



ISMMM. Dr. Antonio Núñez Jiménez
Faculta de Geología-Minas
Especialidad Minas

Trabajo de Diploma

*Título: Análisis y Cálculo de Sostenimiento
para el Túnel 2 del Trasvase Sabanalamar-Pozo Azul.*

Autor: Dennis Cosella Guilartes.

Tutor: Msc. Armando Cuesta Recio

JULIO 2009

Autor: Dennis Cosella Guilartes

I



Agradecimientos

- Ø Quisiera agradecer a mis padres por darme todo su apoyo confiar en que este sueño se haría realidad.*
- Ø Agradecer a mi tutor Armando Cuesta Recio por los conocimientos que me aportó y la preocupación por la realización de mi trabajo de Diploma.*
- Ø A mis familiares y amigos por hacer suyo este trabajo.*
- Ø A mis vecinos y amigos por su infinito apoyo.*
- Ø A mi hermano Dauris Cosella Guilartes por darme todo su apoyo y dedicación para que pudiese lograr convertir este sueño en realidad.*

A todos ellos muchas gracias.



Dedicatoria

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

A mi padre por formar parte de mi vida y con sus sabios consejos hacerme llegar hasta donde he llegado.

A mis hermanos Leonel, Iris, Miguel Ángel por brindarme su apoyo y completa preocupación.

A mi hermano Dauris Cosella Guilartes le dedico este trabajo, por ser la luz y guía de mis pasos.

A mis familiares en general, y en especial a Nidia Frómeta Rodríguez por su incondicional apoyo durante mis años de estudio.

A mis abuelos, que aunque no estén presentes merecen ser participes de este sueño realizado.

A mis amigos y vecinos que siempre me apoyaron. A Lupe, Vicente, Rosi.

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

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

A todos ellos muchísimas gracias.



Pensamiento

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

Fidel Castro Ruz.





Resumen.

Debido a la escasez de agua en los últimos tiempos, principalmente para las provincias orientales, se han propuesto medidas para resolver este problema que aqueja en gran medida a la población y a la economía. La Unión de Construcciones Militares (UCM) es la encargada de desarrollar trabajos a través de diferentes macizos rocosos para hacer llegar el agua hasta las zonas que más sufren de escasez de agua y para esto es necesario primeramente estudiar y evaluar los macizos rocosos.

Este trabajo compuesto de cinco capítulos, propone analizar el macizo rocoso donde se laboreará el túnel 2 del trasvase Sabanalamar-Pozo Azul, es decir, estudiarlo para conocer las características físico-mecánicas de las rocas y realizar la evaluación geomecánica del macizo rocoso para cada tramo de túnel y así determinar las características del sostenimiento que será utilizado.

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



Abstract.



Due to the shortage of water in the last times, mainly for the oriental counties, they have intended measures to solve this problem that it suffers in great measure to the population and the economy. The Union of Military Constructions (UCM) it is the one in charge of developing works through different solid rocky to make arrive the water until the areas that more they suffer of shortage of water and it stops this it is necessary firstly to study and to evaluate the solid ones rocky.

This work made up of five chapters, intends to analyze the solid one rocky where you laborea the tunnel 2 of the trasvase Blue Sabanalamar-well, that is to say, to study it to know the physical characteristics - mechanical of the rocks and to carry out the rocky classification geomecánica of the solid one for each tunnel tract and this way to determine the characteristics of the maintenance that it will be used. This classification geomecánica will be carried out by some of the well-known methods that it will be chosen after a decisive comparison of which it is more efficient of them and I complete.

Besides the analysis geomecanic, they are carried out used studies of the arid ones and they intend new arid to toast to the shotcrete (projected concrete) bigger resistance and quality, looking for to minimize the maintenance costs.



Índice.

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL DE LA TEMÁTICA.....	4
1.1: INTRODUCCIÓN:	4
1.2: ESTADO ACTUAL DE LA TEMÁTICA.	4
1.3: TRABAJOS PRECEDENTES.	12
CAPÍTULO 2: CARACTERIZACIÓN GEOMÉCANICA DEL MACIZO ROCOSO.....	13
2.1: CARACTERIZACIÓN GEOGRÁFICA DE LA OBRA:	13
2.1.1: <i>Delimitación del Área de la obra:</i>	13
2.1.2: <i>Hidrología:</i>	13
2.1.3: <i>Descripción General de la obra:</i>	14
2.1.4: <i>Tramo Túnel 2 con calicata y canal de salida (capas ingeniero-geológicas que se distinguen):</i>	14
<i>El túnel 2 atraviesa dos capas de las antes mencionadas, un primer tramo a través de argilita medianamente meteorizada, ocupando un 80% de la longitud del túnel, y un segundo tramo de túnel a través del conglomerado- brecha poco meteorizado, ocupando un 40%</i>	14
2.1.5: <i>Población.</i>	15
2.1.6: <i>Redes de Comunicación.</i>	15
2.2: OBJETIVOS Y CAPACIDADES DE PRODUCCIÓN O DE SERVICIO DE LA OBRA: ..	15
2.3: PRINCIPALES PARÁMETROS MINERO-TECNOLÓGICOS DE LA EXCAVACIÓN	
OBJETO DE ESTUDIO.	15
2.4: EVALUACIÓN DEL AGRIETAMIENTO.	16
2.5: CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO EN ESTUDIO.	16
2.5.1: <i>Introducción a las clasificaciones geomecánicas.</i>	16
2.6: COMPARACIÓN ENTRE AMBOS MÉTODOS:	30
2.7: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD.	30
2.8: RESULTADOS OBTENIDOS:	33
2.9: CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DE PROTODYAKONOV.	34
2.10: OTROS PARÁMETROS DEL MACIZO ROCOSO OBJETO DE ESTUDIO:	35
2.11: RESULTADOS OBTENIDOS POR LOS CÁLCULOS REALIZADOS:	36
CAPÍTULO 3: CÁLCULOS DE SOSTENIMIENTO.....	37
3.1: INTRODUCCIÓN:	37
3.2: TRABAJOS DE LABORATORIO:	37
3.3: ANÁLISIS DEL HORMIGÓN APLICADO Y DE LOS ÁRIDOS QUE SE USAN.	
PROPUESTA DE NUEVOS ÁRIDOS.	38
3.3.1: <i>Generalidades del Hormigón Lanzado:</i>	39
3.4: TRABAJOS DE LABORATORIO. ANÁLISIS DE LOS ÁRIDOS UTILIZADOS EN	
GUANTÁNAMO (SABANALAMAR-POZO AZUL).	51
3.5: CÁLCULO DEL SOSTENIMIENTO.	57
3.5.1: <i>Características de Sostenimiento.</i>	57
3.5.2: <i>Hipótesis de Presión Minera para Excavaciones Horizontales.</i>	59
<i>Hipótesis de Tsimbarievich:</i>	59
3.5.3: <i>Cálculo de Sostenimiento:</i>	60
3.5.4: <i>Resultados.</i>	64
CAPÍTULO 4: ROTECCIÓN DEL MEDIO AMBIENTE Y EL HOMBRE.....	65
4.1: INTRODUCCIÓN:	65



4.2: ACTUACIÓN DEL LOS TRABAJOS SUBTERRÁNEOS SOBRE EL MEDIO AMBIENTE.	65
4.3: PROTECCIÓN DEL HOMBRE.	65
CAPÍTULO 5: EVALUACIÓN ECONÓMICA.	68
5.1: INTRODUCCIÓN:	68
CONCLUSIONES.	72
RECOMENDACIONES.	73
BIBLIOGRAFÍA.	74
ANEXOS.	75



Introducción.

El Estado cubano ha establecido como su principal estrategia lograr la invulnerabilidad económica en los próximos años, lo que le permitirá al país salir del período especial y alcanzar niveles de desarrollo en lo social, económico, político y cultural, superiores a los obtenidos en períodos precedentes.

Para ello se ha previsto un volumen considerable de inversiones en las ramas energética, minera, de construcción industrial, en obras hidrotécnicas, las que están estrechamente vinculadas al desarrollo de la industria extractiva de recursos minerales y con la agricultura, el cual consideramos una importante rama que necesitamos continuar desarrollando.

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

Se reinicia la construcción del Trasvase Este-Oeste, obra de ingeniería iniciada en los años 90 y propuesta en aquel entonces como Obra más importante de la ingeniería cubana del siglo XX, que contempla la construcción de gran cantidad de canales y presas, el laboreo de túneles con el objetivo de trasvasar el agua existente en la zona noreste de la región oriental, donde son mas abundantes las precipitaciones y los ríos presentan un balance hídrico más favorable.

En el presente trabajo de diploma nos proponemos hacer llegar lo más sencillamente posible los términos del control de la presión minera, especialmente sobre túneles que se realizan en El Valle del Caujerí, excavaciones subterráneas que estarán destinadas para trasvasar agua a la presa Pozo Azul.



Para caracterizar el Macizo Rocosó, se debe recopilar la informaci3n necesaria para poder construir los modelos geol3gicos y geomecánicos del macizo en estudio. La recolecci3n de los datos debe definir e identificar todos los rasgos estructurales que controlan la estabilidad de la obra por construirse. El orden de la informaci3n dependerá de la capacidad de acceso a los afloramientos y zonas específicas por describirse. El nivel de detalles requeridos depende de la estructura e importancia del proyecto.

Justificaci3n de la Investigaci3n: Debido a la escasez de agua que padeci3 durante 10 ańos la regi3n oriental y por la posibilidad de que el fen3meno climático vuelva a repetirse, con las consecuencias negativas que ya produjeron para la economía y la poblaci3n es por lo que se ha hecho necesario tomar una serie de medidas para dar soluci3n a esta problemática en el futuro y que en el impacto de la economía de la regi3n sea mínimo.

La falta de agua en la regi3n afecta el abasto del preciado líquido a la poblaci3n, además a la agricultura, la ganadería y la industria. Una de las medidas tomadas por el gobierno cubano es la realizaci3n de estudios ingenieros-geol3gicos de algunas regiones para la construcci3n del complejo hidrÁulico, formado por presas, canales, puentes canales, túneles y estaciones de bombeo que permitan abastecer de agua a la parte central y occidental de la provincia Holguín y a las provincias de las Tunas y Camaguey.

Determinaci3n del problema, objeto y objetivos: Diversos autores han propuesto metodologías para el diseńo y la ejecuci3n de los cálculos de sostenimiento de excavaciones subterráneas y cálculo de estabilidad de los macizos rocosos.

Problema Científico: Necesidad de calcular los principales parámetros de la fortificaci3n por tramos de túnel a partir del estudio geomecánico del macizo rocoso, de forma que garantice las exigencias técnicas del Túnel 2 del trasvase Sabanalamar-Pozo Azul.



Objeto de estudio: Túnel 2 del Trasmase Sabanalamar-Pozo Azul de la provincia Guantánamo.

Campo de acción: La fortificación como elemento físico para el sostenimiento de obras subterráneas y acción de este para controlar las deformaciones del macizo.

Hipótesis: Si se conocen las propiedades de las rocas y las características mecánico-estructurales y físicas del macizo por tramos de túnel, las propiedades de los elementos de fortificación (hormigón proyectado), es posible calcular la fortificación que cumpla con las exigencias técnicas del túnel y minimice los costos de los trabajos de sostenimiento.

Objetivo general: Cálculo de los principales parámetros de cálculo de sostenimiento por tramos de túnel a partir del análisis de estabilidad del macizo rocoso para garantizar las exigencias técnicas y productivas del túnel.

Objetivos específicos:

- ✚ Estado Actual de la temática.
- ✚ Determinación de las propiedades mecánica-estructurales y físicas del macizo.
- ✚ Análisis del hormigón que se utiliza para el gunitaje y de sus componentes (Propuesta de nuevos áridos).
- ✚ Cálculo de los principales parámetros de la fortificación por tramos de Túnel.
- ✚ Evaluación económica

Estructura de la tesis: La tesis está estructurada en Introducción, 5 Capítulos, Conclusiones, Recomendaciones, Referencias Bibliográficas y Anexos.



Capítulo 1: ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL DE LA TEMÁTICA.

1.1: Introducción:

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

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

1.2: Estado Actual de La Temática.

El estado actual del conocimiento en mecánica de rocas, así como la definición y obtención de parámetros y adopción de modelos que representen el comportamiento real de los macizos rocosos, se encuentran en una fase de desarrollo inferior al de otras ramas de la ingeniería como pueden ser la Mecánica de Suelos, Hidráulica, Resistencia de Materiales, etcétera; bien por la menor antigüedad de la primera, o por una mayor complejidad frente a la simulación del problema real del macizo (López Jimeno, 1998). Como consecuencia de esto, resulta difícil establecer modelos analíticos del comportamiento del macizo rocoso que sean reflejo fiel de este, cuando se trata de resolver problemas de estabilidad o dimensionamiento de obras a cielo abierto o subterráneo. Antes esta dificultad, se abren dos caminos de estudio;



por el primero se llega al planteamiento analítico con búsqueda de nuevos modelos que simulen mejor la realidad del terreno y su comportamiento frente a la excavación, que permitan un diseño adecuado de ésta; y por el segundo, el planteamiento es empírico llegando al diseño de una excavación estable basado en la experiencia de obras anteriores, ambas vías distan mucho hoy en día de la perfección y por lo general, es una aplicación de ambas lo que se utiliza en la actualidad.

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

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



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

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

Por este período se publican los trabajos de T. HAGERMAN (1966). Que diferencia cinco tipos de macizos según su estabilidad, para lo cual parte del grado de debilitamiento estructural que ellos presentan, desde macizos totalmente estables (macizos homogéneos e 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.

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



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

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

BOLUCHOF en la década de los años 70, desarrolló un método para valorar la estabilidad dado por el índice - S -; este criterio es bastante completo incorporando parámetros como el coeficiente de fortaleza de las rocas, aunque le podría serlo aún más, si en vez de utilizar el parámetro n , que define el



modulo de agrietamiento lineal del macizo, se empleara, el módulo volumétrico, ya que el parámetro n no se puede precisar el volumen del bloque (según Bolushof, 1982. Martínez, 2000). Durante esta misma década aparecen otras Clasificaciones Geomecánicas de Macizo Rocosos, como las de, FRANKLIN, (1970 y 1975) y LOUIS en 1974, que han tenido menos seguidores (Moreno, 1998. González de Vallejo, 1998. López Jimeno, 1998).

La sencillez de los métodos propuesto por BIENIAWKI (1973) y BARTON, LIEN Y LUNDE (1974), (tomado Blanco, 1998. González de Vallejo, 1998). López Jimeno, 1998. Moreno, 1998) contribuyeron definitivamente a su rápida aceptación y expansión. Palmstróm en 1995 y 1996 propone el índice RMI, a partir de la resistencia a la compresión simple de la roca matriz, del parámetro de diaclasado JP en función de las discontinuidades y tamaño del bloque. El índice permite caracterizar macizos rocosos y calcular los parámetros del sostenimientos en excavaciones subterráneas (tomado de Palmstróm, 1998).

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

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



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

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

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

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

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



conocidas de evaluación de estabilidad. De esta investigación se derivó que el criterio de Barton (1974), fue el que mejores resultados arrojó.

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

Las investigaciones encaminadas a la caracterización geomecánica de los macizos rocosos, en nuestro país, no han alcanzado un desarrollo importante, utilizándose muy poco en el análisis del comportamiento de los macizos rocosos. Han sido empleados principalmente para el estudio del macizo en obras con fines hidráulicos y protectoras, en menor cuantía, le siguen el estudio en laderas, taludes, en obras civiles (viaductos, embalses, presas, etcétera) y por último (casi nulo) canteras y minas subterráneas, aunque se debe señalar que en los últimos diez años, se ha manifestado un cierto interés, por estas materias; destacándose los esfuerzos realizados, por el grupo de construcción subterránea del ISMMM, apoyándose en los cursantes de las Maestrías de Geomecánica y Construcción Subterránea, que desarrollaron varias tesis en esta línea de investigación, que constituyen importantes documentos científico – técnicos, en la realización de este trabajo, tales como: la Caracterización geomecánica de los macizos rocosos de la Mina Merceditas (según Cartaya, 1996), la geometría del agrietamiento de la Mina Merceditas y su estabilidad (tomado de Falero, 1996), la acción de la presión minera en las minas de cromo (tomado de Mondejar, 1996), la elección del método de arranque a partir de las clasificación geomecánica del macizo (Noa,1996), entre otras investigaciones. (según Blanco, 1998. Blanco, 2000. Cartaya, 1997. Cartaya, 1999. Cartaya, 2000. Guillerme, 1998. Mondejar, 1998. Mondejar, 1999. Mondejar, 2000).

El Centro de investigaciones y proyectos Hidráulicos y la Constructora Militar No.2, ambas de Holguín, desarrollaron un importante trabajo ingeniero geológico y geomecánico, en el macizo del Trasvase Este – Oeste, con el auxilio de medios y métodos novedosos, como son el procesamiento de



imagen por teledetección, la geofísica, y el empleo de las clasificaciones geomecánicas de Bieniawski, modificada por Federico Torres (1989), Barton y Deere, estas investigaciones constituyen una base importante para la caracterización geomecánica del macizo de esa obra. (tomado de Colectivo, 1991. Colectivo, 1992 a. Hidalgo, 1991 a, b. Pérez, 1991 a, b, c)

En el trabajo aplicación de nuevas técnicas en el estudio ingeniero geológico de los macizos rocosos del ing. J. M. Alfaro, (2000) se realiza un análisis de los trabajos de campo más importantes, utilizados en la evaluación de macizos rocosos a partir de la utilización de métodos de campo no tradicionales utilizados en nuestro país. En el mismo se hace un análisis y evaluación del agrietamiento del macizo rocoso de varios túneles en las provincias Granma y Santiago de Cuba. Como base fundamental para la evaluación de la estabilidad del macizo se emplearon las clasificaciones de Barton, Bieniawski y el SMR de Romana, este último para la evaluación de taludes. En el estudio se determinan las propiedades físico – mecánicas de las rocas, se hace la evaluación del agrietamiento del macizo y análisis cinemático de los bloques, y la medición de las deformaciones en el interior de las excavaciones. Esta investigación es sin dudas un paso importante para efectuar la caracterización geomecánica de los macizos rocosos, pero en nuestra opinión no se logra caracterizar geomecánicamente los mismos.

Otros esfuerzos en esta temática, lo constituye la investigación realizada por el Ing. J. L. Peñates, (2000) titulada: caracterización geomecánica de Macizo del Escambray, donde el peso de la investigación lo tienen los criterios geológicos, clasificando las rocas por su génesis, para la determinación de las propiedades físico – mecánicas, como únicos criterios para la caracterización geomecánica del macizo. Esto a nuestro juicio, más bien es una investigación ingeniero geológica, que constituye la base fundamental de la caracterización geomecánica, a la cual no se llega en el trabajo.

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



En nuestro país actualmente la mayoría de las investigaciones geomecánicas tratan como principales aspectos, las condiciones ingeniero geológicas del macizo rocoso y la evaluación de la estabilidad de estos, teniendo en cuenta las Clasificaciones Geomecánicas. En la presente investigación se consideran esos aspectos, pero además se introduce un nuevo enfoque, hasta ahora no tratado en la literatura consultada, que radica en la estimación del modelo geomecánico más representativo de los macizos rocosos a partir de su estudio diferenciado, de acuerdo a su comportamiento mecánico y estructural, principales formas de pérdidas de estabilidad y el mecanismo con que ellas se producen, estado tensional, bloquesidad, entre otros; con el empleo de una metodología integral de investigación.

1.3: Trabajos Precedentes.

Para la realización del proyecto que actualmente se ejecuta por La Unión de Construcciones Militares (UCM) en Guantánamo, se realizaron estudios al macizo para determinar las características de este, los encargados del proyecto planteado fue el Departamento de Inversión y Proyecto (DIP) y el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH). Estos se dirigieron especialmente hacia los trabajos hidráulicos, es decir sobre la conducción de agua del río Sabanalamar hacia la presa Pozo Azul.

Para nuestro nuevo proyecto nos adentramos en la parte de construcción, donde a partir de las características del macizo en estudio, definir un tipo de fortificación que permita cumplir con las exigencias del proyecto inicial, es decir, plazo de servicio de la excavación, etc. Para esto es necesaria la utilización de una fortificación que asegure los trabajos posteriores que se vayan a realizar en dicha excavación.



Capítulo 2: CARACTERIZACIÓN GEOMÉCANICA DEL MACIZO ROCOSO.

2.1: Caracterización Geográfica de la Obra:

Ubicación de La obra.

La zona de objeto de estudio se encuentra situada a 15,5 Km al norte de San Antonio del Sur, provincia Guantánamo y a 3Km aproximadamente, al sur del poblado Puriales de Caujerí, en la hoja cartográfica 1: 10 000, 5 276- IV- d- 5.

**(No se dan coordenadas por ser esta una obra con cierto carácter militar)*.*

El relieve de la zona es de premontañas bajas pertenecientes a las estribaciones sur de La Sierra Cristal Baracoa, norte de La Sierra del Convento y suroeste de La Sierra del Purial. Las cotas máximas están en el orden de los 480m y las mínimas 155m.

2.1.1: Delimitación del Área de la obra:

El trasvase está compuesto por dos objetos de obras fundamentales. El sistema de conducción con tres tramos, un tramo inicial de túnel con una longitud de 1301,0m y un ancho de 4.50m, seguido por un tramo de canal con 180. 27m y ancho de 25m, continúa un tercer tramo de túnel con 200.0 m y ancho 4.50 m. El segundo objeto de la obra, la derivadora con una longitud aproximada de 40m y un ancho de 10m, ocupando un área aproximado de 400m².

2.1.2: Hidrología:

El clima de la región es tropical, variando significativamente desde tropical húmedo en las montañas hasta tropical de sabana en las zonas bajas en dirección sur, hacia la costa y el cual puede ser bastante seco. Los puntos en estudio definen pequeñas cuencas montañosas que drenan la parte superior de la vertiente izquierda del río Pozo Azul, caracterizándose estas por avenidas



naturales que pueden considerarse significativas por sus dimensiones, dadas las altas precipitaciones máximas diarias de bajas probabilidades de la zona, sus pequeñas áreas de captación (entre 0, 215 y 2.01 Km²), las cortas longitudes de cauces y las grandes pendientes, que provocan que el escurrimiento de estas precipitaciones, después de las pérdidas iniciales por infiltración, apenas no hay transformación de la avenida por los factores físico-geográficos de dichas cuencas (cubierta vegetal, suelo, geología) se producen avenidas muy rápidas y con alto coeficiente de escorrentía.

2.1.3: Descripción General de la obra:

La obra consiste en una derivadora ubicada en el río Sabanalamar con una altura aproximada de 8.0m con cota de vertimiento 231.0m, de esta forma se eleva el tirante de agua, derivando la misma por un sistema de túneles y canales con un gasto de 1m³/s, trasvasando de esta forma hacia la presa Pozo Azul, un volumen anual de 10 Hm³.

2.1.4: Tramo Túnel 2 con calicata y canal de salida (capas ingeniero-geológicas que se distinguen):

La longitud total del tramo es de unos 320m, incluyendo calicata y canal. El túnel comienza en la cota 228.40m en la estación 1+610.00 con una longitud de 200.00m con una sección ovoidal de 4.50m de ancho y 4.50m de alto. La roca se torna frágil e inestable en presencia de agua. El nivel freático yace a pocas profundidades y oscilan entre 14.79m en la cala C-5 y 24.10m en la T-7a, para esta época de intensa sequía, teniendo en cuenta que la zona de descarga en dirección a los portales, la entrada y salida. En el período húmedo pueden ascender entre 1.5 y 3.0m según datos de archivos.

Capa N°6: Aleurolita y/o argilita medianamente meteorizada.

Capa N°6a: Argilita poco meteorizada.

Capa N°7: Conglomerado-Brecha intensamente meteorizado.

Capa N°7a: Conglomerado-Brecha poco meteorizado.

El túnel 2 atraviesa dos capas de las antes mencionadas, un primer tramo a través de argilita medianamente meteorizada, ocupando un 80% de la longitud



del túnel, y un segundo tramo de túnel a través del conglomerado- brecha poco meteorizado, ocupando un 40%.

2.1.5: Población.

Dentro de las poblaciones más importantes en la región tenemos el poblado de Puriales, Guaibanó, pertenecientes al municipio San Antonio del Sur. Algunos caseríos diseminados como son: El Turco, Quimbuelo, etc.

2.1.6: Redes de Comunicación.

En sentido general el sistema de comunicaciones está dirigido hacia la vía de comunicación terrestre, puesto que acá no se presenta otra, nos referimos a la carretera que une al municipio de San Antonio del Sur con el poblado de Puriales.

2.2: Objetivos y Capacidades de Producción o de servicio de la obra:

Elevar los niveles de aguas del río Sabanalamar a través de un cierre y derivar las mismas por un sistema de conducción de túneles y canales hacia el embalse Pozo Azul. El gasto de agua a conducir es de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ equivalente a un volumen anual aproximado de 10 Hm^3 .

2.3: Principales Parámetros Minero-Tecnológicos de La Excavación Objeto de Estudio.

Tabla 1: Parámetros Minero Tecnológicos de la Excavación Objeto de estudio.

Obra	Estén-sión (m)	Pendien-te	Profundidad de ubicación (m)	Ángulo de intersección del sistema de grietas con el eje	Carácter del Frente	Destino	Labor eado por:	Dirección
Túnel 2	200	0.0006	30	–	Homogé-neo	Hidrotéc-nico sin presión.	argilita	275°



2.4: Evaluación del agrietamiento.

En este túnel no se encuentran familias de grietas, solo unas pocas grietas aleatorias en forma de pequeñas brechas, poco visibles que están rellenas de cuarzo con una especie de alternancia con el eluvio de conglomerado- brecha y a medida que se va avanzando encontramos un cambio de litología (argilita, al conglomerado). Encontramos una falla en el frente que esta determinada por el mencionado cambio litológico, esta falla esta rellena de cuarzo. La capa N°6, representada por secuencias heterogéneas de eluvio de aleurolitas y argilitas que transicionan una de otras, sin ley geológica regular, formando ambos, estratos de (3-5) metros de potencia.

2.5: Clasificación Geomecánica del Macizo en Estudio.

Para la realización de análisis de la estabilidad de la excavación se usaron los datos recolectados por los geólogos de la DIP (Departamento de Ingeniería de Proyectos). En la interpretación de los datos se utilizaron los métodos de Barton y Bieniawski además del cálculo del RMR, RQD y J_v volumétrico para tener una mayor precisión de los resultados aunque se le prestó más importancia a la interpretación de los dos primeros los cuales vienen explicados a continuación.

2.5.1: Introducción a las clasificaciones geomecánicas.

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

Las clasificaciones pueden ser usadas en la etapa de Proyecto y también durante la Obra. En la etapa de Proyecto, permiten estimar el sostenimiento necesario en base a las propuestas del autor de cada sistema de clasificación,

mientras que durante la Obra, permiten evaluar la calidad del terreno que se va atravesando conforme avanza la excavación del túnel y aplicar el sostenimiento correcto en cada caso. En los esquemas que siguen se muestran las actividades concretas a efectuar en las dos etapas que se han considerado:

A): Según Barton:

La clasificación cuantitativa del macizo rocoso se basa en el denominado Sistema Q, que es un sistema de clasificación de las rocas basado en el índice de calidad del macizo rocoso, desarrollado por Barton en 1974, a partir de un conjunto de datos procedentes de distintos casos reales, en los que se contrastó la calidad de las rocas existentes y los sostenimientos aplicados en las distintas obras. El índice de calidad antes mencionado se popularizó rápidamente, llegando en la actualidad a constituir una referencia esencial, junto con el índice RMR de Bieniawski, en el diseño de obras subterráneas. En 1994, 20 años después de su creación, se realiza la última actualización del Sistema Q, basada en las correlaciones empíricas entre el espesor de hormigón proyectado, el espaciamiento entre bulones y la calidad del macizo rocoso de un total de 1.050 nuevos casos registrados, procedentes en su mayoría de los principales túneles de carreteras construidos durante los últimos diez años.

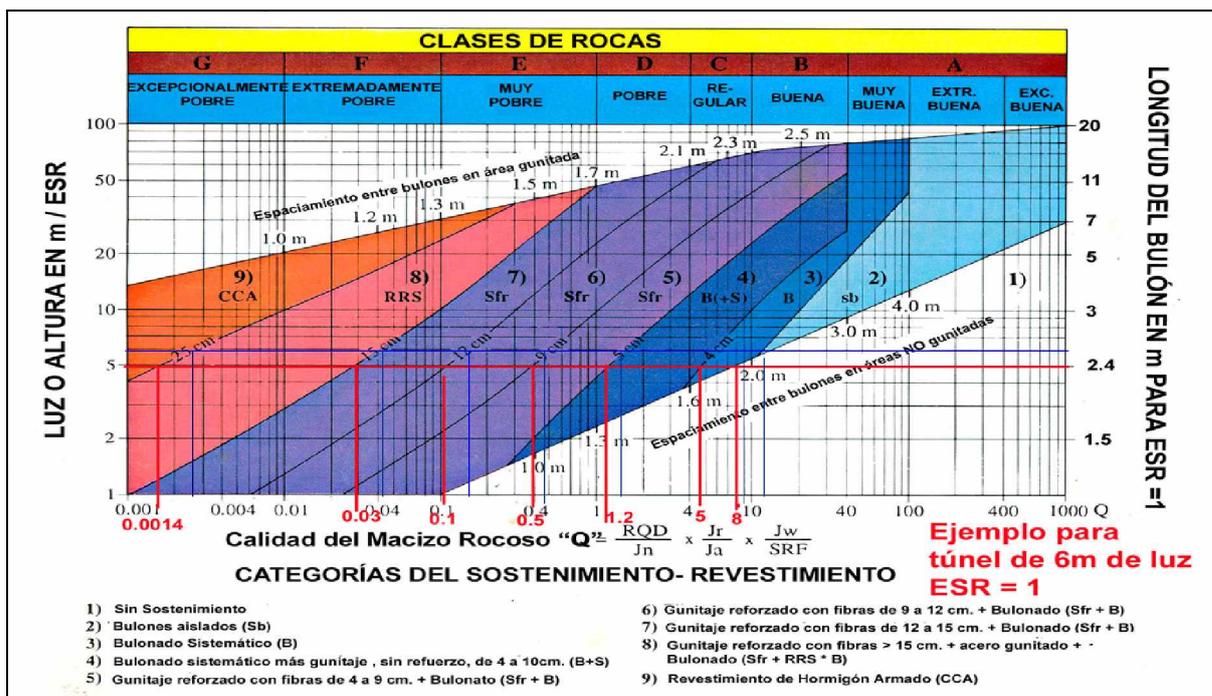


Figura1: Q de Barton para Clasificación de los Macizos Rocosos.



Después de un extenso período de ensayos y tanteos ejecutados en el año 1973, se consideraron finalmente un total de seis parámetros y un conjunto de categorías dentro del Sistema Q. De acuerdo con este sistema de clasificación, la calidad del macizo rocoso puede definirse mediante la expresión:

$$Q = (RQD/J_n) \times (J_r/J_a) \times (J_w/SRF).$$

Donde los diferentes parámetros que la forman el índice Q de calidad de la roca se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 2: Definición de los parámetros del índice de calidad del macizo.

RQD	Índice de fracturación.	Medida del tamaño de bloque.(RQD/J _n)
J _n	Índice de diaclasado.	
J _r	Índice de rugosidad de la discontinuidad.	Medida del ángulo
J _a	Índice de alteración o relleno de la discontinuidad.	Fricción entre bloques. (J _r /J _a)
J _w	Factor de reducción por la presencia de agua o filtraciones a través de las discontinuidades.	Medida de las tensiones efectivas.
SRF	Factor representativo de las condiciones tensionales de la roca.	(J _w /SRF)

El rango de valores numéricos que puede tomar el índice Q de calidad de la roca oscila entre 0,001 (excepcionalmente mala) y 1.000 (excepcionalmente buena). Los seis parámetros pueden estimarse a partir de la cartografía geológica de la zona y de la descripción de los testigos procedentes de los sondeos de investigación, pudiendo verificarse, o bien corregirse, posteriormente, durante la excavación.

El amplio rango de valores que puede tomar el índice de calidad del macizo rocoso (seis órdenes de magnitud) constituye una característica muy importante del sistema Q y refleja la variación en la calidad de la roca de manera probablemente más rápida que mediante la escala lineal del índice RMR. Debido a esta característica, se logra de manera más fácil la correlación con el resto de parámetros físicos de la roca. La calidad del macizo rocoso, se



correlaciona con el sostenimiento instalado, de forma que los resultados obtenidos con esta correlación se resumen en las tablas detalladas que a continuación se muestran.

Tablas de valores de los seis parámetros característicos del sistema Q

(Barton, Grimstad; Actualización 1994).

Tabla 3: Calidad del Testigo RQD (Rock Quality Designation) (RQD%)

A	Calidad Muy Mala.	0 -25
B	Calidad Mala.	25 -50
C	Calidad Media.	50 - 75
D	Calidad Buena.	75 - 90
E	Calidad Excelente.	90-100

Tabla 4: Índice de Diaclasado (Jn): (0.5-20).

A	Roca masiva, sin diaclasas o con fisuración escasa.	0,5 - 1,0
B	Una familia de diaclasas.	2
C	Una familia y algunas diaclasas aleatorias.	3
D	Dos familias de diaclasas.	4
E	Dos familias y algunas diaclasas aleatorias.	6
F	Tres familias de diaclasas.	9
G	Tres familias y algunas diaclasas aleatorias.	12
H	Cuatro o más familias, diaclasas aleatorias, roca muy fracturada, roca en terrones, etc.	15
J	Roca triturada, terrosa	20

**Tabla 5: Índice de Rugosidad de las Discontinuidades (Jr): (0.5-4).**

A	Diaclasas discontinuas.	4
B	Diaclasas onduladas, rugosas o irregulares.	3
C	Diaclasas onduladas, lisas.	2
D	Diaclasas onduladas, perfectamente lisas.	1.5
E	Diaclasas planas, rugosas o irregulares.	1.5
F	Diaclasas planas, lisas.	1.0
G	Diaclasas planas, perfectamente lisas.	0.5

Tabla 6: Índice de Alteración de las Discontinuidades (Ja): (0.75-20)

A	Discontinuidad cerrada, dura, sin reblandecimientos, impermeable, cuarzo.	0.75
B	Planos de discontinuidad inalterados, superficies ligeramente manchadas.	1.0
C	Planos de discontinuidades ligeramente alterados. Presentan minerales no reblandecibles, partículas arenosas, roca desintegrada libre de arcillas, etc.	2.0
D	Recubrimientos de arcillas limosas o arenosas. Fracción pequeña de arcilla (no blanda).	3.0
E	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.	4.0
F	Partículas arenosas, roca desintegrada libre de arcillas, etc.	4.0
G	Fuertemente sobre consolidados, con rellenos de minerales arcillosos no blandos (continuos, pero con espesores inferiores a 5 mm).	6.0
H	Sobre consolidación media o baja, con reblandecimiento, rellenos de minerales arcillosos (continuos, pero de espesores inferiores a 5 mm).	8.0
J	Rellenos de arcillas expansivas, es decir, montmorillonita (continuos, pero con espesores inferiores a 5 mm). El valor de Ja depende del porcentaje de partículas con tamaños similares a los de las arcillas expansivas.	8-12
K	Zonas o bandas de roca desintegrada o triturada y arcillas (ver clases G, H, y J	6-12
L	para la descripción de las condiciones de las arcillas).	
M		
N	Zonas o bandas de arcillas limosas o arenosas, con pequeñas fracciones de	5.0



	arcillas no reblandecibles.	
O P R	Zonas o bandas continuas de arcilla, de espesor grueso (ver clases G, H, y J, para la descripción de las condiciones de las arcillas).	10-20

Tabla 7: Factor de Reducción por La Presencia de Agua (J_w): (0.05-1)

Factor de reducción por la presencia de agua.		Presión de agua (Kg./cm ²)	J_w
A	Excavaciones secas o pequeñas afluencias, inferiores a 5 l/min, de forma localizada.	< 1	1,0
B	Afluencia o presión medias, con lavado ocasional de los rellenos de las discontinuidades.	1 - 2,5	0,66
C	Afluencia importante o presión alta en rocas competentes con discontinuidades sin relleno.	2,5 - 10	0,5
D	Afluencia importante o presión alta, produciéndose un lavado considerable de los rellenos de las diaclasas.	2,5 - 10	0,33
E	Afluencia, excepcionalmente alta o presión elevada en el momento de realizar las voladuras, decreciendo con el tiempo.	> 10	0,2 - 0,1
F	Afluencia excepcionalmente alta o presión elevada de carácter persistente, sin disminución apreciable.	> 10	0,1 - 0,05

**Tabla 8: Condiciones Tensionales de La Roca (SRF) (Stress Reduction Factor): (0.5-20).**

a) Las zonas débiles interceptan a la excavación, pudiendo producirse desprendimientos de roca a medida que la excavación del túnel va avanzando.

A	Múltiples zonas débiles, conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente, roca de contorno muy suelta (a cualquier profundidad)	10
B	Zonas débiles aisladas, contenido de arcilla o roca desintegrada químicamente (profundidad de la excavación < 50 m).	5
C	Zonas débiles aisladas, contenido de arcilla o roca desintegrada químicamente (profundidad de la excavación > 50 m).	2.5
D	Múltiples zonas de fracturas en roca completamente (libre de arcillas), roca de contorno suelta (a cualquier profundidad).	7.5
E	Zona de fracturas aisladas en roca completamente (libre de arcillas), (profundidad de la excavación < 50 m).	5.0
F	Zona de fracturas aisladas en roca completamente (libre de arcillas), (profundidad de la excavación > 50 m).	2.5
G	Terreno suelto, diaclasas abiertas, fuertemente fracturados en terrones, etc. (a cualquier profundidad).	5.0

b) Rocas competentes problemas tensionales en las rocas.		σ_v / σ_1	σ_v / σ_c	SRF
H	Tensiones pequeñas cerca de la superficie, diaclasas abiertas.	>200	< 0.01	2.5
J	Tensiones medias condiciones tensionales favorables.	200-10	0.01-0.3	1
K	Tensiones elevadas, estructuras muy compactas. Normalmente favorables para la estabilidad, puede ser favorable para la estabilidad de los hastiales.	10-5	0.3-0.4	0.5-2
L	Lajamiento moderado de la roca después de una hora en rocas masivas.	5-3	0.5-0.65	5-50
M	Lajamiento y estallido de la roca después de algunos minutos en rocas masivas.	3-2	0.65-1	50-200
N	Estallidos violentos de la roca, (deformación explosiva) y deformaciones dinámicas inmediatas en rocas masivas.	< 2	> 1	200-400



c) Rocas desfavorables: flujo plástico de roca incompetente sometida a altas presiones litostáticas.		SRF
O	Con bajas presiones.	5-10
P	Con altas presiones.	10-20
d) Rocas expansivas: actividad expansiva química dependiendo de la presencia de agua.		SRF
R	Presión de expansión suave.	5-10
S	Presión de expansión intensa.	10-15

Para determinar el RQD (Rock Quality Designation) en el campo y /o zona de estudio, existen hoy en día tres procedimientos de calculo.

PRIMER PROCEDIMIENTO: Se calcula midiendo y sumando el largo de todos los trozos de testigo mayores que 10 cm en el intervalo de testigo de 1.0 m, contando únicamente las discontinuidades naturales del testigo. En el caso que exista duda respecto al origen de la discontinuidad (natural o inducida) se toma el caso más conservador, es decir se considerará que la fractura es inducida (artificial). Las medidas se toman con respecto al eje del testigo. La sumatoria de estos trozos se expresarán en porcentaje del intervalo de 1.0 m. (Según Barton Lien y Lunde).

$$RQD\% = \frac{\sum \text{trozos} \geq 100}{150}$$

SEGUNDO PROCEDIMIENTO: Comprende el cálculo del RQD en función del número de fisuras, por metro lineal, determinadas al realizar el levantamiento litológico-estructural (Detail line) en el área y/o zona predeterminada de la operación minera (tomado de Gavilanes J. Hernán; Andrade Haro, B. (2004).

La fórmula matemática:

$$RQD = 100\lambda - 0.1\lambda^2 \quad (0.1\lambda + 1)$$

Siendo:

$$\lambda = \frac{N^{\circ} \text{ de Fisuras}}{SPAN}$$



TERCER PROCEDIMIENTO: Comprende el cálculo del RQD en función del número de fisuras, por metro cúbico, determinadas al realizar el levantamiento litológico-estructural (*Detalline*) en el área y/o zona predeterminada de la operación minera. Esta fórmula fue propuesta por Palmstrón (1982).

La fórmula matemática:

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

Siendo:

J_v = Número de fisuras por metro cúbico.

La calidad de la roca puede tener un rango que va desde $Q= 0.001$ a $Q= 1000$ en una escala logarítmica, teniendo en cuenta las siguientes categorías de macizos rocosos:

Tabla 9: Clasificación de las rocas según el índice de calidad Q:	
Tipos de rocas	Índice de Q
Excepcionalmente mala	10^{-3} - 10^{-2}
Extremadamente mala	10^{-2} - 10^{-1}
Muy mala	10^{-1} -1
Mala	1-4
Media	4-10
Buena	10-40
Muy buena	40-100
Extremadamente buena	100-400
Excepcionalmente buena	400-1000

B): Según Bieniawski:

El sistema de clasificación Rock Mass Rating o sistema RMR fue desarrollado por Z.T. Bieniawski durante los años 1972- 73, y ha sido modificado en 1976 y 1979, en base a más de 300 casos reales de túneles, cavernas, taludes y cimentaciones. Actualmente se usa la edición de 1989, que coincide sustancialmente con la de 1979.



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

- 1- La resistencia a compresión simple del material.
- 2- El RQD (Rock Quality Designation).
- 3- El espaciamiento de las discontinuidades.
- 4- El estado de las discontinuidades.
- 5- La presencia de agua.
- 6- La orientación de las discontinuidades.

Resistencia de La Roca: Tiene una valoración máxima de 15 puntos, y puede utilizarse como criterio el resultado del Ensayo de Resistencia a Compresión Simple o bien el Ensayo de Carga Puntual (Point Load).

RQD: Tiene una valoración máxima de 20 puntos. Se denomina RQD de un cierto tramo de un sondeo a la relación en tanto por ciento entre la suma de las longitudes de los trozos de testigo mayores de 10 cm. y la longitud total del sondeo.

Separación entre Discontinuidades: Tiene una valoración máxima de 20 puntos. El parámetro considerado es la separación en metros entre juntas de la familia principal de diaclasas de la roca.

Estado de las Discontinuidades: Es el parámetro que más influye, con una valoración máxima de 30 puntos. Pueden aplicarse los criterios generales de la tabla 9 o bien aplicar la tabla 10, en la que el estado de las diaclasas se descompone en otros cinco parámetros: persistencia, apertura, rugosidad, relleno y alteración de la junta.

Presencia de Agua: La valoración máxima es de 15 puntos. La tabla 9 ofrece tres posibles criterios de valoración: estado general, caudal cada 10 metros de túnel y relación entre la presión del agua y la tensión principal mayor en la roca.

Orientación de las Discontinuidades: Este parámetro tiene una valoración negativa, y oscila para túneles entre 0 y -12 puntos. En función del buzamiento de la familia de diaclasas y de su rumbo, en relación con el eje del túnel (paralelo o perpendicular), se establece una clasificación de la discontinuidad

en cinco tipos: desde Muy Favorable hasta Muy Desfavorable. Según el tipo, se aplica la puntuación especificada en la tabla 13 de acuerdo a la valoración de la tabla 11.

Para cada clase de roca, Bieniawski propone una cuantía de sostenimiento y un método de excavación (véase tabla 14). Esta tabla es aplicable a túneles excavados en roca mediante perforación y voladura, con anchura o vano comprendido entre 5 y 10 metros. Por último creemos de utilidad indicar algunas correlaciones que algunos autores han elaborado entre el RMR y otros parámetros, citadas igualmente por Bieniawski.

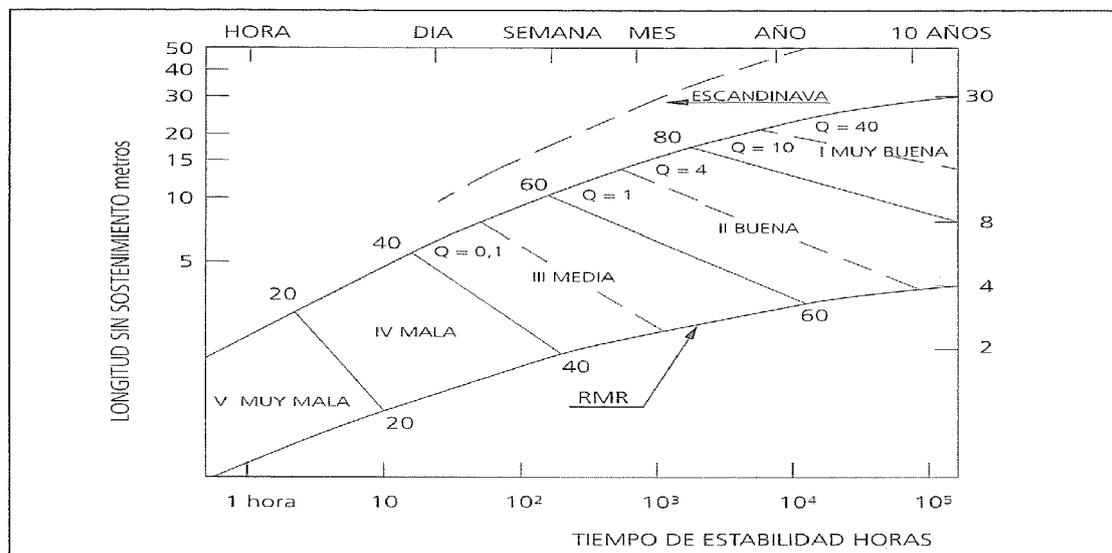


Figura 2: *Tiempo de Estabilidad según Bieniawski.*

Correlación: Además de existir unas cuantas correlaciones de diferentes orígenes entre el índice Q y el RMR aplicable para túneles, entre los que encontramos: $RMR = 9.0 \cdot L \cdot Q + 44$ (de origen diverso), $RMR = 12.5 \log Q + 55.2$ (España), entre otros.

El RMR se obtiene como suma de unas puntuaciones que corresponden a los valores de cada uno de los seis parámetros enumerados (tabla 9). El valor del RMR oscila entre 0 y 100, y es mayor cuanto mejor es la calidad de la roca. Bieniawski distingue cinco tipos o clases de roca según el valor del RMR:

- CLASE I: RMR (81-100); muy buena.
- CLASE II: RMR (61-80); buena.
- CLASE III: RMR (41-60); mediana.



- CLASE IV: RMR (21-40); mala.
- CLASE V: RMR (0-20); muy mala.

Tabla 9: Clasificación Geomecánica de Bieniawski.

Clase.	I	II	III	IV	V
Calidad.	Muy Buena.	Buena.	Mediana	Mala	Muy Mala
RMR.	81-100	61-80	41-60	21-40	0-20
Tiempo de estabilidad y longitud de vano.	20 años 15 metros	1 año 10 metros	1 semana 5 metros	10 horas 25 metros	30 minutos 1 metro
Cohesión (MPa).	> 0.4	0.3-0.4	0.2-0.3	0.1-0.2	< 0.1
Rozamiento.	> 45°	35-45°	25-35°	15-25°	< 15°

Tabla 10: Clasificación Geomecánica de Bieniawski, Parámetros de Clasificación.

Resistencia de las rocas sana (MPa)	Ensayo capa puntual	> 10	4-10	2-4	1-2	-
	Compresión. simple	> 250	100-250	50-100	25-50	5-25 1-5 <1
Valoración		15	12	7	4	2 1 0
RQD %		90-100	75-90	50-75	25-50	< 25
Valoración		20	17	13	8	3
Separación Discontinuidades		> 2m	0.6-2	0.2-0.6 m	0.06-0.2m	< 0.06 m
Valoración		20	15	10	8	5
Estado de diaclasas		Muy rugosas discontinuas borde sano y duro.	Ligeramente rugosas e < 1 mm borde duro.	Ligeramente rugosas e < 1 mm borde blando.	Rellenos e <5 mm abiertas y continuas.	Rellenos blandos e <5 mm continuas
Valoración		30	25	20	10	0



Presencia de Agua	Caudal en 10m túnel	Nulo	<10 l/min.	10-25 l/min.	25-125 l/min.	>125 l/min.
	σ_w / σ_3	0	0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5
	Estado	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Fluyendo
Valoración		15	10	7	4	0

Tabla 11: Guía Para Valorar el Estado de las Discontinuidades.

PARÁMETRO	VALORACIÓN				
	< 1m	1-3	3-10m	10-20m	> 20m
Longitud de la discontinuidad (Persistencia).	6	4	2	1	0
Apertura	Nada	< 0.1mm	0.1-1.0mm	1-5mm	> 5mm
	6	5	3	1	0
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente	Ondulada	Suave
	6	5	3	1	0
Relleno	Ninguno	Duro	Duro	Blando	Blando
	6	4	2	2	0
Alteración	Inalterado	Ligera	Moderada	Muy alterado	Descompuesto
	6	5	3	1	0

Tabla 12: Clasificación Geomecánica de Bieniawski. Orientación de las Discontinuidades.

Dirección Perpendicular al eje del Túnel.				Dirección Paralela al eje del Túnel. (Buzamiento)		Cualquier Dirección. (Buzamiento)
Excavación a favor de Buzamiento		Excavación a favor de Buzamiento				
45°-90°	20°-45°	45°-20°	20°-45°	45°-90°	20°-45°	0°-20°
Muy Favorable	Favorable	Medio	Desfavorable	Medio	Muy Desfavorable	Desfavorable

**Tabla 13: Clasificación Geomecánica de Bieniawski: Corrección por Orientación de las Discontinuidades.**

Dirección de Buzamiento		Muy Favorable	Favorable	Medio	Desfavorable	Muy Desfavorable
Valoración para	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentación	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Tabla 14: Necesidades de Sostenimiento (Según Clasificación Geomecánica de Bieniawski).

RMR	EXCAVACIÓN	BULONADO	GUNITADO	CERCHAS
>81	Sección completa avances de 3m	Algún bulón ocasional	Innecesario	No
61-80	Sección completa avances de 1-1.5m	Bulonado local en bóveda L=2-3m, S=2-2.5m	5cm en bóveda eventualmente mallado	No
41-60	Avance y destroza avance de 1.5-3m	Bulonado sistemático L=3-4m, s=1.5-2m	5-10cm en bóveda, 3cm hastiales. Mallado en bóveda	No
21-40	Avance y destroza avance de 1-1.5m	Bulonado sistemático L=4-5m, S=1-1.5m	10-15cm en bóveda, 10cm hastiales. Mallado sistemático	Ligeras s= 1.5m
< 20	Faces múltiples avances de 0.5-1m	Bulonado sistemático (incluso en solera)L=5-6m, s=1-1.5m	15-20cm en bóveda, 15cm hastiales y 5cm frente. Mallazo sistemático	Pesadas y cerradas s=0.75m



2.6: Comparación Entre Ambos Métodos:

La clasificación del macizo rocoso según Bieniawski y Barton, son de un interés muy especial, ya que incluyen un número suficiente de datos para poder evaluar correctamente todos los factores que tienen influencia en la estabilidad de una excavación tanto en túnel como en corte de taludes en roca. Bieniawski da más importancia a la orientación y a la inclinación de los accidentes estructurales de la roca. Barton no incluye en factor de la orientación de las fisuras pero si considera las propiedades de los sistemas de fisuras más desfavorables al evaluar la rugosidad de las fisuras y su grado de alteración, ambos representan la resistencia al esfuerzo cortante del macizo rocoso. Estos dos sistemas señalan que la orientación e inclinación de las estructuras son de menos importancia y que la diferencia entre favorable y desfavorable es adecuada para los casos prácticos, esto se puede aceptar para la mayoría de los casos que se encuentran en el campo. Existen algunos materiales como la pizarra que tiene características estructurales tan importantes que tienden a dominar el comportamiento de los macizos. En otros casos, grandes bloques quedan aislados por discontinuidades y causan problemas de inestabilidad durante la excavación, para estos casos los sistemas de clasificación descritos serán quizás no adecuados y se necesitarán consideraciones especiales para la relación entre la geometría del macizo y la excavación. Cuando se trata de rocas de muy mala calidad que implican rocas comprimidas, expansivas ó grandes flujos de agua, muchos autores han comprobado que la clasificación de Bieniawski es poco aplicable, esto se entiende ya que se ideó originalmente para túneles de poca profundidad y taludes en roca dura fracturada. Por tanto, en este tipo de rocas extremadamente malas se recurre al sistema de Barton. La relación que existe entre ambos métodos, está expresado como:

$$RMR = 9 \ln Q + 44.$$

2.7: Análisis de estabilidad

Los factores que influyen en las condiciones de estabilidad de la masa rocosa de las excavaciones subterráneas, que son de particular interés en términos de la operación minera día a día, son: la litología, intemperización y alteración, la estructura de la masa rocosa, los esfuerzos, el agua subterránea, la forma, el



tamaño y orientación de las excavaciones, el esquema y secuencia de avance del minado, la voladura, el tiempo de exposición abierta de la excavación y los estándares de sostenimiento.

Los seis parámetros pueden estimarse a partir de la cartografía geológica de la zona y de la descripción de los testigos procedentes de los sondeos de investigación, pudiendo verificarse, o bien corregirse, posteriormente, durante la excavación.

El amplio rango de valores que puede tomar el índice Q (seis órdenes de magnitud) constituye una característica muy importante del Sistema Q y refleja la variación en la calidad de la roca de manera probablemente más rápida que mediante la escala lineal del índice RMR. Debido a esta característica, se logra de manera más fácil la correlación con el resto de parámetros físicos de la roca.

Para determinar el índice RMR de calidad de la roca se hace uso de los seis parámetros que caracterizan el macizo objeto de estudio. La resistencia a compresión simple del material, el RQD designación cualitativa de la roca, el espaciamiento de las discontinuidades, su estado, la presencia de agua, y la orientación de las mismas. Este se obtiene como suma de unas puntuaciones que corresponden a los valores de cada uno de los seis parámetros enumerados Ver tabla 10

El valor del RMR oscila entre 0 y 100, y es mayor cuanto mejor es la calidad de la roca.

El RQD que se aprecia a lo largo de una vertical de un metro de longitud se calcula según la expresión $RQD = 115 - 3.3 \cdot J_v$, donde J_v es la cantidad de grietas en un metro lineal de roca.

La luz (L) es la distancia que hay de un lado del túnel al otro, o sea el diámetro del mismo. En dependencia de la dureza de la roca en la cual se perforará, si el cálculo de la Luz Teóricamente Estable es similar a la Luz escogida para los trabajos entonces la estabilidad es buena.



Orientación de las excavaciones:

La roca puede ser minada con mayor seguridad en una dirección que en otra, la dirección preferencial de avance de la excavación es determinada por el rasgo estructural dominante de la masa rocosa. Minar en la dirección preferencial de avance, significará tener condiciones más ventajosas para la estabilidad de la excavación. Contrariamente, minar en la dirección de avance menos favorable, puede alterar o debilitar la estabilidad de la masa rocosa durante la vida de la mina, representando peligro de caída de rocas.

Si una excavación avanza en forma paralela a un sistema principal de discontinuidades o al rumbo de los estratos, fallas principales y zonas de corte, las condiciones de estabilidad de la masa rocosa serán muy desfavorables por el debilitamiento de la roca, principalmente cuando el buzamiento de estas estructuras es mayor de 45° . Lo ideal para tener condiciones de estabilidad favorables de la masa rocosa en una excavación, es que ésta avance en forma perpendicular, cruzando al sistema principal de discontinuidades o al rumbo de los estratos, fallas principales y zonas de corte, es decir, al rasgo estructural dominante de la masa rocosa.

Para el análisis de estabilidad se hace uso del Unwedge 1- 3D. Este software es un programa interactivo, que constituye una herramienta fácil de trabajar para el análisis cinemática y geométrico de las cuñas de rocas que rodean a una excavación subterránea.

Cuando se está trabajando con Unwedge, se proporcionan varias vistas diferentes cada una de los cuales le permite realizar ciertas tareas (por ejemplo definir el límite de Sección de Apertura, las cuñas en diferentes vistas, etc.

Las roturas de las cuñas se producen producto a la intersección de las discontinuidades, o producto a la presencia de agua entre las grietas entre otros parámetros como relleno de las discontinuidades, etc. En el sistema global el factor de seguridad (FS) para que sea estable debe de ser mayor o igual a 1.5, en caso de que este sea menor será inestable por lo que las tensiones que actúan en el eje del túnel van a ser propensas a derrumbarse.

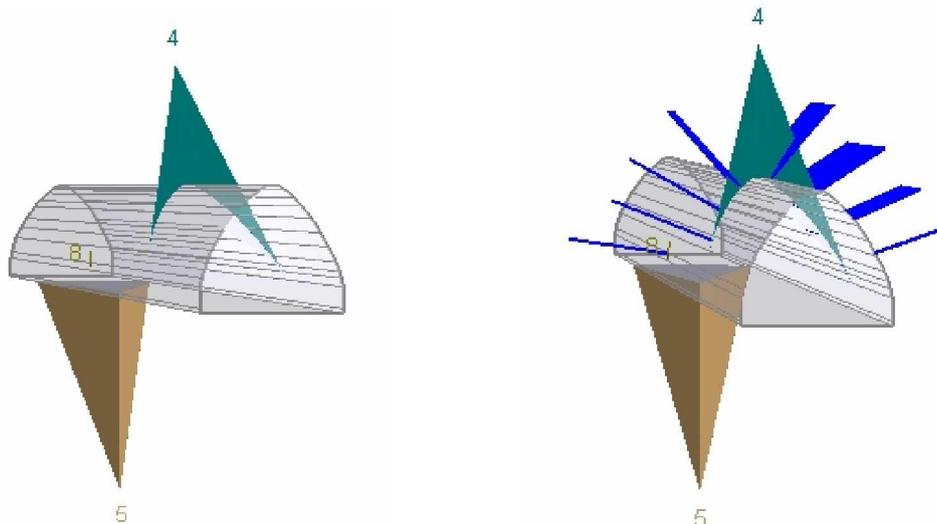


Figura3: Vistas en 3D de la sección del túnel y de las cuñas de rocas que actúan sobre la excavación.

Para los resultados obtenidos por el Software, tenemos entre los principales parámetros que:

Tabla 15: Resultados obtenidos por el Unwedge.

Cuñas (Leyenda)	Factor de Seguridad (Fortificado)	Superficie del Área de la Excavación	Ángulo del Vértice	Altura del Vértice	Volumen De la Cuña
4	35.729	122.08 m ²	83.02°	5.17 m	137.802 m ³
5	Estable	151.68 m ²	83.02°	0.36 m	422.760 m ³
8	1321.558	1.17 m ²	176.00°	0.08 m	0.0029 m ³

En el anexo 6, aparecen otras vistas.

2.8: Resultados Obtenidos:

Tabla 16: Coeficientes obtenidos para los tramos del túnel.

Tramos	Coeficientes						
	Jr	Ja	Jn	Jw	RQD	SRF	Q
I	4	8	3	1	90	2.5	6
II	4	8	3	1	79	5	2.6

**2.9: Clasificación geomecánica de Protodiakonov.**

Mediante esta clasificación geomecánica se define la calidad del macizo rocoso, por medio de un parámetro “f”, que es el coeficiente de resistencia. Este coeficiente está determinado por varias fórmulas que depende de la unidad en que tengamos la resistencia a la compresión y se hace uso de una u otra.

$$f = \frac{\sigma_c}{10} \quad \text{ó} \quad f = \frac{\sigma_c}{100}$$

Siendo:

σ_c = La resistencia a Compresión Simple de la roca expresada en MPa.

Teniendo en cuenta este coeficiente y las dimensiones de la excavación subterránea, se definen las cargas de cálculo para dimensionar el tipo de sostenimiento.

Tenemos entonces que: $f = \frac{\sigma_c}{10} = \frac{20 \text{ MPa}}{10} = 2$

Tabla 17: Calidad del macizo según el coeficiente de fortaleza.

Categoría	Descripción	“f”
Excepcional	Cuarcita, Basalto y Rocas de Resistencia Excepcional.	20
Alta Resistencia	Granito, Areniscas silíceas y Calizas muy Competentes.	15-20
Resistencia Media	Calizas, Granito algo alterado y Areniscas.	8-6
	Areniscas Medias y Pizarras.	5
	Lutitas, Areniscas Flojas y Conglomerados Friables.	4
	Lutitas, Esquistos y Margas Compactas.	3
Resistencia Baja	Calizas, Lutitas Blandas, Margas, Areniscas Friables, Gravas y Bolos Cementados:	2
	Lutitas Fisuradas y rotas, Gravas Compactas y Arcillas Preconsolidadas.	
Resistencia Muy Baja	Arcillas y Gravas Arcillosa.	1.0
	Suelos Vegetales, Turbas y Arenas Húmedas.	0.6
	Arenas y Gravas Finas.	0.5
	Limos y Loess.	0.3

(Según la tabla 17 nuestro macizo posee una resistencia baja)



$$\text{Resistencia a largo plazo: } \sigma_{\infty} = (0.6 - 0.8)$$

Condición de estabilidad del Macizo Rcoso, en el caso más general, viene dado por la siguiente expresión:

$$\sigma - Rc < 0$$

Siendo σ : tensiones actuantes

Rc : resistencia lineal a compresión de la carga

2.10: Otros parámetros del Macizo Rcoso Objeto de Estudio:

Componente de Fricción Interna (FC):

$$FC = \tan^{-1} \left(Jw * \frac{Jr}{Ja} \right); \text{ grados}$$

$$FC = \tan^{-1} \left(1 * \frac{4}{8} \right) = 27^{\circ}$$

Módulo de deformación del Macizo Rcoso (Em):

$$Em = 2RMR - 100; \text{ si } RMR > 50$$

$$Em = 10^{(RMR-10)/40}; \text{ si } RMR < 50$$

Según Bieniawski:

Tramo I:

$$RMR = 9 \ln Q + 44$$

$$Em = 2RMR - 100$$

$$RMR = 9 \ln 6 + 44$$

$$Em = 2 * 60.2 - 100$$

$$RMR = 60.2$$

$$Em = 20.4$$

Tramo II:

$$RMR = 9 \ln + 44$$

$$Em = 2RMR - 100$$

$$RMR = 9 \ln 2.6 + 44$$

$$Em = 2 * 52.6 - 100$$

$$RMR = 52.6$$

$$Em = 5.2$$

Índices de Resistencia de la roca:

Según datos obtenidos de Blanco Torrens, R; Sánchez Rial, E; Miró, R. (2006): Geomecánica Aplicada a la Pequeña Minería; LDM Editorial, para las rocas del macizo ofiolítico presentes en la región norte de Cuba Oriental, esta se determina por la siguiente ecuación matemática:

Tramo I:

$$R = 0.17R_c$$

$$R = 0.17 * 20$$

$$R = 3.4 \text{ MPa}$$

Tramo II:

$$R = 0.17R_c$$

$$R = 0.17 * 23$$

$$R = 3.91 \text{ MPa}$$

2.11: Resultados Obtenidos por los Cálculos Realizados:

Tabla 18: Resultados de algunos de los principales parámetros del macizo rocoso.

TRAMOS	Coeficiente de Fortaleza de la Roca(f)	Componente de fricción interna(FC)	RMR	Deformación del macizo rocoso(Em)	Índice de resistencia de la roca(R)
I	2	27°	60.2	20.4	3.4MPa
II	2.3	27°	52.6	5.2	3.91 MPa



Capítulo 3: Cálculos de Sostenimiento.

3.1: Introducción:

La fortificación de excavaciones subterráneas es un proceso que se realiza con el objetivo de sostener y controlar las deformaciones producto de las tensiones que ejerce un macizo rocoso determinado, sobre una cavidad subterránea.

El término sostenimiento es usado aquí para cubrir los diferentes aspectos relacionados con los bulones, concreto lanzado, reforzados con fibras de acero, entre otros métodos de estabilización de la masa rocosa. Existen varios tipos y métodos de sostenimiento de excavaciones subterráneas, y la elección de uno u otro depende en mayor medida de las condiciones del macizo.

3.2: Trabajos de Laboratorio:

N°	G1	G2	G3	G4
1(94-43)	57.5	166	67.5	172
2(71-148)	51.5	159	62	165

Tabla 19: Cálculos de densidad de muestras de roca del túnel 2:

$$\gamma_1 = \frac{G_3 - G_1}{G_2 - [G_4 - (G_3 - G_1)]} = \frac{10}{166 - [172 - (10)]} = \frac{10}{4} = 2.5 \text{ g/cm}^3$$

$$\gamma_2 = \frac{G_3 - G_1}{G_2 - [G_4 - (G_3 - G_1)]} = \frac{10.5}{159 - [165 - 10.5]} = \frac{10.5}{4.5} = 2.33 \text{ g/cm}^3$$

$$\gamma_{\text{promedio}} = \frac{2.33 + 2.5}{2} = 2.42 \text{ g/cm}^3$$

A continuación ofrecemos una tabla que recoge los demás valores obtenidos en los ensayos de laboratorio realizados a muestras recogidas del macizo en cuestión, en nuestro caso (argilita) debido que encontramos el conglomerado como un cambio litológico y este no presenta gran importancia a tener en cuenta para el diseño del pasaporte de fortificación.

**Tabla 20: Propiedades de la roca.**

Tipo de Roca	Densidad	Masa Volumétrica	Resistencia a la Tracción	Resistencia a la Compresión	Porosidad	Coefficiente de Fortaleza de la Roca
Argilita	2.42 g/m ³	2.20 g/m ³	1.33 MPa	20 MPa	9.1%	2
Conglomerado.	2.66 g/cm ³	2.46 g/cm ³	2.8 MPa	23,0 MPa	--	2.3

3.3: Análisis del hormigón aplicado y de los áridos que se usan. Propuesta de nuevos áridos.

Hormigón proyectado

Apropiadamente aplicado el hormigón proyectado es un material estructuralmente resistente y durable, con alta adherencia a roca, hormigón, albañilería, acero y otros materiales. La obtención de estas propiedades favorables es fruto de una adecuada planificación, supervisión y habilidad de la cuadrilla de aplicación. Otras bien conocidas características del hormigón proyectado, son la cantidad de rebote o rechazo que ocurre durante la proyección (25% - 40%) y la emisión del polvo al ambiente, principalmente cuando se utiliza el método de proyección por vía seca.

En construcción de túneles, la demanda de más alta calidad y economía en el hormigón proyectado se ha incrementado fuertemente en los últimos años en todo el mundo. El desarrollo de la moderna tecnología del hormigón proyectado ha tomado lugar a través de una estrecha colaboración entre usuarios y fabricantes de equipos y aditivos, Lográndose que el actual rango de equipos y productos disponibles en diversos países satisfaga la demanda por su alta calidad y economía de este material.

El hormigón es una piedra artificial que se obtiene como resultado del endurecimiento de una mezcla racional de un aglomerante (cemento-cal), agua, arena y un árido grueso (grava, piedra picada, etc).



Ventajas:

- A) _ posibilidad de variar sus propiedades en amplios límites, modificando los componentes utilizados y empleando métodos especiales de preparación.
- B) _ posibilidad de la mecanización total de los trabajos.
- C) _ economía con su empleo, pues entre el 80 y 85% de su volumen lo constituyen materiales de piedras locales.
- D) _ aplicación a cualquier altura, ya que el concreto se adhiere inmediatamente y sostiene su propio peso.
- E) -puede aplicarse sobre superficies irregulares.

Desventajas:

- A) _ incapacidad de soportar cargas inmediatamente después de aplicada.
- B) _ requiere de un alto grado de mecanización y operadores especializados.

3.3.1: Generalidades del Hormigón Lanzado:

Concreto lanzado es el nombre genérico del concreto cuyos materiales componentes son: cemento, agregados, agua, aditivos y elementos de refuerzo, los cuales son aplicados neumáticamente y compactados dinámicamente a alta velocidad sobre una superficie. La tecnología del shotcrete comprende los procesos de mezcla seca y de mezcla húmeda.

El producto final de los procesos del hormigón lanzado ya sea seco o húmedo es similar. El sistema de mezcla seca tiende a ser más utilizado en la minería subterránea, debido a que generalmente usa equipos pequeños y compactos, los mismos que pueden ser movilizadas en forma relativamente fácil en la mina. El sistema de mezcla húmeda es ideal para aplicaciones de alta producción, como en piques profundos o labores de avance de gran longitud y donde los accesos permiten operar al equipo de aplicación del gunitaje sobre una base más o menos continua. Las decisiones para usar procesos de hormigón lanzado seco o húmedo, son usualmente adoptadas para cada sitio en particular.



Adecuadamente aplicado, el hormigón proyectado es un material de construcción estructuralmente sólido y durable, con buenas características de adhesión con la roca y alta resistencia. Estas propiedades favorables se consiguen con buenas especificaciones y materiales, preparación adecuada de la superficie, buenas prácticas de mezclado, aplicación del shotcrete y supervisión.

Propiedades: La estructura interna de mezclas proyectadas, consta normalmente de áridos más finos y un mayor contenido de cemento que las mezclas tradicionales. Generalmente la razón agua / cemento es mas baja y su compacidad más alta, lo que incide en la porosidad. Los poros capilares se distribuyen uniformemente, no presentan habitualmente cavidades y, además la proyección genera poros finos, aislados y esféricos que funcionan como vasos de expansión mejorando la resistencia a las heladas. Por otra parte, la colocación en capas, impide casi totalmente la formación de fisuras continuas de contracción.

Los valores de resistencia a compresión habitual están entre 200 kgf/cm² y 450 Kgf/cm² (20 a 45 MPa), aunque en aplicaciones especiales se han desarrollado resistencia sobre 700 Kgf/cm² (70 MPa).

Indudablemente la propiedad mas destacada de mortero y hormigones proyectados, es su adherencia a la superficie de soporte, siempre que esta sea sólida, se encuentre limpia y saturada con superficie seca, y tanto mejor mientras sea más rugosa. Las propiedades del Hormigón se define como la capacidad del hormigón de soportar esfuerzos de compresión, tracción, flexión u otros.

La densidad de los hormigones proyectados, varía entre 2200 y 2400 kg/m³. Gracias a su estanqueidad elevada y a su adecuado volumen de poros capilares, las mezclas proyectadas presentan una excelente impermeabilidad y baja absorción. En consecuencia, tiene una buena resistencia a congelación y deshielo, al ataque químico, a la abrasión y al desgaste.



Como todos los morteros y hormigones, las mezclas proyectadas presentan una buena resistencia al fuego.

La retracción por secado del hormigón proyectado, varía con las proporciones de la mezcla, pero esta generalmente entre 0.06% y 0.1 %, lo que es ligeramente superior a un hormigón convencional de cono bajo. Ello debido a las mayores dosis de cemento utilizado. En consecuencia tiene un mayor potencial para generar fisuración, lo que exige una cuidadosa distribución de juntas y/o un mayor empleo de refuerzo.

Cementos:

El cemento Pórtland corriente es empleado de acuerdo con las especificaciones aplicables al concreto ordinario. Otros cementos como los resistentes a los sulfatos, pueden ser utilizados siempre que las condiciones así lo exijan. La relación agregados-cementos deberá ser del orden de 4:1, variando el contenido de cemento entre 250 y 400 kilogramos por metro cúbico.

Recomendaciones para el uso de los cementos:

Cementos Portland Puros: Para la Industria del prefabricado. Para morteros especiales estructurales. En caso de estructuras en contacto con agua de mar, el cemento con contenido de C3A menor o igual al 5% y suma del C3A y C4AF menor o igual al 22%

Cementos Portland-Puzolánicos: Para hormigón premezclado. Para estructuras en contacto con el agua de mar. Morteros especiales estructurales y morteros de albañilería

Cementos Puzolánicos: Para hormigones en contacto directo con aguas o suelos sulfatados. Estructuras masivas y estructuras en contacto directo con agua de mar. Morteros especiales y morteros de albañilería.

Cementos de Albañilería: Sólo para morteros de albañilería

Cemento Blanco: Hormigón arquitectónico. Hormigones coloreados. Morteros estructurales especiales expuestos. Pastas de asiento para cerámica blanca en baños y cocinas



Cemento Hidrófobo: Hormigones premezclados para estructuras con elevados requerimientos de durabilidad en protección primaria. Cemento con tiempos de almacenaje muy prolongado (3 años o más)

Normas cubanas actuales relativas a los cementos:

- + Cemento Portland. Especificaciones (P- 350; P-450; P- 550)
- + Cemento con adición activa. Especificaciones (PP- 25; PP- 35; PZ 25)
- + Cemento de albañilería. Especificaciones (CA- 16)
- + Cemento resistente a los sulfatos. Especificaciones (PMRS; PARS)
- + Cemento de moderado y bajo calor de hidratación. Especificaciones (PMC;PBC)
- + - Cemento blanco. Especificaciones (CBA- 85); (CBA- 90).

Relación Agua-Cemento: La relación agua-cemento está comprendida, generalmente entre 0.36-0.45, considerándose muy baja, por esta razón se tiene resultados de valores de resistencia elevados. En término medio, la relación A/C para concreto proyectado por la vía seca se sitúa ligeramente sobre 0.5, es decir, sólo requiere el agua necesaria para su fijación sobre la superficie que se está aplicando, esta cantidad es, por regla general, inferior a la requerida por el concreto tradicional, luego hay menos agua superfina que eliminar, por lo tanto, menos porosidad capilar en la masa de concreto. Esto explica por qué en el concreto proyectado se obtiene una permeabilidad mínima.

Aditivos:

Los aditivos son productos que se añaden al concreto proyectado para modificar ciertas propiedades del mismo, mejorando la velocidad de fraguado, evitando el rechazo y contribuyendo a un estancamiento del agua de infiltración.

Los acelerantes de fragua son sales hidrosolubles de ácidos fuertes, sales alcalinas de ácidos débiles, hidróxidos alcalinos o sustancias orgánicas de reacción alcalina, o mezclas de estos que cumplen su cometido al reaccionar químicamente con el clínker del cemento.



Todos los acelerantes de fragua disminuyen la resistencia final del concreto lanzado, la ganancia de la resistencia inicial va siempre acompañada de la pérdida de resistencia final, este fenómeno se debe al régimen energético del cemento y a la introducción de iones extraños por el acelerante.

El empleo de acelerantes requiere de mucha prudencia, no sólo para evitar la pérdida de resistencia final, también un empleo excesivo provoca eflorescencias blancas en la superficie tratada.

Sigunit -L53/P1 AF: Acelerante para concreto lanzado libre de álcalis

Descripción: Polvo soluble en agua para producción de Acelerante de concreto lanzado libre de álcalis.

Usos: Sigunit-L53/P1 AF es un grupo de productos acelerantes para concretos lanzados vía seca y vía húmeda. Los principales concretos lanzados vía seca y vía húmeda. Las principales aplicaciones para este producto son:

- Soporte temporal de túneles
- Soporte de roca y protección de taludes
- Capas de concreto lanzado de alta calidad

Efectividad: La efectividad del producto depende de contenidos de cemento, tipos de cemento, temperatura del concreto lanzado y substrato así como del espesor de capa y método de aplicación.

Las ventajas principales en el uso del **Sigunit-L53/P1 AF** como Acelerante para concreto lanzado son:

- Producto libre de álcalis
- Usado correctamente, pérdida marginal de resistencia a la compresión en el concreto lanzado.
- Notable disminución de rebote
- Fácil colocación de lanzado sobre cabeza logrado por un concreto lanzado de alta adherencia a la roca y concreto
- Notable disminución en la formación de polvo
- Libre de cloruros, por lo que no ataca al acero de refuerzo



- Fácil dilución del Sigunit-P1 (polvo) en sitio para un concreto lanzado efectivo en sitio produciendo cantidades requeridas ahí mismo
- Al realizar la mezcla del producto esta puede alcanzar altas temperaturas.

Sikatard[®] 930: Aditivo estabilizador de fraguado para concreto lanzado.

Descripción del producto: Aditivo desarrollado para controlar la hidratación del cemento. De esta forma, las mezclas de concreto pueden estabilizarse durante periodos de tiempo sin perder su calidad.

Usos: Se utiliza principalmente para la estabilidad de concretos proyectados por vía seca o vía húmeda en trabajos de obras subterráneas, alargando su tiempo de manejabilidad.

Ventajas: Con la utilización de aditivos estabilizador Sikatard-930 se consigue un concreto enormemente fluidificado, retrasando al mismo tiempo la hidratación del cemento durante un período de tiempo que depende de la dosificación de aditivo utilizada. La mezcla de concreto fresco permanece estable durante el tiempo de retraso manteniéndose constante su trabajabilidad y la calidad del mismo.

- Su efecto es distinto al de los retardadores de fraguado tradicionales, los cuales se limitan a ralentizar fuertemente la hidratación del cemento.
- El concreto proyectado por vía húmeda o vía seca estabilizado con el aditivo Sikatard-930, se activa inmediatamente cuando entra en contacto con un aditivo acelerante de fraguado, de forma que se reanuda de nuevo la hidratación de la mezcla.
- El aditivo estabilizador de fraguado Sikatard-930 está exento de cloruros y de otras sustancias que favorezcan la corrosión del acero. Esto permite utilizarlo sin ningún problema en las construcciones de concreto armado. No es tóxico

Modo de empleo: El concreto proyectado por vía húmeda, el aditivo Sikatard-930 se añade a la mezcla directamente en la planta de concreto, junto con el agua de mezcla, debiéndose prolongar el tiempo de mezcla de al menos 1 minuto por cada m³ de concreto. Previamente a su utilización deberá re-mezclarse de nuevo en el camión (mixer) estabilizado se activará mediante la



utilización de un aditivo acelerante de fraguado, añadido a la mezcla de hormigón en la manguera de transporte a 5 m de la boquilla de proyección.

Sika ViscoCrete® SC-305 (VP): Superplastificante con efecto de retardo y estabilización

Descripción: Superplastificante para hormigones de altas prestaciones, con efecto retardante del de producto fraguado y de estabilización de la mezcla. Cumple con las especificaciones de la norma UNE-EN 934-2, de acuerdo a los tipos FM y VZ.

Usos: Se utiliza para la ejecución de hormigón proyectado por vía húmeda, en combinación con distintos tipos de Sigunitas. Con el uso del Sika Viscocrete SC-305 (VP), el hormigón proyectado se retarda y estabiliza, y se mantiene sin pérdida de trabajabilidad durante el transporte, hasta 3 horas. Sika Viscocrete 305 (VP) mejora el tiempo abierto y la ductilidad, dando como resultado una presión para la proyección menor. La combinación del Sika Viscocrete SC-305 (VP) y los acelerantes Sigunitas incrementa en gran medida la rapidez de adquisición de resistencias.

Ventajas: Sika Viscocrete fluidifica en gran medida el hormigón fresco, y permite una reducción de la relación a/c, sin influenciar negativamente la trabajabilidad de la mezcla original.

Al mismo tiempo, la hidratación del cemento se retarda durante cierto tiempo.

Dependiendo de la dosificación, el hormigón fresco permanece estable y retardado por un tiempo predeterminado, manteniendo así la trabajabilidad. El hormigón proyectado retardado se puede acelerar con Sigunitas en cualquier momento, sin pérdida de cantidad.

El retardo y la estabilización dependen en gran medida de:

- Temperatura del hormigón.
- Temperatura ambiente.
- Relación a/c.
- Tipo de cemento.
- Edad del cemento.



Son absolutamente necesarias pruebas previas para lograr la dosificación deseada.

Sika ViscoCrete SC-305 (VP) no contiene cloruros u otros elementos promotores de la corrosión del acero.

Dosificación: Entre 0,6 y el 1,5% del peso de conglomerante dependiendo de la consistencia requerida y el tiempo de trabajabilidad necesario.

Modo de aplicación: Se añade en el agua de amasado o en la mezcladora al mismo tiempo que el agua.

Dosificación y Curado: Al diseñar un hormigón, se debe tener especial cuidado que las propiedades específicas que se están dando al hormigón, sean las necesarias, pues los requerimientos de exposición son generalmente mucho más exigentes, con las dosificaciones; que los requerimientos de resistencia.

Al igual que el concreto, el shotcrete también debe ser curado de tal manera que su resistencia potencial y su durabilidad sean completamente desarrolladas. El mejor método de curado es mantener húmedo el shotcrete continuamente por 7 días, utilizando para tal fin el agua. El curado natural puede ser considerado siempre y cuando la humedad relativa del lugar sea mayor de 85%.

El diseño de dosificaciones para mortero u hormigón proyectado, se basa normalmente en la resistencia a compresión específica. En aplicaciones especiales, pueden requerirse propiedades distintas a la resistencia de compresión, tales como impermeabilidad o durabilidad.

Hay dos aproximaciones distintas para especificar una dosificación: por comportamiento o por prescripción. En el primer caso, se especifica la calidad requerida y el constructor decide como cumplir con ella.

Normalmente se especifica la calidad de materias primas y la resistencia a compresión. En el caso de dosificación por prescripción, se indica solamente la calidad de materias primas y su proporción en masa, por ejemplo, cemento; árido = 1:4.



Los principios de tecnologías de mezclas corrientes, pueden aplicarse en general para dosificar morteros y hormigones proyectados, tomando en cuenta sus particularidades: las mezclas proyectadas, tiene un contenido de cemento mas alto y una granulometría mas fina que la mezcla original (debido al rechazo). Estas características incrementan la retracción y la posibilidad de figuración, y se dan con mayor intensidad en el proceso por vía seca. El contenido de aglomerante en mezclas proyectadas, oscila normalmente entre 250 y 450 kilos de cemento por 1000 litros de árido con su humedad natural.

La dosificación de mezcla por vía húmeda puede hacerse básicamente de acuerdo con métodos conocidos, como Faury o ACI, para hormigones bombeados. El asentamiento debe ser el mínimo que pueda colocarse con el equipo empleado, normalmente entre 4 y 8 cm en el cono de Abrams. Exceso de asentamiento, produce mezclas más débiles y deslizamiento o desprendimiento en colocación sobre superficies verticales o sobre cabeza.

Cuando se especifique aire incorporado, es recomendable un contenido entre 5% y 8% en la bomba. Debe considerarse una perdida entre 0.5% y 5% de aire y de 1 cm a 2.5 cm de asentamiento durante la impulsión.

Materiales componentes del Shotcrete y sus proporciones en las mezclas.

El cemento que se utiliza normalmente es el Pórtland Estándar. Como regla práctica, los agregados más grandes no deberían ser más de 16mm. La experiencia ha mostrado que con agregados de más de 16mm se incrementa drásticamente el rebote, aproximadamente el 60-70 % de los agregados sobre 8 mm están contenidos en el rebote. Por otro lado, debe haber suficiente cantidad de finos, menores de 0.2mm, para formar una capa inicial sobre la superficie de la roca.

El agua de la mezcla debe ser limpia y libre de sustancias que puedan dañar al concreto o al acero. Se recomienda agua potable, en caso contrario el agua debe ser ensayada, de tal manera de asegurar que la resistencia de los cubos de mortero sea como mínimo el 90% de la resistencia de cubos de mortero



hechos con agua destilada. El agua de curado deberá estar libre de sustancias que puedan dañar el concreto.

Se usan aditivos para mejorar las propiedades del shotcrete, éstos pueden ser: los acelerantes de fragua, que no deberán ser usados en más del 2% en peso del cemento; los reductores de agua; y los retardantes. Recientemente se ha introducido la microsílica como un añadido cementante, ésta es una puzolana extremadamente fina que utilizada en cantidades del 8 al 13 % por peso del cemento, permite duplicar y hasta triplicar la resistencia del shotcrete, además reduce el rebote, mejora la adhesión a la superficie de la roca y permite colocar capas de hasta 200 mm de espesor en un paso simple, por su calidad “pegajosa”, sin embargo, en la mezcla húmeda, esta calidad de pegajosa disminuye la facilidad de trabajo, requiriéndose de superplastificantes para restaurar dicha facilidad de trabajo de los elementos de refuerzo

Como elementos de refuerzo, se tienen principalmente las fibras de acero, la malla electrosoldada firmemente adosada a la superficie de la roca (la malla eslabonada no es ideal para la aplicación del shotcrete, debido a la dificultad del shotcrete para penetrar la malla) y las varillas de fierro o acero corrugadas libres de aceites, grasas, polvo u otros materiales que puedan afectar la adhesión del shotcrete.

La práctica y experiencia indica que las proporciones más adecuadas son:

Tabla 21: Proporciones más adecuadas para la mezclas.

Cemento	20 %
Para mezcla seca.	320-460 Kg/m ³ (menos para shotcrete grueso y más para el fino)
Agregados gruesos	15% al 20%
Agregados finos	60% al 65%
Relación agua-cemento(mezcla seca)	0.30-0.50
Relación agua-cemento(mezcla húmeda)	0.40-0.55



Principio de Acción del Shotcrete en el Sostenimiento de Excavaciones Rocosas.

- ✚ La acción conjunta del shotcrete y la roca, impide que estos se deformen independientemente.
- ✚ La interacción induce la formación de un esfuerzo radial de confinamiento, que controla las deformaciones y que aplicado sobre la periferia de la excavación, ayuda a la formación de un arco de sustentación.
- ✚ El shotcrete mantienen el entrabe de las posibles cuñas o bloques rocosos, sellando las discontinuidades o grietas producidas por la voladura.
- ✚ Evita la alteración de minerales inestables presentes en el macizo rocoso excavado, por defecto del intemperismo.

Rebote: En el contexto del proceso constructivo de obras de hormigón, la proyección del material sobre una superficie a alta velocidad constituye una técnica de puesta en obra interesante desde el punto de vista productivo ya que reúne dos etapas del proceso (colocación y compactación) en una misma acción constituida por la proyección.

Al producirse esta proyección, parte del material no se adhiere a la superficie. Hay un cierto rebote que se convierte en una de las características básicas del proceso por su influencia no sólo en las propiedades del material sino también en los aspectos económicos.

Espesor de la aplicación: Siempre que sea posible el shotcrete debe ser aplicado a su espesor completo de diseño en una sola capa. Éste puede ser aplicado en capas o espesores simples, dependiendo de la posición de trabajo. En el techo el espesor debe ser el necesario para evitar la caída del shotcrete, generalmente de 1" a 2" (25 - 50 mm) en cada pasada. En las paredes verticales puede ser aplicado en capas o espesores simples. En cualquiera de los casos el espesor de una capa es principalmente gobernado por el requerimiento de que el shotcrete no caiga.

Fibras: El concreto proyectado con fibras se ha vuelto ahora mas importante debido al desarrollo de nuevos y mas efectivos de fibras, su disponibilidad creciente y si inclusión en varios estándares. Puede considerarse que las fibras



actúan en perfecta combinación con el concreto proyectado. El concreto proyectado es un material frágil con resistencia limitada a la flexión y a la tensión pero con una excelente resistencia a la compresión. Por ello tiene sentido utilizar el concreto proyectado reforzado con fibras ya que este nos muestra una serie de ventajas:

Ventajas:

- Distribución homogénea del refuerzo con fibras en el concreto proyectado.
- Incremento en la ductibilidad.
- Alta resistencia a la tensión y a la flexión.
- Mayor seguridad debido a la deformación post fisuración.
- Aumento de resistencia al impacto.
- Mejora la adherencia.
- Reducción de la fisuración por retracción temprana.
- Mayor resistencia al fuego.

Aunque existen diferentes tipos de fibras que principalmente pueden ser adecuados para el concreto proyectado en nuestro caso utilizamos la fibra de acero que es la más empleada para los trabajos de tunelerías.

Áridos:

Material granular procedente de la roca natural, trituradas o no, cuyas dimensiones varían desde 0,149 mm hasta un tamaño máximo especificado. Ocupan normalmente entre el 65 y el 80% del peso del hormigón.

Ocupan no menos del 75% del volumen total del hormigón, de ahí que su calidad es fundamental. Tienen que ser “estables” químicamente ante el cemento y el medio ambiente y “resistentes”.



3.4: Trabajos de laboratorio. Análisis de los áridos utilizados en Guantánamo (Sabanalamar-Pozo Azul).

Unión de Construcciones Militares
Empresa Constructora de Obras Hidráulicas
Laboratorio 1

Tabla 22: Resultados obtenidos en el laboratorio de los áridos de Guantánamo.

MATERIAL	P.V	P.V	DENSIDAD
	SUELTO	COMPACTADO	
	Kg/m³	Kg/m³	
arena artificial	1345.25	1567.62	2.53
arena buena	1353.75	1601.12	2.47
granito	1497.75	1707.25	2.56

Día: 12/01/2009

Guantánamo

Tabla 23: Dosificaciones ensayadas para proyectar (30 MPa), dosificación para 40 Lts.

Material	Dosificación para 1m³	Dosificación para 40 litros
Cemento	450 Kg/m ³	18 Kg
Arena artificial	707 Kg/m ³	29.69 Kg
Arena lavada	303 Kg/m ³	12.72 Kg
Granito	593 Kg/m ³	23.72 Kg
Agua	175 Lts. /m ³	7 Lts.
Fibra	33.3 Kg/m ³	1.33 Kg
Sikatard	1.5 Lts. /m ³	0.06 Lts.
Viscocrete	2 Lts. /m ³	0.08 Lts.

Asentamiento inicial: 20 cm.

Asentamiento a los 20 minutos: 16.5 cm.



Se tomaron 6 probetas para ensayar la resistencia a los 3; 7 y 28 días.

Nota: no se tuvo en cuenta la humedad de los áridos.

Día: 14/01/ 2009

Guantánamo 2

Tabla 24: Dosificaciones ensayadas para proyectar (30 MPa), dosificación para 25 Lts.

Material	Dosificación para 1m ³	Dosificación para 25 Litros.
Cemento	450 Kg/m ³	11.25 Kg
Arena artificial	633 Kg/m ³	15.825 Kg
Arena lavada	412 Kg/m ³	10.3 Kg
Granito	712 Kg/m ³	17.8 Kg
Agua	180 Lts. /m ³	4.5 Lts.
Sikatard	1.5 Lts. /m ³	0.06 Lts.
Viscocrete	2 Lts. /m ³	0.08 Lts.

Asentamiento inicial: 20 cm.

Se tomaron 4 probetas para ensayar la resistencia a los 7 y 28 días.

Nota: no se tuvo en cuenta la humedad de los áridos y sólo se tomaron 4 muestras porque no se contaban con más arena artificial.

Tabla 25: Resultados:

Prueba	3 días			7 días			28 días		
	1	2	rbm	1	2	rbm	1	2	rbm
Guantánamo 1	25.0	22.0	23.5	31.0	31.1	31.05	40.1	38.8	39.45
Guantánamo 2	-	-	-	-	-	-	39.8	40.6	40.2

**Laboratorio 2.****Tabla 26: Parámetros de las arenas usadas.**

Material	P.V Suelto Kg/m ³	P.V Compactado Kg/m ³	Densidad Kg/Lts.
Arena Yacabo	1 650	1 840	2.78
Arena Cajobabo	1 560	1720	2.86

Tabla 27: Dosificaciones a ensayar.

Cemento	450 Kg/m ³
Arena Yacabo	1 025 Kg/m ³
Granito Cajobabo	900 Kg/m ³
Agua	170 Lts/m ³
Fibra	33.3 Kg/m ³
Sikatard	1.5 Lts/m ³
Viscocrete	2 Lts/m ³

Se preparó una dosificación de 40 litros y se tomaron 6 muestras para ensayar la resistencia a los 3; 7 y 8 días.

El asentamiento obtenido fue de 19 mm.

Tabla 28: Resultado del Ensayo de Resistencia.

Prueba	3 días			7 días			28 días		
	1	2	rbm	1	2	rbm	1	2	rbm
Resistencia MPa	24.5	28.1	26.3	36.7	33.4	35.05	42.7	41.5	42.1
Peso	12.150	12.421	-----	12.500	12.344	-----	12.225	12.317	-----

Tabla 29: Resultados obtenidos.

Prueba	3 días			7 días			28 días		
	1	2	rbm	1	2	rbm	1	2	rbm
Densidad Kg/m ³	2 290	2 340	-----	2356	2326	-----	23.03	23.20	-----

**Determinación de la granulometría de la arena:**

La granulometría de los agregados es el factor principal que regula el contenido de agua y cemento (lechada) para llenar los vacíos existentes en las mezclas. La serie de ensayos granulométricos nos determinan la calidad de los áridos. La granulometría es uno de los parámetros de calidad más importantes de los áridos, al menos para los hormigones convencionales.

Procedencia: Yacabo, Obra de Trasvase Guantánamo.

Descripción: Arena triturada.

Fecha: 30/marzo/2009.

Tabla 30: *Determinación de la granulometría de la arena. (Ver Anexo 5).*

Malla N° (Abertura en mm.)	% QUE PASA		Suma	% Que Pasa
	% Arena Integral	% Granito		
	0.55	0.45		
0(0)	1.1	6.1	7.2	0.0
1(0.125)	3.8	0.0	3.8	7.2
2(0.25)	7.8	0.0	7.8	11.0
3(0.5)	10.8	0.0	10.2	18.8
4(1)	11.3	4.9	16.2	28.8
5(2)	14.7	8.7	23.4	45.0
6(4)	6.3	24.4	30.7	68.5
7(8)	0.0	0.8	0.8	99.1
8(11.2)	0.0	0.1	0.1	99.9
Total:	55.0	45.0	100.0	100.0

Como nuevos áridos propuestos tenemos los siguientes: Arena de Yacabo y Granito de Cajobabo. Con estos áridos como se ha demostrado en las pruebas de laboratorio 2, se obtienen asentamientos de la mezcla que alcanzan los 19 mm, dando características especiales al nuevo hormigón, es decir, obteniendo con esto un fraguado rápido de la mezcla, mayor resistencia, etc.



Tamaño máximo nominal:

Se define como el tamiz inmediato superior al que retiene más de un 15% en peso del árido en la granulometría.

Humedad total de los áridos finos y gruesos:

Se puede determinar por métodos convencionales o especializados:

Métodos convencionales

- Secado en estufa (no válido para escala productiva)
- Medidor rápido de humedad (*Speedy*) si se correlaciona con el secado en estufa
- Secado en sartén
- Secado con alcohol anhidro desnaturalizado

Métodos especializados

- De capacitancia.
- De reflexión de la radiación infrarroja.
- De resonancia magnética nuclear.
- De atenuación de micro ondas.
- De moderación de neutrones.

Índice de Triturabilidad: Permite valorar la resistencia mecánica de un árido. La valoración correcta de este método de ensayo se obtiene ensayando cada fracción del árido grueso empleada en el hormigón. Se introduce la muestra de árido en el cilindro de acero no deformable, se coloca el pistón y todo el accesorio se introduce en una prensa aplicando cierto grado de presión. Se mide la pérdida de peso por trituración del árido.

Resistencia a la abrasión: Es otra medida de la resistencia mecánica de los áridos y se aplica también a los áridos de hormigones sometidos a abrasión, como es el caso de los pavimentos.

Métodos a utilizar: Para los ensayos al hormigón proyectado en estado fresco y endurecido se emplean diferentes tipos de métodos tanto para



conocer las propiedades del mismo así como su resistencia a la compresión a edades tempranas y durante el proceso de fraguado hasta los 28 días.

Métodos de ensayos: Determinación de la consistencia por el método de la tabla de fluidez.

- Densidad.
- Medición del asentamiento por el Cono de Abrams.
- Determinación del contenido de aire en la mezcla.
- Determinación de la consistencia del hormigón en el tiempo.
- Determinación de resistencia a compresión por el método de penetración.
- Determinación de la resistencia a compresión por el método del medidor Hilti.(Ensayo de penetración y extracción)
- Extracción y preparación de testigos cilíndricos (resistencia a la compresión).

Para lograr un hormigón con la calidad de ser proyectado debe cumplir con los siguientes parámetros.

Tabla 31: Parámetros de calidad del hormigón para ser proyectado		
Métodos de ensayo	U/M	Valores
Consistencia por la tabla de fluidez	cm	50 – 60
Densidad	Kg/m ³	2200 - 2500
Temperatura	⁰ C	15 – 25
Relación A/C	--	< 0.50
Asentamiento	cm	16 – 22

En nuestro caso, la resistencia a compresión del hormigón proyectado se determina a partir de la relación fuerza Extracción / Profundidad de penetración según la gráficas de correlación de la herramienta fija clavo.



3.5: Cálculo del Sostenimiento.

El sostenimiento de excavaciones subterráneas es una construcción artificial que se realizan con el objetivo de preservar la destrucción de las rocas circundantes y preservar las dimensiones de la sección transversal y al mismo tiempo satisfacer las necesidades de producción en el período de explotación, así como satisfacer una serie de exigencias técnicas, productivas y económicas.

3.5.1: Características de Sostenimiento.

A partir del valor del RQD podemos saber cuando una excavación necesita o no sostenimiento además de las características de dicho sostenimiento.

Tipo d roca	Necesidad de sostenimiento
A	No necesita sostenimiento
B	2 a 3cm de hormigón lanzado o pernos separados de 1.0 a 2.0m, eventualmente refuerzo en la bóveda únicamente.
C	3 a 5cm de hormigón lanzado o pernos separados de 1.0 a 1.5m, eventualmente refuerzo en la bóveda.
D	5 a 7cm de hormigón lanzado con mallas o pernos separados de 0.7 a 1.0 y 3cm de hormigón lanzado.
E	7 a 15cm de hormigón lanzado, a veces pernos separados de 0.5 a 1.2m y de 3 a 5c de hormigón lanzado, alternativamente serchas y blindaje.
F	15 20cm de hormigón lanzado con serchas y mallas o serchas con blindaje y hormigón lanzado posterior.
G	Hormigón lanzado, serchas reforzadas y blindaje.



Para el cálculo de sostenimiento de la excavación primeramente se consideró el factor de seguridad (FS) del área de estudio, este no es más que la relación entre la luz teóricamente estable (LTE) y la luz real (L) de la excavación, o sea:

$$FS = LTE/L$$

A partir del cálculo del FS, se sabe si es necesario usar sostenimiento en la excavación.

Cuando el FS es:

FS<1: El tramo excavado necesita sostenimiento estructural y no se admite dejarlo sin revestir.

FS>2: El tramo excavado no necesita sostenimiento para resistir las presiones geostáticas naturales

1≤FS<2: El tramo es teóricamente estable bajo presiones geostáticas naturales. Puede mantenerse provisionalmente sin revestir, la decisión de dejarlo definitivamente sin revestir debe tomarse considerando la estabilidad observada en las secciones de igual luz construidas en condiciones análogas.

Cálculo del FS:

$$FS=LTE/L$$

$$FS= 6.3/4.50$$

$$FS= 1.4$$

Como el FS calculado en la excavación es menor que uno, es de vital importancia sostenerla por ser esta inestable.

3.5.2: Hipótesis de Presión Minera para Excavaciones Horizontales.

Hipótesis de Tsimbarievich:

En el caso en el que rocas laterales son inestables, el ancho de la zona de destrucción que se forma por el techo de la excavación va a ser mayor que el ancho por el techo de la excavación.

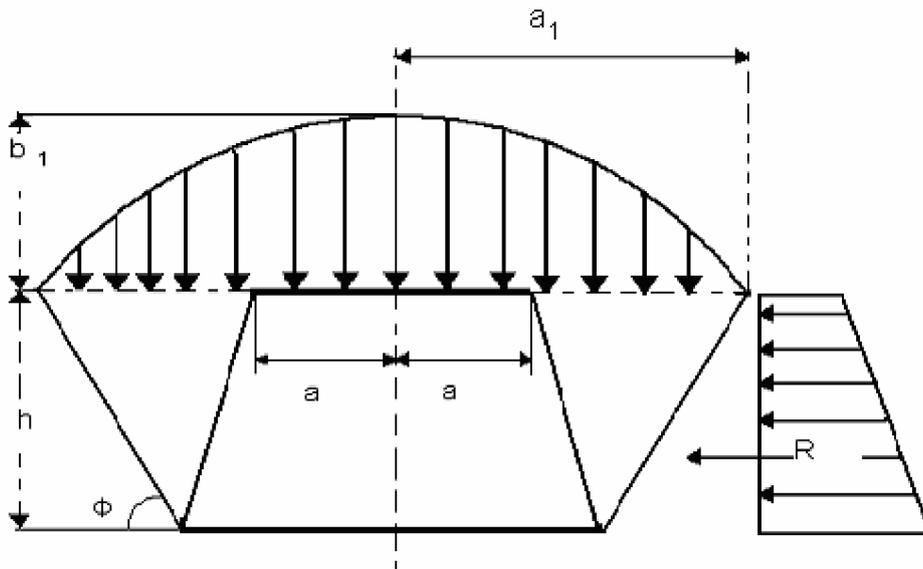


Figura 4: Esquema de cálculo según Tsimbarievich, cuando actúa presión por el techo y los laterales.

En este caso la altura de la bóveda de destrucción «b» se determina por la siguiente expresión:

$$b = \frac{a_1}{f}$$
$$b = \frac{a_1}{f} = \frac{2.25}{2} = 1.125m$$

Donde:

a_1 : semiancho de de la excavación por el techo.

f : coeficiente de fortaleza de la roca.

El empleo de una u otra de las expresiones vistas, para el cálculo de **b** está dado por el tiempo de servicio de la excavación en cuestión y por las condiciones geólogo-mineras concretas del macizo que se estudia.



Para el cálculo de la carga actuante sobre el túnel, se recomienda usar la siguiente formula propuesta por Unal (1983).

Tramo I:

$$p = \frac{100 - RMR}{100} * \gamma B$$

$$p = \frac{100 - 60.2}{100} * 2.72 * 450$$

$$p = 0.48 \text{ Kgf} / \text{cm}^2$$

$$p = 4.8 \text{ Tnf} / \text{m}^2$$

Tramo II:

$$p = \frac{100 - RMR}{100} * \gamma B$$

$$p = \frac{100 - 52.6}{100} * 2.80 * 450$$

$$p = 0.60 \text{ Kgf} / \text{cm}^2$$

$$p = 6.0 \text{ Tnf} / \text{m}^2$$

Donde:

p: carga para el sostenimiento

B: ancho del túnel

γ : peso específico de la roca

3.5.3: Cálculo de Sostenimiento:

Para la aplicación del Gunitado, en forma independiente, primeramente debemos comprobar que se cumpla la siguiente condición:

$$\frac{\gamma_v * H}{Rc} \leq 0.25$$

Donde:

γ_v = masa volumétrica de la roca (2.2 g/ cm³).

H= profundidad de la excavación (30 m).



R_c = resistencia lineal de la roca a compresión (20 Mpa).

Para el caso en que se puede utilizar el Gunitado pero en combinación con otros tipos de fortificación se debe cumplir entonces la siguiente condición:

Tramo I:

$$\frac{\gamma_v * H}{R_c} \supset 0.25$$

$$\frac{2.2 * 30}{20} \supset 0.25$$

$$3.3 \supset 0.25$$

Tramo II:

$$\frac{\gamma_v * H}{R_c} \supset 0.25$$

$$\frac{2.46 * 30}{23} \supset 0.25$$

$$3.2 \supset 0.25$$

En nuestro diseño de fortificación nos dirigimos hacia uso del gunitado combinado con los bulones, por eso tomamos en cuenta esta condición.

Espesor de la fortificación (Hormigón Lanzado):

Esta fórmula basada en criterios de resistencia de materiales se recomienda para cuando el hormigón lanzado se combina con anclas. Según este criterio, el espesor de la fortificación se halla para el caso de túneles y cámaras por la siguiente expresión:

Tramo I:

$$e = a * K_f * \sqrt{\frac{\eta_c * p}{M_t * R_t}}$$

$$e = 1.13 * 0.35 * \sqrt{\frac{0.92 * 4.8}{0.8 * 407.9}}$$

$$e = 0.046 \text{ m}$$

$$e = 5 \text{ cm}$$

**Tramo II:**

$$e = a * K_f * \sqrt{\frac{\eta_c * p}{M_t * R_t}}$$
$$e = 1.13 * 0.35 * \sqrt{\frac{0.92 * 6.0}{0.8 * 407.9}}$$
$$e = 0.058 \text{ m}$$
$$e = 6 \text{ cm}$$

Donde:

a: distancia entre anclas; m

p: carga para el sostenimiento, Tnf/m²

Mt: Coeficiente de trabajo de la fortificación; (0.6-1)

Rt: resistencia a la tracción del hormigón.

η_c : coeficiente que tiene en cuenta la combinación de distintas cargas; (0.9-0.95).

K_f : Coeficiente que se obtiene en dependencia del tipo y paso de la fortificación, cuando se utiliza específicamente el gunitado $K_f = 0.35$.

Cálculo de Bulones:

La fortificación de anclas se considera progresiva y ventajosa del punto de vista económico y pueden ser empleadas en un gran rango de condiciones minero-técnicas.

Es importante señalar que tanto la longitud de los bulones como el espaciamiento entre ellos pueden ser determinados de manera sencilla por Barton, pero también conocemos que se puede determinar de forma más exacta a la realidad por otras vías, la utilización de fórmula que tengan en cuenta las condiciones geomecánicas del macizo, entre otras características.

A) Longitud de los Bulones:

Para excavaciones que tienen ancho menores de 6 m se determina la longitud de los bulones por:

$$L = \frac{B}{2} = \frac{4.50}{2} = 2.25 \text{ m}$$

**Donde:**

B: ancho de la excavación.

Aunque existen otras fórmulas para determinar la longitud de los bulones, no todas son aplicables para todo tipo de excavaciones, pues hay que tener muy en cuenta las condiciones particulares de cada macizo. Por lo antes mencionado, tenemos que tener en cuenta el factor de seguridad FS para determinar la longitud real del bulón que utilizaremos para que cumpla con las exigencias del sostenimiento.

$$L_{rb} = L + FS$$

$$L_{rb} = 2.25 + 1.4$$

$$L_{rb} = 3.65 \text{ m}$$

Donde:

L_{rb}: longitud real del bulón; m.

Es importante conocer que este solo es un resultado de proyecto, además de haber tenido en cuenta este factor de seguridad, hay que tener en cuenta el espesor de la capa que se va a coser.

B) _El espaciamiento de los pernos se calculan por la siguiente expresión:

$$d = \frac{L}{2} = \frac{2.25}{2} = 1.125 \approx 1.13 \text{ metros}$$

Donde:

L: semiancho de la excavación.

Longitud Máxima sin Soporte (Barton):**Tramo I:**

$$CLARO = 2 * ESR * Q * 0.4; \text{ m}$$

$$CLARO = 2 * 1.6 * 6 * 0.4$$

$$CLARO = 7.68 \text{ m.}$$

Tramo II:

$$CLARO = 2 * ESR * Q * 0.4; \text{ m}$$

$$CLARO = 2 * 1.6 * 2.6 * 0.4$$

$$CLARO = 3.33 \text{ m.}$$

**3.5.4: Resultados.****Tabla 33: Resultados obtenidos en el capítulo por los cálculos.**

TRAMOS	Longitud máxima sin soporte (CLARO)	Espaciamiento entre pernos(d)	Longitud real del bulón (Lrb)	Longitud del bulón(L)	Espesor de la fortificación(e)	Carga para el sostenimiento (p)	FS	Altura de la bóveda de destrucción (b)
I	7.68m	1.13m	3.65m	2.25m	5cm	4.8Tnf/m ²	1.4	1.125m
II	3.33m	1.13m	3.65m	2.25m	6cm	6Tnf/m ²	1.4	1.125m

En este capítulo se han obtenido los valores de los principales parámetros de cálculo para el sostenimiento del túnel. Estos cálculos han sido realizados por el método de cálculo de sostenimiento propuesto por Barton, y comparados con los resultados que se obtuvieron con el **ContExc** (Ver Anexo 8).

Nota: El **ContExc** es un software que a partir de datos geomecánicos obtenidos del macizo en estudio, por diferentes metodologías de Clasificación Geomecánica (Barton, Bieniawski o la propuesta por Cuesta), nos da como resultado la clasificación del macizo rocoso (Q), además de los espesores de sostenimiento, longitud de bulones si es aplicable, su espaciamento, entre otros parámetros.



Capítulo 4: ROTECCIÓN DEL MEDIO AMBIENTE Y EL HOMBRE

4.1: Introducción:

La protección del medio ambiente y a al hombres un importante punto al que están dirigido todas las industrias. Es una de las tareas más importantes al realizar un proyecto, puesto que debemos tomar medidas para disminuir o eliminar las afectaciones producidas al medio ambiente durante la construcción de una obra. La industria minera, por ser esta una rama que representa una gran influencia negativa para el medio ambiente y por la realización de labores realmente peligrosas que pueden atentar contra la vida de los hombres que se desempeñan e esta labor, toman medidas especiales.

4.2: Actuación del los Trabajos Subterráneos sobre el medio Ambiente.

La actividad minera subterránea tiene las características de no ser contaminadora o afectadora severa del medio ambiente, pues estos son mínimos sus efectos en el nivel de ruido, calidad del agua superficial, en el suelo y sus uso, en la vegetación y su regeneración (áreas afectadas por escombreras), especies y comunidades de la vegetación y su calidad regeneradora al igual que con la fauna, o con los procesos geofísicos donde se crea problemas de inestabilidad, no altera de forma grave la morfología y el paisaje de la zona, de toda forma se debe insistir en los problemas de la calidad del agua y de la atmósfera que es donde más incidencia se refleja.

4.3: Protección del Hombre.

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



Para evitar los accidentes hay que prestar especial atención a la seguridad y utilización de los medios de protección por parte de los trabajadores.

Medidas Importantes:

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

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



Medios de Protección:

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

Estos medios son entregados a cada obrero con el objetivo para evitar los accidentes leve o de gran envergadura. Por eso es necesario que el jefe encargado de la protección al trabajador haga que se cumpla estrictamente con el uso todos los equipos de protección personal que se entregan por puestos de trabajo a cada hombre de la entidad.

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



Capítulo 5: Evaluación Económica.

5.1: Introducción:

Todo trabajo debe tener como resultado ganancia, no pérdidas, por eso no queda exento los trabajos mineros. En el caso de los túneles de conducción de agua, cuyo resultado está en cumplir con las expectativas de proyecto, los resultados económicos son analizados en la dirección de su construcción y mantenimiento.

Incurrir los menores gastos en su proceso constructivo es la principal tarea que debemos seguir, por ejemplo, disminución de los gastos por metros lineal de fortificación, sin alterar las características de esta para cumplir su función.

Para la preparación del Hormigón proyectado, tenemos componentes como el cemento, agua, áridos finos y gruesos, y estos son comprados a otras empresas, por lo que ya estamos incurriendo en gastos de producción, por lo que debemos analizar como disminuir estos gastos.

Este análisis, es en parte resultado de nuestro trabajo, el cual nos proponemos a continuación dar explicación a través de las tablas que a continuación aparecen, es necesario conocer que estos valores o precios están estipulados previamente por PRECOMS-1.



Tabla 34: COSTOS PARA EL REVESTIMIENTO. TRAMO I (ESPESOR 5 cm)			
ITEM	COSTO POR m. LINEAL	LONGITUD (m.)	GASTOS POR TRAMO
Materiales			
SINGUNIT L50 AFX (ACELERANTE)	\$38.96	160	\$6233.6
SIKA FIBER CH 065/35 NB	\$25.20	160	\$4032
SIKA VISCOCRETE E-200 KG	\$2.55	160	\$408
SIKA TARD 930 E-230 KG	\$1.94	160	\$310.4
HORMIGON 30.0MPA	\$60.05	160	\$9608
DIFERENCIA DE PRECIO EN EL CEMENTO	\$8.10	160	\$1296
SUB TOTAL Materiales	\$136.8	160	\$21888
Mano de obra			
AYUDANTE DE CONSTRUCCION DEL GRUPO SALARIAL II	\$8.15	160	\$1304
AYUDANTE DE ALPINISTA DEL GRUPO SALARIAL IX	\$8.15	160	\$1304
ELECTRICISTA INSTALADOR DEL GRUPO SALARIAL IV	\$8.45	160	\$1352
ESPECIALISTA ALPINISTA DEL GRUPO SALARIAL XII	\$10.50	160	\$1680
PLOMERO DEL GRUPO SALARIAL V	\$9.00	160	\$1440
SOLDADOR DEL GRUPO SALARIAL VI	\$7.03	160	\$1124.8
GUNITADOR DEL GRUPO SALARIAL VII	\$7.03	160	\$1124.8
SUB TOTAL Mano de obra	\$58.31	160	\$9329.6
Equipos			
BOMBA DE HORMIGON ELECTRICA DE 20 M3/H DE CAPACIDAD	\$8.10	160	\$1296
TRACTOR AGRICOLA HASTA 30 HP	\$3.30	160	\$528
CAMION HORMIGONERA DE 3-5 M2	\$7.20	160	\$1152
COMPRESOR DE AIRE MOVIL 8-12 M3/MIN	\$23.03	160	\$3684.8
SOLDADOR ELECTRICO POR MOTOR 100-550 AMPERES S/JORNAL	\$3.70	160	\$592
SUB TOTAL Equipos	\$45.33	160	\$7252.8
Bulonado			
AYUDANTE DE CONSTRUCCION DEL GRUPO SALARIAL ii	\$4.90	160	\$784
ALBANIL DEL GRUPO SALARIAL V	\$5.35	160	\$856
ELECTRICISTA INSTALADOR DEL GRUPO SALARIAL IV	\$6.54	160	\$1046.4
PLOMERO DEL GRUPO SALARIAL V	\$4.90	160	\$784
SOLDADOR DEL GRUPO SALARIAL VI	\$4.98	160	\$796.8
SUB TOTAL Bulonado	\$26.67	160	\$4267.2
TOTAL	\$267.11	160	\$42737.6



Tabla 35: COSTOS PARA EL REVESTIMIENTO. TRAMO VI (ESPESOR 6 cm)			
ITEM	COSTO POR m. LINEAL	LONGITUD (m.)	GASTOS POR TRAMO
Materiales			
SINGUNIT L50 AFX (ACELERANTE)	\$41,98	40	\$1679.2
SIKA FIBER CH 065/35 NB	\$30,29	40	\$1211.6
SIKA VISCOCRETE E-200 KG	\$3,68	40	\$147.2
SIKA TARD 930 E-230 KG	\$1,94	40	\$77.6
HORMIGON 30.0MPA	\$56,60	40	\$2264
DIFERENCIA DE PRECIO EN EL CEMENTO	\$10,47	40	\$418.8
SUB TOTAL Materiales	\$144,96	40	\$5798.4
Mano de obra			
AYUDANTE DE CONSTRUCCION DEL GRUPO SALARIAL II	\$9,29	40	\$371.6
AYUDANTE DE ALPINISTA DEL GRUPO SALARIAL IX	\$9,29	40	\$371.6
ELECTRICISTA INSTALADOR DEL GRUPO SALARIAL IV	\$9,46	40	\$378.4
ESPECIALISTA ALPINISTA DEL GRUPO SALARIAL XII	\$12,41	40	\$496.4
PLOMERO DEL GRUPO SALARIAL V	\$10,15	40	\$406
SOLDADOR DEL GRUPO SALARIAL VI	\$9,46	40	\$378.4
GUNITADOR DEL GRUPO SALARIAL VII	\$9,46	40	\$378.4
SUB TOTAL Mano de obra	\$69,52	40	\$2780.8
Equipos			
BOMBA DE HORMIGON ELECTRICA DE 20 M3/H DE CAPACIDAD	\$8,23	40	\$329.2
TRACTOR AGRICOLA HASTA 30 HP	\$3,84	40	\$153.6
CAMION HORMIGONERA DE 3-5 M2	\$9,83	40	\$393.2
COMPRESOR DE AIRE MOVIL 8-12 M3/MIN	\$26,66	40	\$1066.4
SOLDADOR ELECTRICO POR MOTOR 100-550 AMPERES S/JORNAL	\$4,02	40	\$160.8
SUB TOTAL Equipos	\$52,58	40	\$2103.2
Bulonado			
AYUDANTE DE CONSTRUCCION DEL GRUPO SALARIAL ii	\$4,90	40	\$196
ALBANIL DEL GRUPO SALARIAL V	\$5,35	40	\$214
ELECTRICISTA INSTALADOR DEL GRUPO SALARIAL IV	\$6,54	40	\$261.6
PLOMERO DEL GRUPO SALARIAL V	\$4,90	40	\$196
SOLDADOR DEL GRUPO SALARIAL VI	\$4,98	40	\$199.2
SUB TOTAL Bulonado	\$26,67	40	\$1066.8
TOTAL	\$293,73	40	\$11749.2



TRAMOS	COSTO TOTAL POR m. LINEAL	LONGITUD (m.)	GASTO TOTAL POR TRAMO
I (Espesor 10cm)	\$554.42	160	\$88707,2
II (Espesor 10cm)	\$554.42	40	\$22176.8
TOTAL	\$1108.84	200	\$110884

TRAMOS	COSTO TOTAL POR m. LINEAL	LONGITUD (m.)	GASTO TOTAL POR TRAMO
I (Espesor 5 cm)	\$267.11	160	\$42737.6
II (Espesor 6 cm)	\$293,73	40	\$11749.2
TOTAL	\$560.84	200	\$54486.8

Al diferenciar los tramos en 5cm y 10 cm de espesor, e incluirlos en la valoración económica, se logra ahorrar:

Ahorro del costo total por metro lineal: \$ 548.00

Ahorro del gasto total por tramos: \$ 56397.2.



Conclusiones.

Con la realización de este trabajo se han obtenido un conjunto de magnitudes y criterios importantes para el estudio de la fortificación de excavaciones subterráneas, así como la orientación de trabajos futuros. Entre los principales criterios podemos mencionar:

- ✚ Con la introducción de nuevos áridos y con la misma dosificación, se logra obtener un hormigón con mayor resistencia, posibilitando reducir los espesores de revestimiento para cada tramo de túnel analizado, y disminuyendo por tanto los gastos por concepto de sostenimiento.
- ✚ A partir de la evaluación geomecánica del macizo rocoso se determinaron los espesores de sostenimiento (hormigón proyectado) para los tramos del túnel, se demostró que no es necesario el espesor de los 10 cm dado por el proyecto del trasvase: para **Tramo I:** 5 cm y **Tramo II:** 6 cm.
- ✚ Con las nuevas propuestas de los espesores de revestimiento obtenidos se logró ahorrar un total de \$ 56397.2.



Recomendaciones.

Se recomienda:

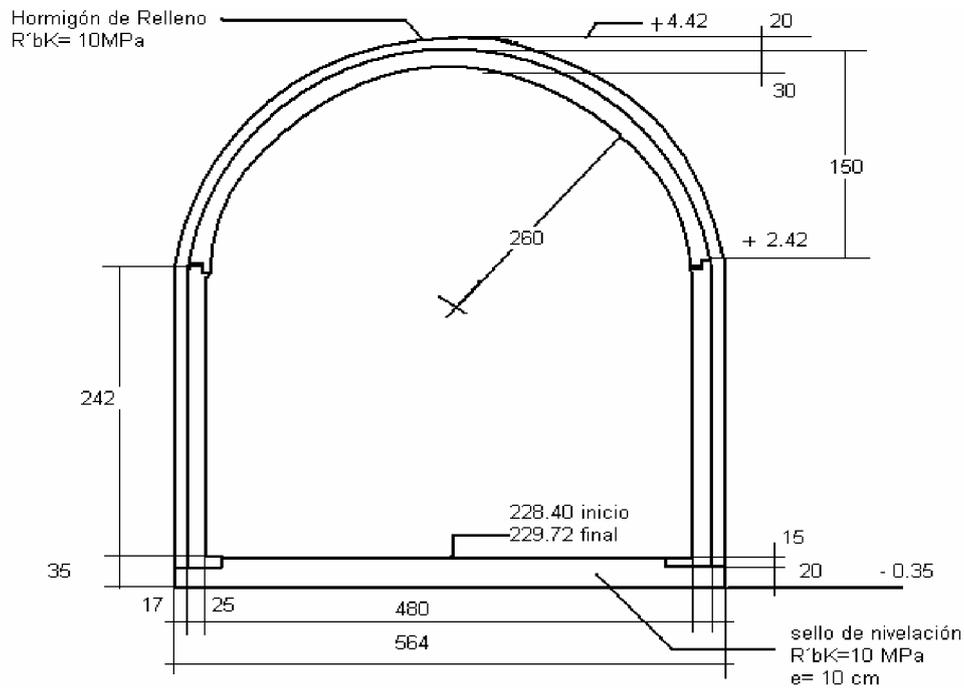
- ✚ Realizar en otras obras subterráneas en ejecución la evaluación geomecánica por tramos para ajustar los pasaportes de fortificación evitando con esto gastos innecesarios.
- ✚ Dar continuidad a este trabajo, ya adentrándose en el análisis profundo de las características tenso-deformacionales de los macizos rocosos.
- ✚ Realizar estudios similares en otros tipos de macizos rocosos.



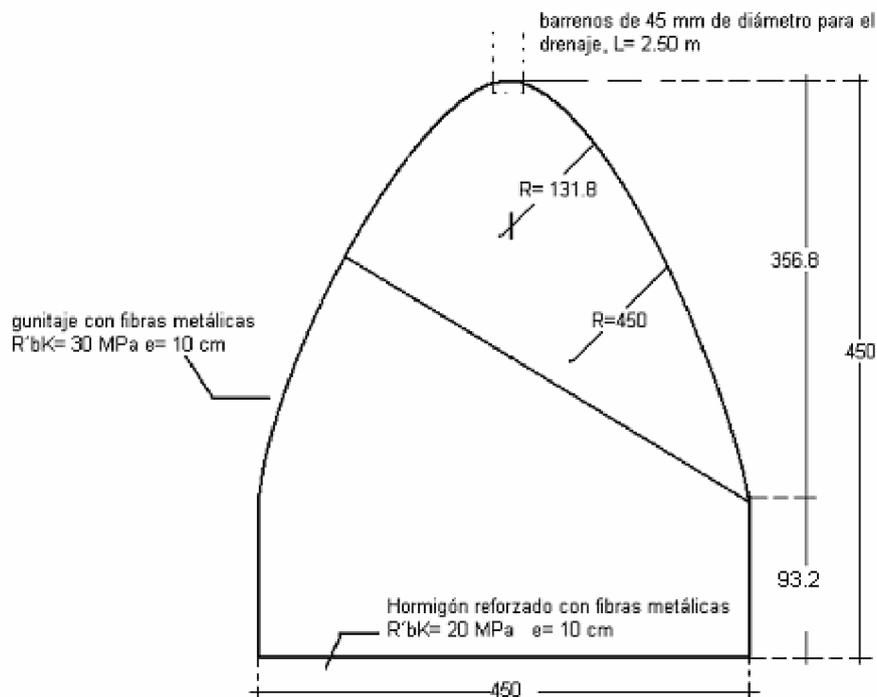
Bibliografía.

1. ACC: Nuevo Atlas Nacional de Cuba. C. Habana, 1989.
2. Blanco Torrens, R: Fortificación de Excavaciones Horizontales. Editorial Félix Varela, La Habana, 1993.
3. Blanco Torrens, R; Javier Carvajal, D: Curso Iberoamericano y Geoambientales al Desarrollo sostenible de la Minería; Ediciones Panorama Minero.
4. Blanco Torrens, R; Sánchez Rial, E; Miró, R: Geomecánica Aplicada a la Pequeña Minería; LDM Editorial, 2006.
5. Blanco Torrens, R: Elementos de Mecánica de Roca para Macizos Rocosos; Editorial,
6. Diagnóstico ambiental inicial: Unidad Empresarial de Base Geotecnia y Perforación. EIPHH. Holguín, 2005.
7. Gavilanes J. Hernán; Andrade Haro, B: Introducción a la Ingeniería de Túnel. Asociación de Ingenieros de Minas (A.I.M.E), Quito- Ecuador, 2004.
8. H. Robles Espinosa, N: Excavación y sostenimiento de Túneles en Rocas; CONCYTEC, Lima, 1994.
9. IMECA. Control Estadístico de Calidad en Productividad. Hansel B. L (1972). <http://publiespe.espe.edu.ec/academicas/hormigon/hormigon02-b.htm>
10. Listado Oficial de Precios. Resolución N°106. ENIA-MICONS, 1997.
11. Manual de procedimientos generales. EIPHH. UEBGP.
12. Prontuario: autor Sika Fiber.
13. Robles Espinosa, Nerio H: Excavación y Sostenimientos en Rocas; Editorial CONCYTEC, 1994.
14. Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía: Manual de Geomecánica Aplicada a la Prevención de Accidentes por Caídas de Rocas en Minería Subterránea, Junio 2004.
15. www.graceconstruction.com.

Anexos.



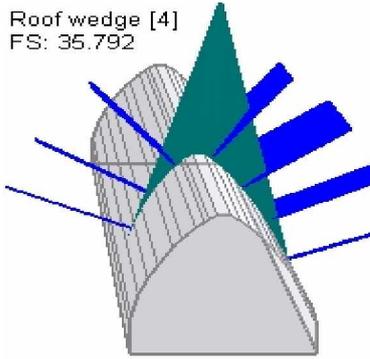
Anexo N°1: Emboquillamiento del Túnel 2.



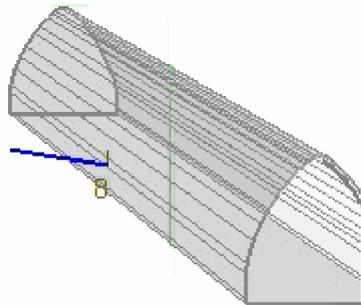
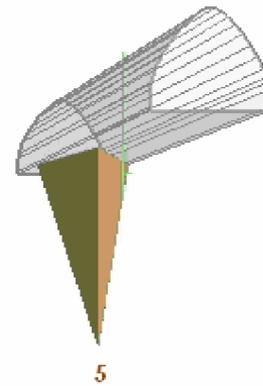
Anexo N°2: Sección transversal del túnel, forma ovoidal.



Roof wedge [4]
FS: 35.792



Volume: 137.802 m³,



Anexo N° 5: *Vistas de la sección transversal del túnel y de las cuñas de rocas que rodean la excavación obtenidas por el Unwedge 1-3D.*

Hormigón	Rc (MPa)	Espesor de Aplicación	Asentamiento de la Mezcla (28 días)	Dosificaciones
actualmente aplicado	32.2	10 cm	16.5 cm	(para 40 Ltr.)
propuesto	42.1	5 cm	19 mm	(para 40 Ltr.)

Anexo N° 6: *Tabla comparativa de algunos de los aspectos determinantes para el uso del hormigón*

Nota: Es importante señalar que se pueden tomar otros valores que son determinante para elegir cual hormigón es mas conveniente usar para el sostenimiento, como densidad del hormigón, contenido de aire de la mezcla, etc.



Fecha: 02/06/2009 Autor:		
Evaluación Cualitativa del Macizo Rocoso y Propuesta de Sostenimiento.		
Nombre del proyecto Sostenimiento del Túnel 2 Tramo I	Tipo de Obra Túnel 2	
	Tipo de Roca argilita	
Calidad del Macizo Según Barton.	Valor 7	Denominación Roca media
Propuesta de Sostenimiento: Anclado Sistemático con Hormigón lanzado (40-100 mm), B+S Longitud del anclado: 3 m Separación entre anclas: 1,3 m		

Reporte		
Fecha: 02/06/2009 Autor:		
Evaluación Cualitativa del Macizo Rocoso y Propuesta de Sostenimiento.		
Nombre del proyecto Sostenimiento del Túnel 2 Tramo I	Tipo de Obra Túnel 2	
	Tipo de Roca argilita	
Calidad del Macizo Según Barton.	Valor 3,7	Denominación Roca mala
Propuesta de Sostenimiento: Anclado Sistemático con Hormigón lanzado (40-100 mm), B+S Longitud del anclado: 3 m Separación entre anclas: 2,1 m		

Anexo N° 7: Resultados obtenidos por el **ContExc.**