

# *Trabajo de Diploma*

*Para Optar por el Título de*

## *Ingeniero de Minas*

*Título: Evaluación de la estabilidad y propuesta de sostenimiento para el túnel Levisa-Mayarí Tramo IV*

*Autor: Iosnel Rouco Suárez*

*Tutores: Dr. C. Rafael Noa Monje*

*Mr. C. Yurisdél Velázquez La O*



## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Declaro que soy el único autor del trabajo “Evaluación de la estabilidad y propuesta de sostenimiento para el túnel del certifico su propiedad a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

Para que así conste firmo la presente a los \_\_\_\_\_ días del mes de \_\_\_\_\_ del \_\_\_\_\_.

Iosnel Rouco Suárez

Nombre completo del autor

Rafael Noa Monje

Nombre completo del tutor

Yurisdell Velázquez La O

Nombre completo del tutor

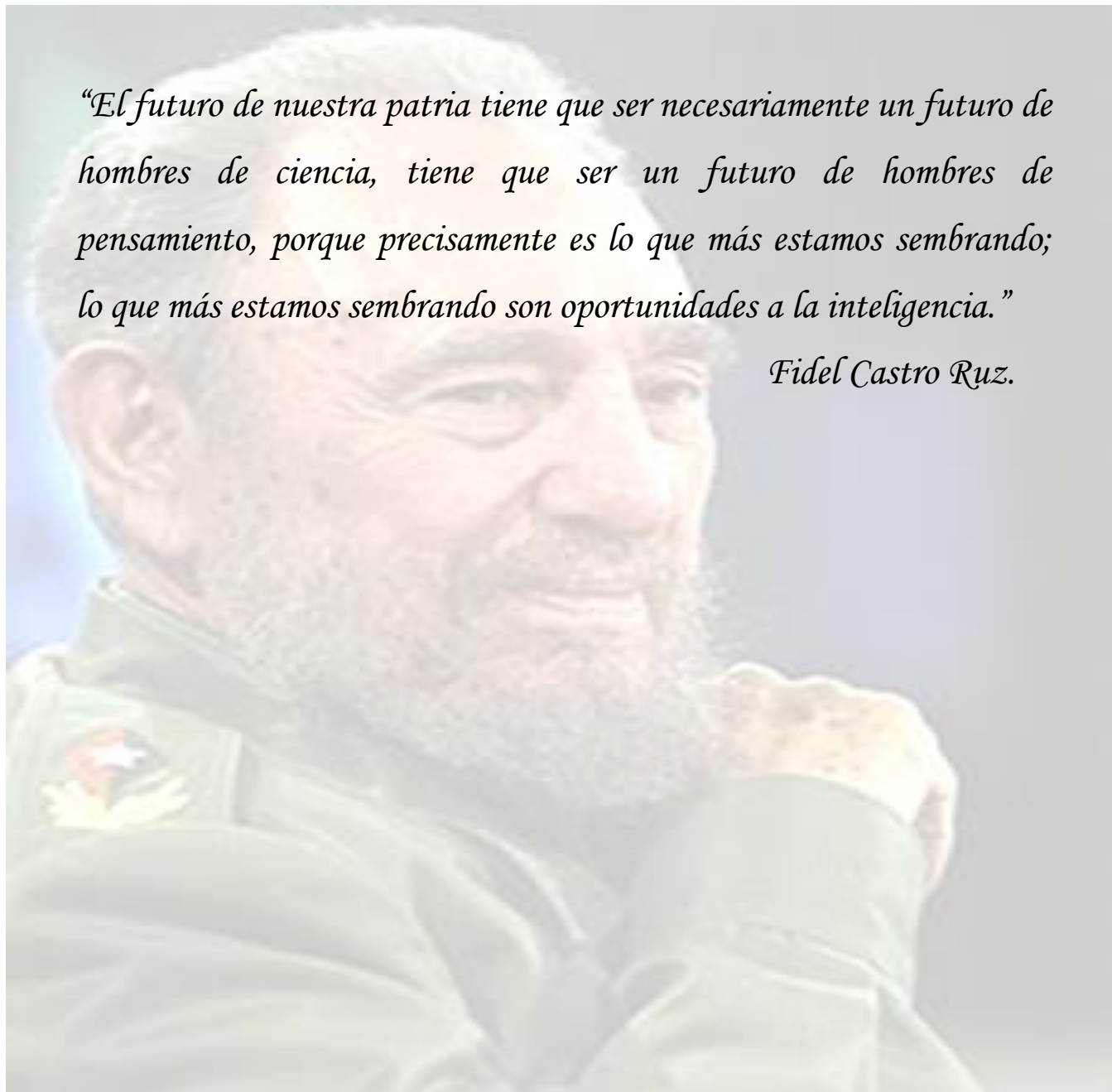
Iosnel Rouco Suárez

# Pensamiento

---

*“El futuro de nuestra patria tiene que ser necesariamente un futuro de hombres de ciencia, tiene que ser un futuro de hombres de pensamiento, porque precisamente es lo que más estamos sembrando; lo que más estamos sembrando son oportunidades a la inteligencia.”*

*Fidel Castro Ruz.*





# Agradecimientos



- Quisiera agradecer a la Revolución Cubana, a su pueblo, a Fidel y a Raúl, por darme la oportunidad de realizar uno de los sueños más anhelados en Latinoamérica y en el mundo, el cual es educarnos, con igualdad de derechos y de una forma digna.
- Agradecer a mis padres Alberto Rouco León y Tania Suárez Ferreira por darme todo su apoyo incondicional, confiar en mí para lograr que este sueño se hiciera realidad.
- Agradecer a mi hermanito Alberto Rouco Suárez e Iosney Suárez Ferreira por confiar y estar siempre a mi lado.
- Agradecer a Yurisley Valdez Mariño, Maday Cartaya Pire, Nelia Cardoso por sus consejos y apoyo.
- Agradecer a todas mis amistades por haberme apoyado y ayudado en los momentos que me hizo falta, en especial a Luis Enrique Reyes Castro, Carlos Alberto Cabrera Lobaina, Carlos Enrique Córdova Echemendía y Héctor Esparraquera.
- Agradecer a Tamary por apoyarme y darme fuerzas cuando pensé que ya no tenía.



- *Agradecer a Marlene Bertrán Vicente y Marlen Torres Bertrán por toda su dedicación, apoyo y haberme estado conmigo cuando lo necesite y darme fuerza para seguir hacia adelante.*
- *Agradecer a Daniel Jacomino y Betania por apoyarme.*
- *Agradecer a todos mis compañeros de aula, de cuarto por formar una familia en este periodo de vida que compartimos juntos.*
- *Agradecer a todos mis profesores por poder trasmitirme los conocimientos y sin ellos no habría podido lograr mis sueños.*
- *Agradecer a mis tutores Rafael Noa Monjes y Yurisdell Velázquez La O por los conocimientos que me aportó y la preocupación por la realización de mi trabajo de Diploma y no por ser los últimos dejan de ser menos importantes.*

*“A todos ustedes mis más sinceros y profundos agradecimientos”*



# *Dedicatoria*



*Dedico este trabajo a mi mamá, papá y hermanos por ser tan especial en mi vida por haberme brindado su apoyo incondicional, su amor y cariño, por darme las fuerzas e inspirarme para que hoy logre mis sueños.*

*A mis amigos y vecinos que siempre me apoyaron. .*

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

*A nuestra Revolución y Nuestro comandante va en especial la dedicatoria de este trabajo, por permitirme convertirme en un profesional y revolucionario.*

*A todos ellos muchísimas gracias.*



# Resumen



El presente trabajo está relacionado con el proceso de construcción de los túneles del trasvase Este – Oeste, fundamentalmente con el túnel Levisa-Mayarí, Tramo IV, el objetivo del mismo es realizar una evaluación de la estabilidad de las rocas y definir la necesidad o no de fortificar estas excavaciones; en el trabajo se realiza una caracterización ingeniero - geológica del macizo donde se construyen estas obras, además se hace una evaluación del agrietamiento y las características estructurales de este, dividiendo el túnel en tres tramos según sus características litológicas, para la evaluación de la estabilidad se utilizan, tres clasificaciones geomecánica de las existentes: la clasificación de Deere, basada en el índice de calidad del macizo(RQD), la clasificación de Bartón, basada en el índice (Q) y la clasificación de Bieniawski, basada en el (RMR), conjuntamente con esto se realiza una propuesta del sostenimiento a emplear en la excavación objeto de estudio.

De los análisis realizados para cada uno de los parámetros, se obtienen los siguientes resultados: con las clasificaciones geomecánicas empleadas para evaluar la estabilidad se obtiene que la calidad del macizo para los tres tramos se comporta entre mala y muy mala, de aquí que es necesario fortificar la excavación y para ello se propone el empleo de hormigón lanzado reforzado con fibras sintéticas, combinado con anclas metálicas.



# *Abstract*



The present work is related with the process of construction of the tunnels of the trasvase East-West, fundamentally with the tunnel Levisa-Mayarí, Tract IV, the objective of the same one is to carry out an evaluation of the stability of the rocks and to define the necessity or not of fortifying these excavations; in this work a characterization of the engineer-geologic is carried out where these works are built, an evaluation of the cracking and the structural characteristics of this, dividing the tunnel in three tracts according to their characteristic, for the evaluation of the stability is used, three classifications geomecánica of the existent ones: the classification of Deere, based on the index of quality of the macizo(RQD), the classification of Bartón, based on the index (Q) and the classification of Bieniawski, based on the (RMR), jointly therewith a proposal of the maintenance to use in the excavation study object.

Of the analyses realized for each one of the parameters, the following results are obtained: with the classifications geomecánicas used to evaluate the stability it is obtained that the quality of the solid one for the three tracts behaves among bad and very bad, of there that it is necessary to fortify the excavation and for that intends it in the employment of reinforced thrown concrete with synthetic fibers, cocktail with metallic anchors.





## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO I. Estado actual de la temática .....</b>	<b>5</b>
I.1 Introducción .....	5
I.2 Marco teórico conceptual .....	5
I.3 Estado actual de la temática en el mundo .....	10
I.4 Situación actual de la temática en Cuba .....	19
<b>CAPÍTULO II. Características generales de la región.....</b>	<b>23</b>
II.1 Introducción .....	23
II.2 Ubicación Geográfica.....	24
II.3 Geología regional y local.....	24
II.4 Clima, Vegetación, Orografía e Hidrografía .....	29
II.5 Población, Redes de Comunicaciones y Energía .....	32
II.6 Características socioeconómicas de la región y Geomorfología regional ....	32
II.7 Características hidrogeológicas .....	36
II.8 Tectónica Regional .....	36
II.9 Litología de la zona donde se encuentran el Túnel Levisa-Mayarí tramo IV	38
II.10 Características tectónicas y sísmicas de la zona donde se encuentra el túnel Levisa- Mayarí tramo IV .....	41
<b>CAPÍTULO III. Evaluación de la estabilidad y propuesta de sostenimiento..</b>	<b>43</b>
III.1 Introducción.....	43
III.2 Análisis de las clasificaciones para la evaluación de la estabilidad .....	44
III.3 Evaluación de la estabilidad.....	55
III.4 Análisis y propuesta de sostenimiento .....	59



III.5 Propuesta de parámetros técnicos del sostenimiento para la ejecución de los trabajos.....	63
<b>CAPÍTULO IV. Impacto ambiental y protección del trabajo .....</b>	<b>68</b>
IV.1 Generalidades .....	68
IV.2 Protección del Hombre .....	68
IV.3 Impactos ambientales.....	70
IV.4 Medidas para mitigar y prevenir impacto .....	71
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>73</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>74</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>75</b>
<b>ANEXOS</b>	



## *INTRODUCCIÓN*

El Estado cubano ha establecido como su principal estrategia para lograr la invulnerabilidad económica en los últimos años, lo que le ha permitido al país disminuir los efectos del período especial y alcanzar niveles de desarrollo en lo social, económico, político y cultural, superiores a los obtenidos en períodos anteriores.

Para ello ha realizado un número considerable de inversiones en diferentes ramas, tales como: como la energética, minera, la construcción industrial, turística, en la vivienda, en el transporte, entre otras.

También se prevé un considerable impulso en la construcción de obras hidráulicas con el propósito de encontrarle solución a corto, mediano y largo plazo a los efectos de las intensas sequías que han afectado y afectan a la economía con mayor intensidad en la región oriental del país.

El Trasvase Este-Oeste, una de las obra más importante de la ingeniería cubana del siglo XX, iniciada en los años 90 por empresas del Ministerio de la Construcción, el Instituto Nacional de Recursos Hidráulico y la Dirección de Construcciones Militares, se construye por la necesidad que existe de llevar el agua de los ríos que nacen en el macizo montañoso de Nipe-Sagua-Baracoa a las fértiles llanuras del norte de Holguín, Las Tunas, noreste de Camagüey y el norte y centro del Valle del Cauto. El Comandante en jefe con su acostumbrada luz larga, previendo los problemas ecológicos como consecuencia del galopante calentamiento global, orientó la necesidad de desarrollar un amplio plan inversionista para aprovechar el caudal del agua del macizo montañoso de Nipe-Sagua-Baracoa para crear un sistema de obras que trasvasará el agua mediante interconexiones a los lugares antes mencionados.

Iniciados los primeros trabajos en Mayarí, Holguín, tuvieron que paralizarse las obras cuando comenzó la aguda etapa del Periodo Especial. Debido al paso del



tiempo y la falta de preservación las obras fueron dañadas en buena parte, en el caso de Mayarí por las crecidas de los ríos y el abandono de las obras.

A finales del año 2004, ante la crisis ambiental que provocó una severa y prolongada sequía con grandes pérdidas para las provincias orientales y Camagüey, la máxima dirección del país orientó reiniciar el plan estratégico de las obras del Trasvase Este-Oeste, que será la garantía para que los lugares más afectados dispongan de agua en este siglo, bajo cualquier circunstancia.

El Trasvase para su óptimo funcionamiento no solo ha requerido la construcción de presas, canales, conductoras y otros objetos de obra, sino también hacer más de 80 Km. de túneles en las montañas para lograr una eficiente conexión del sistema.

En las excavaciones subterráneas existen algunas afectaciones como derrumbes, pérdida de estabilidad, inundación parcial o total, aumento de la humedad relativa, entre otras, las que guardan estrecha relación con los períodos de lluvia; el estado de saturación del terreno y el escurrimiento superficial y subterráneo, son aspectos que no siempre se toman en consideración para el diseño correcto de este tipo de obras, lo que puede traer como consecuencia que se afecte negativamente el cumplimiento del cronograma de ejecución del proyecto y el presupuesto asignado. Ello hace necesario en ocasiones, rediseñar parcial o totalmente la construcción o algunos de sus elementos.

Teniendo en cuenta lo anteriormente planteado, el **problema** que se pretende resolver es: necesidad de evaluar las condiciones de estabilidad de las rocas y proponer el tipo de sostenimiento del Túnel Levisa-Mayarí, Tramo IV, perteneciente al Trasvase Este-Oeste.

**Objeto de estudio:** Túnel Levisa – Mayarí, Tramo IV.

**Campo de Acción:** La estabilidad y el sostenimiento del Túnel Levisa – Mayarí,



Tramo IV.

A partir de este problema se justifica la ejecución de la presente investigación, para la cual se propone como **objetivo general** evaluar la estabilidad de las rocas y realizar una propuesta de sostenimiento para el Túnel Levisa-Mayarí Tramo IV del Trasvase Este-Oeste.

Teniendo como **hipótesis** que si se realiza un estudio de las condiciones ingeniero-geológicas, las propiedades de las rocas, las características mecánico-estructurales de los macizos donde se laborea el Túnel Levisa-Mayarí se puede realizar una evaluación de las condiciones de estabilidad y realizar una propuesta de sostenimiento.

Teniendo como **objetivos específicos**:

- Evaluar las condiciones ingeniero-geológicas de la región objeto de estudio.
- Analizar las características mecánico-estructurales del macizo.
- Determinar la calidad de las rocas.
- Evaluar el impacto ambiental producido por la construcción del Túnel Levisa-Mayarí Tramo IV.

**Métodos de investigación utilizados para dar solución al problema científico del trabajo:**

- **Histórico -lógico:** se utilizó para la revisión y análisis de los documentos y definir los principales antecedentes investigativos.
- **Método empírico:** será imprescindible el empleo de la medición. Como técnicas; la observación, para el conocimiento de las características fundamentales del objeto.
- **Métodos teóricos:** se utiliza para la interpretación conceptual de los datos empíricos; haciendo uso del **análisis y síntesis** en el estudio de las partes del objeto y para comprender su comportamiento como un todo. Dentro de los



métodos teóricos también se utilizó la **inducción y deducción** como procedimiento para pasar de lo conocido a lo desconocido y de lo general a lo particular. **El método dialéctico:** para conocer las relaciones entre las componentes del objeto.



## ***CAPÍTULO I. Estado actual de la temática***

### **I.1 Introducción**

La geomecánica es quizás una de las ramas tecnológicas más antiguas del universo, sin embargo, como ciencia es a fines de los años 50, que hizo su entrada en el hasta entonces, mundo crítico de las obras subterráneas. Históricamente se conoce que el Primer Congreso de Mecánica de Rocas se celebró en Portugal en 1966. (López Jimeno, 1998).

Las Clasificaciones Geomecánica de los Macizos Rocosos tienen aplicación en el análisis del comportamiento de las obras subterráneas. Se basan en la cuantificación de determinados parámetros que influyen en la estabilidad de las excavaciones, obteniéndose una serie de índices de calidad. Estos permiten la aplicación de fórmulas empíricas, que estiman las características de resistencia de los macizos rocosos. Dichos macizos también pueden clasificarse de forma cualitativa, dando una estimación de su comportamiento.

### **I.2 Marco teórico conceptual**

Por estabilidad de las rocas desnudas se entiende su capacidad de resistir la aparición y manifestación de la presión sin destruirse. En las zonas cercanas al contorno de las excavaciones y como consecuencia de la concentración de tensiones que en esas zonas se producen, puede ocurrir que la magnitud de las tensiones actuantes sobrepase el límite de resistencia de la roca, lo que trae consigo su deformación o destrucción. Antes de que esto último ocurra se debe proceder a garantizar las condiciones de estabilidad o el sostenimiento de las excavaciones, para lo cual se pueden emplear diferentes elementos de fortificación.

Los elementos de fortificación que actualmente son más utilizados en la ejecución de túneles mediante métodos convencionales son:

- Hormigón proyectado



- Bulones
- Chapa Bernold
- Hormigón Encofrado

Se describen seguidamente cada uno de estos elementos del sostenimiento.

### **Hormigón Proyectado**

Está constituido por un mortero de tamaño máximo de árido en torno a 8 mm, que se coloca contra el interior de la excavación compactando el mismo mediante la energía de su proyección. Este sistema de colocación y densificación es lo que diferencia claramente al hormigón proyectado del hormigón vibrado, que se coloca al amparo de un encofrado.

Actualmente con el hormigón proyectado pueden alcanzarse resistencias iguales o superiores a las del hormigón convencional encofrado, a pesar de la disminución del tamaño máximo del árido, lo que se consigue mediante la adición de humo de sílice.

Los métodos de colocación del hormigón proyectado son:

- ❖ Por vía seca, en que el aporte del agua a la mezcla de cemento y árido lo realiza el propio operario, incluyéndose en el extremo de la lanza de proyección el grifo para la regulación del caudal del agua.  
Este es el sistema antiguo de colocación del hormigón proyectado, y presentaba los siguientes inconvenientes:
  - Falta de homogeneidad del hormigón proyectado, debido al mayor o menor contenido de agua regulada por un operador.  
Por otro lado, como cuanto mayor fuera el contenido en agua aunque la resistencia fuera menor, también se disminuía el rebote, la tendencia del operario era a colocar más agua de la necesaria.





- Falta de compacidad del hormigón proyectado, ya que aunque se indicaba en todos los Pliegos que debía mantenerse una distancia de la lanza respecto a la zona de proyección del orden de 1.50 m, el operario para evitar el efecto desagradable del rebote, tendía a distanciarse de la posición a gunitar, hasta alcanzar una distancia con la que se realizaba un “regado” de la zona a gunitar.
- ❖ Por vía húmeda, mediante el empleo de robots que realizan automáticamente el gunitado, con lo que el operario debidamente protegido y a distancia del punto de trabajo tiene únicamente que situar los extremos de las lanzas de los robots. Ver figura 1 del anexo.

Durante la proyección parte del material suministrado se desprende de la masa, lo que se denomina como rebote, y que modifica el grado de aprovechamiento del hormigón gunitado y disminuye la resistencia de la gunita colocada, ya que con el rebote se pierden más gruesos que finos. El porcentaje de rechazo depende de los siguientes factores:

- Relación agua/cemento.
- Proporción de la mezcla.
- Gunitador.
- Tipo de áridos (> árido grueso => más rebote).
- Eficacia de la hidratación.
- Presión del agua o del aire.
- Diseño y tamaño de la boquilla.
- Velocidad de la proyección.
- Capacidad del compresor.
- Angulo y distancia del impacto.

En el sostenimiento de túneles está totalmente extendida la incorporación de fibras de acero a la gunita, lo que lleva a las siguientes mejoras:

- Mayor resistencia a la tracción de la gunita colocada y menor fisuración.



- Disminución del rebote.
- Aumento del desarrollo inicial de resistencia.

Se recomienda que la longitud de las fibras sea como mínimo de 20 mm, y con cualquiera de las formas habituales según las especificaciones.

## **Bulones**

Pueden diferenciarse los siguientes tipos de bulones: Ver figura 2 del anexo.

- a) Bulones de barra a la resina o inyectados.
- b) Bulones de expansión hidráulica.
- c) Bulones de anclaje mecánico.
- d) Bulones autoperforantes.

- a) Bulones a la resina.

Están constituidos por redondo normal corrugado de acero BS-500 y diámetros de 25 a 32. La perforación se realiza con un ligero sobreancho respecto al diámetro del redondo, que debe rellenarse íntegramente con cartuchos de resina de dos componentes, cuyo endurecimiento es inmediato una vez que se produce el batido que realiza el propio martillo que perfora el agujero para la colocación del bulón.

En el extremo exterior del bulón se realiza un mecanizado en rosca, con una longitud no inferior a 150 mm y se coloca una placa y su correspondiente tuerca.

- b) Bulones de expansión hidráulica.

Son los actualmente utilizados de forma generalizada por su rapidez de colocación hasta longitudes de 6-8 m, utilizando la propia cercha del Jumbo después de haberse perforado el agujero con uno de los brazos del mismo. Consisten en una chapa flexible que se suministra ondulada, y que por presión.

Es igualmente dudoso el comportamiento de este tipo de bulones, en que la sección de chapa es muy reducida frente a los esfuerzos de cortante, que pueden



producirse en el caso de rotura en riñones de una sección de túnel.

c) Bulones de anclaje mecánico.

Son bulones con cabeza metálica que por expansión aprietan contra el terreno de forma similar a los tacos de expansión colocados en viviendas. La ventaja fundamental de este tipo de bulones con anclaje en punta es que mediante el empleo de llave dinamométrica permite tensar los mismos, lo que es necesario en el caso del refuerzo del sostenimiento mediante bulones en túneles profundos con presión de confinamiento elevada para evitar la rotura de hastiales por estallido o bursting, este efecto debido a la rotura por pandeo del terreno comprimido en el entorno del perímetro del túnel, sobre todo de los hastiales, solamente se contrarresta aumentando la presión de confinamiento, una vez excavado el túnel mediante bulones o anclajes tesados.

d) Bulones autoperforantes.

Este tipo de bulón presenta las ventajas de que permite alcanzar longitudes muy superiores a la de los anclajes convencionales y puede atravesar cualquier tipo de material, incluso los muy fracturados, sin que haya problemas de pérdida de la perforación al realizarse la misma con la misma barra de anclaje. El sistema de perforación es por tanto mediante barra hueca con cabeza perdida, inyectándose por el interior del mismo mortero o lechada que además de extraer el detritus, cementa el espacio existente entre el agujero realizado y el diámetro exterior de la barra una vez que se ha alcanzado su profundidad.

### **Chapa Bernold**

Es una placa troquelada, de espesores de 2 ó 3 mm, que puede colocarse entre cerchas, con las siguientes funciones: ver figura 3 del anexo.

- Equivalen a una armadura de acero en el hormigón.
- Pueden servir de encofrado perdido para el gunitado por detrás de las mismas en el caso de un sostenimiento de túnel, o para el gunitado exterior



en la visera.

No es habitual actualmente la realización de túneles con empleo de chapa Bernold, salvo en dos situaciones:

- Viseras de emboquilles, en que es sistemática su colocación, y en las que la función principal de éstas es constituir el encofrado perdido del gunitado realizado por el exterior.
- En el caso de paso de zonas hundidas en que se han formado chimeneas, en que se realiza el siguiente proceso:
  - ❖ Realización de paraguas de la zona hundida.
  - ❖ Avance con cerchas pesadas espaciadas en torno a 0.50 m y con colocación de chapa Bernold por detrás de las mismas.
  - ❖ Una vez pasada la zona hundida, inyección de mortero por detrás de la cercha y chapa Bernold hasta rellenar la oquedad, o al menos realizar un tramo de arco de hormigón de 1 m de hormigón.

### **Hormigón Encofrado**

En muchos casos, una vez colocado el sostenimiento, en general en todo el desarrollo del túnel, se procede a la realización de un revestimiento de hormigón en masa, que tendría la función de constituir un nuevo elemento de soporte, que aumentará el coeficiente de seguridad del túnel una vez construido este.

El encofrado suele estar constituido por 3 módulos deslizantes, de forma que pueda retirarse y adelantarse el módulo en que anteriormente se hubiera realizado el hormigonado, poniéndole por delante del que en ese momento se está hormigonando, lo que permite que esta actividad constituya un proceso continuo sin interrupciones. Ver figura 4 del anexo. (Francisco J. 2010)

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

El estado actual del conocimiento en mecánica de rocas, así como la definición y obtención de parámetros y adopción de modelos que representen el



comportamiento real de los macizos rocosos, se encuentran en una fase de desarrollo inferior al de otras ramas de la ingeniería como pueden ser la Mecánica de Suelos, Hidráulica, Resistencia de Materiales, etcétera; bien por la menor antigüedad de la primera, o por una mayor complejidad frente a la simulación del problema real del macizo (López Jimeno, 1998). Como consecuencia de esto, resulta difícil establecer modelos analíticos del comportamiento del macizo rocoso que sean reflejo fiel de este, cuando se trata de resolver problemas de estabilidad o dimensionamiento de obras a cielo abierto o subterráneo. Antes esta dificultad, se abren dos caminos de estudio; por el primero se llega al planteamiento analítico con búsqueda de nuevos modelos que simulen mejor la realidad del terreno y su comportamiento frente a la excavación, que permitan un diseño adecuado de ésta; y por el segundo, el planteamiento es empírico llegando al diseño de una excavación estable basado en la experiencia de obras anteriores, ambas vías distan mucho hoy en día de la perfección y por lo general, es una aplicación de ambas lo que se utiliza en la actualidad.

La Geomecánica está dando a la construcción de obras subterráneas un creciente soporte científico y técnico que ha reflejado su máximo desarrollo en la última década, hasta el punto de que hoy en día, la mayoría de los túneles se hacen bajo supervisión de un experto en geotecnia. Siendo uno de los objetivos, caracterizar geomecánicamente los macizos, constituyendo esto el estudio integral del macizo en cuestión, que incluye tanto el modelo geológico, como el geomecánico, abarcando aspectos tales como, estructura del macizo, litología, contactos y distribución de litologías, geomorfología, cartografía geológica, estudio hidrogeológico, levantamiento de discontinuidades, técnicas geofísicas, sondeos, ensayos in situ, de laboratorio, clasificaciones geomecánicas, entre otros. Convirtiéndose la caracterización geomecánica de los macizos rocosos en una herramienta indispensable para pronosticar su comportamiento.

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 (Palmström, 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).

Al depender los túneles de múltiples variables geológicas de difícil cuantificación, los métodos empíricos, a los que pertenecen las clasificaciones geomecánicas, han sido de gran ayuda, desde el primer sistema de clasificaciones propuesto por TERZAGHI en 1946 (Moreno, 1998), convirtiéndose este en el primer aporte a las investigaciones geomecánicas.

El método basado en trabajos experimental, se empleó hasta la década de los años cincuenta, teniendo como objetivo facilitar el cálculo del sostenimiento con arcos metálicos de túneles de ferrocarril. TERZAGHI parte del criterio de la formación de una zona de roca destruida por el techo de la excavación, clasificando los terrenos en nueve tipos atendiendo esencialmente a las condiciones de fracturación en las rocas y a la cohesión o expansividad en los suelos. Él consideró la disposición de la estratificación respecto al eje del túnel, haciendo una previsión respecto a posibles desprendimientos. Esta metodología expuesta por TERZAGHI (González de Vallejo, 1998. Moreno, 1998) carece de un índice cuantitativo mediante el cual se pueda tener un criterio más acertado de la competencia de las rocas.

Por este período se publican los trabajos de T. HAGERMAN (1966). Que



diferencia cinco tipos de macizos según su estabilidad, para lo cual parte del grado de debilitamiento estructural que ellos presentan, desde macizos totalmente estables (macizos homogéneos e isotrópos) hasta macizos muy inestable, que presentan un gran número de superficies de debilitamiento. En esta propuesta solo se hace un análisis cualitativo de la situación del macizo rocoso, pero además no tiene en cuenta criterios importantes como por ejemplo la orientación de las principales superficies de debilitamiento.

En 1958, LAUFFER, propuso una nueva clasificación para túneles, que posee un carácter cualitativo. El autor da una clasificación del macizo rocoso y a partir de ella efectúa recomendaciones para la elección del sostenimiento, introduciendo el concepto del claro activo (tomado de Moreno, 1998). A nuestro criterio, el inconveniente que presenta, es la dificultad de determinar los parámetros que intervienen en la clasificación, si no se tienen abiertas excavaciones de distintas longitudes libres, durante sus tiempos de estabilidad.

Más tarde en 1963, DEERE, propuso un índice de la calidad de las rocas, basado en la recuperación de testigos en sondeos de diámetro mínimo 54 mm, denominado como el sistema Rock Quality Designation (RQD) - *Índice de Calidad de las Rocas* -. Este índice se ha usado en muchas partes y se ha comprobado que es muy útil en las Clasificaciones Geomecánicas de los Macizos Rocosos, formando parte de un sin número de ellas. El mismo se define como el porcentaje de la longitud del testigo recuperado en trozos mayores o iguales a 10 cm, respecto a la longitud del sondeo (tomado de Blanco, 1998. González de Vallejo, 1998. López Jimeno, 1998. Moreno, 1998, Palmström, 1998). Este criterio dado por DEERE tiene el inconveniente que el índice RQD, puede afectarse si no se realiza correctamente el sondeo del testigo, ya que este puede sufrir fracturas, que pueden confundirse con las de la roca. Cuando no se dispone de sondeos el RQD puede estimarse con el empleo de la expresión propuesta por Palmström en 1974,



teniendo como principal parámetro el número de grietas por metro cúbico para definir la calidad de las rocas (tomado de Moreno, 1998. Blanco, 1998. González de Vallejo, 1998. López Jimeno, 1998. Palmström, 1998).

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

BOLUCHOF en la década de los años 70, desarrolló un método para valorar la estabilidad dado por el índice - S -; este criterio es bastante completo incorporando parámetros como el coeficiente de fortaleza de las rocas, aunque le podría serlo aún más, si en vez de utilizar el parámetro  $n$ , que define el módulo de agrietamiento lineal del macizo, se empleara, el módulo volumétrico, ya que el parámetro  $n$  no se puede precisar el volumen del bloque (según Bolushof, 1982. Martínez, 2000). Durante esta misma década aparecen otras Clasificaciones Geomecánicas de Macizo Rocosos, como las de, FRANKLIN, (1970 y 1975) y LOUIS en 1974, que han tenido menos seguidores (Moreno, 1998. González de Vallejo, 1998. López Jimeno, 1998).

La sencillez de los métodos propuesto por BIENIAWKI (1973) y BARTON, LIEN Y LUNDE (1974), (tomado Blanco, 1998. González de Vallejo, 1998). López Jimeno,





1998. Moreno, 1998) contribuyeron definitivamente a su rápida aceptación y expansión. Palmström en 1995 y 1996 propone el índice RMI, a partir de la resistencia a la compresión simple de la roca matriz, del parámetro de diaclasado JP en función de las discontinuidades y tamaño del bloque. El índice permite caracterizar macizos rocosos y calcular los parámetros del sostenimientos en excavaciones subterráneas (tomado de Palmström, 1998).

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

Debe añadirse también el creciente desarrollo de los trabajos de reconocimiento de los macizos rocosos, aunque por el momento estas actividades no han alcanzado la generalización deseable en la mayoría de los países, es creciente el número de obras subterráneas que, por medio de secciones instrumentadas u otro tipo de estaciones de control, aportan datos objetivos para las calibraciones de los modelos, generalmente, semiempíricos, para la verificación práctica de los estudios teóricos y para la estimación del estado tensional.

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



En Cuba las Clasificaciones Geomecánicas de los Macizos Rocosos, tienen pocos seguidores. Han sido empleadas fundamentalmente por las empresas de proyecto y construcción de obras subterráneas del Ministerio de las Fuerzas Armadas Revolucionarias.

Durante la década de los 60 y 70, los criterios utilizados en el CAT – FAR para proyecto y ejecución de túneles se basan en la escuela Soviética, que se apoya en los trabajos del profesor Protodiakonov. Según esta teoría, la estabilidad se logra cuando la excavación tiene forma parabólica o cuando alcanza, por derrumbes, dicha forma. Durante esos años la observación y control de infinidad de casos reales (Acosta, 1996), donde se logra la estabilidad con secciones de formas absolutamente arbitrarias, puso en dudas el planteamiento de Protodiakonov.

A principios de la década de los 80 se pone en práctica la clasificación de Bieniawski, más tarde modificada por F. Torres. La modificación consistió en sustituir la resistencia a compresión de la roca de Bieniawski por su equivalente dado por el coeficiente de fortaleza de Protodiakonov. Por lo que a partir de este momento se comenzó a evaluar la estabilidad de las rocas según el criterio Bieniawski – Torres, en las investigaciones de los túneles del área CAT – FAR. De acuerdo a esta evaluación, se establecía el tiempo y el avance permisible sin revestir que admitía cada tramo de obra.

Al verificar en la práctica que la estabilidad no se afectaba con avances o tiempos sin revestir superiores a los pronosticados, se decidió realizar una minuciosa investigación para establecer criterios más exactos y que permitieran realmente valorar dicho comportamiento. Esta investigación fue realizada por Augusto A. Cañizares, del Departamento de Matemáticas aplicadas del CDCM (Acosta, 1996). La investigación fue realizada en túneles con luces de hasta 6,0 m y relación luz / puntal entre 0,8 y 2,0 aplicando varias metodologías conocidas de evaluación de estabilidad. De esta investigación se derivó que el criterio de Barton (1974), fue el que mejores resultados arrojó.



En la actualidad el uso de las clasificaciones geomecánicas tanto para trabajos subterráneos como a cielo abierto se ha incrementado en nuestro país. Se debe aclarar que las clasificaciones geomecánicas, si bien se puede considerar como una parte de la caracterización geomecánica del macizo rocoso de ningún modo pueden representar por sí solas a esta problemática. Ya que no incluyen en su análisis una variedad de parámetros que deben ser considerados para tener un pronóstico del comportamiento del macizo rocoso.

Las investigaciones encaminadas a la caracterización geomecánica de los macizos rocosos, en nuestro país, no han alcanzado un desarrollo importante, utilizándose muy poco en el análisis del comportamiento de los macizos rocosos. Han sido empleados principalmente para el estudio del macizo en obras con fines hidráulicos y protectoras, en menor cuantía, le siguen el estudio en laderas, taludes, en obras civiles (viaductos, embalses, presas, etcétera) y por último (casi nulo) canteras y minas subterráneas, aunque se debe señalar que en los últimos diez años, se ha manifestado un cierto interés, por estas materias; destacándose los esfuerzos realizados, por el grupo de construcción subterránea del ISMMM, apoyándose en los cursantes de las Maestrías de Geomecánica y Construcción Subterránea, que desarrollaron varias tesis en esta línea de investigación, que constituyen importantes documentos científico – técnicos, en la realización de este trabajo.

El Centro de investigaciones y proyectos Hidráulicos y la Constructora Militar No.2, ambas de Holguín, desarrollaron un importante trabajo ingeniero geológico y geomecánico, en el macizo del Trasvase Este – Oeste, con el auxilio de medios y métodos novedosos, como son el procesamiento de imagen por teledetección, la geofísica, y el empleo de las clasificaciones geomecánicas de Bieniawski, modificada por Federico Torres (1989), Barton y Deere, estas investigaciones constituyen una base importante para la caracterización geomecánica del macizo



de esa obra. (tomado de Colectivo, 1991. Colectivo, 1992 a. Hidalgo, 1991 a, b. Pérez, 1991 a, b, c).

En el trabajo aplicación de nuevas técnicas en el estudio ingeniero geológico de los macizos rocosos del ing. J. M. Alfaro, (2000) se realiza un análisis de los trabajos de campo más importantes, utilizados en la evaluación de macizos rocosos a partir de la utilización de métodos de campo no tradicionales utilizados en nuestro país. En el mismo se hace un análisis y evaluación del agrietamiento del macizo rocoso de varios túneles en las provincias Granma y Santiago de Cuba. Como base fundamental para la evaluación de la estabilidad del macizo se emplearon las clasificaciones de Barton, Bieniawski y el SMR de Romana, este último para la evaluación de taludes. En el estudio se determinan las propiedades físico – mecánicas de las rocas, se hace la evaluación del agrietamiento del macizo y análisis cinemático de los bloques, y la medición de las deformaciones en el interior de las excavaciones. Esta investigación es sin dudas un paso importante para efectuar la caracterización geomecánica de los macizos rocosos, pero en nuestra opinión no se logra caracterizar geomecánicamente los mismos. Otros esfuerzos en esta temática, lo constituye la investigación realizada por el Ing. J. L. Peñates, (2000) titulada: caracterización geomecánica de Macizo del Escambray, donde el peso de la investigación lo tienen los criterios geológicos, clasificando las rocas por su génesis, para la determinación de las propiedades físico – mecánicas, como únicos criterios para la caracterización geomecánica del macizo. Esto a nuestro juicio, más bien es una investigación ingeniero geológica, que constituye la base fundamental de la caracterización geomecánica, a la cual no se llega en el trabajo.

El estudio geomecánico de los macizos rocosos mediante la aplicación de la proyección estereográfica, (Corpas. 2000), constituye un texto de consulta, para la aplicación consecuente de estos métodos en el estudio geomecánico de los



macizos rocosos agrietados.

En nuestro país actualmente la mayoría de las investigaciones geomecánicas tratan como principales aspectos, las condiciones ingeniero geológicas del macizo rocoso y la evaluación de la estabilidad de estos, teniendo en cuenta las Clasificaciones Geomecánicas. En la presente investigación se consideran esos aspectos, pero además se introduce un nuevo enfoque, hasta ahora no tratado en la literatura consultada, que radica en la estimación del modelo geomecánico más representativo de los macizos rocosos a partir de su estudio diferenciado, de acuerdo a su comportamiento mecánico y estructural.

#### **I.4 Situación actual de la temática en Cuba**

Las investigaciones encaminadas a la caracterización geomecánica de los macizos rocosos, en nuestro país, no han alcanzado un desarrollo importante, utilizándose de manera insuficiente el análisis del comportamiento de los macizos rocosos. Estas investigaciones han sido empleadas principalmente para el estudio del macizo en obras con fines hidrotécnicos y protectoras, en menor cuantía, le siguen el estudio en laderas, taludes, en obras civiles (viaductos, embalses, presas, etcétera) y por último canteras y minas subterráneas, aunque se debe señalar que en los últimos diez años, se ha manifestado un cierto interés, por estas materias; destacándose los esfuerzos realizados, por el grupo de construcción subterránea del ISMMM, apoyándose en los cursantes de las Maestrías de Geomecánica y Construcción Subterránea, que desarrollaron varias tesis en esta línea de investigación, que constituyen importantes documentos científico – técnicos, en la realización de este trabajo, tales como son:

Se realiza una caracterización geomecánica de los macizos rocosos de la Mina Merceditas, así como la evaluación de estabilidad de la excavación, por diferentes clasificaciones geomecánicas y se proponen los modelos



geomecánicos que responden al comportamiento de cada macizo así como los modelos de interacción macizo-fortificación. (Cartaya, 1996).

(Mondejar, 1996). hace un estudio de la acción de la presión minera en las minas de cromo, en este caso el autor no propone métodos de sostenimiento para la estabilidad de estas excavaciones.

Se realiza una caracterización ingeniero-geológica de la región de estudio, la cual abarca la información general y las características de cada zona y las obras que en ellas se encuentran, se dan las propiedades físico-mecánica de las rocas y se hace un análisis detallado del agrietamiento, estableciéndose una clasificación del macizo rocoso, para determinar los principales parámetros de cálculo y la caracterización del agrietamiento, para en función de estos con la utilización de las clasificaciones geomecánicas, evaluar la estabilidad de las excavaciones, a parte del conocimiento del comportamiento del macizo se proponen metodologías de cálculos de la presión minera. El autor no hace referencia a los métodos de fortificación de estas excavaciones. (Fernández, 1999).

A parte de esas investigaciones podemos encontrar otras más recientes tales como caracterización geomecánica del macizo rocos en obras subterráneas de la región oriental del país, esta se enfoca más en la realización del estudio ingeniero-geológico del macizo rocoso, en determinar los parámetros geomecánicos de los macizos estudiados, en proponer los modelos geomecánicos más representativos de los macizos rocosos de las obras estudiadas, en proponer criterios geomecánicos estructurales que permitan un mejor diseño de excavaciones y obras subterráneas, pero no hace referencia en ningún momento a la forma de fortificación de estas excavaciones. (Cartaya, 2001).

(Noa, 2003). Este trabajo está relacionado con el proceso de construcción de las



excavaciones subterráneas horizontales, en el mismo se realiza una caracterización ingeniero - geológica de varios macizos de la región Oriental de Cuba. El autor realiza una caracterización ingenieril de las rocas, lo que permite hacer una evaluación del agrietamiento, el grado de deterioro y el tamaño de los bloques, utilizando en este último, varios métodos, determinando cuál es el que más se adecua a cada macizo estudiado, teniendo en cuenta los resultados obtenidos y las características geo-estructurales de estos. También se realiza la evaluación de las condiciones de estabilidad de los macizos rocosos donde se ubican las excavaciones objeto de estudio, utilizando cuatro de las metodologías de clasificación geomecánica existentes: la clasificación de Deere, la clasificación de Bulichev, la clasificación de Bieniawski y la clasificación de Barton. Por último se realiza la propuesta de un sistema de indicaciones metodológicas, que posibilitan con su empleo lograr una correcta fundamentación de la elección del método de arranque de la roca a emplear, durante el laboreo de excavaciones subterráneas. Pero no realiza un estudio de empleo de método de fortificación.

La siguiente investigación propone analizar el macizo rocoso donde se laborea el túnel 2 del trasvase Sabanalamar-Pozo Azul, es decir, estudiarlo para conocer las características físico- mecánicas de las rocas y realizar la evaluación geomecánica del macizo rocoso para cada tramo de túnel y así determinar las características del sostenimiento que será utilizado. Pero en diferentes condiciones geológicas. (Cosella, 2009).

Esta investigación se ha realizado con el objetivo de diseñar un sostenimiento de la Cámara de Acceso a la PCHE correspondiente al Trasvase Este-Oeste, a partir de la caracterización geomecánica del macizo rocoso. Se ha realizado con el objetivo fundamental de lograr el sostenimiento de dicha Cámara, a fin de construir la Cámara con la calidad requerida, y lograr la estabilidad necesaria para continuar con los trabajos futuros



y finalmente trasvasar el agua. Pero en diferentes litologías y condiciones ingeniero-geológicas. (Hernández, 2009).

Este trabajo se realiza una evaluación de las condiciones ingeniero-geológicas y minero-tecnológicas de laboreo de las excavaciones subterráneas en el túnel donde se realizaron las investigaciones y la determinación de las propiedades másicas, y las características de resistencia de las rocas en los macizos que se investigan. Se realiza el diseño, y la planificación de los pasaportes de perforación y voladura para utilizarse según las litologías de la excavación. Además es vasado en un análisis geomecánico de la obra de estudio. (Fajardo Granda, 2009).

Se caracterizar los factores que influyen en los procesos de infiltración y filtración de agua por los macizos rocosos fuertes poco porosos y agrietados, y hacia el interior de las excavaciones subterráneas, se hace una caracterización los factores que influyen en el proceso de control del agua que afecta las excavaciones subterráneas y se realiza un estudio las principales técnicas utilizadas para controlar el agua que afecta una excavación subterránea. Pero no se realiza un estudio de fortificación y estabilidad en este tipo de excavaciones con gran afluencia de agua. (Cuesta, 2010).





## *CAPÍTULO II. Características generales de la región*

### **II.1 Introducción**

En la presente investigación correspondiente al túnel Levisa-Mayarí, el cual ha sido dividido en 6 tramos dada su longitud aproximada de 17,0 Km. correspondiendo este en específico, al Tramo IV con una longitud de 2715.24 m. El proyecto se ejecuta a partir de la solicitud realizada por la inversión de diseñar un túnel a partir del trazado ajustado con el objetivo de permitir la conducción del gasto mínimo de  $30.0 \text{ m}^3/\text{s}$  desde la presa Levisa hasta la presa Mayarí, en unión con los tramos que le anteceden (sin proyectar), el tramo I (construido), el tramo II y tramo III (en construcción). Para el diseño y proyección 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 y cota de fondo del túnel a la salida de 65.00. El túnel tramo IV inicia en el estacionado  $3+020.79=0+000$  Cala No 8 (fin del Tramo III B) con cota de fondo 65.43. 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, Las Tunas y Camagüey.

El túnel Levisa-Mayarí Tramo IV está compuesto por túnel de conexión III que sirve de acceso al túnel propiamente dicho y se utilizará como otro frente de trabajo el túnel de conexión II ( tramo IIIB), ya en ejecución. Trasvasará un caudal mínimo de  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  (gasto forzado) con una pendiente constructiva para el drenaje en el interior del túnel 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, etc. (Proyecto Técnico-Ejecutivo).

## II.2 Ubicación Geográfica

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 km<sup>2</sup>. El Tramo IV del túnel se encuentra en una zona intrincada con difíciles accesos, formado por un relieve montañoso, en el trazado las alturas van desde cota 100.00 hasta 236.00, todo el trazado puede verse en la hoja cartográfica a escala 1:50 000 de Mayarí 5077-I como ya se mencionó con anterioridad. Como se muestra en la figura 1.

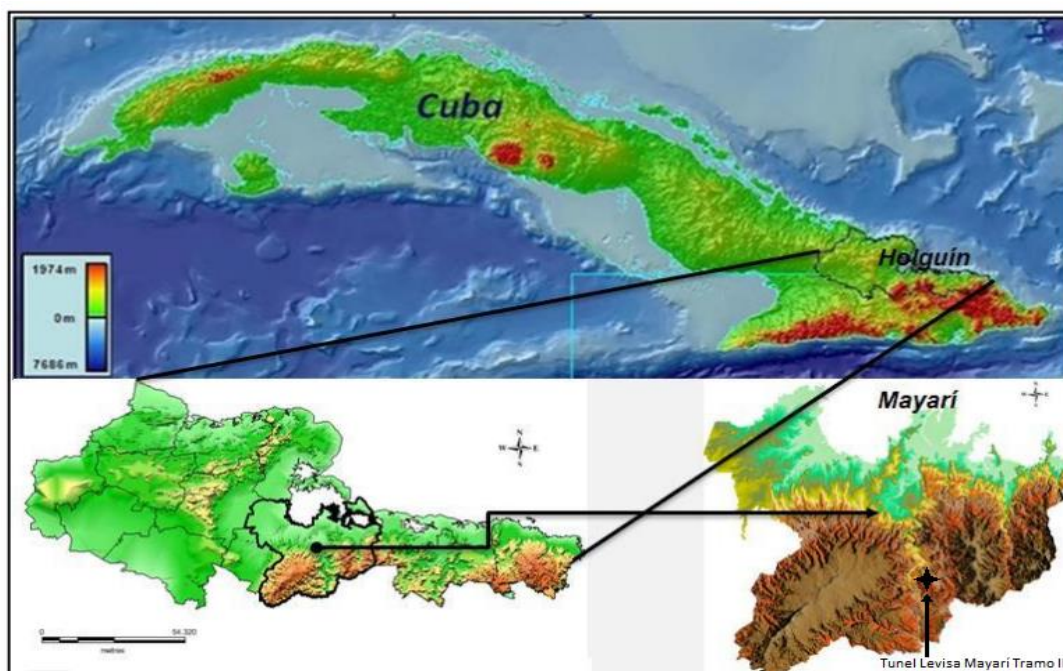
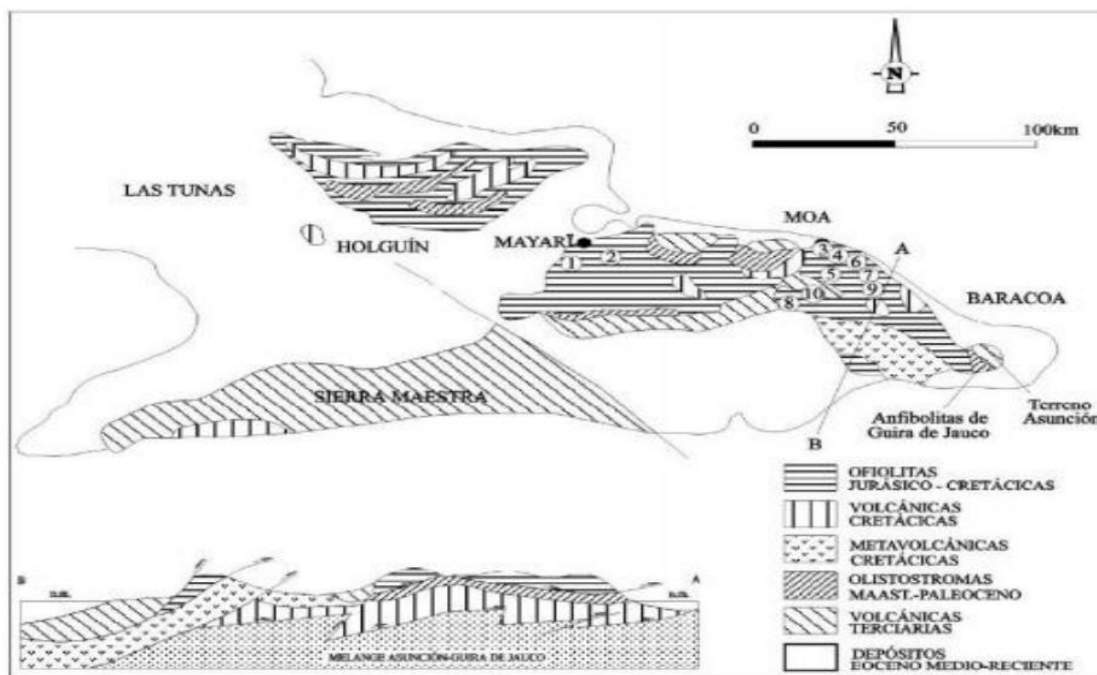


Figura 1 Ubicación geográfica del municipio de Mayarí

## II.3 Geología regional y local

El municipio Mayarí se encuentra ubicado en el complejo ofiolítico Mayarí-Baracoa, el cual se localiza en el extremo oriental de la Isla de Cuba. En este macizo se pueden distinguir diferentes mantos de cabalgamiento, en los que se

aprecian espejos de fricción y escamas tectónicas de diferentes espesores. En los estudios realizados por Proenza (1998) en la región, este divide las fajas ofiolíticas en dos grandes macizos: 1) El macizo Moa-Baracoa y 2) El Macizo Mayarí-Cristal. Como muestra la figura a continuación.



**Figura 2 Ubicación de la faja ofiolítica Mayarí-Baracoa**

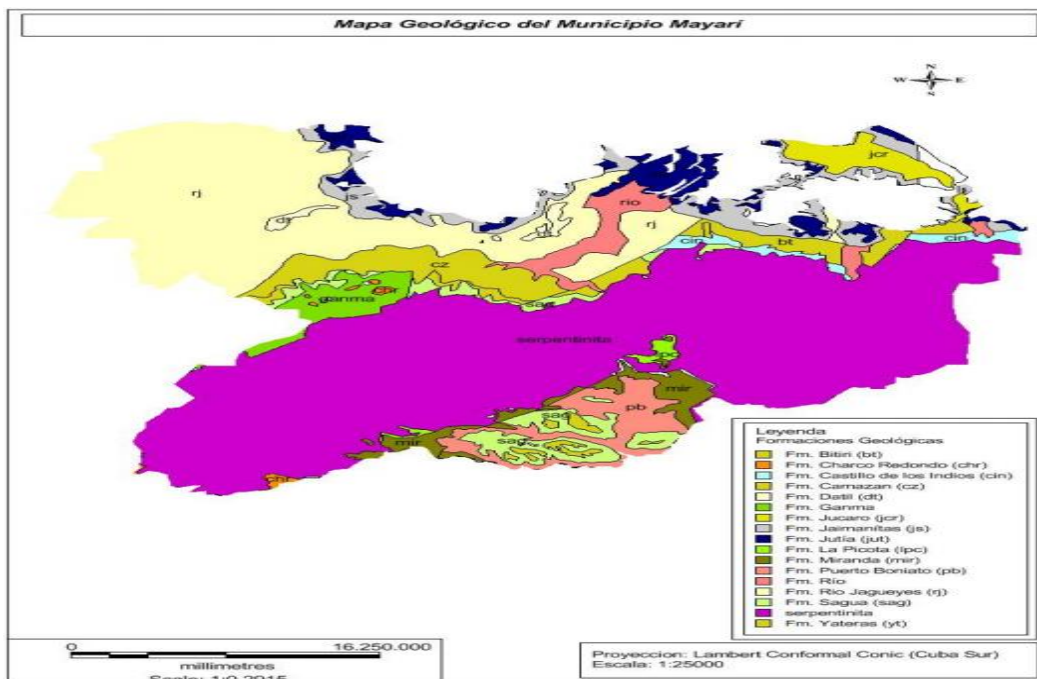
Según (Iturralde-Vinent, 1996). Los números indican la ubicación de las principales áreas de distribución de los depósitos lateríticos de níquel y cobalto: 1 Pinares de Mayarí, 2- Nicaro, 3- Moa, 4- Punta Gorda-Yagrumaje, 5- Las Camariocas, 6-Cantarrana-La Delta, 7- Santa Teresita, 8- La Fangosa, 9- Iberias y 10- Piloto.

Desde el punto de vista geológico el área de estudio se encuentra en la parte central del macizo ultramáfico Sierra de Nipe-Sierra Cristal, constituyendo desde el punto de vista de la tectónica un bloque hundido de tipo graben (intramontañoso). Esta subdivisión en bloque según algunos autores, empezó en la fase orogénica Larámica, contemporáneamente con la formación de napes de ultramafitas

(Arango et al, 1988). En el área se distinguen bien diferenciadas rocas carbonatadas y terrígenas carbonatadas sobreyaciendo a las ultramafitas serpentinizadas del complejo intrusivo del Cretácico Superior.

Estas rocas presentan diferentes grados de alteración y ha dado origen a varios tipos de harzburgitas y en menor grado Dunitas y Piroxenitas. Esto se debió al intenso tectonismo sufrido por la región durante el Cretácico y el Paleógeno y hoy se muestran intensamente agrietadas y fracturadas en bloques de diversas dimensiones que van desde algunos m<sup>2</sup> hasta km<sup>2</sup>. El macizo también es atravesado por diques de rocas básicas predominantemente Gabros y Diabasas (Arango et al., 1988).

En Mayarí la geología se describe según el mapa geológico 1:25000 tomado del Instituto de Geología y Paleontología (I.G.P.) 2001. Mostrado a continuación en la figura 3.



**Figura 3 Mapa Geológico de Mayarí. Escala: 1:25000**



Rocas Serpentinizadas del Complejo Ofiolítico: Constituidas por harzburgitas y peridotitas. Se han datado con una edad de Jurásico-Cretácico Temprano (Iturralde-Vinent, 1996). Se considera que estas rocas serpentinizadas poseen un espesor superior a los 1000 metros, se presentan en forma de escamas tectónicas muy fracturadas (Fonseca et al., 1985).

Formación Río Macío (Holoceno): Está integrada por depósitos en valles aluviales de composición y granulometría heterogénea. Los cuales están formados por sedimentos arenosos, areno-arcillosos y conglomerados, estos últimos los conforman fragmentos de rocas ultramáficas serpentinizadas (peridotitas y harzburgitas). Mineralógicamente se pueden describir por la presencia de óxido e hidróxido de hierro y aluminio. Los minerales de hierro son hematita, goethita, magnetita, y de aluminio principalmente gibbsita. Las arcillas están representadas por montmorillonita. En la parte superior del perfil aparecen materiales orgánicos.

Formación Bitirí (P3-N1 (1)): Calizas algáceas, duras, carsificadas, que contienen ocasionalmente fragmentos de corales.

Formación Camazán (P3-N1 (1)): Calizas biodetríticas, calcarenitas, calciruditas, limolitas con intercalaciones de margas y arcillas.

Formación Río Jagüeyes (N1 (1)-N1 (2)): Limolitas, areniscas, gravelitas, margas, calizas, calcarenitas y arcilla.

Formación Castillo de los Indios (Eoceno Inferior-Medio): Margas con intercalaciones de calizas arcillosas, areniscas polimícticas, con glomerados polimícticos, limolitas y tobas.

Formación Charco Redondo (P2 (2)): Calizas compactas órgano-detríticas, fosilíferas, de color variable.

Formación Dátil (N2-Q1): Conglomerados polimícticos masivos, poco rodados y seleccionados.



Formación Júcaro (N1 (3)-N2): Calizas arcillosas, calcarenitas, margas, limolitas, arcillas yesíferas y dolomitas.

Formación La Picota (K2): Conglomerados polimícticos con intercalaciones de areniscas y conglobrechas mal seleccionadas que se intercalan con argilitas.

Formación Puerto Boniato (P2 (2)): Alternancia de calizas y margas, con intercalaciones de sílice.

Gabros del Complejo Ofiolítico: Los cuerpos de gabros forman grandes bloques y diques incluidos en el macizo ofiolítico, cuyos contactos con los otros tipos litológicos son generalmente tectónicos, las dimensiones de los cuerpos de gabros varían de uno a tres kilómetros de ancho y de 10 a 15 kilómetros de longitud. Se estima que presentan un espesor medio de 500 metros (Fonseca et al., 1985).

Formación Miranda (P1 (1)-P2): Tobas con intercalaciones de tufitas, areniscas tobáceas, calizas, conglomerados, limolitas, margas, gravelitas y conglomerados vulcanomícticos.

Formación Sagua (P2 (2)-P2 (3)): Margas con intercalaciones de calizas arcillosas, areniscas polimícticas, conglomerados polimícticos, limolitas y tobas.

Formación Yateras (P3-N1 (1)): Alternancia de calizas biodetríticas y detríticas, y calizas biógenas de grano fino a grueso, estratificación fina a gruesa o masivas, duras, de porosidad variable, a veces aporcelanadas que frecuentemente contienen grandes *Lepidocyclinas*. Coloración por lo general blanca, crema o rosácea, y con menos frecuencia carmelitas.

Formación Jaimanitas (Q3-4): Calizas biodetríticas masivas, generalmente carsificadas, muy fosilíferas conteniendo principalmente conchas bien preservadas y corales de especies actuales y ocasionalmente biohermos. Las bolsas cársicas se encuentran rellenas por una fina mezcla carbonato- arcillosa ferruginosa de color rojo ladrillo. Pasan a calcarenitas masivas o finamente estratificadas y a





veces contienen intercalaciones de margas. La cementación es variable. La coloración predominante es blancuzca o amarillenta.

Formación Jutía (Q4): Depósitos de pantanos, de mangles, limos, limos arenosos.

Se sabe que los deslizamientos están relacionados con las laderas y taludes de una estructura geológica determinada. En la mayoría de los casos, los deslizamientos están propagados en laderas compuestas por suelos arcillosos donde en el grueso de las rocas que los constituyen, se encuentran capas, intercalaciones, zonas de suelos arcillosos, aditivos arcillosos u otras rocas que forman las superficies de discontinuidad y zonas de debilitamiento; por último, en lugares de las laderas donde hay acumulaciones considerables de facies eluviales, diluviales y proluviales arcillosas. El análisis de las condiciones de formación de deslizamientos en los suelos rocosos enseña que en estos casos el relleno arcilloso en las grietas y los aditivos arcillosos en las superficies de las grietas facilitan de modo considerable la alteración del equilibrio de las masas de rocas. La formación de deslizamientos resulta más favorable en tramos donde en la estructura geológica de las laderas o taludes hay superficies potenciales de resbalamiento, orientadas de modo desfavorable, es decir, que su pendiente está dirigida en el sentido de las pendientes de las laderas.

## **II.4 Clima, Vegetación, Orografía e Hidrografía**

### **➤ Clima**

El clima de la región es tropical húmedo, distinguiéndose de acuerdo a la distribución de las precipitaciones dos períodos: seco y húmedo; el primero se extiende de noviembre-abril y el segundo de mayo-octubre, lo que se correlaciona con la distribución interanual del escurrimiento. 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 en la parte norte es de 26°C y más.

En el clima el factor que más influye en la ejecución de las obras propuestas son



las precipitaciones, estas son responsables del escurrimiento de los principales ríos y arroyos de la zona de estudio, además son las principales fuentes de recarga de las aguas subterráneas.

La precipitación anual oscila entre valores de 1600 a 1900 mm en la porción centro y sur, en la norte de 1200 y 1400mm. La evaporación media anual es de 400 a 1700 mm. El escurrimiento superficial en la parte central y sur es de 15 a 30 l/s/Km. y al norte de 5 a 20 l/s/km.

#### ➤ *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.

En la parte norte, es predominante, el patabán y yana. En las costas bajas cambia a saladares y prados de saladares. En la parte central hay predominio de bosques aciculifolios con vegetación arbórea, arbustiva renovada en los talados con pinos (pinos cubensis) y bosques planifolios predominando con mayor frecuencia en los desfiladeros. En la parte sur existen bosques planifolios con vegetación arbórea y arbustiva renovada en los talados y ocasionalmente con cambios rápidos en los sectores con predominio de especies perennifolios en las montañas.

#### ➤ *Orografía*

La Orografía de esta región está caracterizada por su diversidad y complejidad, existiendo llanuras fluviales, pero sobre todo con el predominio de un relieve montañoso constituido casi en su totalidad por el sistema orográfico o grupo montañoso Nipe-Cristal-Baracoa.

En todo el borde norte predominan las zonas llanas y onduladas con algunas elevaciones aisladas y colinas de cimas redondeadas. Además cerca del litoral aparecen llanuras acumulativas y palustres. Las cotas van desde 0 hasta 100 m, las pendientes entre 0° a 10°, la disección vertical de 0 a 70 m, disección





horizontal de 0 a 60 m/ha y la disección total de 0 a 110 m/ha.

También hay predominio de zonas llanas en los valles de los principales ríos, las que se solapan con la llanura litoral norte, siendo las llanuras aluviales más extensas las de las cuencas de los ríos Sagua y Mayarí, siguiendo una pequeña llanura aluvial en el río Levisa y menores aún en los ríos Cabónico y Grande. En ellas se presentan zonas de inundación actual y terrazas elevadas con meandros y cauces abandonados levantados lo que demuestra una dinámica neotectónica de levantamiento. Las cotas en estas llanuras aluviales oscilan entre 50 y 150 m, las pendientes entre 0° y 15°, la disección vertical de 0 a 90 m, disección horizontal de 20 a más de 380 m/ha y la disección total de 0 a 150 m/ha.

Hacia la parte sur el relieve es completamente montañoso, va desde una zona premontañosa (100 a 250 m) hasta elevaciones con más de 250 m y hasta 1200 m en el Pico Cristal. Las pendientes en esta parte van desde 0° a 70°, la disección vertical de 0 a 200 m, disección horizontal de 0 a más de 120 m/ha y la disección total de 0 a 460 m/ha. Esta zona montañoso se caracteriza por tener forma de colinas medias a altas con cimas redondeadas en las elevaciones premontañosas, mesetas carbonatadas bajas, mesetas lateríticas altas (Pinares de Mayarí al este y elevaciones al sur de Levisa donde sólo quedan restos de estas estructuras), así como cuchillas y picos en la zona del Pico Cristal y sus inmediaciones).

#### ➤ *Hidrografía*

La red Hidrográfica, características del relieve y el régimen de las precipitaciones han favorecido en la formación de una densa red que corre generalmente de sur a norte. Dentro de las principales corrientes fluviales se destacan los ríos Mayarí y Levisa, así como los arroyos La Ceiba, Arroyo Blanco y Cajimaya.

La red hidrográfica que predomina es dendrítica, el nivel de los ríos cambia en dependencia de las precipitaciones. Los niveles más bajos se observan en el período de seca, noviembre-abril y los más elevados en el período de lluvias,



mayo-septiembre.

## **II.5 Población, Redes de Comunicaciones y Energía**

### **➤ Población**

Los poblados más importantes en la región son: la ciudad de Mayarí, Levisa, Guaro, Cayo Mambí (Frank País), Sagua de Tánamo, Cueto, apareciendo también algunos caseríos diseminados como Pinares de Mayarí, Arroyo Seco, La Pedrona, Colorado, El Cocal entre otros.

### **➤ Redes de Comunicaciones**

En sentido general el sistema de comunicaciones se encuentra desarrollado fundamentalmente hacia el norte de la región, existiendo dos vías de comunicación, terrestres y marítimas. Dentro de las terrestres se encuentran vías de orden principal, como la carretera pavimentada que enlaza Cueto con Mayarí, Mayarí con Sagua, Sagua con Frank País y Sagua con Las Calabazas. Entre las vías de orden secundario se encuentran terraplenes, trillos y senderos que unen a los diferentes poblados y obras de menor importancia. Las comunicaciones marítimas se realizan por los puertos de Nicaro y Felton, utilizado el primero fundamentalmente para la exportación de minerales, recepción de equipos y materiales para la fábrica de níquel ubicada en el área. También las redes de Comunicaciones pertenece al MICOM, así como la distribución de la prensa, la actividad de teléfonos es realizada por ETECSA y Radio Cuba atiende las repetidoras de radio y TV.

### **➤ Energía**

Para la generación de electricidad se cuenta con la Termoeléctrica 'Lidio Ramón Pérez', una planta eléctrica en la Empresa del Níquel "Comandante René Ramos Latour", así como grupos electrógenos entre los que se encuentra ubicados en diferentes centros priorizados para garantizar los servicios vitales que se prestan.

## **II.6 Características socioeconómicas de la región y Geomorfología regional**



➤ *Características socioeconómicas de la región*

El municipio cuenta con 108 534 habitantes y una densidad poblacional de 80.1 habitantes por km<sup>2</sup>; el 62.7% de la población es urbana. La cabecera municipal es la ciudad de Mayarí con alrededor de 60 000 habitantes. Existen además, 134 lugares habitados, otros centros urbanos importantes son: Levisa, Nicaro, Guatemala, Guaro, Felton, Cosme y Caridad.

Mayarí ocupa el segundo lugar en la provincia en habitantes y el primero en extensión territorial. Además es el tercero del país en población entre los municipios que no son cabeceras de provincias, solo superado por Contramaestre y Cárdenas. Su población representa el 10,2% del total la provincia, se sitúa en el lugar 26 en cuanto a población y fondo habitacional del país y sólo en su tipo es superado por los municipios Palma Soriano y Manzanillo y en extensión territorial es el 8vo de Cuba.

El municipio Mayarí presenta un notable desarrollo Industrial. En su territorio se encuentran la Central termoeléctrica "Lidio Ramón Pérez", puesta en marcha en la década de los 90 del siglo XX, que es la de mayor capacidad de generación de Cuba (560 Mega Watts); además la Fábrica de plástico Cajimaya y otras. La actividad económica fundamental se sustenta en la generación de electricidad, plásticos y accesorios, agricultura no cañera, la ganadería vacuna, la actividad extractiva y forestal, la silvícola, la cafetalera, el comercio, la gastronomía y los servicios, la construcción, la producción alimentaria, las investigaciones, el transporte, así como la actividad de la salud, la cultura, el deporte, la educación y la actividad de los servicios comunales y personales entre otros. En los estudios de PVR por deslizamientos del terreno las características socio económicas del municipio son muy importantes al evaluar los riesgos. Teniendo en cuenta que la principales actividades económicas de la región como pueden ser la actividad minera, la agricultura,



construcción de obras hidráulicas entre otras pueden generar una alteración en el medio natural lo que puede generar zonas de susceptibilidad.

➤ *Geomorfología regional*

La geomorfología del municipio Mayarí está compuesta por dos macizos montañosos, Sierra de Nipe y Sierra Cristal. Su relieve ha sido condicionado tectónicamente, donde se refleja las particularidades de la compleja estructura geológica obtenida como resultado de los movimientos compresivos de la Orogenia cubana y las adquiridas en la etapa neotectónica. En la Sierra Cristal se encuentra la mayor elevación del territorio, la Mensura, con 995 metros sobre el nivel del mar. Se encuentran diferentes categorías geomorfológicas determinadas por las diversas amplitudes de los movimientos neotectónicos como son las montañas, las alturas y las llanuras. Las montañas son el resultado de ascensos neotectónicos moderados e intensos (CISAT, 2007).

En la zona de estudio van a encontrarse los siguientes escalones morfoestructurales:

**Montaña pequeña, de horst-bloque, aplanada, diseccionada**, masiva, con una altura de 500a 995m.s.n.m. Sierra de Nipe. En ella se encuentran varias superficies de nivelación de génesis denudo-acumulativa de edad Mioceno-Plioceno al que está asociado el yacimiento Mina Pinares.

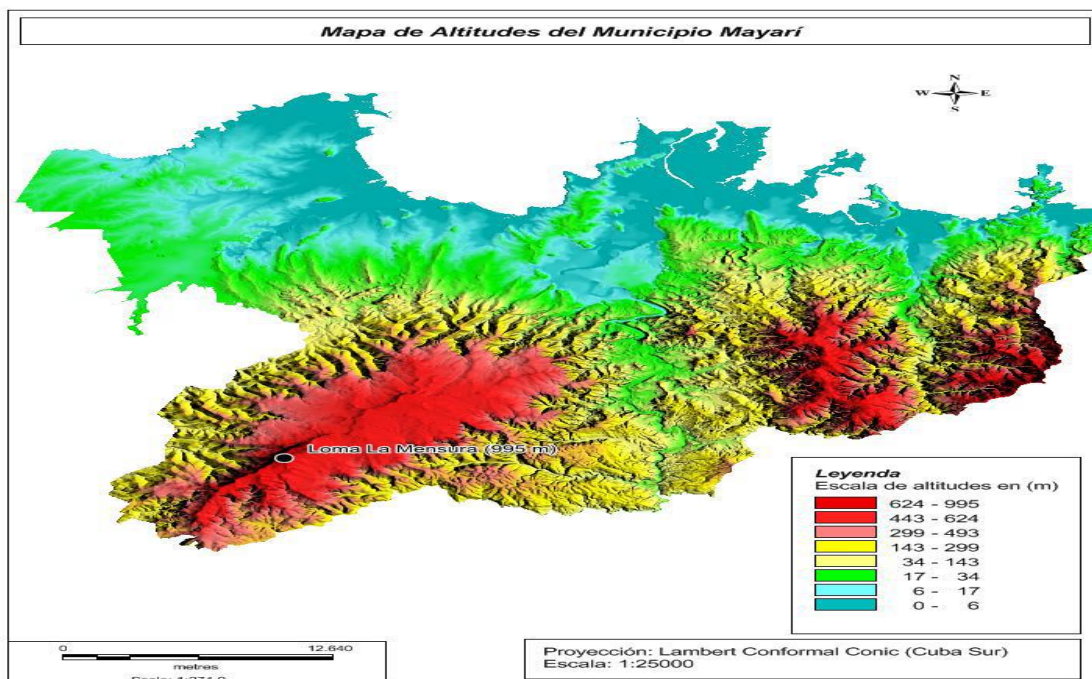
**Montañas bajas, aplanadas, diseccionadas**, con una altura de 500a 750 m.s.n.m., donde se encuentra una superficie de nivelación de génesis denudo-acumulativa de edad Cuaternaria, al que está asociado el yacimiento Mina Ocuja - La Ramona.

**Premontañas, aplanadas, ligeramente diseccionadas**, con una altura de 300a 400 m.s.n.m. A ellas está asociada la altura media, que es de 307m.s.n.m.

**Premontañas y submontañas de bloque en plegamientos**, diseccionados,



con una altura de 200a 300m.s.n.m. Alturas que ocupan pequeñas áreas asociadas a los sistemas montañosos, son el resultado de ascensos neotectónicos débiles y moderados con una altitud de hasta 300 m.s.n.m. En el área constituyen las alturas de Mayarí, varias alturas ubicadas a lo largo de la cuenca del Río Mayarí como son: Seboruco, con 106 m.s.n.m., Sabaneta, con 106 m.s.n.m., Colorado, con 100m.s.n.m., etc. Las llanuras ocupan gran parte del territorio y corresponden a las zonas de descenso relativo o de ascensos neotectónicos más débiles, cuyas amplitudes son inferiores a los 100m. El relieve constituye una condición importantísima que favorece la formación de deslizamientos. De clara evidencia sirven su propagación geográfica y la ubicación geomorfológica. Las observaciones revelan que con mayor frecuencia los deslizamientos están propagados en regiones montañosas, en tramos con relieve bruscamente accidentado, en las laderas escarpadas de los valles fluviales, en los taludes de desmontes y canteras. En general, el relieve del terreno y la situación orográfica de la región crean reservas de la energía potencial, la cual condiciona el desarrollo de los fenómenos de deslizamientos. Como se ilustra en la figura 4.



**Figura 4 Mapa de altitudes del municipio Mayarí**

## II.7 Características hidrogeológicas

La zona de estudio en sentido general, es pobre en aguas subterráneas, debido a la poca permeabilidad de las rocas. Las aguas que predominan son de fisuras y grietas, dependiendo la permeabilidad del grado de alteración y agrietamiento del macizo, predominando las rocas muy agrietadas.

En la zona ocurren abundantes precipitaciones por lo que los ríos corren permanentemente, aún en época de sequía. Los horizontes acuíferos de la región son de tres tipos fundamentales: 1) Aguas intersticiales de los depósitos friables aluviales areno-arcillosos (Ríos Mayarí y Levisa), 2) Aguas fisúrales o de grietas, al cual pertenecen los relacionados con las formaciones rocosas (ofiolitas), 3) Las aguas estrato-fisúrales de rocas areno-carbonatadas, calizas, margas y areniscas de edad paleogénica, relacionadas con las Formaciones Mucaral, Bitirí y Río Jagüeyes.

Para evaluar las aguas subterráneas se creó el mapa de hidroisohipsas, como se muestra en figura 2.5, utilizando el mapa de polibasitas de III orden que es el que más se correlaciona con la red de drenaje permanente obtenido con la red de drenaje 1:10 000.

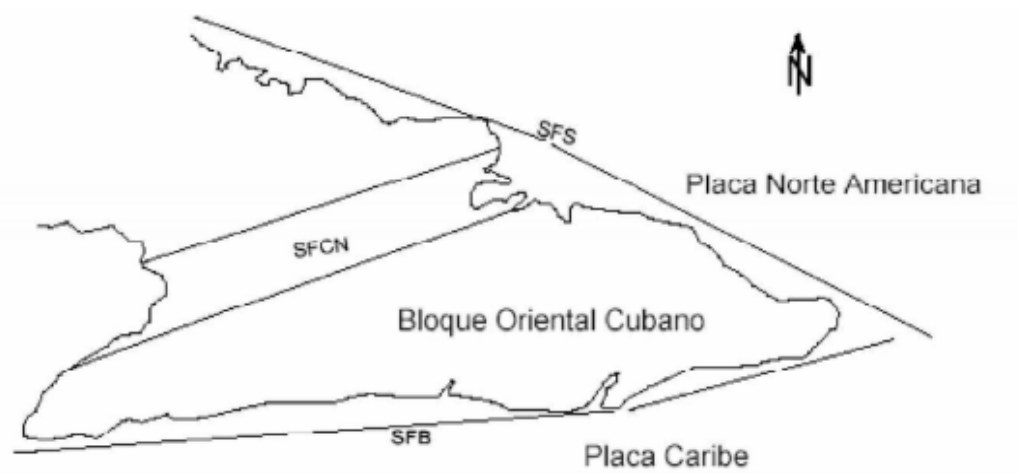
El manto freático se encuentra generalmente por encima del túnel y las aguas subterráneas como tendencia fluyen en dirección oeste hacia el río Mayarí. En el Perfil Ingeniero-Geológico pronóstico se representó el nivel freático obtenido del modelo de infiltración pudiéndose observar que en el perfil de este tramo existen varios puntos donde es posible que se alimente el manto cuando llueve.

## **II.8 Tectónica Regional**

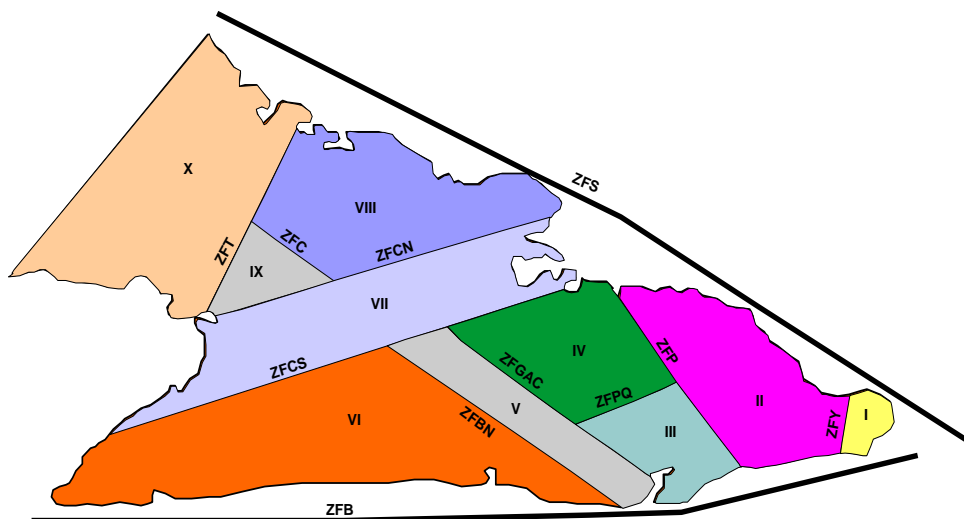
La tectónica en la zona está representada por las siguientes fallas:

- Sistema de fallas Cauto-Nipe al oeste-noroeste.
- Falla transformantes de Bartlett al sur.
- Falla de sobrecorrimiento Sabana al norte.

Estas fallas se cortan formando un triángulo que conforma el Bloque Oriental Cubano, el que está muy cerca del límite entre las Placas Norteamericana y Caribe; posición ésta que lo hace muy vulnerable a movimientos sísmicos. Como se observa en la figura 5 y 6.



**Figura 5 Bloque Oriental cubano. Sistemas de fallas regionales: SFS Sistema de Falla Sabana; SFB Sistema de Falla Bartlett; SFCN Sistema de Fallas Cauto Nipe.**



**Figura 6 Terrenos Tectonoestratigráficos en Cuba Oriental.**

Nombres de los Terrenos: I, Asunción; II, Puriales-Moa; III, Guaso; IV, Mayarí Sierra Cristal; V, San Luís; VI, Sierra Maestra; VII, Cauto-Nipe; VIII, Maniabón; IX, Buena Ventura; X, Tunas-Camagüey.

Nombres de las fallas: ZFY Zona de falla Yumurí; ZFP Zona de falla Puriales; ZFPQ Zona de falla Palenque; ZFS Zona de falla Sabana; ZFB Zona de falla Bartlett; ZFBN Zona de falla Baconao; ZFGAC Zona de falla Guaso-Alto Cedro; ZFCS Zona de falla Cauto-Sur; ZFCN Zona de falla Cauto-Norte; ZFC Zona de falla Cacocum; ZFT, Zona de falla Tunas. (Blanco M. J. y Proenza J., 1994)

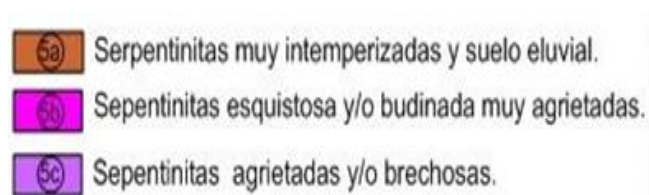
## **II.9 Litología de la zona donde se encuentran el Túnel Levisa-Mayarí tramo IV**

### **➤ Litología**

Las investigaciones geológicas por el eje del túnel demostraron que las rocas de la elevación Levisa-Mayarí, que atraviesa el túnel están representadas en toda su profundidad por serpentinitas esquistosas y budinadas, Serpentinita agrietada y/o brechosa media. Como se muestra en el perfil ingeniero geológico a continuación.

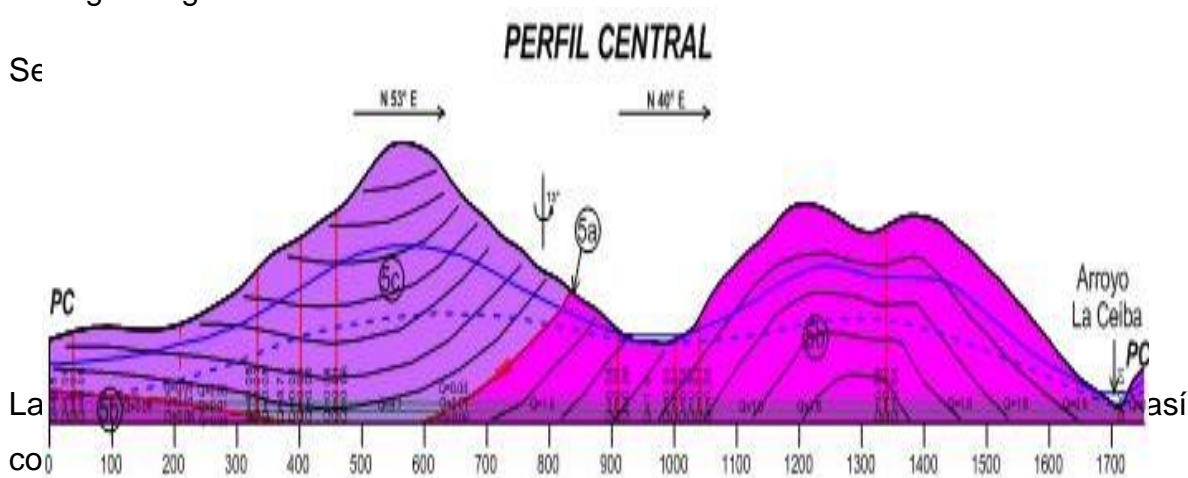


**Figura 7 Perfil Ingeniero-Geológico.**



Litología diagnóstica:

Se



**Capa 5a: Serpentinitas muy intemperizadas y suelo eluvial**, de color amarillo u ocre que puede llegar a ser suelo. Tiene poco espesor que no llega por lo general a 1 m, nunca afectará al túnel a no ser en la obra de fábrica en el río La Ceiba, por lo que no se abundará en su descripción y propiedades, ya que sólo se representa

en los perfiles ingeniero-geológicos.

**Capa 5b. Serpentinitas brechosas muy agrietadas, medianamente meteorizadas.** Como se refleja en la tabla 1. propiedades físico – mecánicas de la capa 5b.

**Tabla 1 Propiedades físico – mecánicas de la capa 5b**

Propiedades	Estado	U/m	Valor
Densidad	Seca	kN/m <sup>3</sup>	18.3-24.5(21.3)
	Natural	kN/m <sup>3</sup>	18.4-26.6(21.5)
	Saturada	kN/m <sup>3</sup>	21.5-25.5(23.3)
Peso específico			2.55-2.73(2.66)
Porosidad		%	8.39-32.20(19.7)
Resistencia a la compresión	Seca	MPa	20.03-
	Saturada	MPa	7.10-38.7(19.4)
Coeficiente de ablandamiento		-	0.21-0.95(0.60)
Absorción (Abs)		%	2.5 a 18.0(7.5)
Coeficiente de fortaleza de Protodiakonov (F.K.P)	Seca	MPa	2.0-5.0(3.0)
	Saturada	MPa	1.0-4.0(2.0)
Resistencia a la tracción	Seca	MPa	2.09-2.94
	Saturada	MPa	1.90-1.92
Módulo Young	Seco	MPa	920-
	saturado	MPa	545-
Químicos	CaCO <sub>3</sub>	%	Traza a 1.5
	SST	%	0.026 a

**Capa 5c. Serpentinitas brechosas agrietadas, poco meteorizadas:** A diferencia del Tramo III B, sólo se espera en los primeros 500 m más adelante en el trazado, con posible plano y zona de falla subhorizontal, lo que puede acarrear problemas de estabilidad en este sector. Se caracterizan por presentar bloques elementales entre grietas de tamaño medio entre 10-30 cm. Por su dureza se clasifican como

rocas medias a blandas, pueden estar medianamente intemperizadas predominando en profundidad las poco meteorizadas, excepto en zonas de influencia de fallas con circulación de aguas estacionales. Su color predominante es verde claro hasta oscuro casi negro. Las variedades brechosas propiamente dicho, se presentan en la parte más externa de la zona de influencia de fallas, ya que hacia el centro de estas pueden encontrarse a un nivel de trituración tal que llegue hasta la milonitización. Los valores reflejados en la tabla 2 propiedades físico – mecánicas de la capa 5c fueron a partir de ensayos de laboratorio.

**Tabla 2 Propiedades físico – mecánicas de la capa 5c**

Propiedades	Estado	U/m	Valor
Densidad	Seca	kN/m <sup>3</sup>	21.3-
	Natural	kN/m <sup>3</sup>	20.4-
	Saturada	kN/m <sup>3</sup>	22.3-
Peso específico		kN/m <sup>3</sup>	2.55-
Porosidad		%	11.2-
Absorción (Abs)		%	3.4-
Resistencia a la compresión	Seca	MPa	3.4-
	Saturada	MPa	6.9-8.6(7.6)
Coeficiente de ablandamiento		-	0.63-
Coeficiente de fortaleza de Protodiakonov (F.K.P)	Seca	MPa	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 Young	Seco	MPa	192-801(604)
	saturado	MPa	480-558(519)

Las características de dureza de las rocas, son muy variadas y en general bajas. Como promedio, para las serpentinitas en estado de saturación, la resistencia temporal a la compresión es de un orden de 130 kg/cm<sup>2</sup>.

## **II.10 Características tectónicas y sísmicas de la zona donde se encuentra el túnel Levisa- Mayarí tramo IV**

### ➤ Tectónica



Lo diferentes eventos tectónicos que ocurrieron en la región y afectaron las rocas del área 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 maestrichtiano 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, que dieron origen a la Fm. La Picota y que da la apariencia a todo el conjunto regional de un gran mega-melange, interpretado por Cordovés y Quintas como macromelange (Cordovés Pedrianes J. M., 2009). Entre el Daniano y el Eoceno medio se desarrolló próximo a la zona el arco de islas terciario que dejó sus huellas en las soluciones hidrotermales que provocaron el relleno de muchas de las grietas.

A este evento se superpusieron en el Oligoceno y Eoceno eventos que complicaron aún más el cuadro geólogo-estructural y que determinaron todas juntas las principales direcciones estructurales que van desde el noreste hasta el noroeste y las más jóvenes con dirección norte-sur. Las dislocaciones este-oeste por lo general de bajo ángulo, son las más antiguas vinculadas al emplazamiento tectónico de las rocas de la asociación ofiolítica. Entre las estructuras geológicas están los pliegues, grietas y fallas de diferente ángulo y mecanismo de formación.

#### ➤ *Sismicidad*

Según la Norma Cubana NC- 46-1999, el área de estudio está enclavada en la zona sísmica 1B. Esta área es de riesgo sísmico bajo, que puede ocasionar daños en las construcciones, debiéndose tomar medidas sismorresistentes en todas las estructuras y obras en función de la importancia de las mismas. Los valores de la aceleración horizontal máxima del terreno para el cálculo **A** serán de 0,1 g para

[illegible]

*Iosnel Rouco Suárez*



## ***CAPÍTULO III. Evaluación de la estabilidad y propuesta de sostenimiento***

### **III.1 Introducción**

La estabilidad de las excavaciones subterráneas depende de una serie de factores, por lo que primeramente se debe realizar un estudio geomecánico del macizo objeto de estudio y a partir de este definir la necesidad o no de fortificar las excavaciones que en ellos se laborean. Por lo cual los más influyentes en la estabilidad del sistema macizo-excavación son:

- Propiedades físico-mecánicas de las rocas.
- Grado de agrietamiento del macizo y unido a esto el número de sistemas de grietas existentes, sus orientaciones respecto a la dirección de la excavación, material del que están rellenas las grietas, entre otros aspectos.
- Tensiones actuantes en el macizo (antes y después de hecha la excavación).
- Forma y dimensiones de la sección transversal de la excavación.
- Ubicación espacial de la excavación en el macizo.
- Método de laboreo empleado.
- Cantidad de agua e hidrología en el macizo.

En la actualidad uno de los problemas más debatidos en la esfera de la mecánica de rocas y la construcción subterránea, es como valorar la estabilidad de las excavaciones subterráneas, desde el punto de vista cuantitativo y cualitativo. Actualmente para tal efecto existen numerosos criterios, los cuales se basan en el empleo de diferentes indicadores que permiten clasificar el macizo en categorías, según su estabilidad.

Las excavaciones subterráneas son estructuras enormemente complejas; para realizar tales obras es necesario poseer el máximo conocimiento del macizo rocoso donde se realiza la excavación. La mejor clasificación sería conocer las



propiedades mecánicas del macizo, como combinación de las propiedades de las rocas y de las discontinuidades. Por ser esto prácticamente imposible, se han hecho clasificaciones en las que se diferencian los macizos rocosos en diversas categorías de calidad.

Con las experiencias citadas y con el "índice de calidad del macizo rocoso" se estiman los métodos de excavación más adecuados y las necesidades de sostenimiento.

Para clasificar un determinado macizo rocoso, se dividirá éste previamente en dominios estructurales, cada uno de los cuales tendrá características similares, como: litología, espaciado de las juntas, cantidad de estas, etc. Los límites de un dominio estructural pueden coincidir con rasgos geológicos, tales como fallas o diques.

### **III.2 Análisis de las clasificaciones para la evaluación de la estabilidad**

Para la evaluación de la estabilidad del macizo con el empleo de criterios ingenieriles empíricos, conocidos como "clasificaciones geomecánicas", se pretende con ellas, evaluar la competencia de las rocas a partir de la observación de las mismas o de ensayos simples, de forma que, a partir del "índice de calidad" y la experiencia anterior, se puedan definir las necesidades de sostenimiento o los sistemas de excavación más adecuados para la ejecución de una obra; pudiendo a la vez servir como patrón en la identificación de los terrenos para las distintas partes implicadas en la obra, en temas contractuales derivados de la propia ejecución; por otra parte, y también durante la fase de ejecución, la aplicación de las mismas debe ayudar a la modificación del proyecto inicial, en puntos donde esto sea necesario por condicionantes del terreno imprevistos en la fase de proyecto. De aquí que se hace necesario conocer el fundamento teórico de las clasificaciones más utilizadas.

#### **1- Clasificación a partir del R.Q.D. (DEERE)**

El R.Q.D (ROCK QUALITY DESIGNATION), (Deere et al 1963) es un índice que



se obtiene de la recuperación de testigos en sondeos con diámetro mínimo de 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.

Este índice, de uso muy generalizado, quizás por su fácil obtención, hay que considerarlo con ciertas reservas, ya que en él influyen factores ajenos a la calidad de la roca, como son la mecánica del sondeo y pericia del sondista que lo ejecuta, que pueden producir roturas en el testigo que no sean debidas a la calidad y fracturación de la roca. Por esta razón, es conveniente que el levantamiento del sondeo para la determinación del índice se haga durante la ejecución, procurando, dentro de lo posible, que no contemple las roturas que puedan ser producidas por la sonda.

El RQD fue desarrollado principalmente en rocas de naturaleza ígnea.

$$RQD = \frac{\text{Longitud recuperada de testigos en pedazos } \geq 100\text{mm}}{\text{Longitud total del testigo}} \times 100$$

Cuando no se dispone de sondeos, una aproximación del R.Q.D. se obtiene por la expresión dada por Palmstron.

$$RQD = 115 - 3.3J_v$$

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, de los anexos.

Esta clasificación, como la mayoría de las existentes, da resultados válidos en rocas masivas y resistentes, en las que se generó aplicación siendo poco útil en





rocas poco resistentes.

Basándose en datos experimentales en distintas obras y tipos de roca, Merrit (1968) ha establecido una correlación entre el RQD y el índice de velocidad del macizo, que se define como el cuadro de la relación entre velocidad sísmica en el sondeo y en el laboratorio. Este índice, es en esencia una relación entre la velocidad media de propagación de ondas en el macizo rocoso y en la roca matriz, en el cual está reflejado implícitamente la influencia de las discontinuidades del macizo.

## 2- Clasificación de Barton. (Q)

Barton y otros investigadores establecen una clasificación geomecánica de las rocas, a partir de un índice de calidad "Q" que obtienen de 6 parámetros procedentes de la observación del macizo rocoso, para lo que establecen la correspondiente valoración.

Igual que en otras clasificaciones y procedente de la experiencia y observación de túneles construidos, se establecen unos criterios empíricos para el dimensionado del túnel.

Determinación del índice Q

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

Dónde:

RQD- es un índice definido anteriormente.

Jr- índice que contempla la continuidad y rugosidad de las superficies de las grietas.

Jn- índice que se toma según la cantidad de sistemas de grietas.



Ja- índice que depende del grado de alteración de las grietas y de las características de su relleno coeficiente reductor por la presencia del agua.

Jw- índice que caracteriza la humedad de las rocas.

SRF- (stress reduction factor) es un coeficiente que tiene en cuenta la influencia del estado tensional en el macizo rocoso.

Los tres grupos formados con estos parámetros son:

$\frac{RQD}{J_v}$  - representa el tamaño de los bloques.

$\frac{J_r}{J_a}$  - representa la resistencia al corte entre los bloques.

$\frac{J_w}{SFR}$  - representa la influencia del estado tensional.

En la tabla 2, de los anexos, se reflejan los criterios de valoración de estos parámetros. El rango de variación del índice Q está entre 0.001 y 1.000. Este intervalo se ha dividido en 9, que han dado lugar a la siguiente clasificación cualitativa.

Estimación de parámetros se observa en la tabla 5 que se encuentra en los anexos que intervienen en el índice Q (BARTON, 1974). Ver las tablas 6 y 7 de los anexos.

### **3- Clasificación de Bienawski (RMR)**

Esta clasificación fue publicada por el autor en 1973 y ha sido ligeramente modificada en el año 1976 y 1979 si bien, entre estas 2 últimas publicaciones, no existe diferencia en la estructura y valoración de los parámetros. Por esta razón expondremos las dadas en las publicaciones de 1973 y 1979.



Esencialmente, la clasificación consiste en la obtención de un índice de calidad del macizo rocoso denominado “Rock Mase Rating” (RMR), que depende de:

- a) resistencia de la roca matriz.
- b) condiciones del diaclasado.
- c) efecto del agua.
- d) posición relativa del diaclasado respecto a la excavación.

Para tener en cuenta la incidencia de estos factores se definen una serie de parámetros, asignándoles unas determinadas valoraciones, cuya suma en cada caso, nos dará el índice de calidad RMR; cuyo rango de variación está entre 0 y 100.

En función del valor del RMR se clasifican las rocas en 5 categorías diferentes, para los que se definen sus correspondientes tipos de sostenimiento empíricos, que servirán de dimensionamiento previo para las excavaciones que en éstas se realicen; a la vez que se establecen criterios sobre la forma de ejecutar la excavación, así como el tiempo que puede permanecer abiertas de terminadas longitudes de excavación.

Parámetros de clasificación y sus rangos, según Bieniawski (1979). Corrección por la orientación de las diaclasas, según Bieniawski (1979). Ver tabla 3 en los anexos. Clasificación, según Bieniawski (1979). Ver tabla 4 en los anexos.

#### **4- Clasificación de Terzaghi**

Propuesta por el autor en 1964, es y ha sido de gran aplicación en Norteamérica. Clasifica los terrenos en 9 tipos atendiendo esencialmente a las condiciones de fracturación en las rocas y a la cohesión o expansividad en los suelos.

Considera la disposición de la estratificación respecto al túnel, en la previsión de desprendimientos que se resume en 3 normas empíricas:

- Con estratificación vertical el techo será estable en general, pero se pueden producir caídas de bloques en una altura de  $0,25 B$  ( $B$  es el ancho



del túnel).

- Con estratificación horizontal de gran potencia y con pocas juntas, la excavación será estable sin roturas.
- Con estratificación horizontal de pequeña potencia y/o gran cantidad de juntas, en el techo se desarrollarán roturas, formándose un arco apuntando sobre el túnel, con anchura la de éste y altura la mitad de la dimensión anterior. Este proceso es progresivo y se detendrá si se coloca rápidamente un sostenimiento.

En la tabla 8 de los anexos se presenta la clasificación de los 9 tipos de terreno propuestos por el autor, así como la estimación de la carga en el techo ( $H_r$ ) para cada uno de ellos.

Hay que añadir, que estos valores son de aplicación para dimensionamiento de sostenimientos clásicos – cerchas y hormigón, que se consideran conservadores para rocas de buena calidad, que su campo de aplicación es **para túneles de tamaño medio del orden de 8 m de anchura o menor** y que son de dudosa aplicación en **terrenos expansivos o que fluyen plásticamente**.

La distribución de cargas para el dimensionado del sostenimiento se hace suponiendo:

- Presión uniforme vertical sobre la bóveda de valor:

$$P_m = \gamma H_r.$$

- Presión uniforme sobre las paredes de valor:  $P_h \approx 0,3 P_m$
- Presión uniforme sobre la solera, si la hay, de valor.

$$P_s \approx 0,5 P_m$$



$\gamma$  = densidad de la roca.

Hr se obtiene de la tabla

Cuando puedan desprenderse localmente bloques, el sostenimiento deberá dimensionarse para resistir las cargas puntuales correspondientes.

### 5- Clasificación de Protodyakonov

Es una clasificación bastante extendida en los países del este de Europa, en los que se utiliza para el dimensionamiento de sostenimientos de túneles, y que en 1976 fue adoptada en Francia junto con la de Deere, para el pre dimensionado de las excavaciones en este país.

Protodyakonov clasifica los terrenos, asignándoles un parámetro "f" llamado coeficiente de resistencia, a partir del cual, y de las dimensiones del túnel, define las cargas de cálculo para dimensionar el sostenimiento. La clasificación se resume en la tabla 3, donde se indican el tipo de terreno y el coeficiente f, según las distintas resistencias.

Da unas reglas para la determinación de f en función de la resistencia a la compresión simple, el ángulo de rozamiento interno y la cohesión, éstas son:

Para rocas: 
$$f = \frac{\sigma_c}{10}$$

Para suelos: 
$$f = \operatorname{tg} \varphi + \frac{C}{\sigma_c}$$

Dónde:

$\sigma_c$  → Resistencia compresión simple (Mpa)

$\varphi$  → Angulo de rozamiento interno a largo plazo

C → Cohesión a largo plazo (Mpa)



La distribución de cargas sobre el túnel para el dimensionamiento del sostenimiento se hace suponiendo:

Presión uniforme vertical sobre clave:

$$P_V = \gamma \cdot h$$

Presión uniforme horizontal lateral:

$$P_L = \gamma(h + 0.5m) \cdot \text{tg}^2 \left( 45 + \frac{\varphi}{2} \right)$$

Dónde:

$$h = \frac{B}{2f} \quad \text{y} \quad B = b + 2m \cdot \text{tg} (45 - \varphi/2)$$

Dónde:

B- ancho del túnel

m-altura del túnel

f- coeficiente de resistencia

$\Phi$ - ángulo de rozamiento interno

$\gamma$ - densidad del terreno

Según experiencias, se ha demostrado que esta teoría es válida para profundidades de túnel H comprendidas entre:

$$\frac{b}{2\text{tg} \varphi} < H < \frac{b}{\text{tg} \varphi}$$

**Tabla 3-** Factor f de Protodyakonov (simplificado de SZECHY. 1967).

CATEGORIA	DESCRIPCION	f
Excepcional	Cuarcita, basalto y rocas de resistencia excepcional	20
Alta resistencia	Granito, areniscas silíceas, calizas muy competentes	15-10
Resistencia media	Caliza, granito algo alterado, areniscas. Areniscas medias u pizarras. Lutitas, areniscas flojas, conglomerados, morrenas. Lutitas y esquistos, margas compactas	8-6 5 4 3
Resistencia baja	Calizas y lutitas blandas, margas, areniscas friables, gravas y bolos cementados, morrenas. Terrazas, lutitas fisuradas y rotas, gravas compactas, arcillas preconsolidada.	2 1.5
Resistencia muy baja	Arcillas, gravas arcillosas. Suelos vegetales, turbas, arenas húmedas. Arenas y gravas finas, derrubios. Limos, loes, fanfos, etc...	1.0 0.6 0.5 0.

## 6- Clasificación de Lauffer

Desarrollada por el autor en 1958, recoge la experiencia de un estudio sistemático sobre el tiempo que permanecían estables excavaciones en diferentes tipos de roca, incluso en minas abandonadas.

La clasificación se efectúa atendiendo a los parámetros:

Longitud libre: que es la menor de las dos dimensiones, diámetro o profundidad de la excavación abierta sin revestimiento;



Tiempo de estabilidad: es el tiempo que permanece sin desmoronarse la longitud libre anteriormente definida.

**Tabla 4-** En función de ambos parámetros clasifica las rocas en 7 tipos de la siguiente forma:

Tipo	Longitud libre	Tiempo Estabilidad	Descripción
A	4 m	20 años	Sana
B	4 m	6 meses	Algo fracturada
C	3 m	1 semana	Fracturada
D	1,5 m	5 horas	Friable
E	0,8 m	20 minutos	Muy friable
F	0.4 m	2 minutos	De empuje inmediato
G	0.15 m	10 segundos	De empuje inmediato fuerte

Necesidades de Entibación según Lauffer:

(A) No es necesario entibar

(B) 2-3 cm de gunita, o bulones separados 1.5-2 m con mallazo, eventualmente refuerzo de la bóveda únicamente.

(C) 3-5 cm de gunita, o bulones separados 1-1.5 m con mallazo, eventualmente solo refuerzo de la bóveda.

(D) 5-7 cm de gunita, con mallazo o bulones separados 0.7-1m junto con mallazo y 3 cm de gunita.

(E) 7-15 cm de gunita con mallazo, a veces bulones separados 0.5-1.2 m y 3-5 cm de gunita alternativamente cerchas y blindaje.

(F) 15-20 cm de gunita con cerchas y mallazo, o cerchas y blindaje con gunitado posterior.





(G) Gunitado, cerchas, reforzados y blindaje.

**Según Lauffer, el tipo A no necesita sostenimiento, los tipos B y C necesitan sostenimiento de techo, el tipo D requiere cerchas ligeras, el E cerchas pesadas y los tipos F y G, requieren sostenimiento pesado y de frente.**

Una descripción algo más detallada la que recoge Romana (1980) es la siguiente:

**Tipo A:** Roca Sana

Terreno muy bueno.

**Tipo B:** Roca Sana, compacta pero fracturada.

Terreno bueno.

**Tipo C:** Roca Sana, bastante fracturada o roca ligeramente alterada.

Terreno medio.

**Tipo D:** Roca muy fracturada o bastante alterada.

Rocas Blandas.

Terreno mediocre.

**Tipo E:** Roca triturada o muy alterada, con juntas rellenas de arcilla, sercita o caolín.

Roca blanda, de débil cohesión.

Terrenos arcillosos con fuertes empujes.

Terreno malo.

**Tipos F y G:** Características análogas a “suelos”.

Se consideran muy difíciles y necesitan métodos especiales para ser atravesados por el túnel.



Analizando los resultados de las características del macizo objeto de estudio, y su comportamiento mecánico estructural, así como teniendo en cuenta los parámetros en que se basan las clasificaciones geomecánicas vistas anteriormente y su campo de acción conjuntamente con los resultados por estas en el macizo con características análogas se propone para analizar nuestra evaluación de las clasificaciones de:

- **Clasificación a partir del R.Q.D. (DEERE)**
- **Clasificación de Barton. (Q)**
- **Clasificación de Bienawski (RMR)**

### *III.3 Evaluación de la estabilidad*

- Descripción del área de estudio por tramos:

Tramo I- Serpentinitas muy agrietadas: En el mismo se observan rocas de color negras o azul-verdosas, siendo las predominantes las primeras, en este caso estas rocas astillan en fragmentos pequeños después de múltiples golpes de piqueta, la roca azul-verdosa está más afectada por los procesos de meteorización (principalmente en el borde de la segunda y tercera familia) y por el proceso de serpentinización.

Existen tres familias de grietas, las grietas están espaciadas entre 25 - 70 cm, predominando distancias de 30 - 40 cm, dando lugar a que se formen bloques pequeños y medianos.

Tramo II- Serpentinitas agrietadas: En el macizo se aprecian rocas negras-azulosas o verdosas, predominando los tonos oscuros y en planos de juntas el color verde más claro. Las rocas negras siendo la predominante con dureza alta, saltan astillas con varios golpes de piqueta, la roca azul-verdosa está afectada por el proceso de serpentinización en los bordes de las juntas por la meteorización. Existen tres familias de grietas más algunas aleatorias. Las rocas tienen color



negro-azuloso en los puntos donde hay humedad al tacto, espejos, tacto grasoso, lisa onduladas, en ocasiones adherencia mayor 1 mm, separación promedio entre puntos 30 - 50 cm gran continuidad, cerradas.

Tramo III- Serpentinitas menos agrietadas: En el frente objeto de estudio predominan tres familias de grietas más aleatorias. La roca es predominante oscura y verde más clara en las grietas y zonas de intercepción de varios planos de grietas, con 2 - 4 mm de relleno de un verde claro de las propias rocas aleatorias. El macizo es serrado cruzado por puntos de gran continuidad, con material de relleno de hasta 10-30 cm, predominando 10 cm a lo largo del sistema del trazado de los puntos del sistema crítico. La separación entre los puntos críticos va desde 30 cm hasta 2 mm pero no conformando bloque individuales.

#### **Cálculo de RQD de DEERE para cada tramo.**

$$RQD = 115 - 3.3J_v$$

➤ Tramo I Serpentinitas muy agrietadas.

$$J_v = \frac{1}{e_{eq}}$$

$$e_{eq}(Total) = e_{eq}(Familia_1) + e_{eq}(Familia_2) + e_{eq}(Familia_.....x)$$

$$J_v = \frac{1}{e_{eq}} = \frac{1}{0.0384} = 26.06 \text{ _ Grietas/m}^3$$

$$RQD = 115 - 3.3 \cdot 26.06 = 29 \text{ _ \%}$$



- Tramo II Serpentinitas agrietadas.

$$J_v = \frac{1}{e_{eq}} = \frac{1}{0.0434} = 23.03 \text{ _ Grietas/m}^3$$

$$RQD = 115 - 3.3 \cdot 23.03 = 39 \text{ _ \%}$$

- Tramo III Serpentinitas menos agrietadas.

$$J_v = \frac{1}{e_{eq}} = \frac{1}{0.0398} = 25.15 \text{ _ Grietas/m}^3$$

$$RQD = 115 - 3.3 \cdot 25.15 = 32 \text{ _ \%}$$

**Calculo del factor de estabilidad Q según Barton para cada tramo.**

- Tramo I Serpentinitas muy agrietadas.

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

$$Q = \frac{29}{12} \cdot \frac{2}{2} \cdot \frac{1}{2.5} = 0.97$$

- Tramo II Serpentinitas agrietadas.

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

$$Q = \frac{39}{12} \cdot \frac{1.5}{2} \cdot \frac{0.65}{2.5} = 0.63$$



- Tramo III Serpentinitas menos agrietadas.

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

$$Q = \frac{32}{12} \cdot \frac{1.5}{4} \cdot \frac{1}{2.5} = 0.4$$

**Calculo del factor de estabilidad RMR según Bienawski para cada tramo.**

$$RMR = 9 \cdot (\ln Q) + 44$$

- Tramo I Serpentinitas muy agrietadas.

$$RMR = 9 \cdot (\ln Q) + 44$$

$$RMR = 9 \cdot (\ln 0.96) + 44 = 44$$

- Tramo II Serpentinitas agrietadas.

$$RMR = 9 \cdot (\ln Q) + 44$$

$$RMR = 9 \cdot (\ln 0.63) + 44 = 38$$

- Tramo III Serpentinitas menos agrietadas.

$$RMR = 9 \cdot (\ln Q) + 44$$

$$RMR = 9 \cdot (\ln 0.4) + 44 = 36$$

Resultados de estos cálculos se reflejan en la siguiente tabla 5 que a continuación se muestra.

De los resultados anteriores llegamos a la conclusión que las zonas por donde se va a proyectar el túnel es una zona muy agrietada donde la calidad de las rocas es **mala**.

**Tabla 5- Resultados de los cálculos *geomecánicos*.**

Formulación		Q=(RQD/Jn)*(Jr/Ja)*(Jw/SRF), LTE=2*CTE*Q <sup>0.4</sup>	
Parámetros	Zonas		
	Tramo I Serpentinitas muy agrietadas	Tramo II Serpentinitas agrietadas	Tramo III Serpentinitas menos agrietadas
RQD	29	39	32
Clasificación	Mala	Mala	Mala
Jn	12	12	12
Jr	2	1,5	2
Ja	2	2	2
Jw	1	0,65	1
SRF	2,5	2,5	2,5
Q	0,96	0,63	0,96
Clasificación	Roca muy mala	Roca muy mala	Roca muy mala
RMR	44	38	36
Clasificación	Roca mala	Roca mala	Roca mala
LTE	0,8m	1m	1,5m

#### *III.4 Análisis y propuesta de sostenimiento*

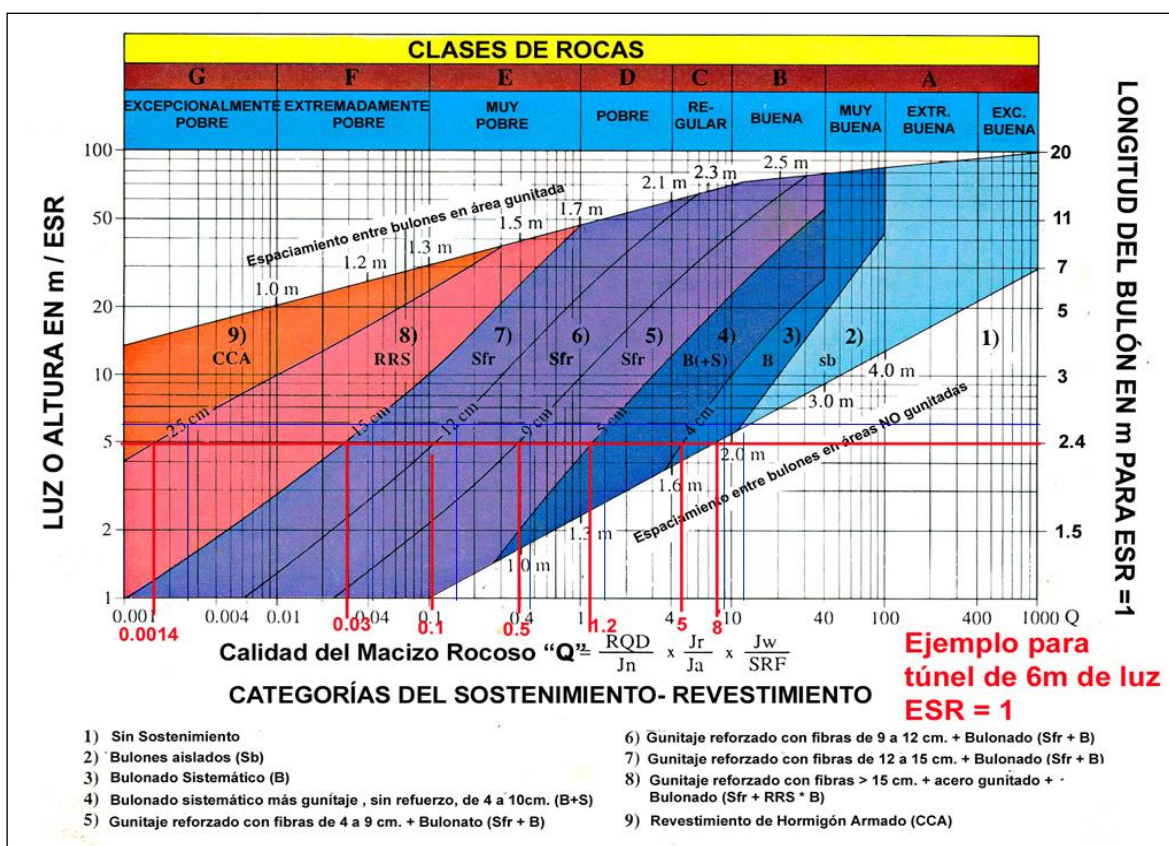
El sostenimiento de obras subterráneas, tienen como objetivo controlar las deformaciones que se producen en las excavaciones producto de las tensiones que ejerce el macizo rocoso. Existen varios tipos de sostenimientos, y la utilización

de uno u otro, dependen en medida de las condiciones del macizo, del destino de la excavación y de su plazo de servicio.

El cálculo del sostenimiento fue diseñado teniendo en cuenta el gráfico de diseño del sistema Q para túneles y cavernas con actualización del año 1986.

1. Del método Noruego de excavación de túneles: Sistema Q de Barton. (Ingeotunel 1, 2000).
2. Clasificación de Bieniawski (RMR). (Ingeotunel 1, 2000).

Los valores del gráfico utilizado fueron determinados con un ESR = 1, teniendo en cuenta la importancia de la obra y los problemas que traería por deficiencia del sostenimiento revestimiento del túnel en la etapa de explotación.



Con los valores de Q ajustados por criterios de Expertos dados en la investigación Geológica se calcularon los valores del RMR, utilizados en los cálculos para la proyección del sostenimiento-revestimiento del túnel, así como la longitud libre de



la excavación, estos valores pueden verse representados en los planos, y los valores del RMR.

Los criterios de sostenimiento a partir de las investigaciones ingeniero-geológicas realizadas fueron tratadas según la literatura internacional, así como la revisión de diseño con cierta similitud próximo a la zona en estudio. Atendiendo esencialmente a las condiciones del macizo, las presiones que se generan en la bóveda y en los hastiales, así como los desplazamientos, la distribución de las cargas para el dimensionamiento del sostenimiento, la longitud libre o de avance y el tiempo de estabilidad de la excavación se adopta para el caso del túnel de conexión III la utilización de elementos prefabricados (T-26) como revestimiento definitivo en una longitud de 11 m y a partir de esta se adoptó una sección ovoidal cuyo revestimiento está en función del índice de la calidad del macizo según Barton ( $Q=1$ ) hasta interceptar con el túnel principal. El trazado del túnel principal se desarrolla por las litologías (capas), compuesto por serpentinas brechosas agrietadas de mediana a poco meteorizadas respectivamente, donde se comprueban la existencia de 14 fallas). Se definieron cuatro secciones típicas que fueron detalladas anteriormente. Se utilizó la metodología dada por Barton para la elección del sostenimiento-revestimiento (categorías) y es, además, la que se emplea en la investigación ingeniero-geológica que sirve de base a este proyecto. No obstante se revisaron otras metodologías de que adoptaron criterios a la solución definitiva adoptada en el diseño (Deere, Bienawski, Lauffer, Protodiakonov, Palmstron, AFTES entre otros). En todos los casos, desde el punto de vista constructivo y de operaciones, la superficie tendrá una terminación acabada que garantice las condiciones supuestas en los cálculos hidráulicos, por lo que se deberá tener especialmente cuidado durante la ejecución de los trabajos de proyección del hormigón y terminación de la misma. En relación el tramo donde se prevé deslizamiento o pérdidas de estabilidad del macizo por encontrarse una falla subhorizontal el avance debe ser controlado tanto en el diseño del patrón de





voladura como en el sostenimiento secundario de bulones y hormigón proyectado y en último caso hormigonado in situ de la sección utilizando el molde español.

Para el túnel Levisa – Mayarí Tramo IV se propone el sostenimiento considerando las diferentes características de los tramos de excavación estudiados, según su comportamiento estructural, derivado de los resultados de la calidad de las rocas obtenidos.

- Argumento del trazado. Pendiente y secciones transversales propuestas para el túnel Levisa – Mayarí Tramo IV.

Argumento del trazado: El trazado del túnel obedece a cumplir los siguientes parámetros condicionales:

1. Realizar un trazado lo más lineal posible con la longitud necesaria teniendo en cuenta el alto costo en que se incurre para su construcción y el incremento de pérdidas hidráulicas por incremento de longitud.
2. Búsqueda de posibles túneles de conexión a distancias no mayores de dos (2) kilómetros para garantizar una buena ventilación, así como la extracción de gases y polvos en el proceso de voladura.
3. Ubicar el túnel por zonas donde se garantice evitar el cruce por zonas de fallas y en el caso de que no sea posible tal condición cruzarlas lo más perpendicular posible.

Pendiente: El túnel se ha proyectado con dos pendientes, dividiéndose en dos tramos convenientemente, de forma tal que se garantiza que en el período de construcción se pueda drenar y evacuar el agua producto a que el mismo se encuentra en su mayor longitud por debajo de la línea del nivel freático, datos aportado por la investigación Geológica.

Secciones transversales: En el tramo se han establecido cuatro (4) secciones típicas atendiendo al índice de calidad del macizo rocoso (Q), clasificación de



Barton, valores que fueron determinados en las investigaciones geológicas que sirven de base al Proyecto Técnico Ejecutivo, las mismas se describen a continuación.

- Metodología utilizada para el cálculo Hidráulico.

Para el cálculo hidráulico del túnel se tuvo cuenta:

- Determinación de las dimensiones de su sección transversal del túnel desde el punto de vista constructivo.
- Elección de la forma de su sección transversal.
- Formula a emplear en el cálculo (Mannig).

El análisis hidráulico se realizó con el programa EPANET, teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- El túnel se encuentra completamente lleno en todo momento, y por consiguiente que el flujo de agua que se conduce es a presión.
- La dirección del flujo es siempre del nudo de mayor altura piezométrica (suma de la cota más la presión) al de menor altura piezométrica.

Los principales parámetros para el cálculo fueron:

- Los nudos, iniciales y finales.
- El diámetro equivalente del túnel.
- Las longitudes de los tramos.
- El coeficiente de rugosidad (para calcular las pérdidas de carga).
- El estado en que trabaja el túnel (abierto).

Teniéndose en cuenta la premisa antes mencionada y que la Presa Mayarí se encontrará con un nivel de explotación en cota 71.00 msnm, se realizó la modelación hidráulica, dando como resultado que las presas deben tener un nivel de aguas normales (NAN) de 96.00 msnm y para todos los tramos de los túneles los datos básicos que a continuación se tabulan. Ver tabla 9 de los anexos.



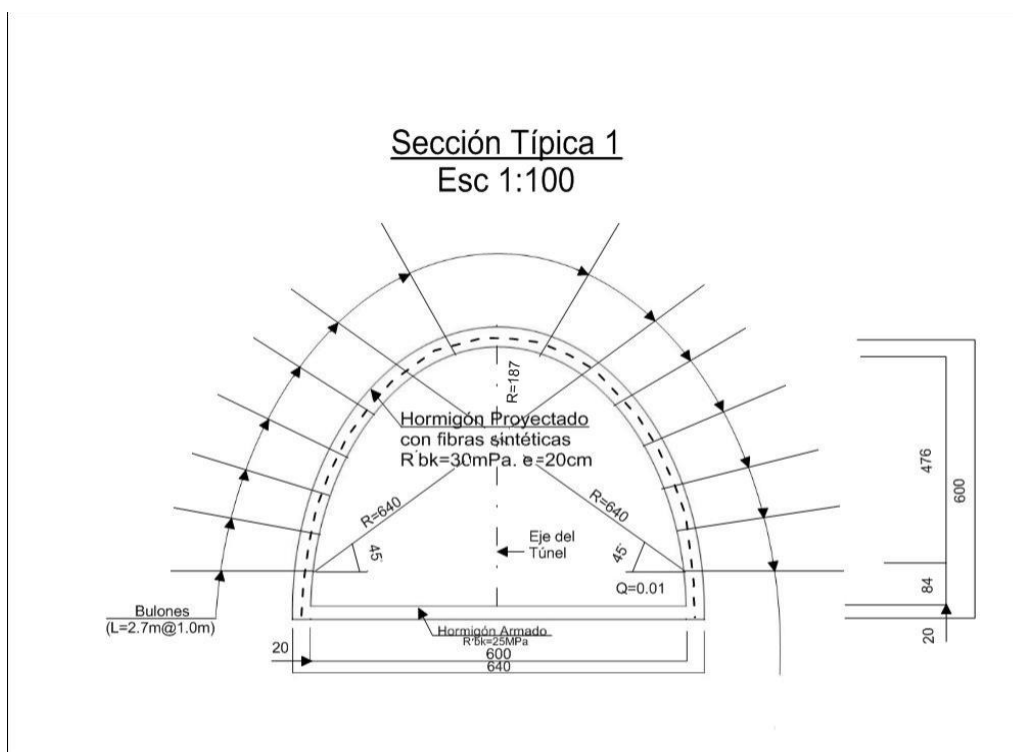
### III.5 Propuesta de parámetros técnicos del sostenimiento para la ejecución de los trabajos

#### Secciones transversales

En el tramo se han establecido cuatro secciones típicas atendiendo al índice de calidad del macizo rocoso (Q), clasificación de Barton.

**Tabla 6- Parámetros para la sección típica 1**

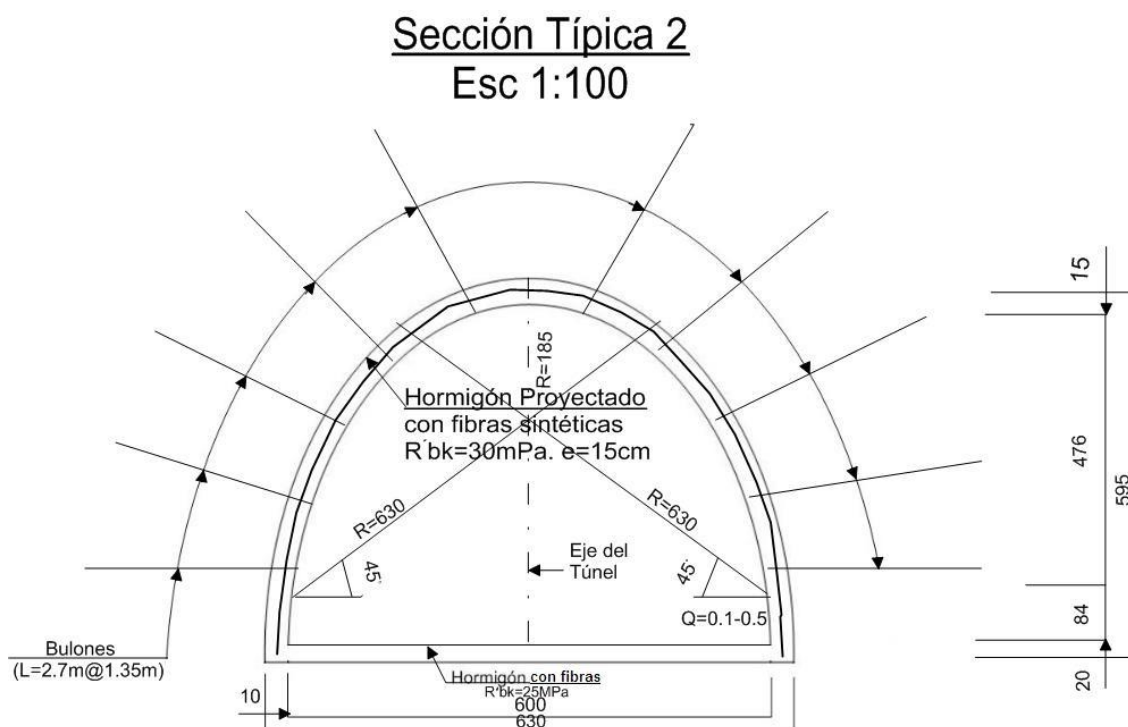
Características	
Índice de calidad del macizo rocoso	0.01
Categoría de sostenimiento	8
Tipo de revestimiento-sostenimiento	Hormigón proyectado con fibra sintética espesor 5cm bulonado sistemático L=2.70m espaciado a 1m en ambos sentidos, arcos de acero espaciados a 1m.
Hormigón proyectado con fibra sintética	15cm para un revestimiento total de 20cm
Sección de excavación total	30.81m <sup>2</sup>
Longitud de avance (Barton)	1m
Sección Hidráulica	26.74m <sup>2</sup>
Ancho interior por el fondo	6m
Altura interior	5.60m
Losa de piso definitivo del túnel	0.20m



### Figura 9 - Sección típica 1

**Tabla 7- Parámetros para la sección típica 2**

Características	
Índice de calidad del macizo rocoso	0.1-0.5
Categoría de sostenimiento	7
Tipo de revestimiento-sostenimiento	Hormigón proyectado con fibra sintética espesor 5cm bulonado sistemático L=2.70m espaciado a 1.35m en ambos sentidos.
Hormigón proyectado con fibra sintética	10cm para un revestimiento total de 15cm
Sección de excavación total	30.07m <sup>2</sup>
Longitud de avance (Barton)	1.50m
Sección Hidráulica	26.74m <sup>2</sup>
Ancho interior por el fondo	6m
Altura interior	5.60m
Losa de piso definitivo del túnel	0.20m

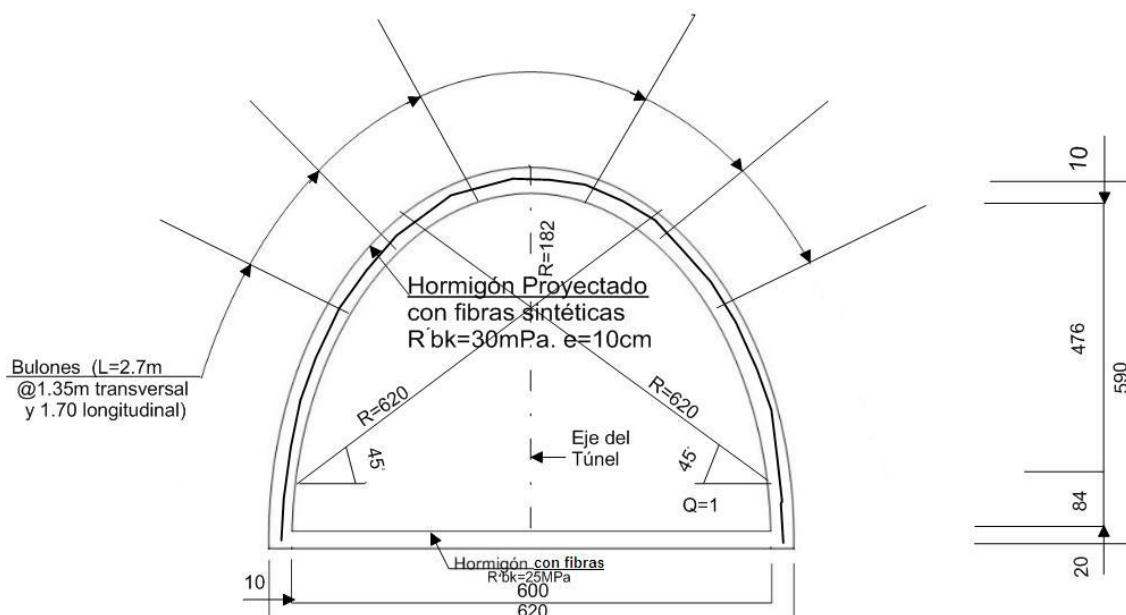


**Figura 10- Sección Típica 2**

**Tabla 8- Parámetros para la sección típica 3**

Características	
Índice de calidad del macizo rocoso	1
Categoría de sostenimiento	5
Tipo de revestimiento-sostenimiento	Hormigón proyectado con fibra sintética espesor 5cm bulonado sistemático L=2.70m espaciado a 1.35m transversal y 1.70m longitudinal.
Hormigón proyectado con fibra sintética	5cm para un revestimiento total de 10cm
Sección de excavación total	29.34m <sup>2</sup>
Longitud de avance (Barton)	3m
Sección Hidráulica	26.74m <sup>2</sup>
Ancho interior por el fondo	6m
Altura interior	5.60m
Losa de piso definitivo del túnel	0.20m

Sección Típica 3  
Esc 1:100

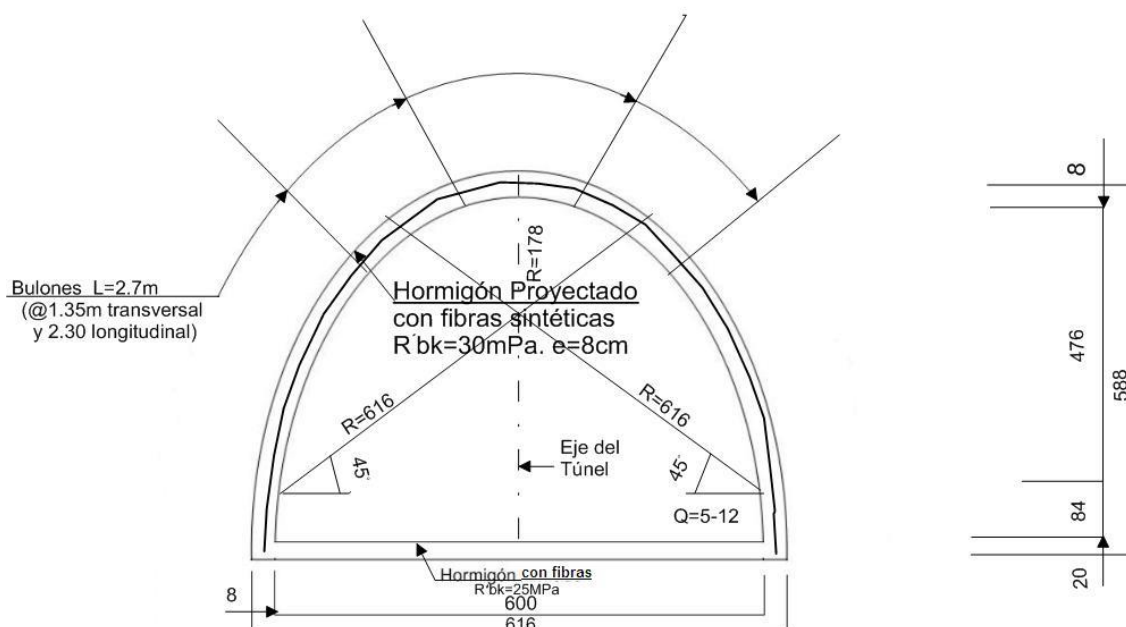


### Figura 11- Sección Típica 3

### Tabla 9- Parámetros para la sección típica 4

Características	
Índice de calidad del macizo rocoso	5-12
Categoría de sostenimiento	3
Tipo de revestimiento-sostenimiento	Hormigón proyectado con fibra sintética espesor 5cm bulonado sistemático L=2.70m espaciado a 1.35m transversal y 2.30m longitudinal.
Hormigón proyectado con fibra sintética	3cm para un revestimiento total de 8cm
Sección de excavación total	29.05m <sup>2</sup>
Longitud de avance (Barton)	6m
Sección Hidráulica	26.74m <sup>2</sup>
Ancho interior por el fondo	6m
Altura interior	5.60m
Losa de piso definitivo del túnel	0.20m

Sección Típica 4  
Esc 1:100



### Figura 12- Sección Típica 4

## *CAPÍTULO IV. Impacto ambiental y protección del trabajo*

### IV.1 Generalidades

La protección del trabajo tiene gran importancia, ya que cada integrante es un eslabón básico para su desarrollo. Su importancia económica radica en que la ocurrencia de un accidente en una empresa, establecimiento o taller representa una baja en la productividad global, y causa problemas con el estado de ánimo y psicológico en los restantes obreros, que inciden directamente en la gestión económica, así como las pérdidas de materiales e incluso la vida de algún (s) trabajadores. Para evitar los accidentes hay que prestar atención especial a la seguridad y utilización de los medios de protección por parte de los trabajadores desarrollando un papel importante en la exigencia de estos la dirección de la



empresa y cada uno de sus integrantes.

#### **IV.2 Protección del Hombre**

La protección del hombre tiene una gran importancia, ya que cada integrante es un eslabón básico para su desarrollo. Su importancia económica radica en que la ocurrencia de un accidente en una empresa, establecimiento o taller representa una baja productiva global, y causa problemas en el estado de ánimo y psicológico en los restantes obreros, incide directamente en la gestión económica, así como en las pérdidas materiales e incluso la de vidas humanas. Para evitar los accidentes hay que prestar especial atención a la seguridad y utilización de los medios de protección por parte de los trabajadores.

##### **Medidas Importantes:**

- La utilización del casco para entrar al túnel.
- La utilización de botas de agua con protección en la puntera.
- Utilización adecuada de los ventiladores para mantener los índices higiénico – sanitarias del frente de trabajo.
- Los obreros que están expuesto al ruido deben utilizar las orejeras.
- Se prohíbe entrar con alimentos o fumar dentro de la obra.
- Velar por la higiene del trabajo.
- Cumplir con la dosificación indicada por el fabricante, que es de un 3 % – 8 % del volumen del cemento. Una sobredosis puede causar incremento de la reducción de la resistencia final.
- Debido a que este producto contiene componentes que pueden causar irritación, el trabajador debe de evitar el contacto con los ojos y contacto prolongado con la piel, esto será posible utilizando la ropa adecuada, guantes, gafas u otro tipo de dispositivo que protejan a los ojos.
- Evitar la contaminación del aire con humo, polvo, etc., y del medio circundante con ruidos excesivos o innecesarios, especialmente en zonas urbanas





- Cumplir estrictamente con lo dispuesto en el proyecto.
- .Garantizar la salud individual y colectiva mediante el cumplimiento de las disposiciones sanitarias vigentes, con especial cuidado en el almacenamiento de alimentos y otros productos para el uso y consumo de las personas.

En la protección al trabajador de Unidad Constructora Militar tenemos algunos puntos a tener en cuenta para su seguridad y calidad de vida, entregándoles medios de protección y seguridad según su departamento o trabajo a realizar en su profesión. A continuación hacemos mención de la relación de algunos medios de protección personal para algunos puestos de trabajo según indicación 174/2007 del MINFAR con adiciones ajustada a la ECOH.

#### **Medios de Protección:**

- Casco para construcción (para trabajos en exteriores e interiores).
- Botas de goma con casquillo metálico (para trabajos en exteriores donde hay presente humedad alta).
- Traje impermeable (para trabajos donde hay presencia de gran humedad)
- Botas de piel con casquillo metálico (para trabajos donde no hay humedad).
- tapones para el ruido (donde hay presencia de ruido).
- Espejuelo (para la protección contra gases y polvo).
- Filtro contra el polvo fino (para la protección contra el polvo).
- Respirador contra gases tóxicos (para la protección contra los gases nocivos producto de diferentes labores).
- Guantes de cuero súper reforzado, guantes de látex, guantes dieléctricos y guantes de lona y piel.

Estos medios son entregados a cada obrero con el objetivo para evitar los accidentes leve o de gran envergadura. Por eso es necesario que el jefe



encargado de la protección al trabajador haga que se cumpla estrictamente con el uso todos los equipos de protección personal que se entregan por puestos de trabajo a cada hombre de la entidad.

Se deberán cumplir las medidas de mitigación y monitoreo, especificadas en la Licencia Ambiental, así como todas las Normas y regulaciones para la Protección e Higiene del Trabajo en la actividad de producción industrial y de explotación de los equipos tecnológicos de transporte, así como el transporte en general de las materias primas y el personal.

### **IV.3 Impactos ambientales**

Durante las distintas etapas de construcción del túnel se generan impactos de transformación de áreas, es decir se modifican aspectos morfológicos del relieve, estructura y conformación de las capas subterráneas, distribución de flora y fauna y calidad del aire principalmente. Se implementaran obras de construcción civil que determinan un cambio definitivo en los atributos naturales y del ambiente, están compuesto fundamental mente por maleza y vegetación de charrascales de zonas montañosas (25ha) y los suelos presentes son pocos productivos, destacando las regulaciones para proteger el mismo.

De manera concluyente a partir del análisis realizado anteriormente, se pueden destacar los componentes del medio más afectados en la construcción:

- |              |             |
|--------------|-------------|
| • Suelo      | • Atmosfera |
| • Fauna      | • Paisaje   |
| • Vegetación | • Geología  |
| • Hidrología | • Población |

### **IV.4 Medidas para mitigar y prevenir impacto**

- Acopiar la capa vegetal producto de los trabajos de desbroce para su reutilización en la rehabilitación de las áreas degradadas por la construcción.
- Rehabilitar las condiciones original luego de retirada las facilidades



temporales, canteras, etc.

- Cumplir con el pasaporte de perforación y voladura para evitar agrietamiento excesivo del macizo rocoso.
- Racionalizar al máximo el proyecto de voladuras, así como cumplir estrictamente los requerimientos del mismo para disminuir los niveles de ruidos, y polvo en la atmósfera.
- Humedecer las vías de circulación, superficies desnudas expuestas al viento en lugares de acopio de materiales y canteras para disminuir al máximo la emisión de polvo a la atmósfera.
- Evitar el vertimiento de materiales y productos de la construcción (hormigón, lechada de cemento, etc.), así como, combustibles y/o lubricantes al lecho de los ríos.
- Cumplir con los planes de mantenimiento establecidos para todos los equipos, máquinas herramientas y vehículos automotores, así como instalar filtros de humo y silenciador a los equipos de combustión interna, para minimizar las emisiones de ruidos y gases.
- Rehabilitar por medio de la reforestación a los terraplenes, taludes, superficies desnudas, escombreras, préstamos y canteras para disminuir y eliminar las pérdidas de suelo por erosión y los impactos visuales.
- Proveer a los obreros de los medios de protección adecuados durante los procesos de construcción y operación de la obra para proteger la salud y seguridad de los trabajadores, esto incluye controles adecuados de seguridad y contra accidentes.
- Utilizar los aditamentos necesarios en los motores de equipos y maquinarias de construcción que permitan disminuir al mínimo posible los niveles de ruido y la expulsión de gases de combustión, así como instalar mata chispas en estos vehículos.

Se prevé que en las escombreras sean restablecidas con las mismas condiciones que existían que existían antes de realizar el movimiento de tierra. Además de lo



planteado en el documento, podemos decir que una vez finalizados los trabajos de la construcción de los canales y túneles de los cuales esta obra forma parte, y su puesta en explotación tendrá una incidencia positiva en la población y la agricultura ya que las aguas que serán trasladada del Este al Oeste servirán de abasto a la población y la utilización en la agricultura para la producción de los cultivos fundamentales en la alimentación de la población. También podemos reflejar que los habitantes que viven el curso del trazado del canal que se ven desplazados de sus propiedades, se les tendrán en cuenta sus necesidades materiales y espirituales, con vista a compensar en gran medida las posibles afectaciones.



## **CONCLUSIONES**

- ✓ A partir de la caracterización ingeniero - geológica y estructural del macizo, se realizó una evaluación de la calidad y estabilidad del mismo donde se obtuvo que para los tres tramos la calidad se comporta entre mala y muy mala, definiendo que las rocas son inestables.
- ✓ Se realizó una propuesta de sostenimiento para estas excavaciones, la misma consiste en el empleo de hormigón lanzado reforzado con fibras sintéticas, combinado con anclas metálicas y se establecieron los parámetros que caracterizan las secciones típicas a utilizar en el túnel.
- ✓ Se propuso un sistema de medidas **para mitigar y prevenir el impacto** producido al medio ambiente.



## *RECOMENDACIONES*

- ✓ Que los resultados de este trabajo constituyan una herramienta para evaluar las condiciones de estabilidad de otros túneles que se construyan en macizos con características similares al estudiado.
- ✓ Que el trabajo sea entregado la empresa de construcciones militares, para su implementación.



## *BIBLIOGRAFÍA*

1. **ARANGO, A. 1988. Informe Geológico. Proyecto C.H.A de Río Guayabo y Río Sojo. Holguín. 24 p.**
2. BARTON, N, R y Choubey. 1974. A review of the shear strength of filled discontinuities in rock. Ed.e.Brooch.
3. BARTON, N. (1991).: "Geotechnical Design". World Tunnelling.
4. BARTON, N.; LIEN, R. y LUNDE, J. 1977. "Estimation of support requirements for underground excavations". Proc. of 16th Symposium on Design Methods in Rock Mechanics. Minnesota, 1975. Published by ASCE, New York, 1977. Discussion.
5. BARTON, N.; LØSET, F.; LIEN, R. y LUNDE, J. 1980: "Application of System in Design Decisions Concerning Dimensions and Appropriate Support for Underground Installations". International Conference on Sub-surface Space. Rockstore, Stockholm. Sub-surface Space, Vol. 2. Pergamon.
6. BLANCO, T. R. 1998. Valoración de la estabilidad de las excavaciones a partir del criterio de formación y dimensiones de una zona de deformación inelástica en su contorno: Centro nacional de informaciones geológicas. Instituto de Geología y Paleontología. Memorias III Congreso Cubano de Geología y Minería. La Habana. Cuba. 57 - 60p.
7. BLANCO, T. R. 1998. Elementos de la mecánica de los medios rocoso: Felix Varela, La Habana,. 327p.
8. COLECTIVO DE AUTORES. 1991. Informe ingeniero geológico, Tránsito Este – oeste (Melones – sabanilla): Túnel Seboruquito - Esperanza. ENIA– Holguín, Junio,.
9. COLECTIVO DE AUTORES. 1992<sup>a</sup>. Informe ingeniero geológico, Tránsito Este – oeste (Melones – sabanilla): Túnel Guaro – Manacal. Empresa de Proyectos e Investigaciones del MINFAR – Holguín. (E. C. M. No 2).
10. COLECTIVO DE AUTORES. 1992<sup>b</sup>. Informe ingeniero geológico, Tránsito



- Este – oeste (Melones – sabanilla): Túnel Mula 2 - Batista. Empresa de Proyectos e Investigaciones del MINFAR – Holguín (E. C. M. No 2).
11. COLECTIVO DE AUTORES. 1992c. Informe ingeniero geológico, Tránsito Este – oeste (Melones – sabanilla): Túnel Buenaventura. Empresa de Proyectos e Investigaciones del MINFAR – Holguín (E. C. M. No 2).
12. COLECTIVO DE AUTORES. 1992d. Informe ingeniero geológico, Tránsito Este – oeste (Melones – sabanilla): Túnel Casteyanos 2 – Julia 3. Empresa de Proyectos e Investigaciones del MINFAR – Holguín (E. C. M. No 2).
13. LÓPEZ, C. 1998. ESTEFANÍA PUEBLA. S. Túneles hidrotécnicos. Ingeotúneles: \_\_ Madrid. I. T. S. De Ingenieros de Minas. U. P. Madrid. T – I, 345 – 369p
14. **FONSECA, E.; ZELEPUGIN, V.N.; HEREDIA, M. 1985. Structure features of the ophiolite association of Cuba. Geotectonic. 19(4):321-329 p.**
15. GONZÁLEZ DE VALLEJO. L. 1998. Las clasificaciones geomecánicas para túneles. Ingeotúneles: Carlos López Jimeno \_\_ Madrid. I. T. S. De Ingenieros de Minas. U. P. Madrid. T – I, 25 – 66p
16. HIDALGO, H. A. SÁNCHEZ, R. G. 1991a. Informe ingeniero geológico, Tránsito Este – oeste (Melones – sabanilla): Túnel Melones – Levisa. INRH – Holguín.
17. HIDALGO, H. A. 1991b. Informe ingeniero geológico, Tránsito Este – oeste (Melones – sabanilla): Túnel Enmedio - Guayabo. INRH – Holguín.
18. MORENO, TALLÓN. E. 1998. Las clasificaciones geomecánicas de las rocas, aplicadas a las obras subterráneas: KAHER II, S.A. Madrid. (Curso impartido en el ISMM). 63p.
19. PALMSTROM. A. Caracterización de macizos rocosos mediante el Rmi y sus aplicaciones en Mecánica de Rocas. Ingeotúneles: Carlos López Jimeno \_\_ Madrid. 1998. I. T. S. De Ingenieros de Minas. U. P. Madrid. T – II, 79 – 107p.
20. LÓPEZ, C, 1998. Primer Congreso de Mecánica de Rocas se celebró en





Portugal en 1966.

21. PROENZA, J. 1998. Mineralización de cromitas en la Faja Ofiolítica Mayarí- Baracoa (Cuba). El ejemplo del Yacimiento Mercedita. Tesis doctoral. Universidad de Barcelona. 227 p.
22. FRANSISCO, J. 2010. Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Ciencias Geológicas, Elementos de Sostenimiento de Túneles.

## ANEXOS



Figura 1-Equipo de proyección de hormigón por vía húmeda.

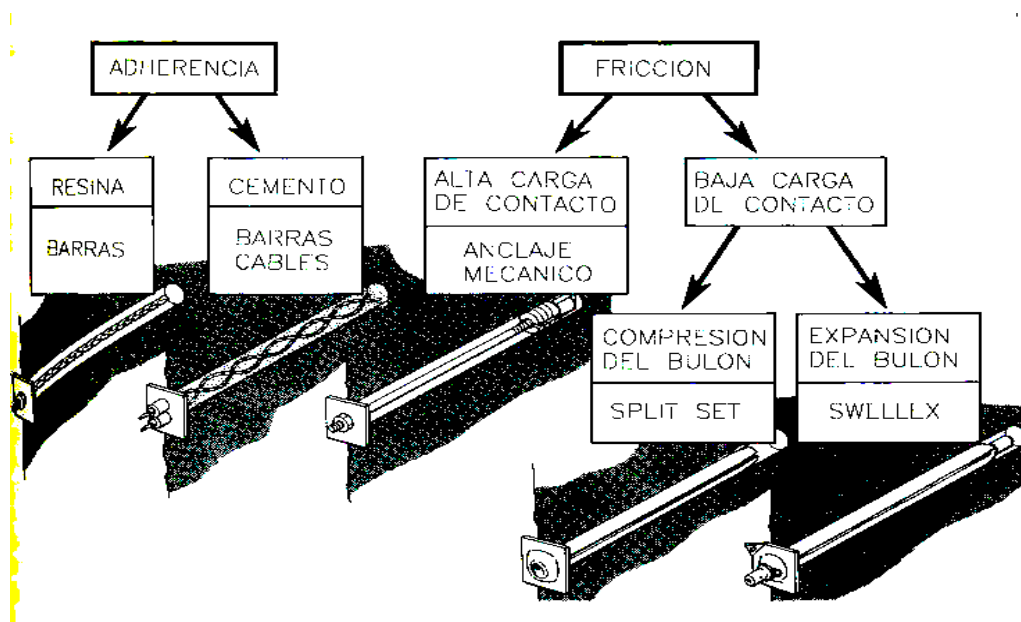


Figura 2-Esquema de los distintos tipos de bulones.





Figura 3-Túnel sostenido con chapa Bernold entre cerchas.

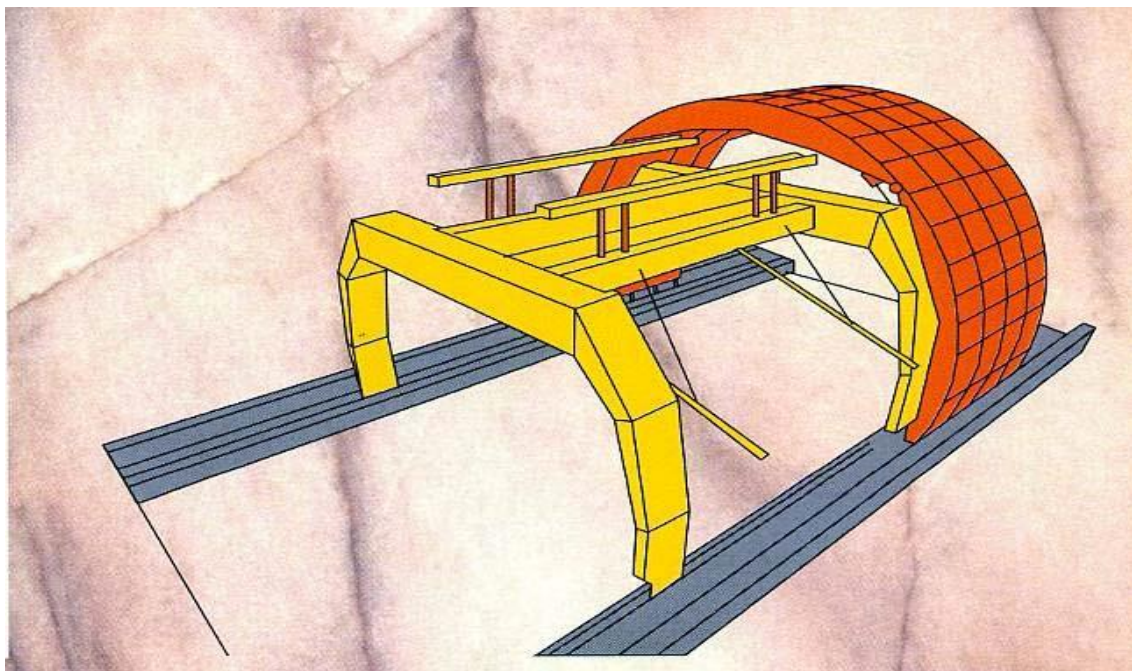


Figura 4-Muestra un proceso continuo de encofrado de hormigón.



**Tabla 1-Clasificación de las rocas por R.Q.D.**

Valores de RQD en %	Calidad de la roca
25	Muy mala
De 25 a 50	Mala
De 50 a 75	Normal
De 75 a 90	Buena
De 90 a 100	Muy buena

**Tabla 2-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

**Tabla 3- Estimación de parámetros que intervienen en el índice Q (BARTON, 1974).**

Jn - Índice de diaclasado Valor	Jr - Índice de rugosidad Valor
Roca Masiva. 0.5-1,0	Diaclasas rellenas 1
Una familia de diaclasas. 2	Diaclasas limpias (*)
Id. con otras diaclasas ocasionales. 3	Discontinuas 4
Dos familias de diaclasas. 4	Onduladas rugosas 3
Id. con otras diaclasas ocasionales. 6	Onduladas lisas 2
Tres familias de diaclasas. 9	Planas rugosas 1,5
Id. con otras diaclasas ocasionales. 12	Planas lisas 1,0
Cuatro o más familias, roca muy fracturada. 15	Lisas o espejos de fallas
Roca muy triturada . 20	Onduladas 1,5
	Planas 0,5
	(*) o cuyas caras este entran en contacto bajo la sollicitación.

**Tabla 4--Estimación de parámetros que intervienen en el índice Q (BARTON, 1974).**

Ja - Indice de alteración. Valor	Coeficiente reductor de la presencia de agua Jw	Valor	Presión de agua (kg/cm <sup>2</sup> )
Diaclasas de paredes planas. 0.75 -1	Excavaciones secas o con <5 l/min localmente.	1	< 1
Liga alteración 2	Afluencia media con lavado de algunas diaclasas.	0,66	1 – 2,5
Alteración arcillosa. 4	Afluencia importante por diaclasas limpias.	0,5	2,5 - 10
Con detritus arenosos. 4	Id. Con lavado de diaclasas.	0,33	2,5 - 10
Con detritus arcillosos Preconsolidados. 6	Afluencia excepcional inicial, decreciente con el tiempo.	0,2 – 0,1	> 10
Id. poco consolidados 8	Id. Mantenida.	0,1 – 0,05	>10
Id. Expansivos. 8 - 12			
Milonitos de roca y arcilla. 6 - 12			
Milonitos de arcilla limosa. 5			
Milonitos arcillosos - gruesos 10 - 20			



**Tabla 5-Parámetros de clasificación y sus rangos, según Bienawski (1979).**

Nº	Parámetros.		Rango de valores.						
1	Resistencia de la roca matriz.	Ensayo de carga puntual.	>10MPa	4 - 10 MPa	2 -4 MPa	1-2 MPa	comp.. simple (Mpa)		
		C. Simple	>25 0MPa	100- 50MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5 - 25 MPa	- 5 MPa	< 5Mpa
	valoración		15	12	7	4	2		0
	RQD.		90 a 100 %	75 a 90 %	50 a 75 %	25 a 50 %	< 25 %		
	valoración		20	17	13	8	3		
	Espaciamiento entre grietas.		> 2m	0,6 - 2 m	0,2 a 0,6m	0,06 a 0,2m	< 0,06 m		
	valoración		20	15	10	8	5		
	Estado de las diaclasas.		Muy rugosas discontinuas, sin separaciones, bordes duros.	Ligeramente rugosa. Abertura < 1mm. bordes duros	Ligeramente rugosa, Abertura < 1mm. Bordes blandos	Espejos de falla o con relleno <5mm o abiertas 1 -5 mm. Diaclasa continua	Relleno blando >5mm, aberturas >5mm. diaclasa continua		
	valoración		30	25	20	10	0		
	Agua freática	Caudal por 10 m de túnel.	Nulo	< 10 l/min.	10 - 25 l/min	25 - 125 l/min	>125 l/min		
		Relación: entre presión de agua tensión principal mayor	0	0 - 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5		
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Fluyendo		
	valoración		15	10	7	4	0		



**Tabla 6-Corrección por la orientación de las diaclasas, según Bienawski (1979).**

Dirección y buzamiento		Muy favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy desfavorable
Valoración	túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

**Tabla 7-Clasificación, según Bienawski (1979).**

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala
Valoración	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20





**Tabla 8-Cargas para dimensionar el sostenimiento (Trezaghi) 1946.**

Clase	Terreno	Tipo de terreno	Carga de la roca Hr (m)		Observaciones
			Inicial	Final	
1	Roca	Dura y sana	-	-	Revestimiento solo si hay caída de bloques
2	Roca	Dura. Estratificada o esquistosa.	-	0 a 0,5 B	Caída de bloques probable. Empuje lateral si hay estratos inclinados.
3	Roca	Masiva. Moderadamente diaclasada.	-	0 a 0,25 B	Necesita entibación rápida. Empuje lateral pequeño.
4	Roca	Moderadamente fracturada. Bloques y lajas.	-	0,25 a 0,35 (B+H)	Entibación inmediata. Empuje lateral pequeño.
5	Roca	Muy fracturada	-	0,35 a 1,1 (B+H)	Entibación continua. Empuje lateral considerable.
6	Roca	Completamente fracturada pero sin meteorizar.	0 a 0,6 (B+H)	1,1 (B+H)	Los valores más altos corresponden a grandes deformaciones que aflojan el terreno.
6 <sup>I</sup>	Grava o arena	Densa	-	0,62 a 1,38 (B+H)	Empuje lateral. Ph = 3,0 y (Hr Ho, 5H)
6 <sup>II</sup>	Grava o arena	Suelta	0,54 a 1,2(B+H)	1,08 a 1,38 (B+H)	Fuerte empuje lateral.
7	Suelo cohesivo	Profundidad moderada	0,94 a 1,2 (B+H)	1,1 a 2,1 (B+H)	Entibación continua con cierre en la base
8	Suelo cohesivo	Profundidad grande	-	2,1 a 4,5 (B+H)	Entibación continua y circular (y deformable en casos extremos)
9	Suelo o roca expansivos	Expansivo	-	Hasta 80 m. Sea cual sea (B+H)	





**Tabla 9-Datos Hidráulicos**

Denominación	Valores
Gasto mínimo de conducción (m <sup>3</sup> /seg.)	30.00
Área de la sección hidráulica (m <sup>2</sup> )	26.74
Perímetro de la sección hidráulica (m)	19.91
Diámetro equivalente de la sección hidráulica (m)	5.39
Coeficiente de rugosidad (n)	0.022
Velocidad (m/seg.)	1.32

**Tabla 10-Parámetros Minero Tecnológicos de la Excavación Objeto de estudio.**

Obra	Túnel
Extensión (m)	2715.24m
Pendiente	0.001m/m
Profundidad de Ubicación (m)	65.43m
Ángulo de intersección del sistema de grietas con el eje.	---
Carácter del Frente.	Homogéneo
Destino.	Hidrotécnico con presión
Laboreado a través de.	Serpentinitas
Dirección.	275°