

**Especialidad – Minas**

# **Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero en Minas**

**LA INYECCIÓN DEL TERRENO EN EL TRASVASE  
ESTE-OESTE. UNA ALTERNATIVA PARA ELEVAR LA  
CALIDAD DE LAS CONTRUCCIONES**

**Autor:** Eugenio Ramírez Toledo

**Curso: 2018-2019**  
**“Año 61 de la Revolución”**

**Especialidad – Minas**

# **Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero en Minas**

## **LA INYECCIÓN DEL TERRENO EN EL TRASVASE ESTE-OESTE. UNA ALTERNATIVA PARA ELEVAR LA CALIDAD DE LAS CONTRUCCIONES**

**Autor:** Eugenio Ramírez Toledo

**Tutores:** Dr. C. Armando Cuesta Recio

Mr. C. Yurisdell Velázquez La O

**Moa-2018**

**Curso: 2018-2019**  
**“Año 61 de la Revolución”**

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Declaro que soy el único autor del trabajo “La inyección del terreno en trasvase como alternativa para elevar la calidad del macizo” y certifico su propiedad a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

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

\_\_\_\_\_ Eugenio Ramírez Toledo \_\_\_\_\_

Nombre completo del autor

\_\_\_\_\_ Armando Cuesta Recio \_\_\_\_\_

Nombre completo del tutor

\_\_\_\_\_ Mr. C. Yurisdell Velázquez La O

\_\_\_\_\_”

Nombre completo del tutor

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo a Dios por haberme levantado del hoyo donde estaba, por haber quitado el manto que me tenía ciego, por mostrarme su luz, la que había preparado desde el principio de los tiempos, mi Señor y amigo Jesucristo.

A mi madre Maritza Toledo Martínez por su amor y apoyo desde que nació.

A mi padre Eutimio Eugenio Ramírez Gómez por su rectitud, amor y apoyo en mi vida.

A mis hermanos y amigos, Minardo Montero Ramírez, Yodaniz Matos Savigne, Salder Sánchez

## **Agradecimientos**

Mi vida y agradecimientos a Dios por su misericordia y su gracia en mi vida y a su hijo mi Señor y Salvador Jesús.

A mi familia por su apoyo, a mis padres Maritza Toledo Martínez y Eutimio Eugenio Ramírez Gómez.

A mis tíos Alberto Rodríguez Almarales, Milagro Toledo Martínez, Manuel Toledo Martínez, William Toledo Martínez, E runde Toledo Martínez.

Agradezco a mi tutor y amigo Armando Cuesta Recio, y a todos los profesores y profesionales del departamento de Minería.

A mis hermanos y amigos y a los conocidos.

## **Resumen**

El presente trabajo está relacionado con el proceso de construcción de los túneles del trasvase Este–Oeste, fundamentalmente con el Tramo V túnel Levisa-Mayarí, el objetivo del mismo es proponer la inyección como alternativa para elevar la calidad de las construcciones; en el trabajo se realiza un análisis conceptual, teórico y práctico de las condiciones de aplicación de la fortificaciones donde se mencionan las características de las fortificaciones de excavaciones subterráneas, además se hace un análisis de la geología en el túnel o tramo en cuestión, la permeabilidad, la estabilidad, la hidrogeología, el comportamiento de las fallas, características litológicas, se mencionan las clasificaciones geo mecánicas existentes y se propone emplear el método propuesto por (Recio., 2010) para controlar el agua en los túneles conjuntamente con esto se realiza una propuesta de fortificación a emplear en la excavación objeto de estudio.

**Palabras claves;** sostenimiento, fortificación, inyección

## **Abstract**

The present work is related to the construction process of the east-west transfer tunnels, mainly with the Levisa-Mayarí tunnel, Section IV, the purpose of which is to propose the injection or Jet Grouting as an alternative to raise the quality of the constructions ; in the work a conceptual, theoretical and practical analysis of the fortification is made, the characteristics of the fortifications of underground excavations are mentioned, in addition an analysis of the geology is made in the tunnel or section in question, the permeability, the stability, the hydrogeology , the behavior of the faults, lithological characteristics, the existing geomechanical classifications are mentioned and it is proposed to use the method proposed by (Recio., 2010 9) to control the water in the tunnels together with this a proposal of the support to be used is made in the excavation object of study.

**Key Words:** Support, fortification, injection, Jet Grouting

# ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	11
<b>CAPÍTULO I. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>15</b>
1.1 Marco teórico conceptual. ....	15
1.2 Estado Actual de la Temática. ....	16
1.3 Clasificación y uso de las fortificaciones.....	23
1.4 Criterios para la elección del tipo de fortificación. ....	24
1.5 Métodos para la evaluación del macizo rocoso. ....	25
1.6 Procedimiento para la inyección.....	34
1.7 Trabajos Precedentes.....	37
<b>CAPÍTULO II. MATERIALES Y METODOS .....</b>	<b>38</b>
2.1 Introducción .....	38
Tabla 1. Relación entre el coeficiente de permeabilidad del macizo y el índice de calidad propuesto por Deere (RQD) expresado a través de $K\omega$ .....	39
2.2 Métodos del procedimiento seleccionado.....	39
<b>CAPÍTULO III. LA INYECCIÓN DEL TERRENO EN EL TRASVASE ESTE-OESTE. UNA ALTERNATIVA PARA ELEVAR LA CALIDAD DE LAS CONTRUCCIONES....</b>	<b>42</b>
3.1 Introducción. ....	42
3.2 Aplicación del procedimiento propuesto. ....	44
3.3 Área y forma de la sección transversal del Tramo V. ....	45
3.4 Profundidad de ubicación.....	46
3.5 Características del agrietamiento.....	47
3.6 Características hidrogeológicas. ....	47
3.7 Especificaciones técnicas para la ejecución de las inyecciones.....	51
3.8 Impactos ambientales identificados y protección del trabajo.....	57
Conclusiones.....	60
Recomendaciones.....	61
<b>Bibliografía .....</b>	<b>62</b>
Anexos .....	66



## Índice de figuras

Figura 1. Equipo de proyección de hormigón por vía húmeda. Tomado de (Suárez, 2015a).....	18
Figura 2. Esquema de los distintos tipos de bulones. Tomado de (Suárez, 2015a) .....	19
Figura 3. Bulones con placas y tuercas. Tomado del sitio <a href="http://www.anclajes.com.ar">http: www. anclajes.com.ar</a> .....	20
Figura 4. Túnel con sostenimiento de Paraguas Continuo. Tomado de (Suárez, 2015a). .....	21
Figura 5. Túnel con sostenimiento de Paraguas Continuo. Tomado de (Suárez, 2015). .....	21
Figura 6. Proceso continuo de encofrado de hormigón. Tomado de (Suárez, 2015a). .....	23
Figura 7. Etapas de inyección por consolidación e impermeabilización ( <a href="http://www.pdf4free.com">http://www.pdf4free.com</a> ). .....	36
Figura 8. Ubicación geográfica del municipio de Mayarí. Tomado de (Cala, 2018c). .....	43
Figura 9. Que muestra la sección típica de sostenimiento (Hidraulicos, 2008). 46	
Figura 10. Muestra el análisis hidráulico general del sistema desde presa Miguel hasta presa Mayarí (Hidraulicos, 2008). .....	48
Figura 11. Máquina perforadora (Pineda, 2011). .....	52
Figura 12. Mezcladora y tanque de almacenamiento (Pineda, 2011). .....	53
Figura 13. Muestra un corte longitudinal de la acción de la lechada de cemento. ....	55
Figura 14. Algoritmo para la selección de la técnica adecuada de control de las filtraciones (Recio., 2010). .....	70

## Índice de tablas

Tabla 1. Relación entre el coeficiente de permeabilidad del macizo y el índice de calidad propuesto por Deere (RQD) expresado a través de $K\omega$ . ....	39
Tabla 2. Clasificación de las excavaciones subterráneas en función del destino y plazo de servicio (Recio, 2010). ....	40
Tabla 3. Muestra el factor de estabilidad de Barton para cada estacionado desde el estacionado 2+485.00 al 3+390.00.....	43
Tabla 4. Que muestra el índice de estabilidad Q según el estacionado correspondiente.....	44
Tabla 5. Muestra la profundidad del tramo A, B, C, D. ....	46
Tabla 6. Muestra las longitudes de cada tramo.....	46
Tabla 7. Datos hidráulicos .....	47
Tabla 8. Calidad del macizo rocoso en las zonas estudiadas .....	50
Tabla 9. Resumen de los elementos principales que recoge la metodología e inciden en el proceso de selección de la técnica de inyección (Hidraulicos, 2008). ....	50
Tabla 10. Muestra la relación en la composición de cada tipo de lechada (RAUDAL, 2008) .....	55
Tabla 11. Resultados de la prueba hidráulica (RAUDAL, 2008).....	56
Tabla 12. Muestra los impactos ambientales .....	58
E 13. Clasificación de las rocas por RQD (Palmström, 1982) .....	66
E 14. Clasificación de las rocas en cinco categorías diferentes (RMR) (Bieniawski & Bernede, 1979) .....	66
E 15. Parámetros de clasificación y sus rangos, según Bienawski (1979) (Bieniawski & Bernede, 1979) .....	66
E 16. Cargas para dimensionar el sostenimiento (Trezaghi) 1946 tomado (Cala, 2018c). ....	67
E 17. Calidad del macizo según el coeficiente de fortaleza Protodiakonov.....	68
E 18. Clasificación de Lauffer (Lauffer., 1958). ....	69
E 19. Denominación de las técnicas y parámetros utilizados en el algoritmo (Recio., 2010).....	70

## **INTRODUCCIÓN**

La necesidad imperiosa que tiene Cuba de desarrollar estrategias que permitan el abastecimiento de agua a todas las regiones valiéndose de todo un sistema de tecnologías para la construcción de presas, puentes, canales y túneles que trasladen el líquido a donde sea necesario y así contrarrestar los efectos de la sequía y satisfacer necesidades de la población, hace que se analice detenidamente hoy la tecnología como principal herramienta con que cuenta el hombre, pero como toda herramienta para utilizarla racionalmente hay que conocerla y utilizarla correctamente (Cala, 2018a).

El Comandante Fidel Castro Ruz, considerando problemas ecológicos del mundo como consecuencia del agudo calentamiento global, orientó desarrollar un amplio plan inversionista que aprovechará el caudal del agua de la Sierra Maestra, el macizo montañoso Nipe-Zagua-Baracoa y la Sierra del Escambray, para crear un gran sistema nacional que trasvasara agua mediante interconexiones en, al menos, nueve provincias del oriente y centro del país.

Para ello se realiza la construcción del Tránsito Este-Oeste el cual lleva el agua desde Nipe-Zagua-Baracoa a las fértiles llanuras del norte de Holguín, Las Tunas, noreste de Camagüey y el norte y centro del Valle del Cauto.

Cuando se realizaron los primeros proyectos e iniciaron los trabajos en Mayarí, donde se encuentra situado dicho tránsito, las acciones fueron paralizadas, iniciándose la aguda etapa del período especial. Por razones naturales, las obras fueron dañadas en buena parte, en el caso de Mayarí, por las crecidas de los ríos y la falta de preservación.

Terminando el año 2004, ante la crisis ambiental que provocó una severa y prolongada sequía con grandes pérdidas para las provincias orientales y Camagüey, el Comandante en Jefe le orientó al entonces Ministro de las FAR, General de Ejército Raúl Castro, reiniciar el plan estratégico de las obras de los trasvases que sería la garantía para que el país disponga de agua en este siglo bajo cualquier circunstancia. Los efectos de la intensa sequía de los últimos años permiten analizar una vez más la posibilidad de explotación de los recursos hidráulicos, de ahí la construcción del Tránsito Este-Oeste con un conjunto de grandes y pequeños embalses, túneles, canales magistrales y sistema de riego, obras todas que el país consideró iniciar para solucionar el

abasto de agua en el oeste de la provincia de Holguín y en el norte de la provincia de Las Tunas.

El objetivo de este conjunto hidráulico es trasvasar las aguas desde el este de la provincia de Holguín hacia zonas deficitarias de agua del oeste de la región Oriental, para garantizar una soberanía alimentaria, tomado de (Cala, 2018b). Esta acción se fundamenta sobre la base de que en el este de esta región se localiza el mayor potencial hidrotécnico del país, con pocas posibilidades actuales de un aprovechamiento hidráulico significativo, potencial que puede ser utilizado y explotado para la producción de alimentos y el abastecimiento de la población.

En el Tránsito Este-Oeste, desde sus inicios, debido al aumento de la permeabilidad, la pérdida de estabilidad provocada por las difíciles condiciones geológicas del macizo, las variaciones de intercalaciones de rocas de diferentes características y formas, manifestadas como derrumbes tanto de la roca como de la fortificación, el agrietamiento existente producto de las fallas geológicas y cambios litológicos, la poca profundidad del estudio geológico, hidrogeológico, geofísico, geotectónico; derivan en consecuencias, dentro de las que se encuentran, atraso en el programa de construcción, gastos adicionales no planificados en el proyecto, pérdidas económicas, gasto de recursos y aún más importantes pérdidas de vidas humanas.

En esta obra las tecnologías que más se utilizan para fortificar son, costillas, hormigón lanzado combinados con anclas y mayas metálicas. Esta última combinación suele utilizarse en las zonas más complejas donde el macizo es de muy mala calidad y propenso a los derrumbes, lo que permite el avance a más de dos metros, sin embargo, en la práctica en las zonas más inestables se utiliza actualmente el hormigón lanzado y se refuerza con anclas o pernos con una longitud de 2.67 m.

Debido a lo anterior, en muchos lugares del túnel se producen derrumbes masivos debidos fundamentalmente a los cambios litológicos que afectan la construcción de la obra y el avance de la misma.

A partir de lo mencionado es evidente que existe una selección inadecuada de los parámetros de fortificación puesto que no se llega a consolidar el macizo como se necesita aun cuando las anclas alcanzan una longitud de 2.67 m.

Una de las técnicas poco utilizadas en el trasvase y que en muchas ocasiones resuelve el problema de consolidación del macizo es el método de inyección y el de Jet Grouting porque permite consolidar el macizo con sustancias cementantes generalmente cemento, arcilla, bitúmenes y otras mezclas que se inyectan a través de las grietas en el macizo rocoso y las discontinuidades. Estas sustancias fraguan rápidamente cumpliendo así varios objetivos; consolida el macizo creando un bloque irregular, disminuye las posibilidades de penetración del agua a ese lugar y se crea una zona completamente seca, se evita el intercambio del agua que circula con aguas extrañas que pueden o no estar contaminadas y acceden al túnel a través de grietas y fallas. Sin embargo no se ha hecho un análisis para evaluar la efectividad de la técnica de inyección comparada con las que tradicionalmente son utilizadas y no se han resuelto los problemas siguientes: aumento de la permeabilidad, la pérdida de estabilidad provocada por las difíciles condiciones geológicas del macizo, las variaciones e intercalaciones de rocas de diferentes características y formas, manifestadas en formas de derrumbes tanto de la roca como de la fortificación, el agrietamiento existente producto de las fallas geológicas, aspectos que toma más relevancia en el tramo Levisa-Mayarí con una extensión de 17,0 km de túneles en condiciones muy complejas.

Por lo expuesto anteriormente el **problema** de nuestra investigación sería la necesidad de elegir una técnica de fortificación que solucione los problemas de estabilidad presentes en el Túnel Levisa-Mayarí, Tramo V.

Por tal razón el **Objeto de estudio** es: Las técnicas de inyección en túneles.

**Campo de acción:** Tramo V Túnel Levisa-Mayarí.

**Hipótesis:** Si se analizan las características geológicas, litológicas hidrogeológicas y geomecánicas del Túnel Levisa-Mayarí, Tramo V del macizo, se analizan las condiciones de aplicación de las técnicas de fortificación y se identifican los sectores del Túnel Levisa-Mayarí, Tramo V del Trasvase Este-Oeste con problemas de estabilidad es posible elegir la técnica que solucione los problemas mencionados de estabilidad del túnel.

**Objetivo General:** Elegir la técnica de fortificación que solucione el problema de estabilidad en el Túnel Levisa-Mayarí, Tramo V en el trasvase Este-Oeste.

**Objetivos específicos;**

1. Analizar las características geológicas, litológicas, hidrogeológicas y geomecánicas del Túnel Levisa-Mayarí, Tramo V para determinar los factores que influyen en la estabilidad del conjunto macizo-excavación y en el empleo de las fortificaciones.
2. Analizar las condiciones de aplicación de las técnicas de fortificación empleados en el trasvase.
3. Identificar los sectores del Túnel Levisa-Mayarí, Tramo V del Trasvase Este-Oeste con problemas de estabilidad.
4. Aplicar el procediendo seleccionado.

# **CAPÍTULO I. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN**

## **1.1 Marco teórico conceptual.**

En este capítulo se realizará un análisis conceptual y teórico de las definiciones de fortificación y sostenimiento de varios autores, definiciones que en nuestro país suelen utilizarse respecto a una misma idea, así como su importancia en la relación macizo excavación.

Por fortificación se define el conjunto de procedimientos que permiten mantener estable las labores cuando su condición no es auto soportante en túneles subterráneos y minas (Cala, 2018a).

De acuerdo al artículo fortificación de minas; la fortificación de minas, es una construcción artificial que se hace en las excavaciones subterráneas para prevenir la destrucción de las rocas circundantes y preservar las dimensiones de la sección transversal. La fortificación de minas, como una obra más de ingeniería, debe satisfacer una serie de exigencias técnicas, productivas y económicas, (Chalco & Andrade, 2013). Pero no menciona que las exigencias deben materializarse en todo el proceso de construcción, cumpliendo estas con las expectativas para toda la construcción.

Según el Manual de Fortificaciones mineras; se define como fortificación de excavaciones subterráneas al sostenimiento o fortificación que tiene por objeto mantener abiertas las labores durante la explotación, compensando la "condición inestable" de la masa de roca que soporta. En la mayoría de los casos, solamente es necesario que las labores mineras permanezcan abiertas durante períodos de tiempo relativamente cortos. Por ello la función de las fortificaciones es retrasar el reajuste de las masas de rocas, más que asegurar un sostenimiento permanente. Pero si fallara antes que las labores puedan ser abandonadas, será preciso sustituirlos, (Chalco & Andrade, 2013). Definición que para excavaciones subterráneas con plazos de servicios largos no es utilizable, lo cual es necesario fortificar el macizo con métodos efectivos donde la inyección juega un papel fundamental.

Según Vallejo el sostenimiento se refiere a los elementos estructurales de sujeción del terreno, aplicados inmediatamente después de la excavación de

un túnel, con el fin de asegurar su estabilidad durante la construcción y después de ella, así como garantizar las condiciones de seguridad) (González\_de\_Vallejo., Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002; López-Jiméno. et al., 2004).

## **1.2 Estado Actual de la Temática.**

El hombre comenzó a utilizar las fortificaciones desde muy temprano para satisfacer necesidades básicas como el montaje de una cabaña para protegerse de la lluvia o del calor abrasador del Sol, utilizando materiales que recogía del medio que lo rodeaba como madera, rocas y otros; lo que fue llevando con los años a un desarrollo progresivo creando canales y túneles, viéndose en la necesidad de implementar y combinar técnicas de fortificación para la durabilidad de sus obras frente a factores agresivos, como el agua, las temperaturas, las condiciones geológicas y estructurales de la tierra.

La técnica de inyección como un método de mejoramiento de las propiedades del terreno fue creada y desarrollada en Japón alrededor de los años 70 y actualmente se encuentra bajo constante innovación. Esta técnica se clasifica como un método de inyección de una lechada de agente cementante que mejora las características del suelo, y no depende de la granulometría del terreno para su aplicación (Ruiz, 2006).

En este sentido, es de mencionar el elevado nivel que han alcanzado actualmente los japoneses en la tecnología de las inyecciones geotécnicas. Así, en el citado congreso de Nueva Orleans (1982), los japoneses presentaron 49 comunicaciones, siendo con mucho la mayor representación, después de los anfitriones. Son de mencionar sus avances en relación con las inyecciones mediante «chorro» y también por inyección de las dos soluciones reaccionantes «<inorgánicas» directamente en el terreno por tubos concéntricos, así como en el empleo de soluciones coloidales de sílice, no alcalinas, o en la inyección de resinas de poliuretano, que reaccionan in situ con el agua del terreno (Ruiz, 2006).



Francia es uno de los países que desarrolla y emplea la inyección en diferentes obras como puentes, edificios, carreteras, canales, diques de represas, túneles oceánicos, y muchas otras alcanzando resultados por encima de los esperados.

En nuestro país la inyección y consolidación con mezclas segmentantes la dirige la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA). Los ingenieros franceses la aplicaron en la construcción del túnel de la Habana y fue aplicada recientemente en la cortina de la presa Levisa-Mayarí

En el trasvase Este-Oeste en Mayarí se implementa una fortificación por confinamiento del macizo portante mediante la utilización del hormigón proyectado fibroreforzado combinado con armadura del macizo portante mediante el uso del bulonado.

Los elementos de fortificación que actualmente se utilizan en la ejecución de túneles mediante métodos convencionales son:

- Hormigón proyectado
- Bulones
- Chapa Bernold
- Paraguas de micro pilotes
- Mayas y costillas o arcos metálicos

Se describen seguidamente cada uno de estos elementos.

Hormigón proyectado; está constituido por un mortero de tamaño máximo de árido en torno a ocho milímetros, que se coloca contra el interior de la excavación compactando el mismo mediante la energía de su proyección. Actualmente con el hormigón proyectado pueden alcanzarse resistencias iguales o superiores a las del hormigón convencional encofrado, a pesar de la disminución del tamaño máximo del árido, lo que se consigue mediante la adición de humo de sílice.

Los métodos de colocación del hormigón proyectado son:

1. Por vía seca, el aporte del agua a la mezcla de cemento y árido lo realiza el propio operario, incluyéndose en el extremo de la lanza de proyección del grifo para la regulación del caudal del agua.

2. Por vía húmeda, mediante el empleo de robots que realizan automáticamente la proyección del cemento, con lo que el operario debidamente protegido y a distancia del punto de trabajo tiene únicamente que situar los extremos de las lanzas de los robots como se observa en la figura1.



Figura 1. Equipo de proyección de hormigón por vía húmeda. Tomado de (Suárez, 2015a)

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

Relación agua/cemento.

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

- Ángulo y distancia del impacto.

En el sostenimiento de túneles está totalmente extendida la incorporación de fibras de acero o plásticas formando una mezcla, lo que lleva a las siguientes mejoras:

- Mayor resistencia a la tracción de la mezcla colocada y menor fisuración.
- Disminución del rebote.
- Aumento del desarrollo inicial de resistencia.

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

### Bulones.

Los bulones son anclajes de barra que se alojan en el interior de un taladro perforado en la roca y que se adhieren a esta por diferentes sistemas. Trabajan de forma pasiva, esto es, entran en carga cuando se deforma el terreno. Tienen un efecto de cosido de juntas, pero también de confinamiento sobre el macizo rocoso.

Pueden diferenciarse los siguientes tipos de bulones como se muestra en la figura 2.

a) Bulones de barra a la resina o inyectados.

b) Bulones de anclaje mecánico.

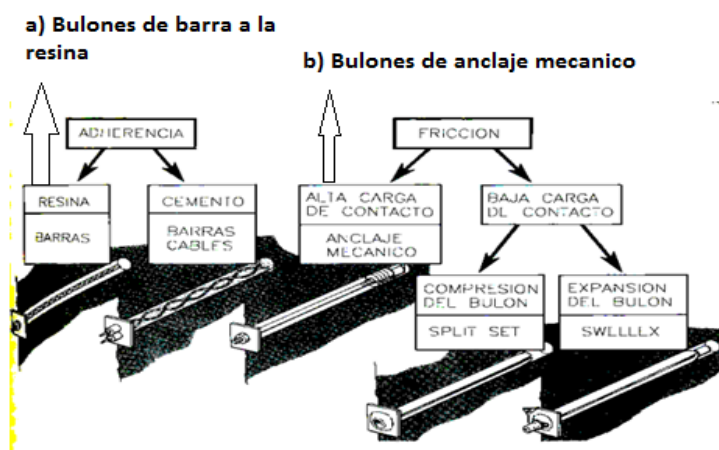


Figura 2. Esquema de los distintos tipos de bulones. Tomado de (Suárez, 2015a)

a) Bulones de barra con resinas o inyectados.

Están constituidos por barras de acero normal corrugado del tipo BS-500 y diámetros de 25 a 32 mm. La perforación se realiza con un ligero sobrealcance respecto al diámetro de la barra, que debe rellenarse íntegramente con cartuchos de resina de dos componentes, cuyo endurecimiento es inmediato una vez que se produce el batido que realiza el propio martillo que perfora el agujero para la colocación del bulón (Suárez, 2015a). En el extremo exterior del bulón se realiza un mecanizado en rosca, con una longitud no inferior a 150 mm y se coloca una placa y su correspondiente tuerca como se muestra en la figura 3.



Figura 3. Bulones con placas y tuercas. Tomado del sitio <http://www.anclajes.com.ar>

#### b) Bulones de anclas mecánica.

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

#### **Chapa Bernold.**

Es una placa troquelada, de espesor de dos o tres metros, que puede colocarse entre cerchas, con las siguientes funciones como se muestra en la figura 4.

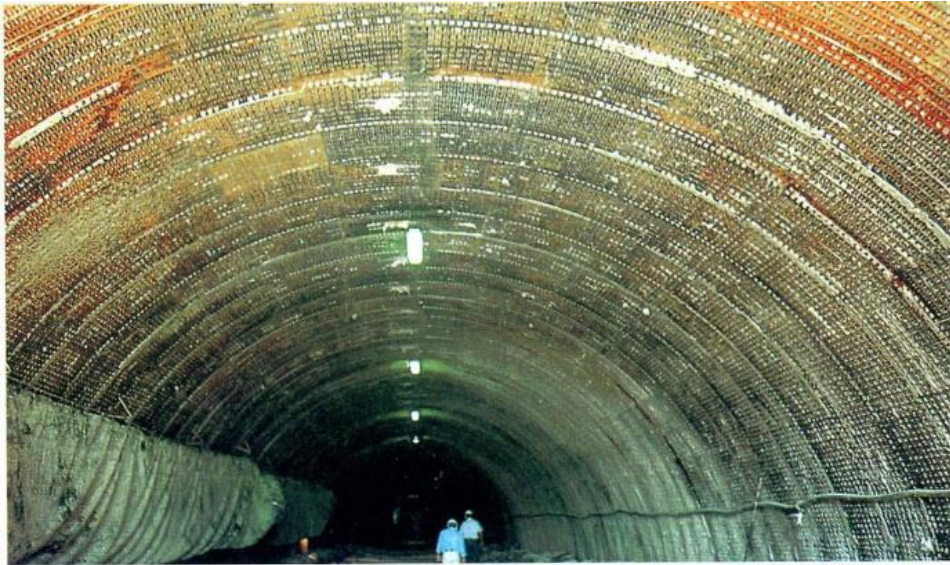


Figura 4. Túnel con sostenimiento de Paraguas Continuo. Tomado de (Suárez, 2015a).

No es habitual la realización de túneles con empleo de chapa Bernold, por su elevado costo.

#### **Paraguas de Micropilotes.**

Consiste en la realización en la clave del túnel de una protección mediante tubos continuos o micropilotes que evitan la caída del material excavado y mejoran la estabilidad del propio frente como se observa en la figura 5.

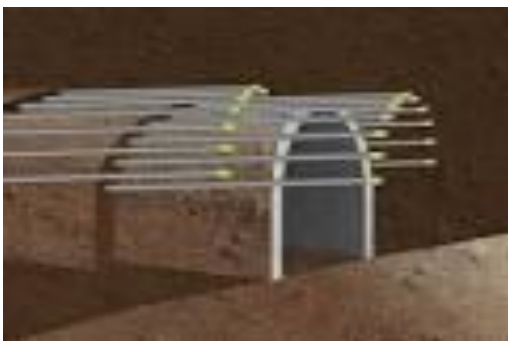


Figura 5. Túnel con sostenimiento de Paraguas Continuo. Tomado de (Suárez, 2015).

Como ya se ha citado, la realización de un túnel con paraguas continuo que normalmente debe solapar de  $1/3$  a  $1/5$  de la longitud del mismo, es un proceso muy lento, penoso y de elevado coste, ya que obliga a sacar del túnel la maquinaria de perforación mientras se realiza el paraguas por otra máquina distinta a las que se utilizan durante la excavación.

Para limitar los desvíos de los micropilotes del paraguas la longitud de cada paraguas se limita a 15-25 m, lo que en la excavación se avanza en una semana, con lo que prácticamente debe estar disponible en la obra la máquina de realización de estos elementos de refuerzo.

### **Hormigón encofrado.**

En muchos casos, una vez colocado el sostenimiento, en general en todo el desarrollo del túnel, se procede a la realización de un revestimiento de hormigón en masa con las siguientes funciones:

- Mejora el acabado estético del túnel.
- Reduce la fricción del aire permitiendo limitar la potencia de los ventiladores.
- Constituye un elemento de protección frente al fuego del sostenimiento.

Además de los puntos anteriores, es evidente que un revestimiento de hormigón encofrado constituye un nuevo elemento de soporte, que aumenta el coeficiente de seguridad del túnel una vez construido.

El encofrado suele estar constituido por tres módulos deslizantes, de forma que pueda retirarse y adelantarse el módulo en que anteriormente se hubiera realizado el hormigonado, poniéndole por delante del que en ese momento se está hormigonando, lo que permite que esta actividad constituya un proceso continuo sin interrupciones como se observa en la figura 6.

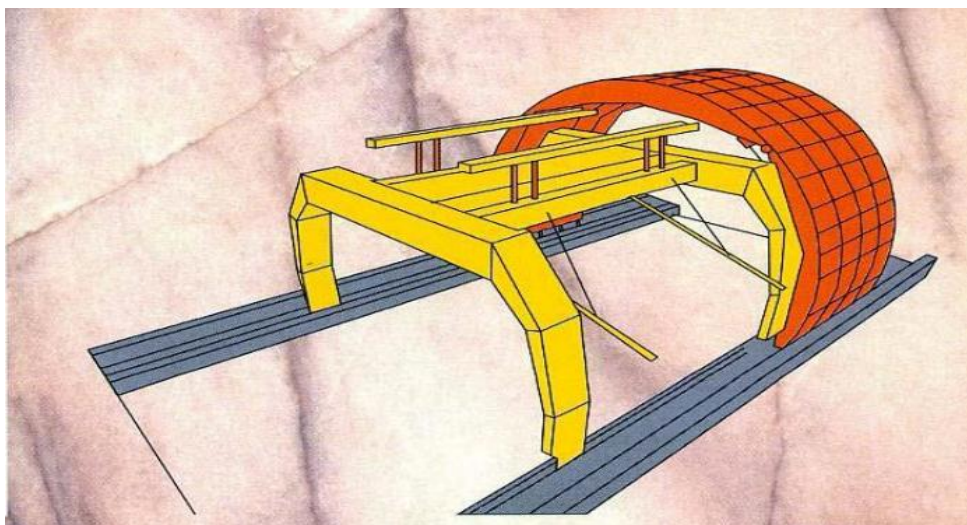


Figura 6. Proceso continuo de encofrado de hormigón. Tomado de (Suárez, 2015a).

### **1.3 Clasificación y uso de las fortificaciones.**

Existen numerosas clasificaciones de la fortificación para excavaciones subterráneas, entre las que se encuentran:

Según su uso: fortificación de excavaciones mineras, fortificación de túneles de transporte, fortificación de excavaciones hidrotécnicas etc.

Según su plazo de servicio: fortificación temporal, fortificación permanente.

Según el material de construcción: de madera, metálicas, de rocas, de hormigón, de hormigón armado y con el empleo de diferentes combinaciones de materiales.

#### **Acorde a las soluciones constructivas:**

1. Según la forma de la construcción en la excavación (rectangular, trapezoidal, poligonal, con techo abovedado, con bóveda invertida por el piso, elípticas).
2. Según la forma de los principales elementos sostenedores (vigas, elementos de la construcción de cuadros, anclas, coberturas continuas, elementos de paredes y cemento, elementos portadores).
3. Forma de construcción de la unión de los elementos punteados (forma rígida con charnelas y su forma combinada)
4. Según sus características cinemáticas forma un sistema estáticamente determinado o un sistema estáticamente indeterminado)
5. Según la estructura de la construcción (de una capa, de dos capas y de muchas capas)
6. Según las características de su enlace con el macizo (contacto y cohesión total, no hay una total cohesión por todo el contacto y no hay cohesión (Gavilanes & Andrade, 2004).

#### **Según las soluciones tecnológicas de construcción:**

1. Con elementos prefabricados (piedra, elementos metálicos, bloques etc.)
2. Construcciones monolíticas.

3. Con elementos prefabricados–monolíticas (por eje. con paredes monolíticas y la bóveda hecha con elementos prefabricados) (Gavilanes & Andrade, 2004).

#### **Según sus características de deformación:**

1. Tipo de características de su deformación (con resistencia constante, con resistencia que crece linealmente y con resistencia que crece en forma no lineal).
2. Según su rigidez (rígida, poco flexible, hasta 100 mm, flexibles hasta 300 mm y las más flexibles cuando ceden más de 300 mm (Gavilanes & Andrade, 2004).

#### **Según su capacidad portadora:**

1. Construcciones protectoras (fortificación de recubrimiento, para la aislación, para proteger)
2. Fortificación sostenedora (de poca capacidad con capacidad portadora hasta 0.1 MPa, de mediana capacidad de 0.11 a 0.3 MPa, de alta capacidad de 0.31 a 1.0 MPa y de muy alta capacidad portadora más de 1.0 MPa).
3. Según las características de manifestación de la capacidad portadora (por acciones de empuje, por el aumento de su resistencia, combinada).

#### **Según la forma de su construcción.**

1. Por métodos habituales (no mecanizados y mecanizados)
2. por métodos especiales (fortificación de hincado, fortificación de descenso, bajo la protección del aire comprimido y otros) (Chalco & Andrade, 2013)

#### **1.4 Criterios para la elección del tipo de fortificación.**

Para la elección del tipo de fortificación a emplear se deben tener en cuenta una serie de factores, los que pueden tener un mayor o menor peso relativo, según la situación que se analice:

1. Condiciones mecánico y geoestructurales existentes en el macizo.
2. Forma y dimensiones de la sección transversal de la excavación.
3. Su vida de servicio y uso.



4. Grado de estabilidad del conjunto macizo–excavación
5. Carga pronosticada
6. Presencia de agua y sus características.

### **1.5 Métodos para la evaluación del macizo rocoso.**

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

- Grado de agrietamiento del macizo y unido a esto el número de sistemas de grietas existentes, sus orientaciones respecto a la dirección de la excavación, el material de relleno.
- Estado tensional del macizo (antes y después de realizada la excavación).
- Formas y dimensiones de la sección transversal de la excavación.
- Ubicación espacial de la excavación en el macizo.
- Método de laboreo empleado.
- Condiciones hidrogeológicas.

**Clasificaciones geomecánicas;** estas 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 evaluación 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 geomecánicas constituyen actualmente un método fundamental para la evaluación geomecánica de los macizos rocosos, ya que permiten obtener parámetros de resistencia y deformabilidad del macizo y estimar la fortificación de una excavación subterránea, clasificaciones que se mencionan a continuación.

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

El R.Q.D (ROCK QUALITY DESIGNATION), (Deere-1963) es un índice que se obtiene de la recuperación de testigos en sondeos con diámetro mínimo de 54 mm y se define como el porcentaje de la longitud de testigo recuperado en trozos mayores de 10 cm, respecto a la longitud de sondeo. Este índice, de uso muy generalizado, quizás por su fácil obtención, hay que considerarlo con ciertas reservas, ya que en él influyen factores ajenos a la calidad de la roca, como son la mecánica del sondeo y pericia del sondista que lo ejecuta, que pueden producir roturas en el testigo que no sean debidas a la calidad y fracturación de la roca. Por esta razón, es conveniente que el levantamiento del sondeo para la determinación del índice se haga durante la ejecución, procurando, dentro de lo posible, que no contemple las roturas que puedan ser producidas por la sonda. Índice basado en evaluaciones numéricas de tres parámetros.

$$RQD = \frac{\text{Longitud recuperada del testigo} > 100 \text{ mm}}{\text{Longitud del testigo}} \times 100 \quad (1)$$

Cuando no se dispone de sondeos, una aproximación del R.Q.D se obtiene por la expresión dada por (Palmström, 1982).

$$RQD = 115 - 3.3 J_v \quad (2)$$

Siendo  $J_v$  el número total de juntas por metro cúbico, que se puede obtener sumando las juntas que hay por metro, de cada familia de las existentes en el lugar de observación (Palmström, 1982). En función del R.Q.D, se establece la clasificación de las rocas como se muestra en la E 13 de los anexos.

Esta clasificación, como la mayoría de las existentes, da resultados válidos en rocas masivas y resistentes, basándose en datos experimentales en distintas obras y tipos de roca, establece una correlación entre el RQD y el índice de velocidad del macizo, que se define como el cuadro de la relación entre velocidad sísmica en el sondeo y en el laboratorio. Este índice, es en esencia una relación entre la velocidad media de propagación de ondas en el macizo rocoso y en la roca matriz, en el cual está reflejado implícitamente la influencia de las discontinuidades del macizo (Suárez, 2015b).

## 2- Clasificación de Bienawski (RMR).

Esta clasificación fue publicada por su autor en 1973 y ha sido ligeramente modificada en el año 1976 y 1979 si bien, entre estas dos últimas publicaciones, no existe diferencia en la estructura y valoración de los parámetros (Bieniawski, 1973). Por esta razón expondremos las dadas en las publicaciones de 1973 y 1979, (Bieniawski & Bernede, 1979) . Para determinar el índice RMR de calidad de la roca se hace uso de seis parámetros del terreno:

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.

Para tener en cuenta la incidencia de estos factores se definen una serie de parámetros, asignándoles una determinada valoración, cuya suma en cada caso, nos dará el índice de calidad RMR; cuyo rango de variación está entre cero y 100. En función del valor del RMR se clasifican las rocas en cinco categorías diferentes como se muestra en la E 14 de los anexos para los que se definen sus correspondientes tipos de sostenimiento empíricos, que servirán de dimensionamiento previo para las excavaciones que en éstas se realicen; a la vez que se establecen criterios sobre la forma de ejecutar la excavación, así como el tiempo que puede permanecer abiertas determinadas longitudes de excavación. Parámetros de clasificación y sus rangos, según Bienawski (1979) mostrados en la E 15.

### **3- Clasificación de Terzaghi.**

La clasificación propuesta en 1946 por Terzaghi ha sido de gran aplicación en Norteamérica. Clasifica los terrenos en nueve tipos, atendiendo esencialmente a las condiciones de fracturación en las rocas y a la cohesión o expansividad en los suelos. Considera la disposición de la estratificación respecto al túnel, en la previsión de desprendimientos que se resume en tres normas empíricas:

1. Con estratificación vertical el techo será estable en general, pero se pueden producir caídas de bloques en una altura de  $0,25 B$  ( $B$  es el ancho del túnel)
2. Con estratificación horizontal de gran potencia y con pocas juntas, la excavación será estable sin roturas
3. Con estratificación horizontal de pequeña potencia y/o gran cantidad de juntas, en el techo se desarrollarán roturas, formándose un arco apuntando sobre el túnel, con anchura la de éste y altura la mitad de la dimensión anterior. Este proceso es progresivo y se detendrá si se coloca rápidamente un sostenimiento.

En la E 16 de los anexos presenta la clasificación de los nueve tipos de terreno propuestos por el autor, así como la estimación de la carga en el techo ( $H_r$ ) para cada uno de ellos.

Estos valores son de aplicación para dimensionamiento de sostenimientos clásicos cerchas y hormigón, que se consideran conservadores para rocas de buena calidad, que su campo de aplicación es para túneles de tamaño medio del orden de ocho metros de anchura o menor y que son de dudosa aplicación en terrenos expansivos o que fluyen plásticamente. La distribución de cargas para el dimensionado del sostenimiento se hace suponiendo:

Presión uniforme vertical sobre la bóveda de valor:

$$P_m = \gamma H_r \quad (3)$$

Presión uniforme sobre las paredes de valor:  $P_s = 0.3 P_m$

Presión uniforme sobre la solera, si existe esta, de valor:  $P_s = 0.5$

$P_m \gamma$ : densidad de la roca

$H_r$ : se obtiene de la tabla cuando puedan desprenderse localmente bloques, la fortificación deberá dimensionarse para resistir las cargas puntuales correspondientes.

#### **4- Clasificación de Protodiakonov.**

En los países del este de Europa es una clasificación bastante extendida, en los que se utiliza para el dimensionamiento de fortificaciones de túneles, y que

en 1976 fue adoptada en Francia junto con la de Deere, para el predimensionado de las excavaciones en este país.

Protodiakonov clasifica los terrenos, asignándoles un parámetro "f" llamado coeficiente de resistencia, a partir del cual, y de las dimensiones del túnel, define las cargas de cálculo para dimensionar la fortificación. La E 17 que se muestra en los anexos, donde se indican el tipo de terreno y el coeficiente f, según las distintas resistencias (Suárez, 2015b).

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

$$\text{Para rocas: } f = \frac{\delta_c}{10} \quad (4)$$

$$\text{Para suelos: } f = \text{tg} \varphi + \frac{c}{\delta_c} \quad (5)$$

Dónde:

$\delta_c$  - Resistencia compresión simple (MPa)

$\varphi$  - Ángulo de rozamiento interno a largo plazo

C - Cohesión a largo plazo (MPa)

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

Presión uniforme vertical sobre clave:

$$P_v = \gamma \times h \quad (6)$$

Presión uniforme horizontal lateral:

$$P_L = \gamma (h + 0.5 \text{ m}) + \text{tg}^2 (45 - \frac{\theta}{2}) \quad (7)$$

Donde:

$$h = \frac{B}{2f} \text{ y } B = b_2 \text{ mtg}(45 - \frac{\theta}{2}) \quad (8)$$

B - ancho del túnel

m - altura del túnel

f - coeficiente de resistencia

$\Phi$ - ángulo de rozamiento interno

$\gamma$ =densidad del terreno

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

$$\frac{b}{2tg\phi} < H < \frac{B}{tg\phi} \quad (9)$$

### **5-Clasificación de Lauffer.**

Esta clasificación fue desarrollada por el autor en 1958, recoge la experiencia de un estudio sistemático sobre el tiempo que permanecían estables excavaciones en diferentes tipos de roca, incluso en minas abandonadas (Lauffer., 1958).

La clasificación se efectúa atendiendo a los parámetros;

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

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

En función de ambos parámetros clasifica las rocas en siete tipos, los que se muestran en la E 18 de los anexos.

#### **Necesidades de fortificación según Lauffer:**

(A) No es necesario fortificar

(B) De dos a tres centímetros de hormigón, o bulones separados 1.5-2 m con mallas, o eventualmente refuerzo de la bóveda únicamente.

(C) De tres a cinco centímetros de hormigón, o bulones separados 1 -1.5 m con mallas, eventualmente solo refuerzo de la bóveda.

(D) De cinco a siete centímetros de hormigón, con mallas o bulones separados 0.7-1m junto con mallas y tres centímetros de hormigón.

(E) 7-15 cm de hormigón con mallas, a veces bulones separados 0.5-1.2 m y tres a cinco centímetros de hormigón alternativamente cerchas y blindaje.

F) 15-20 cm de hormigón con cerchas y mallas, o cerchas y blindaje con hormigón posterior.

(G) Hormigonado, cerchas, reforzados y blindaje.

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

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

**Tipo A:** Roca Sana.

Terreno muy bueno.

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

Terreno bueno.

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

Terreno medio.

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

Rocas Blandas.

Terreno mediocre.

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

Roca blanda, de débil cohesión.

Terrenos arcillosos con fuertes empujes.

Terreno malo.

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

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

## **2.1- Clasificación de Barton (Q).**

Desarrollada por Barton, Lín y Lunde en 1974, a partir del estudio de un gran número de túneles, constituye un sistema de clasificación de macizos rocosos que permite estimar parámetros geotécnicos del macizo y diseñar sostenimientos para túneles y cavernas subterráneas (Nick Barton & Grimstad,

2000). El índice (Q) está basado en una evaluación numérica de seis parámetros dados por la expresión 10 y su valor varía entre 0,001 y 1.000:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (10)$$

Dónde:

$J_n$  = índice de diaclasado que indica el grado de facturación del macizo rocoso.

$J_r$  = índice de rugosidad de las discontinuidades o juntas.

$J_a$  = índice que indica la alteración de las discontinuidades.

$J_w$  = coeficiente reductor por la presencia de agua.

SRF (stress reduction factor) = coeficiente que tiene en cuenta la influencia del estado tensional del macizo rocoso.

Los tres grupos formados con estos parámetros son:

$\frac{RQD}{J_n}$  – RQD-representa el tamaño de los bloques

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

$\frac{J_w}{SRF}$  – representa la influencia del estado tensional

Estas clasificaciones geomecánicas y sus resultados en diferentes macizos rocosos donde se construyen obras subterráneas y su correspondencia con el comportamiento práctico, no analizan varios fenómenos que inciden negativamente en los procesos constructivos y son utilizados universalmente en todo tipo de macizos rocosos. En condiciones heterogéneas y especiales, estos métodos pueden dar resultados erróneos; así mismo estos métodos no consideran los diferentes las fallas e inestabilidad y la interacción macizo-fortificación que pueda presentarse en condiciones excepcionales como el aumento de las tensiones en tramos afectados por los cambios litológicos a lo que se le suma la gran permeabilidad, que presentan muchos túneles en construcción por debajo del nivel freático necesitándose utilizar métodos especiales para sostener estas zonas.



Como es el hecho del Tramo V del Túnel Levisa-Mayarí donde este presenta problemas de estabilidad debido a la presencia de agua subterránea que ataca la fortificación y su estructura provocando derrumbes totales del túnel, sumado a esto los cambios estructurales, litológicos, geomecánicos que provocan aumentos de sobre excavaciones de la sección transversal del túnel, debiéndose utilizar elementos de fortificación (bulones, mallas metálicas) en cantidades no programadas, la caída de la fortificación provocado por la gran permeabilidad que en los meses de lluvia aumenta considerablemente teniendo que detener las labores de construcción totalmente por días, el aumento del número de grietas manifestándose en derrumbes totales de la construcción lo que es visible a 100 y 800 m de la boca del túnel, este último producto de la negligencia del hombre que no tomo en cuenta que el túnel iba a pasar a unos 10 o 12 m por debajo de un río lo que causó que el agua hiciera colapsar el túnel y este tomar como cauce el interior del túnel amenazando la vida de obreros y pudiendo provocar pérdidas económicas millonarias para el país. Todo esto lleva a plantearse la aplicación de técnicas especiales de fortificación ya que las utilizadas no cumplen los objetivos esperados por lo que se propone la aplicación de la clasificación propuesta por (Recio, 2010) donde establece un procedimiento para elegir la técnica de control de las filtraciones que afectan las excavaciones subterráneas desarrolladas en macizos rocosos fuertes poco porosos y agrietados, tomando en consideración la correlación existente entre la calidad de los macizos fuertes y su permeabilidad con el fin de estabilizar el macizo en los tramos o secciones que lo ameriten.

Como fortificación, mejoramiento y estabilización de suelos, puede utilizarse la técnica de inyección la cual puede ser aplicada cuando los suelos tienen índice de consistencia inapropiados o muy alta permeabilidad (SALGADO, 2014). La cual consiste en inyectar una pasta de baja viscosidad denominada lechada, generalmente está compuesta por cemento y agua (Suárez, 2015a).

El tratamiento de la roca tiene la finalidad de garantizar la estabilidad del macizo rocoso y de las obras que ahí se construyan, por lo cual es necesario conocer la naturaleza geológica de la zona de las obras (<http://www.pdf4free.com>).

### **Principales aplicaciones de las inyecciones;**

Las principales aplicaciones de las inyecciones geotécnicas incluyen las siguientes:

1. Estabilización de suelos incoherentes en la excavación de túneles y galerías, incluso bajo nivel freático.
2. Ejecución y sellado de pozos de acceso a túneles y galerías.
3. Rellenado y sellado tras los hastiales y bóvedas de túneles.
4. Control de los movimientos del suelo en la construcción de túneles.  
Minería.
5. Levantamiento y nivelación de estructuras pesadas.
6. Recalces.
7. Sellado de pilotes de gran diámetro, antes de su hormigonado en seco.
8. Relleno de oquedades y cuevas Kársticas.
9. En cimentaciones y sellado de sótanos y pantallas de impermeabilización y estructurales.

### **1.6 Procedimiento para la inyección**

Existen dos grandes modos de actuación; las inyecciones en cierre y las inyecciones de cierre.

**Inyecciones en serie;** Esta expresión se emplea cuando se inyectan al mismo tiempo grupos de sondeos de entre cinco a 10, incluyendo además las pruebas de agua y su limpieza simultáneamente. Normalmente esta técnica se emplea para la inyección de áreas o capas superficiales.

**Inyecciones de cierre;** La aplicación más importante de este método es la formación de pantallas.

El procedimiento consta de varias etapas; en la primera se realizan la inyección de unos sondeos bastante separados, con una separación constante que es determinada previamente y que será al menos el doble de la separación que se fije para el último. A estos sondeos se les denomina primarios. En una segunda etapa se perforan los otros sondeos, que serán de nuevos equidistantes con los anteriores y así en sucesivas etapas hasta que los sondeos lleguen a estar a la distancia de proyecto.

Debido a la heterogeneidad y comportamiento del terreno, existen diferentes métodos de inyección, por su importancia se describirán algunas:

- Pantallas de impermeabilización
- Inyección por reemplazo (Jet Grouting)
- Inyección por impregnación y fractura (Fracture Grouting)
- Inyección por consolidación (Compaction Grouting)
- Inyección de lechadas de cemento-bentonita y/o aditivos plastificantes y aceleradores de fraguado. (Chemical / Cement Grouting)

### **Pantallas de impermeabilización**

Inyección de impermeabilización.

Consiste en la impermeabilización de la roca mediante inyecciones a través de perforaciones profundas, sellando fracturas o discontinuidades geológicas (fallas, diques, etc.) existentes, con el propósito de reducir la permeabilidad del terreno al formar una barrera lo suficientemente profunda para garantizar la estanqueidad de la obra. Inyección del contacto entre la roca in situ y el límite inferior de la pantalla flexible o muro plástico de las ataguías, para lograr la continuidad de la pantalla flexible, y garantizar la estanqueidad del terreno (<http://www.pdf4free.com>).

Este procedimiento consiste en introducir mortero o lechada en macizo con el uso de un monitor a una presión que corta el suelo; esta presión es generada por la energía de impacto de la alta velocidad de circulación del fluido el cual es bombeado a través de la boquilla del equipo inyector. Su aplicación busca modificar o incrementar las características mecánicas del medio tratado ya sea para aumentar su capacidad de carga o disminuir su compresibilidad y al mismo tiempo reducir la permeabilidad.

### **Inyecciones de consolidación:**

Tienen como propósito mejorar el módulo de deformabilidad de la roca de cimentación, mediante la inyección de mezclas a presión, a través de barrenos perforados previamente en un arreglo geométrico definido como se muestra en la figura 7 (<http://www.pdf4free.com>).

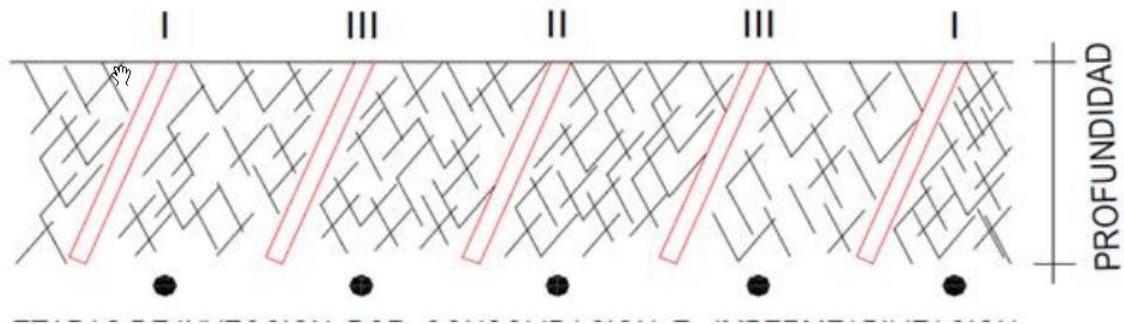


Figura 7. Etapas de inyección por consolidación e impermeabilización (<http://www.pdf4free.com>).

Con esta inyección se trata de sellar las fisuras o grietas existentes en la masa de roca.

Las características de las líneas de los barrenos de consolidación son las siguientes:

**La profundidad.**

La profundidad de los barrenos de consolidación depende de las condiciones geológicas del terreno.

**Separación de barrenos:**

La separación entre las perforaciones también depende de las condiciones geológicas del terreno. En macizos rocosos muy fracturados la separación entre los barrenos se reduce a tres metros, ya que no es posible aplicar presiones de inyecciones muy elevadas pues se corre el riesgo de fracturar más el terreno y llegar a hacer una condición llamada hidrofracturamiento. Mientras que en terrenos fracturados la separación puede ser de cinco a seis metros de separación.

Como objetivos que cumple la inyección están; rellenar fisuras, grietas y oquedades con el fin de evitar el flujo del agua a través de sus planos de falla o reducir su permeabilidad, también se busca evitar el colapso del macizo y una adecuada transmisión de esfuerzos en caso de que una cimentación se desplante.

Las inyecciones en macizos masivos y rocas firmemente ancladas son normalmente más fáciles que en materiales sueltos, rotos y sin consistencia en los que el barreno se sierra y colapsa rápidamente. Cuando la roca está sometida a tensiones debido a la tectónica, antes de iniciar la inyección es muy

importante que se haga un reconocimiento y valoración de estas tensiones, para llegar a definir el método de inyección más adecuado, (*Tratamientos del terreno*, 2012).

### **1.7 Trabajos Precedentes.**

(Pineda, 2011). Considera los aspectos de inyección de suelo por medio de la técnica de Jet Grouting, a efecto de formular una propuesta que se pueda adaptar a las condiciones y realidad de Guatemala. Propone los beneficios de la técnica del Jet Grouting, como una buena técnica para la inyección de suelos. Pero no menciona que la técnica de Jet Grouting solo puede emplearse para terrenos arenosos y arcillosos.

La introducción de la computación, como por ejemplo los Software para el cálculo de estabilidad de las obras, diseño de la fortificación , estado tensiona alrededor de las excavaciones, entre otros (López-Jiméno et al., 1997) también han contribuido grandemente en el desarrollo científico técnico de los túneles hidrotécnicos.

La compactación es un método mecánico de mejoramiento de las características del suelo, el cual incide favorablemente sobre la resistencia, la compresibilidad y la permeabilidad. Mediante la aplicación de una energía específica de compactación y la variación del contenido se obtienen pesos específicos secos; de los cuales existe para cierto contenido de humedad denominado óptimo, un peso volumétrico seco máximo. En este punto se ha producido una reducción significativa de volumen debido a la disminución de vacíos que ocupaba el aire en suelo, este incremento del peso volumétrico permite el mejoramiento de las propiedades del suelo. Este tratamiento de mejora es aplicable tanto para arcillas como arena, (Salgado, 2014). No menciona la compactación como tratamiento de macizo.

(Recio., 2010). Caracteriza los factores que influyen en los procesos de infiltración y filtración de agua por los macizos rocosos fuertes poco porosos y agrietados y hacia el interior de las excavaciones subterráneas, realiza una caracterización de los factores que influyen en el proceso de control del agua que afecta las excavaciones subterráneas y se realiza un estudio de las

principales técnicas utilizadas para controlar el agua que afecta una excavación subterránea.

## **CAPÍTULO II. MATERIALES Y METODOS**

### **2.1 Introducción**

La elección de la técnica para fortificar las excavaciones se puede realizar según varios criterios, sin embargo, en nuestro trabajo consideraremos los criterios siguientes:

1. Condiciones mecánico y geoestructurales existentes en el macizo.
2. Presencia de agua y sus características.

El primer criterio se llevará a cabo mediante el análisis de los métodos de evaluación del macizo rocoso, los criterios para la elección del tipo de fortificación, la clasificación y uso de las fortificaciones, se propone evaluar el macizo tomando en cuenta el análisis de Barton, Lín y Lunde desarrollado en 1974 (Nick. Barton, Lien, & Lunde, 1974).

Analizaremos el factor de estabilidad de (Nick. Barton et al., 1974) en cada estacionado y el índice Q obtenido desde el estacionado 2+485.00 al 2+740.0 así como desde el estacionado 2+833.00 al 3+148.00 el 3+366 al 3+453.00 y el 3+553.00 al 3+670.00 a los que llamaremos tramos A, B, C, D como se muestra en la tabla 4.

Se debe aclarar que en el trasvase que se construye en Mayarí las propuestas de fortificaciones son resultado de la aplicación de la clasificación geomecánica de Barton, Lín y Lunde, 1974, sin embargo en los tramos en los que existe presencia de agua y la calidad del macizo varia de rocas excepcionalmente malas (entre 0,001 y 0,01), a rocas extremadamente malas (entre 0,01 y 0,1) y en ocasiones rocas muy malas (entre 0,1 y 1) las propuestas no garantizan la seguridad del espacio, trayendo como resultado derrumbes por el techo de gran magnitud, pérdidas económicas por avería de equipo, pérdidas de vidas humanas, atrasos en el cronograma; todo esto traducido en sobregiros en el presupuesto a causa de la necesidad de implementar alternativas no concebidas en el proyecto inicial.

Para los casos antes mencionados y objetivo fundamental de nuestra investigación, aplicaremos la clasificación propuesta por (Recio, 2010) donde establece un procedimiento para elegir la técnica de control de las filtraciones que afectan las excavaciones subterráneas desarrolladas en macizos rocosos fuertes poco porosos y agrietados, tomando en consideración la correlación existente entre la calidad de los macizos fuertes y su permeabilidad que se muestra en la tabla 1, así como los principales factores que inciden en los procesos de control y circulación del agua a través del conjunto macizo rocoso-excavación. La técnica es elegida a partir de un algoritmo propuesto por (Recio, 2010) y propone entre otras, la técnica de inyección como una de las soluciones para mejorar la calidad del macizo.

Tabla 1. Relación entre el coeficiente de permeabilidad del macizo y el índice de calidad propuesto por Deere (RQD) expresado a través de  $K\omega$ .

Categorías( $K\omega$ )	I	II	III	IV	V
Ke m/día	5	4	3	2	1
	0,001-0,1	0,1 – 1,0	1-10	11-100	más de 100
Deere	E	D	C	B	A
	90<RQD<100	75<RQD<90	50<RQD<75	25<RQD<50	0<RQD<25

Algoritmo que se muestra en la figura 12 de los anexos con su nomenclatura en la E 19 de los anexos estructurado por 4 bloques y 19 pasos. Aplicándose para el Tramo V Túnel Levisa-Mayarí. Según las características y las informaciones obtenidas utilizaremos la metodología del bloque II formado por los pasos (3, 4, 5, 6) ya que estos analizan las características de la excavación, las del agrietamiento y las hidrogeológicas y el bloque IV con los pasos (13, 15, 19) donde se evalúa y se propone la utilización de las inyecciones de sustancias cementantes con doble propósito: fortalecimiento y control del agua (Recio, 2010).

## 2.2 Métodos del procedimiento seleccionado.

### Paso 3. Destino y plazo de vida de la excavación.

Se evalúa este aspecto debido a la lógica proporcionalidad que existe entre el destino y plazo de servicio con respecto a los costos y durabilidad de la técnica

de control de las filtraciones. Esto se realiza seleccionando una de las tres categorías establecidas en la tabla 2.

Tabla 2. Clasificación de las excavaciones subterráneas en función del destino y plazo de servicio (Recio, 2010).

<b>Categoría/Plazo</b>	<b>(I) / PI &lt; 5 años</b>	<b>(II) / 5 &lt; PI &lt; 10 años</b>	<b>(III) / PI &gt; 10 años o más</b>
Tipo o destino de excavación	Galerías preparatorias y galerías de minas	Excavaciones temporales, para el acceso a cuerpo minero, o de otro tipo	Viaductos. Túneles hidráulicos y salas para máquinas. Obras para la defensa y estratégicas. Algunas excavaciones mineras destinadas como depósitos y almacenes.

#### **Paso 4: Características de la excavación subterránea.**

Este dato permite excluir técnicas de control y advertir sobre la efectividad de algunas en función de la forma y dimensiones de la sección transversal, la profundidad de ubicación y longitud de los tramos de estudio. Ejemplo: Cuando la forma de la sección transversal es rectangular no es recomendable utilizar hormigón lanzado, debido a su dificultad para adherirse en la unión del techo con las paredes, además de la alta concentración de tensiones que se produce en estos puntos (Recio, 2010).

#### **Paso 5: Características del agrietamiento.**

Los índices de calidad y la permeabilidad del macizo se toman para el Tramo V mencionados según datos del proyecto (Hidraulicos, 2008) así como su agrietamiento.



## **Paso 6. Características hidrogeológicas.**

Son tomadas del proyecto (Hidraulicos, 2008).

### **Bloque IV.**

El bloque plantea la inyectabilidad utilizando el paso (13) y los parámetros propuestos por (Recio, 2010) donde se tratan los macizos de calidad mala y muy mala (categorías IV y V).

Para comprobar la aplicabilidad y efectividad del procedimiento se realizará una aplicación teórica del mismo ejecutando los pasos siguientes.

1. Elección y justificación de las excavaciones objeto de estudio.
2. Aplicación del procedimiento.
3. Análisis de los resultados.

De ser necesario, durante el proceso de evaluación de los resultados, se podrán realizar ajustes y correcciones al procedimiento.

## CAPÍTULO III. LA INYECCIÓN DEL TERRENO EN EL TRASVASE ESTE-OESTE. UNA ALTERNATIVA PARA ELEVARE LA CALIDAD DE LAS CONTRUCCIONES

### 3.1 Introducción.

Para la propuesta de aplicación de la técnica de inyección en el Túnel Levisa-Mayarí, Tramo V, que se llevara a cabo mediante la aplicación del procedimiento propuesto por (Recio., 2010) dividiremos el tramo v en cuatro tramos conforme al índice de calidad aplicando (Nick. Barton et al., 1974) de 0.001-1. En los que se evaluó la estabilidad aplicando (Nick. Barton et al., 1974) para elegir las técnicas de fortificación utilizadas actualmente, las que no han garantizado la estabilidad del conjunto macizo excavación.

### Ubicación.

El Túnel Levisa-Mayarí es una obra subterránea que va desde la Presa Levisa a la Presa Mayarí en el río del mismo nombre. Toda la zona se encuentra en las hojas cartográficas 1:50 000 de Mayarí 5077-I para una superficie total de 84.0 (km<sup>2</sup>) como se muestra en la figura 8.

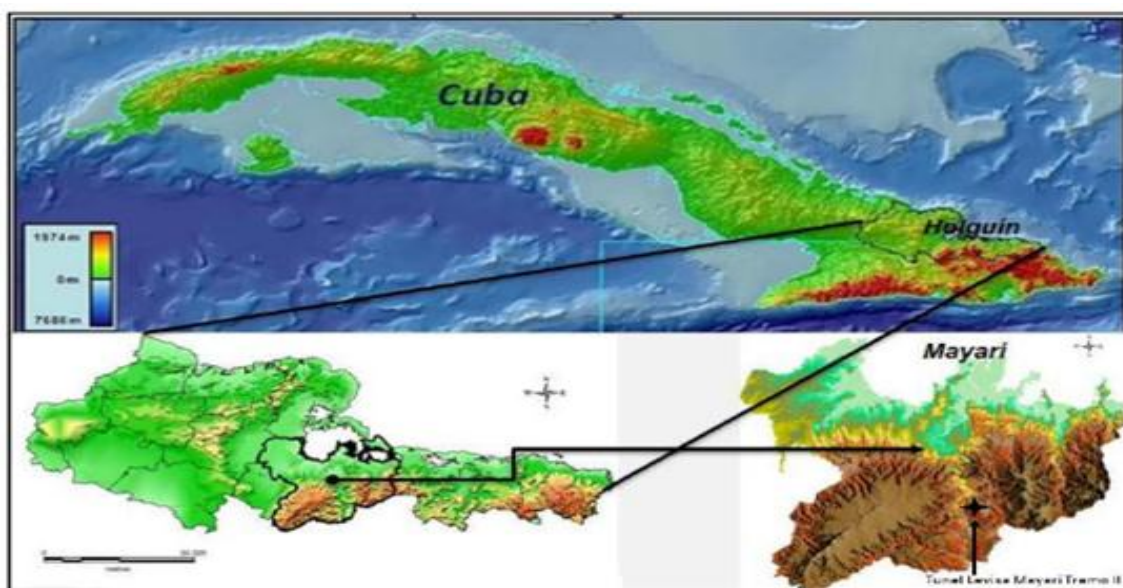


Figura 8. Ubicación geográfica del municipio de Mayarí. Tomado de (Cala, 2018c).

### **Aplicación de los procedimientos propuestos.**

Evaluación del macizo rocoso.

Al analizar el factor de estabilidad de (Nick. Barton et al., 1974) en cada estacionado como se muestra en la tabla 3 y el índice Q obtenido desde el estacionado 2+485.00 al 2+740.0 así como desde el estacionado 2+833.00 al 3+148.00 el 3+366 al 3+453.00 y el 3+553.00 al 3+670.00 a los que llamaremos tramos A, B, C, D como se muestra en la tabla 4. Según el orden determinamos que la calidad del macizo varia de rocas excepcionalmente malas (entre 0,001 y 0,01), a rocas extremadamente malas (entre 0,01 y 0,1) y en ocasiones rocas muy malas (entre 0,1 y 1).

Tabla 3. Muestra el factor de estabilidad de Barton para cada estacionado desde el estacionado 2+485.00 al 3+390.00.

Estacionado	(Q) según Barton
2+485.00	0.1
2+550.00	1
2+597.00	0.1
2+740.00	0.10
2+788.00	4
2+833.00	0.10
2+886.00	0.5
2+927.00	0.1
2+972.00	1
3+020.00	0.1
3+090.00	0.01
3+148.00	1
3+210.00	7

3+280.00	5
3+366.00	0.01
3+453.00	0.10
3+509.00	4.50
3+553.00	0.01
3+670.00	0.1
3+390.00	-

Tabla 4. Que muestra el índice de estabilidad Q según el estacionado correspondiente.

Tramos	Estacionado	Q
A	2+485.00- 2+740.00	0.1-1
B	2+833.00 -3+148.00	0.1-1
C	3+36600- 3+453.00	0.01-0.1
D	3+553.00 -3+670.00	0.01-0.10

Por lo que a partir de los resultados obtenidos se clasifican los tramos con la categoría de  $(K\omega)=IV$  y  $(RQD) 25 < RQD < 50$  con una calidad mala.

### 3.2 Aplicación del procedimiento propuesto.

#### Características de la excavación.

#### Finalidad de la obra y plazo de servicio

El túnel Levisa-Mayarí, el cual ha sido dividido en seis tramos dados su longitud aproximada de 17,0 Km. correspondiendo este en específico, al Tramo V con una longitud de 4920.0 m, y el túnel de conexión III con una longitud de 620.00 m. Este se ejecuta a solicitud de la inversión, de diseñar un túnel a partir del trazado ajustado con el objetivo de permitir la conducción del gasto mínimo de  $30.0 \text{ m}^3/\text{s}$  desde la presa Levisa hasta la presa Mayarí, en unión con los tramos

que le anteceden (tramo VI sin proyectar), el tramo I y II (construido), tramo III y tramo IV (en construcción). Para el diseño de este túnel se consideró que la conducción se realizará a presión, aprovechando la carga de la presa Levisa con cota de nivel de aguas normales de 96.00 m y cota de fondo del túnel a la salida de 65.00. Este túnel constituye un elemento más del sistema del Trasvase Este-Oeste en el tramo Sagua-Mayarí, resultando un elemento continuador del proyecto que pretende aliviar, futuramente, los posibles efectos de la sequía en el oeste de Holguín Y Las Tunas (Hidraulicos, 2008).

El plazo de servicio según la tabla 9 propuesta por (Recio, 2010) es de (PI > 10 años o más).

### 3.3 Área y forma de la sección transversal del Tramo V.

Todos los tramos tienen la sección definida del túnel del tipo ovoidal de piso plano y hastial vertical, constituyendo una sección intermedia entre la circular (máxima eficiencia hidráulica) y la parabólica (sección que mejor distribuye el estado tensional del macizo). Sus dimensiones responden fundamentalmente a criterios de diseños hidráulicos y a facilidades constructivas para el acceso a los equipos de construcción. Presenta una base rectangular de 6,00 m de ancho y 0.84 m de hastial la sección superior está compuesta por dos radios de igual dimensiones a su base y unos arcos de cierre (techo del túnel) con un radio de 1.75 m como se muestra en la figura 9.

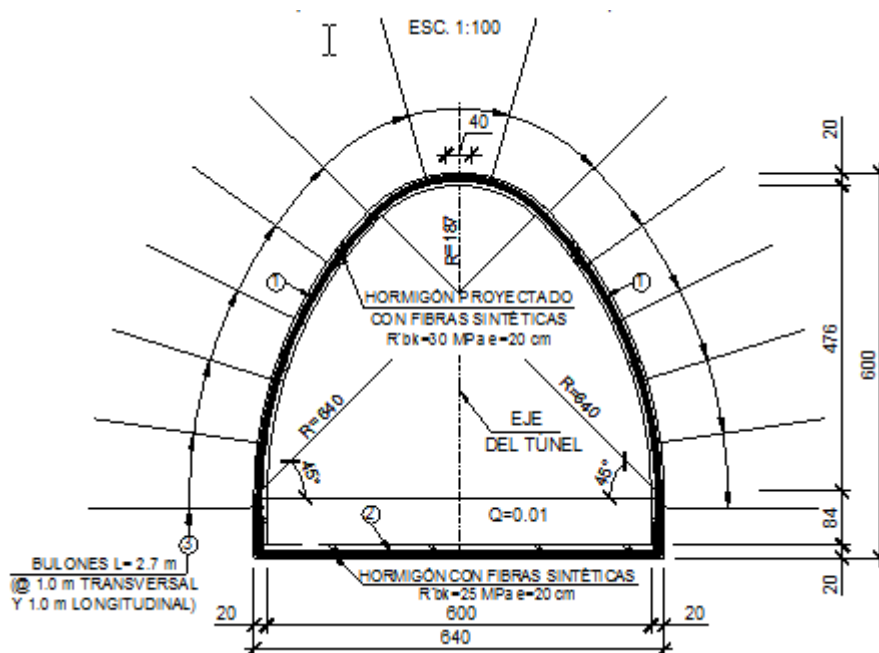


Figura 9. Que muestra la sección típica de sostenimiento (Hidraulicos, 2008).

### 3.4 Profundidad de ubicación.

Al igual que los tramos anteriores el tramo V del túnel Levisa-Mayarí se desarrolla en zonas montañosas de la parte norte oriental del país perteneciente al macizo montañoso cierra Cristal, caracterizada por una topografía cambiante y accidentada con pendientes acentuadas de laderas y grandes contrastes de las elevaciones que van desde un valor mínimo de 76.0 m hasta valores de 317.0 m como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Muestra la profundidad del tramo A, B, C, D.

Tramos	Profundidad (m)	Calidad del macizo (Q)	Losa de fondo del piso (m)	Categorías de sostenimiento.
A	288	0.1-1	66	8
B	250	0.1-1	66	7
C	302	0.01-0.1	66	8
D	285	0.01-0.10	65	8

### Longitud del tramo de estudio.

El túnel Levisa-Mayarí con una longitud aproximada de 17,0 Km. El cual ha sido dividido en cuatro tramos A, B, C, D de la tabla 6 correspondiendo estos en específico, al Tramo V con una longitud de 4920.0 m (Hidraulicos, 2008).

Tabla 6. Muestra las longitudes de cada tramo.

Tramos	Longitud (m)	Profundidad(m)
A	270	288
B	315	250
C	117	302

D	117	285
---	-----	-----

### **3.5 Características del agrietamiento.**

#### **Caracterización tectónica.**

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

#### **Espaciamiento entre grietas de una familia.**

Las grietas pueden aparecer espaciadas entre 25-70 cm, dando lugar a que se formen bloques pequeños y medianos (Hidraulicos, 2008).

### **3.6 Características hidrogeológicas.**

La precipitación anual en el túnel de forma general oscila entre valores de 1475 a 1517 mm según el Mapa de Lluvia media hiperanual 60 años de N. Fernández y O. Maximova, 1992 actualizado en el 2005. La vegetación presente en la zona es variada principalmente abundan los charrascales sobretodo en la zona donde la pendiente es más pronunciada. En algunas zonas se observan pinos y otras plantas. Los datos hidráulicos se muestran en la tabla 7 y en la figura 10 muestra el análisis hidráulico general del sistema desde presa Miguel hasta presa Mayarí realizado con el software (EPANET) por (Hidraulicos, 2008).

Datos Hidráulicos.

Tabla 7. Datos hidráulicos

Denominación	Valores
Gasto mínimo de conducción (m <sup>3</sup> /seg.)	30.00
Área de la sección hidráulica (m <sup>2</sup> )	26.74
Perímetro de la sección hidráulica (m)	19.86
Diámetro equivalente la sección hidráulica (m)	5.39
Coefficiente de rugosidad (n)	0.022
Velocidad (m/seg.)	1.32

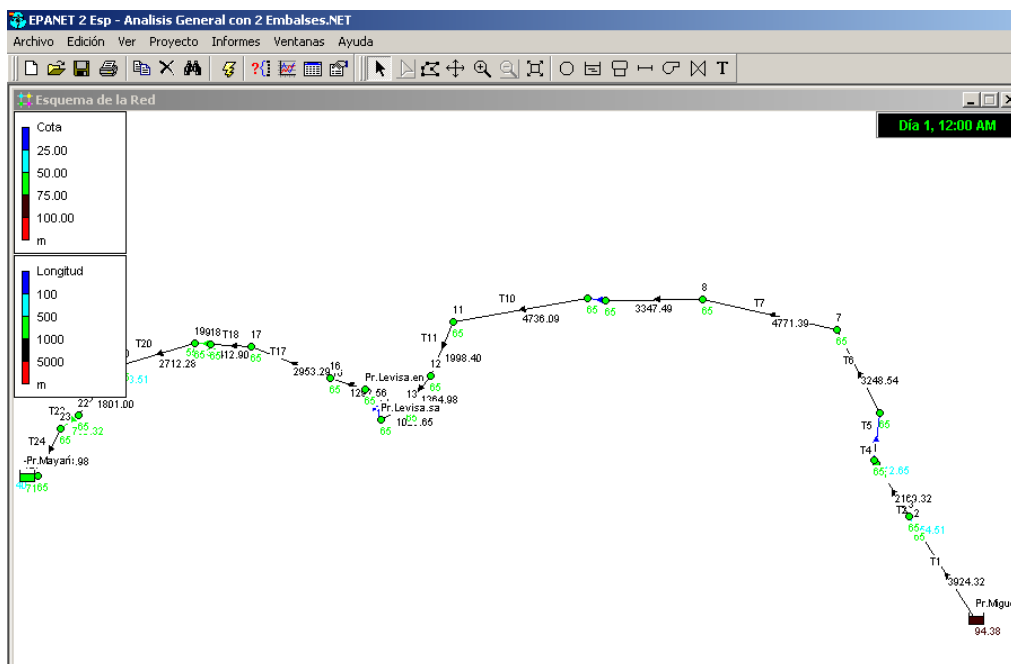


Figura 10. Muestra el análisis hidráulico general del sistema desde presa Miguel hasta presa Mayarí (Hidraulicos, 2008).

### Profundidad de ubicación del nivel del manto acuífero.

Antes de la ejecución del túnel el nivel del acuífero se encontraba por encima de la cota en toda su traza; luego del inicio de la excavación, éste descendió lo que se debió principalmente a la diferencia de presión que provocó el túnel y el intenso agrietamiento existente en las zonas, que favoreció el aumento de las filtraciones.

### El caudal que se espera.



Las rocas que forman parte del horizonte acuífero están representadas desde el punto de vista litológico por ocre y rocas duras, pedregosas, agrietadas, fracturadas: serpentinitas y peridotitas, fundamentalmente, que se comportan como colectoras de aguas provenientes de las precipitaciones atmosféricas. En este tipo de rocas predominan las aguas de grietas y filoneanas, con mayor desarrollo en la corteza de intemperismo y en zonas de fallas. Aunque hay que destacar que se conoce de estudios anteriores que las propiedades de infiltración de estas secuencias predominantes en el área son menores de 1m/d ( $1.157 \times 10^{-3}$  cm/s), estando estos entre 0.003 hasta 0.073 m/día ( $3.47 \times 10^{-6}$  a  $8.45 \times 10^{-5}$  cm/s) (Hidraulicos, 2008).

Las aguas se caracterizan por un PH desde débilmente básicas a básicas o alcalinas y de media mineralización (entre 0.2 y 1 g/l).

#### **Propiedades físico-mecánicas.**

Las rocas clasificadas como rocas medianamente duras a blandas, pueden estar medianamente meteorizadas predominando en profundidad las poco meteorizadas, poseen una resistencia a la compresión seca (20.03-49.50 Mpa) o saturada de (7.10-38.7 Mpa).

#### **Presencia de ríos arroyos o embalses.**

Dentro de las principales corrientes fluviales se destacan los ríos Mayarí y Levisa, así como los ríos La Ceiba, Arroyo Blanco y Cajimaya, estos últimos con influencia en el trazado del tramo en cuestión. Para los efectos de este proyecto y por ser una obra subterránea el fenómeno hidrológico de mayor importancia y valor práctico lo constituye los escurrimientos máximos principalmente del río Arroyo Blanco. En las cuales se hace necesaria ejecutar diques y canales de desvío de carácter temporal para garantizar su construcción.

#### **Método de excavación.**

El arranque se realiza con el método de perforación y voladura, lo que incrementará el agrietamiento en el contorno de la excavación, y como consecuencia, aumentarán las filtraciones que serán más intensas en zonas de fallas.

#### **Tipo de sostenimiento o fortificación propuesto.**

Según proyecto original se propone la combinación de anclas y hormigón lanzado reforzado con fibras metálicas como el sostenimiento seleccionado, a partir de la clasificación propuesta por Barton, el espesor propuesto es de 20 cm. en las zonas de fallas y 15 cm en el resto de la obra. En ningún caso se propone tratamiento diferenciado a las zonas afectadas por las filtraciones de agua.

### Calidad del macizo rocoso.

La calidad del macizo correspondiente a cada tramo se muestra en la tabla 8.

Tabla 8. Calidad del macizo rocoso en las zonas estudiadas

Tramos	Longitud (m)	Calidad del macizo	Descripción
A	270	25<RQD<50	Calidad mala
B	315	25<RQD<50	Calidad mala
C	117	25<RQD<50	Calidad mala
D	117	25<RQD<50	Calidad mala

Después de aplicar el procedimiento propuesto por (Recio., 2010) se resumen los elementos principales que incidieron en el proceso de selección de la técnica mostrados en la tabla 9.

Tabla 9. Resumen de los elementos principales que recoge la metodología e inciden en el proceso de selección de la técnica de inyección (Hidraulicos, 2008).

Tramos	Longitud (m)	Plazo de servicio y tipo de obra	Espaciamiento	Coefficiente de filtración	RQD) Calidad del macizo	Profundidad de la excavación (m)
A	270	(III)/PI > 10 años o más	25-70 cm	1m/d (1.157x 10 <sup>-3</sup> cm/s	25<RQD<50	288
B	315	(III)/PI > 10 años o más	25 - 70 cm	1m/d (1.157x 10 <sup>-3</sup> cm/s	25<RQD<50	250

C	117	(III)/PI > 10 años o más	25 - 70 cm	1m/d (1.157x 10 <sup>-3</sup> cm/s)	25<RQD<50	302
D	117	(III)/PI > 10 años o más	25 - 70 cm	1m/d (1.157x 10 <sup>-3</sup> cm/s)	25<RQD<50	285

### Selección de la técnica.

Estos tramos se ubican a más de 10 metros de profundidad y debido al coeficiente de permeabilidad y la calidad del macizo, se clasifican de categoría (K $\omega$ )=IV. A partir de estas características se propone las variantes 15, 16 que propone (Recio., 2010) para la utilización de la inyección.

[Variante 15] (II o IS)+Z+HL [N<sub>6</sub>, N<sub>7</sub>] (11)

[Variante 16] (II o IS)+Z+G+L+HLR [N<sub>6</sub>, N<sub>7</sub>] (12)

[N<sub>6</sub>]. Las inyecciones que se realizan con el doble propósito deben ser comprobadas.

[N<sub>7</sub>]. Después de realizar las inyecciones, se debe aplicar una capa de hormigón lanzado para proteger la superficie desnuda, evitar su deterioro, y disminuir la resistencia dinámica del interior de la excavación

### 3.7 Especificaciones técnicas para la ejecución de las inyecciones

La inyección se plantea realizar en una cimentación rocosa con el objetivo de mejorar su impermeabilidad y consolidar la roca mejorando su calidad. Se prevé el hormigonado de una losa de hormigón de 30.0 cm de espesor. Las inyecciones se propone hacerlas de abajo hacia arriba perforando la cala en toda su longitud. El tramo superior se ejecutará con las presiones que se especifican colocando un niple de tubo metálico con el diámetro requerido para obturar en la última etapa contra la losa de sobrecarga.

#### Máquinas para la ejecución de la inyección.

Máquina para la ejecución de la inyección tabla 11.



**Figura 11. Máquina perforadora (Pineda, 2011).**

Son relativamente pequeñas, auto-propulsadas con motores accionados por diesel o energía eléctrica, de potencia entre 135 a 185 caballos de fuerza equipadas con motores de rotación hidráulicos o neumáticos en su mástil.

Básicamente son máquinas que poseen las mismas características que aquellas que se utilizan en las obras de ejecución de micropilotes y anclajes, con capacidad de perforar hasta 40 metros, pero equipadas con controles y mecanismos capaces de garantizar una velocidad de giro y de ascenso de la cabeza de rotación cuando se está en el proceso de inyección de la lechada de agente cementante (Pineda, 2011).

#### **Planta de fabricación de fluidos.**

Estas plantas de fluidos, consisten en mecanismos de suministro y mezclado de forma controlada, automática y bastante precisa de los ingredientes que componen la mezcla. También cuentan con tanques de almacenamiento temporal equipados con palas agitadoras de alta turbulencia y de suficiente energía de batido.

El elevado caudal que las bombas son capaces de impulsar (un promedio de 20-25 m<sup>3</sup> /hora) hace necesario poseer pequeñas instalaciones de fabricación

de fluidos de perforación e inyección que sean capaces de suministrar estas cantidades con calidad suficiente, ya que se debe garantizar que la mezcla de inyección (generalmente de agua-cemento o bentonita-agua-cemento o con humo de sílice) sea completamente uniforme desde su fabricación hasta su inyección figura 12.



Figura 12. Mezcladora y tanque de almacenamiento (Pineda, 2011).

Antes de comenzar los trabajos de inyección será necesario realizar un tramo experimental donde se precisará la efectividad de la cortina de inyección. De acuerdo con los datos reales obtenidos el proyecto podrá ser modificado. El método recomendado de inyección es de abajo hacia arriba por zonas de 12.0 m de profundidad máxima con un margen de tiempo de 48 horas entre cada etapa. La etapa superior o de contacto se ejecuta mediante los niples especificados anteriormente. Se consideran siete filas de inyecciones separadas a dos metros con igual separación entre calas.

El aumento o disminución de las calas a inyectar será determinado por el proyectista de acuerdo a los resultados de las calas de control.

Perforación:

1. Se perforarán todas las calas con  $\varnothing$  132 mm.
2. Se encamisará hasta un metro dentro de la base rocosa con tubería  $\varnothing$ 108 mm.
3. Se perforará por el método de rotación con diámetros menores que la totalidad de la cala.

**Prueba hidráulica y absorción específica:**

En la ejecución de los trabajos de inyección deberá cumplirse con lo estipulado en la regulación de la construcción RC-3003 (Inyecciones de cemento de las bases rocosas en Obras Hidrotécnicas)

Las pruebas hidráulicas para la limpieza de las grietas y la determinación de la absorción se realizan en las calas ya preparadas para la inyección, estando lavada y controlada la profundidad de la etapa a cementar.

En caso de no lograrse la aplicación de la presión estipulada en la prueba, la inyección se realizará con la máxima presión posible, anotándose los gastos de agua y presiones con una duración total no menor de 15 minutos; hasta que las dos últimas mediciones del gasto sean prácticamente iguales.

**Presiones de inyecciones:**

La presión de la inyección será de dos atmósferas. La presión se controlará mediante dos manómetros, uno colocado en la embocadura de la cala y el segundo en la bomba de inyección.

En caso de producirse salida de lechada a la superficie durante la inyección, se taponará con cuñas si la misma es puntual. En caso de ocurrir salideros por una zona amplia, se densificará la lechada hasta sellar el salidero y luego se vuelve a la lechada inicial, de no sellarse se espera 24 horas, se perfora y se comienza de nuevo la inyección.

La figura 13 muestra la acción de la lechada de cemento en el macizo.

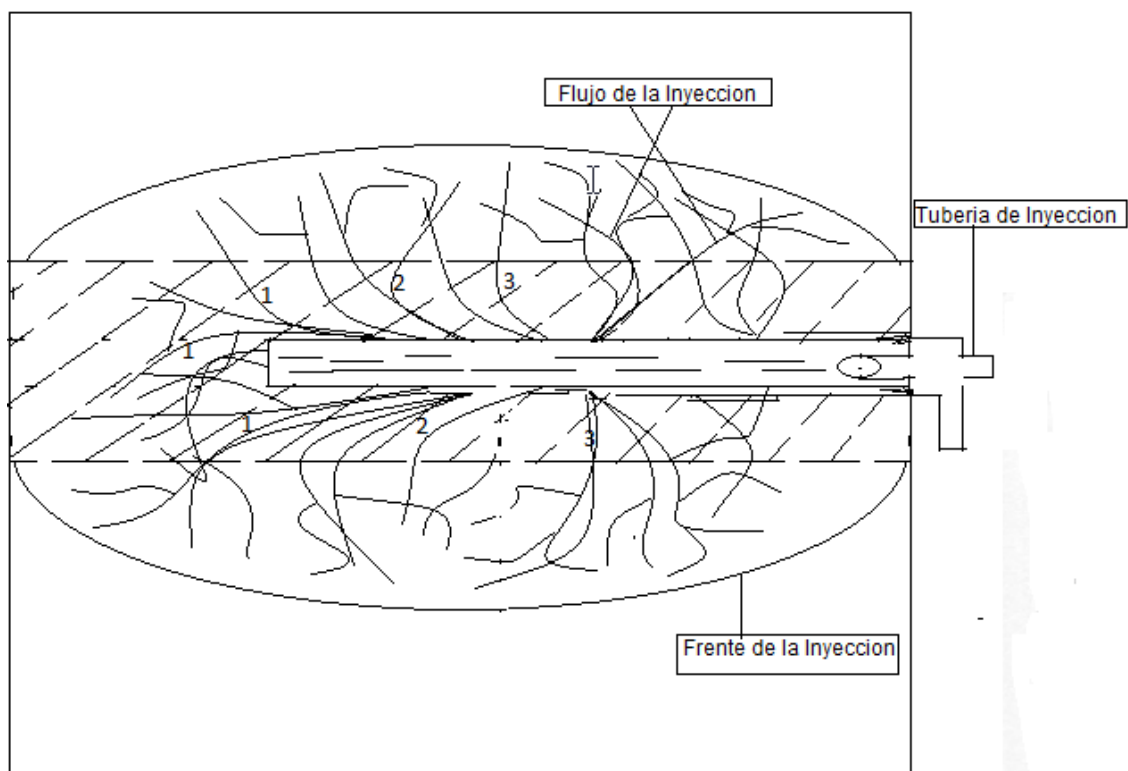


Figura 13. Muestra un corte longitudinal de la acción de la lechada de cemento.

#### **Ejecución de los trabajos de inyección:**

Antes de iniciar la inyección se deberá lavar la cala en la zona donde se va a inyectar, ejecutando posteriormente la prueba de inyección por el método de abajo hacia arriba. Las calas una vez perforadas no podrán permanecer más de 24 horas sin inyectar.

De ocurrir grandes absorciones, gastos de lechada con consistencias muy espesas (1:0.8–1:0.5) es necesario agregar arena a la lechada y la cantidad de arena debe aumentarse a un máximo posible, donde la arena debe pasarse por una malla de diámetro menor de dos milímetros.

Terminadas las inyecciones de la última etapa todos los pozos o calas se rellenarán con la misma lechada con que termina la última etapa como muestra la tabla 10.

Tabla 10. Muestra la relación en la composición de cada tipo de lechada (RAUDAL, 2008)

Tipo de lechada	Relación agua/cemento	Cantidad de cemento ( Kg)	Cantidad de agua (L)
A	1:12	12.5	150

B	1:9	17.0	150
C	1:6	25.0	150
D	1:4	37.5	150
E	1:3	50.0	150
F	1:2	75.0	150
G	1:1.5	100	150
H	1:1	150	150
I	1:0.7	200	150
J	1:0.5	300	150
A	1:12	12.5	150

La lechada se estimará según los resultados obtenidos en la prueba hidráulica de acuerdo a los siguientes índices de la tabla 11.

Tabla 11. Resultados de la prueba hidráulica (RAUDAL, 2008)

Gasto de agua (l/min/m)	Composición de la lechada	Tipo de lechada
menos de 10	1:12	A
10 - 20	1:9	B
20 - 30	1:6	C
30 - 50	1:4	D
50 - 80	1:3	E
80 - 100	1:1	H
más de 100	1:0.5	J

Se considera satisfactorio el trabajo de inyección si en las calas de control se comprueba que la absorción específica  $q < 0.05 \text{ l/mín}$ .

Control de los trabajos de inyección:

1. Cumplimiento con lo establecido en la RC – 3003.
2. Control sistemático.
3. Medición sistemática de los gastos de filtración por medio de vertedores de control.
4. Gráfico de los volúmenes de inyección contra tiempo.
5. Perfil por las calas inyectadas por zona con fecha de inyección de cada una.
6. Análisis global de los resultados.



La prueba hidráulica de las calas de control se realizará por etapas ascendentes igual a las empleadas en la inyección siendo la presión la misma empleada durante las inyecciones de lechada.

#### **Calas de control.**

- Estas calas serán ubicadas durante la ejecución de los trabajos.
- La prueba hidráulica se realizará por zona igual que la inyección.
- Las presiones serán iguales a las utilizadas durante la inyección.
- Después de haber realizado la cala de control con prueba hidráulica, se inyectará y se sellará la cala.

Se recomienda que los trabajos de inyección sean ejecutados por una empresa especializada en estos tipos de trabajos.

### **3.8 Impactos ambientales identificados y protección del trabajo.**

Durante las distintas etapas de construcción de este túnel se generan básicamente impactos de transformación de áreas, es decir, se modifican aspectos morfológicos del relieve, estructura y conformación de las capas subterráneas, distribución de flora y fauna y calidad del aire principalmente. En la construcción los impactos ambientales serán consecuencia de la ocupación de las áreas previamente preparadas, es decir, se implantarán obras de ingeniería civil que determinarán un cambio definitivo en los atributos naturales y del ambiente previo al proyecto.

Estas áreas afectadas (de propiedad estatal) están compuestas principalmente por malezas y vegetación características de charrascales de zonas montañosas ocupando una extensión de 25 ha aproximadamente. Los suelos según el Decreto 179 protección, uso y conservación de los suelos en sus artículos 14 al 18 clasifican desde el punto de vista agro productivo como tipo IV (suelo muy poco productivo) destacando además las regulaciones para proteger el mismo, tarea de obligatorio cumplimiento.

De manera más particular y en relación con los elementos ambientales más afectados, destacan los siguientes impactos:

La calidad de las aguas puede verse afectada durante las etapas de construcción y operación. En la primera, los principales parámetros que pueden modificarse son los sólidos disueltos y en suspensión (debido a los movimientos de tierra) así como las grasas e hidrocarburos (por vertidos accidentales en las zonas de almacenamiento y maquinaria pesada). Durante la etapa de operación los principales contaminantes (esta cuantía debe ser mínima) son los derivados de la deposición de las emisiones atmosféricas, principalmente partículas y los de conservación del revestimiento del túnel, que incluye materiales tóxicos; también en esta fase se pueden presentar vertidos ocasionales en los accidentes y derrames de aceites y grasas. El arrastre de todas las sustancias por las aguas de escorrentías va a parar a los distintos cursos fluviales pudiendo ocasionar cambios en la calidad del agua.

En la mayor parte de los estudios revisados se adjudica a las excavaciones y revestimientos la pérdida de las propiedades permeables del terreno, lo que trae como consecuencia el abatimiento del nivel freático. Otras acciones implican además la interrupción y/o la desviación temporal de los cauces, ocasionados por el movimiento de materiales y por el emplazamiento de maquinarias y equipos.

Se identifica los impactos ambientales que pueden ser generados en la siguiente tabla 12.

Tabla 12. Muestra los impactos ambientales

IMPACTOS	IMPORTANCIA RELATIVA
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Hidrología subterránea, superficie afectada.</li> <li>2. Vegetación, impacto visual, ruido</li> <li>3. Afección a construcciones e instalaciones, residuos sólidos y líquidos.</li> <li>4. Vibraciones y humos.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Poco importante</li> <li>2. Poco Importante</li> <li>3. Poco importante</li> <li>4. No significativo</li> </ol>

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

- Suelo
- Fauna
- Vegetación
- Hidrología
- Atmósfera
- Paisaje
- Geología
- Población

### **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 higiénicos – sanitarios del frente de trabajo.
- Los obreros que están expuesto al ruido deben utilizar las orejeras.
- Se prohíbe entrar con alimentos o fumar dentro de la obra.
- Velar por la higiene del trabajo.
- Cumplir con la dosificación indicada por el fabricante, que es de un 3 % – 8 % del volumen del cemento. Una sobredosis puede causar incremento de la reducción de la resistencia final.
- Debido a que este producto contiene componentes que pueden causar irritación, el trabajador debe de evitar el contacto con los ojos y contacto prolongado con la piel, esto será posible utilizando la ropa adecuada, guantes, gafas u otro tipo de dispositivo que protejan a los ojos.

- Evitar la contaminación del aire con humo, polvo, etc., y del medio circundante con ruidos excesivos o innecesarios, especialmente en zonas urbanas
- Cumplir estrictamente con lo dispuesto en el proyecto.
- Garantizar la salud individual y colectiva mediante el cumplimiento de las disposiciones sanitarias vigentes, con especial cuidado en el almacenamiento de alimentos y otros productos para el uso y consumo de las personas.

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.

## **Conclusiones**

1. Se identificaron las características geológicas, litológicas y geomecánicas de las secciones A, B, C, D del Túnel Levisa-Mayarí Tramo V Trasvase Este-Oeste y se determinaron los factores que influyen en la estabilidad del conjunto macizo-excavación y en el empleo de las fortificaciones.

2. Se identificaron los Tramos A, B, C, D como los que poseen menor calidad, con una calidad mala a extremadamente mala según el índice de calidad de (Nick. Barton, Lien, & Lunde, 1974) y la evaluación de (Recio, 2010) con categoría de (IV-V) con el fin de aplicar el procedimiento propuesto por (Recio, 2010) para elegir la técnica de control de las filtraciones que afectan las excavaciones subterráneas desarrolladas en macizos rocosos fuertes poco porosos y agrietados, tomando en consideración la correlación existente entre la calidad de los macizos fuertes y su permeabilidad
3. Al aplicar el procedimiento propuesto por (Recio, 2010) en los tramos A, B, C, D del Túnel Levisa-Mayarí Tramo V Tránsito Este-Oeste donde el índice de calidad es de 0.001-1 según (Nick. Barton, Lien, & Lunde, 1974) se obtiene que las variantes más efectivas para el fortalecimiento del macizo son las 15 y 16 del paso 18 pertenecientes al bloque IV las cuales proponen la inyectabilidad con dos propósitos; fortalecimiento y control del agua para dichos tramos como una alternativa para elevar la calidad de las construcciones.

Se propuso un sistema de medidas para mitigar y prevenir el impacto producido al medio ambiente.

## **Recomendaciones**

1. Realizar un análisis de costo beneficio para los sectores A, B, C, D del Túnel Levisa-Mayarí Tramo V Tránsito Este-Oeste para utilizar la

técnica de inyección cuya calidad no permite utilizar las del bulonado ni el tratamiento con paraguas.

2. Realizar un análisis geomecánico de los tramos A, B, C, D con el fin de evaluar las tensiones antes de utilizar la inyección en el túnel
3. Que el trabajo sea entregado la empresa de construcciones militares, para su implementación

## **Bibliografía**

1. anclajes.com.ar. (2019). Fornis 16 anclajes con placas metalicas

2. Barton, N., & Grimstad, E. (2000). *El sistema Q para la selección del Sostentamiento en el método noruego de Excavación de túneles*. Madrid España: Entorno Grafico, S.L.
3. Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974). Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. *Rock Mechanics*, 6(4), 183-236.
4. Bieniawski, Z. T. (1973). *The Science of Rock Mechanics*. 1. The Strength Properties of Rock - W. Dreyer. Trans Tech Publications, Bay Village. *Engineering Geology*, 7(1), 74-75.
5. Bieniawski, Z. T., & Bernede, M. J. (1979). Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials - Part 1. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 16(2), 138-140.
6. Cala, A. T. (2018a). *EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DEL TÚNEL LEVISA – MAYARÍ, CONEXIÓN III – IV, TRAMO V Y PROPUESTA DE SOSTENIMIENTO*. INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA “DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”.
7. Cala, A. T. (2018b). *EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DEL TÚNEL LEVISA – MAYARÍ, CONEXIÓN III – IV, TRAMO V Y PROPUESTA DE SOSTENIMIENTO*. (Diploma), ISMM Doct. Antonio Nuñez Jimenez
8. Cala, A. T. (2018c). *EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DEL TÚNEL LEVISA –MAYARÍ, CONEXIÓN III – IV, TRAMO V Y PROPUESTA DE SOSTENIMIENTO*. INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA “DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”.
9. Chalco, J. P. S., & Andrade, D. E. R. (2013). *PROPUESTA DEL SISTEMA DE FORTIFICACION QUE SE DEBE EMPLEAR A LO LARGO DE LA VETA F-10 DE LA MINA SUBTERRANEA LIGA DE ORO DE LA EMPRESA MINERA SOMILOR S.A.* UNIVERSIDAD DE CUENCA.
10. Gavilanes, H., & Andrade, B. (2004). *Introducción a la ingeniería de túneles caracterización, clasificación y análisis geomecánico de macizos rocosas*. Quito, Ecuador: AIME.
11. González\_de\_Vallejo., L., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid.

12. Hidraulicos, I. y. P. (2008). Memoria Tramo V.
13. Holguín., E. d. I. y. P. H. (2007). Memoria Tramo V (D. d. Geología, Trans.) (pp. 22): UNION DE CONSTRUCCIONES MILITARES.
14. <http://www.pdf4free.com>. Proceso constructivo para Inyecciones en macizos rocosos (Vol. v 2, pp. 12).
15. Lauffer., H. (1958). Gebirgsklassifizierung für den Stollenbau. *Geol. Bauwesen*, 24(1), 46-51.
16. López-Jiméno, C., De-Vallejo, L. G., Ruiz, M. R., & Capuzano, A. G. (1997). *Manual de túneles y obras subterráneas* (Vol. I). Madrid España: Entorno Gráfico, S.L.
17. López-Jiméno., C., Ruiz, M. R., Capuzano, A. G., González, R. F., Hoek, E., Palmstrom, A., . . . Rivas, J. (2004). *Ingeo Túnel* (3<sup>ra</sup> ed. Vol. I). Madrid España: Entorno Grafico, S.L.
18. Palmström, A. (1982). *The volumetric joint conut - a useful and simple measure of degree of rock mass jointing*. Paper presented at the IV Congress International Association Of Engineering Geology New Delhi, New Delhi
19. Pineda, H. A. O. (2011). *INYECCIÓN DE SUELO POR MEDIO DE LA TÉCNICA DE JET GROUTING*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
20. RAUDAL, I. Y. P. (2008). *Memoria Tramo V*.
21. Recio, M. A. F. C. (2010). *PROCEDIMIENTO PARA ELEGIR LA TÉCNICA DE CONTROL DE LAS FILTRACIONES QUE AFECTAN LAS EXCAVACIONES SUBTERRÁNEAS EN MACIZOS ROCOSOS POCO POROSOS Y AGRIETADOS*. INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO "Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ".
22. Recio., A. F. C. (2010). *PROCEDIMIENTO PARA ELEGIR LA TÉCNICA DE CONTROL DE LAS FILTRACIONES QUE AFECTAN LAS EXCAVACIONES SUBTERRÁNEAS EN MACIZOS ROCOSOS POCO POROSOS Y AGRIETADOS*. INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO "Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ" FACULTAD DE GEOLOGÍA Y MINERÍA.
23. Ruiz, A. L. (2006). *MEJORA GEOTECNICA DEL SUELO\** (Vol. 1).



24. SALGADO, M. A. C. (2014). *ESTUDIOS DE MESCLAS DE INYECCIÓN INCORPORANDO AL CEMENTO MATERIALES COMO CANGAHUA, BENTONITA, CRUDO DE CALIZA-ARCILLA O ADITIVOS PARA ESTABILIZACIÓN Y MEJORAMIENTO DE SUELOS*. ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL.
25. Suárez, I. R. (2015a). *Evaluación de la estabilidad y propuesta de sostenimiento para el túnel Levisa-Mayarí Tramo IV*. Instituto Superior Minero Metalurgico de Moa.
26. Suárez, I. R. (2015b). *Evaluación de la estabilidad y propuesta de sostenimiento para el túnel Levisa-Mayarí Tramo IV*. Instituto Superior Minero Metalurgico de Moa DR. Antonio Nuñez Jiménez.
27. *Tratamientos del terreno*. (2012).

## Anexos

### E 13. Clasificación de las rocas por RQD (Palmström, 1982)

Clasificación de las rocas por RQD	Valores de RQD en % Calidad de la Roca
0 a 25	Muy mala
De 25 a 50	Mala
De 50 a 75	Media
De 75 a 90	Buena
De 90 a 100	Muy Buena

### E 14. Clasificación de las rocas en cinco categorías diferentes (RMR)

(Bieniawski & Bernede, 1979)

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

### E 15. Parámetros de clasificación y sus rangos, según Bienawski (1979)

(Bieniawski & Bernede, 1979)

Resistencia de las rocas sana (MPa)	Ensayo capa puntual	> 10	4-10	2-4	1-2	-
Resistencia. (MPa)	Compresión simple	> 250	100-250	50-100	25-50	5-25 1-5 <1
Valoración		12	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	Ligeramente	Ligeramente	Rellenos	Rellen
Estado de diaclasas		Rugosas discontinuas borde sano y duro.	rugosas e <1 mm borde duro.	rugosas e < 1 mm borde blando.	e <5 mm abiertas y continuas.	blando se <5 mm continuas
Valoración		30	25	20	10	0
Presencia de Agua	Caudal en 10mtúnel	Nulo	<10 l/min.	10-25 l/min.	25-125 l/min.	>125 l/min.
Presencia de Agua	$\sigma W / \sigma 3$	0	0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5
Presencia de Agua	Estado	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Fluyendo
Valoración		15	10	7	4	0

E 16.Cargas para dimensionar el sostenimiento (Trezaghi) 1946 tomado (Cala, 2018c).

Clase	Terreno	Tipo de terreno	Carga de la roca Hr (m)Inicial	Carga de la roca Hr (m) Final	Observaciones
1	Roca	Dura y sana	-	-	Revestimiento solo si hay caída de bloques
2	Roca	Dura. Estratificada o esquistosa.	-	0 a 0,5 B	Caída de bloques probable. Empuje lateral si hay estratos inclinados.
3	Roca	Masiva. Moderadamente diaclasada	-	0 a 0,25 B	Necesita Entibación rápida. Empuje lateral pequeño.
4	Roca	Moderadamente fracturada. Bloques y lajas.	-	0,25 a 0,35 (B+H)	Entibación inmediata Empuje lateral pequeño
5	Roca	Muy fracturada	-	0,35 a 1,1 (B+H)	Entibación continúa. Empuje Lateral considerable.

6	Roca	Completamente fracturada pero sin meteorizar	0 a 0,6(B+H)	1,1(B+H)	Los valores más Altos corresponden a grandes deformaciones que aflojan el terreno
6´	Grava o arena	Densa	0,62a1,38 (B+H)	1,08 a 1,38 (B+H)	Empuje lateral. Ph = 3,0 y (Hr Ho, 5H)
6´´	Grava o arena	Suelta	0,54 a 1,2(B+H)	-	Fuerte empuje lateral.
7	Suelo cohesivo	Profundidad moderada	0,94a1,2 (B+H)	1,1 a 2,1 (B+H)	Entibación continua con cierre en la base
8	Suelo cohesivo	Profundidad grande	-	2,1 a 4,5 (B+H)	Entibación continua y circular (y deformable en casos extremos)
9	Suelo o roca Expansivos	Expansivo	-	Hasta 80 m. Sea cual sea (B+H)	

E 17. Calidad del macizo según el coeficiente de fortaleza Protodiakonov.

<b>Categoría</b>	<b>Descripción</b>	<b>"f"</b>
Excepcional	Cuarcita, Basalto y Rocas de Resistencia Excepcional.	20
Alta Resistencia	Granito, Areniscas silíceas y Calizas muy Competentes.	15-20
Resistencia Resistencia Media	Calizas, Granito algo alterado y Areniscas. Areniscas Medias y Pizarras. Lutitas, Areniscas Flojas y Conglomerados Friables. Lutitas, Esquistos y Margas Compactas.	8-6 5 4 3
Resistencia Baja	Calizas, Lutitas Blandas, Margas, Areniscas Friables, Gravas y Bolos Cementados: Lutitas Fisuradas y rotas, Gravas Compactas y Arcillas Preconsolidas.	2 1.5

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

E 18. Clasificación de Lauffer (Lauffer., 1958).

<b>Tipo de roca</b>	<b>Longitud libre</b>	<b>Tiempo Estabilidad</b>	<b>Descripción</b>
A	4 m	20 años	Sana
B	4 m	6 meses	Algo fracturada
C	3 m	1 semana	Fracturada
D	1,5 m	5 horas	Friable
E	0,8 m	20 minutos	Friable
F	0,4 m	2 minutos	De empuje inmediato
G	0,15 m	10 segundos	De empuje inmediato fuerte

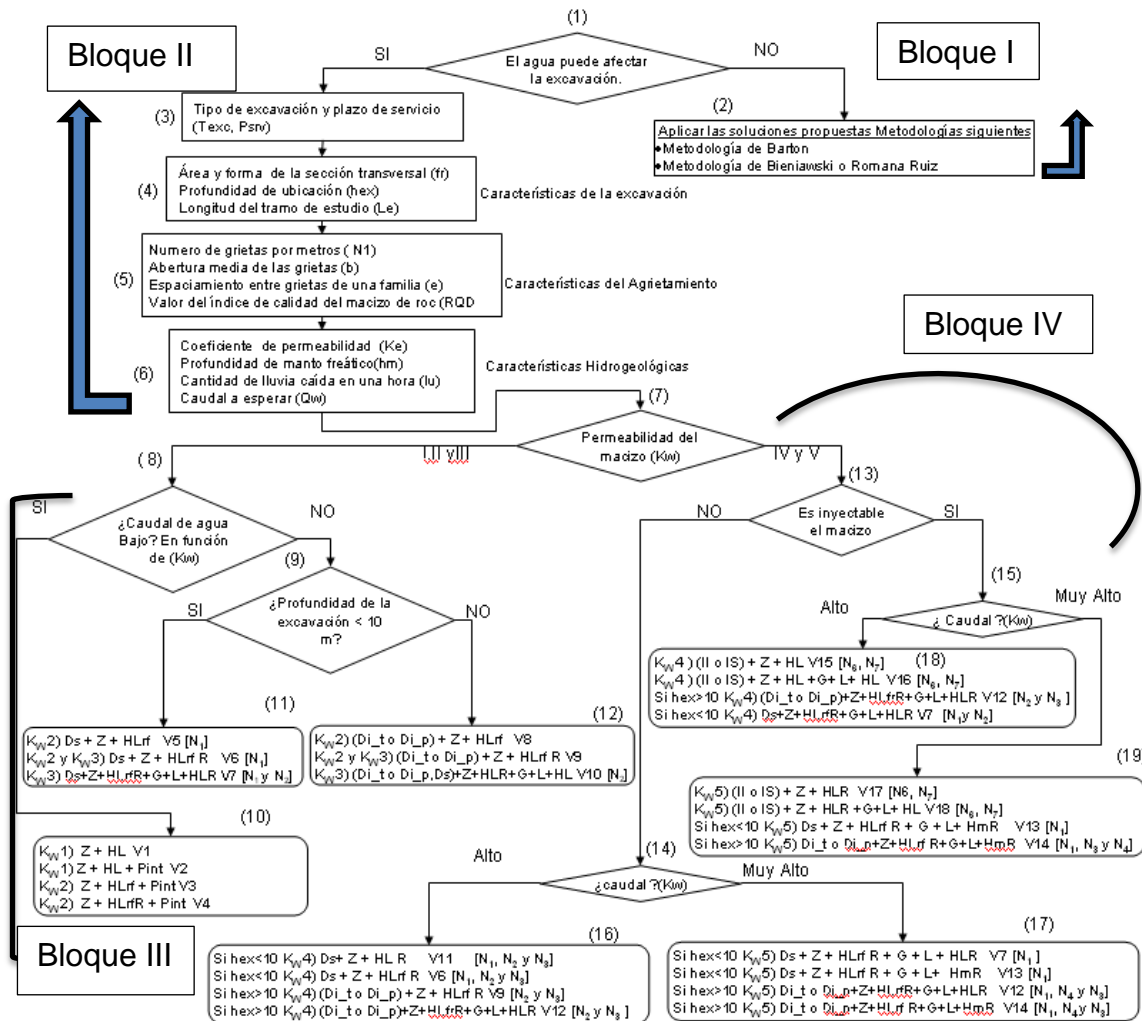


Figura 14. Algoritmo para la selección de la técnica adecuada de control de las filtraciones (Recio., 2010).

E 19. Denominación de las técnicas y parámetros utilizados en el algoritmo (Recio., 2010).

Técnicas a utilizar	Denominación
Nomenclatura	Denominación
Ds	Drenaje desde la superficie bajo la que yace la excavación
Di_t	Drenaje desde el interior para uso temporal.
Di_p	Drenaje desde el interior para uso permanente
G	Geotextiles.
hex	Profundidad de ubicación de la excavación respecto a la superficie.
HL	Hormigón lanzado ordinario
HLR	Hormigón lanzado reforzado

HLrf	Hormigón lanzado con aditivo de rápido fraguado.
HLrf R	Hormigón lanzado con aditivo de rápido fraguado y reforzado.
HmR	Hormigón monolítico reforzado.
II	Inyección desde el interior.
Is	Inyección desde la superficie
Pint	Pintura impermeabilizadora.
V1	Variante.
N1	Notas o consideraciones de la variante a aplicar
C1	Categoría según la permeabilidad y la calidad del macizo determinado a partir de la correlación entre ambos aspectos.
Notas (Ni)	
N1	Cuando se presenta una situación similar en excavaciones horizontales con salida directa a la superficie (socavones), resulta más racional drenar el manto desde el interior de la excavación, posibilidad que siempre se debe analizar.
N2	Si se cuenta con la técnica para aplicar hormigón in situ con paneles deslizantes se puede sustituir el hormigón lanzado reforzado, con lo que se disminuye la productividad pero se aumenta la densidad del hormigón, se humaniza el trabajo, y aumenta la calidad de la terminación
N3	La utilización del drenaje desde la superficie debe ser temporal, no se excluye la posibilidad del empleo del drenaje desde el interior de la excavación siempre que no afecta la calidad del trabajo. Con la utilización del drenaje desde el interior, la afectación al medio ambiente es menor.
N4	Analizar la posibilidad de implementar el método Oberhasli o similar.
N6	Las inyecciones que se realizan con el doble propósito deben ser comprobadas.
N7	Después de realizar las inyecciones, se debe aplicar una capa de hormigón lanzado para proteger

	la superficie denudada, evitar su deterioro, y disminuir la resistencia dinámica del interior de la excavación
--	--