdot \log Q + 55.2 \qquad \text{Moreno (1980)} \qquad (3.6)$$

$$RMR = 15 \cdot \log Q + 50 \qquad \text{Bieniawski (2004)} \qquad (3.7)$$

Se sustituye el valor del índice Q en las ecuaciones 3.4–3.7.

$$RMR = 9 \cdot \ln 1.18 + 44 \qquad RMR = 45.48$$

$$RMR = 13.5 \cdot \log 1.18 + 43 \qquad RMR = 43.97$$

$$RMR = 12.5 \cdot \log 1.18 + 55.2 \qquad RMR = 56.09$$

$$RMR = 15 \cdot \log 1.18 + 50 \qquad RMR = 51.07$$

El valor del RMR básico varía entre 43.97 y 56.09, clasificando al macizo rocoso en la categoría III y calidad Media. El rango de valores en las diferentes correlaciones, se debe a que las investigaciones se han realizado en diferentes partes del mundo y tipos de roca.



DETERMINACIÓN DEL GSI (Geological Strength Index)

El GSI es un sistema para la estimación de las propiedades geomecánicas del macizo rocoso a partir de observaciones geológicas de campo. Los dos parámetros que toma en cuenta esta clasificación son los siguientes:

- Estado de fracturamiento
- Calidad de las discontinuidades

Una vez realizadas las observaciones en campo, se escogió basados en la figura 3.9 la situación que está más cercana al estado del macizo en estudio, obteniendo de esta forma, el rango de valores del GSI, que se muestra a continuación:

$$GSI = 55 - 65$$

El valor del índice GSI puede ser estimado directamente de la clasificación de Bieniawski, por la siguiente ecuación:

$$GSI = RMR'_{89} - 5 \quad (3.8)$$

Donde al RMR_{89} se le asigna 15 puntos a la condición de aguas subterráneas y 0 puntos al ajuste por orientación de las discontinuidades, a este valor se lo denomina RMR'_{89} . De la Tabla 3.9 se obtiene el valor del $RMR_{89} = RMR'_{89} = 66$ y se sustituye en la ecuación 3.8

$$GSI = 66 - 5$$

$$GSI = 61$$



El valor del índice GSI define la calidad del macizo rocoso como: Roca fracturada en bloques regulares (**BR**), muy bien entrelazado, consistiendo en bloques formados por tres familias de discontinuidades y la condición de las discontinuidades es Regular (**R**), superficies lisas, moderadamente meteorizadas o alteradas. Que está en el rango del GSI determinado por observaciones de campo.

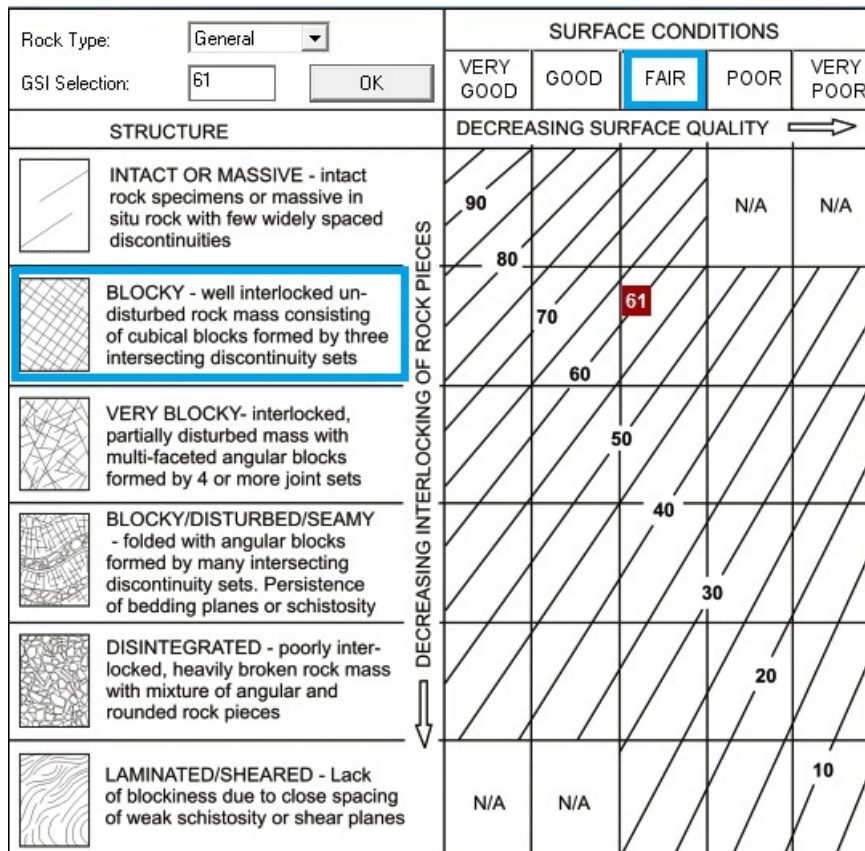


Figura 3.9.: Estimación del GSI, basado en observaciones de campo (Hoek et al., 2002)

ANÁLISIS DE LAS CLASIFICACIONES GEOMECÁNICAS EN EL MACIZO ROCOSO

Al aplicar las diferentes clasificaciones geomecánicas los resultados obtenidos son: de acuerdo al índice RQD se clasifica al macizo rocoso de calidad Buena. La clasificación RMR correspondiente a roca tipo II de calidad Buena, al aplicar la



clasificación de Romana (SMR) la calidad varía roca Mala - Inestable a roca Buena - Estable. El índice Q define al macizo rocoso de calidad Mala. Para el índice GSI el macizo rocoso está en el rango de 55 – 65 (roca fracturada en bloques regulares, muy bien entrelazados con tres familias de discontinuidades).

Al emplear las diferentes clasificaciones en el macizo rocoso en la cantera “Las Victorias”, descritas en el presente trabajo de investigación, se determinará cuál es la representativa de las condiciones actuales en que se encuentra el macizo rocoso. Esto se debe a que los parámetros utilizados en cada clasificación no son los mismos, tienen diferente valor e influencia en el valor global de la clasificación.

Las clasificaciones geomecánicas RMR y SMR son discretas. Por ello, asignan a cada parámetro característico del macizo rocoso una determinada puntuación en función del intervalo al que pertenezca. Para valores próximos a los extremos de cada intervalo de valores se optan generalmente por los valores más desfavorables, que nos sitúan del lado de la seguridad.

El índice Q varía en rangos más amplios que el resto de clasificaciones, es por eso que al correlacionar el índice Q con el RMR sus valores están en el rango de 45 – 51 que corresponde a un macizo rocoso de calidad Media. El índice Q se basa en excavaciones subterráneas en túneles, sus datos y correlaciones no están descritas para taludes.

La clasificación GSI se basa en una observación cuidadosa del macizo rocoso, es esencialmente cualitativa. Este índice incorpora la estructura del mismo y las características geomecánicas de las superficies de discontinuidad existentes en él y se obtiene a partir de un examen visual del macizo rocoso en afloramientos y sondeos.



3.6. ESTIMACIÓN DEL COMPORTAMIENTO GEOMECÁNICO DEL MACIZO ROCOSO

Se evaluará el comportamiento del macizo rocoso, con respecto a sus propiedades elásticas y al criterio de rotura de Mohr-Coulomb.

Criterio de rotura lineal de Mohr-Coulomb

El criterio de rotura de Mohr-Coulomb, asume que el corte en las rocas es producto de la combinación de esfuerzos normales y tangenciales, la ecuación que define la superficie de falla es lineal y tangente a los círculos obtenidos mediante ensayos de resistencia a compresión (sin confinamiento y confinada) y tracción, dicho de otra forma $\tau = f(\sigma)$. La expresión matemática que representa esta función es:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (3.9)$$

Donde:

c : es la cohesión

ϕ : es el ángulo de fricción

τ : es la tensión tangencial

σ_n : es la tensión normal

En la figura 3.10 se aprecia que la ecuación 3.9 de la superficie de rotura es la ecuación de la recta tangente a todos los círculos de falla.

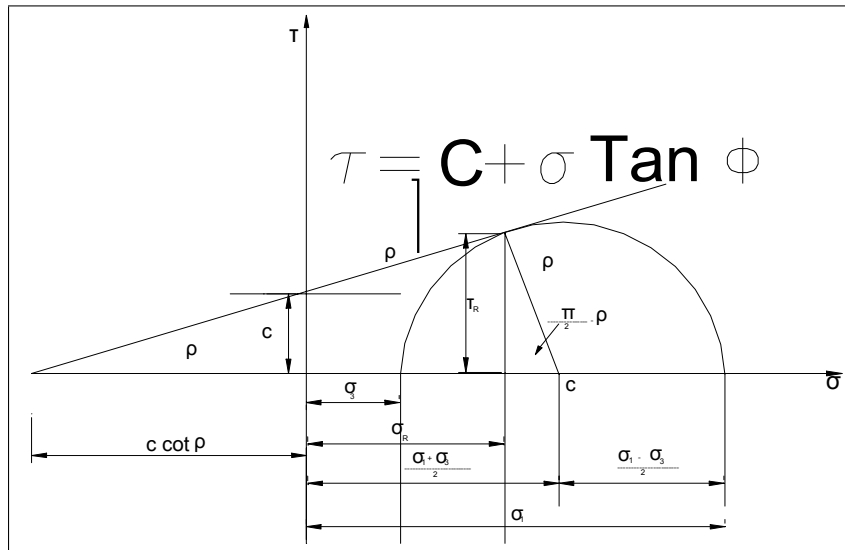


Figura 3.10.: Representación de la envolvente de Mohr-Coulomb en el espacio de tensiones normal y tangencial. Fuente: Geomecánica aplicada a la pequeña minería, Córdoba-Argentina, 2005.

La envolvente de Mohr-Coulomb representa el comportamiento elástico de las rocas. Cualquier combinación de esfuerzos normales y tangenciales que se encuentre debajo de la superficie de falla, están en un estado elástico y si se encuentran sobre esta se producirá la rotura, no pueden darse combinaciones por encima de la superficie de falla ya que la roca habría alcanzado ya la rotura.

Pasaporte de resistencia del macizo rocoso en la cantera “Las Victorias”

Para estimar los parámetros de resistencia del macizo rocoso, se utilizó el criterio de falla de Mohr-Coulomb, mediante la envolvente que se muestra en la figura 3.11 construida a partir de ensayos de resistencia a compresión sin confinamiento y resistencia a tracción (Brasiliano), representa de una forma bastante completa las características de resistencia, por lo que se puede establecer las características de resistencia del macizo, para cualquier tipo de estado tensional.

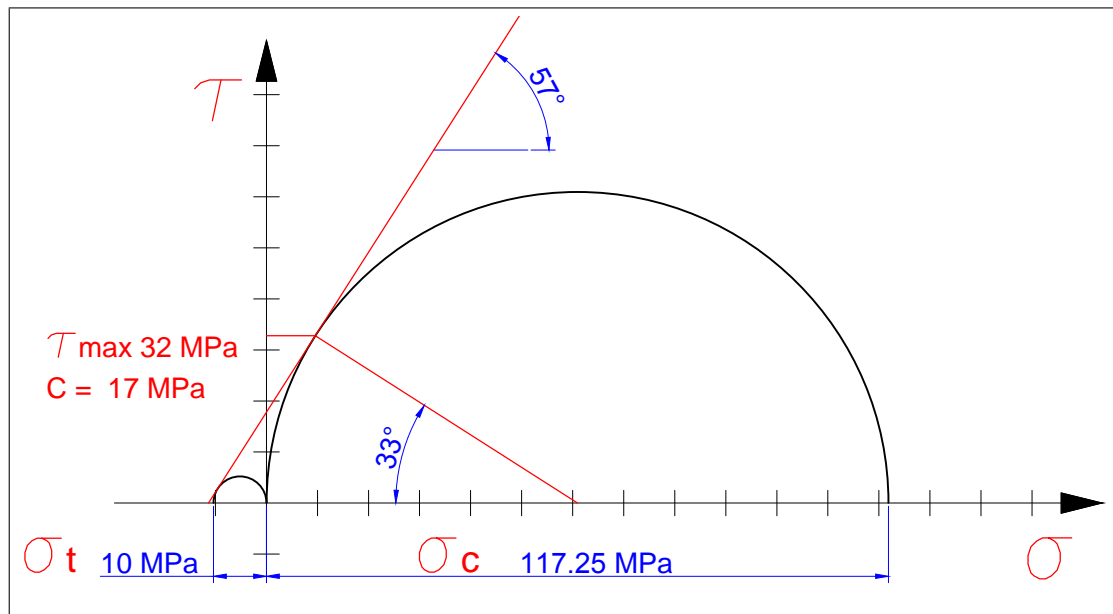


Figura 3.11.: Estimación del comportamiento geomecánico

En la tabla 3.11 se muestran las propiedades de resistencia del macizo rocoso y por otro lado se detallan los valores obtenidos en las diferentes clasificaciones. El módulo de deformación del macizo rocoso ha sido estimado según la correlación propuesta por Bieniawski (1978).

Tabla 3.11.: Parámetros y estimación del comportamiento geomecánico

Características mecánico estructurales											
	σ_c (MPa)	σ_T (MPa)	τ (MPa)	ϕ (°)	C (MPa)	E_M (GPa)	RMR	Q	GSI	RQD	Estimación del comportamiento geomecánico
Andesita	117.25	10	32	57	17	32	66	1.18	55 – 65	80	Elásto - Frágil

- Las propiedades de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción) del macizo rocoso en la zona objeto de estudio, fueron estimadas utilizando el método de Mohr–Coulomb.
- La resistencia a compresión y tracción, se determinó mediante ensayos de laboratorio. Estos valores se ubican en el eje σ (esfuerzos normales) de la



figura 3.11, determinan el esfuerzo de corte máximo y definen la ecuación de la superficie de fluencia

- La clasificación RMR básica clasifica al macizo rocoso de calidad Buena. Al aplicar la clasificación de Romana (SMR) la calidad varía de Mala a Buena.
- El índice RQD clasifica al macizo rocoso de calidad Buena
- El índice Q clasifica al macizo rocoso de calidad Mala
- El rango del índice GSI clasifica al macizo rocoso como: Roca fracturada en bloques regulares (BR) y la condición de las discontinuidades Regular (R).



CONCLUSIONES

- En el macizo rocoso en la zona objeto de estudio está conformado por dos formaciones, cuyo contacto es vertical y encontrándose fracturado producto de la actividad tectónica de la cordillera de los Andes y por efectos de la voladura. Se encuentran Argilitas estratificadas con estructura laminar y Andesitas poco meteorizadas, siendo estas últimas el material explotable.
- Las familias de discontinuidades presentes en el macizo rocoso, influyen en su comportamiento y calidad global. La principal forma de pérdida de estabilidad se debe a la formación de cuñas. Las propiedades mecánicas de la Andesita corresponde a rocas de resistencia alta y el macizo rocoso presenta fracturamiento en bloques regulares.
- En general, las clasificaciones geomecánicas con mejores resultados de aplicación son las de Bieniawski (RMR básico), Romana (SMR) y el índice de resistencia geológica (GSI) basado en el estado de fracturamiento y calidad de las discontinuidades. Se clasifica al macizo rocoso de la cantera “Las Victorias” de calidad Media y comportamiento Elasto–Frágil.

La clasificación de Barton (Q), presentó resultados que eran incompatibles con las observaciones de campo, respecto a la Andesita que conforma el macizo rocoso. En primer lugar el espaciado de las discontinuidades no se considera directamente del índice Q, aunque es considerado en el RQD. En segundo lugar la resistencia de la roca intacta y grado de meteorización no se tienen en cuenta directamente en la clasificación, además no se tiene en cuenta la orientación de las discontinuidades con respecto al talud de la cantera.



RECOMENDACIONES

- El análisis de esfuerzos realizado en el sistema de clasificación geomecánica Q a través del SRF (Factor de Reducción por esfuerzos) es estimado. Se debería realizar un análisis de los esfuerzos in situ que afectan al macizo rocoso, ya que este se comporta diferente con la magnitud y dirección de los esfuerzos.
- Los parámetros que intervienen en las clasificaciones RMR, Q índice de Barton y GSI en el campo, deben tener similitud y si existen dudas sobre la valoración de las discontinuidades o del macizo estas deben ser aclaradas en el campo y no cuando se hace el trabajo de oficina. Malas interpretaciones de datos llevan a resultados inesperados, con la consiguiente pérdida de tiempo.
- En la estimación de la calidad geomecánica del macizo rocoso, se emplean las diferentes clasificaciones que se usan en la actualidad y que han sido probadas en muchas obras a nivel mundial. Pero tomando en cuenta las limitaciones que tiene cada una.
- La implementación y utilización de los resultados obtenidos por la empresa a la que pertenece el macizo rocoso estudiado.



ANEXOS



A. Tablas de las clasificaciones geomecánicas

Tablas A. Clasificación Bieniawski “R.M.R”

Tablas B. Clasificación Romana “S.M.R”

Tablas C. Clasificación de Barton índice “Q”

Tabla D. Libro Mecánica de rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes



Clasificación "RMR" Bieniaswki (1989)

Tabla A.1 Clasificación Geomecánica RMR (Bieniaswki,1989).

A. PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN CON SUS VALORES									
Parámetros			Rango de Valores						
1	Resistencia de la roca intacta	Índice de Resistencia de Carga Puntual (Is)	> 10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 Mpa	1-2 MPa	Para estos rangos es recomendable ensayos de resistencia a la compresión uniaxial		
		Resistencia a la compresión uniaxial	> 250 MPa	100 - 250 Mpa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5 -25 Mpa	1 - 5 Mpa	<1 MPa
Puntaje			15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	<25		
	Puntaje		20	17	13	8	3		
3	Espaciado de las discontinuidades		> 2 m	0.6 - 2 m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm		
	Puntaje		20	15	10	8	5		
4	Condiciones de las discontinuidades (ver E)		Superficies muy rugosas, sin continuidad, sin separación, paredes de rocas sin alteración.	Superficies rugosas, con separación < 1mm. Paredes de roca ligeramente meteorizadas.	Superficies ligeramente rugosas, con separación < 1mm. Paredes altamente meteorizadas.	Superficies pulidas o relleno < 5 mm de espesor o separación 1-5 mm. Continuas.	Relleno blando > 5 mm de espesor. Separación > 5 mm. Continuas.		
	Puntaje		30	25	20	10	0		
5	Agua Subterránea	Flujo por cada 10 m de longitud del túnel (l/min).	Ninguno	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
		(Presión de agua en diaci.)/(Tensión principal mayor σ)	0	< 0.1	1.0 - 2.0	0.2 - 0.5	> 0.5		
	Condiciones Generales		Completamente seco	Húmedo	Mojado	Goteo	Flujo		
	Puntaje		15	10	7	4	0		
B. AJUSTE DE LA ORIENTACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES									
Orientación del rumbo y buzamiento.			Muy Favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy Desfavorable		
Puntaje	Túneles y Minas		0	-2	-5	-10	-12		
	Cimentaciones		0	-2	-7	-15	-25		
	Taludes		0	-5	-25	-50	-60		
C. TIPOS DE MACIZOS ROCOSOS DETERMINADOS A PARTIR DE LA VALUACIÓN TOTAL									
Puntaje			100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	< 21		
Tipos de Roca			I	II	III	IV	V		
Descripción			Muy Buena	Buena	Regular	Mala	Muy Mala		
D. SIGNIFICADOS DE LOS TIPOS DE ROCA									
Tipo de Roca			I	II	III	IV	V		
Tiempo medio de sostén			20 años, claro de 15 m	1 año, claro de 10 m	1 semana, claro de 5m	10 horas, claro de 2.5 m	30 min, claro de 1 m		
Cohesion del macizo rocoso (kPa)			> 400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	< 100		
Ángulo de fricción del macizo rocoso (*)			> 45	35 - 45	25 - 35	15 - 25	< 15		
E. GUÍAS PARA LA CLASIFICACIÓN SEGÚN LAS CONDICIONES DE LAS DISCONTINUIDADES									
Longitud (Persistencia)			< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m		
Puntaje			6	4	2	1	0		
Separación (abertura)			Ninguna	< 0.1 mm	0.1 - 1.0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm		
Puntaje			6	5	4	1	0		
Rugosidad			Muy Rugosa	Rugosa	Ligeramente Rugosa	Lisa	Superficies pulidas		
Puntaje			6	5	3	1	0		
Relleno			Ninguno	Duro < 5 mm	Duro > 5 mm	Blando < 5 mm	Blando > 5 mm		
Puntaje			6	4	2	2	0		
Meteorización			Inalterada	Ligeramente meteorizada	Moderadamente meteorizada	Altamente meteorizada	Descompuesta		
Puntaje			6	5	3	1	0		
F. EFECTO DE ORIENTACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES DEL RUMBO Y BUZAMIENTO EN TÚNELES**									
Rumbo perpendicular al eje del túnel				Rumbo paralelo al eje del túnel					
Avance en el sentido del buzamiento - Buz. 45 - 90°			Avance en el sentido del buzamiento - Buz. 20 - 45°		Buzamiento 45 - 90°		Buzamiento 20 - 45°		
Muy Favorable			Favorable		Muy desfavorable		Regular		
Avance contra el sentido del buzamiento - Buz. 45 - 90°			Avance contra el sentido del buzamiento - Buz. 20 - 45°		Buzamiento 0 - 20° Independiente del rumbo				
Regular			Desfavorable		Regular				



Clasificación "SMR" Romana (1985)

En la Tabla B.1 se presentan los valores de los factores F₁, F₂ y F₃ y en la Tabla B.2 del factor F₄.

Tabla B.1. Factor de ajuste de las juntas (Romana, 1985)

Caso		Muy favorable	Favorable	Normal	Desfavorable	Muy desfavorable
P	$ \alpha_j - \alpha_s $	>30°	30°-20°	20°-10°	10°-5°	<5°
T	$ \alpha_j - \alpha_s - 180° $					
P/T	F ₁	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
P	$ \beta_j $	<20°	20°-30°	30°-35°	35°-45°	>45°
	F ₂	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
T	F ₂	1	1	1	1	1
P	$\beta_j - \beta_s$	>10°	10°-0	0°	0-(-10°)	<-10°
	$\beta_j + \beta_s$	<110°	110°-120°	>120°		-
P/T	F ₃	0	-5	-25	-50	-60

P = Rotura plana

T = Rotura por vuelco

α_s = Dirección de buzamiento del talud

α_j = Dirección de buzamiento de las juntas

β_s = Buzamiento del talud

β_j = Buzamiento de las juntas

Tabla B.2. Factor de ajuste según el método de excavación. (Romana, 1985)

METODO	TALUD NATURAL	PRECORTE	VOLADURA SUAVE	VOLADURA O MECANICO	VOLADURA DEFICIENTE
F ₄	+15	+10	+8	0	-8

Tabla B.3. Clases de estabilidad. (Romana, 1985)

CASO	V	IV	III	II	I
SMR	0 - 20	21 - 40	41 - 60	61 - 80	81 - 100
Descripción	Muy mala	Mala	Normal	Buena	Muy buena
Estabilidad	Totalmente inestable	Inestable	Parcialmente estable	Buena	Muy buena
Roturas	Grandes roturas por planos continuos o por masa	Juntas o grandes cuñas	Algunas juntas o muchas cuñas	Algunos bloques	Ninguna
Tratamiento	Reexcavación	Corrección	Sistemático	Ocasional	Ninguno



Clasificación "Q" de Barton et al. (1974)

El índice de calidad Q del macizo rocoso, se deduce que éste oscila entre 10^{-3} y 10^3 . Según los valores de Q, se clasifican los macizos rocosos en nueve categorías Tabla C.1.

Tabla C.1 Clasificación de Barton et al. (1974) de los macizos rocosos. Tipos de macizos rocosos.

TIPO DE MACIZO	VALOR DE Q
Excepcionalmente malo	$10^{-3} - 10^{-2}$
Extremadamente malo	$10^{-2} - 10^{-1}$
Muy malo	$10^{-1} - 1$
Malo	1 - 4
Medio	4 - 10
Bueno	10 - 40
Muy bueno	40 - 100
Extremadamente bueno	100 - 400
Excepcionalmente bueno	400 - 1000

En las Tablas C.2 a C.6 se presentan los valores de todos los parámetros que intervienen en clasificación de Barton

Tabla C.2 Clasificación de Barton et al. (1974) Número de familias de Juntas. J_n

DESCRIPCIÓN	J_n
- Roca masiva	0,5-1
- Una familia de diaclasas	2
- Una familia y algunas juntas ocasionales	3
- Dos familias	4
- Dos familias y algunas juntas	6
- Tres familias	9
- Tres familias y algunas juntas	12
- Cuatro o más familias, roca muy fracturada, "terrones de azúcar", etc.	15
- Roca triturada terrosa	20
En boquillas, se utiliza $2 J_n$ y en intersecciones de túneles $3 J_n$	

Los rangos de variación de los parámetros son los siguientes:

RQD	0 - 100
J_n	0,5 - 20
J_r	0,5 - 4
J_a	0,75 - 20
J_w	0,05 - 1
SRF	0,5 - 20



Tabla C.3. Clasificación de Barton et al. (1974) Meteorización de las juntas. J_a

DESCRIPCIÓN	J _a	Φ _r
* Contacto entre las dos caras de la junta.		
- Junta sellada dura, sin reblandecimiento, impermeable, p.ej. cuarzo, paredes sanas.	0,75	
- Caras de la junta únicamente manchadas.	1	25-30
- Las caras de la junta están alteradas ligeramente y contienen minerales no reblandecibles, partículas de arena, roca desintegrada libre de arcilla, etc.	2	25-30
- Recubrimiento de limo o arena arcillosa, pequeña fracción arcillosa no reblandecible.	3	20-25
- Recubrimiento de minerales arcillosos blandos o de baja fricción, p.ej. caolinita, mica, clorita, talco, yeso, grafito, etc. y pequeñas cantidades de arcillas expansivas. Los recubrimientos son discontinuos con espesores máximos de 1 ó 2 mm.	4	8-16
*Contacto entre las dos caras de la junta con menos de 10 cm de desplazamiento.	J _a	Φ _r
- Partículas de arena, roca desintegrada libre de arcilla.	4	25-30
- Rellenos de minerales arcillosos no reblandecidos, fuertemente sobreconsolidados. Los recubrimientos son continuos de menos de 5 mm de espesor.	6	16-24
- Sobreconsolidación media o baja, reblandecimiento; rellenos de minerales arcillosos. Los recubrimientos son continuos de menos de 5 mm de espesor.	8	12-16
- Rellenos de arcillas expansivas, p.ej. montmorillonita, de espesor continuo de 5 mm. El valor J _a depende del porcentaje de partículas del tamaño de la arcilla expansiva.	8-12	6-12
* No existe contacto entre las dos caras de la junta cuando ésta ha sufrido un desplazamiento cortante.	J _a	Φ _r
- Zonas o bandas de roca desintegrada o roca machacada y arcilla.	6-8 u 8-12	6-24 "
- Zonas blandas de arcilla limosa o arenosa con pequeña fracción de arcilla, sin reblandecimiento.	5	6-24
- Milonitos arcillosos gruesos	10-13 ó 13-20	6-24 "



Tabla C.4 Clasificación de Barton et al. (1974) Rugosidad de las juntas. J_r

DESCRIPCIÓN	J_r
* Contacto entre las dos caras de la junta mediante un desplazamiento cortante de menos de 10 cm	
- Juntas discontinuas	4
- Junta rugosa o irregular ondulada	3
- Suave ondulada	2
- Espejo de falla, ondulada	1,5
- Rugosa o irregular, plana	1,5
- Suave plana	1
- Espejo de falla, plana	0,5
* No existe contacto entre las dos caras de la junta cuando ambas se desplazan lateralmente	J_r
- Zona conteniendo minerales arcillosos, suficientemente gruesa para impedir el contacto entre las caras de la junta	1
- Arenas, gravas o zona fallada suficientemente gruesa para impedir el contacto entre las dos caras de la junta	1
NOTA: Si el espaciado de la familia de juntas es mayor de 3 m hay que aumentar el J_r en una unidad. Para juntas planas con espejo de falla provisto de lineaciones, si éstas están orientadas en la dirección de mínima resistencia, se puede usar $J_r=0,5$	

Tabla C.5 Clasificación de Barton et al. (1974) Agua en las juntas. J_w

DESCRIPCIÓN	J_w	Presión agua kg/cm ²
- Excavaciones secas o de fluencia poco importante, p.ej. menos de 5 l/min localmente.	1	<1
- Fluencia o presión medias, ocasional lavado de los rellenos de las juntas.	0,66	1-2,5
- Fluencia grande o presión alta; considerable lavado de los rellenos de las juntas.	0,33*	2,5-10
- Fluencia o presión de agua excepcionalmente altas al dar las pegas, decayendo con el tiempo.	0,1-0,2*	>10
- Fluencia o presión de agua excepcionalmente altas y continuas, sin disminución.	0,05-0,1*	>10
Los valores presentados con el signo * son sólo valores estimativos. Si se instalan elementos de drenaje, hay que aumentar J_w . Los problemas causados por la formación de hielo no se consideran.		



Tabla C.6 Clasificación de Barton et al. (1974) Tensiones en la excavación. S.R.F.

DESCRIPCIÓN			
1. Zonas débiles que intersectan la excavación y pueden causar caídas de bloques, según avanza la misma.			SRF
A Varias zonas débiles conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente, roca muy suelta alrededor (cualquier profundidad).			10
B Sólo una zona débil conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente (profundidad de excavación menor de 50 m).			5
C Sólo una zona débil conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente (profundidad de excavación mayor de 50 m).			2,5
D Varias zonas de fractura en roca competente (libre de arcilla), roca suelta alrededor (cualquier profundidad).			7,5
E Sólo una zona fracturada en roca competente (libre de arcilla), (profundidad de excavación menor de 50 m).			5
F Sólo una zona fracturada en roca competente (libre de arcilla), (profundidad mayor de 50 m).			2,5
G Juntas abiertas sueltas, muy fracturadas, etc. (cualquier profundidad).			5
2. Rocas competentes, problemas de tensiones en las rocas.	σ_c/σ_1	σ_t/σ_1	SRF
H Tensiones pequeñas cerca de la superficie.	>200	>13	2,5
J Tensiones medias.	200-10	13-0,66	1,0
K Tensiones altas, estructura muy compacta (normalmente favorable para la estabilidad, puede ser desfavorable para la estabilidad de los hastiales).	10-5	0,66-0,33	0,5-2,0
L Explosión de roca suave (roca masiva).	5-2,5	0,33-0,16	5-10
M Explosión de roca fuerte (roca masiva).	<2,5	<0,16	10-20
σ_c y σ_t son las resistencias a compresión y tracción, respectivamente, de la roca; σ_1 es la tensión principal máxima que actúa sobre la roca.			
3. Roca fluyente, flujo plástico de roca incompetente bajo la influencia de altas presiones litostáticas.			SRF
N Presión de flujo suave.			5-10
O Presión de flujo intensa.			10-20
4. Rocas expansivas, actividad expansiva química dependiendo de la presencia de agua.			SRF
P Presión de expansión suave.			5-10
R Presión de expansión intensa.			10-20
- Observaciones al SRF:			
i Reducir los valores del SRF en un 25-50% si las zonas de rotura sólo influyen pero no intersectan a la excavación.			
ii En los casos en que la profundidad de la clave del túnel sea inferior a la anchura del mismo, se sugiere aumentar el SRF de 2,5 a 5 (ver H).			
iii Para campos de tensiones muy anisótropos (si se miden) cuando $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$, reducir σ_c y σ_t a 0,8 σ_c y 0,8 σ_t ; cuando $\sigma_1/\sigma_3 > 10$, reducir σ_c y σ_t a 0,2 σ_c y 0,6 σ_t , donde σ_3 es la tensión principal mínima que actúa sobre la roca.			



TABLA D.1. Propiedades físicas y mecánicas de diversas rocas del libro "Mecánica de rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes"

ROCAS	DENSIDAD (kg/m ³)	MÓDULO DE YOUNG (GPa)	COEFICIENTE DE POISSON	POROSIDAD %	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (MPa)	RESISENCIA A TRACCIÓN (MPa)	RESISENCIA A FLEXIÓN (MPa)
Rocas batolíticas							
Granito granodiorita	2500-2750	30-70	0,12-0,25	0,1-2	120-280	4-7	10-20
Gabro	2920-3050	60-100	0,12-0,25	2-5	150-200	5-8	10-22
Rocas extrusivas							
Riolitas	2450-2600	10-20	0,1-0,2	0,4-4	80-160	5-9	10-22
Dacita	2500-2750	8-18	0,09-0,2	0,5-5	80-160	3-8	9-20
Andesita	2300-2750	12-35	0,11-0,2	0,2-8	40-320	5-11	13-25
Basalto	2750-3000	20-100	0,14-0,2	0,2-1,5	30-420	6-12	14-26
Diabasa	2900-3100	30-90	0,12-0,2	0,3-0,7	120-250	6-13	12-26
Tobas volcánicas	1300-2200	-----	0,1-0,2	8-35	5-60	0,5-4,5	3-8
Rocas sedimentarias							
Arenisca	2100-2500	15-17	0,07-0,12	1-8	10-120	1,5-6	4-16
Caliza de grano fino	2600-2850	50-80	0,1-0,2	0,1-0,8	50-200	4-7	5-15
Caliza de grano grueso	1550-2300	-----	12	2-16	4-60	1-3,5	2,5-7
Caliza	1550-2500	-----	0,07-0,12	1,5-6	49-200	1,5-5	3-9
Dolomita	2200-2700	20-30	0,08-0,2	0,2-4	15-200	2,5-6	4-16
Esquistos	2450-2750	-----	-----	0,2-0,4	-----	-----	20-30
Rocas metamórficas							
Mármol	2650-2750	60-90	0,11-0,2	0,1-0,5	50-180	5-8	8-12
Gneis	2600-2780	25-60	0,09-0,2	1-5	80-250	4-7	8-20



B. Ensayos de Laboratorio

Ensayo resistencia a Compresión

Ensayo resistencia a Tracción



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES

Pruebas de Resistencia a Compresión Uniaxial.

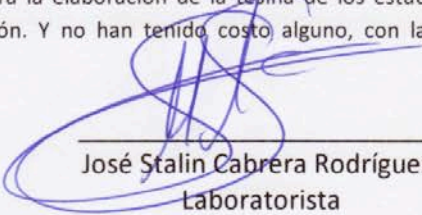
PROYECTO: CANTERA LAS VICTORIAS FECHA: JULIO DEL 2013

UBICACIÓN: Prov. Del Azuay, sector El Descanso

No. DE ENSAYO	1	2	3	4	5
	DIMENSIONES DE LA PROBETA (cm)				
Longitud 1	4.985	4.91	4.99	5.09	5.09
Longitud 2	4.97	5.01	4.98	5.046	5.1

No. DE ENSAYO	1	2	3	4	5
DEFORMACIÓN (x 0.001")	CARGA (kg)				
0	0	0	0	0	0
5	143	748	4500	17	41
10	241	9000	6800	48	450
15	384	16000	11000	177	755
20	755	23000	18000	486	809
25	780	30000	26000	812	809
30	1900		35000	880	8800
35	2400			6000	16000
40	3100			11000	24000
45	3900			18000	
50	5500			25000	
55	9400				
60	14000				
65	18000				
70	19000				
No. DE ENSAYO	1	2	3	4	5
	CARGA MÁXIMA (kg)				
	26734	30044	42740	25588	24956

Los ensayos se han realizado para la elaboración de la tesis de los estudiantes: Vladimir Ernesto Guamán García y Francisco Antonio Mendieta Girón. Y no han tenido costo alguno, con la ayuda de José Stalin Cabrera Rodríguez, laboratorista.


José Stalin Cabrera Rodríguez.
Laboratorista

Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316

Vladimir Ernesto Guamán García
Francisco Antonio Mendieta Girón

e-mail: cdjvbv@ucuenca.edu.ec casilla No. 1103
Cuenca - Ecuador



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES

Pruebas de Resistencia a Tracción (Método Brasileño).

PROYECTO: CANTERA LAS VICTORIAS **FECHA:** JULIO DEL 2013

UBICACIÓN: Prov. Del Azuay, sector El Descanso

No. DE ENSAYO	1	2	3	4	5	6
DIMENSIONES DE LA PROBETA (cm)						
Diámetro	5.10	4.88	5.07	5.02	5.01	5.04
Longitud	5.09	5.07	5.06	10.07	9.93	10.05

No. DE ENSAYO	1	2	3	4	5	6
CARGA MÁXIMA (kg)						
	1798	2114	1380	5252	5204	5400

Los ensayos se han realizado para la elaboración de la tesina de los estudiantes: Vladimir Ernesto Guamán García y Francisco Antonio Mendieta Girón. Y no han tenido costo alguno, con la ayuda de José Stalin Cabrera Rodríguez, laboratorista.



José Stalin Cabrera Rodríguez.
Laboratorista responsable.

Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316

e-mail cdjbv@ucuenca.edu.ec casilla No. 1103

Vladimir Ernesto Guamán García
Francisco Antonio Mendieta Girón

Cuenca - Ecuador



BIBLIOGRAFÍA

[“Cátedra de geotecnia I”, 2010] Anónimo. (2010). *Cátedra de geotecnia I: Macizos rocosos*. Universidad Nacional de Córdoba-Argentina. Recuperada en Julio de 2013, de <http://www.fotomap-geo.com/files/003-2010-1GEO1-CUAD1-MACIZOS.pdf>.

[“El sostenimiento de túneles”, n.f.] Anónimo, (n.f). *El sostenimiento de túneles basado en las clasificaciones geomecánicas*. Publicada en el portal electrónico de la Universidad Politécnica de Cataluña. Recuperada en Julio de 2013, de <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6215/1/00.pdf>.

[Bieniawski, 1979] Bieniawski, Z. (1979). *The geomechanics classification in rock engineering applications*. In *4th ISRM Congress, The Pennsylvania State University University Park*. International Society for Rock Mechanics.

[Bieniawski, 1989] Bieniawski, Z. (1989). *Engineering rock mass classifications*. John Wiley and Sons Inc. New York, NY.

[Blanco, 2013] Blanco, R. (2013). *Curso de graduación: Diseño y construcción de obras de minería*. Catedra: Propiedades de las rocas y del macizo rocoso. Cuenca: escuela de Ingeniería, Universidad de Cuenca.

[Blanco, 1998] Blanco, R. (1998). *Elementos de la mecánica de los macizos rocosos*. Ed. Felix Varela, La Habana.

[Barton, 1974] Barton, N., Lien, R. y Lunde, J. (1974). *Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support*. *Rock mechanics*, 6(4), pp.189– 236.



- [Boluchof, 1982] Boluchof, N. (1982). *Mecánica de obras subterráneas*. Niedra, Moscú.,
- [Cartaya, 2006] Cartaya, M. (2006) *Caracterización geomecánica de macizos rocosos en obras subterráneas de la región oriental de país*. (Resumen de tesis doctoral, 2001). (Num. 3 Vol.22) Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba.
- [TRANSELECTRIC S.A., 2003] Consultora ESINGECO Cía. Ltda. (2003). *El Estudio de Impacto Ambiental Preliminar (EIAP) del proyecto de la Línea de Transmisión Paute-Cuenca y subestaciones Shoray y El Salado*. Recuperada en Julio de 2013, de http://www.transelectric.com.ec/transelectric_portal/files/cap%204%20caracterizacion%20ambiental.pdf.
- [Deere, 1968] Deere, D. (1968) *Geological considerations*. In: *Rock mechanics in engineering practice*. Division of Civil Engineering, School of Engineering, University of Wales, Swansea, John Wiley & sons.
- [Cuenca del Río Paute, 2011] Ecuador, Corporación eléctrica del Ecuador, Hidropaute (2011). *Cuenca del Río Paute, Descripción General de la Cuenca del Río Paute*. Recuperada en Julio de 2013, de <http://www.celec.com.ec/hidropaute/index.php/es/hidrologia>.
- [Estupiñan, 2013] Estupiñan, R. (2013). *Borrador de auditoría ambiental*. Reporte técnico, HORMICRETO CIA. LTDA.
- [Vallejo, 1998] González de Vallejo, L. (1998) *Las Clasificaciones Geomecánicas para Túneles*. Ed. Lopez Jimeno.
- [Vallejo, 1997] Hudson, J. (1997). *Engineering Rock Mechanics: An Introduction to the Principles*. Ed. Pergamon, 1997.
- [Hoek et al, 2002] Hoek, E., Carranza-Torres, C., y Corkum, B. (2002). *Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition*. In: *Proceedings of the 5th*



North American Rock Mechanics Symposium and 17th Tunnelling Association of Canada Conference: NARMS-TAC 2002, July 7-10, University of Toronto, pp. 267-271.

Instituto Geográfico Militar IGM, Mapa geológico, NV-E AZOGUES HOJA 73, escala 1:100000.

[ISMR, 1981] ISMR. (1981). *Basic geotechnical description of rock masses*.

International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences and Geomechanics Abstracts.

[Kirsten, 1988] Kirsten, H. (1988). *Discussion rock classification systems for engineering purposes*. ASTM STP 984, pp. 32–33, 85–87.

[Lauffer, 1972] Lauffer, H. (1972). *Gebirgsklassifizierung für den stollenbau*. *Geologie und Bauwesen*, 24(1): pp. 43–64.

[Markland, 1972] Markland, J. (1972). *A useful technique for estimating the stability of rock slopes when the rigid wedge sliding type of failure is expected*. Imperial College Rock Mechanics.

[Morocho et al., 2010] Morocho, N., Jaramillo, J, y Proaño, J. (2010) *Determinación del factor de seguridad para taludes anisotrópicos en las áreas mineras “Victoria i” y “Victoria ii”, utilizando los sistemas de evaluación de Bieniawski y Romana y método de cálculo de Li, Merifield y Lyamin*, pp. 1-8.

[Montalar, 2009] Montalar, E. (2009). *Una breve historia de la mecánica de rocas*. Recuperada en Julio de 2013, de <http://enriquemontalar.com/mecanica-de-rocas-historia-ii/>.

[Merchán y Sánchez, 2013] Merchán, J. y Sánchez, D. (2013). *Evaluación de la estabilidad de los taludes en un sector de la cantera de materiales pétreos “las victorias”*. Tesina para obtener el título de Ingeniero Civil, Escuela de Civil, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.



- [Mullo, 2012] Mullo, F. (2012). *Empleo de las clasificaciones geomecánicas, para la Investigación del comportamiento geotécnico de las Excavaciones subterráneas en la central hidroeléctrica Coca Codo Sinclair 1500 mw*. Tesina para obtener el título de Ingeniero Geólogo, Escuela de Geología, Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador.
- [Plaxis] Programa computacional PLAXIS. Brinkgreve Delft University of Technology & PLAXIS b.v. The Netherlands.
- [Protodyakonov] Protodyakonov, M. (n.d) *Klassifikacija Gorotworu*. Moscu.
- [Ramírez y Alejano, 2004] Ramírez, P. y Alejano, L. (2004). *Mecánica de rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes*. Red DESIR.
- [Romana, 1985] Romana, M. *Nuevos factores de ajuste para la clasificación de Bieniawski a los taludes*. Ponencia en el 3er. coloquio sobre Ingeniería Geológica. Universidad Politécnica de Catalunya.
- [Terzaghi, 1946] Terzaghi, K. (1946) “*Rock defects and loads on tunneling supports*”, in *rock tunneling with steel supports*. R.V. Proctor and T. White. Eds., Commercial Shearing Co., pp. 15–99.
- [Waltham, 1994] Waltham, A.C. (1994). *Foundations of Engineering Geology*. London : Spon.
- [Wickham et al] Wickham, G., Tiedeman, H. y Skinner, H. (1972). *Ground support prediction model (RSR concept) in proceeding 1st. rapid excavation tunneling*. Conferencia AIME, pp. 43–64.
- [Zamora, 2007] Zamora, P. (2007). *Clasificaciones geomecánicas del macizo rocoso y Aplicaciones para el túnel de conducción del proyecto hidroeléctrico “San Francisco”*. Tesina para obtener el título de Ingeniero Geólogo, Escuela de Geología. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.



SITIOS WEB

- <http://enciclopedia.us.es/index.php/Granito>
- http://www.geoturismo.es/index.php?contenido=noticia&id_noticia=54
- http://es.wikipedia.org/wiki/Provincia_de_Azuay
- http://www.eruditos.net/mediawiki/index.php?title=Parroquias_Urbanas_del_Cant%C3%B3n_Paute
- <http://www.zonu.com>