



**Instituto Superior Minero Metalúrgico  
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”**

**Facultad de Geología y Minería  
Departamento de Geología**

**Título: Propuesta de una clasificación geomecánica para la  
evaluación del comportamiento del macizo rocoso en el  
frente de arranque del Túnel Levisa-Mayarí Tramo IV.**

(Tesis en opción al título académico de Máster en Geología)

**Autor: Ing. de Minas Alexander Ochoa Quesada**

**Tutor: Dra.C. Maday Cartaya Pire**

**Moa, 2018**

## PENSAMIENTO

**“ESTADOS UNIDOS  
VENDRÁ A DIALOGAR CON  
NOSOTROS CUANDO  
TENGA UN PRESIDENTE  
NEGRO Y HAYA EN EL  
MUNDO UN PAPA  
LATINOAMERICANO”**



## DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Declaro que soy autor(a) de este trabajo de tesis y que autorizo al Instituto Superior Minero Metalúrgico, a hacer uso del mismo, con la finalidad que estime conveniente.

Firma: \_\_\_\_\_



**Alexander Ochoa Quesada**  
aexander.ochoa@nauta.cu

**Alexander Ochoa Quesada** autoriza la divulgación del presente trabajo de diploma bajo licencia Creative Commons de tipo **Reconocimiento No Comercial Sin Obra Derivada**, se permite su copia y distribución por cualquier medio siempre que mantenga el reconocimiento de sus autores, no haga uso comercial de las obras y no realice ninguna modificación de ellas. La licencia completa puede consultarse en: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/ar/legalcode>

**Alexander Ochoa Quesada** autoriza al departamento de Geología del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa a distribuir el presente trabajo de tesis en formato digital bajo la licencia Creative Commons descrita anteriormente y a conservarlo por tiempo indefinido, según los requerimientos de la institución, en el repositorio de materiales didácticos disponible en: <http://geologia.mineria.edu.cu/textuales/tesis>

**Alexander Ochoa Quesada** autoriza al departamento de Geología del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa a distribuir el presente trabajo de tesis en formato digital bajo la licencia Creative Commons descrita anteriormente y a conservarlo por tiempo indefinido, según los requerimientos de la institución, en la biblioteca digital del ISMM disponible en: <http://bibliotecadigital.ismm.edu.cu>

## AGRADECIMIENTOS

*Agradezco eternamente el apoyo incondicional de mi esposa en todo momento, la preocupación de mis queridos padres y abuelos, la política de superación existente en mi centro laboral así como la colaboración en los años académicos, a las personas que se me acercaron para darme su opinión con respecto a la investigación.*

*Agradecerles a mis tutores Blanco y Maday que siempre buscaron un espacio de su tiempo para dedicármelo.*

*A todos mis compañeros de trabajo que de una forma u otra han contribuido con el desarrollo de la investigación.*

*Al personal de los túneles por atendernos y ser solidarios en todo momento, al jefe de Seguridad y Protección del Trabajador en los túneles por su ayuda en la traducción de algunas bibliografías.*

*Agradecer a todos aquellos que trabajan cada día por la superación personal y científica, es la mejor contribución que se le pueda hacer a la patria.*

## DEDICATORIA

*Dedico este trabajo investigativo especialmente a mi niño que es el suceso más significativo de mi vida, a mi esposa, mamá, papá, abuelos, tíos, tutores, amigos, a mi centro laboral GEOCUBA ORIENTE NORTE; en fin para todas aquellas personas que han contribuido en mi formación profesional hasta la actualidad, sin dejar por alto a la Revolución Cubana que sin ella nada sería posible.*

## RESUMEN

El presente trabajo de tesis se realiza con el objetivo de proponer una clasificación geomecánica que permita evaluar el comportamiento del macizo rocoso en el frente de arranque del Túnel Levisa-Mayarí Tramo IV. Para lo cual se realizó el análisis de las diferentes clasificaciones geomecánicas empleadas en túneles a nivel mundial y se definió aplicar las clasificaciones de Barton (Q), Bulichev (S), Bieniawski (RMR) y (GSI) Hoek y Marinos por estacionados de 1.50 m aproximadamente, según el avance del túnel y por litologías. El procesamiento del agrietamiento se realizó con los softwares Dips v5 y Unwedge v3.0 y el ajuste de los parámetros geomecánicos se realizó mediante el método de prueba y error. Con lo que se obtuvo el macizo rocoso está fracturado con tres familias de grietas predominantes y según las clasificaciones geomecánicas el mismo se clasifica de calidad muy mala a mala. A partir del ajuste a los parámetros del índice de calidad Q con la resistencia a carga puntual se obtiene  $Q = \left( \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF} \right) K_R$ , y la correlación de GSI con ambos se obtiene una ecuación de cálculo con resultados similares a los medidos,  $Q=2*10^{-07}GSI^{4.244}$  ecuación de ajuste de tipo exponencial  $R^2=0.999$ , lo que representa el comportamiento en tiempo real del macizo rocoso en el túnel según la clasificación geomecánica de GSI ajustada.

### PALABRAS CLAVES:

Clasificación, Geomecánica, Túnel, Macizo.

## SUMMARY

The present thesis work is made with the objective of proposing a geomechanical classification that allows to evaluate the behavior of the rock mass on the starting face of the Levisa-Mayarí Tunnel IV. For which the analysis of the different geomechanical classifications used in tunnels was carried out worldwide and it was defined to apply the Barton (Q), Bulichev (S), Bieniawski (RMR) and Hoek (GSI) classifications for parked approximately 1.50m, according to the progress of the tunnel and by lithologies. The cracking processing was done with the softwares Dips v5 and Unwedge v3.0 and the adjustment of the geomechanical parameters was done by the trial and error method. With what was obtained the rock mass is fractured with three families of predominant cracks and according to the geomechanical classifications it is classified as very bad to bad quality. From the adjustment to the parameters of the quality index Q with the point load resistance you get  $Q = \left( \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF} \right) K_R$ , and the correlation of GSI with both results in a calculation equation with results similar to those measured,  $Q=2*10^{-07}GSI^{4.244}$  adjustment equation of exponential type  $R^2 = 0.999$ , which represents the behavior in real time of the rock mass in the tunnel according to the geomechanical classification of adjusted GSI.

## KEY WORDS:

Classification, Geomechanical, Tunnel, Massif

# ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	12
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO Y ESTADO ACTUAL DE LA TEMÁTICA .....	16
I.1 Clasificaciones geomecánicas.....	16
I.1.1. Clasificación del RQD (Deere, 1963).....	19
I.1.2. Clasificación de Barton (1974) .....	19
I.1.3 Clasificación de Bulichev (1996).....	22
I.1.4. Clasificación de Bieniawski (1979.).....	24
I.1.5. Clasificación GSI. (GEOLOGICAL STRENGTH INDEX 2005) .....	26
I.2 Estado actual de la temática.....	31
I.3 Actualidad de la temática en Cuba.....	35
I.3.1. Breve reseña de las investigaciones y diseños anteriores de los túneles Levisa-Mayarí.....	39
CAPÍTULO II – CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	43
II.1 Ubicación Geográfica.....	43
II.2 Clima.....	44
II.3 Vegetación.....	45
II.4 Orografía y red hidrográfica.....	46
II.5 Análisis Sísmico .....	47
II.5.1 Análisis histórico sísmico.....	49
II.5.2 Análisis del suelo antes la actividad sísmica .....	51
II.6 Análisis Hidrogeológico.....	52
II.7 Tipologías ingeniero-geológicos presentes en la zona y área de estudio.....	52
CAPÍTULO III. APLICACIÓN DE LAS DIFERENTES CLASIFICACIONES GEOMECÁNICAS EN EL MACIZO ROCOSO DEL FRENTE DE ARRANQUE. TÚNEL TRAMO IV, LEVISA-MAYARÍ. ....	57
III.1 Descripción del agrietamiento en el túnel.....	57
III.1.1 Proyección estereográfica del agrietamiento en el macizo y representación de los bloques y cuñas.....	58
III.2. Aplicación de la clasificación de Barton, Q, (1994) en el frente de arranque del túnel. ....	60
III.3 Aplicación de la Clasificación de Bulichev (1996) en el frente de arranque del túnel. ....	62
III.4 Aplicación de la Clasificación de Bieniawski en el frente de arranque del túnel.....	64
III.5 Aplicación de la Clasificación Clasificación GSI en el frente de arranque del túnel. ....	64
III.6 Parámetros geomecánicos del macizo roco del túnel por litología. ....	66
III.7 Ajuste de parámetros de las clasificaciones geomecánicas al comportamiento del macizo rocoso en el Túnel Tramo IV, Levisa-Mayarí. ....	68
III.7.1 Mediciones con el Esclerómetro.....	68
III.7.2 Ajuste de la ecuación de Barton para correlacionarla con el empleo del Esclerómetro .....	69
III.7.3 Ajuste de correlación entre el GSI y la Q de Barton para el cálculo de la estabilidad del macizos rocosos serpentinitico. ....	72
III.8 Fundamentación de la clasificación geomecánica propuesta.....	76
III.8.1 Impacto Económico, Social, Medio Ambiental, Científico. ....	80

CONCLUSIONES .....	81
RECOMENDACIONES .....	82
BIBLIOGRAFIA.....	83
LISTA DE LAS ABREVIATURAS UTILIZADAS .....	87
ANEXOS .....	89
1. Índice Q de Barton, 1974, 1994 y el Índice RQD. ....	89
2. Clasificación de Bulichev .....	95
3. Clasificación de BIENIAWSKI .....	102
3.1 Ajuste que proponen Laubscher y Taylor a la clasificación de Bieniawski, consisten en la modificación del valor original y recomendaciones para el sostenimiento.....	108
4. Clasificación GSI. GEOLOGICAL STRENGTH INDEX.....	113
4.1 Estimación de propiedades a partir del GSI del macizo rocoso .....	116
5. Gráfico de Miller (1965).....	117
6. Palmstron (1995) .....	118
7. Prueba y error .....	1

## ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.1. Propuesta de sostenimiento según la Q de Barton
- Figura 1.2. Ubicación Geográfica
- Figura 1.3. Características de la vegetación del lugar
- Figura 1.4. Mapa de Zonación Sísmica de la Región Oriental de Cuba (Norma Sísmica)
- Figura 1.5. Terremotos con magnitudes mayores que 2.5 Richter registrados por el SSNC en la región Oriental (1964 – Abril 2006). Se destaca con un rectángulo azul la zona de ubicación del Trasmase.
- Figura 1.6. Detalle de la actividad sísmica de la zona de ubicación del Trasmase y sus alrededores considerando los terremotos de todas las magnitudes del periodo 1528 – 2003. Se destaca con un rectángulo azul la zona de ubicación del Trasmase.
- Figura 1.7. Foto No 2. Contacto visible durante la excavación del Tramo IV. Tipo II-III debajo y el Tipo IV-V arriba.
- Figura 1.8. Gráfico Túnel N° IV. Planos principales. 1) 160°/30°, 3) 80°/70° y 4) 210°/60.
- Figura 1.9. Gráfico Túnel N° IV. Vista 3D de los bloques principales.
- Figura 1.10. Subdivisión del frente de arranque según el comportamiento litológico.
- Figura 1.11. Determinación de la curva de correlación entre el GSI y  $\sigma_{ci}$ (MPa).
- Figura 1.12. Determinación de la curva de correlación entre la Q de Barton y el  $\sigma_{ci}$ (MPa).
- Figura 1.13. Determinación de la curva de correlación entre la GSI y la Q Barton.
- Figura 1.14. Gráfico para determinar la resistencia a la compresión simple con el empleo del esclerómetro y la densidad de la roca.(Miller 1965)

## INDICE DE TABLAS

- Tabla 1.1. Índice de Resistencia Geológica(GSI de Marinos y Hoek 2005).
- Tabla 1.2. Ubicación geográfica. Túnel Levisa-Mayarí Tramo IV.
- Tabla 1.3. Afectaciones estimadas en término de intensidad para la zona del travase
- Tabla 1.4. Tipo II-III. Serpentinitas en bloques irregulares, medianos, multifacetados hasta muy tectonizados, valores a profundidad de 65 - 74m.
- Tabla 1.5. Tipo IV-V. Serpentinitas de bloques muy finos desintegradas mal seleccionadas y cementadas, que pueden ser foliadas, laminadas y cizalladas hasta esquistosas, valores a profundidad de 65 - 74m.
- Tabla 1.6. Túnel N° IV. Principales características de los bloques elementales.
- Tabla 1.7. Resultados obtenidos con la metodología de Barton.
- Tabla 1.8. Resultados obtenidos con la metodología de Bulichev.
- Tabla 1.9. Resultados obtenidos con la metodología de Bulichev.
- Tabla 1.10. Resultados obtenidos con la metodología de Bieniawski.
- Tabla 1.11. Determinación de propiedades fundamentales en base al GSI por las descripciones de campo, así como su correlación con Barton.
- Tabla 1.12. Índices de calidad obtenidos.
- Tabla 1.13. Valores medidos con el esclerómetro según el Manuel de instrucciones.
- Tabla 1.14. Índice que caracteriza el macizo rocoso según su resistencia.
- Tabla 1.15. Mediciones realizadas y resultados de la Q de Barton obtenidos.
- Tabla 1.16. Nomenclaturas utilizadas.
- Tabla 1.17. Valores de los parámetros característicos del índice Q.
- Tabla 1.18. Características generales del estado del macizo. Bulichev.
- Tabla 1.19. Tiempo permisible de estabilidad del túnel.Bulichev.
- Tabla 1.20. Condición de juntas. Bieniawski.
- Tabla 1.21. Bieniawski ha propuesto la siguiente clasificación.
- Tabla 1.22. Clasificación de los parámetros y sus valores.

- Tabla 1.23. Ajuste de valores por orientación de las juntas.
- Tabla 1.24. Determinación de la clase del macizo rocoso.
- Tabla 1.25. Significado de la clase del macizo rocoso.
- Tabla 1.26. Parámetro de corrección por meteorización.
- Tabla 1.27. Parámetro de corrección por esfuerzos.
- Tabla 1.28. Parámetro de corrección por cambio de esfuerzos.
- Tabla 1.29. Parámetro de corrección por la influencia de las orientaciones.
- Tabla 1.30. Parámetros de corrección por sostenimiento.
- Tabla 1.31. Estimados de campo de la resistencia a la compresión uniaxial de la roca. (Marinos y Hoek, 2000).
- Tabla 1.32. Estimación del parámetro D. (Hoek et al., 2002).
- Tabla 1.33. Otra forma empírica de determinación de los parámetros (Marinos y Hoek, 2000)).
- Tabla 1.34. Tamaño del bloque en dependencia del rango de variación del volumen del bloque.
- Tabla 1.35. Prueba y Error.

## INTRODUCCIÓN

Desde la antigüedad los hombres surgen y se desarrolla según sus necesidades, provocando hasta la actualidad, el desarrollo del mismo. Por estas causas desde el nacimiento del hombre comienza a realizar excavaciones, que hoy le llamamos túnel utilizándolas para diversas funciones. Tanto tuneleros, como mineros durante sus labores atraviesan gran variedad de macizos, a partir de medios rudimentarios disponibles, el inteligente uso de las manos y de sus elementales útiles, sin olvidar la imprescindible habilidad para protegerse ellos mismos frente a posibles desprendimientos mediante la colocación de fortificaciones, soportes y entibación. (López Jiménez C. 1998).

Pero hoy no se trata sólo de concebir obras lineales, como estas, que comunica dos puntos para el transporte de personas o materiales, sino también de construir amplios espacios subterráneos e inmensas cavernas de propósitos diversos; bien de carácter lúdico, como el urbanismo subterráneo, bien con función de depósito y almacenamiento, tanto de combustible, alimentos, residuales, plantas, hidroeléctricas, potabilizadoras, refugios, etcétera. Algunos son acueductos, contruidos para el transporte de agua (para consumo, para aprovechamiento hidroeléctrico o para el saneamiento). También hay túneles diseñados para servicios de telecomunicaciones. Incluso existen túneles para el paso de ciertas especies de animales. Algunos conectan zonas en conflicto o tienen carácter estratégico, ya que sirven como refugio (Sagasetta C.2006).

Nuestro país, también recibe los impactos de las crisis medio ambiental y económica que atraviesa el mundo, a pesar de ello se toman medidas para alcanzar la invulnerabilidad y planifica acciones que le permitan minimizar el impacto de dicha crisis. En estos momentos se llevan a cabo numerosas inversiones en varias esferas, tales como: la salud, la educación, el deporte, la vivienda, el turismo, la industria minera del níquel, las obras hidrotécnicas, el transporte, entre otros campos.

Para ello, desde 1990 se está desarrollando una de las obras de ingeniería más importantes comenzadas en el siglo XX, el Trasvase Este-Oeste que en su

proyección concibe la construcción de canales, presas, puentes y túneles. El que 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 y construir un sistema de obras que trasvasara el agua mediante interconexiones a los lugares antes mencionados.

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

El proyecto del túnel Levisa-Mayarí Tramo IV está compuesto por cuatro objetos de obras fundamentales. El túnel principal constituye el elemento primordial que responderá directamente a la función de trasvasar agua con un caudal mínimo de 30 m<sup>3</sup>/s (Rodríguez Rojas J. 2005). La entidad relacionada con la construcción subterránea realiza el estudio del macizo rocoso donde está enclavada la obra, pero aún existen insuficiencias en el alcance y contenido de esos estudios, ya que las obras continúan presentando problemas de estabilidad, influyendo esto directamente en el gasto de recursos, ocasionado porque los macizos rocosos no son diferenciados para su estudio y adopción de medidas, de acuerdo al comportamiento variado que puede presentar las diferentes litologías en la excavación subterránea.

A esta problemática se le puede dar una solución práctica más efectiva, al aplicar varios métodos de clasificaciones geomecánicas, de gran aplicación mundial, tales como: Protodyakonov, Bieniawski, Barton, Romana, Plamstrom, González de Vallejo, entre otras, las que en general determinan la calidad del macizo rocoso mediante un índice de calidad, cuya finalidad es dividir al macizo en dominios estructurales, cada uno de ellos con características similares, como: litología, espaciado de grietas, entre otros. Los límites de un dominio estructural pueden

coincidir o no con rasgos geológicos, tales como fallas o diques. (López Jiménez C. 1998), (González de Vallejo).

Estas clasificaciones geomecánicas son ampliamente aplicadas a nivel mundial ya que proporcionan varios parámetros geomecánicos del macizo rocoso, con los que es posible evaluar el comportamiento del mismo y definir el posible sostenimiento a emplear. En las obras del Traspases Este-Oeste, de manera general y con el fin de definir el sostenimiento adecuado, se caracteriza el macizo en el frente de arranque de los túneles con la clasificación geomecánica de Barton (1974), a través de su índice de calidad Q y no se han aplicado otras clasificaciones geomecánicas, aun cuando continúan los problemas de estabilidad. Es por ello que la presente investigación enfrenta el siguiente problema:

**Problema.**

La necesidad de proponer una clasificación geomecánica que permita evaluar el comportamiento del macizo rocoso en el frente de arranque del Túnel Levisa-Mayarí Tramo IV.

**Objeto.**

Las clasificaciones geomecánicas

**Objetivo.**

Proponer una clasificación geomecánica que permita evaluar el comportamiento del macizo rocoso en el frente de arranque del Túnel Levisa-Mayarí Tramo IV.

**Campo de acción.**

El macizo rocoso en el frente de arranque del Túnel Levisa-Mayarí Tramo IV.

**Hipótesis**

Si se realiza un análisis de las diferentes clasificaciones geomecánicas empleadas en túneles, se aplican las mismas para la caracterización del macizo rocoso y se ajustan sus parámetros al comportamiento de los mismos es posible definir la clasificación geomecánica que permita evaluar el comportamiento del macizo en el frente de arranque del Túnel Levisa-Mayarí Tramo IV.

### **Objetivos específicos**

1-Análizar y comparar las clasificaciones geomecánicas de Barton (1974), Bulichev (1996), RMR (Rock Mass Rating) Bieniawski (1973), GSI (E. Hoek, V. Marinos y P. Marinos) 1994, 1998, 2000, 2001 y 2005, aplicadas a túneles.

2-Aplicar las diferentes clasificaciones geomecánicas al macizo rocoso del túnel Levisa-Mayarí Tramo IV del Traspase

3-Determinar los parámetros geomecánicos del macizo rocoso.

4-Ajustar los parámetros geomecánicos al comportamiento del macizo rocoso.

5-Fundamentar la propuesta de clasificación geomecánica identificada a emplear en el túnel Levisa Mayarí Tramo IV.

# **CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO Y ESTADO ACTUAL DE LA TEMÁTICA**

## **Introducción**

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

### **I.1 Clasificaciones geomecánicas**

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

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

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

A continuación se muestran las actividades concretas a efectuar en las dos etapas que se han considerado: Etapa de Proyecto: Las actividades típicas que se realizan durante el proyecto en relación con las clasificaciones geomecánicas son las siguientes:

- Efectuar el estudio geológico de la traza por donde va a ejecutar el túnel.
- Evaluar litologías, resistencia de la roca, estado de las juntas y presencia de agua.
- Dividir el perfil longitudinal del túnel en tramos de características similares.
- Calcular el índice de clasificación de cada tramo. Es conveniente el uso de al menos dos sistemas de clasificación.
- Asignar a cada tramo un sostenimiento, en función del índice de calidad obtenido de las propuestas del sistema de clasificación y de la propia experiencia del proyectista.
- Etapa de Obra: Durante la obra las clasificaciones geomecánicas se usan según se explica a continuación:
  - Es necesario tener previstos varios tipos de sostenimiento y los criterios para aplicar cada uno de ellos. Generalmente éstos deberán venir incluidos en el Proyecto Constructivo del túnel.
  - En cada avance calcular en el frente el índice de calidad de la roca.
  - En función del índice de calidad obtenido y de otros criterios que pudiera haber definidos, aplicar el tipo de sostenimiento correspondiente.

A lo largo de los años se han desarrollado y usado varios sistemas de clasificación.

**Terzaghi** en 1964, es y ha sido de gran aplicación en Norteamérica. **Bulichev** (1981-1996) evalúa la estabilidad mediante un índice de calidad que al igual que Barton coincide en algunos parámetros descriptivos y agrega otros. **Protodiakonov**, esta clasificación se ha extendido mucho por los países del Este de Europa, donde se utiliza para el sostenimiento de túneles. **Lauffer** desarrollada por el autor en 1958, basada en la experiencia de un estudio sistemático sobre el tiempo en que permanecían estables excavaciones en diferentes tipos de roca, incluso en minas abandonadas. **RQD** (Deere et al en 1963) es un índice obtenido de la recuperación de testigos en sondeos. **RSR** (Rock Structure Rating) es un índice de calidad para caracterizar macizos rocosos y fue definido por Wickham, Tiedeman y Skinnes en 1972. **Louis** 1974, que contempla la resistencia de la roca y el tamaño de los bloques del macizo. **Barton** y otros investigadores establecen una clasificación geomecánica a partir del índice de calidad de la roca basado en descripciones visuales de las características del macizo 1974. Vallejo, **RMR** (Rock Mass Rating) Bieniawski, esta clasificación fue empleada por el autor en 1973 y ha sido ligeramente modificada en posteriores publicaciones. Laubscher, **ROMANA** 1985, 1988, 1991, 1995, **GSI** (E. Hoek, V. Marinos y P. Marinos) 1994, 1998, 2000, 2001 y 2005 entre otras que según autor tienen limitantes de aplicación como suelo, taludes.

Los más antiguos fueron los de Terzaghi, Protodyakonov y Lauffer. Hoy en día, para túneles, básicamente se usan dos sistemas, el de Bieniawski (1979) o RMR y el de Barton (1974) o sistema Q.

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

Existen opiniones contrapuestas sobre las clasificaciones geomecánicas:

En contra

- No tienen base científica, son meras compilaciones empíricas.
- Simplifican excesivamente los problemas reales.

- Son peligrosas porque personas sin la adecuada formación pueden pensar que, con una simple aplicación del método clasificatorio, han resuelto un proceso complejo.

A favor

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

En cualquier caso, las clasificaciones constituyen una herramienta válida más.

### **I.1.1. Clasificación del RQD (Deere, 1963)**

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

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

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

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

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

En función del R.Q.D se establece la clasificación de las rocas

### **I.1.2. Clasificación de Barton (1974)**

El Sistema Q o Clasificación de Barton fue desarrollado en Noruega en 1974 por Barton, Lien y Lunde, del Instituto Geotécnico Noruego (*Ver Figura 1.1*). Se basó su desarrollo en el análisis de cientos de casos de túneles construidos principalmente

en Escandinavia. Actualmente el Nuevo Método Noruego de túneles al diseño de las excavaciones se basa directamente en la metodología de Barton.

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

El valor de Q se obtiene de la siguiente expresión:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF} \quad (1)$$

Donde cada parámetro representa lo siguiente:

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

$J_n$ , varía entre 0.5 y 20, y depende del número de familias de juntas que hay en el macizo.

$J_r$ , varía entre 0.5 y 4, y depende de la rugosidad de las juntas.

$J_a$ , varía entre 0.75 y 20, y depende del grado de alteración de las paredes de las juntas de la roca.

$J_w$ , varía entre 0.05 y 1, dependiendo de la presencia de agua en el túnel.

**SRF**, varía entre 0.5 y 20, son las iniciales de Stress Reduction Factor, y depende del estado tensional de la roca que atraviesa el túnel.

(Ver Anexo1)

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

Se selecciona el grado de importancia de la excavación definido mediante un índice ESR (Excavation Support Ratio) (Ver figura1.1) que viene a ser un factor de seguridad. Barton homogeneiza los diámetros de las excavaciones a un diámetro “equivalente”, que se define **De = D/ESR**.

Los valores de ESR aparecen en la figura 1.1 La referencia (ESR=1) corresponde típicamente a los túneles. Un cambio en ESR conduce implícitamente a una percepción diferente de la seguridad que aceptamos para una determinada obra.

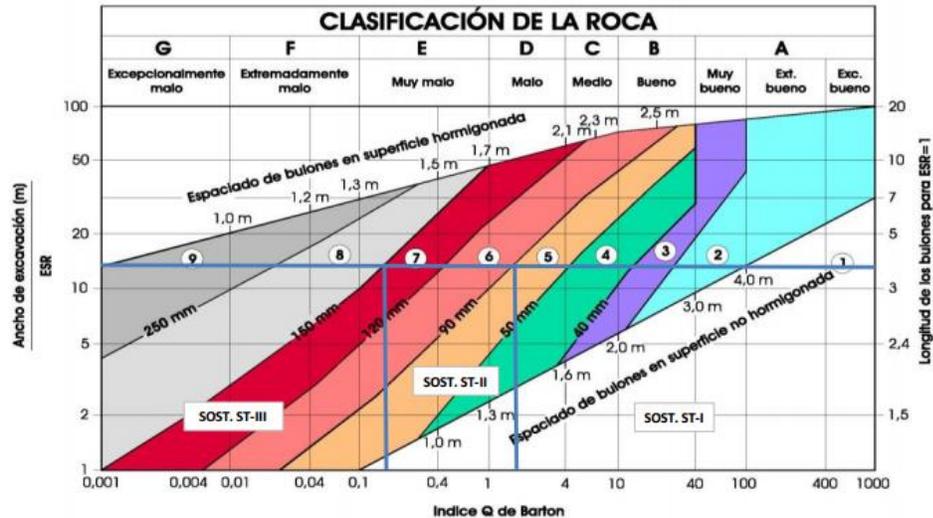


Gráfico de Barton para el Túnel de Via Doble

### Categorías de sostenimiento:

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

Figura No 1.1. Propuesta de sostenimiento según el índice de calidad Q. Barton, 2000.

#### 1.1.2.1. Análisis cualitativo del método de clasificación geomecánica

##### Ventajas:

1- Es una de las clasificaciones geomecánicas más empleadas para túneles y desarrolla bastante bien la estimación del sostenimiento. (González Vallejo L. et al 2002 Ingeniería geológica. Prentice Hall Madrid)

2- Facilidad, rapidez y bastante efectivo en la determinación del índice de calidad del macizo, su efectividad depende de la adecuada visualización y selección de los parámetros necesarios para el cálculo.

3-Hace una caracterización adecuada y necesaria del macizo rocoso para determinar su índice de calidad.

#### Desventajas:

1- Este índice Q no tiene en cuenta la orientación de la excavación con respecto a los principales planos de agrietamiento y propone excesivas subdivisiones de las rocas de buena calidad, cuyo comportamiento frente a las excavaciones se pudiera resumir para mejor empleo.

2- La Q de Barton no tiene en cuenta el estado de la superficie encima de la excavación.

3- El índice de calidad del macizo Q de Barton tiene en cuenta el estado tensional del macizo mediante el índice SRF, y este no determina las tensiones de manera cuantitativa, sino que para valores de SRF las tensiones pueden ser bajas, medias, altas y muy altas.

4- No tiene en cuenta la resistencia de la roca como un parámetro esencial.

5- Esta Clasificación fue creada en macizos graníticos de plataforma principalmente en la península de Escandinavia (Noruega), por lo que ha tenido que adaptarse a las condiciones de Cuba.

#### **I.1.3 Clasificación de Bulichev (1996)**

Esta clasificación parte del cálculo del índice S.

El cálculo o apreciación para la estabilidad se determina:

$$S = f \left( \frac{K_m}{K_n} \right) \left[ \frac{K_r K_w}{(K_t K_A K_\alpha)} \right] \quad (2)$$

Donde:

**f**: Coeficiente de fortaleza según Protodiakonov

**K<sub>m</sub>**: Coeficiente que caracteriza la alteración del macizo en dependencia al modulo **n** relativo al agrietamiento

**K<sub>n</sub>**: Coeficiente que cuenta la influencia del número del sistema o familias de grietas

$K_r$ : Coeficiente que cuenta la superficie de las grietas, que se cuentan como significativas

$K_w$ : Coeficiente que determina la humedad

$K_t$ : Coeficiente que cuenta con la reapertura (t) sin completamiento (grietas sin relleno).

$K_A$ : Coeficiente que determina el completamiento de las grietas que se cuenta como significativa.

$K_\alpha$ : Coeficiente que cuenta la orientación del túnel en dependencia al ángulo de inclinación entre la superficie de las grietas y el eje del túnel.

El indicador S caracteriza el grado de estabilidad del macizo.

### **Cálculo de presión minera Excavación Horizontal**

$$P_B = \frac{\gamma H}{R_c} * \frac{K_2 K_3}{\eta \xi} \quad (3)$$

Donde:

$\gamma$ : Densidad

$H$ : Altura

$R_c$ : Resistencia a compresión (límite de fortaleza en un solo eje)

$K_2$ : Coeficiente de concentración de tensiones por los trabajos realizados en el túnel.

$K_3$ : Coeficiente de cambio de tensiones como resultado de la influencia de otros trabajos.

$\eta \leq 1$  que es el coeficiente de debilitamiento del macizo.

$\xi \leq 1$  es el coeficiente del largo de la fortaleza del macizo.

Influencia del macizo. El campo inicial de tensiones en un macizo no alterado caracteriza las dimensiones de la dirección de las tensiones principales. En el campo gravitacional las tensiones principales se calculan por la siguiente ecuación.

$$\sigma_1 = \sigma_x = \gamma H ; \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_y = \lambda \gamma H \quad (4)$$

Donde:

$\sigma_x$  - Tensiones verticales (MPa)

$\sigma_y$  - Tensiones horizontales (MPa)

$\gamma$ - Peso del macizo en medida de volumen (MNw/m<sup>3</sup>)

$\lambda$ - Coeficiente lateral de presiones en el macizo no alterado

(Ver Anexo 2)

### *1.1.3. 1. Análisis cualitativo del método de clasificación geomecánica*

#### Ventajas:

- 1- Este método de clasificación tienen en cuenta la resistencia de la roca como unos de los parámetros esenciales para determinar la calidad del macizo rocoso.
- 2- Esta clasificación evalúa adecuadamente el macizo rocoso así como que brinda parámetros de sostenimiento.
- 3- Determina las tensiones, las características deformacionales del macizo y las presiones mineras que actúan en excavaciones horizontales.
- 4- Hace una caracterización adecuada y necesaria del macizo rocoso para determinar su índice de calidad.
- 5- Tiene en cuenta un parámetro que analiza el comportamiento del agrietamiento tanto en el frente como en la superficie del túnel.

#### Desventajas:

- 1- No es rápida y sencilla su aplicación.
- 2- Esta metodología no está identificada a nivel internacional.

### **1.1.4. Clasificación de Bieniawski (1979.)**

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

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

$$\text{RMR} = \text{A1} + \text{A2} + \text{A3} + \text{A4} + \text{A5} + \text{B} \quad (5)$$

Esta clasificación geomecánica se basa en el índice RMR "Rock Mass Rating", que hace una estimación de la calidad del macizo rocoso teniendo en cuenta los siguientes factores:

**A1-** Resistencia Compresiva de la roca.

**A2-** Índice de la Calidad de la Roca - RQD.

**A3-** Espaciamiento de Juntas.

**A4-** Condición de Juntas.

**A5-** Presencia de Agua.

**B** - Corrección por orientación.

Estos factores se cuantifican mediante una serie de parámetros definiéndose valores para dichos parámetros, cuya suma, en cada caso nos da el índice de Calidad del RMR que varía entre 0 – 100.

(Ver Anexo 3)

#### *1.1.4.1 Análisis cualitativo del método de clasificación geomecánica*

##### Ventajas:

1- Es una de las clasificaciones geomecánicas más empleadas para túneles y desarrolla bastante bien la estimación del sostenimiento. (González Vallejo L. et al 2002)

2- Facilidad, rapidez y efectivo en la determinación del índice de calidad del macizo, su efectividad depende de la adecuada visualización y selección de los parámetros necesarios para el cálculo.

3- Fue desarrollada para estimar sostenimiento y el RMR se ha ido consolidando como un índice geomecánico para la evaluación de las propiedades del macizo rocoso, utilizado igualmente para la evaluación del sostenimiento. (González Vallejo L. et al 2002)

4- Tiene en cuenta la orientación de las discontinuidades por lo que establece un parámetro corrector. (González Vallejo L. et al 2002)

5- Analiza la resistencia de la roca como uno de los parámetros esenciales para pronosticar la estabilidad de un macizo.

Desventajas:

1- No analiza el comportamiento de los bloques o prismas de desprendimiento.

2- Aún sigue sin satisfacer la necesidad de obtener un índice de calidad del macizo rocoso con rapidez y práctica, así como contribuir con la seguridad humana.

**I.1.5. Clasificación GSI. (GEOLOGICAL STRENGTH INDEX 2005)**

El método GSI se basa en la estimación de la Resistencia a la deformación y la deformabilidad de la masa rocosa para diferentes condiciones geológicas.

En otras palabras el GSI es un índice que indica la disminución de la resistencia de un macizo rocoso, con respecto a la roca intacta, para diferentes condiciones geológicas y que se define en el terreno por observación de dos parámetros principales: estado de fracturación y calidad de las discontinuidades.

El **GSI** se debe dar en un rango de valores como se observa en la Tabla 1.1 donde se estima a partir de la descripción geológica.



parámetros pertinentes para la predicción de deformabilidad y fuerza masiva en la roca.

Para el establecimiento de las diferentes propiedades se tuvieron en cuenta los siguientes criterios:

### **Criterio de rotura generalizado de Hoek & Brown**

Para ello es lo mismo decir que este criterio es simplificado y se expresa como:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \{m_b \sigma'_3 / \sigma_{ci} + S\}^a \quad (6)$$

Donde:

$m_b$ : valor reducido de la constante del material  $m$ , el cual viene dado por:

$$m_b = m_i \{GSI - 100 / 28 - 14D\} \quad (7)$$

$s$  y  $a$  son constantes para un tipo de roca dados por las siguientes relaciones:

$$s = \exp\{GSI - 100 / 9 - 3D\} \quad (8)$$

$$a = 1/2 + 1/6 (e^{-GSI / 15} - e^{-20 / 3}) \quad (9)$$

$D$  es un factor que depende sobre todo del grado de alteración del macizo rocoso por los efectos de las excavaciones (mecánicas o voladuras) o por la relajación de esfuerzos, variando desde 0 para macizos rocosos in situ inalterados hasta 1 para macizos rocosos muy alterados.  $\sigma_{ci}$ : es la resistencia uniaxial compresiva para la roca intacta.

- **Módulo de deformación**

El módulo de deformación  $E_m$  para un tipo específico de roca viene dado por:

$$E_m (GPa) = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} * 10^{((GSI-10)/40)} \quad (10)$$

Donde:

$E_m$ : Módulo de deformación en GPa

Estimación del parámetro  $a$

$$a = 1/2 + 1/6 (e^{-GSI / 15} - e^{-20 / 3}) \quad (11)$$

Donde:

**D:**Factor que depende sobre todo del grado de alteración del macizo rocoso por los efectos de las excavaciones (mecánicas o voladuras) o por la relajación de esfuerzos, variando desde 0 para macizos rocosos in situ inalterados hasta 1 para macizos rocosos muy alterados.

$\sigma_{ci}$ : Resistencia uniaxial compresiva para la roca intacta

**Em:** Módulo de deformación.

$\sigma_{cm}$ : Resistencia a la compresión simple de la masa de roca.

**C:** Cohesión

$m_i$ : Parámetro que depende de las propiedades de la roca, que se determina empíricamente por tablas

$\varphi^\circ$ : Ángulo de fricción interna.

**S:** Dependen de las propiedades de la roca y de su grado de fracturación antes de estar sometidas a tensiones que provoquen su rotura. El parámetro S es la medida de la disminución de la resistencia a la compresión simple de la roca debido a la fracturación, mientras m influye en la resistencia al corte del material.

**a:** Parámetro definido por la fórmula  $a = 1/2 + 1/6 (e^{-GSI/15} - e^{-20/3})$  (12)

$m_b$ : Valor reducido de la constante del material  $m_i$  el cual viene dado por:  $m_b = m_i \exp\{GSI - 100 / 28 - 14D\}$  (13)

(Ver Anexo 4)

#### *1.1.5.1 Análisis cualitativo del método de clasificación geomecánica*

##### Ventajas:

1- Es un buen descriptor de la calidad del macizo rocoso, más rápido de estimar que RMR y en especial Q.

2- Es un método ya aplicado para este macizo serpentinitico durante los últimos 3 años en la determinación del índice de calidad del mismo con resultados positivos.

3- Desarrolla el índice de calidad de manera fácil, rápida y se aproxima bastante a la naturaleza real en cuanto a calidad del macizo, su efectividad depende de la manera en que decida desarrollar este método, determinando las propiedades del macizo de manera empírica o al unísono con los resultados de laboratorio, así como de la experiencia de sus ejecutores.

4- Este método determina el índice de calidad de un macizo bajo el criterio de las propiedades del mismo; elemento principal e imprescindible para un método efectivo según apreciación de diferentes criterios, así como que funciona bajo el planteamiento del factor escala.

5- Esta clasificación tiene en cuenta un análisis del estado tensional del macizo así como su propiedad de resistencia como un elemento importante a analizar.

#### Desventajas:

1-No es una clasificación bien desarrollada para estimar parámetros de sostenimientos en un túnel.

2- Su efectividad depende de una adecuada apreciación del descriptor.

Estos sistemas de clasificaciones no definen todas las condiciones geomecánicas de la roca. Dado, por ejemplo, que ninguna clasificación ha sido adecuadamente verificada por medidas de presión en el sostenimiento real de los túneles, ninguna de ellas se ha convertido en un sistema estándar general. Por consiguiente, las clasificaciones del macizo rocoso han sido necesarias para la comunicación del conocimiento y experiencia adquirida por los ingenieros y geólogos en lugares con diversas condiciones geológicas y con diferentes soluciones de sostenimiento y, de esta manera, poder ser útil en nuevos proyectos.

Estas metodologías, aunque son factibles en la actualidad, no son de empleo normalizado. Por ejemplo, no clasifican el material, sino que permiten determinar el campo de tensiones in situ para su empleo en cálculos numéricos. Otras razones para no poderse haber creado una clasificación universal, es la gran cantidad de parámetros que deben ser considerados, la imposibilidad de cuantificar todos esos parámetros y la dependencia del comportamiento del macizo rocoso de la estructura

desarrollada (túnel, cimentaciones, taludes, etc.), lo cual limita el campo de aplicación del sistema. No obstante, esto no debe ser observado como un fracaso, puesto que el empleo de más de una clasificación es recomendado y aplicado a nivel mundial. Por ejemplo la clasificación geomecánica de Deere (1979) desde su surgimiento constituye un parámetro fundamental en las clasificaciones que le preceden y que en su esencia, define el grado de fracturación del macizo, su índice RQD es empleado en las clasificaciones de Bieniawski y la Barton. El sistema RMR, desarrollado por South African Council of Scientific and Industrial Research, y el sistema Q, desarrollado por Norwegian Geotechnical Institute. Dado que ambos sistemas de clasificación dividen el macizo rocoso en distintas clases de similares características que pueden ser fácilmente evaluables mediante observaciones visuales o simples, se puede esperar que exista una correlación entre ambas. Desde la primera correlación presentada por Bieniawski en 1976, numerosos autores han presentado diferentes correlaciones basadas en análisis de regresión de datos de RMR y Q obtenidos de proyectos de túneles y minas en distintas partes del mundo. Ninguna clasificación se ha impuesto sobre las otras, y habitualmente se recomienda el empleo de más de una en el mismo proyecto.

Considerando los análisis expuestos, además de la clasificación geomecánica Barton (Q), actualmente en los estudios del macizo de los túneles del trasvase y como parte de la presente investigación se emplean las clasificaciones geomecánicas de Bulishev (S), Bieniaeski (RMR) y Palmstrom (1995) (GSI) de Hoek y Marinos.

## **I.2 Estado actual de la temática**

Deere et al. (1967) establece el índice de calidad de la roca “Rock Quality Designation” (RQD), el mismo se basa en la recuperación modificada de un testigo (el porcentaje de recuperación del testigo de un sondeo). Este índice depende directamente del número de fracturas y del grado de alteración del macizo.

En 1972, Wickham, Tiedemain Y Skinner del U. S. Bureau of Mines, (Blanco, 1998. Moreno, 1998). Establecen los criterios para la obtención del RSR (Rock Structure Rating). 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 estos factores

El ingeniero Bieniawski (1973) presentó la clasificación "Rock Mass Rating" (RMR) y modificada sucesivamente 1976, 1979, 1984 y 1989. Esta clasificación permite hacer una clasificación de las rocas 'in situ' y estimar el tiempo de mantenimiento y longitud de un vano. Se utiliza usualmente en la construcción de túneles, de taludes y de cimentaciones. Consta de un índice de calidad RMR, independiente de la estructura, y de un factor de corrección.

Bulichev en la década de los años 70, (Bulishev, 1982. Martínez, 2000) 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. Durante esta misma década aparecen otras Clasificaciones Geomecánicas de Macizo Rocosos, como las de, FRANKLIN, (1970 y 1975) y Louis en 1974, (Moreno, 1998. González de Vallejo, 1998. López Jimeno, 1998) que han tenido menos seguidores. La sencillez de los métodos propuesto por Bieniawski (1973) y Barton, Lien Ylunde (1974), Blanco, (1998). (González de Vallejo, 1998. López Jimeno, 1998. Moreno, 1998) contribuyeron definitivamente a su rápida aceptación y expansión. Palmstrom en 1995 y 1996 (Palmstrom, 1998) 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 sostenimientos en excavaciones subterráneas.

La clasificación "Slope Mass Rating" de Romana (1985, 1983, 1995) es una adaptación del RMR de Bieniawski a taludes, mediante la aplicación de los factores de corrección adecuados.

Romana (1997) propuso la Clasificación del SMR (Slope Mass Rating), propuesto para evaluar la calidad del macizo rocoso en taludes, cuyo índice se obtiene del

RMR de Bieniowski, definiéndose unos factores de ajustes por orientación de las discontinuidades y por el método de excavación. (González de Vallejo, 2002)

Torres (2004), en su libro, hizo análisis geomecánico de varias minas y obras civiles en Perú y concluyó que se debe tener en cuenta el sistema de monitoreo de los componentes estructurales del macizo rocoso, una parte integrante de las operaciones mineras, para la detección y control de los signos de inestabilidad potencial, antes, durante y después de la construcción de dichas obras mineras, con la finalidad de garantizar la seguridad, verificación de la validez de los modelos conceptuales; propiedades del macizo rocoso usadas en los cálculos para el diseño y el control de la implementación del tratamiento para remediar y/o mitigar el ecosistema impactado.

Bieniawski (2011) señaló que es primordial evitar elegir un único método de diseño, justificándolo con “no teníamos el tiempo y el dinero” para afrontar la aproximación correcta y que cada uno de los tres métodos de diseño (el empírico, el analítico y el observacional) tiene virtud y juega un determinado papel. Además, las clasificaciones geomecánicas empíricas RMR o Q, representan un gran número de experiencias prácticas sobre casos históricos y proporcionan un criterio técnico veraz y actual. En cuanto al método teórico, los criterios analíticos de resistencia y deformabilidad del macizo rocoso son fundamentales, puesto que incluyen la relación entre la resistencia del macizo rocoso y los esfuerzos existentes en vistas a la determinación de factores de seguridad. Y en cuanto al método observacional, las medidas de convergencia y deformaciones durante la construcción, resultan imprescindibles para comparar las predicciones con el comportamiento real, permitiendo así revisar las hipótesis y estimaciones asumidas en el diseño. Reiteró también que es un error el hecho de que el RMR no se puede usar en rocas de muy mala calidad, y que se puede aplicar el RMR en Clase 5 perteneciente a la roca de mala calidad con  $RMR < 20$ , solo, cuando el análisis de los datos se hace de manera adecuada.

En los años 60, los trabajos de T. Hagerman (Cartaya, 2001) diferencian cinco tipos de macizos P según su estabilidad, para lo cual parte del grado de debilitamiento estructural que ellos presentan, desde macizos totalmente estables (macizos

homogéneos e isótropos) 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.

A finales de la década 50, Lauffer (Moreno, 1998; Cartaya, 2001), propuso una clasificación, también para túneles, que posee un carácter cualitativo. Se da una clasificación del macizo rocoso y a partir de ella efectúa recomendaciones para la elección del sostenimiento, introduciendo el concepto del claro activo. El inconveniente que presenta ésta, 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.

Cabrera et al. (2012) y Cabrera & Samaniego (2013) aplicaron una metodología práctica de diseño geomecánico para las labores subterráneas, empleando el método de explotación por sub-nivel con la aplicación de criterios empíricos y numéricos, para optimizar las dimensiones de las excavaciones y pilares, y mantener la estabilidad del equilibrio del macizo rocoso; con el fin de alcanzar una alta productividad y bajos costos de explotación con alto grado de seguridad.

González Vallejo L, (2002) Las investigaciones geológicas de los túneles son en general, más costosas que en otras obras de ingeniería. Sin embargo, el no dedicar suficientes medios a estos estudios puede conducir a situaciones imprevistas, “cuando el terreno no se investiga adecuadamente, el terreno es un riesgo”. La inversión adecuada en los estudios geólogo-geotécnicos depende de la complejidad geológica, longitud del túnel, espesor del recubrimiento, etc. Y puede llegar al 3 % del presupuesto de la obra; por debajo de este porcentaje aumentan los casos de túneles con problemas y por encima de los imprevistos mínimos.

Prueba y error es un método que se basado en el arte del descubrimiento para obtener el conocimiento y aplicarlo a la investigación científica, consiste en probar una alternativa y verificar si funciona basado en las experiencias, si es así se tiene una solución, pero en caso contrario si el resultado es erróneo se intenta nuevamente otra solución.

Analizado este método como científico, donde los científicos seleccionan solo un conjunto reducido de alternativas a probar sobre la base de sus conocimientos previos del tema El método no está dirigido a la resolución "ciega" de un problema, sino a la identificación de la explicación o causa correcta de un proceso mediante pruebas.

Científicos como Enrique Dans (2017).Plantea en una excelente entrevista en [www.madresfera.com](http://www.madresfera.com), la simple cercanía a un medio físico o intelectual no garantiza mayor ni mejor afinidad. Jóvenes y mayores aprendemos por prueba y error. O, mejor dicho, encadenamos errores hasta lograr un aprendizaje efectivo y eficaz: real y con una tasa de error mínimamente admisible.

Jóvenes y adultos compartimos, afortunadamente, la necesidad de experimentar para aprender y saber. Probar y equivocarse/acertar es inevitable.

Trata de un proceso continuo cuyos resultados van mejorando con las sucesivas experiencias. Ser conscientes de esta realidad puede eliminar expectativas inalcanzables.

En todo proceso de experimentación en el que existe la posibilidad de errar hay riesgo de que el error sea importante.

El análisis de resultados es un elemento clave de la prueba y error científica.

### **I.3 Actualidad de la temática en Cuba**

Cuba es un país subdesarrollado que con el paso de los años trata de ponerse al día con los avances de las investigaciones y las construcciones ingenieriles, este es un método el cuál va influenciando en nuestro desarrollo económico, desde el triunfo de nuestra revolución hemos incursionado en las construcciones subterráneas tales para la defensa nacional con la construcción de túneles populares para el albergue de personas y para almacenamiento de mercancías, para el paso de vehículos como lo son los túneles viales, y para el trasvase de agua desde el Oriente hacia el Occidente del país.

El conocimiento geológico en los túneles es sumamente importante, la geología más que ningún otro factor determina el grado de dificultad y el costo de una excavación subterránea. Este conocimiento no solo es necesario para proyectar adecuadamente el túnel, sino fundamental para evitar sobrecostos, accidentes y retrasos imprevistos. Aunque el conocimiento geológico groso modo abarca el conocimiento ingeniero geológico se puede decir que el conocimiento esencial es el ingeniero geológico que es el específico necesario para cualquier tipo de obra.

Es necesario y evidente realizar estudios ingeniero geológicos en los túneles del trasvase para conocer el comportamiento del macizo rocoso durante la toma de decisiones en cuanto a las actividades mineras a realizar, esta labor es sumamente importante porque le da inicio a muchas actividades.

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

Cosella Guilarte D. (2009) analiza el macizo rocoso donde se laboró el túnel 2 del trasvase Sabanalamar-Pozo Azul, se realizó un estudio para conocer las características físico- mecánicas de las rocas y la evaluación geomecánica del macizo rocoso para cada tramo de túnel. Determinó las características del

sostenimiento utilizado. Además del análisis geomecánico, se realizó estudios de los áridos usados y propuso nuevos áridos para brindar al hormigón proyectado mayor resistencia y calidad, buscando minimizar los costos de sostenimiento.

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

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

Deere(1963), la clasificación de Bulichev (1996), la clasificación de Bieniawski (1979) y la clasificación de Barton (1974). Hace un estudio detallado de las clasificaciones de excavabilidad más aceptadas, del que se obtiene que estas clasificaciones, en el mejor de los casos y cuando son usadas convenientemente, pueden ofrecer criterios preliminares sobre como resulta más adecuado realizar el arranque de la roca, pero que nunca ellas deben ser utilizadas como criterio básico, debido a la insuficiente fundamentación que poseen. Considera posible emplear estas clasificaciones como un criterio más a la hora de elegir el método de arranque, por lo que se define cuáles de estas clasificaciones se adecuan a cada tipo de macizo y obra estudiada. Por último realiza la propuesta de un sistema de indicaciones metodológicas, que posibilitan con su empleo lograr una correcta fundamentación de la elección del método de arranque de la roca a emplear, durante el laboreo de excavaciones subterráneas.

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

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

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

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

### **I.3.1. Breve reseña de las investigaciones y diseños anteriores de los túneles Levisa-Mayarí.**

Blanco Blázquez J.L. y R. M. Martínez, en el año 2009 realizaron Investigaciones Ingeniero-Geológicas e Hidrogeológicas del Trasvase Este-Oeste. Tramo Sagua-Melones. (Túnel Levisa-Melones). Tramo II y Tramo III. Etapa: Ingeniería Básica. En el cual se ofrecen los resultados del levantamiento ingeniero-geológico, características hidrogeológicas y geofísicas del Tramo investigado (Tramo II del Túnel Levisa-Melones), donde se estudió el agrietamiento en los afloramientos de rocas en la Calicata de entrada al final del Tramo I e inicios del Tramo II, fundamentado en la caracterización de este, relacionado con los parámetros que determinan la estabilidad del macizo tales como: Densidad de grietas por m<sup>2</sup>,

abertura, espaciamiento entre grietas, características de las paredes y del relleno, continuidad y orientación. Este Tramo tiene una longitud de 1800 m con una dirección de unos  $30^{\circ}$  al NE partiendo del estacionado 0+000.00 en el final del Tramo I ya construido hasta la Cala No 3, donde se produce una inflexión de  $15^{\circ}$  más al NE y donde además se produce la unión con el túnel de conexión 1.

La precisión de los trabajos fue para la zona a una escala 1:10 000, tomando como base el Modelo Digital del Terreno (MDT) realizado por la Agencia de Investigaciones Regionales de GEOCUBA para el Estudio Ingeniero-Geológico a Escala 1:10000 Tramo Levisa-Melones, la que fue mejorada con la utilización del GPS Leica SR20 y la incorporación de nuevas descripciones y mediciones de campo.

Quintas Caballero F. (2014), realiza el estudio de las Características Geológicas e Ingeniero Geológicas túnel Levisa –Mayarí. Tramo IV-V Etapa: Ingeniería Básica. Este informe recoge los resultados del análisis regional litológico- estructural del área y perfil por donde se proyectó la traza del túnel de trasvase Levisa- Mayarí para lo cual se realizó el estudio de los resultados obtenidos por las calas 8,9 y 11, la tomografía central del tramo IV y los resultados de la sísmica de refracción, la documentación del levantamiento ingeniero geológico realizado en el tramo IV y la información geológica contenida en el informe “Estudio ingeniero geológico a escala 1:10 000. Tramo Levisa – Melones.

Blanco Blázquez J. L. (2015) en el trabajo Investigación Ingeniero Geológica e Hidrogeológica Túnel de Trasvase Este-Oeste. Tramo Sagua-Mayarí.(Túnel Levisa-Mayarí).Tramo V Y Túnel De Conexión No 3 Etapa: Ingeniería Básica y de detalle, expresa los resultados de la aplicación principalmente de los métodos geofísicos que aclaran el cuadro geológico del área, así como la aplicación del levantamiento geológico, con el objetivo principal de estudiar las características del subsuelo a partir de la interpretación de las propiedades obtenidas mediante la geofísica, correlacionándola con investigaciones realizadas en tramos contiguos (Tramos III y Tramo IV) donde se emplearon todos los métodos incluyendo la perforación y algunos de ellos ya construidos (Tramo III) o en proceso de construcción (Tramo IV),

todo esto con el fin de hacer un pronóstico con la información aproximada para la perforación del túnel y para comenzar las labores constructivas hasta tanto no esté el completamiento de todos los aditamentos necesarios importados para la ejecución de las perforaciones necesarias, que calibrarían los métodos geofísicos con la realidad del macizo y permitirían hacer las pruebas necesarias de permeabilidad, petrografía, carotage de pozos o cualquier otra técnica que acerque más el pronóstico de los investigadores a la realidad técnica.

Para realizar los trabajos de campo y gabinete se contó con planos topográficos, así como la información existente de trabajos de investigaciones realizados en otros tramos del trasvase, los cuales fueron analizados exhaustivamente.

Blanco Blázquez J. L. (2014).Informe Ingeniero Geológico integrador, el mismo consistió en un análisis regional usando informaciones locales de los tramos investigados y la información regional aportada por el Estudio Regional Básico escala 1:10 000 realizado por la Agencia de estudios Regionales de GEOCUBA el cual se denominó: Características geológicas e ingeniero geológicas del Túnel Levisa –Mayarí con fecha de terminación en noviembre de 2014.

Ochoa Quesada A. y A. Hernández (2016). Elaboran varios informes de Asistencia Técnica de los frentes de trabajo en el túnel Levisa-Mayarí, a solicitud de la Dirección del Trasvase, en dicho documento realizan descripciones de los frentes de trabajos, se determinan los planos principales máximos donde fue posible medirlos, se hace un análisis de los bloques elementales y se comparan los resultados de las investigaciones anteriores con las ejecutadas in situ, empleándose para esto los Programas Dips v5 y Unwedge v3.0, para finalmente brindar el índice de calidad del macizo rocoso por la metodología de Barton.

#### *1.3.1.1 Descripción del proyecto*

El túnel Levisa Mayarí está compuesto por el túnel de Conexión III que sirve de acceso al túnel Tramo IV ya en ejecución. El mismo trasvasará un caudal mínimo de 30 m<sup>3</sup>/s (gasto forzado) con una pendiente constructiva para el drenaje en el interior del túnel de 0.0026<sup>0</sup> y 0.001<sup>0</sup>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, etcétera. La zona de estudio está enclavada en el sistema orográfico o grupo montañoso Nipe-Cristal-Baracoa, el relieve es del tipo montañoso con elevaciones máximas en la traza del túnel hasta 208m y mínimas de hasta 118 m aproximadamente según el MDT en escala 1: 25 000 del área estudiada, la sección del túnel es del tipo ovoidal y tiene dimensiones de 6.00 m de ancho y 5.60m de altura.

La preocupación principal está dada en la predicción del comportamiento de las fracturas con la variabilidad del comportamiento de las rocas, por lo que se debe analizar las cargas o las fuerzas a las que están siendo sometidas, así como el análisis de los esfuerzos, deformaciones y la energía almacenada, para finalmente analizar las características de las discontinuidades, fallas, deslizamiento o las deformaciones de las rocas.

## CAPÍTULO II – CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

### II.1 Ubicación Geográfica.

El Túnel Levisa-Mayarí es una obra subterránea que va desde la Presa Levisa a la Presa Mayarí en el río Mayarí. Toda la zona investigada está entre las coordenadas Lambert  $X_1=622000$  a  $X_2=636000$  y  $Y_1=215000$ ,  $Y_2=221000$  en las hojas cartográficas 1:25 000 de Mayarí 5077-I (Ver Figura No1.2). La parte investigada es el Tramo IV, desde los estacionados dados a continuación, que se encuentran entre las coordenadas Lambert Norte  $X_1= 623254.65$ ,  $X_2= 625797.31$  y Este  $Y_1= 218941.78$ ,  $Y_2= 219294.40$ (Ver Tabla 1.2).

**Tabla 1.2. Ubicación Geográfica. Túnel Levisa-Mayarí Tramo IV**

Punto	Norte	Este
Estacionado inicial 0+125.77	623 254.65	218 941.78
Estacionado final 2+692.77	625 797.31	219 294.40

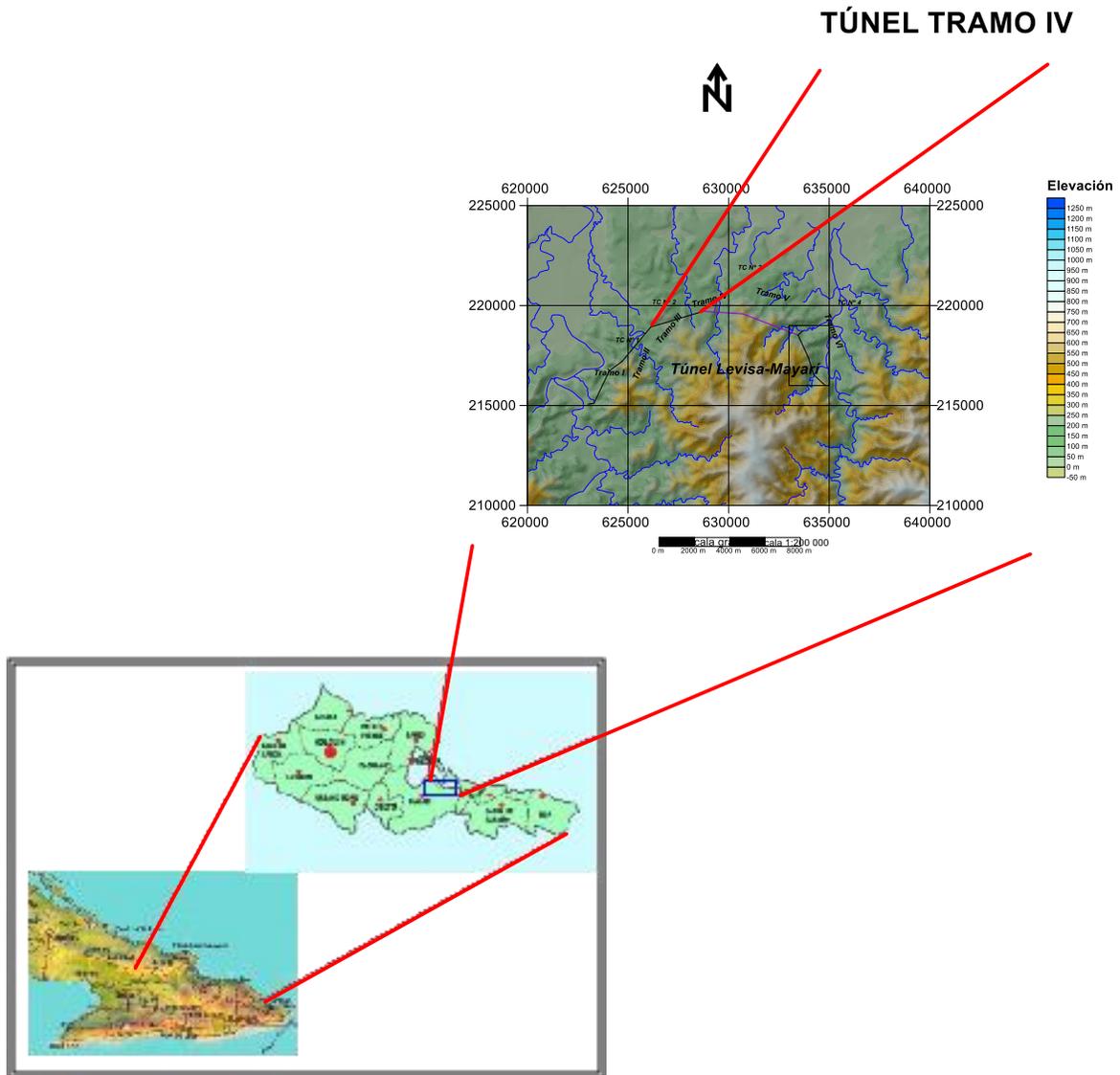


Figura No 1.2. Ubicación Geográfica.

## II.2 Clima

Dentro del 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.

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.

La precipitación anual en el Túnel Levisa-Mayarí oscila entre valores de 1475 a 1517 mm según el Mapa de Lluvia media híper-anual 60 años de **N. Fernández y O. Maximova, 1992** actualizado en el 2005.

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, 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.

### **II.3 Vegetación**

La vegetación presente en el área es variada. 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 encontramos 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 y montículos pedregosos

La vegetación presente en la zona es variada principalmente abundan los charrascales, sobre todo en la zona donde la pendiente es más pronunciada. En algunas zonas se observan otras plantas sembradas no típicas de la zona. (Ver *Figura 1.3*)



## **II.4 Orografía y red hidrográfica**

### Orografía.

La zona, está enclavada en el sistema orográfico o grupo montañoso Nipe-Cristal-Baracoa, se caracteriza por un relieve montañoso, con cotas que van desde 3.65 m a 1207.798 m y valor medio de 309.01 m (*Ver Figura No1.2*). Las pendientes van desde  $0.0027^{\circ}$  hasta  $86.19^{\circ}$  y una media de  $21.5^{\circ}$ .

Esta región está caracterizada por su diversidad y complejidad, existiendo llanuras fluviales amplias en los principales ríos mencionados y valles profundos en forma de V en los cursos superiores, pero sobre todo con el predominio de un relieve montañoso.

En el área las cotas van desde 59.49 m a 507.56 m, con valor medio de 205.21 m. Las pendientes van desde  $0.0516^{\circ}$  hasta  $63.70^{\circ}$ , con valor medio de  $19.22^{\circ}$ .

### Red Hidrográfica.

Dentro de las principales corrientes fluviales se destacan en todo el Túnel Levisa-Mayarí por el oeste el río Mayarí y por el este el río Levisa, así como los arroyos La Ceiba, Arroyo Blanco, Cajimaya, Río Grande, Brazo La Trocha, Mandinga y muchas corrientes superficiales más. 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 a abril y los más elevados en el período de lluvias, mayo a octubre.

Las características del relieve y el régimen de las precipitaciones han favorecido en la formación de una densa red hidrográfica que corre generalmente de sur a norte (*Ver Figura No 1.2*), mientras que las características generales del escurrimiento en la zona están basadas en crecidas y descensos rápidos.

### **II.5 Análisis Sísmico**

El área de estudio se encuentra ubicada en el Oriente del país, la zona con más incidencias sísmicas debido principalmente por la actividad producida entre la placa norteamericana y la placa del Caribe, que a su vez producen cierta actividad en los sistemas de fallas en el oriente del país.

Según la Normas Cubana NC: 46 1999, el área de estudio se encuentra ubicada en la zona sísmica 1B, una zona de riesgo sísmico muy bajo que puede ocasionar daños en las construcciones, debiéndose tomar medidas sismo resistentes en todas las estructuras y obras en función de la importancia socioeconómica de las mismas. (*Ver figura 1.4*)

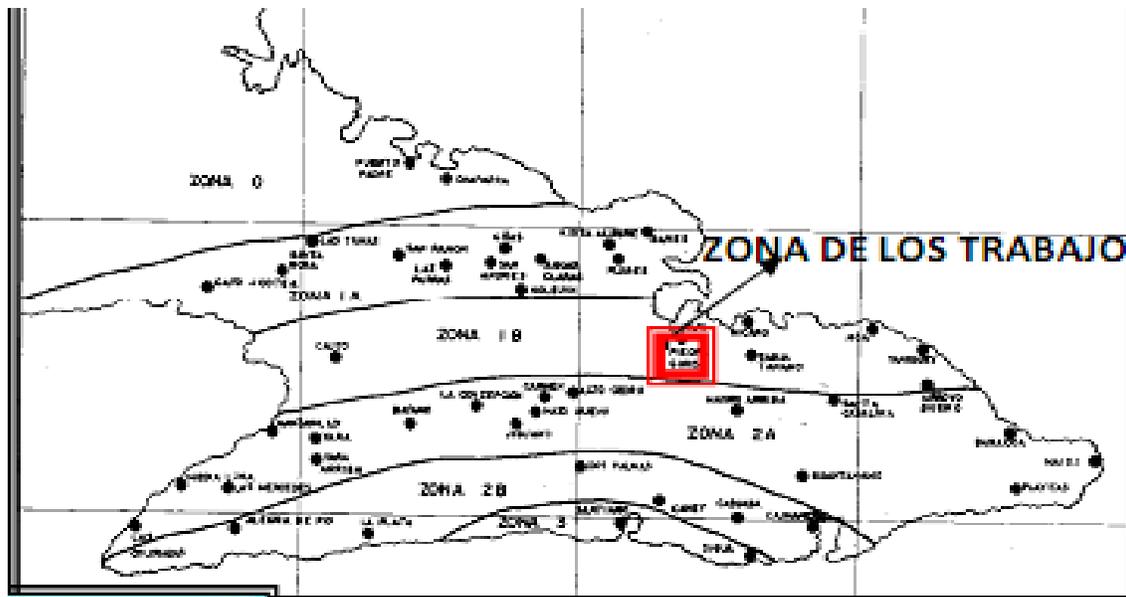


Figura No 1.4 Mapa de Zonación Sísmica de la Región Oriental de Cuba (Norma Sísmica)

En muchas ocasiones el mayor peligro sísmico a que una zona está sometida proviene no sólo de las zonas activas localizadas en ella, sino además de zonas vecinas que por sus características sismotectónicas marcan una significativa peligrosidad.

### II.5.1 Análisis histórico sísmico

El Servicio Sismológico Nacional de Cuba (SSNC-SENAIS), cuenta con una red de estaciones a lo largo de todo el país, en las que se encuentran los reportes históricos y registros instrumentales de más de 16000 terremotos desde 1528 al 2005(Chuy 1999 y SSNC, 2006), para el área de estudio. Más del 90% de estos eventos sísmicos se localizan en la zona sismogénica Oriente (Bartlett–Caimán) que es la principal estructura sismoactiva del país. (Ver figura 1.5)

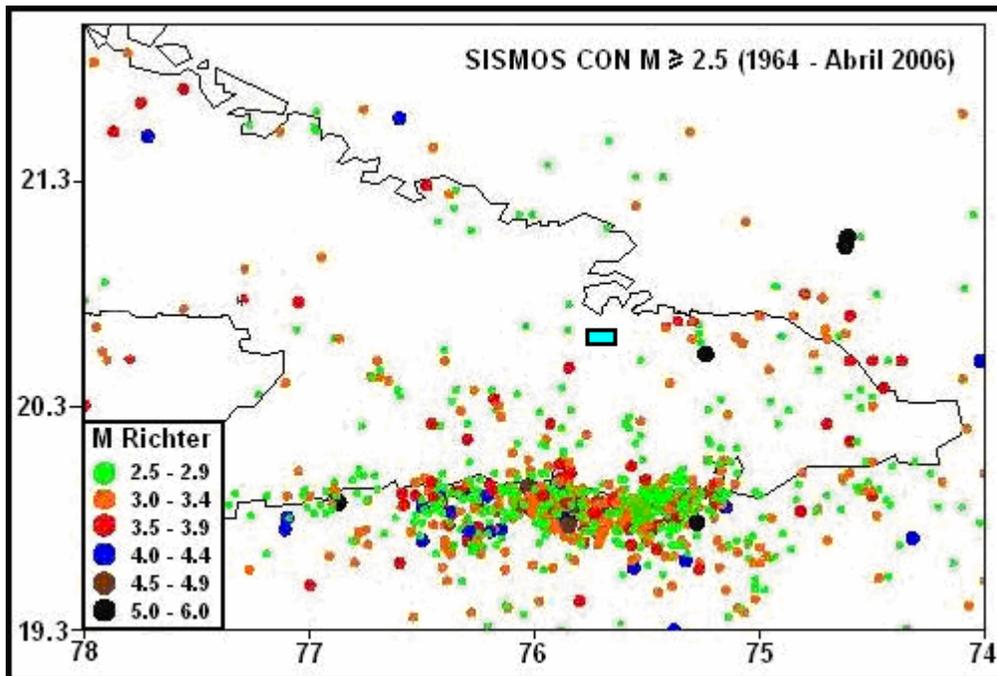


Figura No 1.5. Terremotos con magnitudes mayores que 2.5 Richter registrados por el SSNC en la región Oriental (1964 – Abril 2006). Se destaca con un rectángulo azul la zona de ubicación del Tránsito.

Se han identificado reportes de terremotos con epicentros cercanos a la zona en estudio y otros que han producido ciertos valores de intensidad. (Ver tabla 1.3)

**Tabla 1.3. Afectaciones estimadas en términos de intensidad para la zona del Tránsito.**

Año	Magnitud (Ms)	Zona del epicentro	Intensidad estimada en el Tránsito MSK – EMS
1551	5.8	Bayamo	4.0
1624	5.2	Bayamo	3.0

1766	7.6	Santiago de Cuba	7.0
1842	8.2	La Española	7.0
1852	7.3	Santiago de Cuba	7.0
1887	7.9	La Española	6.5
1914	6.2	Gibara	5.5
1932	6.8	Santiago de Cuba	6.0
1946	8.1	La Española	5.0
1947	6.8	Santiago de Cuba	5.5
1998	5.5	Moa	4.5

Para suplir la falta de información macrosísmica relacionada con la perceptibilidad de sismos históricos en la zona del Tránsito, Chuy (1999) facilitó el modelado de efectos de terremotos fuertes con epicentro en las zonas sismogénicas (ZS) que representan mayor amenaza para la región de estudio.

- El sismo de 1944, que se reporta con una intensidad máxima de 5.0 MSK en la ciudad de Sagua de Tánamo, pudo reconstruirse y modelarse en base a la descripción de sus efectos en diferentes localidades, resultando de la misma, que su epicentro pudo estar en los 20.50 de Latitud Norte y los 75.70 de Longitud Oeste (cerca del Tránsito Mayarí) y su magnitud alcanzar un valor del orden de los 4.7 Richter, lo cual lo convierte en un sismo significativo para ese territorio.

-Finalmente un detalle de la sismicidad en las cercanías del Tránsito se muestra en la **Figura 1.6**. Nótese que hacia la parte Este del área en estudio se han manifestado actividad sísmica de baja energía y se corresponden con los sismos del 17 de abril de 1985 (M=0.9), 19 de julio de 1989 (M=1.2), 23 de junio del 2002 (M=1.0) y 12 de febrero del 2003 (M=1.0), y que al Sur se localiza el epicentro del sismo del 15 de diciembre de 1944 de magnitud 4.7 Richter (marcado con una flecha amarilla).

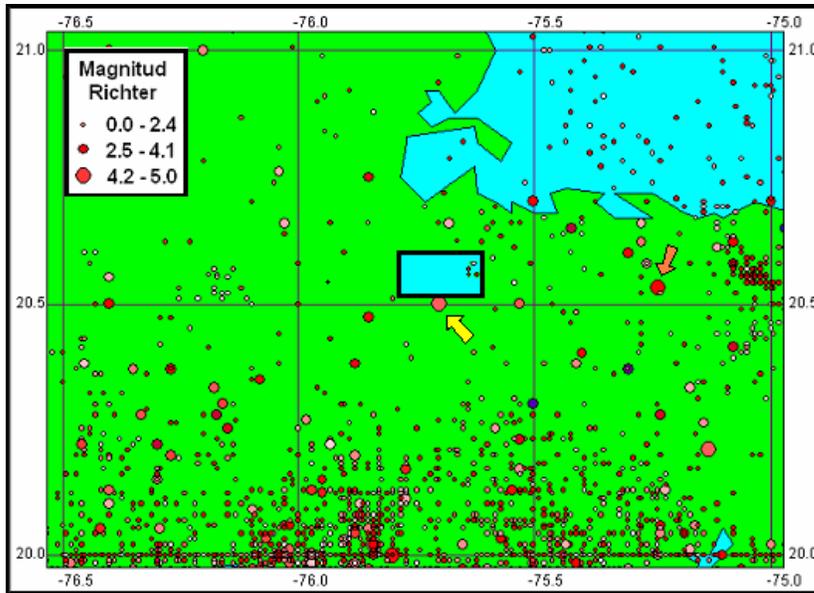


Figura No 1.6. Detalle de la actividad sísmica de la zona de ubicación del Tránsito y sus alrededores considerando los terremotos de todas las magnitudes del periodo 1528 – 2003. Se destaca con un rectángulo azul la zona de ubicación del Tránsito.

En la zona de estudio se observan pocos eventos con magnitudes mayores de 2.5 porque la misma se caracteriza por eventos de baja energía que oscilan entre 0.1 y 2.0 de magnitud Richter. Estos constituyen el 90 % de todos los sismos reportados por las estaciones del SSNC y que se han podido ir registrando en un orden ascendente por la alta sensibilidad con que cuenta este nuevo sistema, a partir de 1998. La sismicidad vinculada con magnitudes menores de 1.5 Richter, generalmente se considera como “sismicidad de fondo” en las estimaciones de peligrosidad sísmica, formando parte de la sismicidad de interior de placas, la cual no produce ningún efecto en el área de estudio.

### II.5.2 Análisis del suelo antes la actividad sísmica

Para evaluar el peligro sísmico del área estudio se hace necesario estimar la máxima magnitud de terremotos posibles antes las condiciones del tipo de suelo, por lo que el comportamiento de la actividad de las fallas es de mucha importancia, así como el registro de sismos de baja energía que es un elemento fundamental en la actividad de las fallas. Consecuentemente, en estas regiones los datos geológicos,

geofísicos, geomorfológicos y geodésicos representan un papel preponderante para la determinación de los parámetros de dichas zonas.

## **II.6 Análisis Hidrogeológico**

El túnel Tramo IV en toda su longitud hay abundantes zonas de goteos de aguas inferiores a 5 l/min y lo atraviesan varias fallas, por lo que se pudiera decir que la afluencia de agua existente en el mismo es por escurrimiento entre las grietas, que a mediano o largo plazo pudiera lavarse el relleno existente entre ellas, provocando desprendimientos de bloques o cuñas de rocas; esto se puede corroborar ya que en las calas realizadas no se encontró nivel freático, solo pudieran encontrarse bajos porcentos de humedad entre el contacto serpentinita y laterita. Lo mismo pudiera decirse para las aguas de escurrimiento pluvial, que a pesar de que el macizo es del tipo montañoso, en el que las aguas superficiales corren sin problema hacia las elevaciones menores, estando la superficie con alto grado de meteorización y abundantes fracturas, facilita la infiltración de las mismas hacia el túnel.

## **II.7 Tipologías ingeniero-geológicos presentes en la zona y área de estudio.**

Blanco Blázquez J.L (2015) Informe Integral Trasvase Este-Oeste. Tramo Sagua Mayarí. Túnel Levisa-Mayarí. Tramo IV y Túnel de Conexión 3. Investigación Ingeniero Geológica. En este informe se integran todos los resultados investigativos realizados por diferentes empresas donde a las litologías ingeniero geológicos presentes en la zona estudiada se le denomina de la siguiente forma.

- Tipo I Serpentinita intacta o masiva formada por bloques cúbicos con hasta tres familias de grietas.
- Tipo II. Serpentinita en bloques irregulares, medianos y multifacetados.
- Tipo III. Serpentinita en bloques irregulares, muy tectonizadas.
- Tipo IV. Serpentinitas de bloques muy finos desintegradas mal seleccionadas y cementadas.
- Tipo V. Serpentinitas foliadas, laminadas y cizalladas hasta esquistosas.

- Tipo M. Serpentinitas muy meteorizadas que puede llegar a contener lateritas mezcladas.

En los informes de Asistencia Técnica Túnel se pudo apreciar que en el macizo rocoso de serpentinita se observó dos tipos litológicos fundamentales.

**Tipo II-III. Serpentinitas en bloques irregulares, medianos, multifacetados hasta muy tectonizados:** aunque se menciona en nombre principal de serpentinitas, pueden ser diferentes tipos de peridotitas con diferente grado de serpentización hasta serpentinitas puras, con fábrica brechosa desde media a fina que en profundidad, entre estos bloques se caracterizan por presentar tamaño medio entre grietas de 10-30 cm de color predominante de verde claro hasta oscuro casi negro, existe un relleno serpentinitico, en ocasiones carbonatos y más raramente silicitas que le pueden dar un aspecto de roca maciza aunque por su dureza clasifican como rocas medias a blandas, cerca de la superficie producto a la influencia de la meteorización o intemperismo, este relleno si es serpentinitico, puede convertirse en arcilloso, si es carbonatado, puede lavarse y dejar los espacios vacíos y abiertos con escasa cohesión entre los bloques y si es silicificado, esta se conserva con mayor dureza que la roca de caja e incluso, expuesta en la superficie, puede dar el aspecto de panal de abejas típico en algunas áreas donde afloran estas rocas, aunque este caso no se ha observado en el área ni en la zona de estudio, porque el relleno predominante observado ha sido mayoritariamente serpentinitico y más raramente carbonatado(Ver figura 1.7)

**Tabla 1.4. Tipo II-III. Serpentinitas en bloques irregulares, medianos, multifacetados hasta muy tectonizados, valores a profundidad de 65 - 74m.**

PROPIEDADES	ESTADO	U/M	VALOR
Densidad	Seca	kN/m <sup>3</sup>	22.4-23.2 (22.9)
	Saturada	kN/m <sup>3</sup>	23.05-23.09
	Sumergida	kN/m <sup>3</sup>	23.1 – 23.8(23.5)
Peso específico			2.56- 2.58 (2.57)
Porosidad		%	7.7 - 11.6 (9.23)

Absorción (Abs)		%	5 - 10 (6.66)
Resistencia a la compresión	Seca	MPa	20.8 -25.8 (22.8)
	Saturada	MPa	6.9 - 8.6 (9.2)
Coeficiente de ablandamiento		-	0.32 - 0.33 (0.40)
Coeficiente de fortaleza de Protodiakonov (F.K.P)	Saturado	MPa/10	0.69 – 0.86 (0.92)
Resistencia a la tracción	Seca	MPa	0 .66– 3.01 (1.6)
	Saturada	MPa	0.21 - 0.87 (0.53)
Módulo de Young	Seco	MPa	1130 - 1290 (1400)
	Saturado	MPa	480 – 558 (384)

**Tipo IV-V. Serpentinitas de bloques muy finos desintegradas mal seleccionadas y cementadas, que pueden ser foliadas, laminadas y cizalladas hasta esquistas:** Se caracterizan por la presencia de numerosas grietas que le dan aspecto brechoso fino, las que en superficie pueden estar abiertas o rellenas de arcillas y en el interior del macizo rellenas de minerales serpentiniticos, cuando son esquistas, pueden presentarse pliegues inarmónicos con budinas de dimensiones variables. Las serpentinitas brechosas finas presentan dureza media a blanda y las esquistas presentan una dureza blanda y las budinas dureza moderadamente dura, por lo general están medianamente meteorizadas, debido a que por ser zonas de fallas, las aguas penetran a mayor profundidad, meteorizando las rocas a grandes profundidades convirtiendo los minerales serpentiniticos, los piroxenos y olivinos en minerales arcillosos, principalmente montmorillonitas. El color es verdoso con bandas oscuras y claras con aspecto abigarrado. Donde están más meteorizadas, relacionadas con el Tipo M y con pendientes abruptas, son muy inestables produciéndose desprendimiento de rocas en taludes. (Ver Figura 1.7)

**Tabla 1.5. Tipo IV-V. Serpentinitas de bloques muy finos desintegradas mal seleccionadas y cementadas, que pueden ser foliadas, laminadas y cizalladas hasta esquistosas, valores a profundidad de 65 - 74m.**

PROPIEDADES	ESTADO	U/M	VALOR
Densidad	Seca	kN/m <sup>3</sup>	22.9-23.0 (22.95)
	Sumergido	kN/m <sup>3</sup>	23.6-23.5 (23.5)
	Saturada	kN/m <sup>3</sup>	23.8-23.8 (23.8)
Peso específico			2.57 - 2.57 (2.57)
Porosidad		%	8.8 - 9.1 (8.95)
Resistencia a la compresión	Seca	MPa	5.2 - 16.2 (10.7)
	Saturada	MPa	0.6 - 1.9 (1.25)
Coeficiente de ablandamiento	Saturado	-	0.04-0.37(0.21)
Absorción (Abs)		%	8 - 13 (10.5)
Coeficiente de fortaleza de Protodiakonov (F.K.P)	Seca	MPa	0.52 - 1.62 (1.07)
	Saturada	MPa	0.06 - 0.19 (0.13)
Resistencia a la tracción	Seca	MPa	0.55 - 0.70(0.63)
	Saturada	MPa	0.13 - 0.64 (0.39)
Módulo de Young	Seco	MPa	940 - 509
	Saturada	MPa	442- 320 (381)



*Figura No 1.7 Foto No 2 Contacto visible durante la excavación del Tramo IV. Tipo II-III debajo y el Tipo IV-V arriba.*

Se puede apreciar las tipologías litológicas presentes en el tramo investigado, entre el puntal izquierdo inferior y el derecho se puede observar adecuadamente las diferencias existentes de manera visual, como lo son su color y el tamaño de los bloques.

## **CAPITULO III. APLICACIÓN DE LAS DIFERENTES CLASIFICACIONES GEOMECÁNICAS EN EL MACIZO ROCOSO DEL FRENTE DE ARRANQUE. TÚNEL TRAMO IV, LEVISA-MAYARÍ.**

Para la validación o aplicación de las metodologías de clasificaciones geomecánicas es necesario realizar un levantamiento geológico del agrietamiento, con el fin de determinar sus características fundamentales, al ser este el parámetro fundamental que evalúan las clasificaciones.

### **III.1 Descripción del agrietamiento en el túnel**

El estudio del agrietamiento como parámetro básico para el empleo de las clasificaciones geomecánicas se realiza por estacionados según el avance del túnel aproximadamente de 1.50m, el procesamiento del mismo es efectuado con los softwares Dips v5 y Unwedge v3.0.

**Tramo:** Túnel IV

**Estacionado:** 1+081.78

**Descripción:** Peridotitas serpentinizadas brechosa media, alterada de color gris claro a gris oscuro con 3 familias principales de grietas y algunas aleatorias, con relleno de material areno arcilloso.

#### **Grietas descritas:**

160°/30°, plano ondulado liso, relleno de arcilla arenosa con 1 cm de espesor, discontinuo

310°/60°, plana rugosa con relleno de material areno arcilloso, continua, distancia entre grietas 30cm.

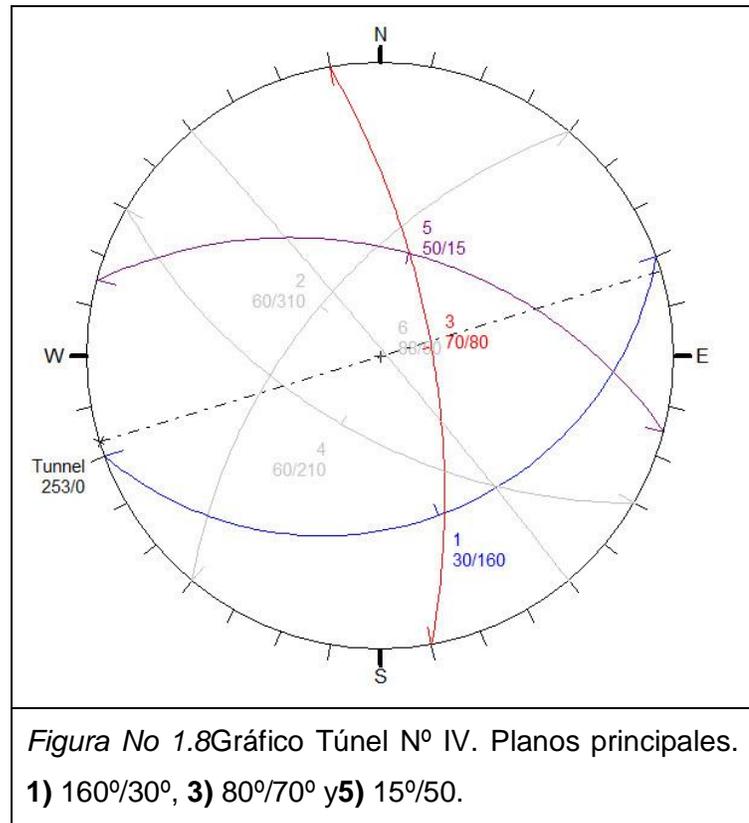
80°/70°, ondulada rugosa, con relleno de material areno arcilloso, distancia entre grietas 40cm.

210°/60°, ondulada rugosa, continua, relleno de material areno arcilloso, distancia entre grietas 60cm, discontinuo.

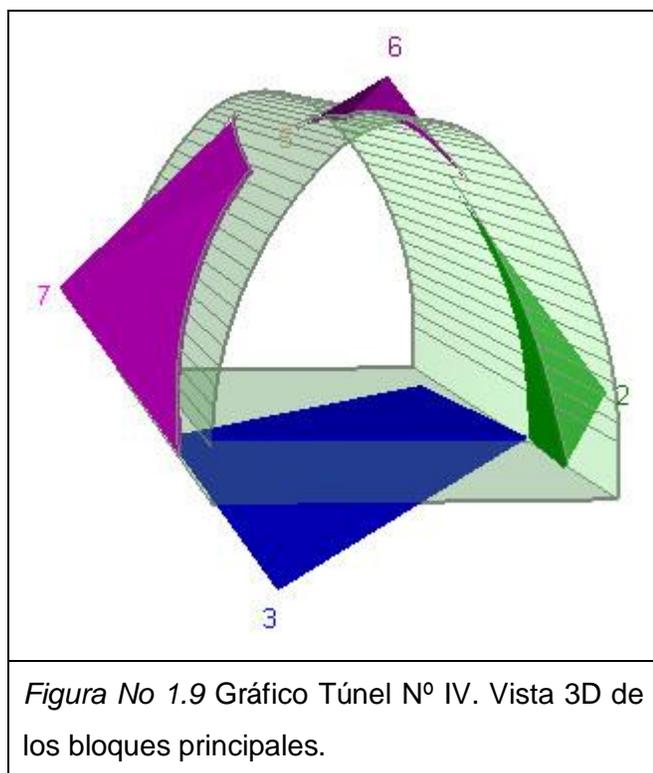
15°/50°, plano ondulado liso, relleno de arcilla arenosa con 2 a 3 mm de espesor, discontinuo.

50°/88°, plano ondulado rugoso.

### III.1.1 Proyección estereográfica del agrietamiento en el macizo y representación de los bloques y cuñas



En esta figura se efectúa la proyección estereográfica de los principales sistemas de grietas medidos en el estacionado antes mencionado, con el empleo del software Dips v.5 donde se le agregó también la dirección proyectada del túnel, se observan tres familias de discontinuidades fundamentales y otras aleatorias con rumbos predominantes de NE-SW y NW-SE.



Se obtuvo con el empleo del software Unwedge 3.0 la representación de los principales bloques presentes, donde se puede apreciar diferencias existentes entre ellos en cuanto a sus dimensiones y ubicación.

En la tabla 1.6 se representan las principales características de estos bloques de roca obtenidos con el software Unwedge v3.0.

**Tabla 1.6 Túnel N° IV. Principales características de los bloques elementales obtenidos con el software Unwedge 3.0.**

CARACTERÍSTICAS	BLOQUE IZQUIERDO INFERIOR 7	BLOQUE DERECHO SUPERIOR 2	BLOQUE DEL TECHO 6
Factor de Seguridad (FS)	0.000	0.000	0.422
Volumen (m <sup>3</sup> )	236.246	2.115	5.220
Peso (ton)	32.176	5.711	1.135

<b>Presión de soporte (ton/m<sup>2</sup>)</b>	<b>30.04</b>	<b>13.15</b>	<b>12.53</b>
---	--------------	--------------	--------------

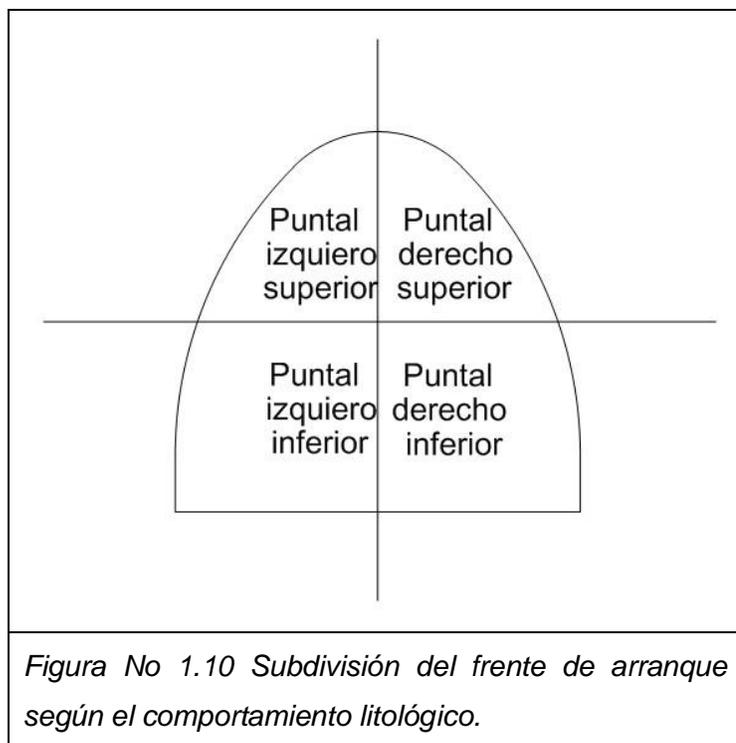
Como puede observarse en la tabla 1.6, los bloques inestables se encuentran en los hastiales del túnel con factor de seguridad muy bajo. En relación al volumen del bloque, estos se clasifican como bloques grandes según Palmstrom 1995, (Ver anexo 6)

### **III.2. Aplicación de la clasificación de Barton, Q, (1994) en el frente de arranque del túnel.**

A continuación se muestran los resultados obtenidos de la aplicación de la clasificación geomecánica de Barton por estacionados en el túnel, con lo cual se obtiene el índice Q, que representa la calidad del macizo, de igual forma se realiza el estudio para las demás clasificaciones geomecánicas empleadas y se muestran a continuación.

**Estacionado:** 1+081.78

Teniendo en cuenta la litología existente en el frente de arranque se subdividió el mismo en puntal izquierdo y derecho como aparece en la en la figura 1.10. Donde se encuentra en la parte izquierda inferior la **Tipología II-III**. Serpentinitas en bloques irregulares, medianos, multifacetados hasta muy tectonizados, y en la parte derecha la **Tipología IV-V**. Serpentinitas de bloques muy finos desintegradas mal seleccionadas y cementadas, que pueden ser foliadas, laminadas y cizalladas hasta esquistosas. (Ver Figura 1.7)



La subdivisión del frente de arranque aplicado a las clasificaciones podría ser práctico según las condiciones geológicas existentes, esto permite identificar la ubicación de las rocas según su calidad para la posterior proyección del patrón de voladura, densificar la fortificación en estas zonas y demás conclusiones.

Basado en la subdivisión del frente según la litología identificada en el estacionado antes mencionado, se procedió a clasificarlo empleando la metodología a continuación.

**Tabla 1.7. Resultados obtenidos con la metodología de Barton**

Parámetros	RQD	Jn	Jr	Ja	Jw	SRF	Clasificación
Puntal Izquierdo inferior ( <b>Tipo II-III</b> )	65	12	1,5	6	1	2,5	Q = 0,541 roca muy mala
Puntal Derecho ( <b>Tipo IV-V</b> )	33	15	1,5	8	1	2,5	Q = 0,166 roca muy mala

Basado en años de experiencias entre muchos obreros a pie de obra, ingenieros, máster y doctores dedicados al estudio geológico-minero para la construcción de los diferentes túneles de trasvase, se puede decir que el macizo rocoso del túnel estudiado hasta los estacionados medidos (*Ver tabla 1.13*) se observa y comporta de manera estable en comparación con los demás túneles a los que se les prestó el servicio de asistencia técnica. Por lo que se afirma la necesidad de ajustar las clasificaciones geomecánicas a nuestro caso de estudio según los parámetros necesario con el fin de acercarse más a las condiciones naturales que presenta el macizo rocoso serpentinitico en el que se ejecuta la construcción de esta obra. Luego de aplicada y analizada la metodología de Barton en su identificación del índice de calidad Q, es apreciable que en su metodología no tuvo en cuenta la resistencia de la roca como un parámetro esencial en la determinación de la calidad del macizo rocoso.

### III.3 Aplicación de la Clasificación de Bulichev(1996)en el frente de arranque del túnel.

Basado en la subdivisión del frente según la litología identificada en el estacionado antes mencionado, se procedió a clasificarlo empleando la metodología a continuación.

En la tabla 1.8 se muestran los resultados obtenidos aplicando la ecuación (2)

**Estacionado:** 1+081.78

**Tabla 1.8. Resultados obtenidos con la metodología de Bulichev**

Parámetros	$f$	$K_m$	$K_n$	$K_r$	$K_w$	$K_t$	$K_A$	$K_\alpha$	Clasificación
Puntal Isquierdo inferior	0,92	9	9	1,5	0,5	4	2	1,5	S = 0,0575 no estable
Puntal Derecho	0,125	2,5	9	1	0,5	4	2	1,5	S = 0,003altamente no estable

En esta clasificación el autor tiene en cuenta una serie de parámetros necesarios a tener en cuenta para clasificar un macizo rocoso lo más cercano a sus condiciones naturales, donde sus resultados están bastantes similares a las condiciones apreciables in situ.

Cálculo de presión minera en Excavación Horizontal según la ecuación 3, cuyos resultados se muestran en la tabla 1.9.

**Tabla 1.9. Resultados obtenidos con la metodología de Bulichev**

	$\gamma$	$H$	$R_C$	$K_2$	$K_3$	$\eta$	$\xi$	Presión minera
Parámetros de cálculo	0,92	9	9	1,5	0,5	4	2	$P_B = 2,27$ Mpa no estable

Estimación del campo inicial de tensiones en un macizo no alterado caracteriza las dimensiones de la dirección de las tensiones principales. En el campo gravitacional las tensiones principales se calculan por la siguiente ecuación.

$$\sigma_1 = \sigma_x = \gamma H ; \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_y = \lambda \gamma H$$

Sustituyendo:

$$\sigma_x = \gamma H = 2.04 \text{ MPa/m}^3$$

$$\sigma_y = \lambda \gamma H = 1.43 \text{ MPa/m}^3$$

En este caso la pérdida de estabilidad por Desplazamiento, Deformación y Destrucción de la roca en el contorno de la excavación se produce cuando la magnitud de las tensiones actuantes en el contorno de las excavaciones sobrepasa el valor de la resistencia de la roca.

La condición de estabilidad del macizo, en el caso más general, viene dada por la siguiente expresión.

$$\sigma - R_C = 0$$

Por lo que se puede decir que la obra analíticamente y en lo práctico se encuentra estable.

Los valores de Densidad y Resistencia a la Compresión antes seleccionados, fueron tomados los valores saturados por ser los resultados más críticos presentes y se promediaron entre los dos tipos de serpentinitas presentes.

### III.4 Aplicación de la Clasificación de Bieniawski en el frente de arranque del túnel.

La clasificación del macizo rocoso empleando la ecuación (5) se desarrolló según la subdivisión del frente como fue dicho anteriormente, así como en el mismo estacionado como se muestra a continuación en la tabla 1.10.

**Estacionado:** 1+081.78

**Tabla 1.10. Resultados obtenidos con la metodología de Bieniawski**

Parámetros	A1	A2	A3	A4	A5	B	Clasificación
Puntal Izquierdo Inferior	1	13	5	20	7	(-5)	RMR = 41 roca de calidad media
Puntal Derecho	4	8	5	20	7	(-5)	RMR = 39 roca de calidad mala

El RMR de Bieniawski clasifica al macizo rocoso bastante próximo a los análisis tacto visual para las diferentes tipologías presentes, necesarios para analizar el comportamiento natural de un macizo rocoso.

### III.5 Aplicación de la Clasificación Clasificación GSI en el frente de arranque del túnel.

El método GSI se basa en la estimación de la Resistencia a la deformación y la deformabilidad de la masa rocosa para diferentes condiciones geológicas, en este caso se elaboró una correlación entre el GSI, la resistencia uniaxial compresiva para la roca intacta y la Q de Barton calculada en el frente de explotación.

**Estacionado:** 1+081.78

Para clasificar el frente de arranque aplicando la metodología GSI, basta con observar la Tabla 1.1, y según el comportamiento del macizo rocoso en cuanto al nivel de agrietamiento, el autor le establece valores. En la tabla 1.11 se ofrecen diferentes valores relacionados con las diferentes tipologías identificadas en todo un proceso investigativo, pero para el estacionado en estudio solo observar la tipología II-III y IV-V según la subdivisión que se le asignó al frente.

**Tabla 1.11. Determinación de propiedades fundamentales en base al GSI por las descripciones de campo, así como su correlación con Barton.**

N°	Tipo	GSI	D	$\sigma_{ci}$ (Mpa)	Em (Gpa)	$\sigma_{cm}$ (MPa)	C (MPa)	Mi	$\varphi^\circ$	S	a	Mb	Q calc.
1.	Serpentinitas macivas Tipo I.	80	0	75	48.70	22.390	0.7804	30	20	0.10837	0.00237	14.7	25.710
		75	0	55	31.27	14.062	0.5026	30	19	0.06218	0.00364	12.3	19.528
		70	0	35	18.71	7.663	0.2808	30	18	0.03567	0.00542	10.3	14.554
2.	Serpentinitas en bloques irregulares, medianos, multifacetados hasta muy tectonizados. Tipo II-III.	70	0	30	17.32	6.569	0.2407	16	18	0.03567	0.00542	5.5	13.099
		60	0	25	8.89	4.015	0.1547	16	16	0.01174	0.01136	3.8	7.546
		50	0	15	3.87	1.767	0.0716	16	13	0.00387	0.02293	2.7	3.470
3.	Serpentinitas de bloques muy finos desintegradas mal seleccionadas y cementadas. Tipo IV.	50	0	10	3.16	1.178	0.0477	12	13	0.00387	0.02293	2.0	3.123
		40	0	7	1.49	0.605	0.0257	12	10	0.00127	0.04547	1.4	1.341
		25	0	5	0.53	0.271	0.0125	12	6	0.00024	0.12507	0.8	0.181
4.	Serpentinitas foliadas, laminadas y cizalladas hasta esquistas.	20	0	4	0.36	0.186	0.0087	10	4	0.00014	0.17488	0.6	0.070
		15	0	3	0.23	0.119	0.0058	10	2	0.00008	0.24440	0.5	0.021

Tipo V	10	0	2	0.14	0.068	0.0034	10	0	0.00005	0.34143	0.4	0.004
--------	----	---	---	------	-------	--------	----	---	---------	---------	-----	-------

La clasificación GSI en su metodología, Hoek y Marinos ofrecen la variante de estimar parámetros de la roca y el macizo, necesarios a analizar para la toma de decisiones que garanticen la estabilidad de la obra, sin necesidad de esperar por resultados mandados a ensayar en el laboratorio; ofrece fórmulas matemáticas que con las mismas se obtienen los valores representados en la anterior tabla 1.11, identificados por la descripción en el frente de trabajo y comparados con los resultados ensayados de las diferentes calas, por lo que se puede confirmar gran proximidad entre ambo, lo suficiente como para que se empleen, y pudiera afirmarse que son tan confiables o más debido a que se dificulta ensayar rocas del frente de avance, propuesto por clasificación de Barton de avanzar hasta 1.50 m, por lo que se asumen valores medidos por métodos geofísicos y promediados entre calas, donde la distancia entre las más cercanas al frente y utilizados sus datos se encuentran a 200 m una de la otra.

Un parámetro que se cree necesario por los investigadores e incluido en una base de datos con fórmulas propuestas para esta clasificación lo es la columna ingresada  $\sigma_{ci}$  y el índice **Qcalc**. Este índice funciona de la misma forma en que el autor ofrece sus parámetros en su metodología, esta correlación permite clasificar al macizo con GSI e identificar los mismos valores que le corresponde a la clasificación de Barton. Para ello los valores de resistencia uniaxial compresiva fueron medidos con el empleo del Esclerómetro. Para más detalle de esta metodología (Ver Anexo 4)

### III.6 Parámetros geomecánicos del macizo roco del túnel por litología.

Un análisis necesario para efectuar una propuesta de utilización de una clasificación geomecánica a un macizo, es aplicar varias de ellas y luego de conocer sus deficiencias cualitativas comparar los resultados cuantitativos de su aplicación como se ofrecen en la tabla 1.12

**Tabla 1.12. Índices de calidad obtenidos.**

<b>N°</b>	<b>Tipos Litológicos</b>		<b>Valor</b>	<b>Índice de Calidad</b>
<b>1</b>	<b>Tipo II-III</b> Serpentinitas de bloques muy finos desintegradas mal seleccionadas y cementadas. <b>Puntal izquierdo inferior.</b>	Barton <b>Q</b>	0.541	Muy Mala
		Bulishev <b>S</b>	0.575	No estable
		Bieniawski <b>RMR</b>	41	Medio
		Hoek y Marinos <b>GSI</b>	50	Mala
<b>2</b>	<b>Tipo IV-V</b> Serpentinitas foliadas, laminadas y cizalladas hasta esquistosas. <b>Puntal derecho</b>	Barton <b>Q</b>	0.166	Muy Mala
		Bulishev <b>S</b>	0.003	Altamente no estable
		Bieniawski <b>RMR</b>	39	Mala
		Hoek y Marinos <b>GSI</b>	50	Mala

En la tabla 1.12 parecen los diferentes resultados obtenidos a partir de las clasificaciones más empleadas para túneles en la actualidad, sus resultados corroboran el comportamiento del macizo rocoso en el frente de laboreo así como fue subdividido el mismo por el tipo de litología ingeniero geológica identificada. Esto afirma que el puntal izquierdo tiene una calidad de mala a media, y el puntal derecho tiene un índice de calidad de muy malo a malo, aunque se hace algo engorroso porque las distintas clasificaciones hacen subdivisiones del macizo propias de los autores, por lo que se hace difícil a simple vista unificar criterios.

### **III.7 Ajuste de parámetros de las clasificaciones geomecánicas al comportamiento del macizo rocoso en el Túnel Tramo IV, Levisa-Mayarí.**

Luego de analizar los parámetros cualitativo de las diferentes calificaciones geomecánicas, se hace necesario ajustar las clasificaciones a las condiciones de nuestro caso de estudio, ya que cada autor se basa en sus propias experiencias y en las condiciones geológicas que presentan las zonas en las que se ejecutarán la obra. Para ello se propone clasificar el macizo serpentínico en el que se está ejecutando la obra Trasvase Este-Oeste. Levisa Mayarí, unificando los diferentes criterios de autores.

1- Macizo de muy mala calidad  $Q=0,001- 5$

2- Macizo de mala calidad  $Q = 5 - 10$

3- Macizo de buena calidad  $Q = 10 - 500$

4- Macizo muy estable  $Q = 500 - 1000$

5- Macizo Altamente estable  $Q = >1000$

#### **III.7.1 Mediciones con el Esclerómetro**

Es un ensayo sencillo de campo y laboratorio, que permite estimar la resistencia a la comprensión simple de la matriz rocosa y que también se aplica a discontinuidades. Se debe tener en cuenta algunas interrupciones de aplicación como: en la roca matriz se debe evitar bloques pequeños o discontinuidades cercanas, y en superficies de discontinuidad aplicar directamente.

El ensayo consiste en lanzar una masa mediante un muelle sobre un vástago en contacto con la roca, al golpear el vástago la roca rebota la masa y queda registrado el "número de rebote".

A partir de los datos obtenidos con el martillo Schmidt sobre la matriz rocosa se calcula resistencia a la comprensión simple de la roca conociendo la densidad que es de  $22.9 \text{ KN/m}^3$

A continuación se expresan los valores obtenidos del rebote del martillo aplicado perpendicularmente al frente de arranque en el túnel antes mencionado. Para los

cuales se eliminan los 5 valores más bajos y los restantes son promediados y llevados al gráfico de Miller (1965).González de Vallejo L. 2002. (Ver Anexo 5)

**Tabla 1.13. Valores medidos con el Esclerómetro** (Manual de Instrucciones NC)

Fecha	Estacionado	Mediciones	Resistencia del Martillo Schmidt
20/10/2016 Tramo IV	0+125.77	11-10-10.5-11- <u>13-12</u> - 10- <u>11-11-11</u>	<b>16MPa</b>
22/10/2016 Tramo IV	0+120.71	11- <u>30</u> -10-10- <u>12</u> -11- <u>11.5</u> -11- <u>11-11</u>	<b>17MPa</b>
20/10/2016 Tramo IV	0+119.59	11-10- <u>13</u> -11-10-11- <u>11-19-11-11.5</u>	<b>16.5MPa</b>
17/3/2017 Tramo IV	1+081.78	11-11-11- <u>12-11.5</u> -11- 11- <u>11.5-11-12</u>	<b>16MPa</b>
20/3/2017 Tramo IV	2+697.36	11-11-10- <u>11.5</u> -10- <u>11</u> - <u>11-11.5</u> -10- <u>11</u>	<b>14.5MPa</b>
22/3/2017 Tramo IV	2+694.02	10-10- <u>13-19-40</u> -11- 11-11- <u>11-20</u>	<b>25MPa</b>
23/3/2017 Tramo IV	2+692.77	10- <u>15</u> -11-11-10-11- <u>11-11-11-11.5</u>	<b>16MPa</b>

### III.7.2 Ajuste de la ecuación de Barton para correlacionarla con el empleo del Esclerómetro

Tras los análisis cualitativos de la clasificación de Barton, bajo condiciones necesarias de ajuste para poder clasificar este macizo serpentinitico, se propone el siguiente ajuste de la ecuación de Barton (1) basado en más de 70 mediciones(Ver *Tabla 1.13*), un parámetro esencial a contemplar como así lo hacen otras clasificaciones y su resultado se aproxima cada vez más a la difícil situación de identificar un índice de calidad lo más próximo a lo real admisible lo es la resistencia de la roca, para ello se establece el siguiente ajuste con el empleo del Esclerómetro,

ya que su empleo es necesario, manual y ágil para aplicar en el frente del túnel cada vez que se avance. (Ver tabla 1.14)

**Tabla 1.14. Índice que clasifica el macizo rocoso según su resistencia.**

Condición de Resistencia	Valor de resistencia a la compresión Esclerómetro-Martillo Schmidt (MPa)	Índice corrector $K_R$
Macizo de muy baja resistencia	1 - 5MPa	1 - 1.12
Macizo de baja resistencia	5 - 15MPa	1.12
Macizo de resistencia media	15 - 50 MPa	1.12
Macizo resistente	50 - 200 MPa	1.12
Macizo altamente resistente	>200 MPa	2

Luego de analizadas varias teorías de clasificación de la roca según su resistencia a compresión simple, como la Tabla de Duncan y Jennings, Precons, FKP, Índice de Excavabilidad de (Hadjigeorgiou y Scoble 1990) entre otros análisis consultados; se clasificó al macizo según su condición de resistencia para rangos de valores identificados en bibliografías y condicionados al ajuste con el esclerómetro.

Para ajustar los resultados obtenidos por la clasificación de Barton (1), debido a que en análisis visuales y analíticos en consulta con diferentes especialistas, con el empleo de diferentes métodos de clasificación geomecánicas y con las experiencias de varios años de prestación de servicios en la ejecución de esta obra, se llegó a la conclusión de que la calidad obtenida por el índice Q se puede mejorar, donde se identificó el parámetro clave para esto, la Resistencia a Compresión Simple de la roca.

Se procedió con un análisis experimental, basado en el método matemático científico e investigativo **Prueba y error** (Dan E. 2017), Quispe, E. (2013).

El mismo se basa en el arte del descubrimiento para obtener el conocimiento y aplicarlo al problema investigativo. Consiste en probar una alternativa y verificar si funciona basado en las experiencias, si es así se tiene una solución, pero si el resultado es erróneo se prueba nuevamente. Este método no está dirigido a la resolución ciega de un problema, sino a la identificación de la explicación o causa correcta de un proceso mediante pruebas. En otras palabras, probar y equivocarse hasta acertar.

Luego de seleccionar los parámetros de condición de resistencia, con sus previos valores de resistencia a carga puntual Mpa con el Esclerómetro, y se subdividieron las categorías asignadas por Barton en su método de clasificación como se muestra en el acápite III.7. Se procedió a encontrar un valor o hasta un rango de valores que mejoraran este índice determinado en la ecuación (1). Para ellos comenzó a desarrollarse una base de datos en una hoja Excel donde se fue probando desde el primer valor designado en la categoría de Macizo de muy mala calidad (0.001) a multiplicarlo por números que aumentarían su valor inicial pero que no llegaran a sobrepasar el rango al que pertenece para mantener las diferentes categorías asignadas por el autor. Se identificó que el número debe ser mayor que 1 pero debe ser igual o menor que 1.12 porque a partir de valores mayores de 1.12, el valor al cual se le asignó en la subdivisión fue 1.13, y multiplicado por el mayor valor obtenido en la ecuación de Barton (1) 4.444 sobrepasa el rango modificado y reducido de calidad, Ver Anexo 7, este fue el funcionamiento tras el cual se probó varias veces y se identificó el valor o los valores tras los cuales al multiplicarlo por el índice de calidad Q, lo mejoraría satisfactoriamente y corroborado con sus resultados en la obra.

#### Análisis experimental a pie de obra

**Estacionado:** 1+081.78

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

### Puntal Izquierdo

$$Q = \left( \frac{65}{12} * \frac{1.5}{6} * \frac{1}{2.5} \right) * 1.12$$

$$Q = 0.541 * 1.12$$

$$Q = 0.605$$

### **III.7.3 Ajuste de correlación entre el GSI y la Q de Barton para el cálculo de la estabilidad del macizos rocosos serpentinitico.**

El GSI siglas en inglés de Geological Strength Index o Índice de Resistencia Geológica en español, se ha aplicado ya por diferentes autores extranjeros como E. Hoek, V. Marinos y P. Marinos (1994, 1998, 2000, 2001 y 2005) y en nuestro país comenzó a ser empleado por (Quintas Caballero F.) a solicitud de la DIP-Trasvases (2014), trabajo que se continuó aplicando y perfeccionando en los Tramos V y VI del Túnel Levisa-Mayarí por Blanco Blázquez, J. L.(2015, 2016 y 2017). Este método permite evaluar con rapidez la estabilidad del macizo rocoso serpentinitico; sin embargo no es un método usado por lo menos en nuestro país para el diseño de las obras subterráneas, aunque se puede evaluar con mayor rapidez al macizo, ya que no depende de perforaciones y ensayos de laboratorio de las muestras de roca, sino de la evaluación, descripción y cálculo de la resistencia uniaxial con el uso del esclerómetro, dando un valor más cercano a la realidad, porque mide la resistencia de la roca en su medio confinado, con un cálculo de las propiedades físicas de esta para el diseño más cercano a las del medio natural. Solo faltaba encontrar una correlación entre este parámetro y el valor del índice Q de Barton para el diseño.

A pesar de no ser un método que desarrolla proyecciones de sostenimiento para un túnel, el mismo fue correlacionado a partir de sus resultados como GSI, con la clasificación de Barton (Q), para finalmente poder proyectar parámetros de sostenimientos a partir del mismo.

Para valores de  $\sigma_{ci}$  menores de 4 MPa, la Q da valores de cero o cercano a cero negativo, la experiencia práctica revela que para valores de cero, a la Q debe

asignársele el valor 0.1 y cercano a cero pero negativo deben ser valores menores o en el rango desde 0.1 hasta 0.001.

**Tabla 1.15 Mediciones realizadas y resultados de la Q de Barton obtenidos**

<b>GSI</b>	<b><math>\sigma_{ci}</math> (Mpa)</b>	<b>Qcalc</b>
80	75	25.710
75	55	19.528
70	35	14.554
70	30	13.099
60	25	7.546
50	15	3.470
50	10	3.123
40	7	1.341
25	5	0.181
20	4	0.070
15	3	0.021
10	2	0.004

En caso de tener GSI iguales y una  $\sigma_{ci} \leq 5$  Mpa, se le da el 90 % del valor de la anterior. Nunca debe sobrepasar los 5 Mpa.

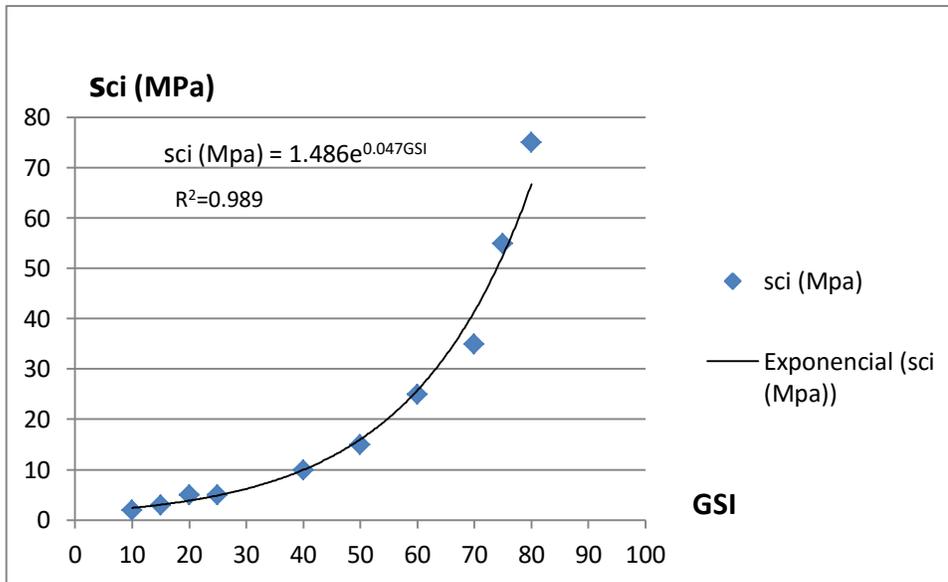


Figura No 1.11. Determinación de la curva de correlación entre el GSI y  $\sigma_{ci}$  (MPa)

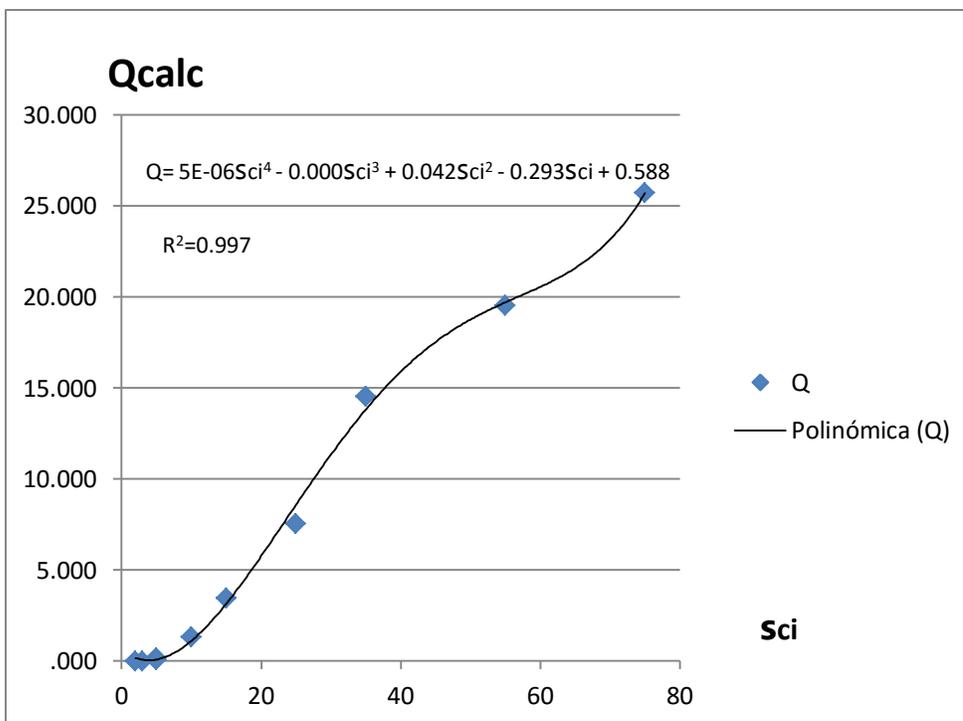


Figura No 1.12. Determinación de la curva de correlación entre la Q de Barton y el  $\sigma_{ci}$  (MPa)

Por ser la primera curva exponencial y la segunda curva polinómica, sus resultados no fueron representativos con respecto a las mediciones en el campo. Sin embargo al ser el GSI con respecto a la Qcalc potencial semejante a la exponencial, se pudo

obtener una curva de ajuste directamente que dio la ecuación de cálculo con resultados similares a los medidos.

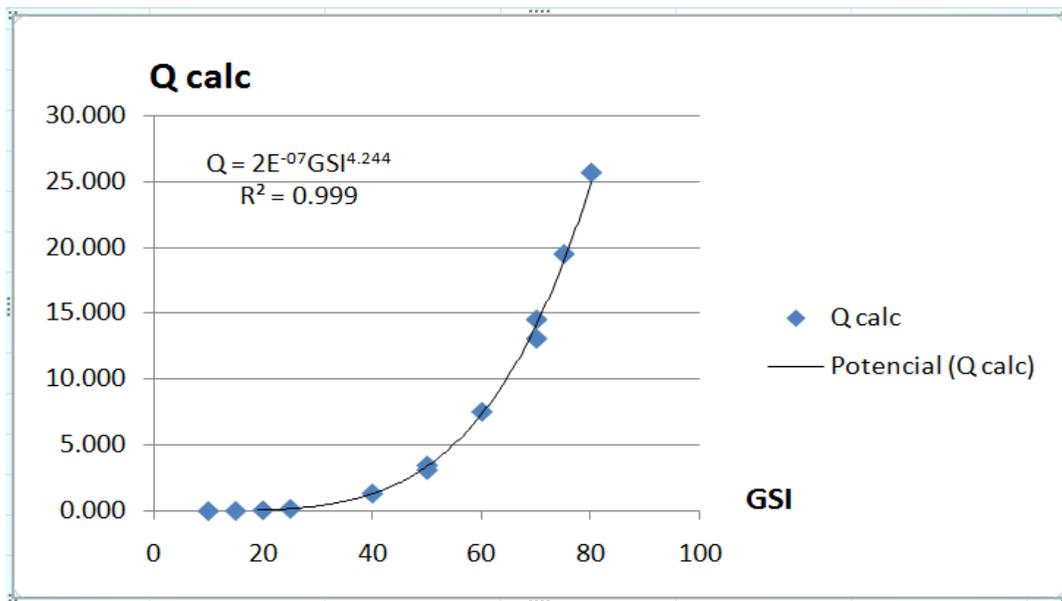


Figura No 1.13. Determinación de la curva de correlación entre el GSI y la Q de Barton.

El control a los túneles, realizado por diferentes especialistas, permitió encontrar una correlación entre el GSI, la resistencia uniaxial compresiva para la roca intacta ( $\sigma_{ci}$ ) y el valor de la Qcalc.de Barton para el diseño, desarrollada de la siguiente forma:

1.  $\sigma_{ci}$  (Mpa) =  $1.486e^{0.047\text{GSI}}$  ecuación de curva exponencial de mejor ajuste con  $R^2=0.989$

2.  $Q = 5 \times 10^{-06} \sigma_{ci}^4 - 0.000 \sigma_{ci}^3 + 0.042 \sigma_{ci}^2 - 0.293 \sigma_{ci} + 0.588$  ecuación de curva polinómica de mejor ajuste de 4º orden con  $R^2=0.997$

Por ser la primera curva exponencial y la segunda curva polinómica, sus resultados no fueron representativos con respecto a las mediciones en el campo. Sin embargo al ser el GSI con respecto a la Q potencial semejante a la exponencial, se pudo obtener una curva de ajuste directamente que dio la ecuación de cálculo con resultados similares a los medidos.

3.  $Q=2 \times 10^{-07} \text{GSI}^{4.244}$  ecuación de ajuste de tipo exponencial  $R^2=0.999$

Hasta el momento se ha aplicado en la Empresa RAUDAL y GEOCUBA Oriente Norte, Agencia ASEMA, estando aplicándose al menos durante 3 años, tiempo en el cual se ha perfeccionado y ajustado la curvas a las descripciones de los frentes de trabajo.

### **III.8 Fundamentación de la clasificación geomecánica propuesta.**

**Barton.** Esta clasificación, luego de analizadas sus cualidades es evidente la escases de parámetros importantes a tener en cuenta para lograr un análisis firme y eficiente en cuanto al índice de calidad de este macizos serpentinitico, no hace una análisis de resistencia de la roca, necesario para clasificar un macizo rocoso.

Este índice de calidad del macizo rocoso no tiene en cuenta un parámetro principal como lo es la orientación del túnel con respecto a las principales discontinuidades existentes, por lo que si la dirección de avance del túnel es bastante paralela a las direcciones de las principales discontinuidades, es evidente la presencia de inestabilidad en esta obra, por lo que al identificar las principales discontinuidades se debe tener en cuenta la proyección del túnel como un parámetro principal para orientarlo perpendicular al sistema de agrietamiento, estando así a favor de la estabilidad del mismo.

Otro parámetro identificado y necesario a tener en cuenta a la hora de clasificar este macizo serpentinitico, es que toda la zona de proyección de esta obra subterránea en un pasado fue una mina donde la extracción del mineral laterítico fue mecanizada y empleando voladura, por lo que es fundamental a la medida en que avanza la obra realizar un levantamiento en la superficie del túnel para analizarlo como un parámetro importante a la hora de pronosticar el índice de calidad del macizo. La superficie al ser removida pierde su estado natural, por lo que con facilidad las aguas superficiales y subterráneas se escurren por las discontinuidades afectando así el comportamiento estable del macizo, y luego al ser aperturado por una excavación de tal envergadura, es predecible que la obra no será estable. Otro motivo de inestabilidad lo es el efecto que producen la onda expansivas con respecto al macizo, si el mismo en su estado natural se comporta de manera irregular, pues tras el efecto de la voladura aumenta su nivel de debilitamiento.

En toda excavación subterránea antes de su ejecución, se debe analizar el estado tensional del macizo rocoso antes y después de aperturado; Barton analiza las condiciones tensionales del macizo mediante el índice SRF, el cual analiza el estado de las tensiones bajo parámetros analíticos que bajo determinadas circunstancias de las excavaciones como: a profundidades mayores de 50 m tomar un valor, en excavaciones a profundidades menores de 50 m tomar otro valor, y así sucesivamente es analizado el comportamiento de las tensiones. Por lo que se plantea que el estado tensional del macizo es otro parámetro fundamental a analizar cuidadosamente, para identificar los posibles problemas que afrontará la excavación.

Esta clasificación es de origen Noruego, por lo que sus parámetros están a fines de condiciones específicas de un área u otra, sin embargo es de fácil aplicación y se aproxima bastante a la realidad según la identificación correcta de los parámetros necesario, aunque escasea de parámetros necesarios para clasificar este macizo, establece parámetros de sostenimiento adecuados y bien detallados para proyectar un sistema de sostenimiento en un túnel.

Para nuestro caso de estudio, debería adaptarse a las condiciones que presenta este macizo serpentínico, para ello se hace necesario plantear parámetros de corrección de esta clasificación para mejorar su eficacia en nuestro caso de estudio.

**Bulichev.** Esta clasificación es de origen Ruso y analizando su aplicación desarrolla bastante bien el comportamiento del macizo serpentínico, cuenta con amplia variedad de parámetros a analizar a la hora de clasificar un macizo rocoso, la resistencia de la roca debe ser analizada como un parámetro esencial para clasificar un macizo rocoso, desarrolla la metodología propuesta por Protodiakonov para la determinación del coeficiente de resistencia.

Desarrolla parámetros que coinciden con la metodología de Barton como lo son la influencia del número de sistemas o familias de grietas ***Mn – Jn***; descripción de la superficie de las grietas ***Kr – Jr***; análisis del relleno de las grietas ***Ka – Ja***; la presencia de agua ***Kw – Jw***, a pesar de estos análisis que son sumamente importante, el autor también estima importante describir la superficie del túnel, lo que

se hace de importante análisis para nuestro caso de estudio debido a que en un pasado la actividad minera efectuó la extracción de mineral laterítico en algunas zonas que atraviesa el túnel, lo que trae consigo que el suelo pierda sus propiedades naturales pasando a encontrarse denudado producto al arranque mecánico, pero también fueron desarrolladas varias voladuras en la zona lo que trae como consecuencia alto grado de debilitamiento del macizo, y al mismo tiempo que las aguas de escurrimiento pluvial, así como manantiales o aguas subterráneas se infiltren por el agrietamiento hacia la obra subterránea, por lo que este es un parámetros necesario para el análisis de nuestro caso de estudio.

Esta metodología permite determinar y analizar las tensiones, las características deformacionales del macizo rocoso así como las presiones mineras que actúan en excavaciones horizontales.

El desarrollo de las labores mineras en el túnel están bien organizadas y cronometradas, por lo que su orden armónico no debe violarse por medidas de seguridad, lo que quiere decir que el método de clasificación a emplear debe ser de fácil ejecución y en poco tiempo para proceder con las siguientes operaciones mineras sin que sean interrumpidas producto a la inestabilidad que presenta el macizo. Por tal motivo esta clasificación tiene esta fundamental desventaja, aunque si pudiera ser aplicable para otra obra que no tenga esta objeción, además de estar poco difundida a nivel internacional.

**Bieniawski.** Esta clasificación posee una amplia variedad de parámetros importantes a tener en cuenta para clasificar un macizo rocoso, el autor desarrolla muy bien y de forma rápida los parámetros necesarios para clasificar un macizo rocoso, su efectividad depende de la adecuada descripción visual y selección de los parámetros adecuados para el cálculo, es un método desarrollado principalmente para estimar sostenimiento, pero el RMR se ha ido consolidando como un índice geomecánica para la evaluación de las propiedades del macizo rocoso. Pudiera analizarse que es una clasificación muy empleada actualmente para túneles y en su metodología analiza la estimación del sostenimiento.

Como un parámetro esencial y fundamental, esta clasificación establece un parámetro corrector teniendo en cuenta la orientación de las discontinuidades, interpretando que la estabilidad de una obra subterránea depende de la orientación del túnel con respecto a las principales discontinuidades.

Esta clasificación analiza la propiedad de resistencia de la roca, para ello pudieran ser resultados obtenidos en laboratorio o por ensayos con el Martillo Schmidt

Esta metodología sigue sin satisfacer la demanda principal de la obra que es la rapidez y eficacia, así como contribuir con la seguridad y protección del hombre.

**GSI (Índice de Resistencia Geológica):** Esta clasificación es la más actual de todas las antes mencionadas, desarrollada a partir de 1994 y ha tenido modificaciones hasta los años actuales por los profesores de Ingeniería Geológica Paul Marinos, Vassilis Marinos y por el Ingeniero Evert Hoek con el fin de estimar la resistencia de macizos rocosos.

Este método dispone de una herramienta numérica que requiere de información confiable de entrada, estimada o medida en cuanto a la resistencia a compresión uniaxial y una constante del material *mi* relacionada con las propiedades de fricción de la roca, entre otras, por lo que se puede decir que es de fácil interpretación, que este método puede analizar parámetros de mucho interés y a su vez ser la que más rápido ofrece el índice de calidad del macizo, es efectiva al no esperar por resultados del laboratorio para determinar propiedades del macizo, además de esto, se centra en la descripción del macizo rocoso para valorar cuán estable o no puede ser el mismo, sin embargo la cala nos brinda propiedades necesarias a emplear, pero solo son propiedades puntuales, y solo es posible analizar la mejor porción de la cala en un laboratorio para conocer ciertas propiedades.

Este es el único método que responde adecuadamente con la teoría representativa del factor de escala, analiza parámetros esenciales como lo son el estado tensional y deformacional del macizo, propiedades físico-mecánicas de la roca, tiene en cuenta las descripciones visuales de la roca, el grado de alteración entre otros, en comparación con los resultados de una cala que son propiedades obtenidas de manera puntual, es imposible caracterizar un macizo rocoso solo con datos

puntuales, este método parte de propiedades particulares de la roca y descripciones visuales del macizo para su clasificación.

### **III.8.1 Impacto Económico, Social, Medio Ambiental, Científico.**

#### Impacto Económico.

Antes de tener en cuenta el cálculo del GSI y con este el ir ajustándolo a la Q de Barton en el control a los túneles durante su construcción, se produjeron derrumbes que teniendo en cuenta el valor del metro de excavación de 10 000 CUP, sobregiraron su construcción en unos 10 000000 de CUP. Desde que se están aplicando el control a túneles por GEOCUBA asesorado por RAUDAL, no se han producido derrumbes de esa magnitud, siendo este su efecto económico.

#### Impacto Social

Ha evitado accidentes con pérdidas de vidas humanas y materiales, permitiendo además que sigan adelante los trabajos que beneficiarán a la industria, la agricultura y sobre todo a la población.

#### Impacto Medio Ambiental

Si bien su objetivo fundamental no es el medio ambiente, al evitar derrumbes innecesarios dentro del macizo rocoso, disminuyen las labores de excavación y escombrecido de material rocoso, donde no hay que buscar lugares para su depósito o acumulación, manteniendo el medio ambiente natural; además el permitir avanzar y concluir estas obras, prepara al país para el enfrentamiento al cambio climático que es ya un hecho a nivel global.

#### Impacto Científico.

Por primera vez se cuenta con una ecuación matemática que ajusta al macizo rocoso serpentinitico, el GSI o Índice de Resistencia Geológica al valor o índice Q de Barton usado en el cálculo de la estabilidad de los macizos rocosos y la que se realizó usando los resultados prácticos de los controles a túneles realizados. Aunque no se ha aplicado en otros macizos rocosos la experiencia puede extrapolarse, haciendo las mediciones pertinentes en esos macizos buscando si la ecuación se mantiene válida para estos o si se le hacen los ajustes correspondientes.

## CONCLUSIONES

1. A partir del análisis de las diferentes clasificaciones geomecánicas empleadas en túneles, de las características geomecánicas del macizo rocoso y del ajuste a sus parámetros fue posible definir la clasificación geomecánica que permita evaluar el comportamiento del macizo en el frente de arranque del Túnel Levisa - Mayarí Tramo IV.
2. La correlación de los resultados de ajuste del GSI con la Q y la resistencia uniaxial compresiva para la roca intacta, permitió una mejor proyección para las soluciones ingenieriles de estabilidad en la ejecución del túnel, basado en múltiples pruebas realizadas tanto en el frente como fuera de la excavación en las mismas rocas, que permitió obtener una base datos con el uso del Excel encontrando una ecuación final de ajuste entre el GSI y Qcalc. Quedando la ecuación de la siguiente forma:  **$Q = 2 \cdot 10^{-07} \text{GSI}^{4.244}$ ,  $R^2=0.999$**
3. Una correcta y meticulosa descripción del frente de trabajo, es suficiente para llegar a resultados que garanticen planificar el avance de las obras subterráneas con el uso solamente del esclerómetro, una brújula de geólogo, una piqueta y una cámara fotográfica.
4. El ajuste de la ecuación de Barton con el empleo del Esclerómetro se acerca más a la difícil predicción de las condiciones reales de este macizo serpentinitico en su estado natural, donde su aplicación solo fue validada en las ultramafitas serpentinizadas del Trasmase Levisa Mayarí.
5. La clasificación GSI de Hoek y Marinos con los ajustes pertinentes es la que más se adecua a las particularidades de macizo rocoso estudiado, la Clasificación Q de Barton ofrece mejores resultados para proyectar soluciones de sostenimiento.

## **RECOMENDACIONES**

- a) Es necesario profundizar en los estudios geotectónicos para conocer como se está desarrollando con el tiempo la actividad tectónica de la zona, para ello es recomendable realizar un Polígono de Pronóstico de Terremotos (Geodinámico) con la tecnología que se posee actualmente.
- b) Continuar el estudio del macizo rocoso para aplicar métodos matemáticos más precisos en el ajuste de los parámetros geomecánicos.

## **BIBLIOGRAFIA**

- Alvarez G. C. Comportamiento mecánico en caliente de refractarios demagnesita-grafito, 1997 [en línea]. [Consultado: 20181022].
- BARTON, N. y E. GRIMSTAD Sistema Q para la selección del sostenimiento en el Método Noruego de excavación de Túneles. Madrid: Norwegian Geotechnical Institute., 2000.
- BIENIAWSKI VON PREIAL, R. Errores en la aplicación de las Clasificaciones Geomecánicas y su corrección. Caracterización. ADIF-Geocontrol, 2012 [en línea]. [Consultado: 20181013]. Disponible en:[https://img.interempresas.net/docs-ingeopres/2012-01-Character\\_-Bieniawski.pdf](https://img.interempresas.net/docs-ingeopres/2012-01-Character_-Bieniawski.pdf)
- BLANCO, R. B. Mecánica de roca. CUBA, 1981.
- BLANCO, R. B. Elementos de la mecánica de los macizos rocosos. Habana, 1998.
- BLÁZQUEZ, J. L. B. y R. M. M. P. Informe Final Túnel Levisa-Melones (Tramo III Primeros 1700m) Ingeniería Básica. Holguín: INRH, 2001.
- BLÁZQUEZ, J. L. B. y R. M. M. P. Informe Final TRASVASE ESTE-OESTE. Túnel Levisa-Melones (Tramo II) Ingeniería Básica. Holguín: INRM, 2009.
- BLÁZQUEZ, J. L. B. y R. M. M. P. Informe Final Túnel Levisa-Melones (Tramo III Primeros 1700m). Ingeniería Básica. Holguín: INRH, 2011.
- BLÁZQUEZ, J. L. B. y R. M. M. P. Informe Final Túnel Levisa-Melones (Tramo IV). Ingeniería Básica. Holguín: INRH, 2012.
- BLÁZQUEZ, J. L. B. y R. M. M. P. Investigación Ingeniero Geológica e Hidrogeológica Túnel de Traslase Este-Oeste. Tramo Sagua-Mayarí.(Túnel levisa-Mayarí). Tramo V y Túnel de Conexión No 3. Ingeniería Básica y de Detalle. Holguín: Archivo Técnico Raudal, 2015.
- BLÁZQUEZ, J. L. B. y R. M. M. P. Informe de Asistencia Técnica a los Frentes de Trabajo en el Túnel Levisa-Mayarí. Traslase Este-Oeste. Tramo Sagua-Mayarí.

- (Túnel Levisa Mayarí). Tramo V, TC No 4 y Túnel de Desvío. Ingeniería de Detalle. Holguín: Archivo Técnico Raudal, 2016.
- CABALLERO, F. Q. Características Geológica e Ingeniero Geológicas del túnel Levisa-Mayarí. (Tamo IV-V). Ingeniería Básica. Archivos Técnicos Holguín: Raudal. Geocuba Oriente Norte, 2014.
- CORDOVÉS PEDRIANA, J.M. y F. Q. CABALLEROS. Modelo Matemático para la evaluación del estado tensional de los macizos rocosos. Holguín: Geocuba, 2006.
- Dans E. Entrevista en la revista [www.madresfera.com](http://www.madresfera.com), 2017. [en línea]. [Consultado: 20180911]. Disponible en: <http://entreparesis.org/prueba-y-error/>
- EVERT HOEK, B. Excavaciones subterráneas en rocas, 1985
- EVERT HOEK, B. El criterio de rotura de Hoek-Brown, 2002
- EVERT HOEK, E. T. B. Underground Excavations in Rock. London. The Institution of Mining and Metallurgy, 1980.
- GERRERO, Y. F. Determinación de las características ingeniero-geológicas del tramo V del túnel Levisa-Mayarí mediante GSI (GEOLOGICAL STENGHT INDEX) o Índice de Resistencia Geológica Tesis de Maestría Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, 2015.
- GILARTE, D. C. Análisis y cálculo de sostenimiento para el Túnel 2 del Trasvase Sabanalamar-Pozo Azul. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, 2009.
- GONZÁLEZ, V. L. INGENIERÍA GEOLÓGICA. MADRID, 2002.
- HOEK, E. Practical Rock Engineering, 2006.
- HOEK, E. et.al. Canadian Rock mech, 1981.
- IGLESIAS, R. G. Investigación Ingeniero Geológica e Hidrogeológica Túnel de Conexión No III (Entre Tramo IV y Tramo V) Levisa-Mayarí. Ingeniería Básica. Holguín: Archivos Técnicos Raudal: ENIA, 2015.

- LOBAINA, A. A. L. Elementos teóricos y prácticos de la investigación científico-tecnológica. In. La Habana, 2014.
- Menéndez S. C. Metodología para la valoración de explotaciones mineras, 2015 [en línea]. [Consultado: 20181022]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5300327.pdf>
- NC 46: 1999. Construcciones sismorresistentes. Requisitos básicos para el diseño y construcción. Oficina Nacional de Normalización.
- NC 246: 2003. Determinación de la resistencia a compresión del hormigón por medio de esclerómetros tipo N NR. Oficina Nacional Normalización.
- NR-FA08 1990: Análisis de Estabilidad de Túneles. Clasificación. MINFAR.
- PEREZ, D. M. P. Propuesta de Técnica para la Determinación del comportamiento del Terreno en Excavaciones Subterráneas con base en un túnel exploratorio. Caso: Túnel de la Línea. Universidad Nacional de Colombia, 2012.
- PIRES, M. C. y R. B. TORRENS, Caracterización geomecánica de los macizos en minas subterráneas en la región oriental del país, 2000. Minería y Geología, XVII, No 1.
- PROTODIAKOMOV, M. M. AND B. B. RICMEVKI Manual del Minero-Geólogo. Para construcción, explotación, operación y liquidación de minas subterráneas. Rusia, 1981-1996.
- Quintana M. C. S. Optimización de la Barrenación en la Exploración de Cuerpos Minerales Mediante el Método Geoestadístico-Edición Única.1994 [en línea].[Consultado: 20181023]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11285/569756>
- Quispe, E. Método de Prueba y Error en Excel. 2013 [en línea]. [Consultado: 20181022]. Disponible en: <http://elmerzinho.blogspot.com/2013/03/metodo-de-prueba-y-error-en-excel.html>
- TORRENS, R. B. Mecánica de roca. 1981.
- TORRENS, R. B. Estudio de la estabilidad y la presión minera en las excavaciones subterráneas. Ecuador: Unión Nacional de Loja, 1993.

YUPANQUI, L. T. Determinación de las propiedades físico-mecánicas de las rocas y monitoreo de la masa rocosa, 2004.

Ochoa, Q. A. y ZALDIVAR, H.A. Informe de la Asistencia Técnica a los Frentes de Trabajo en el Túnel Levisa-Mayarí. Tránsito Este Oeste. Tramo Sagua-Mayarí (Túnel Levisa-Mayarí). Tramo IV. Ingeniería de Detalle. Holguín: Archivos Técnicos Raudal: Geocuba Oriente Norte, 2016.

## LISTA DE LAS ABREVIATURAS UTILIZADAS

**Tabla 1.16 Nomenclaturas utilizadas**

*	Multiplicación
-	Sustracción
+	Suma
$\frac{x}{y}$	División
RQD	Calidad de la roca
Q	Índice de calidad del macizo rocoso según Barton
S	Índice de calidad propuesto por Bulichev
Rc	Resistencia a la compresión del macizo rocoso
$\gamma$	Densidad
FKP	Factor de coeficiente de Protodiaconov
$\sigma_x - \sigma_y$	Estado tensional del macizo rocoso
RMR	Índice de calidad propuesto por Bieniawki
GSI	Índice de Resistencia Geológica
D	Factor que depende sobre todo del grado de alteración del macizo rocoso por los efectos de las excavaciones (mecánicas o voladuras) o por la relajación de esfuerzos, variando desde 0 para macizos rocosos in situ inalterados hasta 1 para macizos rocosos muy alterados.
$\sigma_{ci}$ ó $\sigma_{ci}$	Resistencia uniaxial compresiva para la roca intacta
Em (GPa)	Módulo de deformación.
$\sigma_{cm}$ ó $\sigma_{cm}$	Resistencia a la compresión simple de la masa de roca.
C(Mpa)	Cohesión
mi	Parámetro que depende de las propiedades de la roca, que se determina empíricamente por tablas
$\varphi^\circ$	Ángulo de fricción interna.

S	Dependen de las propiedades de la roca y de su grado de fracturación antes de estar sometidas a tensiones que provoquen su rotura. El parámetro S es la medida de la disminución de la resistencia a la compresión simple de la roca debido a la fracturación, mientras m influye en la resistencia al corte del material.
a	Parámetro definido por la fórmula $a = 1/2 + 1/6 (e - GSI / 15 - e - 20 / 3)$
M <sub>b</sub>	Valor reducido de la constante del material m el cual viene dado por: $m_b = m \exp\{ GSI - 100 / 28 - 14D\}$
e	2.7182818
Ln(e)	1.0

## ANEXOS

### 1. Índice Q de Barton, 1974, 1994 y el Índice RQD.

Tabla 1.17 Valores de los parámetros característicos del índice Q

Calidad del testigo <i>RQD</i>		<i>RQD (%)</i>
<b>A</b>	Muy mala	0-25
<b>B</b>	Mala	25-50
<b>C</b>	Media	50-75
<b>D</b>	Buena	75-90
<b>E</b>	Excelente	90-100

*Notas:*

- Cuando se obtienen valores del RQD inferiores o iguales a 10, se toma un valor de 10 para calcular el índice Q.
- Los intervalos de 5 unidades para el RQD, es decir, 100, 95, 90, etc., tienen suficiente precisión.

#### Continuación

1.17 Índice de diaclasado		$J_n$
<b>A</b>	Roca masiva, sin diaclarar o con fisuración escasa	0.5-1,0
<b>B</b>	Una familia de diaclasas	2
<b>C</b>	Una familia y algunas diaclasas aleatorias	3
<b>D</b>	Dos familias de diaclasas	4
<b>E</b>	Dos familias y algunas diaclasas aleatorias	6
<b>F</b>	Tres familias de diaclasas	9
<b>G</b>	Tres familias y algunas diaclasas aleatorias	<b>12</b>
<b>H</b>	Cuatro o más familias, diaclasas aleatorias, roca muy fracturada, roca en terrones, etc.	<b>15</b>
<b>J</b>	Roca triturada, terrosa	20

*Notas:*

- En intersecciones de túneles se utiliza la expresión **(3J<sub>n</sub>)**
- En las bocas de los túneles se utiliza la expresión **(2J<sub>n</sub>)**

#### Continuación

1.17 Índice de rugosidad de las discontinuidades	$J_r$
--	-------

a) Contacto entre las dos caras de la discontinuidad.		
b) Contacto entre las dos caras de la discontinuidad ante un desplazamiento		
<b>A</b>	Diaclasas discontinuas	4
<b>B</b>	Diaclasas onduladas, rugosas o irregulares	3
<b>C</b>	Diaclasas onduladas, lisas	2
<b>D</b>	Diaclasas onduladas, perfectamente lisas	<b>1,5</b>
<b>E</b>	Diaclasas planas, rugosas o irregulares	1,5
<b>F</b>	Diaclasas planas, lisas	1,0
<b>G</b>	Diaclasas planas, perfectamente lisas	0,5
Nota:		
-Las descripciones se refieren a caracterizaciones a pequeña escala y escala intermedia, por este orden.		
c) No existe contacto entre las caras de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante.		
<b>H</b>	Zona que contiene minerales arcillosos con un espesor suficiente para impedir el contacto de las caras de la discontinuidad	1,0
<b>J</b>	Zona arenosa, de gravas o triturada con un espesor suficiente para impedir el contacto entre las dos caras de la discontinuidad	1.0
Notas:		
-Si el espaciado de la principal familia de discontinuidades es superior a 3 m, se debe aumentar el índice <b>J<sub>r</sub></b> en una unidad.		
-En el caso de diaclasas planas perfectamente lisas que presenten lineaciones, y que dichas lineaciones estén orientadas según la dirección de mínima resistencia, se puede utilizar el valor <b>J<sub>r</sub> = 0,5</b> .		

### Continuación

<b>1.17 índice de alteración de las discontinuidades</b>		<b><math>\Theta_r</math></b>	<b><math>J_a</math></b>
a) Contacto entre los planos de la discontinuidad (sin minerales de relleno intermedios)			
<b>A</b>	Discontinuidad cerrada, dura, sin reblandecimientos, impermeable, cuarzo	—	0,75

<b>B</b>	Planos de discontinuidad inalterados, superficies ligeramente manchadas	$25^0 - 35^0$	1,0
<b>C</b>	Planos de discontinuidades ligeramente alterados. Presentan minerales no reblandecibles. partículas arenosas, roca desintegrada libre de arcillas, etc.	$25^0 - 30^0$	2,0
<b>D</b>	Recubrimientos de arcillas limosas o arenosas. Fracción pequeña de arcilla (no blanda)	$20^0-25^0$	3.0
<b>E</b>	Recubrimientos de arcillas blandas o de baja fricción, es decir, caolinita o mica. También clorita, talco, yeso, grafito, etc., y pequeñas cantidades de arcillas expansivas	$8^0 - 16^0$	4,0
b) Contacto entre los planos de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante inferior a 10 cm (minerales de relleno en pequeños espesores)			
<b>F</b>	Partículas arenosas, roca desintegrada libre de arcilla, etc.	$25^0 - 30^0$	4,0
<b>G</b>	Fuertemente sobreconsolidados con rellenos de minerales arcillosos no blandos (continuos, pero con espesores inferiores a 5 mm)	$16^0 - 24^0$	<b>6.0</b>
<b>H</b>	Sobreconsolidación media a baja, con reblandecimiento, rellenos de minerales arcillosos (continuos, pero de espesores inferiores a 5mm)	$12^0-16^0$	<b>8.0</b>
<b>J</b>	Rellenos de arcillas expansivas, es decir, montmorillonita (continuos, pero con espesores inferiores a 5 mm). El valor de $J_a$ depende del porcentaje de panículas con tamaños similares a los de las arcillas expansivas	$6^0 - 12^0$	8-12
c) No se produce contacto entre los planos de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante (rellenos de mineral de gran espesor)			
<b>K</b> <b>L</b> <b>M</b>	Zonas o bandas de roca desintegrada o triturada y arcillas (ver G. H. y J para la descripción de las condiciones de las arcillas)	$6^0 - 24^0$	6,8 ó 8-12
<b>N</b>	Zonas o bandas de arcillas limosas o arenosas, con pequeñas fracciones de arcillas no reblandecibles	—	5.0
<b>O</b> <b>P</b> <b>R</b>	Zonas o bandas continuas de arcilla, de espesor grueso (ver clases G. H y J. para la descripción de las condiciones de las arcillas)	$6^0-24^0$	10, 13 ó 13-20

Nota: los valores expresados para los parámetros  $J_r$  y  $J_a$  se aplican a las familias de diaclasas o discontinuidades que son menos favorables con relación a la estabilidad, tanto por la orientación de las mismas como por su resistencia al corte (esta resistencia puede evaluarse mediante la expresión:

$$T \approx \sigma_n \cdot \operatorname{tg}^{-1} V(J_r/J_a)$$

### Continuación

1.17 Factor de reducción por la presencia de agua		Presión de agua (kg/cm <sup>2</sup> )	$J_w$
<b>A</b>	Excavaciones secas o pequeñas afluencias, inferiores a 5 l/min, de forma localizada	< 1	<b>1,0</b>
<b>B</b>	Afluencia a presión media, con lavado ocasional de los rellenos de las discontinuidades	1-2,5	0,66
<b>C</b>	Afluencia importante o presión alta en rocas competentes con discontinuidades sin relleno	2,5-10	0,5
<b>D</b>	Afluencia importante o presión alta, produciéndose un lavado considerable de los rellenos de las diaclasas	2.5-10	0,33
<b>E</b>	Afluencia excepcionalmente alta o presión elevada en el momento de realizar las voladuras, decreciendo con el tiempo	>10	0,2-0,1
<b>F</b>	Afluencia excepcionalmente alta, o presión elevada de carácter persistente, sin disminución apreciable	> 10	0,1-0.05

Notas:

- Los valores de las clases C. D. E y F son meramente estimativos. Si se acometen medidas de drenaje, puede incrementarse el valor  $J_w$

- No se han considerado los problemas especiales derivados de la formación de hielo.

### Continuación

1.17 Condiciones tensionales de la roca		SRF
a) Las zonas débiles interceptan a la excavación, pudiendo producirse desprendimientos de roca a medida que la excavación del túnel va avanzando		
<b>A</b>	Múltiples zonas débiles, conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente, roca de contorno muy suelta (a cualquier profundidad)	10
<b>B</b>	Zonas débiles aisladas, conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente (profundidad de la excavación $\leq 50$ m)	5

<b>C</b>	Zonas débiles aisladas, conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente (profundidad de la excavación > 50 m)	2,5
<b>D</b>	Múltiples zonas de fracturas en roca competente (libres de arcillas), roca de contorno suelta (a cualquier profundidad)	7,5
<b>E</b>	Zonas de fractura aisladas en roca competente (libre de arcillas) (profundidad de excavación ≤ 50 m)	5,0
<b>F</b>	Zonas de fractura aisladas en roca competente (libre de arcillas) (profundidad de la excavación > 50 m)	2,5
<b>G</b>	Terreno suelto, diaclasas abiertas, fuertemente fracturado, en terrones, etc. (a cualquier profundidad)	5,0

Nota:

-Se reducen los valores expresados del SRF entre un 20–50% si las zonas de fracturas sólo ejercen cierta influencia pero no intersectan a la excavación.

b) Rocas competentes, problemas tensionales en las rocas		$\sigma_c/\sigma_1$	$\sigma_\theta/\sigma_c$	SRF
<b>H</b>	Tensiones pequeñas cerca de la superficie, diaclasas abiertas	>200	<0,01	<b>2,5</b>
<b>J</b>	Tensiones medias, condiciones tensionales favorables	200-10	0,01-0,3	1
<b>K</b>	Tensiones elevadas, estructura muy compacta. Normalmente favorable para la estabilidad, puede ser desfavorable para la estabilidad de los hastiales	10-5	0,3-0,4	0,5-2
<b>L</b>	Lajamiento moderado de la roca después de 1 hora en rocas masivas	5-3	0,5-0,65	5-50
<b>M</b>	Lajamiento y estallido de la roca después de algunos minutos en rocas masivas	3-2	0,65-1	50-200
<b>N</b>	Estallidos violentos de la roca (deformación explosiva) y deformaciones dinámicas inmediatas en rocas masivas	<2	> 1	200-400

<p>Notas:</p> <p>- Si se comprueba la existencia de campos tensionales fuertemente anisotrópicos; cuando <math>5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10</math>, se disminuye el parámetro <math>\sigma_c</math> hasta <math>0,75\sigma_c</math>: si <math>\sigma_1/\sigma_3 &gt; 10</math>, se tomará el valor <math>0,5\sigma_c</math>, <math>\sigma_c</math> es resistencia a compresión simple, <math>\sigma_1</math> y <math>\sigma_3</math> son las tensiones principales mayor y menor y <math>\sigma_\theta</math> es la tensión tangencial máxima, estimada a partir de la teoría de la elasticidad).</p> <p>- En los casos en que la profundidad de la clave del túnel es menor que la anchura de la excavación, se sugiere aumentar el valor del factor SRF entre 2,5 y 5 unidades (véase clase H).</p>			
c) Rocas deformables: flujo plástico de roca incompetente sometida a altas presiones litostáticas		$\sigma_\theta/\sigma_c$	<b>SRF</b>
<b>O</b>	Presión de deformación baja	1-5	5-10
<b>P</b>	Presión de deformación alta	>5	10-20
<p>Nota:</p> <p>-Los fenómenos de deformación o fluencia de rocas suelen ocurrir a profundidades: <math>H &gt; 350 Q^{1/3}</math> (Singh <i>et al.</i>, 1992). La resistencia a compresión de macizo rocoso puede estimarse mediante la expresión: <math>q(\text{MPa}) \approx 7 * \gamma * Q^{1/3}</math>, donde <math>\gamma</math> es la densidad de la roca en <math>\text{g/cm}^3</math> (Singh. 1993).</p>			
d) Rocas expansivas: actividad expansiva química dependiendo de la presencia de agua.		<b>SRF</b>	
<b>R</b>	Presión de expansión baja	5-10	
<b>S</b>	Presión de expansión alta	10-15	
$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF}$			

A continuación se expresan los criterios de valoración de estos parámetros. El índice Q obtenido a partir de ellos varía entre 0.001 - 1000 con la siguiente clasificación del macizo rocoso:

0.001 - 0.01; roca excepcionalmente mala

0.01- 0.1; roca extremadamente mala

0.1 - 1; roca muy mala

1 - 4; roca mala

4 - 10; roca media

10 - 40; roca buena

40 - 100; roca muy buena

100 - 400; roca extremadamente buena

400 - 1000; roca excepcionalmente buena

## 2. Clasificación de Bulichev

Pronóstico para la estabilidad de macizos propuestos al derrumbe.

$$S = f \left( \frac{K_m}{K_n} \right) \left[ \frac{K_r K_W}{(K_t K_A K_\alpha)} \right]$$

Donde:

$f$ : Coeficiente de fortaleza según Protodyakonov

### Puntal izquierdo

$$\text{Para roca: } f = \frac{R_c}{10} = \frac{9.2}{10} = \mathbf{0.92}$$

### Puntal derecho

$$f = \frac{R_c}{10} = \frac{1.25}{10} = \mathbf{0.125}$$

$K_m$  : Coeficiente que caracteriza la alteración del macizo en dependencia al módulo  $n$  relativo al agrietamiento

$$n = \frac{2a}{l}$$

Donde:  $2a$  es el avance del túnel

$l$ : Distancia promedio entre grietas (abertura de grietas promedio)

Dependencia al módulo relativo al agrietamiento

n.....	> 60	60-25	25-12	12-6	< 6
$K_m$ .....	0,5-2,5	<u>2,5</u> -5	5-7,5	7,5-9	<u>9</u> -12

$K_n$ : Coeficiente que cuenta la influencia del número del sistema o familias de grietas

**0.5-1** - Prácticamente no tiene grietas y la superficie está protegida

**2**- un sistema de grietas o familias

**4**- dos sistemas de grietas o familias

**9**- tres sistemas de grietas o familias

15- cuatro sistemas de grietas y un poco mas

20- el macizo premolido (agrietao totalmente) [frente y superficie]

$K_r$ : Coeficiente que cuenta la superficie de las grietas, que se cuentan como significativas

4- grietas discontinuas

3- grietas irregulares onduladas no rectas

2- grietas onduladas rectas

1.5- grietas onduladas lisas pulidas

1- grietas con superficie lisa, rectas, completamiento con relleno de minerales y otros.

0.5- grietas superficiales con espejos lisos y derechas.

$K_w$ : Coeficiente que determina la humedad

1- rocas secas

0.8- rocas húmedas

0.5- goteo de agua

0.3- afluencia de agua a chorro

$K_t$ : Coeficiente que cuenta con la reapertura (t) sin completamiento (grietas sin relleno).

1- cuando  $t < 3$  mm (también con completamiento las grietas)

2- cuando  $t = 3 - 15$  mm

4- cuando  $t > 15$  mm

$K_A$ : Coeficiente que determina el completamiento de las grietas que se cuenta como significativa.

1- no exista completamiento (relleno) en las paredes de las grietas alteradas

2- el relleno es arena molido con mineral (sin arcilla)

- 3- completamiento con arcilla
- 4- completamiento con caolinita, talco, grafito, etc.
- 5- relleno arenoso arcilloso pero sin contacto entre las paredes de grietas.
- 6-20- coeficiente en dependencia al ancho con relleno de arcilla.

$K_\alpha$ : Coeficiente que cuenta la orientación del túnel en dependencia al ángulo de inclinación entre la superficie de las grietas y el eje del túnel.

Ángulo ( $\alpha$ ) continuación del eje del túnel y la superficie de las grietas

1- para ( $\alpha$ ) 70-90°

**1.5-** cuando ángulo 20-70°

2- cuando ángulo < 20°

**Nota:** Los coeficientes  $K_m$ ,  $K_r$ ,  $K_A$ ,  $K_\alpha$  se toman de las zonas de desarrollo más peligrosa.

El indicador S caracteriza el grado de estabilidad del macizo.

**Tabla 1.18 Características generales del estado del macizo. Bulichev**

Categoría de Estabilidad	Apreciación de la Estabilidad	Características generales del estado del macizo		
		Propuesto al derrumbe	Propuesto a la destrucción	Propuesto al corrimiento Plástico
I	Completamente estable	No hay derrumbe	No hay destrucción	Cuando las rocas se corren 10 cm con respecto al contorno real luego de la voladura

II	Estable	Desprendimiento no significativo	Posibilidad de deformaciones plásticas y surgimiento de agrietamiento tecnológico	20 cm
III	Estabilidad media	Posibilidad de derrumbe en el techo	Formación local de destrucción	30 cm
IV	<b><u>No estable</u></b>	Formación inmediata después de la deformación del túnel por explosivos, derrumbe en el techo y laterales	Zona de destrucción ocupa gran parte de la sección transversal del túnel.	50 cm
V	<b><u>Altamente no estable</u></b>	Después de la alteración del túnel derrumbe inmediato	Significativo desarrollo de la destrucción la cual ocupa la sección total del túnel	≥50 cm

**Tabla1.19 Tiempo permisible de estabilidad del túnel. Bulichev**

<b>Categoría de estabilidad</b>	Indicador de estabilidad	Tiempo permisible	<b>Categoría de estabilidad</b>	Indicador de estabilidad	Tiempo permisible
---------------------------------	--------------------------	-------------------	---------------------------------	--------------------------	-------------------

I	$\geq 70$	Prácticamente sin límite de sostenimiento	IV	<u>0.05-1.00</u>	No más de 1 día
II	5-70	Hasta 6 meses	V	$\leq 0.05$	Después de excavar se derrumba
III	1-5	De 10 a 15 días			

**(I) Coeficiente estructural de debilitamiento del macizo**

Suelo o roca no débiles **(coeficiente 1)**

Particularidades características del macizo: - completamiento estructural monolítico con capas de 1 m con un sistema de grietas ubicadas una de otras hacia el eje del túnel

(perpendicular al eje del túnel)

**(II) Macizos medios**

Capa con potencia 1 m

Capa con potencia 0.5-1 m lineal con 2 sistemas de grietas ubicadas unas de otras a 0.5 m lineal **(coeficiente 0.7)**

**(III) Macizos débiles**

Capa de roca con potencia de 0.5 m lineal, capas con menos de 0.5-1 lineal con tres sistemas de grietas **(coeficiente 0.3)**

**(IV) Muy débiles**

Secciones con alteraciones geológicas propensa a derrumbes. El macizo posee más de tres sistemas de grietas y su distancia entre ellas es menor de 0.5 m lineal **(coeficiente 1)**

## Condiciones Minero-Geológicas del macizo rocoso

- 1- Macizo no estable: avance 0.5 – 1 m lineal
- 2- Pequeña estabilidad: avance **1.5 – 2 m** lineal
- 3- Estabilidad media: avance **2 – 5 m** lineal
- 4- Macizo estable: avance de **5, 10, 15, 20 m** lineal
- 5- Excesivamente estable: más de **60 m** lineal

## Cálculo de presión minera Excavación Horizontal

$$P_B = \frac{\gamma H}{R_C} * \frac{K_2 K_3}{\eta \xi}$$

Donde:

$\gamma$ : Densidad

$H$ : altura

$R_C$ : resistencia a compresión (límite de fortaleza en un solo eje)

$K_2$ : Coeficiente de concentración de tensiones por los trabajos realizados en el túnel.

$K_3$ : Coeficiente de cambio de tensiones como resultado de la influencia de otros trabajos.

$\eta \leq 1$  que es el coeficiente de debilitamiento del macizo.

$\xi \leq 1$  es el coeficiente del largo de la fortaleza del macizo.

De manera orientativa se puede tomar para secciones policirculares  $K_2 - 2.75K_3 - 1.5$

$\eta = \underline{0.8} - 0.4$  cuando la distancia entre grietas  $l_t = 0.5 - 0.2$

$l_t = 0.2 - 0.7$  distancia promedio entre grietas y el ancho del túnel.

$\xi = 1 - \underline{0.9}$  para frentes que se derrumben por bloques macizos

Altura desde el techo del túnel hasta la superficie - 90 m

Sustituyendo:

$$P_B = \frac{0.023 * 90}{5.23} * \frac{2.75 * 1.5}{0.8 * 0.9} = 2.27 \text{ MPa}$$

-Si  $P_B = 1 - 1.5$  Rocas estables

**- $P_B = 1.5 - 3$  no estable**

- $P_B > 3$  altamente no estable

Influencia del macizo. El campo inicial de tensiones en un macizo no alterado caracteriza las dimensiones de la dirección de las tensiones principales. En el campo gravitacional las tensiones principales se calculan por la siguiente ecuación.

$$\sigma_1 = \sigma_x = \gamma H ; \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_y = \lambda \gamma H$$

Donde:

$\sigma_x$ - Tensiones verticales (MPa)

$\sigma_y$  - Tensiones horizontales (MPa)

$\gamma$ - Peso del macizo en medida de volumen (MNw/m<sup>3</sup>)

$\lambda$ - Coeficiente lateral de presiones en el macizo no alterado

$\lambda = \frac{\mu}{1-\mu \leq \lambda \leq 1}$  donde:  $\mu$  - coeficiente de Poisson del macizo (0.25 - **0.4**) [Serpentinita]

$$\lambda = \frac{0.4}{1-0.4} \mathbf{0.7} \leq \lambda \leq 1$$

Sustituyendo:

$$\sigma_x = \gamma H = 0.0227 * 90 = 2.04 \text{ MPa/m}^3$$

$$\sigma_y = \lambda \gamma H = 0.7 * 0.0227 * 90 = 1.43 \text{ MPa/m}^3$$

En las regiones de campo activo de tensiones tectónicas caracteriza el campo inicial de tensiones tectónicas influyendo en las dimensiones normales de tensiones principales  $N_1$ ,  $N_2$  y sus direcciones en el macizo.

En este caso la pérdida de estabilidad por Desplazamiento, Deformación y Destrucción de la roca en el contorno de la excavación se produce cuando la magnitud de las tensiones actuantes en el contorno de las excavaciones sobrepasa el valor de la resistencia de la roca.

La condición de estabilidad del macizo, en el caso más general, viene dada por la siguiente expresión.

$$\sigma - R_c = 0$$

**Nota:** los valores de Densidad y Resistencia a la Compresión antes seleccionados fueron tomados los valores saturados por ser los resultados más críticos presentes y se promediaron entre los dos tipos de serpentinitas presentes.

### **3. Clasificación de BIENIAWSKI**

Los objetivos de esta clasificación son:

- Determinar y/o Estimar la calidad del macizo rocoso.
- Dividir el macizo rocoso en grupos de conducta análoga.
- Proporcionar una buena base de entendimiento de las características del macizo rocoso.
- Facilitar la planificación y el diseño de estructuras en roca, proporcionando datos cuantitativos necesarios para la solución real de los problemas de ingeniería.

Esta metodología clasifica a las rocas en 5 categorías, en cada categoría se estiman los valores de la cohesión y el ángulo de fricción interna del macizo rocoso

A continuación se definen y valoran cada uno de los factores que intervienen en la clasificación.

#### **RESISTENCIA COMPRESIVA DE LA ROCA.**

La resistencia a compresiva "Rc" de una roca se puede determinar por tres procedimientos:

##### **1.- PRIMER PROCEDIMIENTO:**

Estimación de la Resistencia Compresiva mediante el martillo Schmidt de Dureza.

## 2.- SEGUNDO PROCEDIMIENTO

Determinación de la Resistencia Compresiva mediante el Ensayo de Carga Puntual “Franklin”.

## 3.- TERCER PROCEDIMIENTO

Determinación de la Resistencia Compresiva mediante el Ensayo de Compresión Simple y/o Uniaxial

### **INDICE DE LA CALIDAD DE LA ROCA - RQD**

Para determinar el RQD (Rock Quality Designation) en la zona de estudio se empleó el siguiente procedimiento.

Cálculo del RQD en función del número de fisuras por metro cúbico, determinadas a pie de obra.

$$\mathbf{RQD = 115 - 3.3 (Jv)}$$

Donde:

**Jv** = Número de fisuras por metro cúbico.

### **ESPACIAMIENTO DE JUNTAS**

Se ha comprobado que el espaciamiento de juntas tiene gran influencia sobre la estructura del macizo rocoso. La resistencia del macizo rocoso va disminuyendo según va aumentando el número de juntas, siendo el espaciado de las juntas el factor más influyente en esta disminución de resistencia.

Así resulta que un material rocoso de alta resistencia de 100 a 200 MPa, que esté muy fracturado con un espaciamiento de juntas de 5 cm, corresponde a un macizo rocoso débil.

A continuación se presenta la clasificación de Deere de los macizos rocosos. En lo referente al espaciamiento de juntas, que es la que recomienda utilizar en la clasificación geomecánica de Bieniawski.

**Tabla 1.20 Condición de juntas. Bieniawski**

Descripción Espaciamiento	Espacio de Juntas	Tipo Macizo Rocoso
Muy ancho	>3m	Sólido
Ancho	1-3m	Masivo
Moderadamente cerrado	0.3-1m	En Bloque
<b>Cerrado</b>	<b>50</b> -300mm	<b>Fracturado</b>
Muy Cerrado	<50mm	Machacado

En este apartado se tienen en cuenta los siguientes parámetros:

- 1- Apertura.
- 2- Tamaño.
- 3- Rugosidad.
- 4- Dureza de los labios de la discontinuidad.
- 5- Relleno.

### APERTURA

La apertura de las juntas es un criterio para descripción cuantitativa de un macizo rocoso. La clasificación de Bieniawski es la siguiente:

<i>Descripción</i>	<i>Separación</i>
<b>Abierta</b>	> 5 mm
Moderadamente abierta	1 - 5 mm
Cerrada	0.1 – 1 mm
Muy cerrada	< 0.1

## TAMAÑO

El tamaño de las juntas influye en la importancia que el material rocoso y la separación de las juntas tienen en el comportamiento del macizo rocoso.

## RUGOSIDAD

En esta clasificación se establecen 5 categorías de rugosidad: muy rugosa, rugosa, ligeramente rugosa, suave y espejo de falla.

## DUREZA DE LOS LABIOS DE LA DISCONTINUIDAD

Se consideran 3 categorías de dureza: dura, media y blanda.

## RELLENO

Se define por su espesor, tipo de material, consistencia y continuidad.

## **PRESENCIA DE AGUA**

El efecto del agua tiene especial importancia en los macizos rocosos diaclasados. Se tendrá en cuenta el flujo de agua en el macizo rocoso. El criterio que se utilizará será el siguiente: completamente seco, húmedo, agua a presión moderada y agua a presión fuerte.

## **CORRECCION POR ORIENTACION**

A la hora de considerar los efectos de la orientación de las discontinuidades para la clasificación del macizo rocoso, con vistas a la construcción de una excavación subterránea y una labor minera superficial, es suficiente considerar si las orientaciones del rumbo y del buzamiento son más o menos favorables con relación a la labor minera que se va ejecutar.

**Tabla 1.21 Bieniawski ha propuesto la siguiente clasificación.**

RUMBO PERPENDICULAR AL EJE		RUMBO PARALELO AL EJE DEL TUNEL	BUZAMIENTO
Dirección según Buzamiento	Dirección contra Buzamiento		0-20°(Independiente del Rumbo)

Buzamiento 45°-90°	Buzamiento 20°-45°	Buzamiento 45-90°	Buzamiento 20-45°	Buzamiento 45°-90°	Buzamiento 20°-45°	
Muy Favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy Desfavorable	Regular	Desfavorable

**Tabla 1.22 Clasificación de los parámetros y sus valores.**

Parámetro	ESCALA DE VALORES							
	Carga Puntual	80 kg/cm <sup>2</sup>	40-80 kg/cm <sup>2</sup>	20-40 kg/cm <sup>2</sup>	10-20 kg/cm <sup>2</sup>	10 kg/cm <sup>2</sup>		
Resistencia de la roca intacta	A Compresión Simple	2000 Kg/cm <sup>2</sup>	1000 - 2000 Kg/cm <sup>2</sup>	500 - 1000 Kg/cm <sup>2</sup>	250 - 500 kg/cm <sup>2</sup>	100-250 kg/cm <sup>2</sup>	30-100 kg/cm <sup>2</sup>	10-30 Kg/cm <sup>2</sup>
VALOR		15	12	7	<u>4</u>	2	<u>1</u>	0
R Q.D.		90-100%	75-90%	50-75%	25-50%	25%		
VALOR		20	17	<u>13</u>	<u>8</u>	3		
Espaciado de Juntas		3 m	1 - 3 m	0.3 - 1 m	50-300 mm	50 mm		
VALOR		30	25	20	10	<u>5</u>		
Condición de Juntas		Muy rugosas sin continuidades cerradas, Paredes de roca dura	Ligeramente rugosa < 1 mm. de separación Paredes de roca dura	Ligeramente rugosa < 1 mm. de separación Paredes de roca suave	Espejo de falla o relleno de espesor < 5mm ó abiertos 1-5mm Fisuras Continuas	Relleno blando de espesor < 5mm. ó abiertas <5 mm. fisuras continuas		
VALOR		25	<u>20</u>	12	6	0		

<b>Aguas Subterráneas</b>	Cant. Infiltración 10 m. de túnel	Ninguna	25 litros/min	25-125 litros/min	>125 litros/min.
	Presión de agua	Cero	0.0-0.2	0.2-0.5	0.5
	Esfuerzo principal				
	Situación General	Totalmente Seco	Solo húmedo agua insterst.	Ligera presión de agua	Serios problemas de agua
<b>VALOR</b>		10	<b>7</b>	4	0

**Tabla 1.23Ajuste de valores por orientación de las juntas.**

Orientación de rumbo y buzamiento de las fisuras		Muy Favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy Desfavorable
Valores	Túneles	0	-2	<b>-5</b>	-10	-12
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

- Parámetro **A1**, resistencia de la roca intacta le corresponde el siguiente valor, **1** para el puntal izquierdo inferior y **4** para el derecho.
- Parámetro **A2**, el índice de calidad de la roca le corresponde un valor de **13** para el puntal izquierdo inferior y **8** para el derecho.
- Parámetro **A3**, el espaciado de juntas le corresponde un valor de **5**
- Parámetro **A4**, condición de juntas le corresponde un valor de **20**

- Parámetro **A5**, es con respecto a las aguas subterráneas, le corresponde un valor de **7**

- Parámetro **B**, que consiste en un ajuste de valores por orientación de la juntas, le corresponde un valor de **(-5)**

$$\text{RMR} = A1 + A2 + A3 + A4 + A5 + B$$

**Tabla 1.24 Determinación de la clase del macizo rocoso.**

Valor total del RMR	81-100	61-80	41-60	21-40	<20
Clase Número	I	II	III	IV	V
Descripción	Muy Bueno	Bueno	<b>Medio</b>	<b>Malo</b>	Muy Malo

**Tabla 1.25 Significado de las clases de macizos rocosos**

Clase Número	I	II	III	IV	V
Tiempo de Mantenimiento	10 años para 5 m	6 meses para 4 m	<u>1 semana para 3 m</u>	<u>5 horas para 1.5 m</u>	10 minutos para 0.5 m
Cohesión	> 3 Kg/cm <sup>2</sup>	2-3Kg/cm <sup>2</sup>	1.5-2 Kg/cm <sup>2</sup>	1-1.5 Kg/cm <sup>2</sup>	< 1 Kg/cm <sup>2</sup>
Ángulo de fricción	> 45 <sup>0</sup>	40 <sup>0</sup> - 45 <sup>0</sup>	30 <sup>0</sup> - 40 <sup>0</sup>	30 <sup>0</sup> - 35 <sup>0</sup>	< 30 <sup>0</sup>

**3.1 Ajuste que proponen Laubscher y Taylor a la clasificación de Bieniawski, consisten en la modificación del valor original y recomendaciones para el sostenimiento.**

- Meteorización

Algunos tipos de roca se meteorizan rápidamente cuando entran en contacto con el aire, afectando a tres parámetros.

**Tabla 1.26 Parámetros de corrección por meteorización.**

<b>Parámetro</b>	<b>Meteorización</b>	<b>Observaciones</b>
Rc	Disminuye hasta 96%	Afecta las microfisuras de la roca
RQD	Disminuye hasta 95%	La roca aumenta sus fracturas
Condición de Juntas	se reduce hasta un 82%	Si la meteorización es motivo de deterioro en las superficies de la fisura ó su relleno

- Esfuerzos In-situ e inducidos

Los esfuerzos, tanto in-situ como los inducidos pueden incidir sobre las fisuras, mantenimiento sus superficies en compresión o permitiendo que las fisuras se aflojen, y aumentan el riesgo de un movimiento cortante.

**Tabla 1.27 Parámetros de corrección por esfuerzos.**

<b>Parámetro</b>	<b>Esfuerzos In-situ e ind.</b>	<b>Observaciones</b>
Condición de Juntas	Aumenta hasta 120%	Las juntas quedan en compresión
	Disminuye hasta un 90%	Si el riesgo de un movimiento cortante aumenta
	Disminuye hasta un 76%	Si las fisuras están abiertas y con relleno delgado

- Cambios de los esfuerzos

Cuando hay cambios importantes por operaciones mineras, la situación de las fisuras es afectada.

**Tabla 1.28 Parámetros de corrección por cambios de esfuerzos.**

<b>Parámetro</b>	<b>Cambios de Esfuerzos</b>	<b>Observaciones</b>
Condición de Juntas	Aumenta hasta un 120%	Las fisuras siempre están en compresión
	Disminuye hasta en 60%	Causan movimientos cortantes importantes

- Influencia de las orientaciones del rumbo y buzamiento

El tamaño, la forma y la dirección del avance de una excavación subterránea tendrán una influencia sobre su estabilidad cuando se consideran en función del sistema de fisuras del macizo rocoso.

Laubscher y Taylor opinan, para garantizar la estabilidad de una excavación subterránea en una roca fisurada depende de la cantidad de fisuras y de los frentes de excavación que se desvían de la vertical y recomiendan los siguientes ajustes:

**Tabla 1.29 Parámetro de corrección por la influencia de las orientaciones**

Parámetro	Cantidad de fisuras	Porcentaje(*)				
		70%	75%	80%	85%	90%
Espaciado de juntas	3	3		2		
	4	4	3		2	
	5	5	4	3	2	1
	6	6		4	3	2,1

(Ajuste en porcentaje dependiendo de la cantidad de frentes inclinados en la excavación)

Se propone además los siguientes ajustes para los valores del espaciado de juntas, para las zonas de cortantes que se ubican en operaciones mineras:

0-15° = 76%

15°-45° = 84%

45°-75° = 92%

- Efectos de la voladura

Las voladuras crean nuevas fracturas y provocan movimientos en las fisuras existentes. Se proponen las siguientes reducciones para los valores del **RQD** y la **Condición de Juntas**.

Perforaciones de reconocimiento..... 100%

Voladuras de sección lisa..... 97%

Voladuras convencionales buenas..... 94%

Voladuras convencionales deficientes.....80%

-Ajustes combinados

En algunos casos la clasificación geomecánica se encuentra sujeta a más de un ajuste. El ajuste total no debe pasar de un 50%.

-Recomendaciones para el sostenimiento

Considerando los valores de clasificación ajustados y tomando en cuenta prácticas normales de sostenimiento en minas, Laubscher y Taylor han propuesto el siguiente cuadro:

**Tabla 1.30 Parámetros de corrección para sostenimiento.**

VALORES AJUSTADOS	VALORES GEOMECHANICOS ORIGINALES – BIENIAWSKI									
	90-100	80-90	70-80	60-70	50-60	40-50	30-40	20-30	10-20	0-10
70 - 100										
50 - 60		A	A	A	A					
40 - 50			B	B	B	B				
30 - 40				c,d	c,d	c,d,e	d,e			
20 - 30					E	f,g	f,g,j	f,h,j		
10 - 20						I	I	h,i,j	h,j	
0 - 10							K	k	L	L

Leyenda:

a- Generalmente no hay sostenimiento, pero algunas intersecciones de fisuras pueden necesitar pernos.

b- Cuadrícula de pernos cementados con espaciamiento de 1 m.

c- Cuadrícula de pernos cementados con espaciamiento de 0.75 m.

d- Cuadrícula de pernos cementados con espaciamiento de 1 m y 100 mm de concreto lanzado.

e- Cuadrícula de pernos cementados con espaciamiento de 1 m y concreto colado de 300 mm y que solo se usará si los cambios de los esfuerzos no son excesivos.

f- Cuadrícula de pernos cementados con espaciamiento de 0.75 m. y 100 mm de concreto lanzado.

g- Cuadrícula de pernos cementados con espaciamiento de 0.75 m y 10 mm de concreto lanzado y malla.

h- Concreto colado de 450 mm de espesor con una cuadrícula de pernos cementados con espaciamiento de 1 m. si los cambios de los esfuerzos no son excesivos.

i- Pernos cementados con espaciamiento de 0.75 m si hay un refuerzo potencial a la mano, y 100 mm de concreto lanzado, luego cimbras de acero a manera de técnica de reparación si los cambios en los esfuerzos son excesivos.

j.- Estabilizar con refuerzo de cable protector y concreto colado de 450 mm de espesor si los cambios en los esfuerzos no son excesivos.

k.- Estabilizar con refuerzo de cable protector seguido de concreto lanzado hasta e incluyendo el frente si es necesario y luego cimbras de acero poco separados, como técnica de reparación donde los cambios en los esfuerzos son excesivos.

l.- No trabajar en este terreno, o usar las técnicas j ó k.

### Notas Adicionales

1- Al evaluar los requerimientos de los esfuerzos hay que tomar en cuenta la clasificación geomecánica original así como los valores ajustados.

2- Los pernos son de poca utilidad en un terreno intensamente fisurado y no deberán usarse como único refuerzo cuando los valores de espaciado de juntas sea menor de 6.

3- Las recomendaciones del cuadro son aplicables a las operaciones mineras con niveles de esfuerzos menores de 30 MPa.

4-Galerías grandes solo se excavarán en roca con un valor de clasificación totalmente ajustado con valores de 50 ó más.

#### 4. Clasificación GSI. GEOLOGICAL STRENGTH INDEX

Tabla 1.31 Estimados de campo de la resistencia a la compresión uniaxial de la roca. (Marinos y Hoek, 2000)

Clasificación	Término	$\sigma_{ci}$ Resistencia a la	Índice de carga puntual	Estimado de resistencia en el campo	Ejemplos
R6	Extremadamente resistente	>250	> 10	La roca solo puede ser ligeramente lasqueada con una piqueta	Basalto, Diabasa, Gneiss, Granito, Cuarzita, Chert,
R5	Muy resistente	100-250	4-10	Para fracturar la roca se requieren de muchos golpes	Anfibolita, Arenisca, Basalto, Gabro, Gneiss, Granodiorita, Peridotita, Riolita, toba
R4	Resistente	50-100	2 -4	La roca puede ser fracturada por un golpe de piqueta	Caliza, Mármol, Arenisca y Esquistos
R3	Medianamente resistente	25-50	1 -2	No puede ser rallada por una navaja pero si puede ser fracturada por un golpe de piqueta	Filita, Esquistos y Arenisca
R2	Débil	5-25	**	Puede ser rallada con una navaja con dificultad y puede ser fracturada con un simple golpe de piqueta	Creta, Argilita, Marga, Aleurolita, Lutita y sal gema
R1	Muy débil	1-5	**	Puede desmenuzarse con un simple golpe de piqueta	Roca muy meteorizada y lutita
R0	Extremadamente débil	0.25-1	**	Puede hundir el pulgar	Roca desintegrada en zona de falla

Tabla 1.32 Estimación del parámetro D. (Hoek et al., 2002)

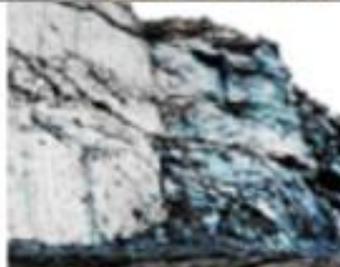
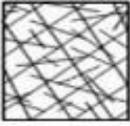
Apariencia del macizo rocoso	Descripción del macizo rocoso	Valor sugerido D
	<p>Excelente calidad de voladura controlada o excavación con tuneladora, TBM, con resultados de alteración mínima confinado circundante al túnel.</p>	<p><b><i>D=0</i></b></p>
	<p>Excavación mecánica o manual en macizos rocosos de mala calidad (sin voladuras) con una alteración mínima en el macizo rocoso circundante. Cuando aparezcan problemas de deformación en el piso durante el avance, la alteración puede ser severa a menos que se coloque una contra bóveda temporal, tal como se muestra en la fotografía.</p>	<p><b><i>D=0</i></b></p> <p><b><i>D=0.5</i></b> <b><i>Ningún invertido</i></b></p>
	<p>Voladura de muy mala calidad en un túnel de roca competente con daños locales severos, extendiéndose 2 o 3 m en el macizo rocoso circundante.</p>	<p><b><i>D=0.8</i></b></p>
	<p>Pequeñas voladuras en taludes de ingeniería civil dan lugar a pequeños daños al macizo rocoso, particularmente si se usan voladuras de contorno como se muestra en el lado izquierdo de la fotografía. Sin embargo la liberación de tensiones resulta en alguna alteración.</p>	<p><b><i>D=0.7</i></b> <b><i>Buena explosión</i></b> <b><i>D=1.0</i></b> <b><i>Mala explosión</i></b></p>
	<p>Los taludes en las grandes minas a cielo abierto sufren alteraciones significativas debido a las grandes voladuras de producción y también debido a la relajación de las tensiones al retirar el estéril de recubrimiento. En algunas rocas blandas la excavación puede llevarse a cabo mediante el ripado y empuje con tractores de oruga y el grado de afectación de los taludes será menor.</p>	<p><b><i>D=1.0</i></b> <b><i>Provocado por explosión</i></b> <b><i>D=1.0</i></b> <b><i>Excavación mecánica</i></b></p>

Tabla 1.33 Otra forma empírica de determinación de los parámetros (Marinos y Hoek, 2000)

<p>EL CRITERIO GENERALIZADO DE HOEK-BROWN</p> $\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left( m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + S \right)^a$ <p><math>\sigma_1</math> = esfuerzo efectivo principal mayor al fallo.  <math>\sigma_3</math> = esfuerzo efectivo principal menor al fallo.  <math>\sigma_c</math> = esfuerzo de compresión uniaxial de pedazos intactos de rocas.  <math>m_b, S</math> y <math>a</math> son constantes que dependen de la composición, de la estructura y de las condiciones de la superficie del macizo rocoso.</p>		CONDICIONES DE LA SUPERFICIE				
ESTRUCTURA		MUY BUENO Muy rugosa, superficie seca	BUENO Rugosa, poco alteradas, manchas de hierro en las superficies	REGULAR Aplanada, superficies ligeramente alteradas o alteradas	POBRE Pulidas, superficie fuertemente alteradas con recubrimiento compacto o rellenos de fragmentos angulares	MUY POBRE Pulidas, superficie fuertemente alteradas con alteraciones o relleno de arcillas
	POCO FRACTURADOS O MASIVAS- macizo rocoso muy poco tectonizada que están formados por bloques cúbicos formados por tres familias de grietas	$m_b/m_s$ 0.60 $a$ 0.190 $E_v$ 0.5 75,000 $GSI$ 0.2 85	0.40 0.062 0.5 40,000 0.2 75	0.26 0.015 0.5 20,000 0.25 62	0.16 0.003 0.5 9,000 0.25 48	0.08 0.0004 0.5 3,000 0.25 34
	MUY FRACTURADOS- en bloques irregulares, medianos y multifacetados, parcialmente tectonizadas y formadas por cuatro o más familias de grietas	$m_b/m_s$ 0.40 $a$ 0.062 $E_v$ 0.5 40,000 $GSI$ 0.2 75	0.29 0.021 0.5 24,000 0.25 65	0.16 0.003 0.5 9,000 0.25 48	0.11 0.001 0.5 5,000 0.25 38	0.07 0 0.53 2,500 0.3 25
	BLOQUES/PERTURBADOS- irregulares muy tectonizados, plegados y/o fallados con bloques angulosos formados por múltiples familias de grietas	$m_b/m_s$ 0.24 $a$ 0.012 $E_v$ 0.5 18,000 $GSI$ 0.25 60	0.17 0.004 0.5 10,000 0.25 50	0.12 0.001 0.5 6,000 0.25 40	0.08 0 0.5 3,000 0.3 30	0.06 0 0.55 2,000 0.3 20
	DESINTEGRADAS- laminadas y cizalladas, de bloques muy finos ahugulosos y redondeados mezclados que pueden ser esquistosas	$m_b/m_s$ 0.17 $a$ 0.004 $E_v$ 0.5 10,000 $GSI$ 0.25 50	0.12 0.001 0.5 6,000 0.25 40	0.08 0 0.5 3,000 0.3 30	0.06 0 0.55 2,000 0.3 20	0.04 0 0.60 1,000 0.3 10

En otras palabras el GSI es un índice que indica la disminución de la resistencia de un macizo rocoso, con respecto a la roca intacta, para diferentes condiciones geológicas y que se define en el terreno por observación de dos parámetros principales: estado de fracturación y calidad de las discontinuidades.

El **GSI** se debe dar en un rango de valores como se observa en la Tabla 18 donde se estima a partir de la descripción geológica.

#### 4.1 Estimación de propiedades a partir del GSI del macizo rocoso

El GSI es un sistema de caracterización del macizo rocoso que ha sido desarrollado para conocer las características ingeniero-mecánicas de la roca con una entrada de datos confiables, en particular los que guardan relación con las propiedades del macizo rocoso, es utilizado como una entrada directa para la selección de parámetros pertinentes para la predicción de deformabilidad y fuerza masiva en la roca.

Para el establecimiento de las diferentes propiedades se tuvieron en cuenta los siguientes criterios:

##### Criterio de rotura generalizado de Hoek & Brown

Para ello es lo mismo decir que este criterio es simplificado y se expresa como:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \{m_b \sigma'_3 / \sigma_{ci} + S\}^a$$

Donde:

$m_b$ : valor reducido de la constante del material  $m_i$  el cual viene dado por:

$$m_b = m_i \{GSI - 100 / 28 - 14D\}$$

$s$  y  $a$  son constantes para un tipo de roca dados por las siguientes relaciones:

$$s = \exp\{GSI - 100 / 9 - 3D\}$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{-GSI/15} - e^{-20/3})$$

$D$  es un factor que depende sobre todo del grado de alteración del macizo rocoso por los efectos de las excavaciones (mecánicas o voladuras) o por la relajación de esfuerzos, variando desde 0 para macizos rocosos insitu inalterados hasta 1 para macizos rocosos muy alterados.  $\sigma_{ci}$ : es la resistencia uniaxial compresiva para la roca intacta.

- **Módulo de deformación**

El módulo de deformación  $E_m$  para un tipo específico de roca viene dado por:

$$E_m (GPa) = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} * 10^{((GSI-10)/40)}$$

Donde:

**$E_m$** : Módulo de deformación en GPa

Estimación del parámetro  $a$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{-GSI/15} - e^{-20/3})$$

### 5. Gráfico de Miller (1965)

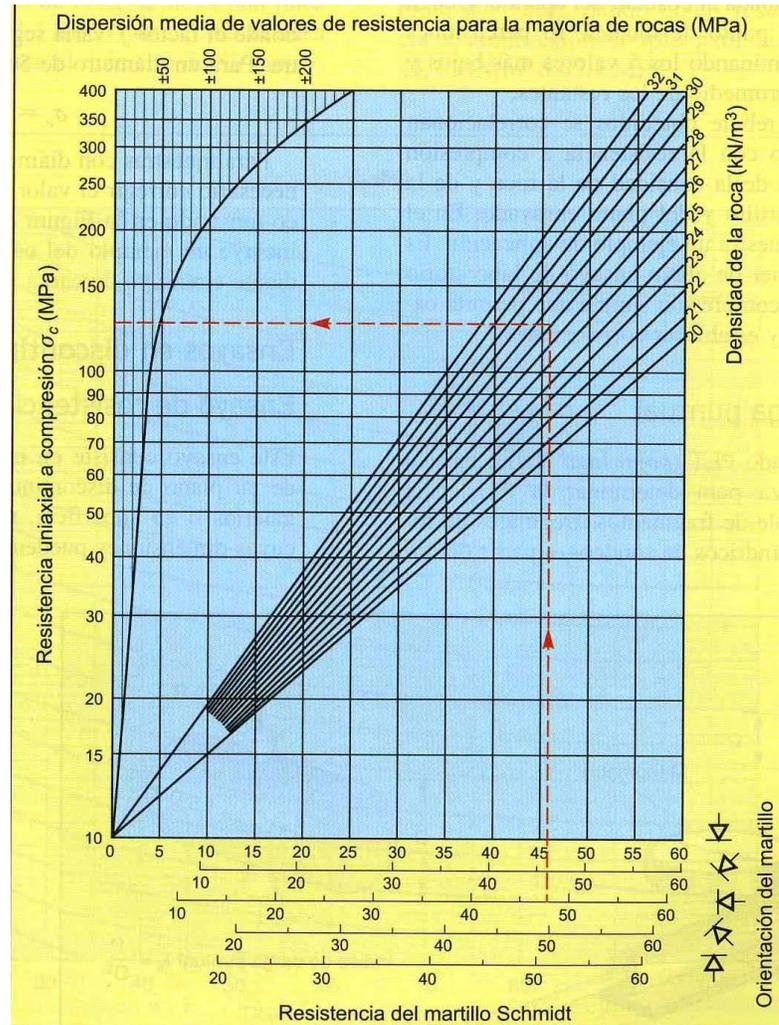


Figura No 1.14 Gráfico para determinar la resistencia a la compresión simple con el empleo del Esclerómetro y la densidad de la roca (Miller 1965)

## 6. Palmstron (1995)

Tabla 1.34 Tamaño del bloque en dependencia del rango de variación del volumen del bloque.

<i>Tamaño de bloque</i>	<i>Vb (m<sup>3</sup>)</i>
<i>Extremadamente pequeño</i>	Menor de 0.00001m <sup>3</sup>
<i>Muy pequeño</i>	0.00001 m <sup>3</sup> -0.0002 m <sup>3</sup>
<i>Pequeño</i>	0.0002 m <sup>3</sup> -0.01 m <sup>3</sup>
<i>Medio</i>	0.01 m <sup>3</sup> -0.2 m <sup>3</sup>
<i>Grande</i>	0.2 m <sup>3</sup> -10 m <sup>3</sup>
<i>Muy grande</i>	10 m <sup>3</sup> -200 m <sup>3</sup>
<i>Extremadamente grande</i>	Mayor de 200 m <sup>3</sup>

