

TRABAJO DE DIPLOMA

EN OPCIÓN AL TÍTULO DE

INGENIERO DE MINAS

**TÍTULO: EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE
LOS TALUDES EN LA CANTERA DE CALIZAS
“URBANO NORIS”**

Autor: Custódio Augusto Muachissaco
Tutor: Dr. C. Rafael Noa Monje

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Declaro que soy el único autor del trabajo “Evaluación de la estabilidad de los taludes en la cantera de calizas “Urbano Noris” de él certifico su propiedad a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

Para que así conste firmo la presente a los 9 días del mes de junio del 2017 .

Custodio Augusto Muachissaco

Nombre completo del autor

Rafael Noa Monje

Nombre completo del tutor

Pensamiento

“Intelligence plus character that is goal of true education”.

(La inteligencia y el carácter, esa es meta de la verdadera educación).

Dr. Martín Luther King. Jr.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi mamá (Delfina Muachissaco), papá (Augusto Muachissaco) y hermanas por ser tan especiales e importantes en mi vida, por haberme brindado su apoyo incondicional, su cariño y amor, por darme esperanzas e inspirarme para que hoy logre mis sueños.

A mis amigos, compañeros de cuarto (442) y de aula que siempre me apoyaron.

A los mineros del planeta que día a día entregan todo lo mejor de sí por un mundo mejor y constituyen la savia imprescindible del conocimiento minero.

A TODOS ELLOS, MUCHÍSIMAS GRACIAS

Agradecimientos

Primeramente quiero agradecer a Dios el TODOPODEROSO, porque a Él pertenece la hora y la gloria.

A mi madre y padre por formar parte de mi vida, y especialmente a mis hermanas (Helena y Engracia) y por sus sabios consejos, por hacerme llegar hasta donde he llegado, adalides de mis ideas y de mis convicciones.

A mi novia por ayudarme en todo y darme fuerzas para seguir en los momentos más importantes.

Agradecer a todas las personas que de una forma u otra contribuyeron con la realización de este trabajo de diploma y a que mis 5 años en la universidad fueran de la manera más placentera posible.

Al claustro de profesores que, con su profesionalidad superaron todas las expectativas logrando elevar mis conocimientos académicos y culturales a un nivel superior; permitiendo observar al mundo que nos rodea desde una perspectiva mucho más desarrollada.

A la gran hermandad de Angola y Cuba va la especial dedicatoria de este trabajo, por permitir que me convierta en profesional y revolucionario.

A mis enemigos, que por pensar que me hacían mal, no creyeron que llegara a hacer realidad este sueño, sin saber que con sus infamias me haría más fuerte y útil.

A TODOS, MUCHÍSIMAS GRACIAS

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo es la evaluación de la estabilidad de los taludes en la cantera de calizas “Urbano Noris”, en el mismo se realiza un análisis de las características ingeniero-geológicas y la evaluación del comportamiento mecánico estructural del macizo, para la evaluación de la calidad de la roca se utilizan cinco clasificaciones geomecánicas de las existentes: la clasificación de Deere, basada en el índice de calidad del macizo(RQD); la clasificación de Bieniawski, basada en el (RMR); la clasificación de Barton, basada en el índice (Q); la clasificación de Romana, basada en el índice SMR, y la clasificación de Hoek y Marinos, basada en el índice GSI; todas ellas nos dan criterios sobre la calidad del macizo objeto de estudio. Se emplean los métodos que más se adaptan a las características de la cantera para evaluar la estabilidad de los taludes: el método de equilibrio límite exacto: rotura plana y rotura en cuña, con los cuales se evalúa la estabilidad de los taludes en la cantera estudiada.

De los análisis realizados para cada uno de los parámetros, se obtienen los siguientes resultados: con las clasificaciones geomecánicas empleadas y teniendo en cuenta los requerimientos establecidos por la SIMR, se obtiene que la calidad del macizo rocoso para la cantera “Urbano Noris” es buena, y con los métodos para evaluar la estabilidad del talud que más se adaptan a este tipo de macizo, se obtiene que la estabilidad de los taludes de esta son estables, aunque presentan planos de debilitamientos. Para ellos se proponen las medidas de estabilización que permiten evitar inestabilidades en los taludes y garantizar la seguridad de los mismos.

SUMARY

The main objective of this work is the evaluation of the stability of the slopes in the limestone quarry "Urbano Noris". It presents analysis of the geological-engineering characteristics and the evaluation of the structural mechanical behavior of the massif. For the evaluation of rock quality are used five of the existing geomechanical classifications: the Deere classification, based on the solid mass index (RQD); the Bieniawski classification, based on the (RMR); the Barton classification, based on the index (Q); the Romana classification, based on the SMR index, and the Hoek and Marinos classification, based on the GSI index. All of them give us criteria on the quality of the studied massif. To evaluate the stability of the slopes, there were used the method that best fit the characteristics of the quarry: the exact limit equilibrium method: flat breakage and wedge fracture.

From the analyzes performed for each of the parameters, the following results are obtained: according to the geomechanical classifications used and taking into account the requirements established by the SIMR, the quality of the rock mass for "Urbano Noris" quarry is good. Also, regarding the methods to evaluate the stability of the slope that fit the most this type of massif, it is obtained that the stability of the slopes of this one are stable, although they present weakening planes . For them are proposed the stabilization measures that allow to avoid instabilities in the slopes and to guarantee their safety.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I ESTADO ACTUAL DE LA TEMÁTICA	5
I.1. Introducción	5
I.2. Marco teórico conceptual	5
I.2.1. Explotación a cielo abierto (las canteras)	7
I.2.2. Elementos que caracterizan los procesos de movimiento	7
I.2.3. Calizas	11
I.2.4. Clasificación de los métodos de cálculo de estabilidad de taludes	12
I.3. Estado actual de la temática en el mundo	15
I.4. Actualidad y situación de la temática en Cuba	19
II.1. Introducción	25
II.2. Ubicación geográfica, principales vías de comunicación y condiciones económicas	25
II.3. Geología regional	27
II.4. Geología del yacimiento	28
II.5. Tectónica regional	29
II.6. Hidrogeología	29
II.7. Propiedades físico-mecánicas de las rocas	29
II.7.1. Construcción de la envolvente de rotura	32
II.8. Características estructurales del área en estudio	33
II.8.1 Orientación de las discontinuidades	33
II.8.2. Espaciado	34
II.8.3. Persistencia	35
II.8.4. Rugosidad	36

II.8.5. Abertura	38
II.8.6. Relleno.....	38
II.8.7. Agua en las discontinuidades	39
II.8.8. Alteración	41
II.8.9. Bloquicidad.....	42
 CAPÍTULO III. EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE LOS TALUDES EN LA CANTERA “URBANO NORIS”	 46
III.1. Evaluación de la calidad de las rocas	46
III.1.1. índice de Calidad de la Roca (RQD) Deere (1967)	46
III.1.2. Clasificación de Bieniawski (RMR) (1973, 1976,1989)	47
III.1.3. Clasificación de Barton et al. (1974)	49
III.1.4. Clasificación de Romana (SMR) (1992)	50
III.1.5. La clasificación GSI (Geological Strength Index).	53
III.2. EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE LOS TALUDES EN EL SECTOR ANALIZADO EN LA CANTERA “URBANO NORIS”	 55
III.2.1. Tipología de movimientos de la cantera.....	55
III.2.2. Evaluación de la estabilidad de los taludes aplicando el método de equilibrio límite exacto (rotura plana y rotura en cuña)	 56
III.3 Medidas de estabilización de los taludes	63
CONCLUSIONES.....	65
RECOMENDACIONES	66
BIBLIOGRAFÍA	67
ANEXOS	70

INTRODUCCIÓN

La minería es una de las principales ramas de la economía de cualquier país, dentro de ella juega un papel fundamental la explotación de los yacimientos de materiales de la construcción, ya sea arena, grava, mármol, cal, materias prima para el cemento, entre otros.

En Cuba inicialmente se usaba la cal solo para la construcción, ejemplo de lo anterior lo constituyen el acueducto de Albear y el puente sobre el río Yayabo, en la ciudad de Santi Espíritus. Con el desarrollo de la industria azucarera la producción de cal alcanza un gran auge, constituyendo este el motivo fundamental por el cual se comenzó a explotarse la cantera de “San Germán” en el año 1923.

Por lo general la explotación de los materiales de construcción se realiza por método a cielo abierto, lo que implica un incremento de nivel de producción, una mejor implantación de las nuevas tecnologías, aparejado a esto se lleva a cabo una mejor organización de los trabajos y un incremento en la seguridad de las operaciones mineras.

La explotación a cielo abierto se realiza directamente en la superficie de la tierra e incluye dos tipos de trabajo: destape y extracción. El primero tiene como objetivo asegurar el acceso al mineral útil y crear las condiciones para su extracción, consiste en el traslado del material estéril que rodea al mineral útil. Como resultado de la ejecución de los trabajos de destape y extracción se forma la cantera, que no es más que el conjunto de excavaciones mineras a cielo abierto que permiten la extracción de las materias primas para la industria.

La explotación de una cantera se realiza mediante el aprovechamiento de las pendientes que se dejan en los límites de estas, el depósito del material extraído, se divide en capas horizontales, con la finalidad de explotar varias capas (bancos) simultáneamente. De esta manera, la cantera va adquiriendo una forma escalonada.

La estabilidad de los taludes en una cantera a cielo abierto no solamente es un aspecto de fundamental importancia, sino que es una de las claves de la viabilidad del proyecto, su seguridad y su rentabilidad. Es por ello que debe ser

analizada desde las etapas iniciales del proyecto, debe ser comprobada y seguida con los datos obtenidos durante la explotación.

Aunque en los últimos años se han realizados investigaciones relacionadas fundamentalmente con la caracterización de la rocas calizas, los trabajos topográficos, el levantamiento geológico y la elevación de los recursos, entre otros, pero se le ha prestado poca atención a la estabilidad de los taludes en el frente de explotación, por lo que estos trabajos están sometidos a riesgos por inestabilidad de los frentes de explotación, lo que hace inseguro a los mismos, y en muchos casos encarecen el método de explotación empleado.

Hay que tener en cuenta que no se le dé una inclinación al talud que provoque derrumbe o pérdida de estabilidad en el mismo, independientemente de que la clasificación de las rocas desde el punto de vista ingeniero – geológico pueda tener una buena calidad.

Generalmente el diseño y explotación de los yacimientos minerales, empleando el método a cielo abierto, ha carecido de un correcto diseño de los principales elementos geométricos que caracterizan al espacio laboreado, y por otro lado no se han tenido en cuenta los diferentes elementos o parámetros que intervienen en la estabilidad de los taludes, tomándose decisiones muchas veces que responden solamente a cuestiones económicas o de producción y pasando a un segundo plano los aspectos constructivos y la seguridad, sin considerar el conocimiento previo del comportamiento mecánico-estructural de los macizos.

A partir de lo planteado anteriormente se declara como **Problema de la investigación:** la necesidad de evaluar la estabilidad de los taludes en la cantera “Urbano Noris”.

Objeto de estudio

Estabilidad de los taludes en la cantera “Urbano Noris”.

Campo de acción

Macizo rocoso donde se ubica la cantera “Urbano Noris”.

Objetivo general

Evaluar la estabilidad de los taludes en la cantera “Urbano Noris” y proponer las medidas para su estabilización.

Hipótesis

Si se realiza un análisis de las características ingeniero-geológicas del macizo rocoso, se hace un estudio del comportamiento mecánico estructural de este, se determinan las propiedades físico-mecánicas de las rocas, se emplean las clasificaciones geomecánicas para evaluar la calidad de la roca y se aplican los métodos de evaluación de la estabilidad del talud que mejor se adaptan a las condiciones reales del macizo rocoso de la cantera “Urbano Noris”, entonces es posible evaluar la estabilidad de los taludes y proponer las medidas adecuadas para su estabilización.

Objetivos específicos

1. Realizar una caracterización ingeniero-geológicas del macizo rocoso.
2. Evaluar el comportamiento mecánico estructural del macizo rocoso.
3. Determinar las propiedades físico-mecánicas de las rocas.
4. Emplear las clasificaciones geomecánicas que más se adaptan a este macizo.
5. Analizar los diferentes métodos de evaluar la estabilidad de talud.

Los principales métodos de la investigación científica empleados en dar solución al problema de la investigación, se exponen a continuación:

- **Método histórico-lógico:** se utilizó para la revisión y análisis de los documentos y definir los principales antecedentes investigativos sobre el tema y la cantera “Urbano Noris”.
- **Método empírico:** imprescindible para el empleo de las **mediciones**.
- **La observación**, para el conocimiento de las características fundamentales del objeto.

Métodos teóricos: fue utilizado para la interpretación conceptual de los datos empíricos; haciendo uso del **análisis y síntesis** en el estudio de las partes del objeto y para comprender su comportamiento como un todo. Dentro de los métodos teóricos también se utilizó la **inducción y deducción** como procedimiento para pasar de lo conocido a lo desconocido y de lo general a lo particular.

- **El método dialéctico:** para conocer las relaciones entre las componentes del objeto.

Todos estos trabajos se realizan en una determinada secuencia que constituye un procedimiento para la realización de la investigación como se muestra a continuación:

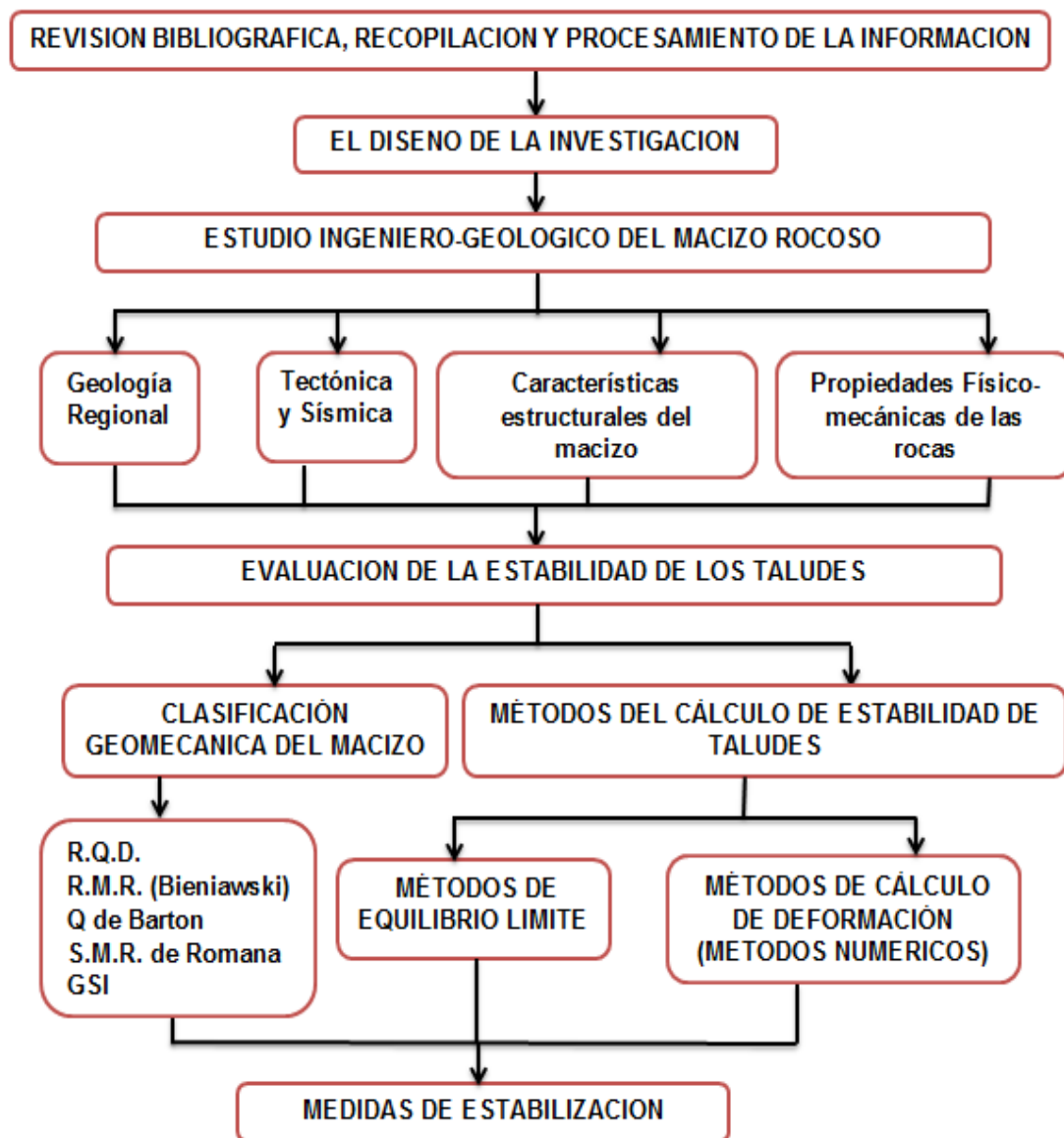


Figura 1.1. Flujo grama de trabajo.

CAPÍTULO I ESTADO ACTUAL DE LA TEMÁTICA

I.1. Introducción

En el presente capítulo se exponen los elementos teóricos de la investigación, haciendo un análisis de los elementos más importantes relacionados con la evaluación de la estabilidad de los taludes de una mina a cielo abierto o de cualquier tipo de obra ingenieril, elementos conceptuales sobre los taludes, cantera y calizas. También se analiza la bibliografía de la temática en el mundo y en Cuba.

De esta forma, con la dinámica de las construcciones ingenieriles de las actuales vías de comunicación, tales como: caminos y ferrocarriles, el desenvolvimiento de obras de protección contra la acción de ríos y la explotación de yacimientos minerales, se han presentado problemas de deslizamiento causados por diferentes agentes(naturales y humanos) o debido a varias condiciones como: condiciones climáticas, particularidades geológicas desfavorables, actividad del hombre, sobre peso de las maquinarias, zonas de alta sismicidad, propiedades físico-mecánicas, acuíferos, movimientos tectónicos y neotectónicos, intervenciones antrópicas, entre otros; todo esto aporta desfavorables condiciones de la obra en la cual se trabaja, lo que lleva al diseño y construcción de taludes en un plano de importancia ingenieril de primer orden.

La definición de la geometría del talud minero, es de gran importancia para el método de explotación para lograr el aprovechamiento racional del yacimiento mineral.

Un elemento importante y fundamental a tener en cuenta en la extracción de una cantera es la estabilidad de los taludes (bancos) en el frente de la explotación, para lograr el control de movimientos de masas, deslizamientos y hasta derrumbe total del frente, lo que trae consigo la complejidad de las labores mineras, ya que de él depende e incrementa el rendimiento económico.

I.2. Marco teórico conceptual

Se comprende bajo el nombre genérico de talud cualquier superficie inclinada respecto a la horizontal que hayan de adoptar permanentemente las estructuras de tierra, ya sea en forma natural o como consecuencia de la intervención

humana en una obra de ingeniería. Los taludes se dividen en naturales (laderas) o artificiales (cortes y terraplenes). Las partes de un talud son: escarpe superior, plataforma superior, pendiente predominante, altura, pie de ladera, altura del nivel freático, zanja de coronación, cabeza, pendiente y pie de talud (Ver la figura 1.2).

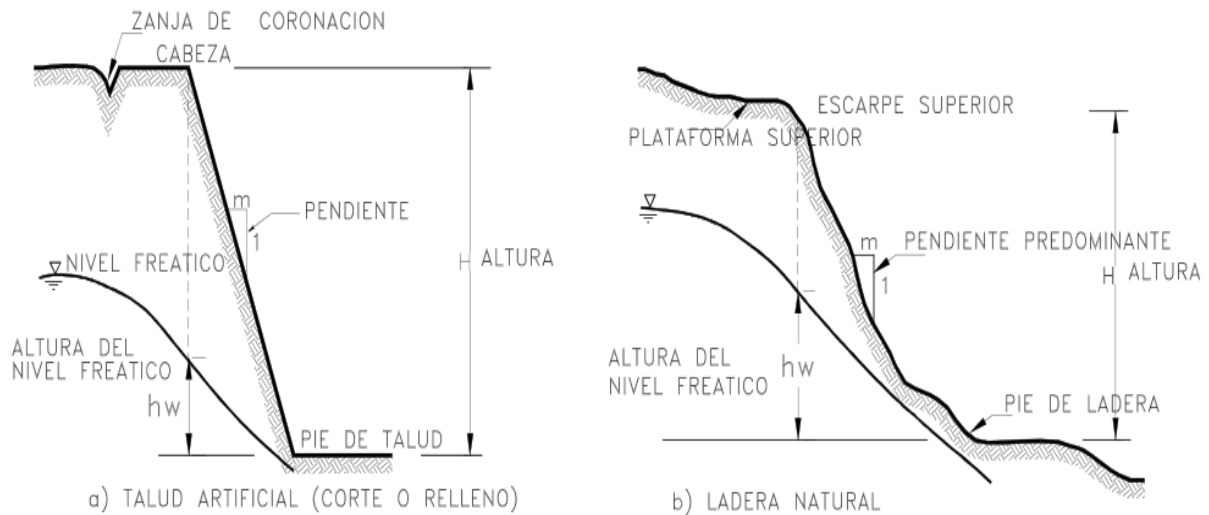


Figura 1.2. Partes constructivas de un talud, a) artificial (cortes y terraplenes) y b) natural (ladera)(Suarez, 1998).

Definición de los elementos constitutivos de un talud o ladera:

1. **Altura:** Es la distancia vertical entre el pie y la cabeza, la cual se presenta claramente definida en taludes artificiales pero es complicada de cuantificar en las laderas, debido a que el pie y la cabeza no son accidentes topográficos bien marcados.
2. **Pie:** Corresponde al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte inferior.
3. **Cabeza o escarpe:** Se refiere al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte superior.
4. **Altura de nivel freático:** Distancia vertical desde el pie del talud o ladera hasta el nivel de agua medida debajo de la cabeza
5. **Pendiente:** Es la medida de la inclinación del talud o ladera. Puede medirse en grados, en porcentaje o en relación $m/1$, en la cual m es la distancia horizontal que corresponde a una unidad de distancia vertical.(Suárez, 1998).

1.2.1. Explotación a cielo abierto (las canteras)

Las canteras son explotaciones a cielo abierto que se dedican a la extracción de piedras o materias primas para la construcción.

Las canteras por si solo suelen ser de dimensiones pequeñas, aunque el conjunto de ellas representan el mayor volumen de la minería mundial.

Las materias primas extraídas en las canteras, a diferencia de las otras explotaciones mineras, no son sometidas a un post- proceso que pueda afectar su concentración. Las principales materias primas obtenidas en las canteras son: calizas, pizarras, mármoles, piedras y granitos.

Criterios de diseño de canteras

Para el correcto diseño de una cantera es necesario contar con los resultados de la investigación geológica con todas las características litológicas y estructurales del yacimiento, y tener en cuenta cuatro grupos de parámetros:

Geométricos: Función de la estructura y morfología del yacimiento, pendiente del terreno, límites de concesión, otros.

Geotécnicos: En dependencia de los ángulos máximos estables de los taludes en cada uno de los dominios estructurales en que se haya dividido el yacimiento.

Operativos: Dimensiones necesarias para que la maquinaria empleada trabaje en condiciones adecuadas de eficiencia y seguridad: alturas de banco, anchuras de bermas y caminos, anchuras de fondo.

Medioambientales: Aquellas que permiten la ocultación a las vistas de los huecos o escombreras, facilitan la restauración de los terrenos o la reducción de ciertos impactos ambientales.(Otaño Noguel, 2016-2017).

1.2.2. Elementos que caracterizan los procesos de movimiento

Los procesos de desplazamiento en taludes y laderas se originan por movimientos en la superficie por fracturas o fallas y desprendimientos de bloques producto de la erosión y otros agentes desencadenantes, determinados por factores como pendientes, vegetación, tipo de suelo, tipo de rocas, entre otros.

Para evaluar los deslizamientos es necesario conocer sus elementos estructurales. En la figura 1.3 se muestra un deslizamiento y las partes del mismo, detalladas a continuación:

Corona: sector de la ladera que no ha fallado y se localiza en la parte más alta de la zona deslizada, en ocasiones presenta grietas, llamadas grietas de la corona.

Escarpe principal: superficie de la pendiente muy fuerte, localizada en el límite del deslizamiento y originada por el material desplazado de la ladera. Si este escarpe se proyecta bajo el material desplazado, se obtiene la superficie de ruptura.

Escarpe menor: superficie de pendiente muy fuerte en el material desplazado y producida por el movimiento diferencial dentro de este material.

Punta de la superficie de ruptura: la intercepción (algunas veces cubierta) de la parte baja de la superficie de ruptura y la superficie original del terreno.

Cabeza: la parte superior del material de deslizamiento a lo largo de su contacto entre el material desplazado y el escarpe principal.

Tope: el punto más alto de contacto entre el material desplazado y el escarpe principal.

Cuerpo principal: la parte del material desplazado que sobre yace la superficie de ruptura localizada entre el escarpe principal y la punta de la superficie de ruptura.

Flanco: el costado de un deslizamiento de tierras o lado del deslizamiento.

Pie: la porción del material desplazado que queda pendiente bajo del margen de la superficie de ruptura.

Dedo: el margen del material desplazado más distante del escarpe principal.

Punta: el punto en el pie más distante del tope del deslizamiento.

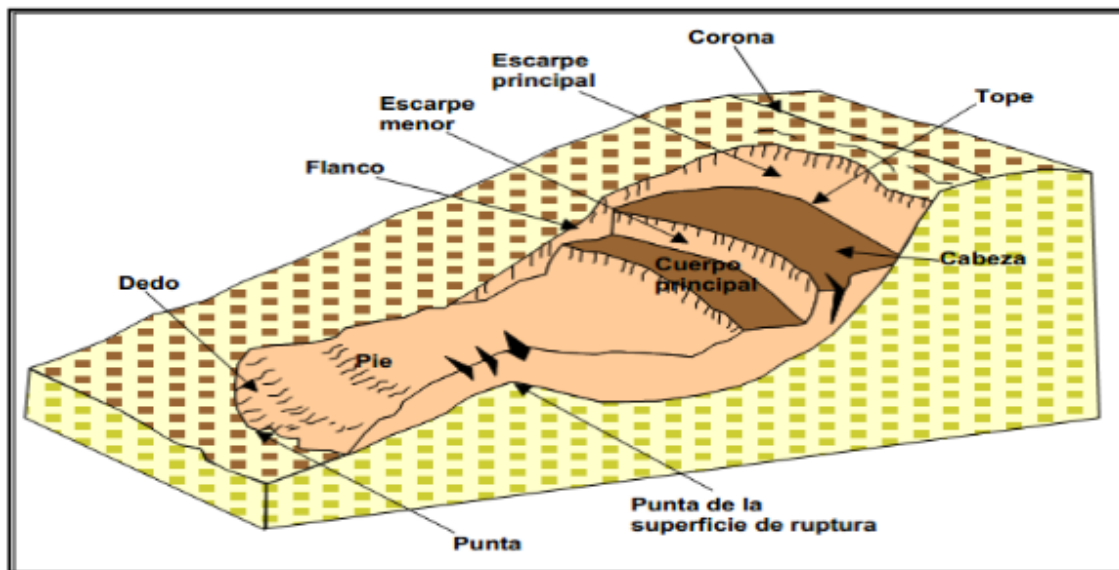


Figura 1.3. Esquema de un deslizamiento rotacional y partes del mismo (modificado de Varnes, 1988).(González)

Tipos de inestabilidad en laderas

1. Deslizamiento

Son movimientos que se producen al superarse la resistencia al corte de un material a lo largo de una superficie de debilidad o a través de una franja estrecha de material menos resistente que el resto.

Los deslizamientos en laderas constituyen un accidente habitual de la corteza terrestre, y están asociados generalmente a lluvias intensas; a veces se producen en formaciones geológicas desfavorables o singulares, y a causa de excavaciones.

Los deslizamientos se pueden dividir en dos subtipos: deslizamientos rotacionales y deslizamientos traslacionales o planares.

– Deslizamientos rotacionales

Son típicos de materiales homogéneos de naturaleza granular o cohesiva; tienen forma aproximadamente circular y cóncava. En ellos la masa deslizada tiende a moverse como un bloque rígido.

Los deslizamientos de este tipo tienen lugar también, en materiales neógenos, -terciarios-, los cuales suelen estar constituidos por alternancias de arcillas limosas, arenas limosas y limos arenosos. El espesor de los distintos niveles

puede oscilar entre unos pocos centímetros y muchos metros. La homogeneidad puede resultar, a veces, muy relativa. Es corriente que el agua aparezca en los contactos entre los niveles permeables e impermeables, en forma de una lámina de muy pequeño espesor. Bajo ciertas circunstancias la presión del agua puede aumentar sin dar tiempo al drenaje, causando el deslizamiento.

– **Deslizamientos traslacionales**

En general cuando el terreno presenta heterogeneidades o anisotropías, como suele ser habitual, la superficie de deslizamiento tiende a no ser circular. Una discontinuidad, una capa dura a escasa profundidad o una capa poco resistente, tienden a canalizar un tramo de la superficie de deslizamiento. La rotura ocurre por los planos de debilidad con dirección más o menos paralela a la del talud e inclinación menor o igual que la de este, en presencia o no de agua, desplazándose la masa de terreno inestable hacia afuera y hacia abajo.

2. Desprendimientos

Se determina como desprendimiento a toda masa separada de un talud o ladera por una superficie de corte generalmente pequeña y cuyo recorrido se realiza principalmente a través del aire. Los fragmentos originados por los desprendimientos presentan recorridos varios, pudiendo el material caer libremente, saltar, rodar, o cualquier combinación de las anteriores. En cualquier caso los materiales desprendidos se suelen depositar al pie del talud o a una cierta distancia del mismo, función de la energía alcanzada por los fragmentos en su movimiento.

Este tipo de inestabilidad afecta fundamentalmente a macizos rocosos altamente fracturados y farallones rocosos.

3. Flujos

En un flujo existen movimientos producidos en materiales de tipo suelo o rocas muy fracturadas, semejándose su comportamiento al de fluidos de mayor o menor viscosidad, en función de su contenido de agua. En este contexto podemos incluir desde desplazamientos de tipo plástico, extraordinariamente lentos, hasta movimientos turbulentos.

Son característicos de materiales que presentan un elevado porcentaje de fragmentos gruesos, cuando el contenido de agua se eleva en ellos.

Cuando ese contenido de agua es bajo, se denominan avalanchas o aludes, dependiendo del volumen de material movido, mientras que si el contenido de agua es elevado se llaman flujos de derrubios.

Características del resultado de este tipo de movimientos son la distribución caótica de bloques de gran tamaño, la inexistencia de clasificación y estructura y una gran porosidad de la masa movida.

4. Avalanchas

El movimiento de una falla progresiva es muy rápido y el flujo se precipita formando una especie de ríos de roca y suelo. Estos flujos comúnmente se relacionan con lluvias ocasionales de índices pluviométricos excepcionales muy altos, deshielo de nevado o movimientos en zonas de alta montaña y la ausencia de vegetación, aunque es un factor influyente, no es un prerequisite para que ocurran. Las avalanchas se forman con material de uno o varios deslizamientos o flujos combinados con una gran cantidad de agua.

Las avalanchas pueden alcanzar velocidades de más de 50 metros por segundo en algunos casos.

5. Movimientos Complejos

Son los movimientos de un talud, incluyen una combinación de dos o más de los diferentes movimientos descritos anteriormente. A este tipo de movimientos se le denomina “complejo”. Adicionalmente, un tipo de proceso activo puede convertirse en otro a medida que progresa el fenómeno de desintegración; es así como una inclinación puede terminar en caída o un deslizamiento en flujo.

I.2.3. Calizas

La caliza es una roca sedimentaria compuesta mayoritariamente por carbonato de calcio (CaCO_3), generalmente calcita, aunque frecuentemente presenta trazas de magnesita (MgCO_3) y otros carbonatos. También puede contener pequeñas cantidades de minerales como arcilla, hematita, siderita, cuarzo, y otras que modifican (a veces sensiblemente) el color y el grado de coherencia de la roca. El carácter prácticamente monomineral de las calizas permite reconocerlas

fácilmente gracias a dos características físicas y químicas fundamentales de la calcita: es menos dura que el cobre (su dureza en la escala de Mohs es de 3) y reacciona con efervescencia en presencia de ácidos tales como el ácido clorhídrico.(Wikipedia, 2017).

Por su origen la roca caliza se clasifica en:

Orgánico: Formadas por acumulaciones de restos calizos de seres vivos como conchas de moluscos, caparazones de foraminíferos (pequeños organismos unicelulares) y esqueletos de corales.

Detrítico: Resultado de la acumulación y compactación de barros calizos.

Químico: Formada por la precipitación de carbonato de calcio (CaCO_3) producido en entornos en los que aguas cargadas de CO_2 liberan este gas a la atmósfera.

La caliza está formada por una serie de compuestos químicos, sus principales componentes son: Carbonato de calcio (CaCO_3), Carbonato de magnesio (MgCO_3), Sílice (SiO_2), Alúmina (Al_2O_3), Óxido de Hierro (Fe_2O_3), Oxido de potasio (K_2O), Oxido de Sodio (Na_2O).

Las calizas con alto contenido de calcio contienen un porcentaje de carbonato de calcio entre un 97 y un 99% y un porcentaje de impurezas de 1 a 3 %. Las calizas dolomíticas contienen de un 40 a un 43 % de magnesita y un porcentaje de impurezas entre 1y3 %. Las calizas aptas para la industria son las que tienen un alto contenido de calcio y las calizas dolomíticas.

I.2.4. Clasificación de los métodos de cálculo de estabilidad de taludes

Los métodos de cálculo para analizar la estabilidad de un talud se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- **Métodos de cálculo basados en deformaciones**

Consideran en el cálculo las deformaciones del terreno además de las leyes de la estática. Su aplicación práctica es de gran complejidad y el problema debe estudiarse aplicando el método de los elementos finitos u otros métodos numéricos.

- **Métodos de equilibrio límite**

Se basan exclusivamente en las leyes de la estática para determinar el estado de equilibrio de una masa de terreno potencialmente inestable. No tienen en cuenta las deformaciones del terreno. Supone que la resistencia al corte se moviliza total y simultáneamente a lo largo de la superficie de corte.

Se pueden clasificar a su vez en dos grupos:

– **Métodos exactos**

La aplicación de las leyes de la estática proporciona una solución exacta del problema con la única salvedad de las simplificaciones propias de todos los métodos de equilibrio límite (ausencia de deformaciones, factor de seguridad constante en toda la superficie de rotura). Esto solo es posible en casos de geometría sencilla como la rotura plana y rotura por cuñas.

– **Métodos no exactos**

La mayoría de estos métodos parte del análisis de la geometría de la superficie de rotura que no permite obtener una solución exacta del problema mediante la única aplicación de las ecuaciones de estática. El problema que se genera es hiperestático y han de hacerse simplificaciones o utilizar alguna hipótesis previa que permita su solución.

Se puede distinguir aquí entre los métodos que consideran el equilibrio global de la masa deslizante, hoy prácticamente en desuso, y los métodos de dovelas que consideran a la masa deslizante dividida en una serie de fajas verticales (figura 1.4).

En el primer caso la hipótesis previa suele hacerse respecto a la distribución de tensiones normales en la superficie de deslizamiento. Tal es el método de círculo de fricción o de rozamiento.

En los métodos de dovelas dicha distribución no es dato del problema, sino un resultado de su resolución. Las hipótesis previas se refieren generalmente a las fuerzas laterales entre las dovelas y existe una gran variedad de métodos que consideran diferentes hipótesis.

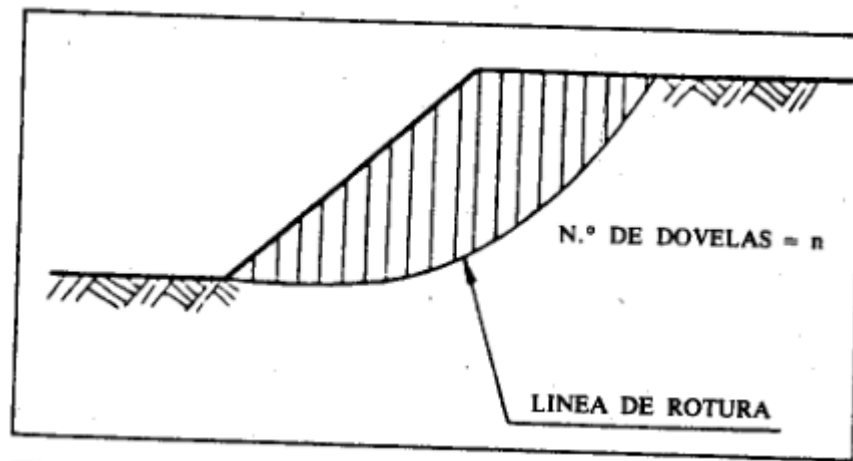


Figura 1.4. División de la masa deslizante en fajas verticales o dovelas.

Los métodos de dovelas pueden clasificarse en dos grupos:

– **Métodos aproximados**

No cumplen todas las ecuaciones de la estática. Se pueden citar como ejemplos los métodos de Fellenius, Janbu y Bishop simplificado.

– **Métodos precisos o completos**

Cumplen todas las ecuaciones de la estática. Los más conocidos son los métodos de Morgenstern-Price, Spencer y Bishop riguroso.

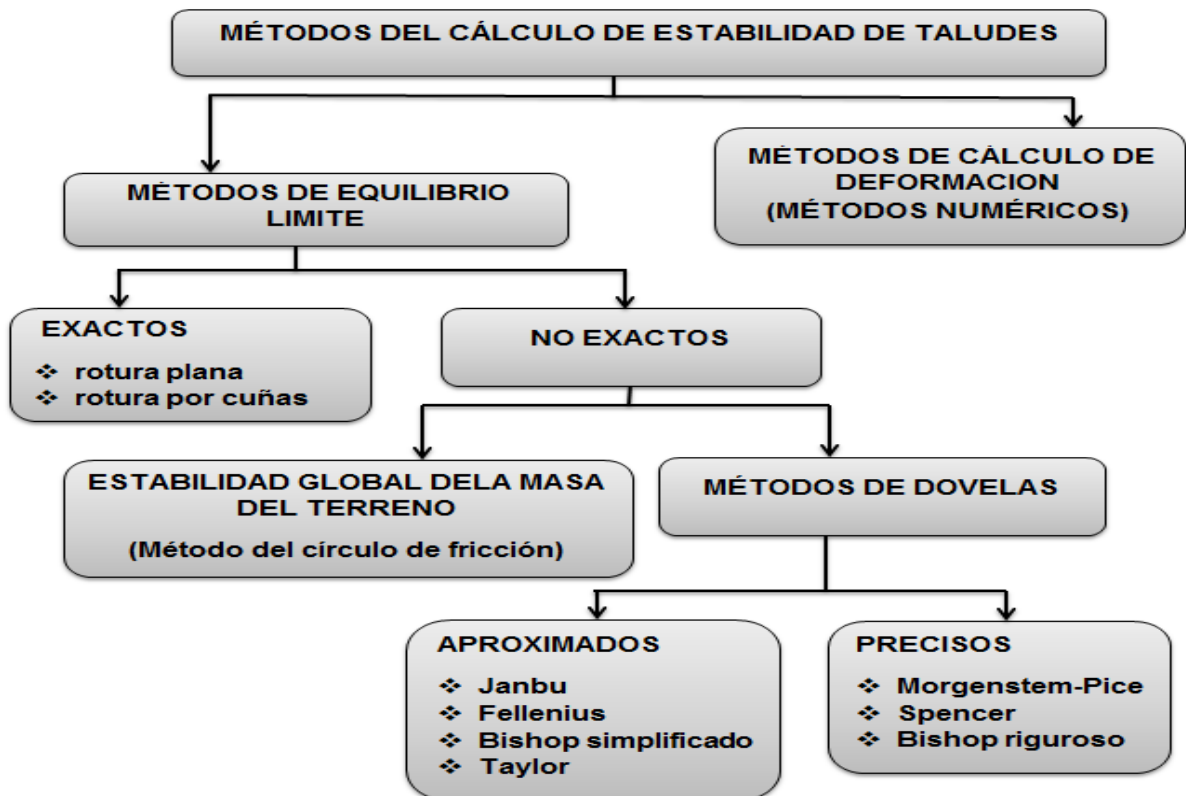


Figura 1.5. Clasificación de los métodos de estabilidad de taludes.

I.3. Estado actual de la temática en el mundo

El estudio de taludes en el mundo es ampliamente difundido, en los países en los que su legislación exige un adecuado estudio y diseño, para asegurar el funcionamiento de las obras que protegen los intereses monetarios y beneficios, a partir del cumplimiento adecuado de la función para la cual fueron calculados.(Pesántez, Bernardo, Molina, & Rigoberto, 2013).

Para el estudio de la estabilidad de los taludes se requiere un conocimiento previo del comportamiento de la geomecánica, que ayuda a la hora del diseño y proyecto de las obras de ingeniería. A continuación se exponen algunos trabajos relacionados con la geomecánica para la evaluación de la estabilidad y calidad de los macizos rocosos.

La primera clasificación geomecánica de los macizos rocosos fue propuesta por Terzaghi en 1946(Gavilanes J. H & Andrade Haro B, 2004). Propuso el primer sistema racional de clasificación para calcular las cargas que deben soportar los marcos de acero en los túneles. Este desarrollo fue importante, dado que los marcos de acero han sido el sistema de sostenimiento más utilizado durante los últimos 60 años. Se debe enfatizar que este método es apropiado para el propósito para el cual fue diseñado, esto es, para la estimación de las cargas para los marcos de acero y, por tanto, no es adecuado para los métodos modernos de tuneleo usando hormigón lanzado y pernos de anclaje.

Terzaghi hace hincapié sobre la importancia de hacer la explotación geológica antes que se termine el diseño, e insiste en conseguir información sobre los defectos en la formación de la roca, pues el defecto de la roca y su intensidad pueden resultar más importantes que el tipo de roca que se puede encontrar.(Gavilanes J. H & Andrade Haro B, 2004).

En 1958, Lauffer, propuso una nueva clasificación para túneles, que posee un carácter cualitativo. El autor da una clasificación del macizo rocoso y a partir de ella efectúa recomendaciones para la elección del sostenimiento, introduciendo el concepto del claro activo (tomado de Moreno, 1998). A nuestro criterio, el inconveniente que presenta, es la dificultad de determinar los parámetros que

intervienen en la clasificación, si no se tienen abiertas excavaciones de distintas longitudes libres durante sus tiempos de estabilidad.

En 1963, Deere, propuso un índice de la calidad de las rocas, basado en la recuperación de perforación, denominada sistema RQD (Rock Quality Designation), índice de calidad de las rocas. (Blanco, 1981,1998, González de Vallejo, 1998 y López Jimeno, 1999). Este índice es de gran utilidad actualmente por su gran uso como parte de muchas de las clasificaciones geomecánicas de los macizos rocosos.

En 1970, Bulichev desarrolló un método para valorar la estabilidad de los macizos dado por el índice de calidad de las rocas (S) (Bulichev, 1982; Martínez, 2000), esta clasificación es bastante completa, en la misma se incorporan parámetros, como la fortaleza de las rocas. Este criterio se considera y podría ser más completo si en vez de utilizar el parámetro n , que define el módulo de agrietamiento lineal del macizo, se empleara el módulo volumétrico, debido a que con el parámetro n no se puede precisar el volumen de los bloques. Durante esta misma década aparecen otras Clasificaciones Geomecánicas de Macizo Rocoso, como las de, FRANKLIN, (1970 y 1975) y LOUIS en 1974, que han tenido menos seguidores (Moreno, 1998. González de Vallejo, 1998. López Jimeno, 1998).

En 1972, Wickham, Tiedeman y Skinner (U. S. Bureau of Mines), con el fin de establecer una clasificación Geomecánica de las rocas que permitiese el dimensionamiento del sostenimiento en obras subterráneas, analizaron más de 100 casos de túneles construidos, a partir de los cuales establecieron los criterios para la obtención del RSR (Rock Structure Rating), así como las normas a utilizar en el diseño del sostenimiento en función de la magnitud de este índice. Según este criterio, el efecto del agua está condicionado por parámetros litológicos y estructurales del macizo y por la influencia del agrietamiento, por lo que se debe analizar muy bien las características del macizo en cuestión a la hora de emplear este criterio porque no siempre la afluencia de agua en una excavación está condicionada exclusivamente por estos factores (según Blanco y Moreno, 1998).

En 1973 Bieniawski, propone la clasificación RMR, (su modificación fue concluida en el año 1979), en ella se establece una cuantificación de la calidad del macizo rocoso. En esta metodología se propone un gráfico para seleccionar el

sostenimiento de los túneles en función de los valores RMR (Blanco, 1998 y López Jimeno, 1997,1999).

En 1974 Barton, Lien y Lunde, proponen la clasificación de macizos rocosos por el índice Q. La determinación de este índice depende de varios parámetros, y uno de ellos es el Índice de la Calidad de la Roca (RQD) de Deere en 1967. Su desarrollo representó una mayor contribución al tema de clasificación de macizos rocosos por las siguientes razones:

- El sistema fue propuesto con base en el análisis de 212 casos históricos de túneles en Escandinavia.
- Es un sistema de clasificación cuantitativo.
- Es un sistema ingenieril que facilita el diseño de sostenimiento para túneles.(Gavilanes J. H & Andrade Haro B, 2004).

En España la aplicación de las clasificaciones se inicia a finales de la década de los 70 y las primeras publicaciones datan del Simposio de Uso Industrial del Suelo de la S.E.M.R. en 1981. Los autores españoles han realizado significativos aportes al desarrollo de las clasificaciones tales como la propuesta de González de Vallejo, L. 1983, aplicada a túneles y la clasificación para taludes de Romana, M.1985 y 1997. Entre otras contribuciones se pueden mencionar las realizadas para medidas de sostenimiento en túneles por Moreno, E. 1982; para el dimensionamiento de galerías mineras por Abad, et al, 1983 y los trabajos de investigación de Muñoz, L.1987 y Encing, I.1992. (Según González de Vallejo, 1998. Moreno, 1998. López Jimeno, 1998).

Romana (1988) propone que el índice SMR se presente como un método óptimo, debido a que considera la orientación de los planos de discontinuidad con respecto a la cara del talud. Este índice se obtiene del índice RMR básico sumando dos "factores de ajuste"; uno en función de la orientación de las discontinuidades (que es, a su vez, producto de tres subfactores) y otro conocido como "factor de excavación". En este caso se coincide que constituye una clasificación geomecánica de uso muy extendido para la caracterización de taludes en roca, calculado a partir de valores característicos del macizo rocoso.

Todas estas clasificaciones geomecánicas nos ayudan a entender en un amplio o menor grado, una caracterización cuantitativa de los macizos rocosos, lo que brinda gran información a la hora de proponer un tipo de sostenimiento a emplear en una excavación subterránea o a cielo abierto y la calidad del macizo en las labores mineras.

La introducción de la computación, como los Software para el cálculo de estabilidad de las obras, diseño del sostenimiento, estado tensional alrededor de las excavaciones, entre otros, también ha contribuido grandemente con el desarrollo científico y técnico de la geomecánica. (López Jimeno, 1998).

Existen autores que han realizado varios trabajos, en la evaluación de la estabilidad de los taludes empleando métodos considerados en minas a cielo abierto, o en las obras de ingeniería, a partir de la caracterización ingeniero-geológica del macizo, aplicación de programas de software, clasificación geomecánica, de los métodos de cálculo para analizar la estabilidad de un talud, y otros métodos aplicables en la evaluación de la estabilidad del talud. A continuación se exponen trabajos relacionados con la temática.

Romana (1985), propone la clasificación SMR para taludes. Es un método de determinación de los factores de ajuste adecuados para aplicar la clasificación RMR de Bieniawski a los taludes. El índice SMR para la clasificación de taludes se obtiene del RMR sumando un factor de ajuste, que es función de la orientación de las juntas y factor de excavación que depende del método utilizado.

Ayala et al (1988) presentaron un estudio sobre la *“Estabilidad de taludes en la minería de lignito a cielo abierto de España”* donde comprobaron la validez de los valores propuestos por Bieniawski en 1979, para la cohesión y rozamiento de la masa rocosa mediante el cálculo del coeficiente de seguridad de taludes estables.

En Perú, Copare J., Cabrera D. y Lupaca L. (2003), realizaron la evaluación de la estabilidad de taludes en la mina Lourdes, mediante una caracterización del macizo rocoso afectado, donde evaluaron la roca a partir de la clasificación geomecánica S.M.R. de Romana (1985) y R.M.R de Bieniawski que fue en 1973. Aplicado el Algoritmo del equilibrio Límite, implementado en el programa

ROCKPACK III, para obtener los factores de seguridad, para cada una de las canteras.

Mateus (2012) realizó la evaluación geotécnica de los deslizamientos en los taludes de la mina kimberlítica de Catoca- Angola, donde evalúa la situación geotécnica que condiciona los deslizamientos que tienen lugar en los taludes de la mina Catoca, con el propósito de establecer un procedimiento que defina la estabilidad de la excavación para una explotación racional y segura de la mina. Se caracterizaron las zonas de ocurrencia de deslizamientos, las propiedades del macizo, las condiciones hidrogeológicas, condiciones geotécnicas y factores antrópicos, incidencia de las lluvias y aguas subterráneas. Se procesaron los datos con ayuda de diferentes programas de cómputo, los que permitieron la determinación y proyección de taludes ideales para esta mina.

En Ecuador Juan, Merchán, Diego y Sánchez (2013), evaluaron la estabilidad de los taludes en un sector de la cantera de materiales pétreos “*Las Victorias*”, mediante la caracterización geomecánica del macizo afectado y determinaron el factor de seguridad de los taludes, hicieron las mediciones in situ y una evaluación de la información existente, para esto aplicaron: Método de círculo de fricción, Método de Markland y los software Dips v5.103 y GEO5. Con estos se proponen las medidas para la estabilización de los taludes para esta cantera.

En Colombia Kevin R. y Juan R. (2016), realizaron una investigación sobre el análisis y diseño de los taludes en la mina a cielo abierto de diabasa de triturados “*El Chochó*”. Este análisis se realizó empleando métodos probabilísticos teniendo en cuenta la variabilidad de las propiedades geomecánicas donde se calculó el factor de seguridad para garantizar la estabilidad de los taludes que quedaran al abandonar la mina. Se utilizó el software Dips 6.0 con el cual se procesó la información y se revisó la posibilidad de las diferentes formas de falla que podían presentar en el talud. También fue necesario realizar simulaciones en el software RocPlane 3.0 y Swedge 6.0 para modelar la rotura plana y en cuña que pudieran presentarse en el macizo rocoso.

I.4. Actualidad y situación de la temática en Cuba

En Cuba la minería se encuentra a gran escala, como son conocidas las dos grandes empresas de explotación de los yacimientos lateríticos, la Empresa Moa

Nickel S.A -Comandante Pedro Sotto Alba y la Ernesto Che Guevara, donde la explotación realizada es a cielo abierto. Las investigaciones encaminadas a la evaluación de la estabilidad de los taludes en este país, han alcanzado un desarrollo importante, a pesar de tener una utilización de manera insuficiente en el análisis del comportamiento de los macizos rocosos, especialmente de los yacimientos de los materiales de construcción.

En el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (ISMMM), particularmente en los departamentos de Geología y Minas, se han realizado varios trabajos geotécnicos, dirigidos a la caracterización ingeniero-geológica de los suelos lateríticos a partir de las propiedades físico-mecánicas de los mismos y la aplicación de clasificaciones geomecánicas para el análisis de la estabilidad de los taludes.

Carmenate J. A., (1996) realizó la evaluación y clasificación de los suelos y rocas a partir de las propiedades físico-mecánicas, obteniendo como resultado un mapa ingeniero-geológico a escala 1:10 000 y una zonificación de áreas susceptibles a la ocurrencia de fenómenos geológicos exógenos, que constituyen peligros para la población y objetivos económicos, como los deslizamientos, proponiendo medidas para su mitigación, pero de una manera superficial, porque no caracteriza todas las posibles condicionantes del terreno que posibilitan la aparición de movimientos, limitándose solamente a las propiedades físico-mecánicas sin tener en cuenta el factor estructural o uso de suelo del territorio.

En el año 1997, ocurre un deslizamiento en un talud de explotación en el yacimiento *Punta Gorda*. A partir de esta problemática la subdirección de minas de dicha entidad, solicita al departamento de geología (ISMMM), realizar un proyecto de investigación en el cual se contemplara la evaluación de las condiciones geotécnicas y modelación del factor de seguridad de los taludes dentro del yacimiento. De esta forma se desarrolla el Proyecto de evaluación hidrogeológica e ingeniero-geológica en la mina Ernesto Che Guevara (Dpto. de geología, 1998), en el cual se realiza una serie de investigaciones geotécnicas de campo y laboratorio con vista al análisis de la estabilidad de los taludes. Tales investigaciones se fundamentaron en la aplicación de los métodos de equilibrio límite para el cálculo del factor de seguridad, mientras que la clasificación del

macizo se limitó a la aplicación del índice RMR, a partir de un estudio preliminar del agrietamiento.

A partir de entonces continúan los estudios para profundizar en el análisis de la naturaleza y tipología de los deslizamientos en corteza laterítica, resultando el trabajo de Guardado R. y Almaguer Y. (2001), donde se presenta una primera aproximación de un mapa de riesgos para el yacimiento *Punta Gorda*, obtenido a partir de la superposición de varios mapas de factores, como la litología, tectónica y pendientes, incluyendo en el análisis un mapa de elementos en riesgo, poniendo énfasis en la situación de los caminos mineros y la ubicación de las excavadoras en los frentes de explotación. El análisis de la influencia de los factores sobre las inestabilidades se realizó mediante la aplicación de métodos heurísticos presentando un mapa de riesgos por bloques de explotación con muy poco detalle para la escala a la cual trabajaron, y el trabajo de Almaguer Y. (2001), donde se aplican métodos de cálculo de estabilidad de taludes utilizando criterios de rotura a partir del estudio integral del agrietamiento del macizo roca-suelo y de la evaluación geomecánica del macizo rocoso serpentinizado.

Tamayo (2001) realizó la evaluación de la estabilidad de los taludes de dicho yacimiento y la propuesta metodológica para la confección de un GIS, donde se desarrolla el estudio del agrietamiento del macizo rocoso, la evaluación geomecánica, análisis de las paleotensiones sobre los taludes y la influencia de estos aspectos sobre los tipos de movimiento, se hace además un análisis de estabilidad según el método de deslizamiento por cuña. Se expone una propuesta metodológica de la confección de un sistema de información geográfica.

Cartaya, (2001), realizó la caracterización geomecánica del macizo rocoso en obras subterráneas de la región oriental del país, esta se enfoca más en la realización del estudio ingeniero-geológico del macizo rocoso, en determinar los parámetros geomecánicos de los macizos estudiados, en proponer los modelos geomecánicos más representativos de los macizos rocosos de las obras estudiadas, en proponer criterios geomecánicos estructurales que permitan un mejor diseño de excavaciones y obras subterráneas, pero no hace referencia en ningún momento a la forma de fortificación de estas excavaciones. (Este es un trabajo de varias excavaciones subterráneas, pero se hace referencia a este

debido a la amplia caracterización ingenieril de las rocas y a la utilización de la metodología de clasificación geomecánica; también es el caso de Noa (2003) y Cuesta (2010)).

Noa (2003), este trabajo está relacionado con el proceso de construcción de las excavaciones subterráneas horizontales; en el mismo se realiza una caracterización ingeniero - geológica de varios macizos de la región Oriental de Cuba. El autor realiza una caracterización ingenieril de las rocas, lo que permite hacer una evaluación del agrietamiento, el grado de deterioro y el tamaño de los bloques, utilizando en este último, varios métodos, determinando cuál es el que más se adecua a cada macizo estudiado, teniendo en cuenta los resultados obtenidos y las características geo-estructurales de estos. También se realiza la evaluación de las condiciones de estabilidad de los macizos rocosos donde se ubican las excavaciones objeto de estudio, utilizando cuatro de las metodologías de clasificación geomecánica existentes: la clasificación de Deere, la clasificación de Bulichev, la clasificación de Bieniawski y la clasificación de Barton.

Por último se realiza la propuesta de un sistema de indicaciones metodológicas, que posibilitan con su empleo lograr una correcta fundamentación de la elección del método de arranque de la roca a emplear, durante el laboreo de excavaciones subterráneas.

Hawari (2004) hizo las investigaciones en este campo de análisis de estabilidad, referentes al análisis en el camino minero Punta Gorda-La Melba, que realizó la evaluación de la estabilidad y propuestas de medidas correctoras en taludes y laderas inestables en el camino minero Punta Gorda- la Melba, parque nacional Alejandro de Humboldt. Se realiza una valoración del marco teórico de la investigación, así como las características físico-geográficas, morfotectónicas y edafológicas de la zona de estudio, una valoración geotécnica de las características de las rocas por las cuales atraviesan los taludes estudiados, se definen los factores condicionantes y desencadenantes de inestabilidades en los mismos y la tipología de los movimientos. Se efectúa el cálculo del factor de seguridad del talud por el método de Taylor y por el método grafo analítico, se ofrecen las tablas correspondientes con las principales características de los

taludes de manera tal que se pueda valorar su comportamiento. Se realiza la propuesta de medidas correctoras y la zonificación de los deslizamientos.

Cuesta (2010), caracterizó los factores que influyen en los procesos de infiltración y filtración de agua por los macizos rocosos fuertes poco porosos y agrietados, y hacia el interior de las excavaciones subterráneas, se hace una caracterización los factores que influyen en el proceso de control del agua que afecta las excavaciones subterráneas y se realiza un estudio de las principales técnicas utilizadas para controlar el agua que afecta una excavación subterránea.

Yaneybis (2013) hizo una investigación que tuvo como el objetivo evaluar las condiciones de estabilidad de taludes en yacimientos lateríticos aplicando métodos de equilibrio límite con vista a una explotación segura de los yacimientos del territorio de Moa. A partir del análisis de las propiedades físico mecánicas de los suelos y rocas, realizó el cálculo del factor de seguridad para la explotación con dragalina y con retroexcavadora teniendo en cuenta las características del equipamiento, también realizó un análisis estadístico multivariable aplicando las técnicas como análisis de correlación y componentes principales.

Mogologolo (2015), en el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (ISMMM), realizó un estudio de análisis comparativo de los métodos de cálculo de taludes más utilizados en suelos. Mediante la comparación del factor de seguridad (FS) obtenido de los diferentes métodos de cálculo de taludes se selecciona el diseño más adecuado para las condiciones del trabajo que realizó. Primeramente utiliza el tabulador electrónico para automatizar los tres métodos de cálculo de taludes más utilizados en suelos. Para probar su viabilidad, se comparan los resultados del factor de seguridad obtenido con los métodos de Fellenius, Bishop y Janbu con los obtenidos por el método de Estado Límite del artículo de la revista Ciencia & Futuro V.3 No Año 2013. Por último, se determina la cohesión de 155 kPa necesaria para diseñar el talud de una presa de cola.

En Cuba existen importantes investigaciones en el campo de análisis de la vulnerabilidad por deslizamiento de taludes, referentes al análisis en viales, tal es el caso de Mirian (2015), con el estudio de la evaluación de la vulnerabilidad por deslizamiento de taludes y laderas del consejo popular Farallones del municipio Moa; se logró evaluar las diferentes vulnerabilidades y se obtuvo el esquema de

vulnerabilidad total por deslizamiento de esta área, utilizando como herramienta los Sistemas de Información Geográfica (SIG), con el fin de mejorar la toma de decisiones de las autoridades ante situaciones vulnerables por estos fenómenos.

A partir del análisis bibliográfico se han podido evaluar los trabajos de Dayris Torres y R. Díaz (1993), Jorge Díaz y Mayelín Ruiz (2009), Miguel Mora, Alcides Mayo y Dulce Rojas, en la cantera objeto de estudio, sin embargo, han sido solamente referidos al campo de la geología, sin hacer un estudio más profundo sobre el comportamiento de los taludes en dicha cantera.

El análisis bibliográfico muestra que varios autores han estudiado la estabilidad de los taludes en minas (principalmente en yacimientos lateríticos) y vías de comunicación, sin embargo, no han estudiado los problemas de estabilidad en las canteras de calizas, objeto de investigación.

CAPÍTULO II. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DEL ESTUDIO

II.1. Introducción

El conocimiento del estudio geológico es de gran importancia para el referido tema; en la siguiente sección se describirán las características principales de la zona a investigar, la ubicación de la cantera, principales vías de comunicación y condiciones económicas. Posteriormente se caracterizará brevemente la geología regional y del yacimiento, la tectónica regional, la hidrogeología y las características estructurales del área.

II.2. Ubicación geográfica, principales vías de comunicación y condiciones económicas

Urbano Noris es un municipio de la provincia Holguín, situado al S de esta, en los 20° 36' de latitud N y los 76° 14' longitud O. Límites: al N, los municipios de Cacocum y Báguanos; al E, la provincia de Santiago de Cuba; al S, las provincias de Santiago de Cuba y Granma; al O, el municipio de Cacocum y la provincia Granma. Fuente: Diccionario Geográfico de Cuba.

El área de los trabajos se localiza en las inmediaciones del caserío Marimón, aproximadamente a 5 Km del poblado de San Germán cabecera del Municipio Urbano Noris; provincia Holguín, muy cerca del yacimiento se encuentra la carretera que une a la cabecera municipal con Jiguany.

Las Coordenadas Lambert donde se ubica el área estudiada son las siguientes:

X: 570 600

Y: 212 300

Ubicada en la Carta Topográfica 4977-I San Germán del I.C.G.C con escala 1: 50 000.

La región forma parte del sinclinorio, Cauto Nipe, caracterizado por elevaciones que alcanzan alturas máximas de 130 m sobre el nivel del mar.

La industria minera está representada por el yacimiento de calizas para la producción de Cal ubicado a unos 6 Km de la cantera Urbano Noris.

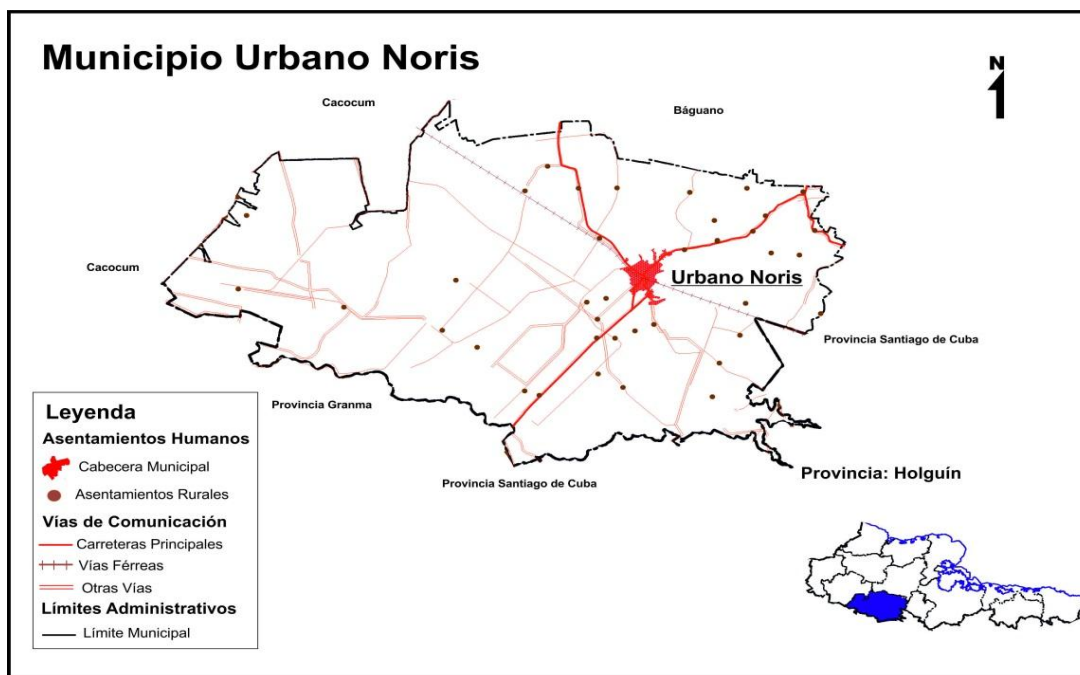


Figura 2.1. Ubicación del municipio Urbano Noris donde se encuentra la cantera en estudio.

La vía de comunicación en sentido general es buena, existe una carretera pavimentada que une la ciudad de Holguín (capital provincial) con el poblado de San Germán, de donde nace un terraplén que llega a la zona de los trabajos mineros.

La red hidrográfica se presenta extremadamente pobre, destacándose solamente un arroyo intermitente en dirección N-S, que en tiempo de seca carece de agua. El clima de la región es subtropical, con alternancia de períodos secos y lluviosos, ocurriendo el primero entre los meses de Noviembre – Abril y el segundo de Mayo – Octubre, el promedio anual de las precipitaciones alcanza (1200 – 1400) mm, con una temperatura media anual de 26°C, mínima en enero 24°C y máxima en julio 28°C.

La flora está caracterizada fundamentalmente por la caña de azúcar, no obstante se revelan algunas áreas con pequeños bosques y matorrales de llanura.

Económicamente la región basa su desarrollo en la Industria Azucarera jugando un segundo rol la ganadería. En correspondencia con el desarrollo de la Industria Azucarera, principal renglón exportable del país, el principal establecimiento

industrial en la región lo constituye el complejo Agro – Industrial (C.A.I) Urbano Noris.

La fuente de agua potable la constituye una conductora desde el poblado cabecera hasta las instalaciones del yacimiento. La región está conectada a la Red Nacional de Suministro de Energía Eléctrica.

II.3. Geología regional

Geológicamente la región de los trabajos se encuentra ubicada en las inmediaciones de las zonas estructurales faciales “Auras y Remedios”. El corte predominante es Terrígeno–Carbonatado, las formaciones geológicas existentes en el área investigada son las siguientes:

Formación Charco Redondo (CHR): Está constituida por calizas compactas, órgano detríticas, fosilíferas, de colores muy variables; blanco, beige, crema, pardo, rosáceo, otros. Hacia la parte inferior de la secuencia se pueden encontrar frecuentes brechas intraformacionales. La potencia varía entre (50 y 200) m. Dentro de esta formación se enmarcan las rocas del yacimiento.

Formación Pedernales (PRO): Litológicamente está compuesta por conglomerados polimícticos de matriz aleurolítica sin cementación, aunque en la parte superior puede encontrarse localmente un cemento poco desarrollado. Los clastos tienen un tamaño frecuente de (4 – 7) cm a veces hasta 15 cm y más, aparecen redondeados y subangulares. Estos clastos están formados por diabasas, microgabros, harzburgitas más o menos serpentinizadas, tobas, tufitas, etc. Potencia 200 m.

Formación Camazán (CAN): Formada por margas amarillentas, estratificadas, con intercalaciones de calizas órgano detríticas, fragmentada con la presencia de corales, yace concordantemente en algunas partes sobre la formación Pedernales, alcanza potencias de hasta 440 m.

Formación Yayal: Calizas carsificadas y aleurolitas calcáreas y margas, los estratos son más o menos horizontales. Las texturas predominantes son macizas con potencia de hasta 300 m.

Formación Cauto (CAU) Q II: Arenas, arenas arcillosas, arenas guijarrosas, limos, gravas, conglomerados polimícticos. Potencia (20 – 25) m.

II.4. Geología del yacimiento

El corte geológico del yacimiento se presenta por una secuencia terrígena–carbonatada con marcado predominio de la segunda. Como fue expresado anteriormente estas rocas se enmarcan dentro de la Formación Charco Redondo con edad de eoceno. La misma no fue perforada en toda su potencia, no obstante como promedio la misma osciló alrededor de los 25 m.

La parte superior del corte está formada por una cubierta constituida por arcilla con abundantes fragmentos de calizas y rocas margosas llegando a alcanzar hasta 8,0 m en el P-5.

Las calizas órgano–detríticas, que constituyen más del 70 % de las rocas presentes están constituidas por restos de organismos, generalmente foraminíferos, mal conservados (habiendo sufrido los efectos del transporte). Recristalizada a calcita y con cemento carbonatado. Los organismos presentan tamaños > 0,1 mm pertenecientes a la fracción gruesa, por lo general la textura es masiva algo porosa con estructura biodetrítica de granos gruesos.

Estas calizas están muy afectadas por los procesos cársicos, como consecuencia, se presentan extremadamente fracturadas y mezcladas con arcilla de color rojizo-amarillento. Estos factores hacen de estas rocas un material prácticamente negativo para la producción de áridos.

Ni por el rumbo ni el buzamiento se observan variaciones significativas. No son características los acuñamientos, ensanchamientos, ramificaciones y cambios de facies.

En la parte inferior del corte, por lo general, se encuentra un material carbonatado margoso con fragmentos de arcillas. Lo que en cierta medida pudiera estar asociado a los fenómenos cársicos ya mencionados.

A modo de resumen, pudiéramos plantear que el yacimiento desde el punto de vista geológico no se presenta complejo, sí tecnológicamente con calizas de la

Formación Charco Redondo con alto grado de carsificación, donde son características las cavernas rellenas de arcilla.

El yacimiento presenta una estructura del tipo de flexión anticlinal cuyas alas buzan con ángulos muy pequeños llegando a ser casi horizontales en el centro.

II.5. Tectónica regional

Los procesos de formación de las rocas que componen el yacimiento no difieren en gran medida de los ya conocidos en el país. Los mismos ocurrieron en el Eoceno Medio producto a la disposición mecánica de sedimentos que luego bajo la acción de los fenómenos diagenéticos no petrificaron al parecer en aguas someras a presiones y temperaturas normales, a juzgar por los estudios macroscópicos y microscópicos realizados a las rocas.

Los desplazamientos disyuntivos se localizan con más frecuencia fuera del área investigada. Estas fallas presentan direcciones predominantes NW-SE y SW-NE y edades de hasta Mioceno. Para el yacimiento es más característica la presencia de grietas, generalmente cubiertas por material arcilloso.

II.6. Hidrogeología

Hidrogeológicamente el yacimiento es sencillo, lo que fue corroborado con las mediciones durante las perforaciones realizadas, en etapas precedentes donde se comprobó que el yacimiento es seco. Debido a este no fue necesaria la ejecución de otros métodos para el estudio de este aspecto.

Se propone que la perforación de un pozo hidrogeológico en el centro del yacimiento y se le realicen mediciones del régimen durante un año, para analizar las fluctuaciones del agua subterránea, ya que a pocos metros del yacimiento, el agua se deposita y se hace una micropresa.

II.7. Propiedades físico-mecánicas de las rocas

El conocimiento profundo de las propiedades de las rocas, así como los métodos para su determinación, es de gran importancia para el diseño y explotación adecuada de las explotaciones mineras, para el buen aprovechamiento funcional del macizo rocoso (Quesada R., 2006). En este trabajo se hace la revisión de la bibliografía existente y se determinan algunas propiedades que no han sido

evaluadas o en algún caso que nos hacen faltan para el cumplimiento del objetivo de este trabajo.

Dentro de las propiedades físico-mecánicas de las rocas, que fueron evaluadas y en algunos casos determinadas, se definen las siguientes: densidad, porosidad, absorción, resistencia a compresión, resistencia a tracción, ángulo de fricción interna, cohesión entre las partículas y los esfuerzos de cortante máxima.

- El peso natural de acuerdo con ISRM (Society International For Rock Mechanic's), de la muestra debe tener como mínimo 50°. El peso seco se determina, mediante el secado de las probetas dentro de un horno ventilado a una temperatura promedio entre 105° - 110°C. En tanto que el peso saturado, se obtiene sumergiendo a la probeta en agua destilada, el volumen de la probeta rocosa y/o mineral a ser ensayada se determina mediante probetas simétricas y/o probetas irregulares, mediante el principio de Arquímedes, en el caso particular de probetas irregulares. Para este estudio se toma: peso volumétrico seco igual a 2.13 g/cm³ y saturado igual a 2.30 g/cm³, según, (D. Torres y R. Díaz, 1993).
- Densidad: Masa de la unidad de volumen de la fase sólida (esqueleto mineral) de la roca. g/v_s , g/cm³, kg/m³. (Quesada R., 2006).

$$D = \frac{\text{Peso seco}}{\text{Volumen}}; \text{ g/cm}^3$$

Tomamos igual a 2.44 g/cm³, según, (D. Torres y R. Díaz, 1993).

- Absorción se toma igual a 7.63 (D. Torres y R. Díaz, 1993).

$$A = \frac{\text{Peso saturado} - \text{Peso seco}}{\text{Peso seco}} * 100 (\%)$$

- Resistencia a la compresión

Existen varios métodos para determinar la resistencia a la compresión, tales como: métodos con el empleo de muestras semirregulares, métodos de los punzones axiales, ensayo puntual, método del martillo de Schmidt y método Standard. En este último método el ensayo se realiza con muestras cúbicas o usando testigos cilindros. Para el caso de muestras cúbicas, que es la variante más usada, influyen en los resultados que se cuenta entre otros: la relación h/D,

la velocidad de aplicación de la carga, las condiciones de borde de la muestras, entre otros.

Para la realización de los ensayos se recomienda usar de 3 a 5 muestras para dar como resultado el valor promedio. Ecuación para determinar la resistencia a la compresión:

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

Donde:

- P_R - Carga de ruptura de la muestra (Kgf)
- F - Área transversal inicial de la muestra (cm^2)

Para las muestras irregulares, la resistencia a la compresión se determina con la siguiente fórmula:

$$R_c = \frac{P}{V^{2/3}} = P \left(\frac{\gamma_v}{g} \right)^{2/3}$$

Donde:

- P - esfuerzo de destrucción (Kg)
- V - volumen de la muestra (cm^3)
- γ_v - peso volumétrico de la roca (g/cm^3)
- g - Peso medio de la muestra (g)

Es conocido que la resistencia de las rocas a compresión es relativamente alta, mientras que la resistencia a tracción, flexión y cizallamiento es comparativamente pequeña. Según datos experimentales se puede establecer la siguiente expresión:

$$R_c \approx (10 \div 30)R_t$$

▪ Resistencia a la tracción

Para determinar la resistencia a la tracción, el método más usado es el método Brasileño que consiste en ensayar una muestra cilíndrica con la relación diámetro/longitud, que puede variar de 0,5 a 1,0 aunque en algunos casos suele utilizarse testigos de 40 a 45 mm. Matemáticamente se puede expresar:

$$R_t = \frac{2P}{\pi dL}; M_{pa}$$

Donde:

P- Esfuerzo de destrucción

d – Diámetro de la muestra

L – Longitud de la muestra

También, para muestras irregulares en la determinación de la resistencia a la tracción se sigue la metodología expresada anteriormente y que es ya conocida con expresión:

$$R_T = \frac{P}{V^{2/3}} = \frac{P}{F}$$

Tabla 2.1. Propiedades mecánicas de las rocas

Tipo de roca	Resist. a compresión (Kgf/cm³)	Resist. a tracción (Kgf/cm³)
Caliza dura	310,59	20,71
Caliza blanda	79,56	5,31

II.7.1. Construcción de la envolvente de rotura

En relación con el estudio de la envolvente de rotura, el criterio más difundido y utilizado por la mayoría de los investigadores es el de círculos de Mohr-Coulomb.

Para que se realice la gráfica de la envolvente de falla mediante el criterio de Mohr-Coulomb se utilizan los resultados de las resistencias a compresión y a tracción.

Se traza la línea tangente a los círculos que representa los esfuerzos a tracción y compresión respectivamente, a esta línea se le denomina envolvente de falla la misma que tiene puntos característicos, el punto de contacto entre la envolvente de falla y el círculo de esfuerzo a compresión perpendicular al eje vertical nos da el valor del cortante máximo $T_{\text{máx}} = 32 \text{ MPa}$; y el punto en el que la envolvente de falla corta al eje vertical se denomina cohesión $C = 4 \text{ MPa}$; el ángulo de inclinación de la envolvente de falla se denomina ángulo de fricción interna $\phi = 58^\circ$ y el ángulo $\theta = 32^\circ$ es el ángulo comprendido entre la línea del punto de semi-esfuerzo de compresión al punto de tangencia con la envolvente de falla. (Ver figura 2.2).

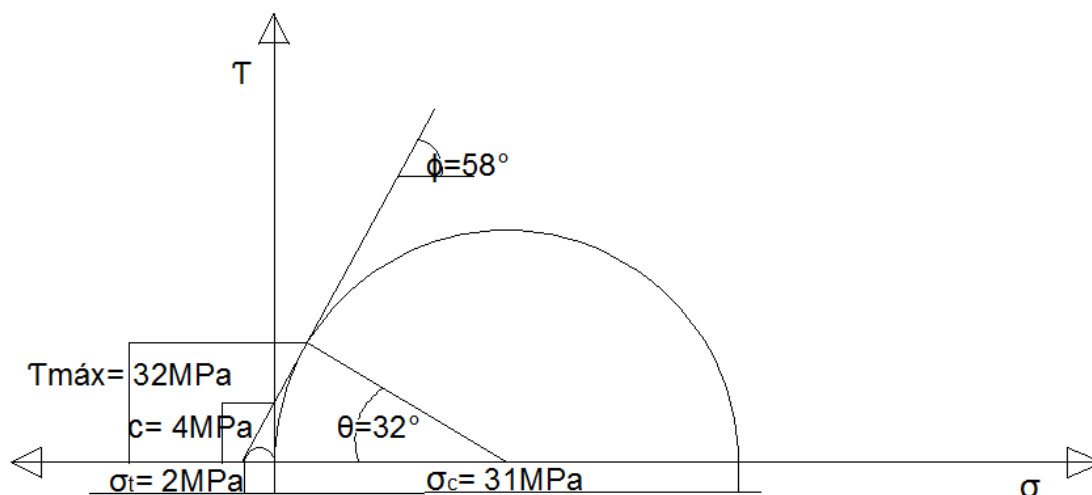


Figura 2.2. Obtención gráfica de C y ϕ , mediante los resultados de ensayos.

Tabla 2.2. Resumen de las propiedades físico-mecánicas de la roca

PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS	
Peso volumétrico seco	2,13 g/cm ³
Peso volumétrico Saturado	2,30 g/cm ³
Densidad	2,44 g/cm ³
Absorción	7,63 %
Resistencia a la compresión (R_c)	31,06 MPa
Resistencia a la tracción (R_t)	2,071 MPa
Cortante máx. ($T_{\text{máx}}$)	32 MPa
Cohesión (C)	4 MPa
Ángulo de fricción interna (ϕ)	58°

II.8. Características estructurales del área en estudio

II.8.1 Orientación de las discontinuidades

Es la posición de la discontinuidad en el espacio y comúnmente es descrito por su rumbo y buzamiento. Cuando un grupo de discontinuidades se presenta con similar orientación o en otras palabras son aproximadamente paralelas, se dice que estas forman un sistema o una familia de discontinuidades.

En el estudio del agrietamiento se utilizaron más de 20 elementos de yacencia de grietas y fallas, para definir las discontinuidades mediante la dirección del buzamiento y la pendiente del plano con la horizontal (rumbo y buzamiento).

Como se observa en el diagrama de roseta (figura 2.3), las principales direcciones de agrietamientos y fallas presentan direcciones predominantes NW-SE y SW-NE, los mayores agrietamientos del macizo están orientados en las direcciones NW-SE, con un ángulo de buzamiento de 20 a 70° que es el agrietamiento principal, que provoca o indica los esfuerzos que afectan este macizo. Se identificaron 3 sistemas de grietas y con número de juntas de 8 a 12.

Las dos gráficas que se presenta a continuación, muestran que en la dirección N55°E, es donde se concentra las mayores fracturaciones o roturas del macizo.

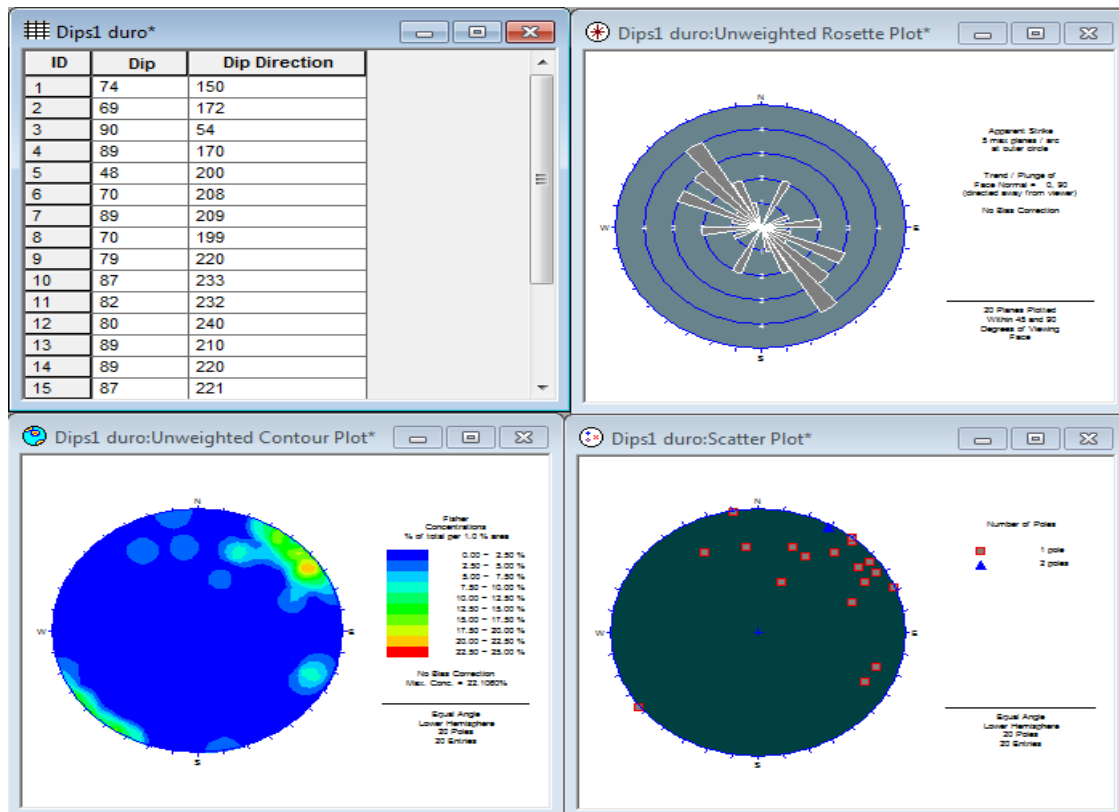


Figura 2.2. Proyección estereográfica del rumbo y buzamiento de la cantera “Urbano Noris”.

II.8.2. Espaciado

Es la distancia perpendicular entre discontinuidades adyacentes. Este determina el tamaño de los bloques de la roca intacta. Cuando menos espaciado tenga, los bloques serán más pequeños; cuando más espaciado tenga, los bloques serán más grandes. En la cantera “Urbano Noris” el espaciado varía entre 40-150mm, incluso los bloques pueden llegar hasta 500mm; como se muestra en la figura 2.3.



Figura 2.3. Medida del espaciado de discontinuidades

Para describir el espaciado se puede utilizar la terminología de la tabla 2.1 recomendada por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (SIMR) (Brown, 1981).

Tabla 2.1 Terminología de espaciados recomendada por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (SIMR) (Brown, 1981).

Descripción	Espaciado en mm
Extremadamente cerrado	<20
Muy cerrado	20-60
Cerrado	60-200
Moderado	200-600
Abierto	600-2000
Muy abierto	2000-6000
Extremadamente abierto	>6000

II.8.3. Persistencia

Es la extensión en área o tamaño de una discontinuidad. Cuanto menor sea la persistencia, la masa rocosa será más estable y cuanto mayor sea esta, será menos estable. En la cantera “*Urbano Noris*” la continuidad varía entre 1-10m, como se muestra en la figura 2.4.



Figura 2.4. Persistencia o continuidad de las discontinuidades de la cantera “Urbano Noris”.

Las discontinuidades se pueden clasificar por el tamaño mediante la terminología de la Tabla 2.2 recomendado por la SIMR (Brown, 1981).

Tabla 2.2 Terminología de continuidad o persistencia recomendada por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (SIMR) (Brown, 1981).

Término	Continuidad en m
Muy pequeña	<1
Pequeña	1-3
Media	3-10
Grande	10-20
Muy grande	>20

II.8.4. Rugosidad

Es la irregularidad de la superficie de la discontinuidad. Cuanta menor rugosidad tenga una discontinuidad, la masa rocosa será menos competente y cuando mayor sea esta, la masa será más competente. Estas son importantes para la estabilidad de taludes, ya que la rugosidad de los labios de una discontinuidad tiene una gran influencia sobre su resistencia al corte.(P. Oyanguren & L. Monge, 2004).

La SIMR (Brown, 1981) propone una clasificación con dos escalas para determinar las rugosidades de las discontinuidades. Estas escalas son:

- Escala intermedia, para observaciones de varios metros de longitud, comprende tres grados de rugosidad: escalonada, ondulada y plana.

- Escala pequeña, para observaciones de varios centímetros; comprende los siguientes grados: rugosa, lisa o suave, pulida o espejo de falla.

La cantera “Urbano Noris” presenta una estructura ondulada y plana en la escala intermedia, y para la escala pequeña: rugosa, lisa o suave y pulida o espejo de falla. Como se muestra en las figuras 2.5 y 2.6.



Figura 2.5. Grado de rugosidad de la cantera “Urbano Noris”.










Descripción	Perfil	Jr	JRC 200mm	JRC 1m
Rugoso	   Escalonado	4	20	11
Suave		3	14	9
Espejo de falla		2	11	8
Rugoso	   Ondulado	3	14	9
Suave		2	11	8
Espejo de falla		1,5	7	6
Rugoso	   Plano	1,5	2,5	2,3
Suave		1	1,5	0,9
Espejo de falla		0,5	0,5	0,4

Figura 2.6. Escala intermedia, para observaciones de hasta un metro de longitud (Barton, 1987), (P. Oyanguren & L. Monge, 2004).

II.8.5. Abertura

Es la separación entre las paredes rocosas de una discontinuidad o el grado de abertura que esta presenta. A menor abertura, las condiciones de la masa rocosa serán mejores y a mayor abertura, las condiciones serán más desfavorables.

En la cantera “Urbano Noris” las aberturas varían de 1-7 mm, como se muestra en la figura 2.7. En la tabla 2.3 se describen las aberturas de las discontinuidades y se puede emplear la terminología recomendada por la SIMR (Brown, 1981).

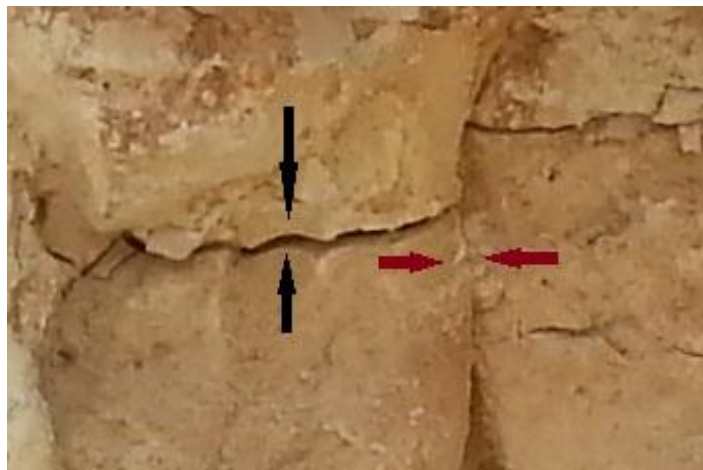


Figura 2.7. Abertura de las discontinuidades de la cantera “Urbano Noris”

Tabla 2.3 Terminología de abertura recomendada por la SIMR (Brown, 1981).

ABERTURA	DESCRIPCIÓN	ASPECTO
<0,1 mm 0,1-0,25 mm 0,25-0,5 mm	Muy cerrada Cerrada Parcialmente abierta	Aspecto cerrado
5,0-2,5 mm 2,5-10 mm >10 mm	Abierto Moderadamente ancha Ancha	Aspecto de hendidura
1-10 cm 10-100cm >1 m	Muy ancha Extremadamente ancha Cavernosa	Aspecto abierto

II.8.6. Relleno

Son los materiales que se encuentran dentro de la discontinuidad. Cuando los materiales son suaves, la masa rocosa es menos competente y cuando son más

duros, esta es más competente. Las aberturas de las discontinuidades de la cantera “*Urbano Noris*” están rellenas de arcillas de color rojizo-amarillento, como se muestra en la figura 2.8.



Figura 2.8. Relleno de las discontinuidades de la cantera “Urbano Noris”

Para estimar la resistencia al corte de una discontinuidad es importante estudiar, caso de existir, las características de la fracción arcillosa del relleno, sobre todo si se trata de arcillas expansivas. Además, es conveniente determinar si ha existido desplazamiento cortante previo de la discontinuidad, pues la resistencia residual al corte de la arcilla es menor que la resistencia de pico (P. Oyanguren & L. Monge, 2004).

II.8.7. Agua en las discontinuidades

La circulación de agua en el macizo rocoso fluye generalmente a lo largo de las discontinuidades (permeabilidad secundaria), excepto en las rocas sedimentarias con un alto índice de poros, en las cuales el agua circula por la propia roca (permeabilidad primaria). El agua circundante es uno de los factores que podrían modificar el comportamiento de la mina al ser excavada, afectan la estabilidad de las paredes, lavando el relleno que tenga entre las estructuras, disminuyendo su resistencia al corte. En la cantera “*Urbano Noris*”, según las perforaciones realizadas por (D. Torres y R. Díaz, 1993), se comprobó que el yacimiento es seco, pero en la toma de datos en campo pudimos tener evidencias de flujo de

agua (manchas de color carmelita) en algunas discontinuidades sin relleno, como se muestra en la figura 2.9; se toma un valor de 15 (seco) para agua subterránea, en la tabla 2.4; y en las tablas 2.5 y 2.6 se presentan unas escalas descriptivas propuestas por la SIMR (Brown, 1981) que permiten evaluar el grado de filtración en una discontinuidad.



Figura 2.9. Discontinuidades sub-horizontal en calizas con claras manchas de flujo de agua.

Tabla 2.4 Agua subterránea

Estado general	Valoración
Seco	15
Ligeramente húmedo	10
Húmedo	7
Goteado	4
Agua fluyendo	0

Tabla 2.5 Grado de filtración de una discontinuidad sin relleno

Discontinuidad sin relleno	
Grado de filtración	Descripción

I	La discontinuidad está muy cerrada y seca. El flujo de agua por la misma no parece posible.
II	La discontinuidad está seca y no hay evidencia de flujo de agua.
III	La discontinuidad está seca, pero muestra evidencias de flujo de agua, por ejemplo, manchas de roña.
IV	La discontinuidad está húmeda, pero no se observa circulación de agua.
V	La discontinuidad muestra filtraciones de agua, gotas de agua ocasionales, pero no flujo continuo.
VI	La discontinuidad muestra filtraciones de agua. (Hay que estimar el caudal en litros/minuto y describir la presión, por ejemplo: baja, media o alta).

Tabla 2.6 Grado de filtración de una discontinuidad con relleno.

Discontinuidad con relleno	
Grado de filtración	Descripción
I	Los materiales de relleno están fuertemente consolidados y secos, parece muy importante la aparición de un flujo debido a que la permeabilidad es muy baja.
II	Los materiales de relleno están húmedos, pero no circula agua.
III	Los materiales de relleno están húmedos, con gotas ocasionales de agua.
IV	Los materiales de relleno muestran signos de lavado, con flujo continuo de agua. (Se debe estimar el caudal en litros/minuto).
V	Los materiales de relleno están lavados localmente, y hay un considerable flujo de agua a lo largo de los canales de erosión. (Se debe estimar el caudal en litros/minuto y describir la presión, por ejemplo: baja, media o alta).
VI	Los materiales de relleno están completamente erosionados por el agua que circula a presiones muy elevadas, especialmente en los afloramientos. (Se debe estimar el caudal en litros/minuto y describir la presión).

II.8.8. Alteración

Algunos tipos de alteraciones, como la silicificación y en menor grado la calcificación, mejoran las características de la masa rocosa, incluyendo las zonas de falla. Otros, como la propilitización, disminuyen levemente las condiciones debido a la presencia de cloritas en las paredes de las fracturas. La sircitización y la argilitización (aumento de minerales arcillosos) son las alteraciones más desfavorables para los macizos rocosos donde se emplazan. En la tabla 2.7 se presentan varios macizos rocosos afectados por diferentes grados de meteorización.

Tabla 2.7 Descripción del grado de meteorización del macizo rocoso (SIMR, 1981).

Grado de meteorización	Tipo	Descripción
I	Fresco	No parecen signos de meteorización.
II	Ligeramente meteorizado	La decoloración indica alteración del material rocoso y de las superficies de discontinuidad. Todo el conjunto rocoso está decolorado por meteorización.
III	Moderadamente meteorizado	Menos de la mitad del macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformando en suelo. La roca fresca o decolorada aparece como una estructura continua o como núcleos aislados.
IV	Altamente meteorizado	Más de la mitad del macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformando en suelo. La roca fresca o decolorada aparece como una estructura continua o como núcleos aislados.
V	Completamente meteorizado	Todo el macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformando en suelo. Se conserva la estructura original del macizo rocoso.
VI	Suelo residual	Todo el macizo rocoso se ha transformando en un suelo. Se ha destruido la estructura del macizo y la fábrica del material.

II.8.9. Bloquicidad

El tamaño de los bloques es un indicador muy importante de la calidad de un macizo rocoso. Este es el que forma y condiciona de forma definitiva su comportamiento y sus propiedades resistentes y deformacionales. La dimensión y la forma de los bloques están definidas por el número de familias de discontinuidades, su orientación, su espaciado y su persistencia.

La determinación o la descripción del tamaño de los bloques se pueden realizar de varias formas, están basados en diferentes factores, que caracterizan al macizo y que se analizan a continuación:

- a) Mediante las dimensiones medias de los bloques tipo (índice I_b), estimadas o medidas en el afloramiento. Para nuestro caso el yacimiento de rocas carbonatadas con planos de estratificación y con tres familias de discontinuidades perpendiculares entre sí, el índice I_b vendría definido por:

$$I_b = (S_1 + S_2 + S_3) / 3$$

siendo S_1 , S_2 y S_3 los valores medios de espaciado de las tres familias de discontinuidades.

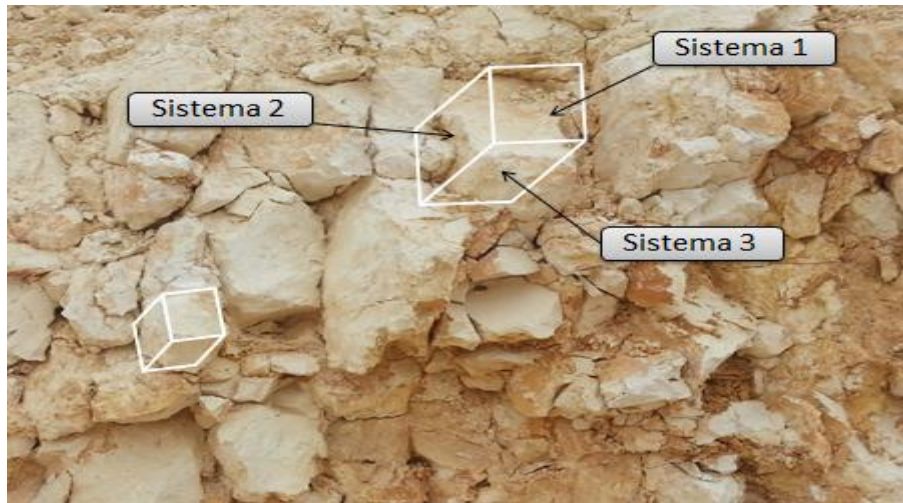


Figura 2.10. Representación espacial de los sistemas de discontinuidades para la estimación del índice de tamaño. Foto y montaje: autor.

En la cantera “Urbano Noris” según el índice I_b los bloques varían de 6,83 a 9,1 cm^3 .

- b) Mediante el número total de discontinuidades que interceptan una unidad volumen (1 m^3) del macizo rocoso, definido mediante el parámetro J_v .

Ante la dificultad de estimar tridimensionalmente en un afloramiento las discontinuidades que interceptan una unidad de volumen de macizo rocoso, el valor de J_v se puede determinar por el número de discontinuidades por unidad de longitud considerando las diferentes familias presentes en el ámbito medido:

$$J_v = \frac{\text{n}^\circ \text{ de discontinuidades}}{\text{longitud de medida}}$$

Existe una correlación entre J_v y el RQD (Palmstrom 2005):

$$\text{RQD} = 110 - 2.5J_v$$

El RQD tiene su valor máximo, es decir, 100% para $J_v > 4$. Esta relación, se puede utilizar, aunque no es muy preciso, para estimar el RQD cuando no se dispone de testigo de sondeos.

En la tabla 2.8 se dispone de términos descriptivos propuestos por la SIMR (Brown, 1981) que permiten clasificar los bloques por tamaños.

Índice volumétrico de grietas (J_v): es el número de grietas que intersecta 1 m³ de macizo rocoso.

$$J_v = \sum \left(\frac{1}{S_i} \right) + N_r/5$$

Donde: S_i – Distancia entre las grietas de cada familia.

N_r – Número de grietas aleatorias.

Utilizando la expresión anterior el valor de J_v calculado es igual a 10,5 grietas/m³.

Tabla 2.8. Descripción del tamaño de bloque en función del número de discontinuidades.

Descripción	J_v (discontinuidades/m³)
Bloques muy grandes	<1
Bloques grandes	1-3
Bloques de tamaño medio	3-10
Bloques pequeños	10-30
Bloques muy pequeños	>30

Según este método se define como bloques de tamaño medio y pequeños para la cantera en estudio.

- c) Mediante la determinación del tipo y forma de los bloques se utilizó la figura 2.10, la cual está basada en los valores de la distancia entre las grietas.

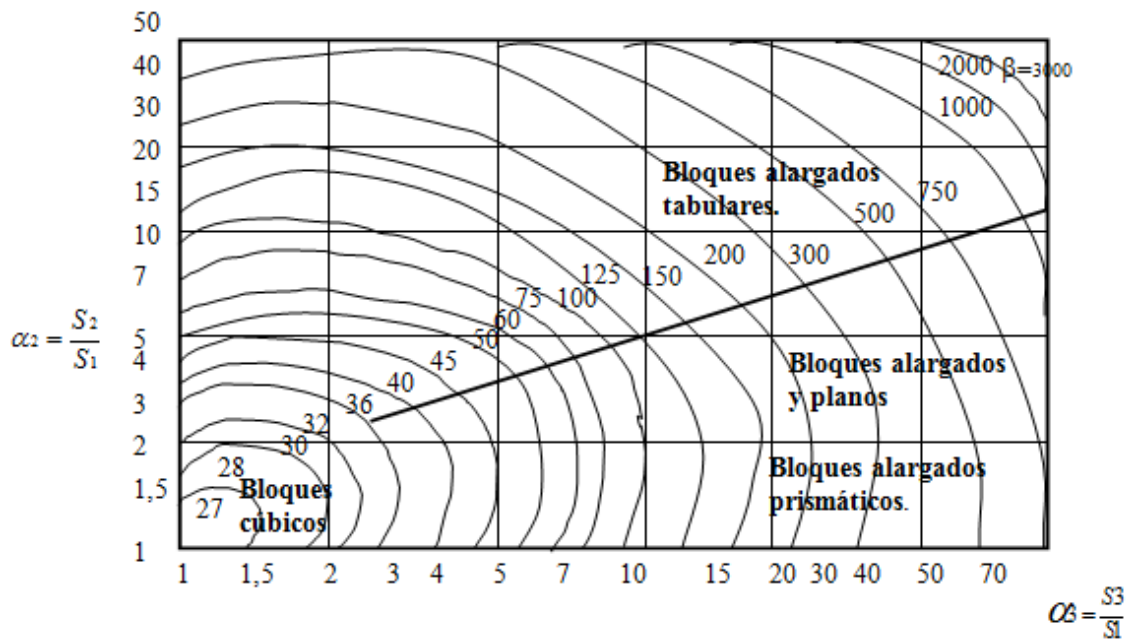


Figura 2.10. Determinación de las formas de los bloques a partir de la distancia entre las grietas.

Donde: S1 – Espacio más pequeño entre las grietas

S2 - Espacio medio entre las grietas

S3 - Espacio más grande entre las grietas

Según este método las formas de los bloques de la cantera “Urbano Noris” son o presenta bloques de tipos alargados y planos, y alargados prismáticos.

CAPÍTULO III. EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE LOS TALUDES EN LA CANTERA “URBANO NORIS”

III.1. Evaluación de la calidad de las rocas

Para valorar la calidad de los macizos rocosos hoy por hoy existen criterios de clasificación geomecánica ampliamente difundidos en todo el mundo, con los resultados y análisis de la información litológica-estructural, la resistencia compresiva uniaxial de las rocas y mineral, se debe aplicar a la clasificación geomecánica que más se adapta al macizo en estudio con el objetivo de determinar la calidad de las rocas.

III.1.1. Índice de Calidad de la Roca (RQD) Deere (1967)

El Índice de Calidad de las Rocas, el RQD (rock Quality designation), Deere (1967) se puede estimar a partir del número de discontinuidades por unidad de volumen, en el cual el número de discontinuidades por metro para cada familia es sumado. Este parámetro puede ser utilizado en afloramiento y túneles. Se obtiene a partir del porcentaje de trozos de testigos mayores de 10 cm recuperado en un sondeo y permite estimar el grado de fracturación del macizo rocoso. Cuando no hay sondeos se puede calcular con la siguiente expresión dada por Deere (1982):

$$RQD = 115 - 3.3J_v$$

Siendo J_v : representa el número total de discontinuidades por metro cúbico y es igual a 10,5 grietas/m³, tomando del capítulo II en la determinación del tamaño de los bloques en el paso b.

Con lo que al sustituir en la ecuación del RQD se obtiene, y posteriormente se le clasifica según la tabla 3.1:

$$RQD = 115 - 3.3 * 10.5$$

$$RQD = 80.35$$

Tabla 3.1. Índice de Calidad de la Roca (RQD)

RQD (%)	Calidad de Roca
<25	muy mala
25-50	mala
50-75	regular
75-90	buenas
90-100	excelente

Esta clasificación, como la mayoría de las existentes, da resultados válidos en rocas masivas y resistentes en las que se generó, siendo usado como un parámetro estándar en el registro de núcleos de perforación y forma un elemento básico de los sistemas de clasificación rocosos más utilizados: el RMR y el Q de Barton.

Según el resultado obtenido el Índice de Calidad de Roca **es buena**, como fue comprobado visualmente en la cantera de estudio.

III.1.2. Clasificación de Bieniawski (RMR) (1973, 1976, 1989)

Esta clasificación se desarrolló inicialmente a partir de la experiencia en obras realizadas en África del Sur. Su aplicación no tiene limitaciones, excepto en rocas expansivas o frías donde no es aconsejable su uso. (P. Oyanguren & L. Monge, 2004).

Para la obtención del valor del RMR (Rock Mass Rating), se utilizan 6 parámetros en vez de los 8 considerados en 1973, con la reducción que se establece en función de la disposición de las juntas. En la tabla 3.2 se muestra la valoración del macizo rocoso según RMR que oscila entre 0 y 100.

Tabla 3.2. Calidad del macizo rocoso en función del RMR

Clase	Calidad de la Roca	RMR
I	Muy buena	81-100
II	Buena	61-80
III	Regular	41-60
IV	Mala	21-40
V	Muy mala	0-20

En la tabla 3.3 se muestra la descripción de los cinco parámetros que son usados para clasificar un macizo rocoso utilizando el Sistema RMR. Y en la tabla 3.4 se da el parámetro de ajuste del RMR mediante la orientación de las discontinuidades para taludes.

Tabla 3.2. Parámetros del RMR y sus valores (Bieniawski, 1979).

Parámetro			Rango de valores						
1	Resistencia de la roca intacta	Ensayo carga puntual	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa			
		Compresión simple	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	< 1 MPa
	valor		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90-100%	75-90%	50-75%	25-50%	<25%		
	valor		20	17	13	8	3		
3	Espaciado de las discontinuidades		> 2 m	0,6-2 m	0,2-0,6 m	6-20 cm	< 6 cm		
	valor		20	15	10	8	5		
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1 – 3 m	3 – 10 m	10 – 20 m	> 20 m		
		Valor	6	4	2	1	0		
		Abertura	Nada	< 0.1 mm	0.1 – 1.0 mm	1 – 5 mm	> 5 mm		
		Valor	6	5	3	1	0		
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
		Valor	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno blando < 5 mm	Relleno blando > 5 mm		
		Valor	6	4	2	2	0		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
		valor	6	5	3	1	0		
5	Flujo de agua en las juntas	Relación Pagua / Pprinc	0	0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	> 0,5		
		Condiciones Generales	Completamente secas	Ligeramente húmedas	Húmedas	Goteando	Agua fluyendo		
	valor		15	10	7	4	0		

Tabla 3.4. Correlación del RMR mediante ajuste de valores por las orientaciones de las juntas.

Orientación de Rumbo y Buzamiento de las Discontinuidades		Muy favorables	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy desfavorable
VALORES	Túneles y minas	0	-2	-5	-10	-12
	cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
	taludes	0-	-5	-25	-50	-60

El factor de ajuste por la orientación de las discontinuidades en el método del RMR, para el macizo estudiado de la cantera “Urbano Noris” se toma como favorable, por lo que el valor de ajuste es igual a -5.

Teniendo en cuenta los parámetros considerados para la obtención del RMR y su valoración, son los que se ilustran en la tabla 3.5 para el macizo en estudio.

Tabla 3.5. Parámetros valorados para RMR de Bieniawski

Parámetros		Valoración
1	Resistencia de la roca intacta	15
2	RQD	17
3	Espaciado de discontinuidades	8
4	Estado de las discontinuidades	14
5	Flujo de agua en juntas	15
6	Las orientaciones de las juntas para Taludes	-5
RMR = (1)+(2)+(3)+(4)+(5)+(6)		64

El valor obtenido del RMR es igual a 64 que corresponde a Clase II con la calidad de **Roca buena**.

III.1.3. Clasificación de Barton et al. (1974)

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

- RQD: Índice de calidad de la roca
- J_n : Número de sistema de discontinuidades
- J_r : Número de rugosidad de discontinuidades
- J_a : Número de alteración de las discontinuidades
- J_w : Factor de reducción por agua
- SFR: Factor de reducción por esfuerzos

Estos 6 parámetros son agrupados en tres cocientes para dar en conjunto la calidad del macizo rocoso Q, matemáticamente se calcula de la siguiente forma:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

El primer cociente RQD/J_n representa el tamaño de los bloques o de las partículas.

J_r/J_a permite estimar la resistencia al corte entre bloques.

J_w/SRF indica el estado de las tensiones en el macizo rocoso. (Ver el anexo 2).

Q de Barton varían en escala logarítmica desde 0,001 hasta 1000 y en la tabla 3.6 se describe la valoración de la calidad de este.

Tabla 3.6. Calidad del macizo rocoso según el cálculo de Q.

Q (Rock Mass Quality)	Valoración
0,001-0,01	excepcionalmente mala
0,01-0,1	extremadamente mala
0,1-1,0	muy mala
1,0-4	mala
4-10	regular
10-40	buenas
40-100	muy buena
100-400	extremadamente buena
400-1000	excepcionalmente buena

Sustituido en la ecuación los valores considerandos:

$$Q = \frac{80.35}{9} \times \frac{1.5}{9} \times \frac{1}{5}$$

$$Q = 0.29$$

El valor del **Q= 0,29** que da una calidad del macizo con la valoración de Roca **muy mala**.

III.1.4. Clasificación de Romana (SMR) (1992)

La clasificación adaptada de Bieniawski para taludes (SMR) "Slope Mass Rating" de Romana (1992), se basa en las condiciones de yacencia del talud y la orientación de las discontinuidades, y permite evaluar la estabilidad de una excavación. Los parámetros considerados son:

- F1: relación entre el rumbo del talud y el rumbo de las discontinuidades

- F2: dependiente del buzamiento de las discontinuidades, se supone rotura plana.
- F3: refleja la relación entre el buzamiento del talud y el buzamiento de las discontinuidades
- F4: factor empírico que depende del método de arranque empleado.

El Índice SMR se obtiene restando del RMR primario un factor de ajuste F que depende de la orientación de las grietas y sumando un factor de excavación F_4 que es función del método de excavación utilizado. A su vez, F es el producto de tres subfactores que consideran: la orientación relativa del rumbo del plano del talud con respecto al de las grietas, F_1 , la diferencia entre el buzamiento de las grietas y del talud, F_3 , y el propio buzamiento de las grietas, F_2 . (P. Oyanguren & L. Monge, 2004).

Matemáticamente su fórmula de cálculo está definido por la expresión siguiente:

$$SMR = RMR + (F1 * F2 * F3 *) + F4$$

En la tabla 3.7 se describe la relación entre el índice SMR y la estabilidad del talud, y para la determinación de los parámetros del talud, los mismos que se calculan aplicado la tabla 3.8, de Romana (1992).

Tabla 3.7. Clases de estabilidad según el SMR de Romana (1992).

CLASES DE ESTABILIDAD SEGÚN EL SMR					
Clases nº	V	IV	III	II	I
SMR	0-21	21-40	41+60	61-80	81-100
Descripción	Muy malo	Malo	Normal	Bueno	Muy bueno
Estabilidad	Totalmente inestable	Inestable	Parcialmente estable	Estable	Totalmente estable
Roturas	Grandes roturas por planos continuos o por la masa	Juntas o grandes cuñas	Algunas juntas o muchas cuñas	Algunos bloques	Ninguna
Tratamiento	Reexcavación	Corrección	Sistemático	Ocasional	Ninguno

Tabla 3.8. Parámetros de cálculo del SMR

Caso		Muy favorable	Favorable	Normal	Desfavorable	Muy desfavorable
P	$ \alpha_j - \alpha_s $	$>30^\circ$	$30-20^\circ$	$20-10^\circ$	$10-5^\circ$	5°
T	$ (\alpha_j - \alpha_s) - 180^\circ $					
P/T	F1	0.15	.040	.07	.085	1
P	β_j	$<20^\circ$	$20-30^\circ$	$30-35^\circ$	$35-45^\circ$	45°
P	F2	0.15	.040	.07	.085	1
T	F2	1	1	1	1	1
P	$\beta_j - \beta_s$	$>10^\circ$	$10-0^\circ$	0°	0° a -10°	$<-10^\circ$
T	$\beta_j + \beta_s$	$<110^\circ$	$110-120^\circ$	$>120^\circ$	-	-
P/T	F3	0	-6	-25	-50	-60
Método		Talud natural	Precorte	Voladura suave	Voladura o mecánica	Voladura deficiente
F4		15	10	8	0	-8

En donde:

- P: rotura plana
- T: rotura por vuelco
- β_j : buzamiento de las grietas $=87^\circ$
- β_s : buzamiento del talud $=75^\circ$
- α_j : dirección de buzamientos de las grietas $=220^\circ$
- α_s : dirección de buzamiento del talud $=185^\circ$

Sustituidos los valores en la fórmula:

$$\text{SMR} = 64 + [0.85 * 0.85 * (-50)] + 0$$

$$\text{SMR} = 27.87$$

El valor del **SMR=27,87**, que nos da **Clase n° IV** de macizo rocoso correspondiendo a una **Descripción de Malo** y una **Estabilidad de Inestable**.

Con la aplicación de las clasificaciones de Bieniawski y Romana se puede comprobar que existe una correlación entre los resultados obtenidos, ya que para Bieniawski la calidad del macizo representada por el RMR es igual a 64 que es

buena y por Romana la calidad del macizo representada por el SMR es igual a 27,87 que es *inestable* como se muestra en la tabla 3.9. Aplicando las dos clasificaciones que valoran el agrietamiento, y como este influye en la calidad de los macizos, se pudo describir que es de calidad *buena*, un aspecto importante en la que coincide con la valoración visual de la misma.

Tabla 3.9. Correlación de las clasificaciones de Bieniawski-Romana

CLASIFICACIÓN	VALORACIÓN	CALIDAD DEL MACIZO ROCOSO
Bieniawski	RMR=64	Buena
Romana	SMR=27,87	Inestable

III.1.5. La clasificación GSI (Geological Strength Index).

El Índice de Resistencia Geológica (GSI) fue expuesto por primera vez por Hoek et al. en 1992 y desarrollada posteriormente por diversos trabajos científicos, de Hoek (1994 y 1995), Hoek-Brown (1997), pero en esta primera estancia su campo de aplicación se restringía a macizos rocosos de roca dura y no incluía los macizos rocosos blandos y equivalente al sistema RMR. A partir de varias publicaciones de Hoek y Marinos (Hoek et al. 1998; Marinos y Hoek 2000, 2001 y 2005) se empezó a incluir los macizos rocosos más débiles en la clasificación GSI.

El Índice de Resistencia Geológica (GSI) considera dos parámetros: la condición de la estructura de la masa rocosa y la condición superficial de la misma (ver anexo 3). En el criterio original se estiman 6 descripciones de macizos rocosos, pero para compatibilizar este criterio con el criterio RMR se han considerado 5 descripciones.

El GSI se puede estimar directamente a partir del caso de 1979 del RMR, pero con una valoración de 10 para macizo rocoso seco, el parámetro correspondiente al agua, y con un cero el que recoge el efecto de la orientación de las grietas (orientación muy favorable). (P. Oyanguren & L. Monge, 2004). Si se utiliza el caso de 1989 del RMR de Bieniawski, $GSI = RMR'_{89} - 5$, siendo asignado un valor de 15

al parámetro que representa la influencia del agua y de cero, como cuando se utiliza el RMR'_{76} , al de orientaciones de las juntas.

Tabla 3.10. Clasificación del GSI de la calidad del macizo

GSI	Clase	Calidad del Macizo
Muy mala	V	0-20
Mala	IV	21-40
Regular	III	41-60
Buena	II	61-80
Muy buena	I	81-100

Sustituido el valor de RMR calculado anteriormente, en la fórmula de $GSI=RMR'_{89}-5$, se obtiene el **GSI=59** que corresponde a la **Clase III** y nos da una calidad del macizo **Regular**. Pero en el anexo 3 de la tabla de Índice de resistencia geológica para macizos rocosos fracturados con el valor obtenido de GSI, nos da una descripción de la estructura del macizo rocoso **formado por muchos bloques** (macizo rocoso formando por bloques angulares de muchas caras delimitadas por cuatro o más familias de discontinuidades. Los bloques están encajados pero solo parcialmente), y con condiciones de los labios de las discontinuidades **Buena** (superficies rugosas, ligeramente meteorizadas y teñidas de óxido).

En la tabla 3.11 se muestra las clasificaciones aplicadas en el presente trabajo, con su valoración y descripción de la calidad del macizo rocoso correspondiente.

Clasificación	Valoración obtenida	Calidad de roca
RQD	80.35	Buena
RMR	64	Buena
Q de Barton	0.29	Muy mala
SMR	27.87	Mala
GSI	59	Regular

III.2. EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE LOS TALUDES EN EL SECTOR ANALIZADO EN LA CANTERA “URBANO NORIS”

III.2.1. Tipología de movimientos de la cantera

La cantera “Urbano Noris” presenta varios tipos de movimientos de masas, debido a la existencia de varias grietas; en el capítulo II, en la geología del yacimiento, se describió que el yacimiento presenta una estructura del tipo de flexión anticlinal, cuyas alas buzan con ángulos llegando a ser casi horizontales en el centro. Sin embargo se puede considerar visualmente una estabilidad general, pero en un análisis minucioso a menor escala se observa una inestabilidad que puede ser controlada con saneamiento (ver figura 3.1). Por tanto, sobre la base de las observaciones y estudios realizados se determina que los tipos de movimientos de masas predominantes o que se manifiestan en nuestro caso de estudio dentro de la cantera de calizas “Urbano Noris”, son deslizamientos, desprendimientos y roturas por cuñas y planares debido a las familias de grietas y las calizas (blanda y dura) que la forman en algunos sectores.

En lo referente a los deslizamientos que se originan en el frente de explotación, se producen a través de los procesos de desestabilización de masas de tierra por el efecto de las condiciones geológicas, principalmente en sectores donde se agrupan las calizas blandas.

Los desprendimientos o caídas de bloques en la cantera objeto de estudio, ocurren debido al colapso estructural del macizo; con la presencia de estos movimientos, es difícil el acceso al área de estudio. La caída de los bloques de cualquier tamaño que se desprenden del talud está dada por la fuerte pendiente que presentan los mismos, adquirida a lo largo de la superficie, durante la explotación, en la cual ocurren desplazamientos producidos por cortante reflejándose mediante vuelcos, saltos o deslizamientos, lo que se pudo comprobar mediante la observación y la medición in situ de algunos parámetros geométricos y estructurales, donde cuya pendiente superficial es de más de 75 grados, como se muestra en la figura 3.1, que aparece a continuación.



Figura 3.1. Proceso de falla al volteo en la cantera “Urbano Noris”

III.2.2. Evaluación de la estabilidad de los taludes aplicando el método de equilibrio límite exacto (rotura plana y rotura en cuña)

En cualquier parte de la superficie terrestre la gravedad actúa continuamente sobre los materiales, que tienden a dirigirse hacia niveles más bajos (P. Oyanguren & L. Monge, 2004). El término más comúnmente usado para designar los movimientos producidos en los taludes es el de deslizamiento. Dicho término implica movimientos de masas formadas por diferentes tipos de materiales: suelos, rocas, rellenos artificiales o también combinados de los mismos, a través de una superficie determinada denominada de rotura. La velocidad con que se desarrollan las roturas de los taludes es variable, dependiendo de la clase de material involucrado en los mismos y del tipo de deslizamiento. El movimiento puede ser progresivo, produciéndose inicialmente una rotura local, que va progresando hasta convertirse en una rotura generalizada.

– Rotura plana

Es cuando existe una fracturación dominante en la roca con la dirección aproximadamente igual a la del talud, pero que buza menos que este. Normalmente requiere superficies laterales de despegue, entre terrenos de características de resistencias buenas, intercalados por otro de menor calidad, que es el caso de nuestro macizo rocoso. Una de las condiciones ante las otras ya mencionadas es el rumbo de la superficie de rotura que debe ser mayor que 20° con respecto a la frente del talud.

Para determinar la rotura plana de la cantera en estudio se calcula el factor de seguridad (**FS**), para ello empleamos la expresión siguiente:

$$FS = \frac{C'A + [W \cos\Psi_p - U - V \sin(\Psi_p + \delta)]\tan\phi'}{W \sin\Psi_p + V \cos(\Psi_p + \delta)} \quad (3.1)$$

Donde:

$$A = \frac{H - Z}{\sin\Psi_p}$$

$$U = \frac{1}{2}\gamma_w Z_w \frac{H - Z}{\sin\Psi_p}$$

$$V = \frac{1}{2}\gamma_w Z_w^2$$

$$W = \frac{1}{2}\gamma H^2 \left[\frac{1 - \left(\frac{Z}{H}\right)^2}{\tan\Psi_p} - \frac{1}{\tan\Psi_t} \text{ Caso a} \right]$$

$$W = \frac{1}{2} \frac{\gamma H^2 \left(1 - \frac{Z}{H}\right)^2 \left(\frac{\tan\Psi_t}{\tan\Psi_p} - 1\right)}{\tan\Psi_p} \text{ Caso b}$$

H: altura del talud

Z: altura de la grieta de tracción

Z_w : altura del agua en la grieta de tracción

C' y ϕ' : parámetros de resistencia del terreno en términos de tensiones efectivas

A: área de la superficie de deslizamiento (supuesta de ancho unidad)

Ψ_p : ángulo que forma el plano de deslizamiento con la horizontal

Ψ_t : ángulo del talud con la horizontal

U: resultante de las presiones intersticiales que actúan en el plano de deslizamiento

V: resultante de las presiones intersticiales que actúan en el plano de deslizamiento

Nota: las figuras que representan los casos a y b de W, verlas en el anexo 4

La expresión anterior de **FS** es una de las más generales y que se utilizan en las últimas décadas para analizar y resolver problemas de rotura plana con razonable éxito.

En muchas ocasiones, la grieta de tracción no se hace visible debido a múltiples factores como la existencia de una escombrera en la zona donde aflora (P. Oyanguren & L. Monge, 2004). En estos casos el problema se resuelve obteniendo la profundidad crítica de la grieta de tracción, h_t que es la que hace que el factor de seguridad sea mínimo, se obtiene derivando respecto a h_t/H la expresión (3.1) correspondiente a un caso seco, sin movimiento sísmico y sin anclajes:

$$FS = \frac{C * A}{W * \sin \Psi_p} + \cot \Psi_p * \tan \phi \quad (3.2)$$

Se emplea la expresión 3.2 para el factor de seguridad cuando el talud está seco, no hay fuerza sísmica y no se han colocado anclajes (que es el caso de los taludes de la cantera “Urbano Noris”).

La profundidad crítica, obtenida igualando a cero dicha derivada, toma el siguiente valor:

$$\frac{h_t}{H} = 1 - \sqrt{\cot \Psi_f * \tan \Psi_p}$$

y la distancia de la grieta de tracción a la coronación del talud viene dada por:

$$d_c = H * \sqrt{\cot \Psi_f * \cot \Psi_p} - H * \cot \Psi_f$$

Para el cálculo de la estabilidad de los taludes de la cantera en estudio se utiliza la expresión 3.2, y mediante la representación geométrica del talud con una rotura plana, como se muestra a continuación en la figura 3.2.

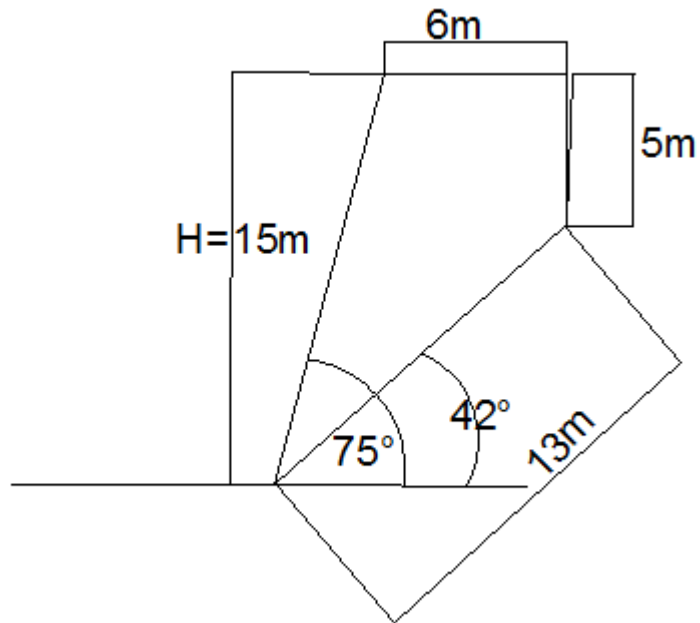


Figura 3.2. Talud con una rotura plana

Datos:

$$H = 15 \text{ m} \quad \Psi_t = 75^\circ \quad \gamma = 20,89 \text{ KN/m}^3$$

$$Z = 5 \text{ m} \quad \phi = 58^\circ$$

$$\Psi_p = 42^\circ \quad C = 4 \text{ MPa}$$

Calculando:

$$A = \frac{15 - 5}{\sin 42^\circ} = 15 \text{ m}$$

$$W = \frac{1}{2} (20,89 \text{ KN/m}^3) (15 \text{ m})^2 \left[\frac{1 - \left(\frac{5}{15}\right)^2}{\tan 42^\circ} - \frac{1}{\tan 75^\circ} \right]$$

$$W = 1.668,59 \text{ KN/m}$$

$$FS = \frac{4 \text{ KN/m}^2 * 15 \text{ m}}{1.668,59 \text{ KN/m} * \sin 42^\circ} + \cot 42^\circ * \tan 58^\circ$$

$$FS = 1,81$$

El factor de seguridad de los taludes para que sea estable debe ser mayor que 1. En nuestro caso el **FS** calculado es igual a **1,81**, esto quiere decir que el talud de

la cantera en estudio es estable, de acuerdo con las observaciones de campo, ya que el talud se encontraba en un buen estado, a pesar de representar una rotura de 5m.

– **Rotura en cuña**

Se produce cuando existen dos planos de discontinuidades, dispuestas oblicuamente a la superficie del talud o de manera que el buzamiento de la línea de intersección de ambos planos tenga un buzamiento inferior al ángulo de talud, (línea de intersección con inclinación desfavorable).

Las roturas en cuña son comúnmente en macizos rocosos con discontinuidades bien definidas (fallas, fracturas, entre otros).

➤ **Análisis de la rotura de cuña a partir del software Dips v5.103**

El software Dips v5.103 es un programa diseñado para realizar análisis y visualizar información estructural de igual modo que si se usa una red estereográfica, permite definir el elemento de yacencia del agrietamiento para determinar si la prevalencia es favorable o no a la falla.

Dips v5.103 está diseñado para el análisis interactivo de datos geológicos basados en la orientación (dirección de buzamiento y el ángulo de buzamiento). El programa es capaz de muchas aplicaciones y está diseñado para el usuario principiante u ocasional, y para el usuario consumado de proyección estereográfica que desee utilizar las herramientas más avanzadas en el análisis de datos geológicos (Pesántez et al., 2013).

Desde el punto de vista de análisis, la característica más importante de una discontinuidad es su orientación (rumbo y buzamiento) la interpretación de los datos geológicas estructurales requiere del uso de proyecciones estereográficas que permiten la representación en dos dimensiones, de datos en tres dimensiones. La proyección estereográfica es una esfera que tiene una orientación fija de su eje relativo al norte y su plano ecuatorial, relativo al horizontal.

En estabilidad de taludes normalmente se utiliza el hemisferio inferior de la esfera para la proyección estereográfica.

Para este análisis varios investigadores utilizan la proyección estereográfica mediante software que se encarga de proyectar los polos de los planos y estructuras tomando como base los datos de sus orientaciones (las mediciones de rumbo y buzamiento tomado en el campo). Para nuestro caso utilizamos el programa Dips v.5.103 a partir del diagrama de Fisher (figura 3.3).

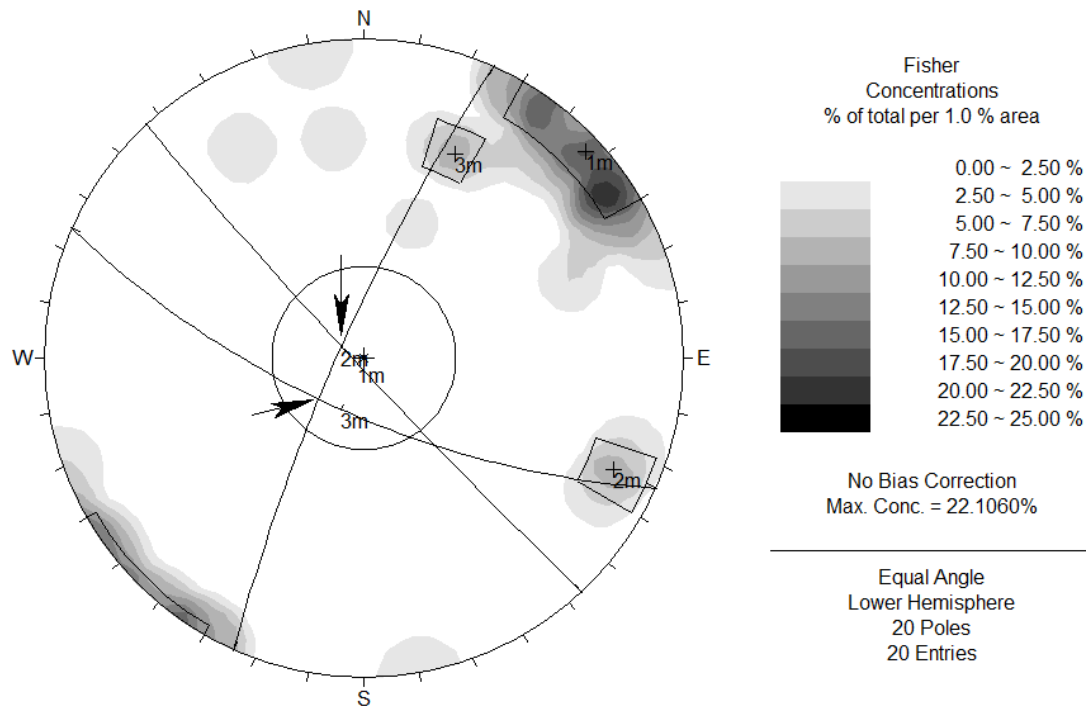


Figura 3.3. Proyección estereográfica de posibilidad cinemática de que se produzca deslizamiento de cuña

En la figura 3.3 se puede observar el diagrama de Fisher por la proyección estereográfica empleado en el software Dips v.5.103, se construyen los planos de círculos máximos con polos 1,2 y 3; se traza un círculo con el de proyección de radio igual al ángulo complementario al de fricción de los planos de discontinuidades, desde la esfera del diagrama hacia el centro. Como se observa en la figura que la intersección de los planos de círculos máximos cae dentro del círculo, eso significa que exista caída o deslizamiento de los bloques de roca que se forman producto al agrietamiento, debido a que el ángulo de la intersección es mayor que el ángulo de fricción interna.

Resumen de los resultados de evaluación de la estabilidad de los taludes

En la tabla 3.12 se muestran los resultados obtenidos con la aplicación de los métodos escogidos para el estudio de la calidad del macizo y la evaluación de la estabilidad de los taludes.

Tabla 3.12. Resultados obtenidos durante los análisis.

Método	Descripción	Resultado
RQD (Deere)	80.35%	CALIDAD DE ROCA BUENA
RMR (Bieniawski)	Valoración RMR=64	CALIDAD DEL MACIZO BUENA
Q DE BARTON	Valoración Q=0.29	CALIDAD DE ROCA MUY MALA
SMR (Romana)	Valoración SMR=27.87	CALIDAD DEL MACIZO INESTABLE
GSI (Hoek y Marinos, 2000)	Valoración GSI= 59	CALIDAD DEL MACIZO REGULAR
Rotura plana (FS)	FS=1,81	Estable
Rotura de cuña, Dips v.5.103	Existen 2 intersecciones de planos de deslizamiento, que originan la formación de cuñas	Planos de deslizamiento

Con los resultados representados en la tabla 3.12 se estima que los taludes analizados en la cantera de calizas “Urbano Noris” se comportan como **estables con presencia de planos de deslizamiento, pudiendo interferir este último en la estabilidad de los mismos.**

III.3 Medidas de estabilización de los taludes

La estabilidad de los taludes analizados de la cantera “*Urbano Noris*”, da un factor de seguridad favorable, pero presenta inestabilidades por desprendimiento de bloques de rocas, originados en la formación de cuña debido a los sistemas de discontinuidades que fueron medidas y catalogadas; presenta un gran grado de meteorización principalmente a la composición química que presentan las rocas en esta área. Con la realización del estudio geomecánico y el análisis de estabilidad de los taludes de dicha cantera, dado que el talud analizado en la base de la cantera es estable, se esperan deslizamientos y desprendimientos.

Es imposible eliminar completamente los desprendimientos de bloques de rocas de los macizos rocosos, pero con el uso de métodos de protección se evita que los bloques desprendidos alcancen al personal, maquinas, vehículos, entre otros. Es importante valorar el aspecto económico a la hora de definir un método u otro de corrección de taludes, para un mismo nivel de garantía.

Para evitar que esto ocurra se proponen las siguientes medidas de estabilización:

1. Modificación de la geometría

Los taludes de la cantera “*Urbano Noris*” presentan diferentes alturas y ángulos, aspecto muy importante que produce inestabilidades de bloques y deslizamientos por cuñas de rocas. En este caso se recomienda el cambio de la geometría (reducción de ángulo de talud y reducción de la altura de banco). Pero en la modificación de la geometría busca obtener al menos uno de los dos efectos siguientes:

- Disminuir las fuerzas que tienden al movimiento de la masa.
- Aumentar la resistencia al corte del terreno mediante el incremento de la superficie de rotura.

2. Saneamiento en el frente de arranque

Se debe mantener el constante saneo en los frentes de taludes excavados para prevenir las caídas de los bloques y para el mejor manejo de las máquinas, y sobre todo del personal que trabaja en ellas.

Para esto se deben construir bermas intermedias en los bancos, es una medida que debe definirse antes de la construcción del mismo, en la fase de proyecto, a diferencia del descabezamiento y los tacones. Las bermas producen un efecto beneficioso y además se emplean con otros propósitos (para transporte y seguridad).

3. Control de la voladura

La fragmentación producida por la voladura en el macizo se debe valorizar mediante la calidad del macizo rocoso, el seguimiento geológico y geomecánico del frente de destape y extracción permite identificar las inestabilidades y definir desde el punto de vista constructivo qué medida de aplicará.

En la cantera “Urbano Noris”, los taludes se excavan con la voladura precorte, la roca es competente, sin embargo la voladura no ha sido bien diseñada por eso aparecen fragmentos de rocas en equilibrio prácticamente inestables que hay que eliminar.

4. Corrección de drenaje

Si la cantera en estudio en un futuro presenta agua se recomienda la utilización de las medidas de drenaje. La corrección de taludes mediante medidas de drenaje tiene por objeto reducir las presiones intersticiales que actúan sobre la potencia o existente superficie de deslizamiento, lo que aumenta su resistencia o disminuye el peso total y, por tanto, las fuerzas desestabilizadoras.

El uso de las medidas de drenaje es frecuente en macizos con presencia de agua, en el caso del macizo en estudio es seco, pero su aplicación desde el inicio de la construcción permite el máximo beneficio, pues se mantiene intacta su resistencia, a pesar de su coste variable para cada uno de los diferentes métodos aplicables.

CONCLUSIONES

1. Se realizó el análisis de las características ingeniero-geológicas y la evaluación del comportamiento mecánico estructural del macizo, empleando las clasificaciones geomecánicas de donde se obtiene que la calidad del macizo de la cantera es buena.
2. Empleando los métodos para evaluar la estabilidad del talud que más se adaptan a este tipo de macizo, se obtiene que la estabilidad de los taludes de la cantera “Urbano Noris” son estables aunque presentan planos de debilitamientos.
3. Se realizó una propuesta de medidas de estabilización que permite evitar inestabilidades en los taludes propensos, para garantizar la seguridad de los mismos.

RECOMENDACIONES

- ✓ Mantener un monitoreo sistemático durante la explotación, de forma tal que se puedan mitigar las posibles manifestaciones de pérdida de estabilidad en los taludes.
- ✓ Aplicar las medidas de estabilización propuestas.

BIBLIOGRAFÍA

1. BLANCO, T. R. 1998. Elementos de la mecánica de los medios rocoso: Félix Varela, La Habana, 327p.
2. BLANCO, T. R. 1998. Valoración de la estabilidad de las excavaciones a partir del criterio de formación y dimensiones de una zona de deformación inelástica en su contorno: Centro nacional de informaciones geológicas. Instituto de Geología y Paleontología. Memorias III Congreso Cubano de Geología y Minería. La Habana. Cuba. 57 - 60p.
3. BARTON, N, R y Choubey. 1974. A review of the shear strength of filled discontinuities in rock. Ed.e.Brooch.
4. BARTON, N. (1991).: "Geotechnical Design". World Tunnelling.
5. BARTON, N.; LIEN, R. y LUNDE, J. 1977. "Estimation of support requirements for underground excavations". Proc. of 16th Symposium on Design Methods in Rock Mechanics. Minnesota, 1975. Published by ASCE, New York, 1977. Discussion.
6. Bieniawski. Z. T. (1989). "Engineering rock mass classification". New York: Wiley Interscience.
7. Bieniawski. Z. T. (1979). Geomechanics classification of rock masses and its application to tunnelling. Proc. II. Tnt. Congress for Rock Mechanic. ISMR. Vol II.
8. BARTON, N.; LØSET, F.; LIEN, R. y LUNDE, J. 1980: "Application of System in Design Decisions Concerning Dimensions and Appropriate Support for Underground Installations". International Conference on Sub-surface Space. Rockstore, Stockholm. Sub-surface Space, Vol. 2. Pergamon.
9. Colectivo de autores. (2011). Caracterización y clasificación geomecánica del macizo rocoso, para determinar la estabilidad óptima de los taludes, en la cantera la primavera, municipio de bosconia. Tesis de Maestría.
10. Cartaya, P. M. (2001). Caracterización geomecánica de macizos rocosos de la región Oriental de Cuba. Tesis Doctoral. ISMMANJ.
11. Díaz, J. y Ruiz, M. (2009). Informe de elevación de categoría de los recursos del yacimiento de calizas para cal "San Germán" Municipio: "Urbano Noris". Provincia: Holguín. EES EXPLOMAT UEB Oriente.

12. D. Torres y R. Díaz, (1993). Informe de búsqueda detallada y exploración orientativa y detallada de calizas para áridos finos en el yacimiento “Piedra Urbano Noris”. Municipio: “Urbano Noris”. Provincia: Holguín.
13. Gavilanes J. H, & Andrade Haro B. (2004). Introducción a la ingeniería de TÚNELES-caracterización, clasificación y análisis de macizos rocosos.
14. González, V. INGENIERÍA GEOLÓGICA. LIBRO DE TEXTO. Cap.9. Taludes.
15. GONZÁLEZ DE VALLEJO. L. 1998. Las clasificaciones geomecánicas para túneles. Ingeotúneles: Carlos López Jimeno __ Madrid. I. T. S. De Ingenieros de Minas. U. P. Madrid. T – I.
16. Hoek, E. (2000). Rock Engineering. Course Notes by E. Hoek. Cap.3.
17. ISRM. Rock Characterization Testing and Monitoring. Brown, E.T. Pergamon Press, 1981.
18. LÓPEZ, C. 1998. ESTEFANÍA PUEBLA. S. Túneles hidrotécnicos Ingeotúneles: __ Madrid. I. T. S. De Ingenieros de Minas. U. P. Madrid. T –I.
19. LÓPEZ, C. (2002). Manual de estabilización y revegetación de taludes._U.D. Proyectos E.T.S.I. Minas. U.P.Madrid.
20. Legrá. A. A. (2017). Elementos teóricos prácticos de la investigación científico-tecnológica. Edición 0,9948 Final.
21. M. Ferrer Y L. Gonzáles de Vallejo. (2003). Manual de campo para la descripción de macizos rocos en afloramientos._ Instituto tecnológico GeoMinero de España.
22. Marinos, P. & Hoek, E. (2000). GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation. Int. Proceeding of the GeoEng200 at the international conference on geotechnical and geological engineering, Melbourne, Technomic publishers, Lancaster, 1422-1446.
23. Mora, M., Mayo, A. y Rojas, D. (2016). Documento de trabajo con la información básica para la operación de la cantera de “Urbano Noris”.
24. Noa, M. R. (2003). Indicaciones metodológicas para la elección del método de arranque de las rocas durante el laboreo de excavaciones subterráneas horizontales de pequeña y mediana sección en cuba oriental. Tesis Doctoral, Instituto Superior Minero Metalúrgico.
25. Otaño Noguel, J. (2016-2017). CURSO DE EXPLOTACIÓN DE ROCAS ORNAMENTALES.

26. Pesántez, M. J. y Molina, S. D. (2013). Evaluación de la estabilidad de los taludes en un sector de la cantera de materiales pétreos "Las Victorias". Universidad de Cuenca. Facultad de Ingeniería.
27. Palmstrom, A. Measurements of and correlatios between block size and rock Quality designation (RQD). Tunnelling and Underground Space Tchnology. 2005.
28. P. Oyanguren, & L. Monge. (2004). Mecánica de rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes: Red DESIR.
29. Romana, Ruiz. M. (1997). El papel de las clasificaciones geomecánicas en el estudio de la estabilidad de taludes. Simposio Nacional de Taludes y Laderas. Granada, Vol. 3.
30. Romana, M. (1992). Métodos de corrección de taludes según la clasificación geomecánica SMR. III Simposio Nacional sobre Taludes y laderas Inestables. La Coruña. pp. 629-650.
31. Rocscience (2009a) Dips v5.103 graphical & statistical analysis of orientation data. 2009. Rocscience Inc <http://www.rocscience.com>.
32. Ruano,k. y Riascos, J. (2016). Análisis y diseño de los taludes en la mina a cielo abierto de diabasa de triturados "El chocho". Pontificia Universidad JAVERIANA.
33. Suarez, D. J. (1998). Análisis Geotécnico Colombia: Instituto de Investigación., Vol.1.
34. Suarez, D. J. (1998). Deslizamiento y estabilidad de taludes en zonas tropicales._ Instituto de Investigaciones sobre erosión y deslizamientos, Ingeniería de Suelos Ltda. Colombia.
35. Wikipedia. (2017). Wikipedia.

ANEXOS

Anexo 1. Medición de los elementos de yacencia



Anexo 2. Estimación de parámetros de Q de Barton:

Tabla 1: Jn

Jn	Número de familias	Valor
Masivo, sin o con pocas juntas		0,5 – 1
Una familia de juntas		2
Una familia y algunas juntas ocasionales		3
Dos familias de juntas		4
Dos familias y algunas juntas		6
Tres familias de juntas		9
Tres familias y algunas juntas		12
Cuatro familias o más, roca muy fracturada.		15
Roca triturada terrosa		20

Tabla 2: Jr

Jr	Número de rugosidad de las juntas	Valor
Juntas (Contacto entre las dos caras)		
✓ Discontinuas		4
✓ Onduladas , rugosas		3
✓ Onduladas, lisas		2
✓ Onduladas perfectamente lisas		1,5
✓ Planas, rugosas e irregulares		1,5
✓ Planas lisas		1
✓ Planas y perfectamente lisas		0,5
Juntas rellenas (Relleno impide contacto entre las dos caras)		
✓ Material arcilloso		1
✓ Material arenoso, de grava o triturado		1

Tabla 3: Ja

Ja Coeficiente de alteración de la junta	Valor
Juntas (Sin minerales de relleno intermedio)	
✓ Juntas de paredes sanas	0,75 – 1
✓ Ligera alteración	2
✓ Alteraciones arcillosas	4
Juntas (minerales de relleno en pequeño espesor)	
✓ Con partículas arenosas	4
✓ Con minerales arcillosos no blandos	6
✓ Con minerales arcillosos blandos	8
✓ Con minerales arcillosos expansivos	8 – 12
Juntas (minerales de relleno en gran espesor)	
✓ Con roca triturada/desintegrada y arcilla	6 – 12
✓ Con zonas de arcilla limosa o arenosa	5
✓ Con zonas de arcillosos (espesor grueso)	10 - 20

Tabla 4: SRF

SRF Factor de reducción de esfuerzos	Valor
Zonas débiles intersectan a la excavación :	10
✓ Multitud de zonas débiles o milonitos	
✓ Zonas débiles aisladas, con arcilla o roca descompuesta (cobertura ≤ 50)	15
	2,5
✓ Zonas débiles aisladas con cobertura > 50	7,5
✓ Abundantes zonas débiles en roca competente	
✓ Zonas débiles aisladas en roca competente (cobertura ≤ 50)	5
	2,5
✓ Zonas débiles aisladas con cobertura > 50	
Roca competente (Problemas tensionales en las rocas)	
✓ Pequeña cobertura	2,5
✓ Cobertura media	1
✓ Gran cobertura	0,5 – 2
Rocas deformables (Flujo plástico de roca)	
✓ Con bajas presiones	5 – 10
✓ Con altas presiones	10 – 20
Rocas expansivas	
✓ Con presión de hinchamiento moderado	5 – 10
✓ Con presión de hinchamiento alta	10 – 20

Tabla 5: Jw

Jw Coeficiente reductor por la presencia de agua	Valor
Excavaciones secas con <5l/min localmente	1
Afluencia media con lavada de algunas juntas	0,66
Afluencia importante por juntas limpias	0,5
Afluencia importante con lavado de juntas	0,33
Afluencia excepcional inicial, decreciente con el tiempo	0,2 – 0,1
Afluencia excepcional inicial mantenida	0,1 – 0,05

Anexo 3. Tabla de Índice de resistencia geológica (GSI) para macizos rocosos fracturados (Hoek y Marinos, 2000)

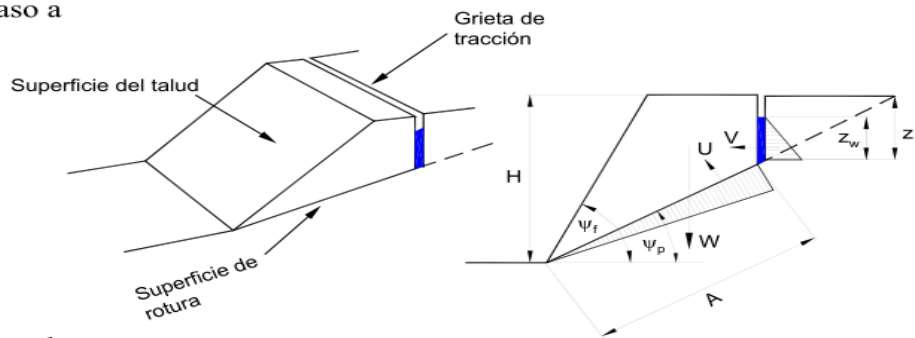
ESTRUCTURA DEL MACIZO ROCOSO	CONDICIONES DE LOS LABIOS DE LAS DISCONTINUIDADES				
	MUY BUENA	BUENA	MEDIA	MALA	MUY MALA
CALIDAD DECRECIENTE DE LOS LABIOS DE LAS DISCONTINUIDADES \Rightarrow					
 INTACTO O MASIVO Muestras intactas de roca o macizos rocosos masivos con pocas discontinuidades muy espaciadas.	90			N/A	N/A
 FORMADO POR BLOQUES Macizo rocoso consistente en bloques cúbicos delimitados por tres familias de discontinuidades, con los bloques bien encajados.	80	70			
 FORMADO POR MUCHOS BLOQUES Macizo rocoso formado por bloques angulares de muchas caras delimitados por cuatro o más familias de discontinuidades. Los bloques están encajados pero sólo parcialmente.		60	50		
 FORMADO POR MUCHOS BLOQUES, DISTORSIONADO Y BANDEADO Plegado con muchos bloques angulares formados por la intersección de muchas familias de discontinuidades. Planos de estratificación o de esquistosidad persistentes.			40	30	
 DESINTEGRADO Macizo rocoso muy fracturado con una mezcla de bloques angulares y redondeados débilmente encajados.				20	
 LAMINADO Y CIZALLADO Debido a la existencia de numerosos planos débiles muy próximos de esquistosidad o de cizalla, no existen bloques.	N/A	N/A			10

Notas sobre las condiciones de los labios de las discontinuidades:

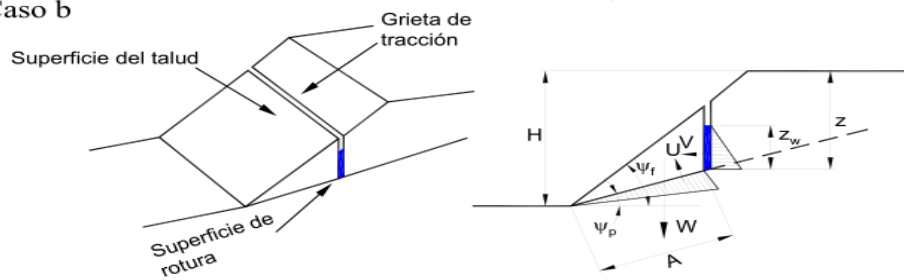
- ✓ Muy Buena: superficies muy rugosas y sanas
- ✓ Buena: superficies rugosas, ligeramente meteorizadas y teñidas de óxido
- ✓ Media: superficies lisas y moderadamente meteorizada y alteradas
- ✓ Mala: superficies con espejos de fallas y altamente meteorizadas, con rellenos de fragmentos angulares o con recubrimientos compactos
- ✓ Muy Mala: superficies con espejo de falla altamente meteorizadas con recubrimientos o rellenos de arcillas blandas.

Anexo 4. Figuras que representan los casos a y b de W para rotura Planar

Caso a



Caso b



Anexo 5. Frente de arranque de la cantera "Urbanos Noris"

