

Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero en Minas

Tema: Caracterización geomecánica del macizo rocoso para la evaluación de la estabilidad del túnel Levisa Mayarí Tramo V.

Autor: Juan José Desdín González

Tutor: Dr.C Maday Cartaya Pire

Curso: 2017-2018

“Año 60 de la Revolución”

Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero en Minas

Tema: Caracterización geomecánica del macizo rocoso para la evaluación de la estabilidad del túnel Levisa Mayarí Tramo V.

Autor: Juan José Desdín González _____

Tutores: Dr.C. Maday Cartaya Pire _____

MSc. Yurisdell Velázquez La O

Curso: 2017-2018

“Año 60 de la Revolución”

PENSAMIENTO:

“Creo en el milagro de lo que puede hacer el trabajo, de lo que puede hacer la ciencia y de lo que pueden hacer los hombres.”

Fidel Castro Ruz.



DEDICATORIA

Dedico este esfuerzo de 5 años de vida a mis padres Juan José Desdín González y Marlenis María González Ricardo por haberme dado la vida y fomentar en mí el hábito del saber.

AGRADECIMIENTOS

Al MSc. Yurisley Valdés Mariño por ser un modelo a seguir como persona y profesional, por ayudarnos en los momentos que fuera necesario.

Muy en especial a mi tutora la Dr. C Maday Cartaya Pire.

A mis padres y mi hermano José Enrique Desdín González

A mis profesores sin los cuales no hubiese podido llegar a este momento Adis Fiol, Lianeyis, Héctor, Julio, Miriam, Yoandro, Cuesta, Noa, Ismael, Watson, Idania, Ches Viera, Victor Fransisco, Yordany, Polanco, Yaritza, Naisma, Alexis y Mayda.

A mis compañeros de aula y amigos inseparables Yasmany, Nilie, Aldemiro, Arletty LLevat, Arlety Terrero, Luis, Annelis, Evelin, Aliuska, Aliena, Amalia, José Adrián, Milena, Dadiana, Gisel, Cristian, José Antonio (Pirro), Ignacio y Salette.

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó la caracterización geomecánica del macizo rocoso para la evaluación de la estabilidad del túnel Levisa Mayarí Tramo V, para lo que se efectuó el estudio ingeniero – geológico del macizo rocoso, así como el levantamiento geológico de campo del agrietamiento según las litologías presentes y tramos o estaciones de medición, por estacionados de 500 m, se empleó el software DIP V.5 para el procesamiento del agrietamiento y la representación espacial de las familias de grietas, así como los bloques formados. Para el cálculo del volumen de los bloques se empleó la metodología de la International Society Rock Mechanics (ISRM), se empleó la clasificación geomecánica de Barton para la obtención de la calidad de las rocas. Como resultados fundamentales se obtuvo que las serpentinitas esquistosas y/o budinas poseen cinco familias de grietas y las serpentinita agrietada y/o brechas y las serpentinita muy intemperizadas poseen tres familias, según la Q de Barton las rocas son de muy mala calidad alcanzando valores de 0.122; 0.400 y 0.711. Dada la orientación de las discontinuidades, obtenidas con los diagramas de círculos máximos, los tramos de túnel más inestables son los atravesados por las serpentinita agrietada y/o brechas, los bloques de rocas formados son de tamaño medio, estos resultados significan que los tramos de túnel estudiados son inestables.

Palabras Claves: Túneles hidrotécnicos, agrietamiento, clasificaciones geomecánicas, bloque natural de rocas.

ABSTRACT

In the present work accomplished the geomechanics characterization of the rocky mountain mass for the evaluation of the stability of Levisa Mayarí Tramo V tunnel, for which was made the rocky mountain mass engineer-geological study, as well as the geological uprising of field of the cracking according to the present lithology's and stretches or measurement stations, for parked of 500 m, used the software DIP V.5 for the processing of cracking and the space performance of cracks families, as well as them blocks formed. The International Society Rock Mechanics' methodology was used for the calculation of the blocks volume (ISRM) was used Barton's geomechanics classification for the obtaining of the quality of the rocks. As fundamental results were obtained than the shaly serpentines and or budinas possess five families of cracks and the cracked serpentines and or breaches and the serpentines very intemperizada possess three families, according to Barton's Q the rocks possess low quality catching up valuables of 0,122; 0,400 and 0,711. Whit the discontinuities orientation, obtained with the diagrams of maximum circles, the tunnel stretches more unstable they are the lying across for the cracked serpentine and or breaches, the rocks blocks formed are of half size, these results mean that the stretches of tunnel studied are unstable.

Key words: Hidrotechincs tunnels, cracking, geomechanics classifications, natural of rocks blocks.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO Y ESTADO ACTUAL DE LA TEMÁTICA	5
Introducción	5
I.1 Métodos de construcción de túneles.....	5
I.2 Caracterización geomecánica de los macizos rocosos.....	9
I.3 Clasificaciones geomecánicas	10
I.4 Fundamentación de la clasificación geomecánica propuesta.	15
I.5 Trabajos previos realizados a nivel mundial y en el área de estudio	17
CAPÍTULO II. CARACTERIZACIÓN INGENIERO GEOLOGICA DEL AREA DE ESTUDIO	21
II.1 Situación geográfica del área de estudio	21
II.2 Vías de comunicación	22
II.3 Geología del área de estudio	23
I.4 Hidrogeología.....	27
II.5 Tectónica	29
II.5 Propiedades físico mecánicas de las rocas en el trazado del túnel	31
II.6 Características constructivas generales del túnel.	36
II.7 Procesos Tecnológicos que se ejecutan durante la construcción	40
CAPÍTULO III. ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS GEOMECÁNICOS DEL MACIZO ROCOSO	45
III.1 Características generales de las diferentes capas que atraviesa el túnel... ..	45
III.2 Levantamiento geológico de agrietamiento.....	46
III.3 Calculo del volumen del bloque	50
CONCLUSIONES	55
RECOMENDACIONES	56
BIBLIOGRAFÍA.	57
ANEXOS	60

Índice de Figuras

Figura 1. Propuesta de sostenimiento según la Q de Barton.....	15
Figura 2. Mapa de ubicación geográfica general del área Túnel Levisa - Mayarí ..	21
Figura 3. Área donde se encuentra ubicado el Tramo V (color Lila) y Túnel de Conexión No. 3 (color amarillo)	22
Figura 4. Relieve del área de estudio.....	23
Figura 5. Comportamiento de las lluvias máximas diarias anuales en los años más significativos	25
Figura 6. Perfil ingeniero-geológico del área de estudio.....	27
Figura 7. Cuencas acuíferas de la provincia Holguín	28
Figura 8. Afloramiento de las serpentinitas muy intemperizadas y suelo eluvial ...	32
Figura 9. Serpentinita esquistosa y/o budinadas.....	34
Figura 10. Serpentinitas agrietadas y/o brechosas.....	36
Figura 11. Vista del túnel Levisa - Mayarí Tramo V.....	38
Figura 12. Perforadora Tamrock Axera 6-240	41
Figura 13. Pala cargadora Toro 400.....	42
Figura 14. Dumper camión de volteo de perfil bajo	43
Figura 15. Gunitadora SIKA PM 4 207.....	44
Figura 16. Planos de grietas estacionado 1501 hasta el 2000	47
Figura 17. Plano de grietas estacionados 2501 hasta el 3000	49
Figura 18. Plano de grietas estacionados 3001 hasta el 3500	50
Figura 19.	51
Figura 20.	53
Figura 21.	54

Índice de Tablas

Tabla 1. Comportamiento de las lluvias máximas diarias anuales en los años más significativos	25
Tabla 2. Propiedades de la capa 5b.....	33
Tabla 3. Propiedades de la capa 5c.....	35

INTRODUCCIÓN

Desde la antigüedad los hombres surgen y se desarrolla según sus necesidades, provocando hasta la actualidad, el desarrollo del mismo. Por estas causas desde el nacimiento del hombre comienza a realizar excavaciones, que hoy le llamamos túnel utilizándolas para diversas funciones. Según “El Diccionario de la Real Academia Española de la Lengua” define túnel como paso subterráneo abierto artificialmente para establecer la comunicación por debajo de algún obstáculo (Gonzales L. 1998).

Los túneles se construyen a partir de la necesidad de superar un obstáculo natural, generalmente macizos montañosos. Pero además de las montañas existen otras barreras que se pueden atravesar mediante túneles, como los cursos de aguas (fluviales o marinos) y zonas urbanas densamente edificadas.

Tanto tuneleros, como mineros durante sus labores atraviesan gran variedad de macizos, a partir de medios rudimentarios disponibles, el inteligente uso de las manos y de sus elementales útiles, sin olvidar la imprescindible habilidad para protegerse ellos mismos frente a posibles desprendimientos mediante la colocación de fortificaciones, soportes y entibación. La mina más antigua que se conoce en el mundo se localiza en el cerro de Bomvu, la Lion Cave (Cueva del León), en Suazilandia. En ese lugar, datado del año 400 000 a.c, en ella el hombre de Neardental minaba hematita (piedra de sangre), muy apreciada para ritos mortuorios; las herramientas no eran otras que piedras afiladas y sus manos. Otros sitios de similar antigüedad son donde los neandertales habrían extraído el sílex para fabricar armas y herramientas que fueron encontradas en Hungría (López Jimenez C. 1998).

En los últimos años han existido avances y crecimientos de la ingeniería subterránea, siendo el rasgo característico, su diversificación, se puede decir sin exageración, que se está viviendo la era de los túneles y construcciones subterráneas multipropósitos, muestra de ello son los grandes túneles como el túnel Gotthard Base construido bajo los Alpes suizos, que tiene 57 kilómetros de

longitud, a 2.500 metros de profundidad bajo los Alpes suizos y acorta el camino entre el norte y el sur de Europa o el túnel submarino del Seikán con 54 km de longitud, el puente-túnel que une Kawasaki con Kisarazu al extremo opuesto de la bahía de Tokio con una longitud total de 15,1 km, así como el Eurotúnel, un túnel submarino que atraviesa el Canal de la Mancha con 50,5 kilómetros, aparte de que se tiene previsto construir el primer túnel de buques en el mundo que atravesará toda una montaña en la península de Stad, en las costas del suroeste de Noruega, el mismo medirá 1,7 kilómetros de largo, 36 metros de ancho y 27 de alto. Pero hoy no se trata sólo de concebir obras lineales, como estas, que comunican dos puntos para el transporte de personas o materiales, sino también de construir amplios espacios subterráneos e inmensas cavernas de propósitos diversos; bien de carácter lúdico, como el urbanismo subterráneo, bien con función de depósito y almacenamiento, tanto de combustible, alimentos, residuales, plantas, hidroeléctricas, potabilizadoras, refugios, etcétera. Algunos son acueductos, contruidos para el transporte de agua (para consumo, para aprovechamiento hidroeléctrico o para el saneamiento). También hay túneles diseñados para servicios de telecomunicaciones. Incluso existen túneles para el paso de ciertas especies de animales. Algunos conectan zonas en conflicto o tienen carácter estratégico, ya que sirven como refugio (Sagaseta C. 2006).

En labores mineras subterráneas y superficiales, cuyos componentes son estructuras complejas; para ejecutar dichas labores mineras, es necesario poseer el máximo conocimiento del macizo rocoso. Para tener el conocimiento del macizo rocoso hoy en día existen muchas clasificaciones geomecánicas, como: Protodyakonov, Bieniawski, Barton, Romana, que nos determinarán la calidad del macizo rocoso, cuya finalidad es dividir al macizo en dominios estructurales, cada uno de ellos tendrán características similares, como: litología, espaciado de grietas, entre otros. Los límites de un dominio estructural pueden coincidir con rasgos geológicos, tales como fallas o diques.

En nuestro país la minera constituye una de las principales ramas de la economía, que facilita el desarrollo de la industria, asegura el abastecimiento de las

principales materias primas e influye directamente en el desarrollo económico y social del país, la construcción de obras subterráneas, tanto civiles (trasvases, almacenes, obras militares, etcétera), como para obras protectoras de diversos usos, ha aumentado en los últimos años. Para garantizar la estabilidad y por ende la seguridad de estas excavaciones, deben realizarse estudios del macizo rocoso, con el objetivo de conocer cuáles son sus características y al menos suponer cuál será su comportamiento ulterior (Cartaya M. 2001).

El proyecto del túnel Levisa-Mayarí es una de las obras subterráneas más importante en construcción en el país, ya que su puesta en funcionamiento ayudara al trasvase de agua desde el macizo montañoso Nipe - Sagua - Baracoa hasta las llanuras del norte de Holguín, Las Tunas y el Noreste del Camagüey (Gonzales Luna G. 2008). El proyecto del túnel Levisa-Mayarí Tramo V está compuesto por cuatro objetos de obras fundamentales. El túnel principal constituye el elemento primordial que responderá directamente a la función de trasvasar agua con un caudal mínimo de 30 m³/s (Rodríguez Rojas J. 2005). La entidad relacionada con la construcción subterránea realiza el estudio del macizo rocoso donde está enclavada la obra, pero todavía existen insuficiencias en el alcance y contenido de esos estudios, ya que las obras continúan presentando problemas de estabilidad, influyendo esto directamente en el gasto de recursos, ocasionado porque los macizos rocosos no son diferenciados para su estudio y adopción de medidas, de acuerdo al comportamiento variado que puede presentar las diferentes litologías en la excavación subterránea. Por lo que habitualmente se fortifica después que ya se han producido pérdidas de estabilidad, o sencillamente se fortifica toda la excavación, “preventivamente”, considerando que el comportamiento de macizo será igual, demostrándose en la práctica que no siempre resulta así.

Es por ello que **el problema** que enfrenta la presente investigación radica en necesidad de realizar la caracterización geomecánica del macizo rocoso para la evaluación de la estabilidad del túnel Levisa Mayarí Tramo V.

El objetivo general es realizar la caracterización geomecánica del macizo rocoso para la evaluación de la estabilidad en el túnel Levisa Mayarí.

Objeto de estudio

Caracterización geomecánica del macizo rocoso en el túnel Levisa Mayarí.

Campo de acción

La estabilidad en el túnel Levisa Mayarí.

La formulación de **la hipótesis** parte del hecho de que si se realiza la caracterización-ingeniero geológica, se analizan las propiedades físico-mecánicas y la estructura y se determina la calidad de las rocas, es posible realizar la caracterización geomecánica del macizo rocoso para la evaluación de la estabilidad del macizo del Túnel Levisa Mayarí Tramo V.

Objetivos específicos:

- ✓ Realizar el estudio ingeniero – geológico del macizo rocoso.
- ✓ Realizar el procesamiento del agrietamiento empleando el software Dip 5.0.
- ✓ Calcular el volumen de bloque.
- ✓ Determinar la calidad de las rocas según la Clasificación geomecánica de Barton (1974).
- ✓ Evaluar la estabilidad del macizo.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO Y ESTADO ACTUAL DE LA TEMÁTICA

Introducción

Generalmente los túneles se construyen en suelos y túneles en roca. Los túneles en suelo su método de construcción está regido por la capacidad del suelo de sostenerse a sí mismo temporalmente, durante el proceso de la construcción y de las presiones que finalmente se producen en el sistema de soporte. Ambas están relacionadas con la profundidad del túnel y su diámetro, las propiedades elásticas y la resistencia del suelo y con la presión del agua subterránea. Mientras que los túneles en roca tienen muchas características de los túneles en suelo, sin embargo, tienen muchas diferencias significativas (Gavilanes J. Hernán 2004) Primero, la formación puede estar sometida a grandes esfuerzos residuales debido a grandes movimientos tectónicos o a la erosión de sobre cargas de tierras que encubren los esfuerzos debidos al peso de la roca. Segundo, las juntas planas de estratificación y zonas de esfuerzo cortante son zonas de debilitamiento que destruyen la continuidad de la masa de roca y concentran el esfuerzo cortante en esas direcciones (Palacio García S. 2015). El objetivo del presente capítulo es mostrar el nivel de conocimiento existente sobre la temática de estudio a nivel internacional y nacional.

I.1 Métodos de construcción de túneles

La construcción de túneles se realiza hoy en día primero realizándose un estudio geológico para obtener una información aproximada de depósitos aluviales y tipos de rocas que podemos encontrar en la excavación, así como de fallas y otros accidentes geológicos que habrá que investigar a fondo. A demás en estos informes se indicara la posible existencia de niveles de agua.

También nos aportaran datos los registros de perforaciones anteriores, como cimentaciones profundas, pozos, túneles anteriores, canteras y minas, e incluso la inspección de acantilados, lechos de ríos y cualquier otro tipo de excavación. Entre los métodos de construcción se encuentran:

Métodos tradicionales

Estos métodos son adecuados para túneles en terrenos blandos. Se atacan por fases debido a la poca competencia del terreno a excavar. La idea es que en secciones más pequeñas no se presentan tantos problemas o, al menos, se ven atenuados. Cada fase de excavación se sostiene convenientemente antes de ensancharse y proseguir con las labores.

Método Belga

El Método Belga (también llamado, actualmente, Método Tradicional de Madrid o, técnicamente, método de la galería en clave) es uno de los métodos más utilizados en la construcción de túneles en suelo.

Se caracteriza por la progresiva excavación de los elementos que componen el túnel, de tal forma que se van retirando los elementos más estables del túnel evitando el hundimiento o la falla de estabilidad del frente.

Se suele aplicar a túneles con un ancho de máximo de 8 m libres más 3 m de ambos hastiales, es decir, de un máximo de 11 m.

Este método consiste en realizar la excavación abriendo una pequeña galería en clave del túnel para ir ensanchándola poco a poco, protegiendo y entibando el frente, hasta permitir hormigonar toda la bóveda.

Método Suizo

El Método Suizo o Bernold es uno de los métodos de avance en túneles a plena sección más extendidos.

El caso ideal al perforar un túnel es colocar el sostenimiento justo después de haber excavado el túnel, sufriendo el terreno pequeñas deformaciones que no deterioran el macizo rocoso. El sistema Bernold de revestimiento de hormigón con chapas que actúan como encofrado y armaduras se aproxima al caso ideal que se ha señalado. Por otra parte, es una forma adecuada de colocar el hormigón en presencia de abundante agua.

La unión de dos paneles se hace por medio de varillas redondas de hierro que se acoplan en los orificios de la chapa. Todas las chapas están normalizadas en las dimensiones de 1080 mm x 1200 mm.

Método Ingles

Recibe su nombre por haber sido aplicado en túneles a través del tipo de terreno que usualmente se localizan en Inglaterra, como son las arenas y areniscas. Se suele usar en secciones pequeñas de 15 m².

En el proceso de excavación por este sistema se da comienzo por la clave del túnel de una sección pequeña y fácil de controlar. En caso de encontrar algún imprevisto en torno a 3 m² y unos 3 o 4 metros de longitud, una vez excavada la clave se procede a la entibación con puntales y tablonos o con placas de metal. Una vez que se ha conseguido asegurar el frente se procede a ampliar la sección con la excavación de los laterales de la clave. Este proceso es más rápido ya que se ataca por el lateral, una vez excavado se sostiene todo el frente de ataque y se pasa a excavar la destroza. Esta se hace a sección completa de unos 4 metros de altura y posteriormente se sostiene los laterales y se procede de igual modo a excavar la contra – bóveda. Una vez toda la sección del túnel excavada y sostenida se procede a revestir empezando por la solera o contra – bóveda.

Métodos nuevos

Tuneladora con escudo.

Los escudos son tuneladoras diseñadas para excavar rocas blandas o suelos, terrenos que necesitan sistemáticamente la colocación de un sostenimiento. Los escudos cuentan con una carcasa metálica exterior que sostiene provisionalmente el terreno desde el frente de avance hasta algo más allá del lugar donde se coloca el sostenimiento definitivo.

Si se trata de una tuneladora de cabeza giratoria suele estar equipada con picas o rastreles. También disponen de una serie de aperturas, frecuentemente regulables, por donde el material arrancado pasa a una cámara situada tras la rueda de corte y desde donde se transporta posteriormente hacia el exterior.

Existen dos grandes grupos de escudos.

- Escudos de frente abierto: Se usan cuando el frente del túnel es estable. El sistema de excavación puede ser manual o mediante brazo fresador.
- Escudos de frente cerrado: Se usan cuando el frente del túnel es inestable como en los terrenos no cohesivos, saturados de agua, etc. Existen varios tipos.
 1. Escudos con cierre mecánico: la entrada y salida del material en el cuarto de tierras se regula mediante dos puertas controladas hidráulicamente. La máquina tiene limitaciones con presencia de agua.
 2. Escudos presurizados: En ellos el frente de ataque trabaja a presión, prácticamente no se usan.
 3. Escudos de balance de presión de tierras: El material es extraído del cuarto de tierras mediante un tornillo sin fin, variando la fuerza de avance y la velocidad de extracción del tornillo se consigue controlar la presión de tierras para que se garantice la estabilidad del frente.

Tuneladora de doble escudo

Las denominadas tuneladoras de doble escudo son máquinas que presentan características tanto de topo como de escudo. Se trata de un escudo telescópico articulado en dos piezas diseñado para el sostenimiento del terreno cuando avanza la excavación del túnel. Su principal característica es su doble sistema de propulsión independiente, el primero para el escudo y el segundo para el topo.

Es una máquina muy versátil, pues permite excavar tanto la roca dura que los escudos propiamente dichos no podrían perforar, con rendimientos parecidos a los de los topos. Pero además, permite la excavación en terrenos inestables y heterogéneos que los topos no podrían ejecutar por sí solos. Por tanto, se trata de la mejor solución para macizos con tramos de geología variable suelo-roca.

La máquina presenta dos escudos: el delantero y el trasero. El delantero soporta la cabeza de corte, contiene el rodamiento principal, la corona de accionamiento y los sellos interno y externo. El trasero, también llamado escudo de anclaje,

incorpora las zapatas de los “grippers” operables a través de ventanas. En su parte posterior incorpora el erector de dovelas y los cilindros de empuje para la propulsión en modo escudo normal.

I.2 Caracterización geomecánica de los macizos rocosos

Una parte importante de la caracterización geomecánica de los macizos rocosos, lo constituyen sin dudas, las clasificaciones geomecánicas, que surgieron de la necesidad de parametrizar observaciones y datos empíricos, de forma integrada, para evaluar las medidas de sostenimiento en túneles. Las mismas son un método de ingeniería geológica que permite evaluar el comportamiento geomecánico de los macizos rocosos, y a partir de estas estimar los parámetros geotécnicos de diseño y el tipo de sostenimiento de un túnel (Palmstrom, 1998). Además de las obras subterráneas, se destacan las aplicaciones en taludes y cimentaciones. Las clasificaciones llevan más de 50 años en uso, pero es a partir de la década de los 70 cuando se extienden internacionalmente (González de Vallejo, 1998).

Las clasificaciones geomecánicas tienen por objeto caracterizar un determinado macizo rocoso en función de una serie de parámetros a los que se les asigna un cierto valor. Por medio de la clasificación se llega a calcular un índice característico de la roca, que permite describir numéricamente la calidad de la misma. Es una herramienta muy útil en el diseño y construcción de obras subterráneas, pero debe ser usada con cuidado para su correcta aplicación, pues exige conocimientos y experiencia por parte de quien la utiliza.

Las clasificaciones pueden ser usadas en la etapa de Proyecto y también durante la Obra. En la etapa de Proyecto, permiten estimar el sostenimiento necesario en base a las propuestas del autor de cada sistema de clasificación, mientras que durante la Obra, permiten evaluar la calidad del terreno que se va atravesando conforme avanza la excavación del túnel y aplicar el sostenimiento correcto en cada caso.

En los esquemas que siguen se muestran las actividades concretas a efectuar en las dos etapas que se han considerado:

Etapa de Proyecto: Las actividades típicas que se realizan durante el Proyecto en relación con las Clasificaciones Geomecánicas son las siguientes:

- Efectuar el Estudio Geológico de la traza por donde va a discurrir el túnel. Evaluar litologías, resistencia de la roca, estado de las juntas y presencia de agua.
- Dividir el perfil longitudinal del túnel en tramos de características similares.
- Calcular el índice de clasificación de cada tramo. Es conveniente el uso de al menos dos sistemas de clasificación, los más habituales son el de Bieniawski y el de Barton.
- Asignar a cada tramo un sostenimiento, en función del índice de calidad obtenido de las propuestas del sistema de clasificación y de la propia experiencia del proyectista.

Etapa de Obra: Durante la Obra las Clasificaciones Geomecánicas se usan según se explica a continuación:

- Es necesario tener previstos varios tipos de sostenimiento y los criterios para aplicar cada uno de ellos. Generalmente éstos deberán venir incluidos en el Proyecto Constructivo del túnel.
- En cada avance calcular en el frente el índice de calidad de la roca. Para ello es conveniente usar unos estadillos que se rellenan en el propio tajo.
- En función del índice de calidad obtenido y de otros criterios que pudiera haber definidos, aplicar el tipo de sostenimiento correspondiente.

I.3 Clasificaciones geomecánicas

A lo largo de los años se han desarrollado y usado varios sistemas de clasificación. Los más antiguos fueron los de Terzaghi, Protodyakonov y Lauffer. Hoy en día, para túneles, básicamente se usan dos sistemas, el de Bieniawski (1979) o RMR y el de Barton (1974) o sistema - Q.

Las clasificaciones geomecánicas se han convertido en una herramienta habitual para el reconocimiento de los macizos rocosos en los que van a construirse obras de ingeniería y especialmente túneles y obras subterráneas.

Existen opiniones contrapuestas sobre las clasificaciones geomecánicas:

En contra

- No tienen base científica, son meras compilaciones empíricas.
- Simplifican excesivamente los problemas reales.
- Son peligrosas porque personas sin la adecuada formación pueden pensar que, con una simple aplicación del método clasificatorio, han resuelto un proceso complejo.

A favor

- Todo el mundo las usa.
- Permiten cuantificar hechos naturales complejos.
- Establecen un lenguaje técnico común.

En cualquier caso las clasificaciones constituyen una herramienta válida más.

Clasificación del RQD (Deere, 1963):

El R.Q.D (Rock Quality Designation), fue propuesta por Deere en 1963, es un índice obtenido de la recuperación de testigo en sondeos de diámetro mínimo 54 mm. Y se define como el porcentaje de la longitud de testigo recuperado en trozos mayores de 10 cm respecto a la longitud de sondeo.

Se basa en clasificar el terreno únicamente por el valor RQD. Según el valor de este parámetro se proponen unos ciertos sistemas de sostenimiento. Hoy en día no se utiliza esta clasificación, aunque el RQD sigue siendo uno de los principales parámetros de caracterización de los macizos rocosos.

Cuando no se dispone de sondeos, para obtener el RQD mediante la recuperación de testigos mayores de 100mm, también una aproximación del R.Q.D. se obtiene por la expresión dada por Palmstron.

$$RQD = 115 - 3.3*(J_v)$$

Siendo J_v el número total de juntas por metro cúbico, que se puede obtener sumando las juntas que hay por metro, de cada familia de las existentes en el lugar de observación.

En función del R.Q.D se establece la clasificación de las rocas (ver Tabla 1 en anexos).

Clasificación de Bieniawski (1979)

Recomienda “que las clasificaciones (se usen) en el contexto de un proceso global de diseño ingenieril”. Además indica “que deben usarse solo en fases preliminares y/o de planeamiento, pero no para definir (las medidas) finales de diseño”.

El sistema de clasificación Rock Mass Rating o sistema RMR fue desarrollado por Z.T. Bieniawski durante los años 1972-1973, y ha sido modificado en 1976 y 1979, en base a más de 300 casos reales de túneles, cavernas, taludes y cimentaciones. Actualmente se usa la edición de 1989, que coincide sustancialmente con la de 1979.

Para determinar el índice RMR de calidad de la roca se hace uso de los seis parámetros del terreno siguientes:

- La resistencia a compresión simple del material
- El RQD (Rock Quality Designation)
- El espaciamento de las discontinuidades
- El estado de las discontinuidades
- La presencia de agua
- La orientación de las discontinuidades

El RMR se obtiene como suma de unas puntuaciones que corresponden a los valores de cada uno de los seis parámetros enumerados (Beniawski, Z. 1978). El valor del RMR oscila entre 0 y 100, y es mayor cuanto mejor es la calidad de la roca. Bieniawski distingue cinco tipos o clases de roca según el valor del RMR (ver Anexo No. 2)

Se describen 10 parámetros seleccionados para definir sus características.

1.- Orientación

Posición de la discontinuidad en el espacio. Definida por la dirección del buzamiento y el buzamiento de la línea de máxima pendiente en el plano de la discontinuidad.

2.- Espaciamiento

Distancia perpendicular entre dos discontinuidades adyacentes. Normalmente se refiere al espaciamiento medio de una familia de discontinuidades.

3.- Continuidad

Extensión superficial de una determinada discontinuidad en un plano imaginario que la contenga.

4.- Rugosidad

Conjunto de irregularidades de diferentes órdenes de magnitud (asperezas, ondulaciones), que componen las superficies de las paredes de una discontinuidad.

5.- Resistencia de la discontinuidad

Resistencia a la compresión de la superficie de discontinuidad. Puede ser más baja que la resistencia de la roca Matriz a causa de la meteorización de la misma.

6.- Apertura

Distancia perpendicular entre paredes de una discontinuidad.

7.- Relleno

Material que separa las paredes de una discontinuidad, normalmente más débil que la roca matriz.

8.- Filtración

Flujo de agua y humedad libre visible en discontinuidades en la totalidad de la roca.

9. Número de familias que comprende el sistema de discontinuidades del medio rocoso.

10. Tamaño del bloque.

Dimensiones del bloque de roca resultante de la mutua orientación y espaciado de las familias de discontinuidades.

Clasificación de Barton (1974):

El Sistema - Q o Clasificación de Barton fue desarrollado en Noruega en 1974 por Barton, Lien y Lunde, del Instituto Geotécnico Noruego (ver Figura 1). Se basó su desarrollo en el análisis de cientos de casos de túneles construidos principalmente en Escandinavia. Actualmente el Nuevo Método Noruego de túneles al diseño de las excavaciones se basa directamente en la metodología de Barton.

La Clasificación de Barton asigna a cada terreno un índice de calidad Q, tanto mayor cuanto mejor es la calidad de la roca. Su variación no es lineal como la del RMR, sino exponencial, y oscila entre $Q = 0.001$ para terrenos muy malos y $Q = 1000$ para terrenos muy buenos.

El valor de Q se obtiene de la siguiente expresión:

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

Donde cada parámetro representa lo siguiente:

RQD: es el índice Rock Quality Designation, de Deere.

J_n , varía entre 0.5 y 20, y depende del número de familias de juntas que hay en el macizo. Ver tabla 6 en los anexos.

J_r , varía entre 0.5 y 4, y depende de la rugosidad de las juntas.
 J_a , varía entre 0.75 y 20, y depende del grado de alteración de las paredes de las juntas de la roca. Ver tablas 6 y 7 en los anexos.

J_w , varía entre 0.05 y 1, dependiendo de la presencia de agua en el túnel.
 SRF , varía entre 0.5 y 20, son las iniciales de Stress Reduction Factor, y depende del estado tensional de la roca que atraviesa el túnel. Ver tablas 4 y 8 en los anexos.

La determinación de Q permite la estimación del sostenimiento del túnel. Para ello se procede de la siguiente manera:

Se selecciona el grado de importancia de la excavación definido mediante un índice ESR (Excavation Support Ratio) (Ver tabla 9 en los anexos) que viene a ser un factor de seguridad. Barton homogeneiza los diámetros de las excavaciones a un diámetro “equivalente”, que se define $De = D/ESR$.

Los valores de ESR aparecen en la figura 1. La referencia (ESR=1) corresponde típicamente a los túneles. Un cambio en ESR conduce implícitamente a una percepción diferente de la seguridad que aceptamos para una determinada obra.

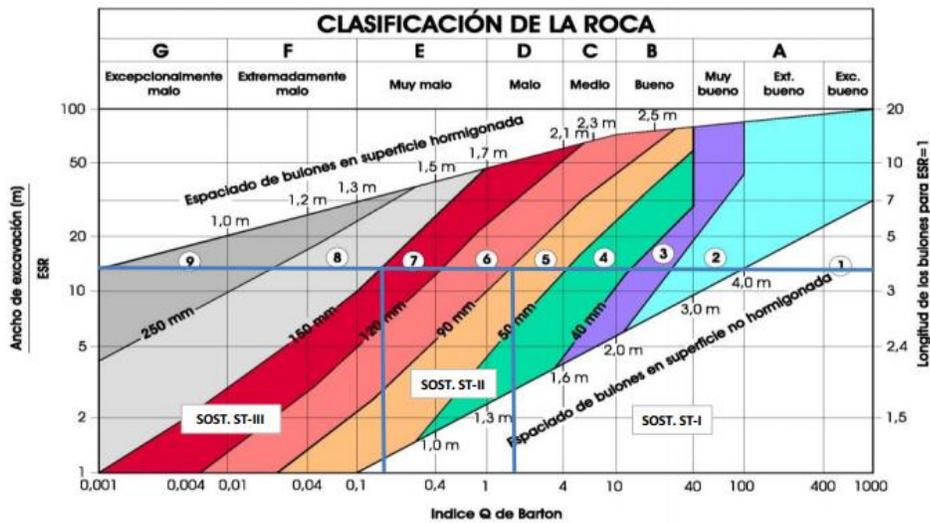


Gráfico de Barton para el Túnel de Vía Doble

Categorías de sostenimiento:

- | | |
|---|--|
| 1. Sin sostenimiento | 6. Hormigón proyectado con fibras, 9-12 cm y bulonado |
| 2. Bulonado puntual | 7. Hormigón proyectado con fibras, 12-15 cm y bulonado |
| 3. Bulonado sistemático | 8. Hormigón proyectado con fibras, >15 cm con bulonado y cerchas |
| 4. Bulonado sistemático con hormigón proyectado | 9. Revestimiento de hormigón |
| 5. Hormigón proyectado con fibras, 5-9 cm, y bulonado | |

Figura 1. Propuesta de sostenimiento según la Q de Barton

I.4 Fundamentación de la clasificación geomecánica propuesta.

Estos sistemas de clasificaciones no definen todas las condiciones geomecánicas de la roca. Dado, por ejemplo, que ninguna clasificación ha sido adecuadamente verificada por medidas de presión en el sostenimiento real de los túneles, ninguna de ellas se ha convertido en un sistema estándar general. Por consiguiente, las

clasificaciones del macizo rocoso han sido necesarias para la comunicación del conocimiento y experiencia adquirida por los ingenieros y geólogos en lugares con diversas condiciones geológicas y con diferentes soluciones de sostenimiento y, de esta manera, poder ser útil en nuevos proyectos.

Estas metodologías, aunque son factibles en la actualidad, no son de empleo normalizado. Por ejemplo, no clasifican el material, sino que permiten determinar el campo de tensiones in situ para su empleo en cálculos numéricos. Otras razones para no poderse haber creado una clasificación universal, es la gran cantidad de parámetros que deben ser considerados, la imposibilidad de cuantificar todos esos parámetros y la dependencia del comportamiento del macizo rocoso de la estructura desarrollada (túnel, cimentaciones, taludes, etc.), lo cual limita el campo de aplicación del sistema. No obstante, esto no debe ser observado como un fracaso, puesto que el empleo de más de una clasificación es recomendado y aplicado a nivel mundial. Por ejemplo la clasificación geomecánica de Deere (1979) desde su surgimiento constituye un parámetro fundamental en las clasificaciones que le preceden y que en su esencia, define el grado de fracturación del macizo, su índice RQD es empleado en las clasificaciones de Bieniawski y la Barton. El sistema RMR, desarrollado por South African Council of Scientific and Industrial Research, y el sistema Q, desarrollado por Norwegian Geotechnical Institute. Dado que ambos sistemas de clasificación dividen el macizo rocoso en distintas clases de similares características que pueden ser fácilmente evaluables mediante observaciones visuales o simples, se puede esperar que exista una correlación entre ambas. Desde la primera correlación presentada por Bieniawski en 1976, numerosos autores han presentado diferentes correlaciones basadas en análisis de regresión de datos de RMR y Q obtenidos de proyectos de túneles y minas en distintas partes del mundo. Ninguna clasificación se ha impuesto sobre las otras, y habitualmente se recomienda el empleo de más de una en el mismo proyecto. Por estas razones expuestas y por ser la clasificación geomecánica empleada actualmente en los estudios del macizo de los túneles del trasvase, con la que se han obtenido buenos resultados, se emplea en el presente trabajo la clasificación geomecánica Barton.

I.5 Trabajos previos realizados a nivel mundial y en el área de estudio

El empleo de las clasificaciones geomecánicas, especialmente RMR, Q y GSI, aplicadas a obras civiles subterráneas, es sobradamente conocido. En este momento se están construyendo, en la región andina, numerosos túneles y presas asociados a nuevas infraestructuras viales y proyectos hidroeléctricos. Para la caracterización de los macizos rocosos, resulta de enorme utilidad y muy necesaria, la aplicación de las diferentes clasificaciones.

Cartaya Pirre M, (2001) realizó una caracterización geomecánica de macizos rocosos en obras subterráneas de la región oriental del país con el objetivo de caracterizar desde el punto de vista geomecánico los macizos rocosos de las Minas Merceditas, Amores y El Cobre, los túneles hidrotécnicos de los Trasvases Melones – Sabanilla y Caney – Gilbert y los Túneles Populares de los municipios Moa y Holguín. Expone el estudio y evaluación de las condiciones ingeniero - geológicas de los macizos rocosos, tales como, las principales características del agrietamiento, las principales formas de pérdidas de estabilidad y la valoración de la calidad de los mismos por las metodologías de Deere (1963), Barton (1974) y Beniaowski. (1979), el grado de bloquesidad, entre otras. Realizó la evaluación integral y diferenciada de los casos de estudio que permitió efectuar la caracterización geomecánica. Sobre la base de lo cual propuso los modelos geomecánicos más representativos del comportamiento de los macizos rocosos y ofrece criterios geomecánicos – estructurales para el diseño de obras subterráneas, en los que se tratan cuatro direcciones fundamentales; estabilidad, estado tensional, resistencia y presión.

Cosella Guilarte D. (2009) analiza el macizo rocoso donde se laboró el túnel 2 del trasvase Sabanalamar-Pozo Azul, se realizó un estudio para conocer las características físico- mecánicas de las rocas y la evaluación geomecánica del macizo rocoso para cada tramo de túnel. Determinó las características del sostenimiento utilizado. Además del análisis geomecánico, se realizó estudios de los áridos usados y propuso nuevos áridos para brindar al hormigón proyectado mayor resistencia y calidad, buscando minimizar los costos de sostenimiento.

Cuesta Recio A, (2010) estableció un procedimiento para elegir la técnica de control de las filtraciones que afectan las excavaciones subterráneas desarrolladas en macizos rocosos fuertes poco porosos y agrietados, tomando en consideración la correlación existente entre la calidad de los macizos fuertes y su permeabilidad, así como los principales factores que inciden en los procesos de control y circulación del agua a través del conjunto macizo rocoso-excavación. Desarrolla el marco teórico conceptual y se evalúa la actualidad y viabilidad de la investigación, se argumentan los principales factores que inciden en los procesos de infiltración, filtración y control del agua que afecta una excavación subterránea, para lo cual, además de pruebas experimentales y la bibliografía consultada relacionada con la temática, se realizó una consulta de expertos empleando el método Delphi. Crea como herramienta de elección, el algoritmo a partir del cual se elaboró un software. Además describe la aplicación del procedimiento en el Túnel Serones-Salida Guaro, obteniendo que las técnicas o variantes obtenidas estén en plena concordancia con la situación real existente en la obra. Se identificaron las características orográficas, hidrográficas, lito-estructurales, tectónicas e hidrogeológicas como los principales factores condicionantes de la susceptibilidad de las excavaciones subterráneas a fenómenos negativos relacionados con la presencia de agua.

Noa Monjes R, (2003) realiza una caracterización ingeniero - geológica de varios macizos de la región Oriental de Cuba relacionado con el proceso de construcción de las excavaciones subterráneas horizontales. Efectúa una caracterización ingenieril de las rocas, 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. 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 (1963), la clasificación de Bulichev (1997), la clasificación de Bieniawski (1979) y la clasificación de Barton (1974). Hace un estudio detallado de las

clasificaciones de excavabilidad más aceptadas, del que se obtiene que estas clasificaciones, en el mejor de los casos y cuando son usadas convenientemente, pueden ofrecer criterios preliminares sobre como resulta más adecuado realizar el arranque de la roca, pero que nunca ellas deben ser utilizadas como criterio básico, debido a la insuficiente fundamentación que poseen. Considera posible emplear estas clasificaciones como un criterio más a la hora de elegir el método de arranque, por lo que se define cuáles de estas clasificaciones se adecuan a cada tipo de macizo y obra estudiada. Por último 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.

López Almira L, (2017) realizó una caracterización del túnel Tramo IV Conexión II a Conexión IIIB del trasvase Este Oeste. Demuestra donde está ubicado el túnel geográficamente, se caracteriza el tipo de rocas presentes en la región, el clima, la vegetación, la orografía, y las características hidrográficas e hidrogeológicas de la zona. Efectuó una evaluación de los procesos tecnológicos durante la construcción del túnel. En el mismo se efectuó un estudio del ciclo de trabajo, se representó gráficamente la comparación entre el tiempo planificado y real, se realizó además un estudio para conocer como se ve reflejado el aumento de los costos para un metro de avance en la excavación con respecto a lo proyectado, todo esto trajo como resultado que se identificaron los procesos de excavación y sostenimiento como los que mayor incidencia negativa ejercen en la calidad de los procesos tecnológicos y a raíz de eso se propusieron 4 medidas para mejorar la eficiencia en la construcción del túnel Tramo IV dentro de las que sobresale “Actualizar en tiempo real las características litoestructurales y las propiedades físico-mecánicas en los frentes de laboreo, por su influencia sobre los pasaportes de voladura y sostenimiento”. Empleó clasificaciones geomecánicas como González de Vallejo y Palmstron.

Ramírez Torres R, (2013) propone un sistema de estabilización del talud frontal en el emboquille del túnel Rio la Ceiba, Tramo III-A del Trasvase Este – Oeste. Para

validar la propuesta evaluó el procedimiento de construcción actual del emboquille en todos los túneles del trasvase, se estudió las características ingeniero – geológicas del área de estudio para determinar el índice de calidad del macizo. Se comprobó que las medidas de estabilización que se aplican en los emboquilles sí garantizan la estabilidad de la clave del túnel por sus características constructivas, pero no responde antes los posibles deslizamientos del talud y es ahí donde los problemas de estabilidad son frecuentes; el macizo rocoso es el más superficial, y por tanto el más alterado y meteorizado. Por lo que la colocación del “Paraguas” sostiene el terreno existente por encima del emboquille, minimiza las deformaciones del mismo, permite laborear en condiciones de mayor seguridad y proporciona un aumento de propiedades de resistencia y deformabilidad al terreno, es una práctica aplicada mundialmente y se recomienda cuando la calidad del macizo no es muy buena. Además se realiza una valoración económica y se exponen medidas medioambientales para la aplicación de la propuesta realizada.

Hoy en día en la construcción del Tramo V del Trasvase Levisa – Mayarí han ocurrido una serie de derrumbes en el frente de arranque debido a la pérdida de la estabilidad del macizo rocoso por lo que es importante realizar la caracterización geomecánica del macizo rocoso para conocer la estabilidad que este tiene para entonces emplear una fortificación que se adapte a dicha situación.

CAPÍTULO II. CARACTERIZACIÓN INGENIERO GEOLOGICA DEL AREA DE ESTUDIO

II.1 Situación geográfica del área de estudio

El Túnel Levisa – Mayarí es una obra subterránea que va desde la Presa Levisa a la Presa Mayarí en el río del mismo nombre. Toda la zona se encuentra en las hojas cartográficas 1: 50 000 de Mayarí 5077-I para una superficie total de 84.0 km². El Tramo V del túnel se encuentra en una zona intrincada con difíciles accesos, formado por un relieve montañoso, en el trazado las alturas van desde cota 69.00 hasta 131.67. Como se muestra en la figura 2.

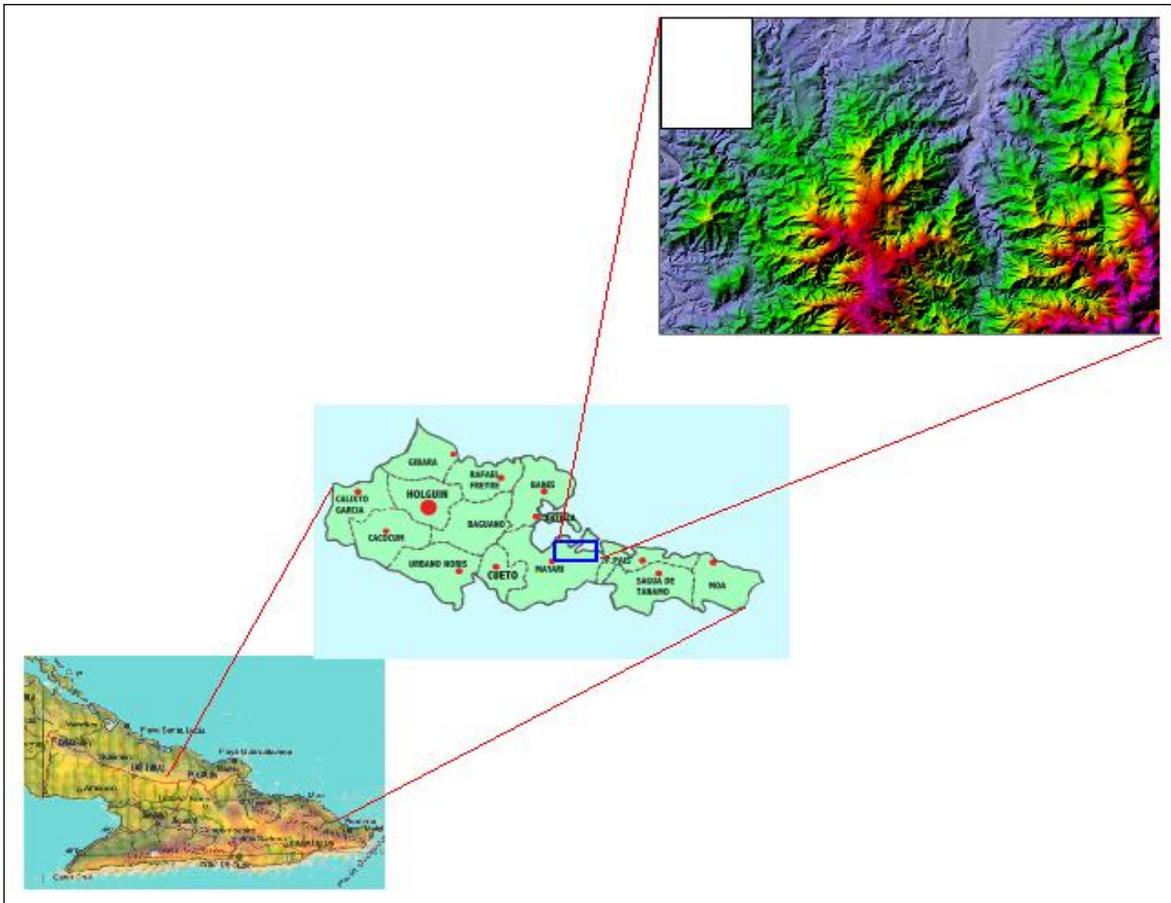


Figura 2. Mapa de ubicación geográfica general del área Túnel Levisa - Mayarí
El área de estudio donde se encuentra enclavado el Tramo V tiene una longitud de 4.92 Km. El túnel tramo V inicia en el estacionado 2+715.24 (fin del Tramo IV)

=0+000 con cota de fondo 65.00 m. Este túnel constituye un elemento más del sistema del Trasvase Este-Oeste (ver Figura 3).

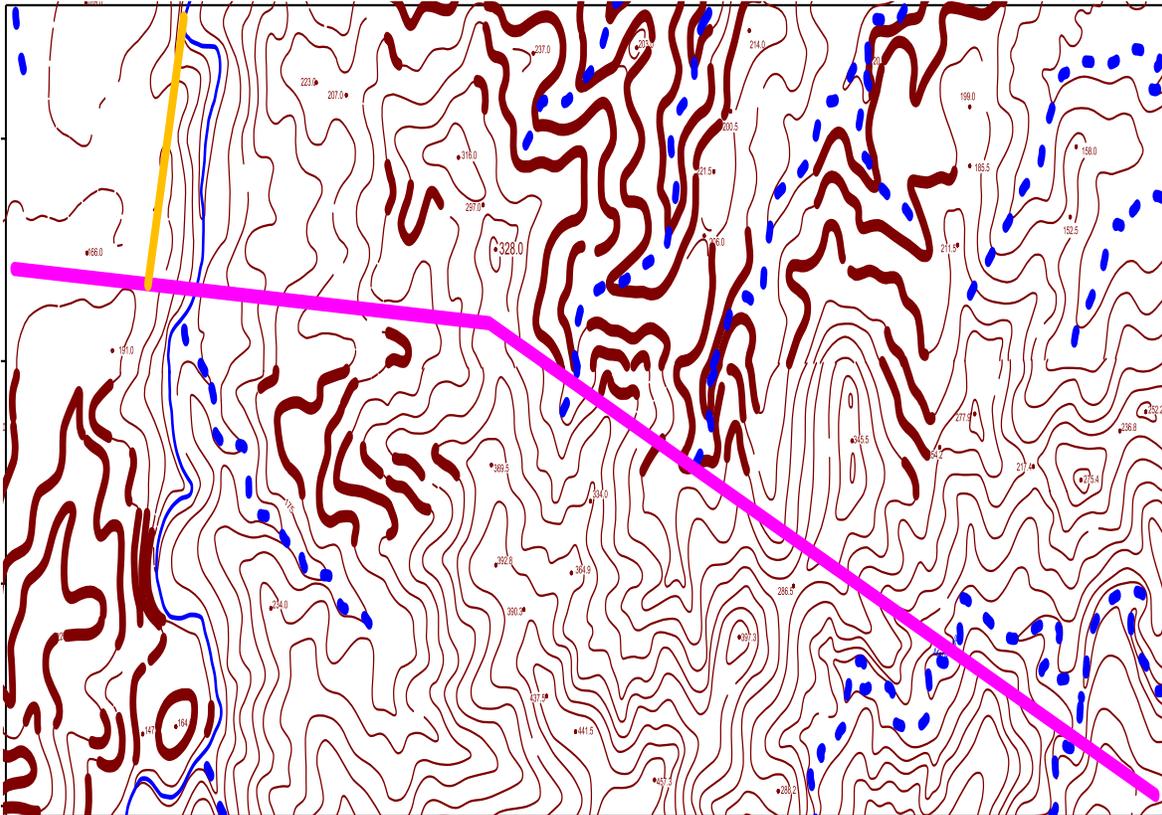


Figura 3. Área donde se encuentra ubicado el Tramo V (color Lila) y Túnel de Conexión No. 3 (color amarillo)

II.2 Vías de comunicación

Para el acceso al objeto de obra a ejecutar en el túnel Levisa – Mayarí tramo V se utilizan caminos mineros existentes los cuales se encuentran próximos a la obra, ya que en esta zona se han ejecutado varios caminos que forman parte del proyecto de rehabilitación minera llevado a cabo por la Unión del Níquel y que servirán de acceso a la construcción de la presa Levisa así como sus objetos de obras incluyendo dicho túnel. Estos caminos se ubican a unos 11 Km aproximadamente del poblado de Levisa. Este camino tiene construido cortes a media ladera, tendrá pendientes en el orden de los 5 y 10 %, y se le aplicará un mejoramiento rocoso con un espesor de 20 cm y ancho de 7.0 m. En su trazado se corta varias veces el río para lo cual se prevé la construcción de obras de fábricas de tubos y cajones según el caso lo amerite.

II.3 Geología del área de estudio

Topografía

El tramo V del túnel Levisa - Mayarí se desarrolla en zonas montañosas de la parte norte oriental del país perteneciente al macizo montañoso cierra Cristal, caracterizada por una topografía cambiante y accidentada con pendiente acentuadas de laderas y grandes contraste de las elevaciones que van desde un valor mínimo de 76.0 m hasta valores de 317.0 m.

Vegetación

La vegetación presente en la zona es variada principalmente abundan los charrascales sobretodo en la zona donde la pendiente es más pronunciada. En algunas zonas se observan pinos y otras plantas.

Relieve

El relieve es fuertemente ondulado en esta zona, además de cruzar varios accidentes geográficos, naturales, principalmente cañadas, ríos, zonas altas y caminos mineros siendo el trazado las alturas que van desde cota 69.00 hasta 131.67 (ver Figura 4).

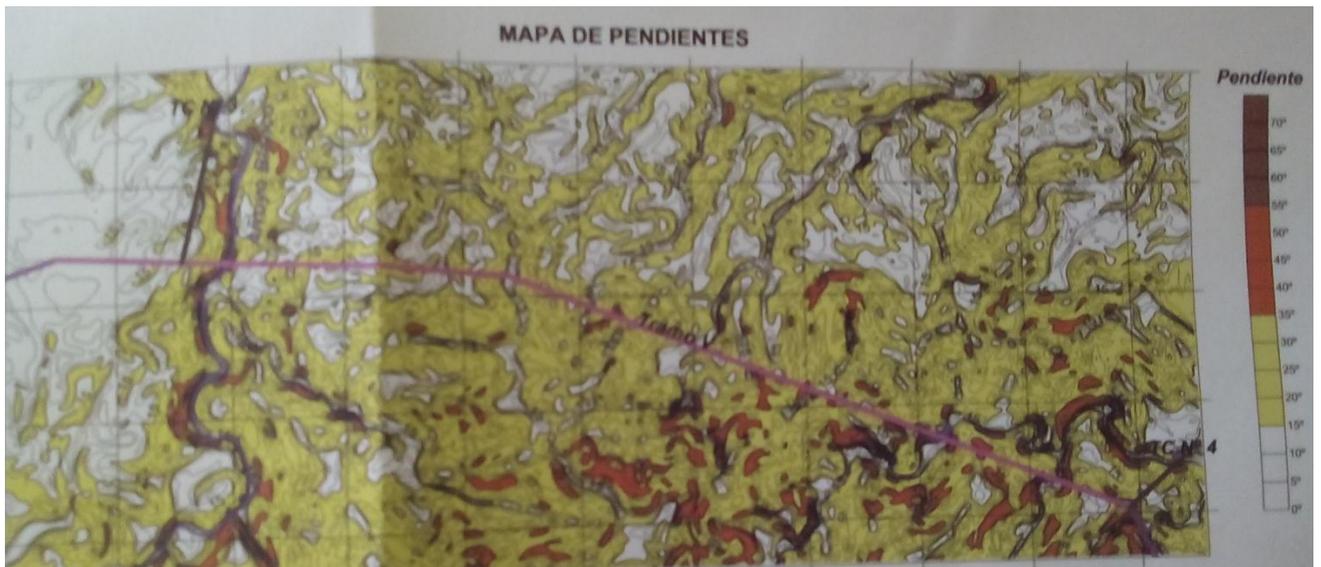


Figura 4. Relieve del área de estudio

Fenómenos Físico - geológicos

El fenómeno físico geológico más importante y de mayor extensión en el área es la meteorización o intemperismo, que se pone de manifiesto en toda la parte cercana a la superficie formando una corteza de meteorización, producto de la alteración de las rocas que lo subyacen.

Clima.

El clima de la región es tropical húmedo, distinguiéndose de acuerdo a la distribución temporal de las precipitaciones un período seco (desde noviembre a abril) y otro húmedo (de mayo a octubre). Según los datos del atlas nacional de cuba, la temperatura media anual para la zona de estudio es aproximadamente de 20 a 25°C en la parte central y de 26°C y más en la parte norte.

Precipitaciones máximas diarias anuales

En Cuba las grandes precipitaciones están asociadas a la combinación que se produce entre las circulaciones atmosféricas, a diferentes escalas espaciales, y los factores físico-geográficos de la región, por lo que generalmente se asocian a la aparición de determinados patrones de circulación como tormentas tropicales, huracanes y bajas estacionarias. Para la caracterización de la lluvia máxima diaria anual del 1% de probabilidad primeramente fueron definidos, como se establece en la NC – 48 – 35 de 1984, todos los valores de la lluvia máxima diaria para cada año de observación de los pluviómetros señalados. A partir de las series de observación de todos los pluviómetros se definieron los fenómenos extremos más significativos de la zona por sus valores y extensión territorial, destacándose el correspondiente a 1963 (Ciclón Flora), con valores entre 238 y 331 mm y que abarcó todo el territorio, seguido en importancia por los años 2000, 1977, 94 y 60. Ver Tabla 1.

Tabla 1. Comportamiento de las lluvias máximas diarias anuales en los años más significativos

Años	1994	1995	1998	2000	2001	2004	2006
Equipos con observación	9	8	9	8	9	9	9
Nº. Equipos con lluvia ≥ 200 mm	5	3	2	6	2	4	3
%	56	38	22	75	22	44	33
Valor máximo, mm	268	250	311	267	218	240	287
Valor mínimo, mm	103	40	100	170	145	62	102
Promedio, mm	199	165	151	221	177	151	174

Sismicidad

Según el mapa de zonación sísmica con fines de ingeniería, emitido por el CENAI, el área se ubica dentro de la zona 1B de riesgo sísmico bajo que puede ocasionar daños en las construcciones, debiéndose tomar medidas sismo – resistentes en todas las estructuras y obras en función de la importancia de las mismas (ver Figura 5). Los valores de la aceleración horizontal máxima del terreno (A) expresados como una fracción de la gravedad para el cálculo serán de 0.1g.

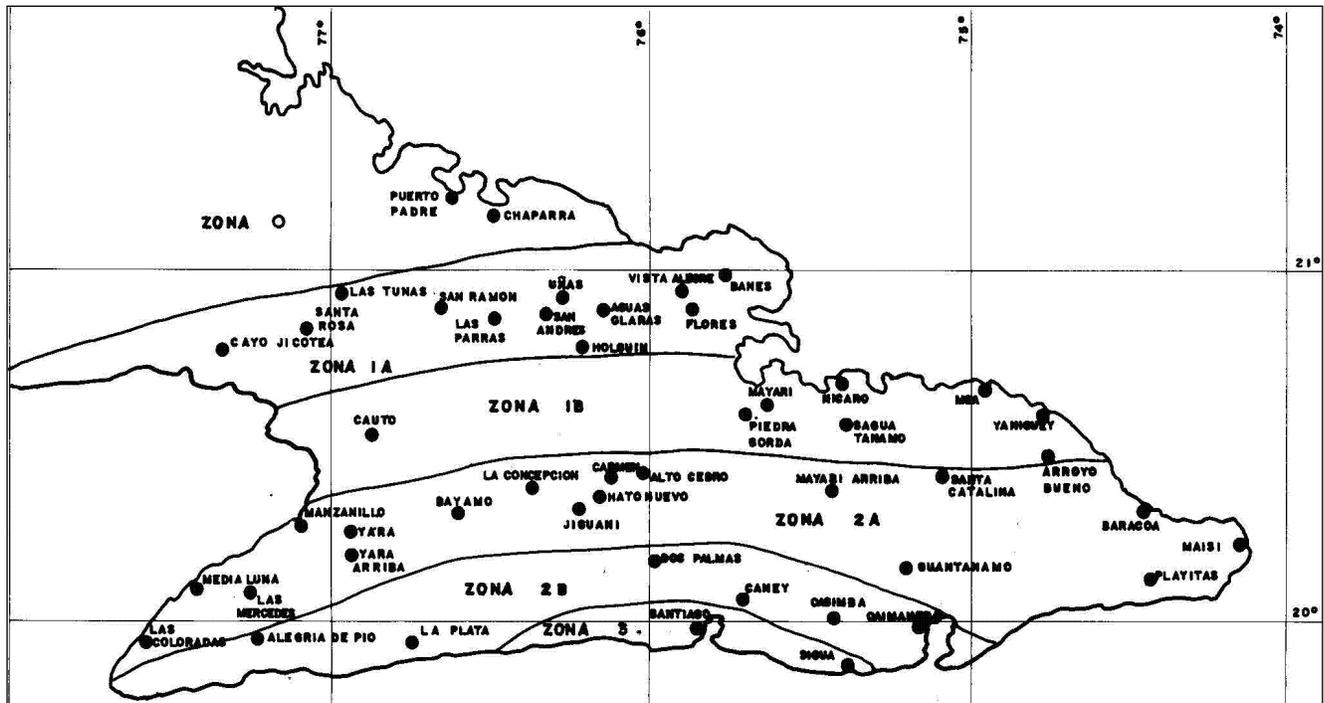


Figura 5. Comportamiento de las lluvias máximas diarias anuales en los años más significativos

Litología

En cualquier clase de excavación subterránea el tipo de roca influye en las condiciones de estabilidad de la masa rocosa de las excavaciones, por ejemplo, las margas, tufos y tobas volcánicas de textura granular o brechoide, caracterizadas por su baja densidad y alta porosidad, son rocas que absorben rápidamente la humedad y se deterioran, pudiendo llegar paulatinamente al fallamiento si es que no se adoptan medidas de control de la estabilidad de la masa rocosa de las excavaciones.

Las condiciones inestables de estos tipos de roca, se incrementan en condiciones de mayor presencia de agua (goteos y flujos), presencia de agua ácida y materiales rocosos carbonatados, presencia de altos esfuerzos y cuando se ubican entre capas de roca de mejor calidad, por ejemplo, brechas tufáceas entre lavas andesíticas o margas entre calizas.

Particularmente en la roca estratificada, se presentan horizontes de rocas de mala calidad como lutitas, margas, calizas carbonosas, calizas porosas u otras rocas que contienen arcillas. Estos materiales constituyen estratos débiles, principalmente en presencia de agua, que pueden influir adversamente en las condiciones de estabilidad de la masa rocosa de las excavaciones. Por otro lado, las rocas intemperizadas y alteradas también pueden influir en las condiciones de estabilidad de la masa rocosa.

Por lo que la litología presente en el área, hasta la profundidad de investigación está constituida por rocas pertenecientes al complejo ultramáfico, representadas por las serpentinitas, las cuales se encuentran muy alteradas e intensamente agrietadas, evidenciando el fuerte tectónismo a que han sido sometidas. Ver Figura 6.

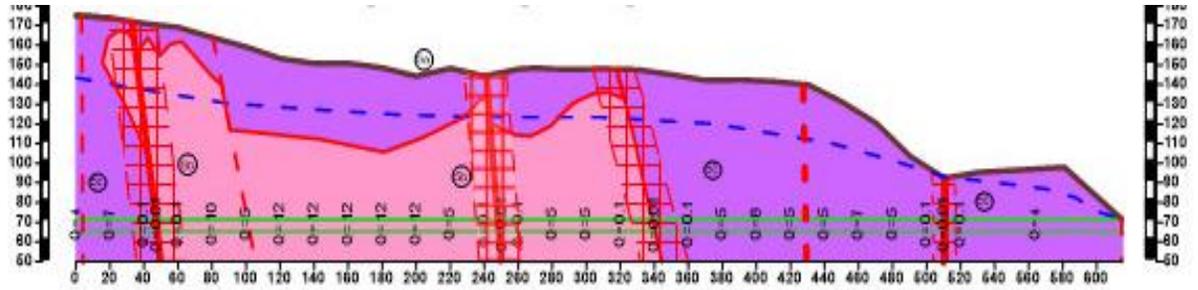


Figura 6. Perfil ingeniero-geológico del área de estudio

I.4 Hidrogeología

En cuanto a las condiciones hidrogeológicas del área investigada podemos decir que con los métodos geofísicos aplicados aunque no se detectó un nivel del manto con claridad, si evidencian la presencia de abundante agua hasta la profundidad de investigación, por lo que debe esperarse la afluencia de cierta cantidad de agua en el interior de la excavación producto del drenaje de las mismas.

En el área se encuentra el complejo acuífero de las aguas fisúrales de las rocas ultra básicas (ver Figura 7). Estas aguas se encuentran en grietas y fisuras de las serpentinitas y gabro-diabasas, caracterizándose por presentar bajos caudales. Se hicieron pruebas de vertimientos y no se obtuvieron valores por frecuentes fugas de agua en profundidad, lo que demuestra la presencia de fallas subhorizontales a diferentes niveles con alta permeabilidad.

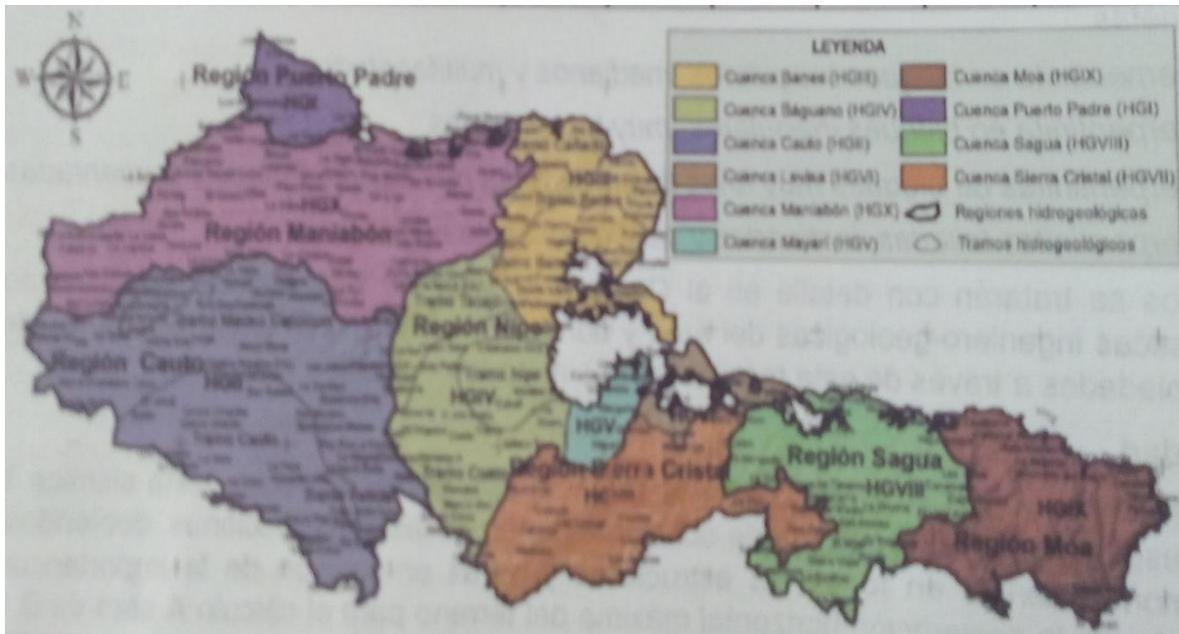


Figura 7. Cuencas acuíferas de la provincia Holguín

De acuerdo a los valores de los coeficientes de filtración obtenidos en trabajos que se han hecho, se pueden clasificar estas rocas como prácticamente impermeables o muy poco permeables.

De acuerdo a la composición química de las aguas subterráneas en la zona las mismas se clasifican como cloruradas-sódicas-magnésicas e hidrocarbonadas.

De acuerdo al pH las aguas se caracterizan desde débilmente básicas a básicas o alcalinas y de media mineralización (entre 0.2 y 1 g/l), siendo una característica de las aguas que circulan por estas rocas ofiolíticas.

Según la mineralización son aguas siempre dulces, mientras que por dureza son en su mayoría blandas, sin embargo son relativamente duras (entre 3 y 6 meq/l), no presentando agresividad al hormigón.

De acuerdo a las características de filtración del macizo, solo se encontraran afluencias considerables de agua en zonas de influencia de fallas, las cuales en su mayoría cortan el eje del túnel en forma vertical.

II.5 Tectónica

Los diferentes eventos tectónicos que ocurrieron en la región y afectaron las rocas de la zona de estudio, generaron estructuras superpuestas a las litologías presentes de la Asociación Ofiolítica, encontrándose grietas iniciales formadas durante el proceso de riftogénesis durante la formación de estas secuencias y diques de gabro - diabasa durante el Jurásico tardío y el Cretáceo inferior, más tarde desde el Maestriciano al Eoceno medio parte alta ocurre la colisión del arco Cretácico con la Plataforma de Bahamas, cerrando el mar marginal entre ambas estructuras, formando escamas tectónicas de bajo ángulo, corrimientos y fallas de deslizamiento por el rumbo, todo en un ambiente combinado marino - continental, que fue creando una especie de nappes o escamas tectónicas combinados con depósitos caóticos de cuencas superpuestas.

En el área fueron detectadas seis fallas, que por su orientación se pueden agrupar en dos sistemas, uno compuesto por las fallas I, II, III y IV con orientación NW – SE y otro compuesto por las fallas V y VI con orientación NE – SW, a continuación describiremos las mismas:

Falla I. Se ubica hacia la parte norte del área investigada con una dirección de 315° NW y un ángulo de buzamiento vertical, posee una zona de destrucción de aproximadamente 10.0 m como promedio hacia la parte norte de la falla y de aproximadamente 16.0 m como promedio hacia la parte sur de la falla, siendo mucho mayor en la parte donde es limitada por la falla VI. La misma fue detectada por métodos geológicos y geofísicos.

Falla II. Se ubica hacia la parte central del área investigada con una dirección que varía de 285° NW a 315° NW y un ángulo de buzamiento vertical, posee una zona de destrucción de aproximadamente 20.0 m como promedio hacia la parte norte de la falla y de aproximadamente 15.0 m como promedio hacia la parte sur de la falla, siendo algo menor hacia el extremo NW de la falla. La misma fue detectada por métodos geológicos y geofísicos.

Falla III. Se ubica hacia la parte central del área investigada con una dirección de 320° NW y un ángulo de buzamiento vertical, posee una zona de destrucción de

aproximadamente 20.0 m como promedio hacia ambos lados de la falla, siendo mayor en la parte donde ésta limita a la falla V. La misma fue detectada por métodos geológicos y geofísicos.

Falla IV. Se ubica hacia la parte sur del área investigada con una dirección de 320° NW y un ángulo de buzamiento vertical, la misma es cortada y desplazada por la falla V, donde toma una dirección de 296° NW posee una zona de destrucción de aproximadamente 25.0 m como promedio hacia ambos lados de la falla, siendo mayor en la parte donde es desplazada por la falla V. La misma fue detectada por métodos geológicos y geofísicos.

Falla V. Se ubica hacia el extremo sur del área investigada con una dirección de 8° NW y un ángulo de buzamiento vertical, se extiende hasta la parte central del área donde es limitada por la falla III, en su trayecto corta y desplaza a la falla IV, posee una zona de destrucción de aproximadamente 10.0 a 15.0 m como promedio hacia ambos lados de la falla, siendo mucho mayor, del orden de los 25.0 a 30.0 m hacia ambos lados de la falla en la parte posterior a la falla IV. La misma fue detectada por métodos geológicos y geofísicos.

Falla VI. Se ubica hacia el extremo norte del área investigada con una dirección de 18° NW y un ángulo de buzamiento vertical, la misma limita a la falla I, donde toma una dirección de 65° NW posee una zona de destrucción de aproximadamente 10.0 a 15.0 m como promedio hacia ambos lados de la falla, siendo mucho mayor del orden de los 25.0 a 30.0 m hacia ambos lados de la falla en la parte posterior a la inflexión. La misma fue detectada por métodos geológicos y geofísicos.

Ambos sistemas de fallas guardan relación con la dirección fundamental del agrietamiento medido durante el levantamiento ingeniero geológico.

Con las direcciones o rumbos de las grietas, se puede apreciar que existe tres direcciones fundamentales del agrietamiento, uno con orientación NNW – SSE, (predominante) una segunda con orientación NW – SE y una tercera con orientación NE - SW, así como otras distribuciones de menor magnitud orientadas hacia los cuatro cuadrantes, en el diagrama de roseta con el acimut de

buzamiento de las grietas se puede apreciar que existen también tres orientaciones fundamentales una con orientación hacia el NE ($60^{\circ} - 90^{\circ}$) predominante, una segunda con orientación SW ($240^{\circ} - 270^{\circ}$), y una tercera con orientación NE ($0^{\circ} - 30^{\circ}$) así como otras de menor magnitud orientadas hacia los demás cuadrantes, se puede apreciar que por las posiciones de concentración de los polos de las grietas, éstas se pueden agrupar en tres familias fundamentales de grietas, con grietas aleatorias, cuyos elementos de yacencia concuerdan con las orientaciones fundamentales observadas con los ángulos de buzamientos de las grietas se puede observar que casi la totalidad de las grietas presentan ángulos entre 50° y 90° , predominando los ángulos entre 50° y 80° , con una pequeña porción entre 20° y 50° .

II.5 Propiedades físico mecánicas de las rocas en el trazado del túnel

En el área investigada mediante la utilización de los diferentes métodos geológicos y geofísicos fue posible la delimitación de 6 capas ingeniero - geológicas, incluyendo las capas 1, 1a y 1b compuesta por capa vegetal con fragmentos de serpentinitas (capa 1), sedimentos aluviales (capa 1a) y suelo laterítico (capa 1b), a las mismas no se le determinaron las propiedades físico - mecánicas por la poca importancia que reviste para la construcción de la obra debido a su poca potencia y ubicación. La capa 2 corresponde a la serpentinita intensamente alterada, la capa 3 corresponde a la serpentinita algo alterada y la capa 4 corresponde a la serpentinita más conservada.

Con los resultados de los ensayos de laboratorio de las muestras tomadas en superficie, y a partir los valores de velocidades sísmicas determinados para las diferentes capas estimadas en el corte ingeniero geológico, se asignaron los resultados a cada capa, con los cuales se realizó un análisis cualitativo y cuantitativo de las propiedades, así como una valoración estadística para determinar los valores mínimos, medios y máximos, la Desviación Estándar (Ds) y el Coeficiente de Variación (V), posibles para cada capa. Además mediante los valores de resistividades eléctricas, se determinaron las características de agresividad al hierro, al aluminio, al hormigón en sulfatación y las condiciones de tomas a tierra y protección a pararrayos.

Se debe aclarar que existe cierta diferencia entre los valores de propiedades determinados por laboratorio con los determinados por geofísica, lo cual está dado porque al laboratorio se envían las muestras más conservadas y menos agrietadas, para que puedan ser cortadas y ensayadas, mientras que los métodos geofísicos integran la capa en su conjunto.

La descripción de las diferentes litologías o elementos ingeniero-geológicos, así como sus propiedades físico–mecánicas se ofrecen a continuación:

Capa 5a: Serpentinitas muy intemperizadas (ver Figura 8), de color rojizo u ocre con perdigones que puede llegar a ser suelo. Tiene poco espesor, por lo general no llega a 2 m, nunca afectará al túnel, por lo que no se abundará en su descripción y propiedades, ya que sólo se representa en el perfil ingeniero-geológico.



Figura 8. Afloramiento de las serpentinitas muy intemperizadas y suelo eluvial. Según el perfil ingeniero geológico del túnel principal y de conexión la obra se desarrolla en todo su trazado en la capa 5b y 5c constituyendo las capas de interés constructivo.

Capa 5b. Serpentinitas esquistosas y/o budinadas, se caracterizan por la presencia de pliegues con budinas, estas aparecen espaciadas y su tamaño es de medio a grande. En la clasificación de Cordovés y Quintas, 2009, se incluye un

tipo formado por Serpentinitas budinadas y foliadas, donde predominan las budinas, que por ser estas de gran tamaño, cartografiables a la escala de los trabajos ingeniero-geológicos, se considerarán según sus características dentro de las demás capas y/o tipos. Las serpentinitas esquistosas presentan una dureza blanda y las budinas son de dureza moderadamente dura. Se clasifican como medianamente intemperizadas según Ingeniería Geológica. González Vallejo 2002. Más raramente como budinas pueden encontrarse bloques de Gabro o Peridotitas. El color es verdoso con bandas oscuras y claras con aspecto abigarrado - jaspeado. Estas rocas no son homogéneas por lo que la denominación de capa es formal, ya que no cumple los parámetros de homogeneidad en extensión (ancho y largo) y potencia. Al ser una roca esquistosa, donde la resistencia depende de la dirección de esquistosidad, envolviendo a rocas más duras (budinas) hace que la excavación pueda presentar problemas de deslizamientos o derrumbes. Las serpentinitas esquistosas se presentan generalmente blanda y las budinas son moderadamente dura. Predominan las rocas foliadas sobre las budinas por lo tanto hay que tener en cuenta que se va a avanzar sobre un tipo de roca blanda a moderadamente dura, en algunos sectores y pudiendo aparecer bloques alargados de rocas de dureza moderadamente dura. Estarán presentes en el trazado en casi en toda su longitud, según Ingeniería Geológica (González Vallejo 2002) (ver Figura 9). En la tabla 2 se muestran las propiedades físico mecánica de las rocas de esta capa.

Tabla 2. Propiedades de la capa 5b

PROPIEDADES	ESTADO	U/M	VALOR
Densidad	Seca	kN/m ³	18.3-24.5 (21.3)
	Natural	kN/m ³	18.4-26.6 (21.5)
	Saturada	kN/m ³	21.5-25.5 (23.3)
Peso específico		kN/m ³	2.55-2.73 (2.66)
Porosidad		%	8.39-32.20 (19.7)
Resistencia a la compresión	Seca	Mpa	20.03-49.50 (32.7)
	Saturada	Mpa	7.10-38.7 (19.4)
Coefficiente de ablandamiento			0.21-0.95 (0.60)
Absorción (Abs)			2.5 a 18.0 (7.5)

Coefficiente de fortaleza de Protodiakonov (F.K.P)	Seca	Mpa/10	2.0-5.0 (3.0)
	Saturada	Mpa/10	1.0-4.0 (2.0)
Resistencia a la tracción	Seca	Mpa	2.09-2.94
	Saturada	Mpa	1.90-1.92
Módulo de Young	Seco	Mpa	920-4248 (2063.6)
	Saturado	Mpa	545-2792 (1531.5)
Químicos	CaCO3	%	Traza a 1.5
	SST	%	0.026 a 0.086 (0.04)

En la figura 9, se puede observar el aspecto que tiene esta capa.



Figura 9. Serpentinita esquistosa y/o budinadas

Capa 5c. Serpentinitas agrietadas y/o brechosas: A diferencia de los tramos anteriores esta capa se encuentra por encima de la capa 5b, su explicación se debe a que estas capas más bien son cuerpos de rocas que pueden encontrarse indistintamente una encima de la otra y su contacto es tectónico asociada con la zona de falla de sobrecorrimiento que pueden ser verticales u horizontales, no obstante en el tramo que nos ocupas estas ultima no afectan el trazado del túnel. En las zonas de estos contactos pueden ocurrir problemas de estabilidad. Se caracteriza por presentar bloques elementales entre grietas de tamaño medio entre 10-30 cm. Por su dureza se clasifican como rocas medianamente duras a

blandas, pueden estar medianamente intemperizadas predominando en profundidad las poco meteorizadas, según Ingeniería Geológica (González Vallejo 2002). En la tabla 3 se muestran las propiedades físico mecánica de las rocas de esta capa.

Tabla 3. Propiedades de la capa 5c

PROPIEDADES	ESTADO	U/M	VALOR
Densidad	Seca	kN/m ³	21.3 - 22.9 (21.9)
	Natural	kN/m ³	20.4 - 22.2 (22.1)
	Saturada	kN/m ³	22.3-23.3 (22.7)
Peso específico		kN/m ³	2.55-2.65 (2.57)
Porosidad		%	11.2 - 20.1 (16.3)
Absorción		%	3.4-18.5(10.7)
Resistencia a la compresión	Seca	Mpa	3.4 - 18.5 (10.7)
	Saturada	Mpa	6.9 - 8.6 (7.6)
Coeficiente de ablandamiento			0.63 - 0.95 (0.82)
Coeficiente de fortaleza de Protodiakonov (F.K.P)	Seca	Mpa/10	0.30 -1.14 (0.85)
Resistencia a la tracción	Seca	Mpa	0.4 - 2.2 (1.1)
	Saturada	Mpa	0.2 - 0.8 (0.4)
Módulo de Young	Seca	Mpa	192 - 801 (604)
	Saturada	Mpa	480 - 558 (519)

Esta capa por su dureza se clasifica según Duncan y Jennings como muy blandas y por el Precons 2005 como blandas. (Informe levantamiento ingeniero – geológico Tramo V, pág. 24)

Debe señalarse que los valores de resistencia de estas rocas presentes en las diferentes capas ingeniero-geológicas, siempre están por debajo de sus condiciones naturales al encontrarse estas confinadas y más aún a la cota 65 m que representa la base del túnel (ver Figura 10).



Figura 10. Serpentinitas agrietadas y/o brechosas

II.6 Características constructivas generales del túnel.

El presente Proyecto Técnico-Ejecutivo corresponde al túnel Levisa-Mayarí, el cual ha sido dividido en 6 tramos dados su longitud aproximada de 17,0 Km. correspondiendo este en específico, al Tramo V con una longitud de 4920.0 m, y el túnel de conexión III con una longitud de 620.00 m. El proyecto se ejecuta a solicitud de la inversión, de diseñar un túnel a partir del trazado ajustado con el objetivo de permitir la conducción del gasto mínimo de 30.0 m³/s desde la presa Levisa hasta la presa Mayarí, en unión con los tramos que le anteceden (tramo VI sin proyectar), el tramo I y II (construido), tramo III y tramo IV (en construcción). Para el diseño de este túnel se consideró que la conducción se realizará a presión, aprovechando la carga de la presa Levisa con cota de nivel de aguas normales de 96.00 m y cota de fondo del túnel a la salida de 65.00. El túnel tramo V inicia en el estacionado 2+715.24 (fin del Tramo IV) = 0+000 con cota de fondo 65.00 m. Este túnel constituye un elemento más del sistema del Trasvase Este-Oeste en el tramo Sagua-Mayarí, resultando un elemento continuador del proyecto que pretende

aliviar, futuramente, los posibles efectos de la sequía en el oeste de Holguín Y Las Tunas.

El túnel Levisa - Mayarí Tramo V está compuesto por el túnel de conexión IV que sirve de acceso al túnel antes mencionado y se utilizará como otro frente de trabajo el túnel de conexión II (tramo IIIB), ya en ejecución. El mismo trasvasará un caudal mínimo de $30 \text{ m}^3/\text{s}$ (gasto forzado) con una pendiente constructiva para el drenaje en el interior de 0.0026 y 0.001 m/m respectivamente, su sección transversal responde a la circulación en régimen forzado del caudal antes mencionado teniendo en consideración los cálculos en cuanto a dimensiones, rugosidad, entre otros elementos. Al igual que los tramos anteriores la sección definida del túnel es del tipo ovoidal de piso plano y hastial vertical, constituyendo una sección intermedia entre la circular (máxima eficiencia hidráulica) y la parabólica (sección que mejor distribuye el estado tensional del macizo). Sus dimensiones responden fundamentalmente a criterios de diseños hidráulicos y a facilidades constructivas para el acceso a los equipos de construcción. El túnel perteneciente al Tramo V, es una galería horizontal que presenta una base rectangular de 6,00 m de ancho y 0.84 m de hastial la sección superior está compuesta por dos radios de igual dimensiones a su base y un arco de cierre (techo del túnel) con un radio de 1.75 m y 4 920.0 m de longitud, con una pendiente de 2 mm/m, 21 nichos de escombrecimiento espaciados a una distancia aproximada de 200.0 m, valor que puede variar a fin de evitar su colocación en zonas de fallas, presentan una longitud de 10.0 m y su revestimiento y parámetro de excavación se ajusta a la sección típica de la zona donde se emplaza. Para facilitar además su ventilación se han propuestos dos pozos de ventilación, ubicados en Arroyo Blanco (estacionado 0 +166.42) y en el estacionado 3 +150.00, su ubicación responden a criterios de ventilación y a la posibilidad de ejecución en superficie (ver Figura 11).



Figura 11. Vista del túnel Levisa - Mayarí Tramo V

Secciones típicas del Tramo V.

Sección Típica 1.

Características:

- Índice de calidad del macizo rocoso – 6.6 según Barton
- Categoría de sostenimiento - 3.
- Tipo de revestimiento-Sostenimiento: Hormigón proyectado con fibra sintética espesor - 3 cm, inmediato después de cada voladura; bulonado sistemático con bulón $L=2.70$ m, espaciado a 1.35 en ambas direcciones; hormigón proyectado con fibra sintética espesor - 5 cm, para un revestimiento total de 8 cm.
- Sección de excavación total - 29.05 m^2 .
- Longitud de avance - 6.0 m.
- Sección Hidráulica - 26.74 m^2 .

- Ancho interior por el fondo - 6.0 m.
- Altura interior - 5.60 m.
- Losa de piso definitivo del túnel (espesor) - 0.20 m.

Sección Típica 2.

Características:

- Índice de calidad del macizo rocoso – (1.8 a 3.7)
- Categoría de sostenimiento - 4.
- Tipo de revestimiento – Sostenimiento: Hormigón proyectado con fibra sintética espesor - 3 cm, inmediato después de cada voladura; bulonado sistemático con bulón L = 2.70 m, espaciado a 1.35 x 2.30 m en ambas direcciones; hormigón proyectado con fibra espesor - 5 cm, para un revestimiento total de 8 cm.
- Sección de excavación total - 29.05 m².
- Longitud de avance (Barton) - 3 m
- Sección Hidráulica - 26.74 m².
- Ancho interior por el fondo - 6.0 m
- Altura interior - 5.60 m.
- Losa de piso definitivo del túnel (espesor) - 0.20 m.

Sección Típica 3.

Características:

- Índice de calidad del macizo rocoso - 0.1 según Barton
- Categoría de sostenimiento - 7.
- Tipo de revestimiento – Sostenimiento: Hormigón proyectado con fibra sintética espesor - 5 cm, inmediato después de cada voladura; bulonado sistemático con bulón L = 2.70 m, espaciado a 1.35 m en ambos sentidos (transversal y longitudinal); hormigón proyectado con fibra sintética espesor - 10 cm, para un revestimiento total de 15 cm.
- Sección de excavación total – 30.07 m².
- Longitud de avance (Barton) - 1.50 m

- Sección Hidráulica – 26.74 m².
- Ancho interior por el fondo - 6.0 m
- Altura interior - 5.60 m.
- Losa de piso definitivo del túnel (espesor) - 0.20 m.

Sección Típica 4.

Características:

- Índice de calidad del macizo rocoso - 0.01 según Barton
- Categoría de sostenimiento - 8.
- Tipo de revestimiento-Sostenimiento: Hormigón proyectado con fibra sintética espesor - 5 cm, inmediato después de cada voladura; bulonado sistemático con bulón L=2.70 m, espaciado a 1.0 m en ambos sentidos (transversal y longitudinal); arcos de acero espaciados 1.0 m (4 ø 12.7 mm, unidos a los bulones)
- Hormigón proyectado con fibra sintética espesor - 15 cm, para un revestimiento total de 20 cm.
- Sección de excavación total – 30.81 m².
- Longitud de avance (Barton) - 1.0 m
- Sección Hidráulica – 26.74 m².
- Ancho interior por el fondo - 6.0 m
- Altura interior - 5.60 m.
- Losa de piso definitivo del túnel (espesor) - 0.20 m.

II.7 Procesos Tecnológicos que se ejecutan durante la construcción

Proceso Tecnológico es el proceso que nace de necesidad de solucionar un problema, necesidad o situación de manera que, a través de un análisis y posterior diseño, nazcan las diversas tecnologías que existen hoy. Los túneles son construcciones con un alto nivel de tecnología, que avanza junto al paso de los años, debemos conocer que la ejecución de estos grandes túneles para infraestructuras, carreteros, ferroviarios, o hidráulicos, suponen una gran complejidad tanto en el aspecto organizativo de la obra, como en el técnico en sí de la construcción: grandes máquinas y elementos auxiliares, periodicidad de los

procesos (excavación, desescombro, sostenimiento, mantenimiento, seguridad del personal, adaptación continua a las condiciones del terreno, entre otros).

Para que se construya un túnel con la calidad requerida, sin que se ocasionen derrumbes, inundaciones, entre otros fenómenos negativos que pueden traer dificultades en el avance del mismo, se debe emplear mejoras tecnológicas para que aumente la eficiencia de construcción. Pero antes tenemos que conocer los procesos tecnológicos empleados el túnel Tramo V: Excavación, Sostenimiento, Bulonado, Revestimiento y Piso.

Perforación de los barrenos

En el túnel Levisa - Mayarí tramo V, se realizan perforaciones cilíndricas de 45mm de diámetro y con una profundidad variable en dependencia de la estabilidad del macizo rocoso. El método de perforación utilizado es rotopercusión, se basa en la combinación de las siguientes acciones: percusión, rotación, empuje y barrido. En esta actividad se utiliza el Tamrock Axera 6 - 240 es un jumbo electro hidráulico de dos brazos, para perforación rápida y precisa en túneles de secciones comprendidas entre 8 y 49 m² (ver Figura 12).



Figura 12. Perforadora Tamrock Axera 6-240

Ventilación

La ventilación se realiza a través de pozos de ventilación en los cuales se colocan ventiladores o extractores en dependencia de la necesidad de la evacuación de gases tóxicos o nocivos que puedan existir en el frente de la excavación. Para lograr una mejor concentración del aire fresco se colocan accesorios para colocar conductos de ventilación lo más próximo al frente de trabajo.

Saneamiento de la roca

En el tramo V, las labores de saneamiento se realizan examinando el estado del techo y lados de la excavación en las zonas cercanas al frente, así como verificar si todos los barrenos hicieron explosión. Solo después que el personal responsable del saneamiento da el visto bueno, se permite el paso de la brigada de trabajo al frente.

Carga y transporte de la roca

La carga y transporte de la roca son utilizados con equipos especializados para obras subterráneas como el pala cargadora, Toro 400 (ver Figura 13) y Dumper (camión de volteo de perfil bajo ver Figura 14). La carga de la roca tiene una duración de 20.6%.



Figura 13. Pala cargadora Toro 400



Figura 14. Dumper camión de volteo de perfil bajo

Sostenimiento

En el Tramo V, el tipo de sostenimiento utilizado es el hormigón lanzado combinado con los anclajes de barras corrugadas con pasta de cemento, con un espesor en dependencia de la estabilidad del macizo entre 3 - 5 cm.

Bulonado, depende del índice de calidad de la roca

Bulones o pernos con anclaje mecánico

Los bulones utilizados en el túnel Levisa - Mayarí Tramo V tienen un diámetro de 25 mm, su extremo opuesto es con rosca, con una placa plana y una tuerca, para presionar la roca. Este tipo de pernos es barato, su acción de reforzamiento de la roca, es creciente a medida que la pasta de cemento adquiera su resistencia.

Mediante rotación se enrosca la tuerca hasta lograr que la chapa de acero este confinada con el macizo.

Revestimiento

Los revestimientos en los túneles del trasvase se realizan según las características del macizo rocoso, en la mayoría de los casos con hormigón lanzado, con un espesor variable entre 5 – 15 cm, además en el caso de zonas de fallas se colocan arcos de acero (4 barras de acero corrugado de ½ “) para asegurar una mejor estabilidad, luego se le aplica la capa de hormigón lanzado. En el sostenimiento y el revestimiento la máquina utilizada es SIKA PM 4 207 (ver Figura 15).



Figura 15. Gunitadora SIKA PM 4 207

CAPÍTULO III. CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA Y EVALUACIÓN DEL MACIZO ROCOSO

III.1 Características generales de las diferentes capas que atraviesa el túnel.

➤ Serpentinitas esquistosas y/o budinas.

Del levantamiento geológico de campo se pudo observar que estas rocas se e caracteriza por la presencia de serpentinita esquistosa, plegada con budinas espaciadas de tamaño medio a grande. Las serpentinitas esquistosas presentan una dureza blanda y las budinas son de dureza moderadamente dura.

El grado de meteorización es de categoría II (algo meteorizada), según González Vallejo 2002, en las grietas y planos de esquistosidad se observa humedad. Las grietas aparecen juntas a muy juntas con una continuidad de alta a muy alta, predominando las de abertura cerrada y en menor medida abiertas, la rugosidad es escalonada rugosa y ondulada rugosa.

Las budinas por lo general son rocas más duras que las rocas esquistosas que las bordean, siendo este desde el punto de vista ingeniero-geológico un factor desfavorable, toda vez que las budinas pueden volverse inestables cuando se excavan y pierden su confinamiento natural.

➤ Serpentinita agrietada y/o brechosa.

Son muy frecuentes a lo largo de la traza del túnel. Por su dureza se clasifican como rocas moderadamente duras a blandas, algo meteorizadas, González Vallejo 2002. Cuando se encuentran al nivel del túnel, existe circulación de agua por las fracturas. Las grietas en esta litología están separadas en superficie producto al intemperismo, aunque cerradas y/o rellenas en profundidad generalmente de serpofita y otros rellenos como arcillas, carbonatos y más raramente sílice, tienen una continuidad alta, sus planos son ondulados rugosos y escalonados-rugosos. Cuando están abiertas sin relleno, por lo general su abertura está en el orden del milímetro o fracción del milímetro.

➤ **Serpentinita muy intemperizadas.**

Se caracterizan por el predominio de los bloques grandes con dimensiones de 30-100 centímetros. La dureza es moderadamente dura, presentándose algo meteorizada, según González Vallejo 2002, sin presencia de humedad. Las grietas se encuentran muy separadas con una continuidad muy alta, se encuentran abiertas y anchas; la rugosidad predominante es la ondulada rugosa y escalonada rugosa.

III.2 Levantamiento geológico de agrietamiento.

El levantamiento geológico de campo del agrietamiento se realizó según las litologías presentes y tramos o estaciones de medición. Para el procesamiento del agrietamiento se utilizó la proyección estereográfica de los elementos de yacencia a través de la representación gráfica de los círculos máximos con el uso del software Dip V.5 por estacionados de 500 m.

Estacionado 1501 hasta el 2000:

Descripción: rocas serpentinitas esquistosas y/o budinas poco alterada de color gris verdoso claro a gris oscuro con 5 familias de grietas con relleno de material serpoftico limo arcilloso.

Familias de grietas descritas:

54⁰/276⁰ plana lisa continua con relleno de material limo arcilloso, distancia entre grietas 0.40 m

71⁰/077⁰ plana lisa continua con espejo de fricción y relleno de material limo arcilloso, distancia entre grietas 0.30 m

09⁰/125⁰ ondulada lisa con relleno de material limo arcilloso, distancia entre grietas 0.35 m

75⁰/141⁰ ondulada lisa con relleno de material limo arcilloso, distancia entre grietas 0.20 m

67°/025° plana lisa con relleno de material areno arcilloso, distancia entre grietas 0.40 m

En la figura 16 se muestran los planos de grietas a través del diagrama de círculos máximos.

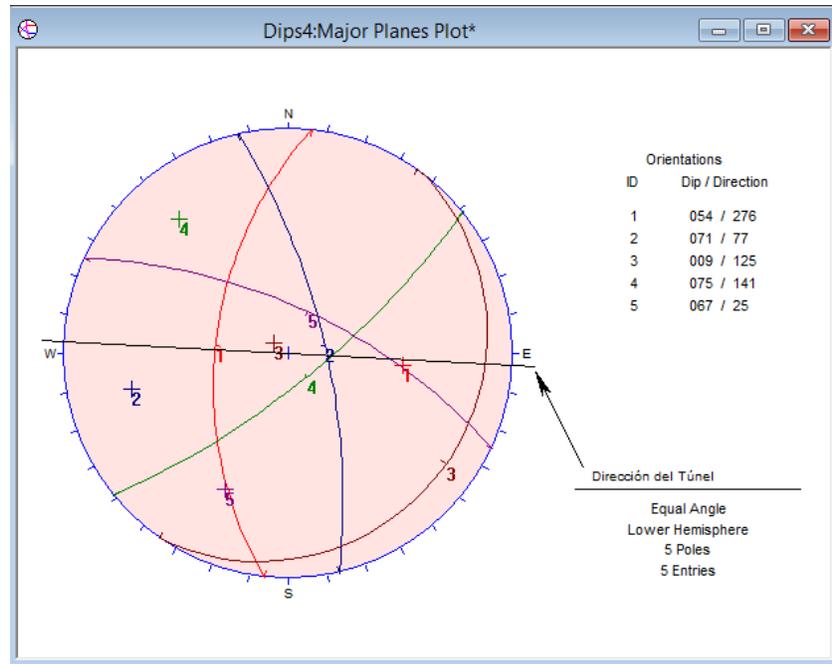


Figura 16. Planos de grietas estacionado 1501 hasta el 2000

Como se puede observar en la figura 17 en este tramo de excavación predominan 5 familias de grietas, orientadas en diferentes direcciones.

En este tramo de túnel, según las características del agrietamiento descritas, se calcula la Q de Barton.

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

$$Q = \frac{80}{15} * \frac{2}{3} * \frac{1}{5}$$

Q = 0.711, según la tabla 5 del anexo la roca clasifica de calidad muy mala.

Estacionados 2501 hasta el 3000:

Descripción: roca serpentinita agrietada y/o brechas de color gris claro a gris oscuro con 3 familias de grietas con relleno de material serpoftico limo arcilloso.

Familias de grietas descritas:

52°/260° plana rugosa con relleno de material limo arcilloso, distancia entre grietas 0.30 m

70°/090° plana rugosa con relleno de material limo arcilloso, distancia entre grietas 0.20 m

63°/012° plana rugosa con relleno de material areno arcilloso, distancia entre grietas 0.40 m

En la figura 17 se muestran los planos de grietas a través del diagrama de círculos máximos.

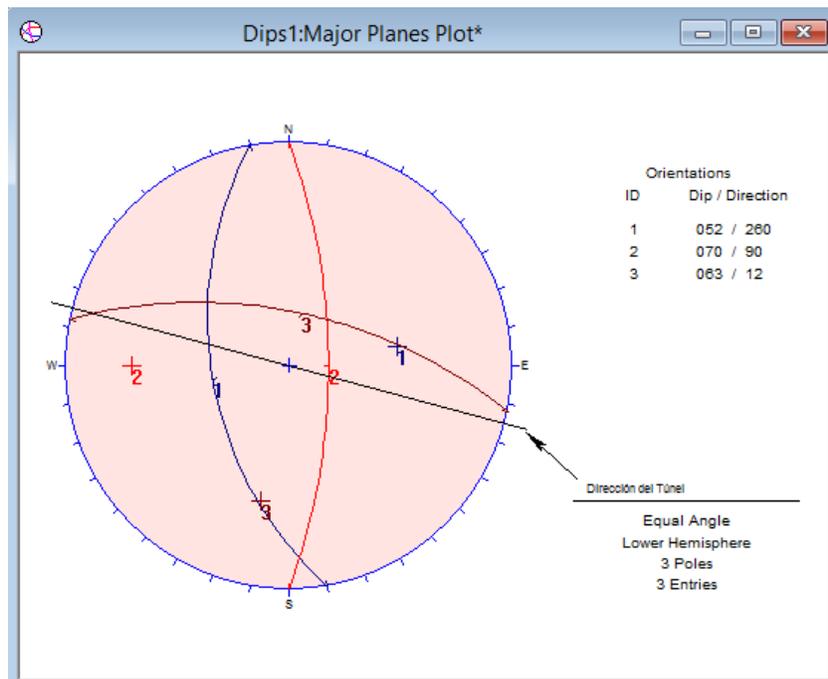


Figura 17. Plano de grietas estacionados 2501 hasta el 3000

Como se puede observar en la figura 18 en este tramo de excavación predominan 3 familias de grietas, orientadas en diferentes direcciones, siendo el sistema 3 desfavorable para la estabilidad de la excavación, ya que el rumbo de este sistema es paralelo al rumbo del túnel.

En este tramo de túnel, según las características del agrietamiento descritas, se calcula la Q de Barton.

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

$$Q = \frac{60}{15} * \frac{1.5}{6} * \frac{1}{2.5}$$

Q = 0.400, según la tabla 5 del anexo la roca clasifica de calidad muy mala.

Estacionados 3001 hasta el 3500:

Descripción: roca serpentinita muy intemperizadas de color rojizo u ocre con 3 familias de grietas con relleno de material serpoftico y areno arcilloso.

Familias de grietas descritas:

75⁰/182⁰ plana rugosa con relleno de material areno arcilloso, distancia entre grietas 0.40 m

44⁰/262⁰ plana rugosa con relleno de material areno arcilloso, distancia entre grietas 0.20 m

59⁰/043⁰ plana rugosa con relleno de material areno arcilloso, distancia entre grietas 0.40 m

En la figura 18 se muestran los planos de grietas a través del diagrama de círculos máximos.

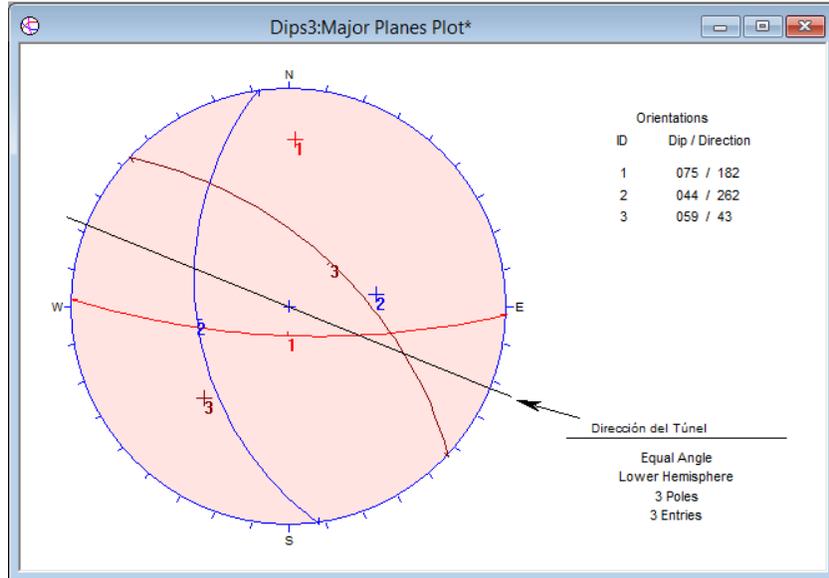


Figura 18. Plano de grietas estacionados 3001 hasta el 3500

Como se puede observar en la figura 19 en este tramo de excavación predominan 3 familias de grietas, orientadas en diferentes direcciones, el trazado del túnel es más vulnerable debido a que el rumbo del túnel casi paralelo con sistema de grietas 3.

En este tramo de túnel, según las características del agrietamiento descritas, se calcula la Q de Barton.

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

$$Q = \frac{55}{15} * \frac{1}{6} * \frac{1}{5}$$

Q = 0.122, según la tabla 5 del anexo la roca clasifica de calidad muy mala

III.3 Calculo del volumen del bloque

Para el cálculo del volumen de los bloques mediante el índice Ib, dado por la ISRM (International Society Rock Mechanics), en las mismas estacionados descritas, utilizándose los ángulos diedros formados entre los planos de agrietamiento. Para

clasificar el tamaño de los bloques, se emplea la escala de Palmstron, 1995 ver tabla 11 en anexos.

Expresión de cálculo del volumen delos bloque I_b , según la ISRM (International Society Rock Mechanics).

$$I_b = \frac{S_1 * S_4 * S_5}{\sqrt{1 - (\cos \alpha)^2 - (\cos \beta)^2 - (\cos \gamma)^2 - 2 \cos \alpha * \cos \beta * \cos \gamma}}$$

Donde:

I_b - Volumen del bloque (m^3)

α - Ángulo diedro formado por los diferentes sistemas de grietas que forman el bloque ($^\circ$)

S_1, S_2, S_3 – Espaciamiento promedio entre grietas (m)

Estacionado 1501 hasta el 2000:

En las figuras 19 y 20 se muestran los ángulos de las grietas usados en el cálculo del volumen de bloques del estacionado 1501 hasta el 2000.

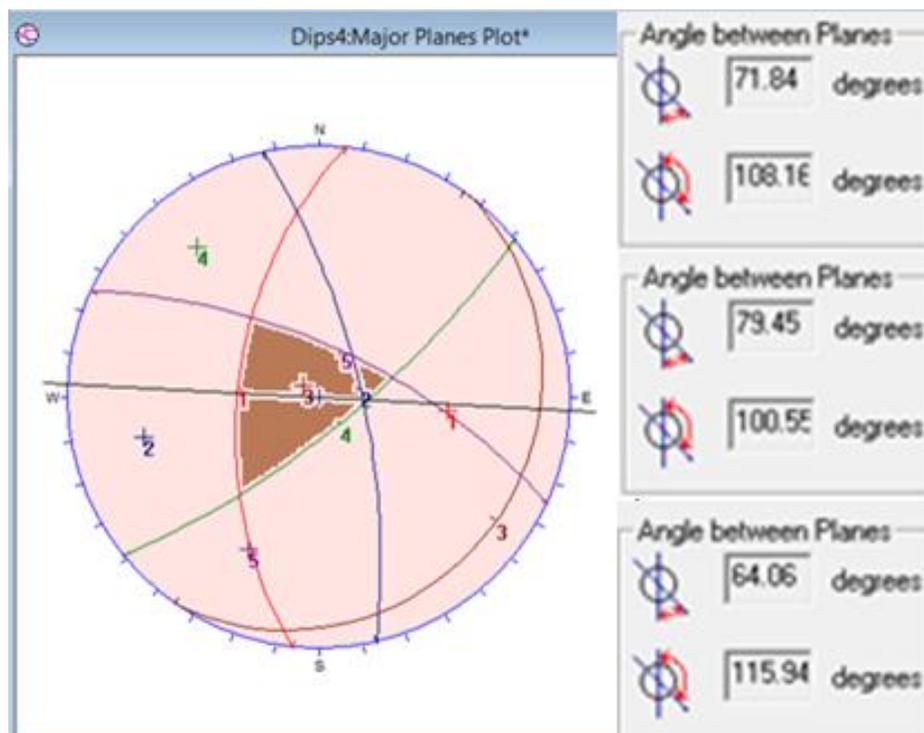


Figura 19. Ángulos del bloque formado por las familias de grietas del estacionado 1501 hasta el 2000 bloque 1

$$Ib1 = \frac{0.40 * 0.20 * 0.40}{\sqrt{1 - (\cos 71.84)^2 - (\cos 79.45)^2 - (\cos 64.06)^2 - 2 \cos 71.84 * \cos 79.45 * \cos 64.06}}$$

$Ib1 = 0.040 \text{ m}^3$ según la tabla 11 del anexo la roca clasifica de tamaño medio.

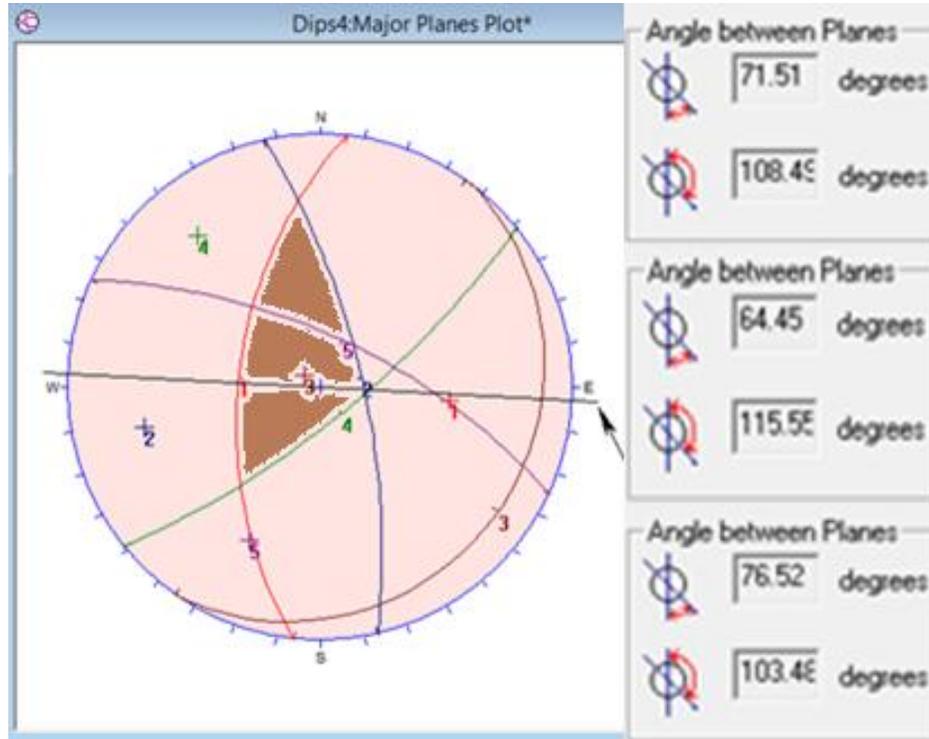


Figura 20. Ángulos del bloque formado por las familias de grietas del estacionado 1501 hasta el 2000 bloque 2

$$Ib = \frac{S_1 * S_4 * S_2}{\sqrt{1 - (\cos \alpha)^2 - (\cos \beta)^2 - (\cos \delta)^2 - 2 \cos \alpha * \cos \beta * \cos \delta}}$$

$$Ib = \frac{0.40 * 0.20 * 0.30}{\sqrt{1 - (\cos 71.51)^2 - (\cos 64.45)^2 - (\cos 76.52)^2 - 2 \cos 71.51 * \cos 64.45 * \cos 76.52}}$$

$Ib = 0.031 \text{ m}^3$ según la tabla 11 del anexo la roca clasifica de tamaño medio.

Estacionados 2501 hasta el 3000:

En las figuras 21 se muestran los ángulos de las grietas usados en el cálculo del volumen de bloques del estacionado 2501 hasta el 3000

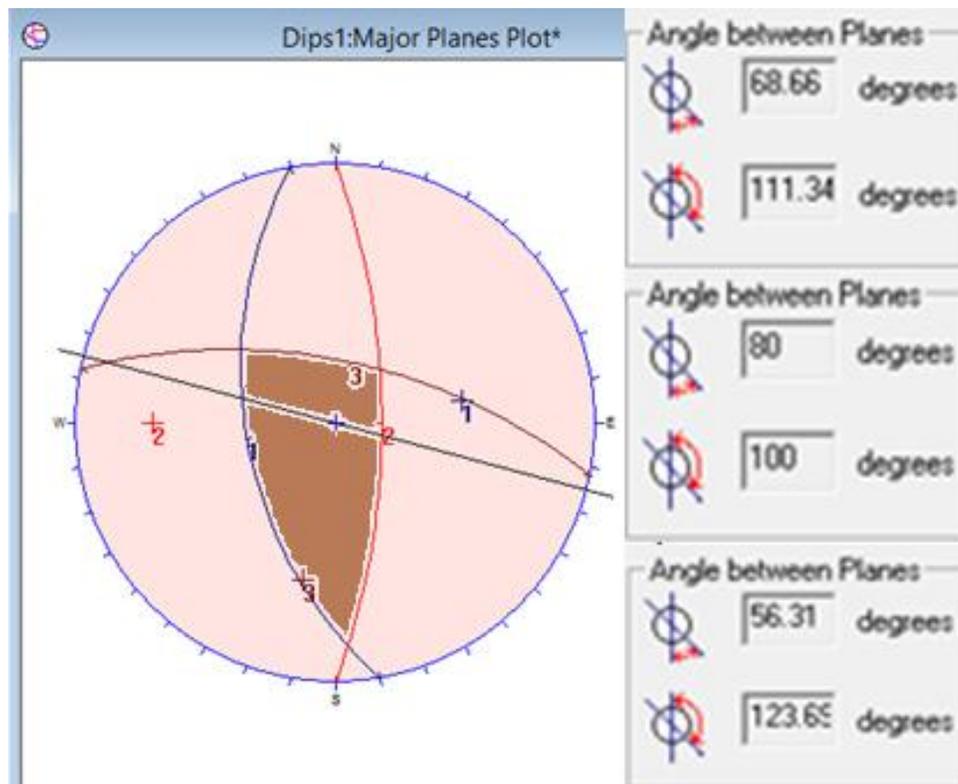


Figura 21. Ángulos del bloque formado por las familias de grietas del estacionado 2501 hasta el 3000

$$Ib = \frac{S_1 * S_2 * S_3}{\sqrt{1 - (\cos \alpha)^2 - (\cos \beta)^2 - (\cos \gamma)^2 - 2 \cos \alpha * \cos \beta * \cos \gamma}}$$

$$Ib = \frac{0.30 * 0.20 * 0.40}{\sqrt{1 - (\cos 68.66)^2 - (\cos 80)^2 - (\cos 56.31)^2 - 2 \cos 68.66 * \cos 80 * \cos 56.31}}$$

$Ib = 0.035 \text{ m}^3$ según la tabla 11 del anexo la roca clasifica de tamaño medio.

Estacionados 3001 hasta el 3500:

En las figuras 22 se muestran los ángulos de las grietas usados en el cálculo del volumen de bloques del estacionado 3001 hasta el 3500

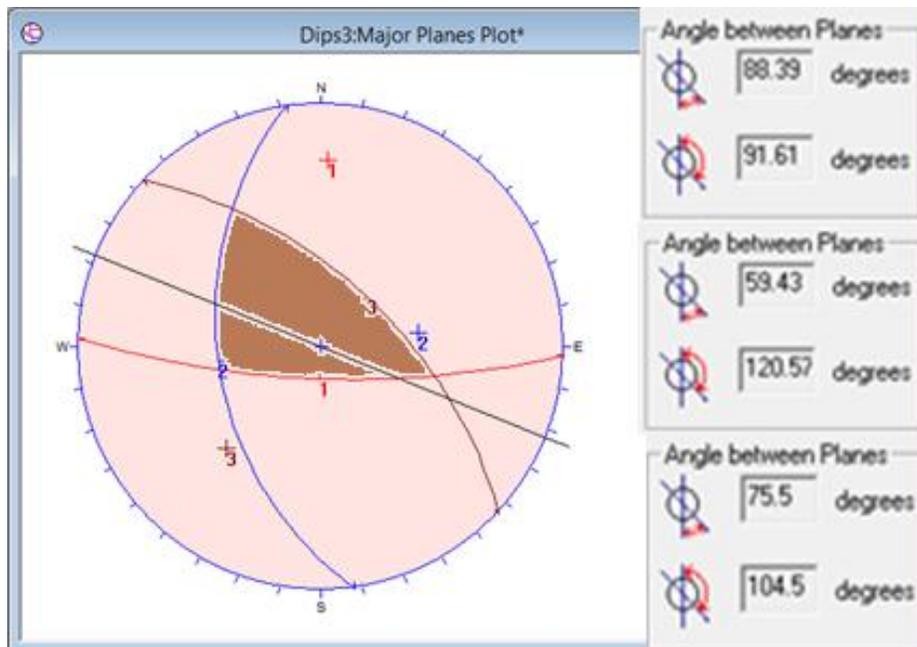


Figura 22. Ángulos del bloque formado por las familias de grietas del estacionado 3001 hasta el 3500

$$Ib = \frac{S_1 * S_2 * S_3}{\sqrt{1 - (\cos \alpha)^2 - (\cos \beta)^2 - (\cos \gamma)^2 - 2 \cos \alpha * \cos \beta * \cos \gamma}}$$

$$Ib = \frac{0.40 * 0.20 * 0.40}{\sqrt{1 - (\cos 88.39)^2 - (\cos 59.43)^2 - (\cos 75.5)^2 - 2 \cos 88.39 * \cos 59.43 * \cos 75.5}}$$

$Ib = 0.039 \text{ m}^3$ según la tabla 11 del anexo la roca clasifica de tamaño medio.

CONCLUSIONES

1. Según las características ingeniero geológica, las propiedades físico-mecánicas y estructurales y la calidad de las rocas obtenidas el macizo rocoso del Túnel Levisa Mayarí Tramo V se puede decir que el mismo se considera inestable.
2. El macizo rocoso atravesado por el túnel posee de tres a cinco familias de discontinuidades, orientadas en varias direcciones, con un volumen del bloque natural varía entre 0, 040 – 0. 031 m³, clasificados según Palmstrom de bloque medio.
3. Las rocas se clasifican según Barton de calidad muy mala en todo el trazado del túnel.
4. Los tramos más inestables desde el punto de vista de orientación del rumbo de las grietas respecto al trazado del túnel son los Estacionados 2501 hasta el 3000 y Estacionados 3001 hasta el 3500.

RECOMENDACIONES

1. Continuar las investigaciones mediante el estudio de otros indicadores que permitan ampliar las características geomecánicas del macizo rocoso del túnel.

BIBLIOGRAFÍA.

1. Barton. N. R. A relationship between of rock and rock joints. International Rock Mechanical, vol 13. 1976.
2. Barton, N, R. A model study of rock Joint deformation. International Journal of Rock Mechanic Geomechanics Abstracts. Vol 9, No. 5, Septiembre. 1972.
3. Barton, N, R y Choubey. A review of the shear strength of filled discontinuities in rock. Ed.e.Brooch. 1974
4. Barton. N. R. y otros. Strength, deformation and conductivity coupling of rock joint, vol 22. International Rock Mechanical, 1985.
5. Barton N. And V. Choubey. The shear strengt of rock joints in theory and practice: Symposion of Rock Mechanics. Pág 1-54, 1977.
6. Beniawski, Z. Roock, T. Determining rock mass deformability experience from case history. International Journal of Rock Mechanic Geomechanics Abstracts. Vol 15, No.15, Oct. 1978.
7. Cartaya, P. M., Caracterización geomecánica de macizos rocosos de la región Oriental de Cuba. Tesis Doctoral. ISMMANJ. 2001.
8. Cuesta Recio A, (2010), Procedimiento para elegir la técnica de control de las filtraciones que afectan las excavaciones subterráneas en macizos rocosos poco porosos y agrietados. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas.
9. Calderón Quirós Carlos Darío, (2013), Análisis, diseño y control geotécnico de la excavación del túnel y pozo vertical de la Descarga de Fondo del Proyecto Hidroeléctrico Reventazón. Proyecto final de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción. Costa Rica.
- 10.C. Sagaseta, (2006), Análisis y diseño de túneles. España.
- 11.González de Vallejo. L. 1998. Las clasificaciones geomecánicas para túneles. Ingeniero túneles: Carlos López Jimeno __ Madrid. I. T. S. de Ingenieros de Minas. U. P. Madrid. T – I, 25 – 66p.

12. González de Vallejo., L (2002). Ingeniería Geológica. Madrid.
13. Gonzales Luna G. (2008). Proyecto etapas ideas conceptuales. Traspase este-oeste.
14. Gavilanes J. Hernán y Byron Andrade Haro (2004). Introducción a la ingeniera de túneles .Ecuador 63 – 110 p.
15. López Almira L, (2017), Propuesta de mejoras tecnológicas para aumentar la eficiencia en la construcción del túnel Levisa-Mayarí Tramo IV. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Trabajo de diploma presentada en opción al Título de Ingeniero de Mina.
16. Noa Monjes 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 presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas.
17. Palacio García S, (2015), Estudio Comparativo De Métodos De Excavación De Túneles En Suelos Mediante El Método De Los Elementos Finitos. Trabajo de fin de grado.
18. Palmstrom. A. Caracterización de Macizos Rocosos mediante el RMI y sus aplicaciones en mecánica de rocas. Ingeniero túneles: Carlos López Jimeno _ Madrid. 1998. I. T. S. de Ingenieros de Minas. U. P. Madrid. TII, 79–107p.
19. Rodríguez Rojas J. (2005), Esquema de aprovechamiento hidráulico del trasvase este – oeste. Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos. Holguín.
20. Romero García-Rubio M, (2015), Estudio de excavación de túneles mediante el nuevo método austriaco a través del análisis por elementos finitos. España.
21. Ramírez Torres R, (2013), Propuesta de la colocación del “Paraguas” en el emboquille del Túnel Tramo III – A, Rio la Ceiba del Traspase Este – Oeste. Trabajo de diploma presentada en opción al Título de Ingeniero de Mina.
22. Sosa González H, (1990), Fundamentos Sobre Excavación De Túneles. Perú.

23. Soto Saavedra P, (2004), Construcción de Túneles. Tesis para optar al Título de Constructor Civil. Chile.
24. Ubierna, J. A. (1997). Historia de los túneles y su evolución histórica, Manual de túneles y obras subterráneas. Madrid.

ANEXOS

Anexo No. 1

Tabla 1. Clasificación de las rocas en función del RQD

RQD	TIPO DE ROCA
90 - 100	Muy buena
75 - 90	Buena
50 - 75	Media
25 - 50	Mala
0 - 25	Muy mala

Anexo No. 2

Tabla 2. Clases de macizos rocosos según el RMR.

Clase de Macizo Rocoso	Descripción	RMR
I	Macizo rocoso de excelente calidad	81-100
II	Macizo rocoso de buena calidad	61-80
III	Macizo rocoso de calidad regular	41-60
IV	Macizo rocoso de mala calidad	21-40
V	Macizo rocoso de muy mala calidad	0-21

Anexo No. 3

Tabla 3. Sostenimiento a partir del RMR.

Clase RMR	Excavación	Sostenimiento		
		Bulones	Gunita	Cerchas
I 100 - 81	Sección completa. Avances de 3 m.	Innecesario, salvo algún bulón ocasional.	No.	No.
II 80 - 61	Sección completa Avances de 1 – 1.5 m	Bulonado local en clave, con longitudes de 2 – 3 m y separación 2 – 2.5 m, eventualmente con mallazo.	5 cm en clave para impermeabilización.	No.

III 60 – 41	Avance y destroza. Avances de 1.5 – 3 m. Completar sostenimiento a 20 m del frente	Bulonado sistemático de 3 – 4 m con separaciones de 1.5 a 2 m en clave y hastiales con mallazo.	5 a 10 cm en clave y 3 cm en hastiales	No.
IV 40 – 21	Avance y destroza. Avances de 1 – 1.5 m. Sostenimiento inmediato del frente. Completar sostenimiento a menos de 10 m del frente.	Bulonado sistemático de 4 – 5 m con separación de 1 – 1.5 m en clave y hastiales con mallazo.	10 a 15 cm en clave y 10 cm en hastiales. Aplicación según avanza la excavación.	Cerchas ligeras espaciadas 1.5 m cuando se requieran
V ≤ 20	Fases múltiples. Avance de 0.5 – 1 m. Gunitar inmediatamente el frente después de cada avance.	Bulonado sistemático de 5 – 6 m, con separación de 1 – 1.5 m y hastiales con mallazo. Bulonado en solera.	10 a 15 en clave y 10 cm en hastiales y 5 cm en el frente. Aplicación inmediata después de cada avance.	Cerchas pesadas separadas 0.75 m con blindaje de chapas y serradas en solera.

Túneles de sección en herradura, máxima anchura 10 m, máxima tensión vertical 250 kp/cm³

Anexo No. 4

Tabla 4. Valores del parámetro SRF.

Parámetro SRF	Valor
○ Zonas débiles	
Multitud de zonas débiles o milonitas	10.0
Zonas débiles aisladas con arcilla o roca descompuesta (cobertura ≤ 50 m)	5.0
Id. con cobertura mayor de 50 mm.	2.5
Abundantes zonas débiles en roca competente.	7.5
Zonas débiles aisladas en roca competente. (cobertura ≤ 50 m)	5.0
Id. con cobertura mayor de 50 mm.	2.5
Terreno en bloques muy fracturado.	5.0
○ Roca competente	
Pequeña cobertura ($\frac{\sigma_c}{\sigma_1} = 200$)	2.5
Cobertura media ($200 > \frac{\sigma_c}{\sigma_1} > 10$)	1.0
Gran cobertura ($10 > \frac{\sigma_c}{\sigma_1} > 5$)	0.5 – 2.0

○ Terreno fluyente	
Con bajas presiones	5 – 10
Con altas presiones	10 – 20
○ Terreno expansivo	
Con presión de hinchamiento moderado	5 – 10
Con presión de hinchamiento alta	10 - 15

Anexo No. 5

Tabla 5. Clasificación de las rocas según la metodología de valoración de estabilidad dada por BARTON (1974)

Q	Clasificación
Entre 0,001 y 0,01	Roca excepcionalmente mala
Entre 0,01 y 0,1	Roca extremadamente mala
Entre 0,1 y 1	Roca muy mala
Entre 1 y 4	Roca mala
Entre 4 y 10	Roca media
Entre 10 y 40	Roca buena
Entre 40 y 100	Roca muy buena
Entre 100 y 400	Roca extremadamente buena
Entre 400 y 1000	Roca excepcionalmente buena

Anexo No. 6

Tabla 6. Estimación de los parámetros según BARTON.

Jn - Índice de diaclasado Valor	Jr - Índice de rugosidad Valor
<ul style="list-style-type: none"> •Roca Masiva. 0.5 -1,0 •Una familia de diaclasas. 2 • Id. con otras diaclasas ocasionales. 3 	<ul style="list-style-type: none"> Diaclasas rellenas 1 Diaclasas limpias (*) <ul style="list-style-type: none"> ▪ Discontinuas 4 ▪ Onduladas rugosas

<ul style="list-style-type: none"> • Dos familias de diaclasas. 4 • Id. con otras diaclasas ocasionales. 6 • Tres familias de diaclasas. 9 • Id. con otras diaclasas ocasionales. 12 • Cuatro o más familias, roca muy fracturada. 15 • Roca muy triturada 20 	<p>3</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Onduladas lisas 2 ▪ Planas rugosas 1,5 ▪ Planas lisas 1,0 <p>Lisas o espejos de fallas</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Onduladas 1,5 ▪ Planas 0,5 <p>(*) o cuyas caras se entran en contacto bajo la sollicitación.</p>
---	---

Anexo No. 7

Tabla 7. Estimación de los parámetros según BARTON.

Ja - Índice de alteración	Valor
Diaclasas de paredes planas	0.75 - 1
Ligera alteración	2
Alteración arcillosa	4
Con detritus arenosos	4
Con detritus arcillosos preconsolidados	6
Id. poco consolidados	8
Id. Expansivos	8 - 12
Milonitos de roca y arcilla	6 - 12
Milonitos de arcilla limosa	5
Milonitos arcillosos - gruesos	10 - 20

Anexo No. 8

Tabla 8. Estimación de los parámetros según BARTON.

Coefficiente reductor de la presencia de agua Jw	Valor	Presión de agua (kg/cm²)
Excavaciones secas o con <5 l/min localmente	1	< 1
Afluencia media con lavado de alguna diaclasas	0,66	1 - 2,5
Afluencia importante por diaclasas limpias	0,5	2,5 - 10
Id. Con lavado de diaclasas	0,33	2,5 - 10
Afluencia excepcional inicial, decreciente con el tiempo.	0,2 - 0,1	> 10
Id. Mantenida	0,1 - 0,05	>10

Anexo No. 9

Tabla 9. Valores del factor ESR

Tipo	Descripción	ESR
A	<ul style="list-style-type: none">• Minas abiertas temporalmente	3 - 5
B	<ul style="list-style-type: none">• Pozos verticales	2.5 - 2
C	<ul style="list-style-type: none">• Minas abiertas temporalmente• Túneles hidroeléctricos• Túneles pilotos y galerías de avance para grandes excavaciones	1.6
D	<ul style="list-style-type: none">• Cavernas de almacenamiento• Plantas de tratamiento de aguas• Túneles pequeños de carretera y ferrocarril	1.3
E	<ul style="list-style-type: none">• Cavernas de defensa civil• Túneles grandes de carretera y ferrocarril• Boquillas e intersecciones• Centrales eléctricas subterráneas	1
F	<ul style="list-style-type: none">• Centrales nucleares subterráneas• Estaciones de ferrocarril• Pabellones deportivos y de servicios	0.8

Anexo No.10

Tabla 10. Clasificación de la roca en función del RQD.

RQD	TIPO DE ROCA
90 – 100	Muy buena
75 – 90	Buena
50 – 75	Media
25 – 50	Mala
0 – 25	Muy mala

Anexo No. 11

Tabla 11. Tamaño del bloque en dependencia del rango de variación del volumen del bloque según Palmstron 1995.

Tamaño del bloque	Vb (m ³)
Extremadamente pequeño	Menor 0.00001 m ³
Muy pequeño	0.00001 m ³ – 0.0002 m ³
Pequeño	0.0002 m ³ – 0.01 m ³
Medio	0.01 m ³ – 0.2 m ³
Grande	0,2 m ³ – 10 m ³
Muy grande	10 - 200 m ³
Extremadamente grande	Mayor de 200 m ³

Anexo No.12

Tabla 12. Definición del tamaño de los bloques según el número de discontinuidades J_v de González de Vallejo (ISRM, 1981).

Descripción.	J_v (discontinuidades/m ³)
Bloques muy grandes.	Una o ninguna.
Bloques grandes.	1-3
Bloques de tamaño medio	3-10
Bloques pequeños	10-30
Bloques muy pequeños	Más de 30