



**INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA**

**“Dr. ANTONIO NUÑEZ JIMENEZ”**

**FACULTAD DE GEOLOGÍA Y MINERÍA**

**DEPARTAMENTO DE MINERÍA**

Trabajo de diploma presentada en opción al Título de Ingeniero de Mina

**Propuesta de mejoras tecnológicas para aumentar la eficiencia en la construcción del túnel Levisa-Mayarí Tramo IV**

**Autor: Lisandra López Almira**

**Moa, 2017**

**“Año 59 de la Revolución”**



**INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA**

**“Dr. ANTONIO NUÑEZ JIMENEZ”**

**FACULTAD DE GEOLOGÍA Y MINERÍA**

**DEPARTAMENTO DE MINERÍA**

Trabajo de diploma presentada en opción al Título de Ingeniero de Mina

**Propuesta de mejoras tecnológicas para aumentar la eficiencia en la construcción del túnel Levisa-Mayarí Tramo IV**

**Autor: Lisandra López Almira**

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

**MSc. Yurisdell Velázquez La O**

**Moa, 2017**

**“Año 59 de la Revolución”**

## *Pensamiento*

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

*Fidel Castro Ruz.*



# *Agradecimientos*

- *Agradecer a Dios por darme las fuerzas, los deseos y la sabiduría para continuar con este camino.*
- *Agradecer a la Revolución Cubana.*
- *Agradecer a nuestro eterno Comandante Fidel Castro Ruz por su empeño en lograr una educación para los niños y jóvenes.*
- *Agradecer a mis padres, y a mi novio por estar conmigo en todo momento, y darme su apoyo ilimitado.*
- *Agradecer al resto de mi familia y vecinos por alentarme siempre a continuar con este sueño.*
- *Agradecer a todos mis compañeros de aula.*
- *Agradecer a mis amigas del cuarto, por formar una familia en este período de vida que compartimos juntos.*
- *Agradecer a todas aquellas personas que de una forma u otra me han apoyado en todo momento.*
- *Agradecer a todos mis profesores por trasmitirme los conocimientos, sin ellos no habría podido lograr mis sueños.*

- *Agradecer a mis tutores el DrC Armando Cuesta Recio, y el Mcs Yurisdel Velázquez La O por brindarme su tiempo y sus conocimientos.*
- *Agradecer al DrC José Otaño Noguel, al Ing. Víctor Amaro y al Ing. Héctor Esparraguera por tener siempre una respuesta a mis preguntas.*
- *Agradecer a todo el personal de la empresa de Construcción de Obras Hidráulicas (UCM).*
- *Agradecer al Ing. Yordan Gómez Turro por su ayuda y apoyo incondicional en todo momento.*
- *Agradecer a Yadier y a Juan por ser tan pacientes conmigo.*

# *Dedicatoria*

- *A mis padres Sonia Almira Leyva y Alejandro López Gómez por desear este triunfo tanto como yo.*
- *A mi hermana, Maite López Almira, para que sepa que podemos lograr nuestras metas.*
- *A mis abuelos Zoila, Julio e Isaías por quererme tanto.*
- *A mis abuelos Verónica y Toñito, que aunque ya no están conmigo siempre me inculcaron a seguir estudiando.*
- *A mi novio Osmany Lozano La O por esperarme tantos años.*

## Resumen

En el presente trabajo, "Propuestas de mejoras tecnológicas para aumentar la eficiencia en la construcción del túnel del trasvase Este Oeste Tramo IV", se realizó una caracterización de la zona objeto de estudio, además se demuestra donde está ubicado el túnel geográficamente, se caracteriza el tipo de rocas presentes en la región, el clima, la vegetación, la orografía, y las características hidrográficas e hidrogeológicas de la zona.

Se efectuó una evaluación de los procesos tecnológicos durante la construcción del túnel Tramo IV Conexión II a Conexión IIIB del trasvase Este Oeste. En el mismo se efectuó un estudio del ciclo de trabajo, se representó gráficamente la comparación entre el tiempo planificado y real, se realizó además un estudio para conocer como se ve reflejado el aumento de los costos para un metro de avance en la excavación con respecto a lo proyectado, todo esto trajo como resultado que se identificaran a los procesos de excavación y sostenimiento como los que mayor incidencia negativa ejercen en la calidad de los procesos tecnológicos y a raíz de eso se proponen 4 medidas para mejorar la eficiencia en la construcción del túnel Tramo IV dentro de las que sobresale *“Actualizar en tiempo real las características litoestructurales y las propiedades físico-mecánicas en los frentes de laboreo, por su influencia sobre los pasaportes de voladura y sostenimiento”*.

## *Abstract*

In the present work, "Proposals of technological improvements to increase the efficiency in the construction of the tunnel of the East West Tranche IV transfer", a characterization of the area under study was carried out, in addition it is demonstrated where the tunnel is located geographically, it is characterized The type of rocks present in the region, climate, vegetation, orography, and the hydrographic and hydrogeological characteristics of the area.

An evaluation of the technological processes during the construction of the tunnel Section IV Connection II a Connection IIIB of the east West transfer. In the same one was made a study of the cycle of work, graphically represented the comparison between the planned and actual time, a study was also made to know how it is reflected the increase of the costs for a meter of advance in the excavation with respect To the projected, all this resulted in the identification of excavation and maintenance processes as the ones that have the greatest negative impact on the quality of the technological processes, and as a result, 4 measures are proposed to improve efficiency in the construction of the tunnel Section IV within which it highlights "Real-time updating of lithostructural characteristics and physical-mechanical properties in the fronts of tillage, by its influence on passports of blasting and support."

## INDICE

INTRODUCCIÓN .....	1
CAPITULO I. ESTADO ACTUAL DE LA TEMÁTICA .....	4
1.1. Marco teórico conceptual .....	4
1.2. Estado actual de la temática en el mundo.....	7
1.3. Situación actual de la temática en Cuba .....	12
CAPITULO II. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA REGIÓN.....	16
2.1. Ubicación geográfica.....	16
2.2. Características constructivas generales del proyecto .....	16
2.3. Geología regional y local.....	20
2.4. Características ambientales del área de estudio.....	22
CAPITULO III: EVALUACIÓN DE LOS PROCESOS TECNOLÓGICOS DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES EN EL TRANSVASE ESTE OESTE .....	26
3.1. Caracterización de la zona objeto de estudio.....	26
3.2. Procesos Tecnológicos que se ejecutan durante la construcción .....	28
3.2.1. Ciclograma de trabajo.....	32
3.3. Aspectos que inciden negativamente en la eficiencia de los procesos tecnológicos .....	35
3.4. Medidas para mejorar la efectividad y la eficiencia en los procesos tecnológicos .....	45
CONCLUSIONES.....	47
BIBLIOGRAFÍA .....	49
ANEXOS .....	52



## **INTRODUCCIÓN**

El Trasvase Este-Oeste, es una de las obras más importantes de la ingeniería cubana del siglo XX, iniciada en los años 90, este se construye por la necesidad que existe de llevar el agua de los ríos que nacen en el macizo montañoso de Nipe-Sagua-Baracoa a las fértiles llanuras del norte de Holguín, Las Tunas, noreste de Camagüey y el norte y centro del Valle del Cauto. El Trasvase es un conjunto de obras que está formado por presas, canales, conductoras y otros objetos de construcción dentro de los que se encuentran más de 80 Km. de túneles.

Los primeros trabajos realizados en Mayarí, Holguín, fueron paralizados por la difícil situación que impuso el Período Especial a finales de los años 90 del siglo pasado. Estas obras sufrieron daños debido al paso del tiempo, falta de preservación y el abandono de las mismas; otros aspectos que afectaron sensiblemente a las obras, fueron las crecidas de los ríos y arroyos de la zona.

Aproximadamente en el año 2005, nuestro país sufrió una severa y prolongada sequía con grandes pérdidas para las provincias orientales y Camagüey, debido a la crisis ambiental y económica se produjeron daños en la ganadería, agricultura, entre otros, además del devastecimiento de agua a la población. Por estos motivos la máxima dirección del país orientó reiniciar el plan estratégico de las obras del Trasvase Este-Oeste, que será la garantía para que los lugares más afectados puedan disponer de agua, bajo cualquier circunstancia.

Las obras se reiniciaron en el año 2005 y el proceso de diseño y actualización de las mismas fueron llevadas a cabo por las empresas del Ministerio de la Construcción, el Instituto Nacional de Recursos Hidráulico y la Dirección de Construcciones Militares, durante todo el proceso constructivo no se han alcanzado los resultados deseados en la construcción y se ha incumplido con el plazo de entrega de las obras, estas afectaciones se deben entre otras causas al insuficiente estudio realizado del macizo rocoso en el que se construye; a la incorrecta implementación de los diferentes métodos para el estudio del comportamiento del macizo como son las clasificaciones geomecánicas empíricas propuestas por Barton, Bieniawski o GSI de los cuales



depende la eficiencia y eficacia de otros procesos tecnológicos; se realizan generalizaciones tecnológicas (pasaporte de perforación y voladura) sin tomar en consideración los resultados obtenidos a través de las clasificaciones geomecánicas, ni se realizan reajuste de los mismos tomando en cuenta las características del macizo o del proceso tecnológico. Como consecuencia de lo anterior se producen derrumbes de diferentes magnitudes, inundaciones de agua parciales o totales de los túneles, entre otros efectos negativos, todo esto conlleva a una baja eficiencia del proceso de construcción de túnel, que se refleja además en un aumento de: el tiempo de perforación y voladura, plazo de la ventilación, el periodo dedicado al escombreo, gastos por concepto de revestimiento y fortificación; todo esto trae como resultado un incremento exagerado en el costo de 1m de túnel.

Sintetizando la situación de los túneles del trasvase se puede decir que a causa del insuficiente estudio en los frentes de trabajo, los túneles quedan sobre excavados después de los trabajo de voladuras, se incrementan los volúmenes a escombrar y como consecuencia aumenta el tiempo dedicado a la carga y transporte, los volúmenes de fortificación, el tiempo para evacuar los gases de la explosión aumenta y otros procesos tecnológicos son afectados por problemas técnicos y organizativos, todo esto afecta la eficiencia del proceso constructivo del túnel Levisa Mayará Tramo IV. Por lo que se hace necesario realizar un estudio profundo para identificar los aspectos que mayor incidencia tienen en la calidad del proceso constructivo y proponer medidas tecnológicas que aseguren que exista correspondencia entre el funcionamiento de los procesos tecnológicos planificado y real en cuanto a tiempo y costo.

Teniendo en cuenta lo anteriormente planteado, se identifica como **problema** a resolver: La necesidad de implementar mejoras tecnológicas para aumentar la eficiencia de los procesos de construcción en el túnel Levisa Mayará Tramo IV.

**Objeto de estudio:** Los procesos tecnológicos para la construcción de túneles.

**Campo de Acción:** El túnel Levisa Mayará Tramo IV.



**Objetivo general** proponer mejoras tecnológicas y organizativas para aumentar la eficiencia del proceso de construcción en el túnel Levisa Mayarí Tramo IV.

**Hipótesis** si se realiza un estudio del macizo rocoso, se caracterizan los procesos tecnológicos, se identifican los procesos tecnológicos que mayor inciden en la calidad de la construcción, y se evalúan posibles soluciones para aumentar la eficiencia del proceso constructivo en los túneles, entonces se puede proponer mejoras tecnológicas y organizativas para aumentar la eficiencia del proceso de construcción en el túnel Levisa Mayarí Tramo IV.

Teniendo como **objetivos específicos**:

1. Caracterizar el macizo rocoso en la zona objeto de estudio.
2. Caracterizar los procesos tecnológicos que se ejecutan durante la construcción del túnel Levisa Mayarí Tramo IV.
3. Identificar los procesos tecnológicos que mayor inciden en la calidad de la construcción del túnel Levisa Mayarí Tramo IV.
4. Evaluar posibles soluciones para aumentar la eficiencia del proceso constructivo en el túnel Levisa Mayarí Tramo IV.

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

- **Método empírico:** será imprescindible el empleo de la medición. Como técnicas; la observación, para el conocimiento de las características fundamentales del objeto.
- **Métodos teóricos:** se utiliza para la interpretación conceptual de los datos empíricos; haciendo uso del análisis y síntesis en el estudio de las partes del objeto y para comprender su comportamiento como un todo. Dentro de los métodos teóricos también se utilizó la inducción y deducción como procedimiento para pasar de lo conocido a lo desconocido y de lo general a lo particular. El **método dialéctico:** para conocer las relaciones entre las componentes del objeto.
- **Histórico -lógico:** se utilizó para la revisión y análisis de los documentos y definir los principales antecedentes investigativos.



## **CAPITULO I. ESTADO ACTUAL DE LA TEMÁTICA**

Los túneles se construyen por la necesidad de superar un obstáculo natural, generalmente un macizo montañoso o por situaciones estratégicas. Pero además de la montaña existen otras barreras que se pueden salvar mediante túneles como los cursos de agua fluviales o marinos, y las zonas urbanas densamente edificadas en las que a menudo se incorporan túneles. Entre los usos más frecuentes pueden enumerarse los túneles para vehículos, para redes de ferrocarril urbano o Metros, para uso peatonal, para abastecimiento de agua, saneamiento, galerías de servicio y para almacenamiento de residuos entre otros

Del proceso constructivo de los túneles en general, cuando llega en el momento de ejecutar la obra hay una serie de aspectos que debemos conocer para realizar la construcción y mejorar la eficiencia de los procesos tecnológicos; conocer el macizo rocoso objeto de la construcción es de vital importancia y nos va a permitir hacer una buena elección de la tecnología a emplear para evitar sobre excavaciones, derrumbes, inundaciones, entre otros fenómenos que pueden traer dificultades en el avance del mismo.

### **1.1. Marco teórico conceptual**

La construcción de un túnel conlleva el planteamiento de una serie de problemas relacionados con las disposiciones a adoptar en las obras, ya sea con los métodos de ejecución, los sistemas y sus equipos. Las soluciones dependerán especialmente de la naturaleza y composición del terreno, de su resistencia y de la posible presencia de agua.

La ejecución de túneles y obras subterráneas se imponen en la construcción de:

- Carreteras.
- Ferrocarriles y Líneas de Alta Velocidad.
- Canales.
- Pasos inferiores en canales, ríos, estrechos o brazos de mar (carreteras y ferrocarriles)



- Obras hidráulicas (galerías de derivación, tuberías de carga o descarga, centrales subterráneas).
- Obras urbanas (alcantarillado, galerías para cables o tuberías, ferrocarriles metropolitanos, pasos subterráneos de peatones)
- Refugios subterráneos (construcciones militares).
- Explotaciones mineras.
- Túneles marino

La construcción de túneles y obras subterráneas, es uno de los procesos más costosos en la industria de la construcción, debido a la necesidad de realización de investigaciones iniciales tanto geológicas como geofísicas del terreno, así como a las predicciones empíricas de los costes de perforación.

La excavación de túneles ha ido evolucionando con el tiempo dando paso a nuevos sistemas y métodos desarrollados regionalmente en función de las características geomecánicas de los materiales existentes. Así, por ejemplo, en cuanto a túneles ejecutados por fases, se pueden diferenciar el Nuevo Método Austriaco de Construcción de Túneles (NATM), el Método Alemán, y el Método Belga, en los que la sección completa se divide en secciones más pequeñas, que se excavan y estabilizan para dar lugar a la sección completa posteriormente ((Alberto Rey Sabin, Gabriel Pardo Fernández, Raúl Hurtado Agra, 2010).

Los recientes progresos en el campo de la construcción de túneles, así como el desarrollo de nuevas técnicas de perforación, tiende a buscar un solo objetivo antes de iniciar la ejecución del túnel; perturbar lo mínimo posible las condiciones del terreno excavado. Al comenzar la excavación de un túnel, el terreno se encuentra en un estado de equilibrio. Como consecuencia del avance de la excavación, este estado de equilibrio se ve alterado y se produce una descompresión del terreno. (Alberto Rey Sabin, Gabriel Pardo Fernández, Raúl Hurtado Agra, 2010).



Una excavación del túnel sin la utilización de explosivos, ejecutado mediante pica, pala mecánica o rozadora, limita estas perturbaciones en el terreno, y propicia una menor descompresión del medio.

Mediante la realización de un sostenimiento previo podremos asegurar el terreno y limitar su descompresión al mínimo posible. Con esta filosofía nació lo que se conoce como sistema NATM o Nuevo Método Austriaco de construcción de Túneles. ((Alberto Rey Sabin, Gabriel Pardo Fernández, Raúl Hurtado Agra, 2010).

Este método fue patentado en 1958 por A. Brunner (Patente Austriaca N° 197851), dándose a conocer al mundo por los Profesores L. Müller y L.V. Rabcewicz en el año 1959.

Hoy en día, la aplicación del NATM está generalizada en casi todos los proyectos de realización de túneles, y una de las herramientas fundamentales incluida entre los sistemas de sostenimiento, es el hormigón proyectado. Por otra parte, los desarrollos técnicos de los procedimientos de excavación, transporte, sostenimiento y revestimiento han avanzado tan rápidamente que necesitan de la química de la construcción para conseguir los fines deseados.

La proliferación de obras subterráneas en los últimos tiempos, ha permitido el desarrollo de nuevos equipos de excavación, más versátiles y seguros. La excavación de túneles con máquinas integrales a sección completa (Tunnel Boring Machine) se divide fundamentalmente en dos grupos, en función del tipo de material a excavar, y de las necesidades de sostenimiento ((Alberto Rey Sabin, Gabriel Pardo Fernández, Raúl Hurtado Agra, 2010).

(Alberto Rey Sabin, Gabriel Pardo Fernández, Raúl Hurtado Agra, 2010).

En primer lugar, estarían los Topos, diseñados fundamentalmente para rocas duras y medias y por otro lado, los Escudos, empleados en rocas blandas y suelos. Un desarrollo posterior sería el Doble Escudo, capaz de trabajar con las dos tipologías de terreno descritas. (Alberto Rey Sabin, Gabriel Pardo Fernández, Raúl Hurtado Agra, 2010).



## **1.2. Estado actual de la temática en el mundo**

La Fundación Dialnet le hizo una entrevista a Alfredo Avello, gerente de ABYO, S.A, donde expresa lo siguiente:

La ejecución de grandes túneles para infraestructuras, carreteros, ferroviarios, o hidráulicos, suponen una gran complejidad tanto en el aspecto organizativo de la obra, como en el técnico en sí de la construcción: grandes máquinas y elementos auxiliares, periodicidad de los procesos (excavación, desescombro, sostenimiento, mantenimiento, seguridad del personal, adaptación continua a las condiciones del terreno, entre otros.) (Alfredo Avello,2006)

Una parte importante de la caracterización geomecánica de los macizos rocosos, lo constituyen sin dudas, las clasificaciones geomecánicas, que surgieron de la necesidad de parametrizar observaciones y datos empíricos, de forma integrada, para evaluar las medidas de sostenimiento en túneles. Las mismas son un método de ingeniería que permite evaluar el comportamiento geomecánico de los macizos rocosos, y a partir de estas estimar los parámetros geotécnicos de diseño y el tipo de sostenimiento de un túnel (Palmstróm, 1998). Además de la implementación a las obras subterráneas, se destacan las aplicaciones en taludes y cimentaciones. Las clasificaciones llevan más de 50 años en uso, pero es a partir de la década de los 70 cuando se extienden internacionalmente (Iosnel Rouco Suárez, 2015)

Las filtraciones descontroladas de agua al interior de las excavaciones subterráneas inciden directa o indirectamente en varias de las afectaciones que se producen en este tipo de obra. Entre estas se pueden mencionar: pérdida de estabilidad del conjunto macizo excavación, disminución de las propiedades de resistencia del macizo, inundaciones, variación de los parámetros de la atmósfera subterránea, etc. Por sus consecuencias y efectos negativos, así como su incidencia en el costo de ejecución de la obra es necesario aplicar técnicas para controlar el proceso de infiltración de agua a las excavaciones. Esta situación técnica y económica se hace más compleja cuando no se consideran adecuadamente la magnitud de la presencia de agua y las técnicas para su control en el diseño inicial. Varios investigadores consideran que el aumento de los costos de construcción y explotación de los



túneles y otras obras subterráneas guarda relación con la correcta o incorrecta utilización de técnicas para el control del agua (Yuan et al., 2000; Zhang & Shen, 2004; en Cuesta Recio, 2010)

En los proyectos de obras de ingeniería subterránea de hoy en día, cada vez van teniendo mayor aceptación los métodos de excavación mecánica, principalmente por razones de seguridad, impacto ambiental, comodidad de operación, etc.; pero tampoco se debe olvidar que, en cualquier caso, el factor fundamental de una obra subterránea, tanto para su viabilidad como para su ejecución, es el costo de la unidad de producción terminada. Sin embargo, hay casos excepcionales en los que un mayor beneficio social, una urgencia de plazo de ejecución u otras circunstancias, pueden justificar un sobre costo de la obra. (Ingeo Túneles Volumen 2)

Por otra parte, tanto los métodos de excavación mecánica subterránea como el convencional de perforación y voladura (con la primera de estas más o menos automatizada) son sistemas que a pesar de los sistemas logrados están condenados a convivir todavía durante muchos años. (Ingeo Túneles Volumen 2)

El sistema de perforación y voladura para la excavación de túneles es una técnica convencional que aún hoy se utiliza con profusión, debido a las numerosas ventajas que presenta frente a la excavación mecánica con miradores y tuneladoras, versatilidad en cuanto a tipos de roca y secciones de las obras, adaptabilidad a otros trabajos, movilidad de los equipos y reducida inversión inicial. En este artículo se exponen algunos de los principales avances tecnológicos recientes producidos en este campo. (Carlos López Jimeno, 2002)

El método de perforación y voladura es la forma principal de acometer las grandes excavaciones en roca que se demandan tanto en minería como en el campo de las obras públicas. Así, la existencia de gran parte de las infraestructuras de nuestro país está ligada al empleo de los explosivos muchas de las obras de presas, centrales hidroeléctricas, carreteras, autopistas, líneas férreas, líneas de alta velocidad, entre otros, se han podido llevar a cabo de una forma económicamente viable gracias a este método de excavación. Los últimos avances tecnológicos hacen que sea un método aún más económico, versátil y productivo; especialmente en la



excavación de túneles, donde la evolución de equipos y productos ha tenido una repercusión determinante. (Benjamín Cebrián Romo, Javier Muñoz García, 2005 en losnel Rouco Suárez 2015)

La primera vez que se utilizó un minador en una excavación subterránea data de los años 80 de este siglo. Las primeras máquinas que utilizaban una cabeza de corte sobre un brazo fueron usadas en Estados Unidos; que dieron lugar más tarde a los minadores continuos en Rusia.

Las rozadoras con movimiento independiente, tanto vertical como horizontal del brazo, permiten adaptarse a secciones curvas. Debido a sus características, se abrieron camino en la construcción de túneles. Las primeras aplicaciones datan de los años 60 y ya en 1970 se utilizaban aproximadamente entre 150 y 200 rozadoras en las obras civiles subterráneas. (Ingeo Túneles Volumen 2)

Una rozadora en su disposición clásica realiza las siguientes funciones:

- Excavación (corte) de la roca.
- Recogida del escombros producido.
- Transferencia del escombros al equipo de transporte secundario.(Ingeo Túneles)

Desde 1933 hasta nuestros días, no cabe duda de que las aplicaciones del hormigón proyectado han obtenido una extensa innovación, tanto en el campo de los materiales y de la maquinaria como de las técnicas y conceptos de aplicación.

Es en el periodo comprendido entre 1992-1998, cuando las consideraciones medioambientales y los objetivos tecnológicos de las empresas de química para la construcción y fabricantes de maquinaria actuales han desarrollado cambios en la técnica de proyección de morteros y hormigones en las obras de España. (Ingeo Túneles)

Dando un repaso a las nuevas tecnologías podremos situarnos en su estado actual. Se consideran los siguientes temas como nuevas tecnologías:



- Producción de un hormigón proyectado, neutro y ecológico, caracterizado por su alta calidad, durabilidad y baja permeabilidad.
- Reducción de la permeabilidad.
- Reducción de rebote y polvo en la proyección.
- Mejora del comportamiento a la deformación sin reducción de resistencias.
- Integración del hormigón proyectado como elemento estructural en túneles.
- Posibilidad de sustitución del revestimiento tradicional por hormigón proyectado. (Ingeo Túneles)

La utilización generalizada del hormigón proyectado, como elemento fundamental, tanto en el sostenimiento como en el revestimiento de túneles y obras subterráneas, ha motivado un continuo desarrollo tecnológico, tanto en los materiales componentes del hormigón (cemento, áridos y aditivos), en la maquinaria, así como en su aplicación y control de calidad. Alberto Rey en el 2006 presentó un trabajo donde brindaba las nociones básicas sobre su dosificación, fabricación y puesta en obra, además presentó los últimos avances tecnológicos relacionados con esta herramienta, tan indispensable en el campo de los túneles y las obras subterráneas. (Alberto Rey, 2006)

Se puede afirmar que la innovación tecnológica es un aspecto relevante en la obtención de mejoras continuas en la productividad, la calidad, durabilidad y seguridad de las obras subterráneas. En este sentido, el Comité de Túneles y Espacios Subterráneos de Chile (CTES-Chile) posee como uno de sus principales objetivos, mantenerse permanentemente informados y actualizados en cuanto a soluciones tecnológicas.

Tecnología de los revestimientos fibroreforzados para túneles excavados con TBM: la presentación del ingeniero Bruno Franco, gerente sector túneles para Latinoamérica en Maccaferri, mostró los diversos usos de fibras en elementos de hormigón, sus efectos y mejoras respecto al hormigón sin uso de fibras (convencional). Se presentaron las ventajas del uso de fibras para el refuerzo de dovelas de hormigón prefabricado para uso en máquinas tuneladoras TBM y la protección pasiva al fuego generado por consideración de micro fibras sintéticas. La



charla incluyó aspectos de diseño y de durabilidad de elementos de hormigón reforzados con fibras, concluyendo con varios casos históricos internacionales, donde se utilizaron fibras para refuerzo de las dovelas de hormigón prefabricado de túneles con TBM. (Alexandre Gomes Presidente del Comité de túneles y Espacios Subterráneos, entidad coordinada por CDT)

Actualmente en México el campo de la construcción de túneles y obras subterráneas tiene un gran auge, experimentando una notable evolución tecnológica. Estos grandes avances se han presentado tanto en el diseño como en la construcción de este tipo de obras; hoy en día se cuenta con programas informáticos muy completos que permiten elaborar modelos matemáticos cada vez más precisos y confiables, maquinaria de construcción y sistemas de estabilización y sostenimiento del terreno de gran versatilidad y eficiencia, que han permitido a la ingeniería de túneles y obras subterráneas convertirse en una auténtica industria de alta tecnología. (Francisco Suárez Fino, Antonio Alonso Jiménez, 2013)

La tunelería en Chile exhibe importantes avances, pero también tiene grandes desafíos y oportunidades de cara al 2020, cuando entren en operación numerosos proyectos mineros y otras tantas ampliaciones de proyectos existentes. Galera en su exposición. (Tercer Taller de Tunelería y Fortificación Minera organizado por el Departamento de Minería de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile, y en el que Minería Chilena), afirma que se han producido en tunelería civil en los últimos años grandes innovaciones que han pasado por la perforación y voladura de la excavación, la optimización del ciclo de avance y también la excavación mecanizada de túneles a través de máquinas tuneladoras o TBM.

En España hay en funcionamiento dieciséis trasvases que principalmente garantizan el abastecimiento de la población y aseguran el suministro de agua al sistema agroalimentario español.

**Trasvase Tajo Segura:** Es una de las obras de ingeniería más grandes realizadas en España. Deriva agua del río Tajo desde los embalses de Entrepeñas (Provincia de Guadalajara) y Buendía (Provincia de Cuenca) al río Segura a través de la presa



del embalse de El Talave. La infraestructura tiene una longitud de 292km y capacidad para 33 m<sup>3</sup>/s.

El 15 de febrero de 1967 se aprobó el trasvase Tajo-Segura, una obra de ingeniería hidráulica que se puso en marcha a finales del franquismo y que llevó en 1979 las primeras aguas desde el río Tajo, en la vertiente atlántica de la Península, a las tierras del Levante español. Los primeros proyectos databan de principios de los años treinta del siglo XX. Con capacidad para un caudal de 33 m<sup>3</sup>/s de agua, el trasvase tiene 286 kilómetros de longitud y comienza en los embalses de Entrepeñas (río Tajo) y Buendía (río Guadiela), en el límite de las provincias de Guadalajara y Cuenca. En 1979 se trasvasaron 63.14 hm<sup>3</sup> hasta alcanzar el volumen máximo de 604.95 hm<sup>3</sup> en 1999-2000. (DEHISPA Los trasvases de España)

La mayor obra de túnel realizada en España, lo constituye la construcción de un túnel fronterizo que comunicara la Comunidad Autónoma de Aragón con Francia a través del puerto pirenaico de Somport en la provincia de Huesca, en ambos frentes intermedios el avance se realizó a sección completa con un sostenimiento del túnel basado en hormigón proyectado por vía húmeda y bulones anclados con resina, simultaneándose la excavación en ambos frentes. Desde el punto fronterizo y hacia la boca española se empleó una máquina tuneladora TBM con un diámetro de 4,70 m con el fin de ejecutar una galería, sostenimiento de la misma se realizó en aquellas zonas en las que se necesitaba mediante bulones de fibra de vidrio, mallazo y hormigón proyectado por vía seca empleándose por primera vez en España la tecnología de los aditivos acelerantes de fraguado libres de álcali. También se emplearon placas metálicas que cerraban la sección en forma de anillo en terrenos de bajas condiciones geológicas.(Hormigón proyectado en el Túnel de Somport (Huesca) (Túneles y Obras subterráneas, Alberto Rey Sabin, Gabriel Pardo Fernández, Raúl Hurtado Agra, 2010).

### **1.3. Situación actual de la temática en Cuba**

En Cuba las clasificaciones geomecánicas de los macizos rocoso, tienen pocos seguidores. Han sido empleadas fundamentalmente por las empresas de proyecto y



construcción de obras subterráneas del Ministerio de las Fuerzas Armadas Revolucionarias.

Durante la década de los 60 y 70, los criterios utilizados en el CAT – FAR para proyecto y ejecución de túneles se basan en la escuela Soviética, que se apoya en los trabajos del profesor Protodiakonov. Según esta teoría, la estabilidad se logra cuando la excavación tiene forma parabólica o cuando alcanza, por derrumbes, dicha forma. Durante esos años la observación y control de infinidad de casos reales (Acosta, 1996), donde se logra la estabilidad con secciones de formas absolutamente arbitrarias, puso en dudas el planteamiento de Protodiakonov. ( tomado de losnel Rouco Suárez, 2015)

Según el análisis del macizo rocoso y el cálculo de los principales parámetros de estabilidad de la Cámara de Acceso en el trasvase Este Oeste (realizado en base a la Q de Barton para la luz de la excavación de 5m.), el comportamiento de las rocas antes de la construcción de la obra es mala producto al nivel de agrietamiento presente en dicha conjunto macizo-excavación. Por consiguiente, se recomienda para evitar un derrumbe aplicar gunitaje más bulonado en todos los tramos de la Cámara. (Marlon Hernández Chery, 2009)

En Cuba se inició las investigaciones relacionadas con la temática aplicadas al corte del mármol por voladura y bajo su tutoría se ha extendido a las canteras de la industria de materiales de la construcción (Palacios, 1997; Pedro Alexandre, 2006; Seidu, 2007) y al laboreo de excavaciones subterráneas (Sargentón, 1997) (Sargentón Romero, 2008) Otaño (1984,1998)

En los túneles del Trasvase se ha venido empleando la voladura tradicional, se calculan los parámetros de la explosión para el laboreo de excavaciones y por lo regular no se consigue obtener con precisión el contorno proyectado de la excavación, produciéndose en ocasiones alcanza áreas sobre excavadas de grandes proporciones, lo que implica un aumento del trabajo y del tiempo (Otaño Noguel, 1998) (Zapata, 2013)



Para contrarrestar esto se emplea la voladora controlada cuyo objetivo es evitar el rompimiento de la roca fuera de límites previamente establecidos, es decir, evitar la sobrerotura. Este método especial que permite obtener superficies de corte lisas y bien definidas y al mismo tiempo evitar el agrietamiento excesivo de la roca, contribuyendo a mejorar su estabilidad, aspecto muy importante en trabajos subterráneos de orden permanente, para prevenir de desplome de techos y otros riesgos. (Manual práctico de voladura, EXSA)

La ejecución de túneles y galerías requiere de soluciones novedosas que permitan disminuir los costos de laboreo durante la construcción de estas obras subterráneas. Uno de los procesos que mayor importancia reviste en esta actividad es el arranque de las rocas con perforación y voladura, el cual, sigue siendo un importante método de excavación y separación de la roca del macizo (P. K. Singh, et. al. 2014); sin embargo, presenta como principal limitante el daño que produce al contorno de las excavaciones subterráneas, aspecto este, que provoca desprendimientos y una sobreexcavación excesiva cuando no se realizan diseños adecuados (Stephen R. et. al. 2013).

En la actualidad en los túneles hidrotécnicos del Trasvase Este – Oeste se realizan diseños de voladuras que no consideran el comportamiento del macizo ante la acción de una sustancia explosiva (SE) como un sistema, esto implica que los resultados difieran de una litología a otra, lo que trae consigo en muchos casos inestabilidad y gasto excesivo de recursos producto de la sobreexcavación obtenida después de la explosión. (Diéguez, 2014)

Mucho es lo que ha avanzado en el diseño y la construcción de túneles desde su surgimiento en la antigüedad hasta la actual fecha. Los métodos varían en cuanto a la perforación, el diseño, la construcción y el revestimiento.

Las características finales de un túnel dependen, del macizo en el que está enclavado y de su función, así como de la forma de diseño. Estos dos aspectos, de conjunto con la tecnología y los métodos de construcción influyen de manera preponderante en su durabilidad y comportamiento. Es por ello que resulta necesario



conocer de forma detallada estos elementos antes de diseñar el revestimiento de cualquier túnel u obra subterráneas.

El revestimiento en un túnel, puede o no, ser un elemento estructural, pero de cualquier manera sirve para mejorar el aspecto estético y las características operacionales del mismo. En el caso de los túneles hidráulicos se usan para impermeabilizar el sistema, disminuyendo de esta forma las pérdidas de su recorrido. (Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Civil. (Ridel Orez Arias, 2014).



## CAPITULO II. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA REGIÓN

### 2.1. Ubicación geográfica

El Túnel Levisa – Mayarí es una obra subterránea que va desde la Presa Levisa a la Presa Mayarí en el río del mismo nombre. Toda la zona se encuentra en las hojas cartográficas 1:50 000 de Mayarí 5077-I para una superficie total de 84.0 km<sup>2</sup>. El Tramo IV del túnel se encuentra en una zona intrincada con difíciles accesos, formado por un relieve montañoso, en el trazado las alturas van desde cota 100.00 hasta 236.00. Como se muestra en la figura 1

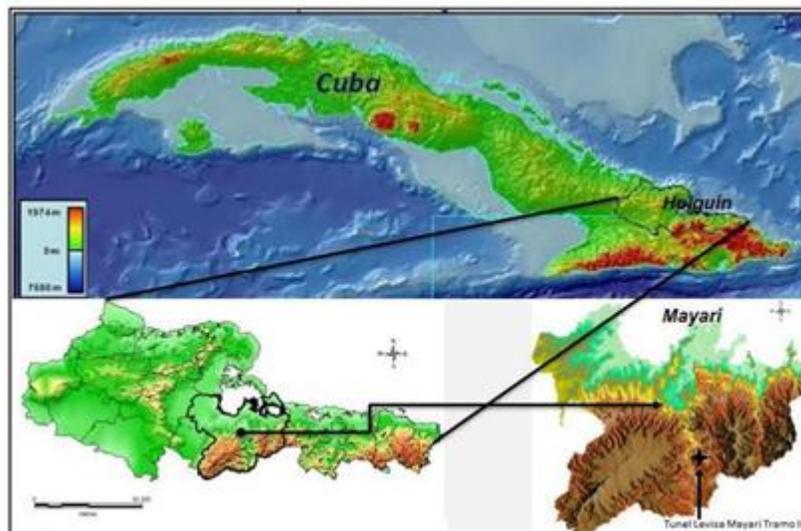


Figura 1 Ubicación geográfica del municipio de Mayarí

### 2.2. Características constructivas generales del proyecto

Proyecto Técnico-Ejecutivo del túnel Levisa-Mayarí, ha sido dividido en 6 tramos dado su longitud aproximada de 17,0 Km, en nuestro caso de estudio nos concentraremos en el Tramo IV con una longitud de 2715.24m. El proyecto se ejecuta a partir de la solicitud realizada por el Dpto de inversión para diseñar un túnel a partir del trazado ajustado con el objetivo de permitir la conducción de agua con un gasto mínimo de 30.0 m<sup>3</sup>/s desde la presa Levisa hasta la presa Mayarí, en unión con los tramos que le anteceden (sin proyectar), el tramo I (construido), tramo II y tramo III (en construcción). Para el diseño y proyección de este túnel se consideró



que la conducción se realizará a presión, aprovechando la carga de la presa Levisa con cota de nivel de aguas normales de 96.00 y cota de fondo del túnel a la salida de 65.00. El túnel tramo IV inicia en el estacionado 3+020.79=0+000 Cala No 8 (fin del Tramo III B) con cota de fondo 65.43. Este túnel constituye un elemento más del sistema del Trasvase Este-Oeste en el tramo Sagua-Mayarí, resultando un elemento continuador del proyecto que pretende aliviar, en el futuro, los posibles efectos de la sequía en el oeste de Holguín, Las Tunas y Camagüey.

El túnel Levisa-Mayarí Tramo IV está compuesto por el túnel de conexión III que sirve de acceso al túnel antes mencionado y se utilizará como otro frente de trabajo el túnel de conexión II (tramo IIIB), ya en ejecución. El mismo trasvasará un caudal mínimo de 30 m<sup>3</sup>/s (gasto forzado) con una pendiente constructiva para el drenaje en el interior de 0.0026 y 0.001 m/m respectivamente, su sección transversal responde a la circulación en régimen forzado del caudal antes mencionado teniendo en consideración los cálculos en cuanto a dimensiones, rugosidad, entre otros elementos. El túnel perteneciente al Tramo IV Conexión II-IIIB, es una galería horizontal de 6.40 m de ancho por 6.00 m de altura y 2756.5 m de longitud, con una pendiente de 2 mm/m, 8 nichos de escombreo. Hasta el mes de abril se han ejecutado 800 m y quedan por ejecutar 1956.5 m.

#### **Sección típica del Tramo 4.**

##### Características:

Tipo de revestimiento-Sostenimiento: Hormigón proyectado con fibra sintética espesor - 5 cm, inmediato después de cada voladura; bulonado sistemático con bulón L=2.70 m, espaciado a 1.0 m en ambos sentidos (transversal y longitudinal); arcos de acero espaciados 1.0 m (4 ø 12.7 mm, unidos a los bulones)

Hormigón proyectado con fibra sintética espesor - 15 cm, para un revestimiento total de 20 cm.

Sección de excavación total – 30.61 m<sup>2</sup>.

Longitud de avance (Barton) - 1.0 m



Sección hidráulica – 26.74 m<sup>2</sup>.

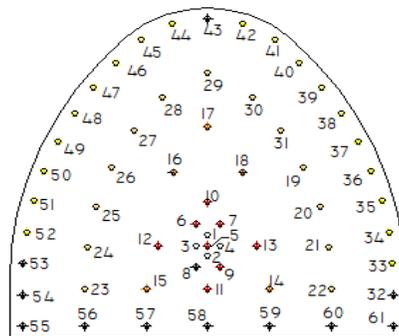
Ancho interior por el fondo - 6.0 m

Altura interior - 5.60 m.

Losa de piso definitivo del túnel (espesor) - 0.20 m.

Para la sección típica IV que tiene dimensiones de excavación de 6.4 m de ancho y 6.0 m de altura con un área a excavar por proyecto de 30.61 m<sup>2</sup>.

**PATRÓN DE BARRENACIÓN Y VOLADURA:  
CON ESPAC.@ DE BARRENOS PROM.590-600MM.  
POSICIÓN DE BARRENOS**



**VARIANTE 4**

CANTIDAD DE BARRENOS DE CUELE = 9

CANTIDAD DE BARRENOS VACIOS = 4

CANTIDAD DE BARRENOS AYUDANTES DE CUELE = 5

CANTIDAD DE BARRENOS DE PIE (REPIE, ZAPATERA) = 7

ESPACIAMIENTO ENTRE BARRENOS DE REPIE = 1000MM

CANTIDAD DE BARRENOS DE CONTORNO = 23

ESPACIAMIENTO PROMEDIO ENTRE BARRENOS DE CONTORNO = 590MM

CANTIDAD DE BARRENOS AYUDANTES DE CONTORNO = 13

CANTIDAD TOTAL DE SUSTANCIA EXPLOSIVA -25 KG HASTA 125 KG

CANTIDAD DE CORDON DETONANTE DE 3 HASTA 5 GRS./M- 50 MTS

CANTIDAD DE CORDON DETONANTE DE 10 GRS./M PARA CONTORNO:

DE 21 HASTA 63 MTS

CANTIDAD DE CORDON DETANTE DE 3 HASTA 4 GRS/M PARA CONTORNO:

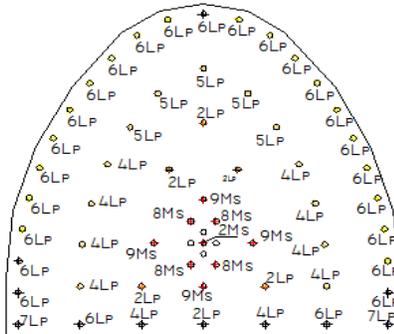
DE 3 GRS/M-70 HASTA 210 MTS

DE 4 GRS/M-53 HASTA 158 MTS

Figura 2 Posición de los barrenos.



PATRÓN DE BARRENACIÓN Y VOLADURA:  
CON ESPAC.@ DE BARRENOS PROM.590-600MM.  
SECUENCIA DE RETARDOS



DETONADORES ELECTRICOS - 2 UNIDADES  
DETONADORES NO ELECTRICOS MS2 - 1 UNIDAD  
DETONADORES NO ELECTRICOS MS8 - 4 UNIDADES  
DETONADORES NO ELECTRICOS MS9 - 4 UNIDADES  
DETONADORES NO ELECTRICOS LP2 - 6 UNIDADES  
DETONADORES NO ELECTRICOS LP4 - 10 UNIDADES  
DETONADORES NO ELECTRICOS LP5 - 5 UNIDADES  
DETONADORES NO ELECTRICOS LP6 - 23 UNIDADES  
DETONADORES NO ELECTRICOS LP7 - 2 UNIDADES

Figura 3 Patrón de barrenación y voladura. Secuencia de retardos.

En este túnel se utiliza el mismo pasaporte para toda la excavación, sin tener en cuenta los cambios de litología y la estructura presentes en el macizo, ver figuras 2 y 3.

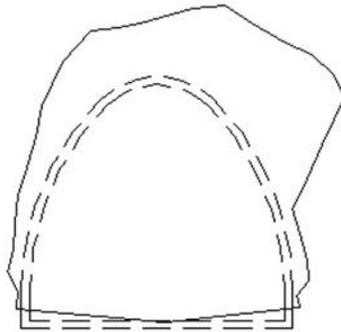
Para el cálculo del área total después de la voladura se tiene en cuenta un 25 % de sobre-excavación teniendo en cuenta las siguientes afectaciones.

- Tecnología 5 %
- Geología 10 %
- Ambiente de trabajo 10 %

Teóricamente el comportamiento debe ser semejante a este, pero prácticamente esto debe mejorar bastante en el caso del ambiente de trabajo, en el caso de la



tecnología debe ser permanente teniendo en cuenta el ángulo de barrenación es obligatorio en el contorno de la excavación y en el caso de la geología en ocasiones sobrepasa los parámetros teóricos teniendo en cuenta la calidad del macizo en que nos encontramos trabajando la que difiere con respecto a los estudios de proyecto inicial. Teniendo en cuenta estos parámetros el área después de la voladura puede llegar a tener un ancho de 6.95 m y una altura de 6.55 m, lo que arrojaría un área total excavada de 45.83 m<sup>2</sup> y perímetro real a gunitar =19.53 m; ver figura 4



Estacionado: 0+057.750  
Cota Real: 66.206  
Cota Piso Proy.: 66.260  
Diferencia : -0.054

Figura 4 Representación de la sobre excavación del Tramo IV después de la voladura.

### 2.3. Geología regional y local

El municipio Mayarí se encuentra ubicado en el complejo ofiolítico Mayarí- Baracoa, el cual se localiza en el extremo oriental de la Isla de Cuba. En este macizo se pueden distinguir diferentes mantos de cabalgamiento, en los que se aprecian espejos de fricción y escamas tectónicas de diferentes espesores. En los estudios realizados por Proenza (1998) en la región, este divide las fajas ofiolíticas en dos grandes macizos: 1) El macizo Moa-Baracoa y 2) El Macizo Mayarí-Cristal. Como muestra la figura 5.

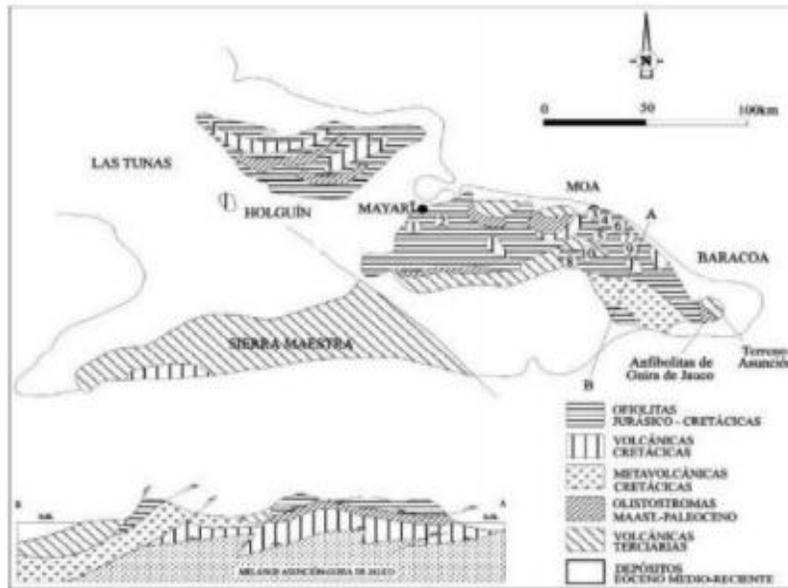


Figura 5 Ubicación de la faja ofiolítica Mayarí-Baracoa

Según (Iturralde-Vinent, 1996). Los números indican la ubicación de las principales áreas de distribución de los depósitos lateríticos de níquel y cobalto: 1 Pinares de Mayarí, 2- Nicaro, 3- Moa, 4- Punta Gorda-Yagrumaje, 5- Las Camariocas, 6- Cantarrana-La Delta, 7- Santa Teresita, 8- La Fangosa, 9- Iberias y 10- Piloto. Desde el punto de vista geológico el área de estudio se encuentra en la parte central del macizo ultramáfico Sierra de Nipe-Sierra Cristal, constituyendo desde el punto de vista de la tectónica un bloque hundido de tipo graben (intramontañoso). Esta subdivisión en bloque según algunos autores, empezó en la fase orogénica Larámica, contemporáneamente con la formación de napes de ultramafitas (Arango et al, 1988). En el área se distinguen bien diferenciadas rocas carbonatadas y terrígenas carbonatadas sobreyaciendo a las ultra mafitas serpentinizadas del complejo intrusivo del Cretácico Superior. Estas rocas presentan diferentes grados de alteración y ha dado origen a varios tipos de harzburgitas y en menor grado Dunitas y Piroxenitas. Esto se debió al intenso tectonismo sufrido por la región durante el Cretácico y el Paleógeno y hoy se muestran intensamente agrietadas y fracturadas en bloques de diversas dimensiones que van desde algunos m<sup>2</sup> hasta km<sup>2</sup>. El macizo también es atravesado por diques de rocas básicas predominantemente Gabros y Diabasas (Arango et al., 1988). En Mayarí la geología





En el clima, el factor que más influye en la ejecución de las obras propuestas, son responsables del escurrimiento de los principales ríos y arroyos de la zona de estudio, además son las principales fuentes de recarga del manto acuífero.

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

### **Vegetación**

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

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

### **Orografía**

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

En todo el borde norte predominan las zonas llanas y onduladas con algunas elevaciones aisladas y colinas de cimas redondeadas. Además, cerca del litoral aparecen llanuras acumulativas y palustres. Las cotas van desde 0 hasta 100 m, las pendientes entre 0° a 10°, la disección vertical de 0 a 70 m, disección horizontal de 0 a 60 m/ha y la disección total de 0 a 110 m/ha.



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

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

### **Hidrografía**

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

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

### **Hidrogeológicas**



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

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



## CAPITULO III: EVALUACIÓN DE LOS PROCESOS TECNOLÓGICOS DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES EN EL TRANSVASE ESTE OESTE

### 3.1. Caracterización de la zona objeto de estudio

Las investigaciones geológicas por el eje del túnel demostraron que las rocas de la elevación Levisa-Mayarí, que atraviesa el túnel están representadas en toda su profundidad por Serpentinitas muy agrietadas, Serpentinita agrietada y Serpentinitas menos agrietadas, como se muestra en la figura 7.

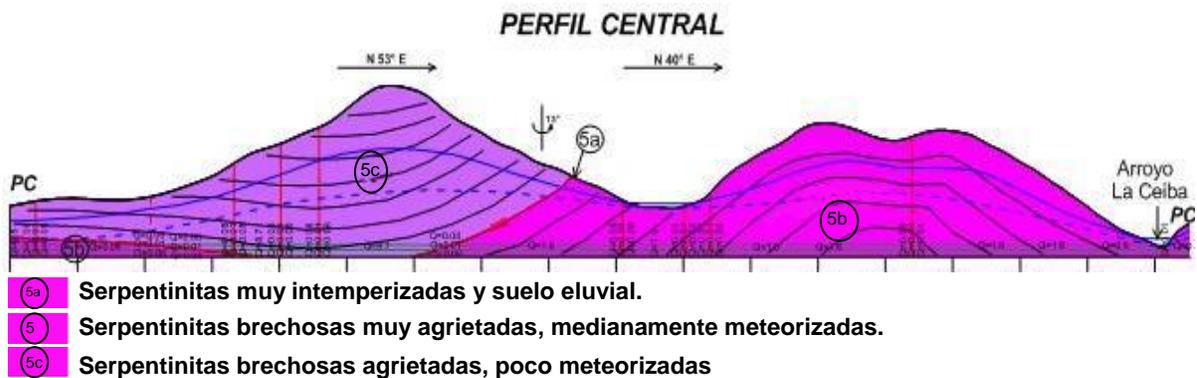


Figura 7 Perfil Ingeniero geológico de tramo IV

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

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



Tabla.1 Capa 5b. Serpentinitas brechosas muy agrietadas, medianamente meteorizadas.

PROPIEDADES	ESTADO	U/M	VALOR
Densidad	Seca	kN/m <sup>3</sup>	18.3-24.5 (21.3)
	Natural	kN/m <sup>3</sup>	18.4-26.6 (21.5)
	Saturada	kN/m <sup>3</sup>	21.5-25.5 (23.3)
Peso específico			2.55-2.73 (2.66)
Porosidad		%	8.39-32.20 (19.7)
Resistencia a la compresión	Seca	MPa	20.03-49.50 (32.7)
	Saturada	MPa	7.10-38.7 (19.4)
Coeficiente de ablandamiento		-	0.21-0.95 (0.60)
Absorción (Abs)		%	2.5 a 18.0 (7.5)
Coeficiente de fortaleza de Protodiakonov (F.K.P)	Seca	MPa	2.0-5.0 (3.0)
	Saturada	MPa	1.0-4.0 (2.0)
Resistencia a la tracción	Seca	MPa	2.09-2.94
	Saturada	MPa	1.90-1.92
Módulo de Young	Seco	MPa	920-4248 (2063.6)
	Saturado	MPa	545-2792 (1531.5)
Químicos	CaCO <sub>3</sub>	%	Traza a 1.5
	SST	%	0.026 a 0.086 (0.04)

**Capa 5c. Serpentinitas brechosas agrietadas, poco meteorizadas:** A diferencia del Tramo III B, sólo se espera en los primeros 500 m más adelante en el trazado, con posible plano y zona de falla subhorizontal, lo que puede acarrear problemas de estabilidad en este sector. Se caracterizan por presentar bloques elementales entre grietas de tamaño medio entre 10-30 cm. Por su dureza se clasifican como rocas medias a blandas, pueden estar medianamente intemperizadas predominando en profundidad las poco meteorizadas, excepto en zonas de influencia de fallas con circulación de aguas estacionales. Su color predominante es verde claro hasta oscuro casi negro. Las variedades brechosas propiamente dicho, se presentan en la parte más externa de la zona de influencia de fallas, ya que hacia el centro de estas pueden encontrarse a un nivel de trituración tal que llegue hasta la milonitización. Los valores reflejados en la tabla 2 fueron obtenidos a partir de ensayos de laboratorio.



Tabla.2 Capa 5c. Serpentinitas brechosas agrietadas, poco meteorizadas

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

En la tabla 1 y 2 se puede ver que el macizo donde se encuentra el túnel tramo IV del trasvase Este Oeste está compuesta por tres características litológicas diferentes de las rocas, esto demuestra la necesidad de emplear diferentes pasaportes que es imposible que se pueda usar el mismo pasaporte para toda la excavación, ya que a medida que se avanza, la roca cambia de estructura y por ende el comportamiento ante los trabajos de voladura y luego de ejecutada esta .

### 3.2. Procesos Tecnológicos que se ejecutan durante la construcción

Proceso Tecnológico es el proceso que nace de necesidad de solucionar un problema, necesidad o situación de manera que, a través de un análisis y posterior diseño, nazcan las diversas tecnologías que existen hoy. Los túneles son construcciones con un alto nivel de tecnología, que avanza junto al paso de los



años, debemos conocer que la ejecución de estos grandes túneles para infraestructuras, carreteros, ferroviarios, o hidráulicos, suponen una gran complejidad tanto en el aspecto organizativo de la obra, como en el técnico en sí de la construcción: grandes máquinas y elementos auxiliares, periodicidad de los procesos (excavación, desescombro, sostenimiento, mantenimiento, seguridad del personal, adaptación continua a las condiciones del terreno, entre otros).

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

### **Perforación de los barrenos**

En el túnel Levisa Mayarí tramo IV, se realizan perforaciones cilíndricas de 45mm de diámetro y con una profundidad variable en dependencia de la estabilidad del macizo rocoso. El método de perforación utilizado es rotoperCUSión, se basa en la combinación de las siguientes acciones: percusión, rotación, empuje y barrido.

En esta actividad se utiliza el Tamrock Axera 6-240 es un jumbo electro hidráulico de dos brazos, para perforación rápida y precisa en túneles de secciones comprendidas entre 8 y 49m<sup>2</sup>. (Las características se pueden encontrar en los Anexos 23 y 24)

Luego de realizar la perforación de los barrenos, se comprueba si lo realizado en el frente corresponde con el patrón de voladura (Profundidad de los barrenos, espaciamiento dirección, ángulo de inclinación.)Teniendo en cuenta la cantidad de los barrenos (53-63) y el área de la sección (26-35m<sup>2</sup>) el artillero trabaja con dos ayudantes. La carga y relleno se realiza manual mecanizada. El tiempo medio de duración de la carga de un barreno oscila de 1.7 a 2.0 minutos. Como relleno puede ser empleado una mezcla de arcilla-arena, papel o cartón mojado (con relación de 1/2 o de 1/3), luego se realiza la explosión.



Figura 8 Máquina perforadora Tamrock Axera 6-240

### **Ventilación**

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

### **Saneamiento de la roca**

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

### **Carga y transporte de la roca**

La carga y transporte de la roca son utilizados con equipos especializados para obras subterráneas como el pala cargadora, Toro 400 y Dumper (camión volteo de perfil bajo). La carga de la roca tiene una duración de 20.6%. (Ver figuras 9 y 10 además de los anexos 19,20 y 23,24)



Figura 9 Máquina cargadora Toro 400



Figura 10 Camión volteo para el traslado del material, DUMPER (Moaz)

### **Sostenimiento**

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

### **Bulonado, depende del índice de calidad de la roca**

Bulones o pernos con anclaje mecánico

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



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

### Revestimiento

Los revestimientos en los túneles del trasvase se realizan según las características del macizo rocoso, en la mayoría de los casos con hormigón lanzado, con un espesor variable entre 5-15cm, además en el caso de zonas de fallas se colocan arcos de acero (4 barras de acero corrugado de ½ ") para asegurar una mejor estabilidad, luego se le aplica la capa de hormigón lanzado.

En el sostenimiento y el revestimiento la máquina utilizada es SIKA PM 4 207. (Ver figura 11 además de los Anexos 19 y 20)

En el Bulonado la máquina que se utilizaba era El Robolt 06-126 XL «Cement»(ver anexo 15 Y 16), pero en este momento el equipo se encuentra roto, por lo que compraron Máquina de Pasta de Cemento para cada frente de trabajo, adquiridas en el presente año



Figura 11 Máquina gunitadora SIKA modelo PM 4 207

#### 3.2.1. Ciclograma de trabajo

En el trasvase Este Oeste, Tramo IV Conexión II a Conexión IIIB, la brigada está compuesta por dos turnos de trabajo, con tres trabajadores cada uno y la misma está representada por un técnico de Construcción Civil, un operador de la máquina según la actividad que se realiza y un ayudante. Para realizar el ciclograma de trabajo se realizan cálculos para determinar el tiempo requerido en cada actividad, en este caso



se realizó el ciclograma mediante la fotografía laboral. En la tabla # 4 se puede apreciar el tiempo unitario planificado para diferentes avances, por características presentadas en el macizo en el tiempo de confección del trabajo, se estaba avanzando un metro.

Tabla 4. Ciclograma de trabajo planificado para las cuatro secciones del túnel.

Tramo	Frente de Trabajo	Actividad	Actividad Ciclo	Tiempo de Unitario Planificado Hrs	Tiempo Unitario Hrs(1ml)	Tiempo Unitario Hrs(1.5 ml)	Tiempo UnitarioHrs (2ml)	Tiempo Unitario Hrs(3ml)
Tramo IV	Conexión II-III	Excavación	Traslado e Instalación Jumbo	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72
			Barrenación	2,10	0,70	1,05	1,40	2,10
			Desinstalación y Traslado	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
			Carga y Voladura	1,50	0,60	0,90	1,20	1,50
			Ventilación	2,50	2,50	2,50	2,50	<b>2,50</b>
			Escombreo	1,76	1,76	2,63	3,51	5,27
			Ventilación	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
		Sostenimiento	Traslado e Instalación PM	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46
			Lubricación	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
			Proyección de Hormigón	0,50	0,20	0,29	0,39	0,59
			Desinstalación y Traslado PM	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
			Parada Tecnológica y Ventilación	1,37	1,37	1,37	1,37	1,37
		Bulonado	Traslado e Instalación Jumbo	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72
			Barrenación	0,03	0,47	0,33	0,47	0,44
			Desinstalación y Traslado	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
			Traslado e instalación Maquina de Pasta de Cemento	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83
			Preparación pasta de Cemento	0,02	0,29	0,21	0,29	0,28
			Colocación Bulones	0,08	1,17	0,83	1,17	1,11
			Limpieza de Maquina de Pasta de Cemento	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
			Desinstalación y Traslado	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
			Parada Tecnológica	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33
		Revestimiento	Traslado e Instalación PM	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46
			Lubricación	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
			Proyección de Hormigón	0,50	0,59	0,59	0,59	0,59
			Desinstalación y Traslado PM	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
			Parada Tecnológica y Ventilación	1,37	1,37	1,37	1,37	1,37
		Piso	Preparación de Rasante	4,00	0,44	0,67	0,89	1,33
			Encofrado	0,25	0,25	0,38	0,50	0,75
			Hormigonado y terminación	0,19	0,19	0,25	0,37	0,56
			Parada Tecnológica	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00

En el gráfico 1 se demuestra que el tiempo unitario planificado de las actividades es menor que el tiempo real. Se puede ver que la excavación, el sostenimiento y el piso son las actividades que más tiempo ocupan dentro del ciclograma de trabajo, el piso



se ve reflejado porque su duración es a causa de las seis horas que se debe esperar para que fragüe el hormigón. (Ver Anexo 11)

### PROCESOS TECNOLÓGICOS

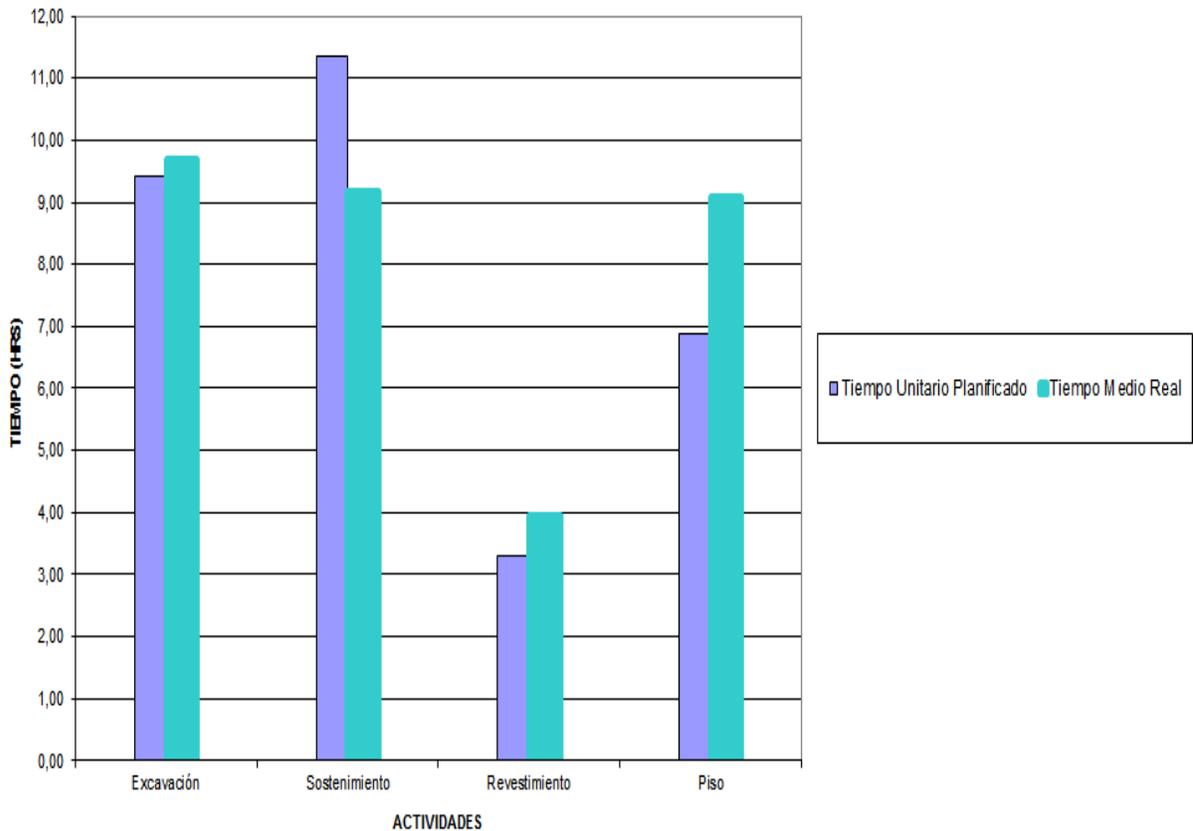


Gráfico 1. Representación del ciclograma de trabajo (planificado y real)

Además del tiempo se realizó un estudio de los costos reales para un metro de avance en la excavación, donde se demuestra que los costos reales no se parecen a lo planificado por proyecto. Todas las actividades no se comportan de la misma manera, en este caso la excavación, el sostenimiento y el revestimiento son las que más afectan la excavación, ya que hacen que el costo unitario planificado aumente. Esto se puede ver a simple vista en el gráfico 2

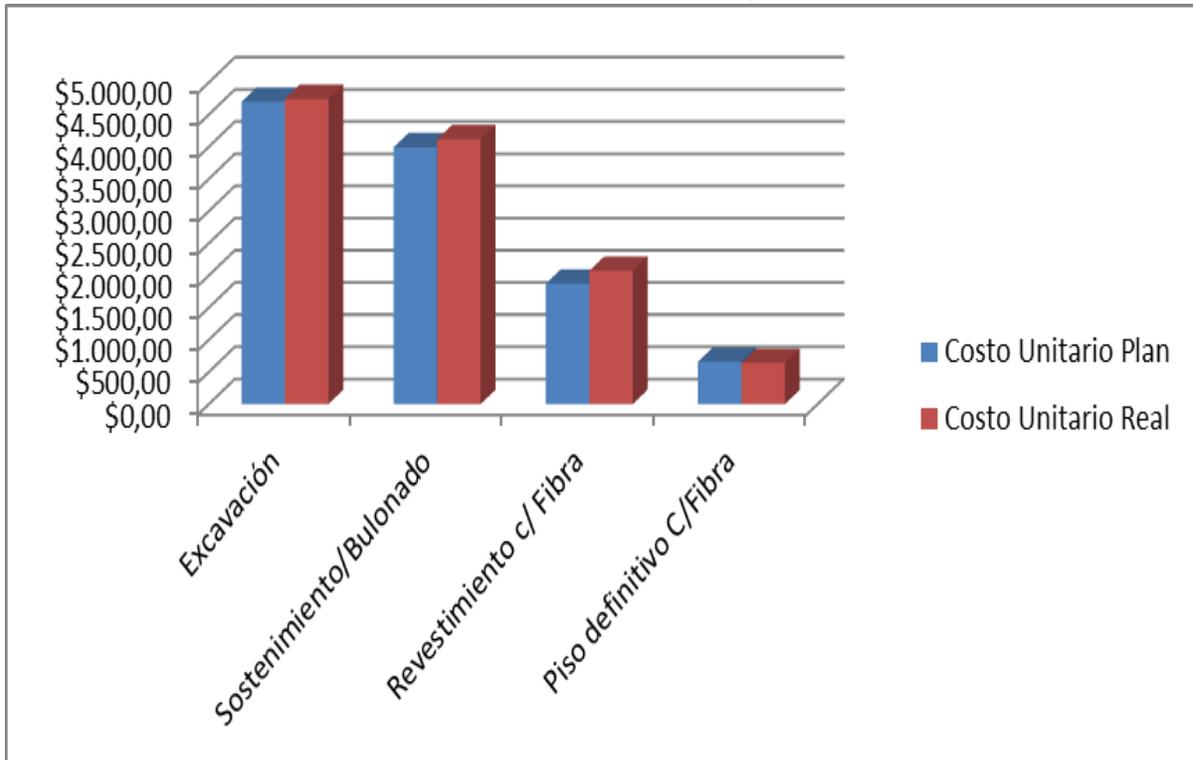


Gráfico 2. Representación del costo planificado y real para un metro de avance.

### 3.3. Aspectos que inciden negativamente en la eficiencia de los procesos tecnológicos

Después de realizar estudios de investigación con respecto a las variables de control (tiempo y costo) se pudo comprobar que los procesos tecnológicos que mayor inciden en la calidad de la construcción del túnel son:

1. Excavación
2. Sostenimiento

Debido a que la excavación y el sostenimiento son las actividades más costosas teniendo en cuenta el costo de mano de obra, materiales y uso de equipos, además de ser las que más tiempo consumen dentro del ciclograma de trabajo.

1. En la excavación y el sostenimiento se puede decir, que los aspectos que inciden negativamente en la eficiencia de los procesos tecnológicos son:

2. No hay correspondencia entre la litología y estructura del frente con lo que está concebido en el proyecto, es decir, la necesidad de actualizar en tiempo real lo que



hay en el frente de trabajo con respecto al tipo y características de las rocas y su estructura.

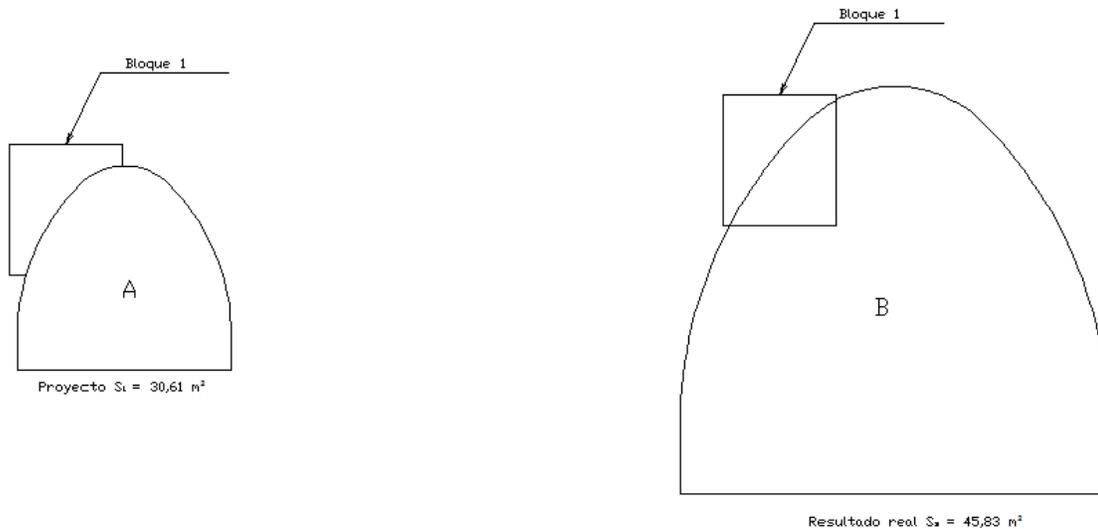


Figura 12 *Representación de como se provoca un derrumbe*

3. Se aplica el mismo pasaporte para todas las excavaciones sin tomar en cuenta la litología y estructura de los frentes.
4. Como consecuencia de un mal diseño se produce una sobre excavación, se incrementan los gastos por escombros y áreas para la escombrera, además aumentan los gastos de Sustancia Explosiva.
5. Aumenta la probabilidad de pérdida de estabilidad a consecuencia del aumento del área a proyectar como se muestra en la figura 12.
6. Se incrementa el área de la superficie a revestir y aumentan los costos por metros de excavación.
7. Se producen caídas de grandes volúmenes de roca que muchos de ellos sostienen bulonado y eso se debe a que la longitud que debe tener el bulón según Bienawski es de 3-4m y el utilizan en el tramo IV es de 1.70m. (Ver figura 13)

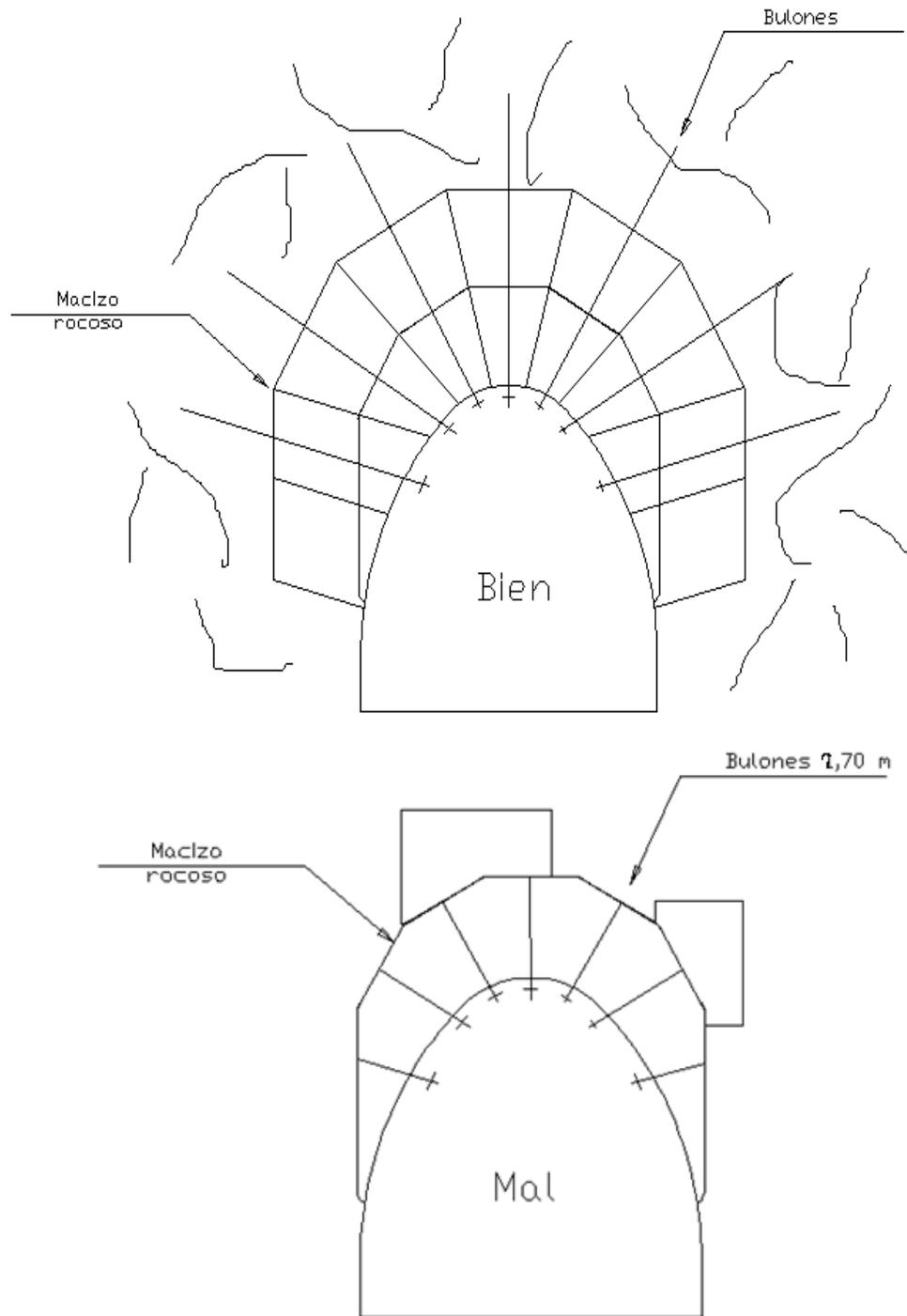


Figura 13 Representación de la ubicación de los bulones



8. En el trasvase Este Oeste, Tramo IV se utilizan bulones de 2.70m, pero si varía el área de la excavación también varían la dimensión de los bulones y eso no se tiene en cuenta.

Por lo expresado anteriormente se decide proponer un nuevo Patrón de Voladura, parecido al que realizó el DrC Yoandro Diéguez García en su Trabajo de Doctorado, por lo que se espera resultados parecidos.

### **Patrón de voladura para el túnel Levisa-Mayarí Tramo IV**

1. Se elige el tipo de máquina perforadora.

Jumbo Axera 06

2. Se determina el número de máquinas de perforación.

Una máquina

3. Se elige el tipo de sustancia explosiva y medios de explosión.

Elegimos la sustancia explosiva a partir del diámetro de perforación, la fortaleza de la roca la categoría del túnel según los gases y el flujo de agua.

Para este caso tomamos la sustancia explosiva Senatel Magnafrac en cartuchos con diámetro  $d_c = 32mm$ , longitud  $L = 500mm$  y masa  $q = 455g$ . Como medios de explosión tomamos detonadores no eléctricos, cordón detonante, detonadores eléctricos, línea eléctrica.

4. Número de barrenos.

$$N = 12.7 \frac{q * S}{\gamma * d_c^2 * \rho} \quad (1)$$

$q$  : Gasto específico de la sustancia explosiva ( $kg/m^3$ )

$S$  : Área de la sección transversal ( $m^2$ )



$\gamma$  : Coeficiente de carga de los barrenos

$d_c$  : Diámetro de los cartuchos (cm)

$\rho$  : Densidad de la sustancia explosiva en los cartuchos ( $g/cm^2$ )

$$N = 12.7 \frac{0.9 * 30.61}{0.6 * (3.2)^2 * 1.10}$$

$$N = 12.7 \frac{27.54}{6.75}$$

$$N = 51.81 \approx 52 \text{ barrenos}$$

5. Cantidad de barrenos en cada grupo.

$$N_c : N_a : N_{co} = l : a : b = 1 : 1.5 : 2 \tag{2}$$

$$m = 1 : 1.5 : 2 = 3.5 \tag{3}$$

$$N_c = \frac{N * l}{m} = \frac{52 * 1}{3.5} = 15 \tag{4}$$

$$N_a = \frac{N * a}{m} = \frac{52 * 1.5}{3.5} = 7$$

$$N_{co} = \frac{N * b}{m} = \frac{52 * 2}{3.5} = 30$$

$N$ : Número de barrenos

Reajuste de los barrenos

$N_c$ : 16 corte

$N_a$ : 6 arranque

$N_{co}$ : 30 contorno

6. Profundidad de los barrenos.

1 m



7. Gasto de la SE.

$$Q = q * v = q * S * P = 0.9 * 30.61 * 1 \quad (5)$$

$$Q = 27.54kg$$

$P$ : Profundidad del conjunto de barrenos (arranque y contorno) ( $m$ )

$S$ : Área de la sección transversal ( $m^2$ )

$q$ : Gasto específico de la SE ( $kg/m^3$ )

8. La masa media de la carga para un barreno

$$qm = \frac{Q}{N} = \frac{27.54}{52} = 0.52kg \quad (6)$$

$Q$ : Masa de la carga de sustancia explosiva para un ciclo.

$N$ : Número de barrenos.

9. Se determina la masa de la carga de los barrenos de cada grupo

$$qc = (1.1 - 1.2)qm = 1.2 * 0.52 = 0.62 \text{ (1 cartucho con 37 cm)} \quad (7)$$

$$qa = qm = 0.52 \text{ (1 cartucho con 15 cm)} \quad (8)$$

$$qco = (0.85 - 0.95)qm = 0.85 * 0.52 = 0.44 \text{ (1 cartucho)} \quad (9)$$

10. Se comprueba el coeficiente real de llenado de los barrenos.

$$\gamma_c = \frac{l * Nc}{lc} = \frac{0.50 * 1.37}{1.26} = 0.54 \quad (10)$$

$$lc = \frac{P}{\text{sen } 87.75^\circ} = \frac{1.05}{0.99} = 1.26 \quad (11)$$

$$\gamma_a = \frac{l * Na}{la} = \frac{0.50 * 1.15}{1} = 0.57 \quad (12)$$

$$\gamma_{ca} = \frac{l * Nco}{lco} = \frac{0.50 * 1}{1.05} = 0.47 \quad (13)$$



$$lco = \frac{P}{\text{sen } 86.58^\circ} = \frac{1.05}{0.9982} = 1.05 \quad (14)$$

11. Se puntualiza el gasto real de la sustancia explosiva para un ciclo.

$$Qr = qc + Nc * qa + Na * qco + Nco \quad (15)$$

$$Qr = 0.62 + 16 * 0.52 + 6 * 0.44 + 30$$

$$Gr = 26.24kg$$

12. Distancia entre los barrenos de contorno

$$dm = \frac{Pe}{Nco} = \frac{21.24}{30} = 0.70m \quad (16)$$

Perímetro de la excavación antes de ubicar los barrenos de contorno en el frente.

$$Pe = (\text{Ancho de la sección}) + (h \text{ de la pared recta} * 2) + \frac{(r \text{ mayor} * \pi)}{2} + \frac{(r \text{ menor} * \pi)}{2} \quad (17)$$

$$Pe = (6.40) + (0.92 * 2) + \frac{(6.40 * 3.1416)}{2} + \frac{(1.88 * 3.1416)}{2}$$

$$Pe = 21.24$$

$$h \text{ de la pared recta} = h \text{ total de la excavación} - \left( \frac{\text{ancho de la sección}}{2} \right) - r \text{ menor} \quad (18)$$

$$h \text{ de la pared recta} = 6 - \left( \frac{6.4}{2} \right) - 1.88$$

$$h \text{ de la pared recta} = 0.92$$

$$\text{radio menor} = 6.4 - \sqrt{\left( \frac{6.4}{2} \right)^2 * 2}$$

$$\text{radio menor} = 1.88$$

$$\text{radio mayor} = \text{ancho de la sección transversal} = 6.4$$

Número de barrenos por el piso.



$$N_{cop} = \frac{B - 0.4}{dm} + 1 = \frac{6.4 * 0.4}{0.70} + 1 = 9.57 \approx 9 \quad (19)$$

Recalculamos la distancia entre barrenos.

$$d_{cop} = \frac{B - 0.4}{N_{cop} - 1} = \frac{6.4 - 0.4}{9 - 1} = 0.75m \quad (20)$$

Número de barrenos por el lado.

$$N_{col} = \frac{H - 0.4}{dm} = \frac{0.92 - 0.4}{0.70} = 0.74 \approx 1$$

$$d_{col} = dm = 0.70m \quad (21)$$

Número de barrenos por el techo.

$$N_{cot} = N_{co} - N_{cop} - 2N_{col} = 30 - 9 - 2(1) = 19 \quad (22)$$

Para calcular la distancia de los barrenos por el techo se calculó el perímetro restándole a la altura y al ancho de la excavación 0.20m.

$$Pe = (\text{Ancho de la sección}) + (h \text{ de la pared recta} * 2) + \frac{(r \text{ mayor} * \pi)}{2} + \frac{(r \text{ menor} * \pi)}{2} \quad (23)$$

$$Pe = (6.00) + (0.72 * 2) + \frac{(6.00 * 3.1416)}{2} + \frac{(1.78 * 3.1416)}{2}$$

$$Pe = 19.65$$

$$h \text{ de la pared recta} = 6.00 - \left(\frac{6.00}{2}\right) - 1.78$$

$$h \text{ de la pared recta} = 1.22$$

$$\text{radio menor} = 6.00 - \sqrt{\left(\frac{6.00}{2}\right)^2 * 2}$$

$$\text{radio menor} = 1.78$$

$$\text{radio mayor} = \text{ancho de la sección transversal} = 6.00$$

Distancia entre barrenos por el techo.



$$d_{cot} = \frac{P_{menor}}{N_{cot}} = \frac{19.65}{19} = 1.03m \quad (24)$$

14. Calculo de los índices técnicos económicos.

- Avance por ciclo.

$$l = \rho' * \delta = 1.05 * 0.9 = 0.94m \approx 1m \quad (25)$$

- Metros cúbicos de roca a arrancar(en el macizo)

$$V_r = S * l = 30.61 * 1 = 30.61m^3 \quad (26)$$

- Cantidad total de metros de perforación

$$L_p = l_c * N_c + l_a * N_a + l_{co} * N_{co} \quad (27)$$

$$L_p = 1.26 * 16 + 1 * 6 + 1.05 * 30$$

$$L_p = 57.66m$$

- Metros de perforación por metros de avance

$$L_p' = \frac{L_p}{l} = \frac{57.66}{1} = 57.66m \quad (28)$$

- Metros de perforación por metros cúbicos de roca a arrancar

$$L_p'' = \frac{L_p}{V_r} = \frac{57.66}{28.77} = 1.99m^3 \quad (29)$$

- Gasto de SE por metros de avance

$$G_r = \frac{Q_r}{l} = \frac{26.24}{1} = 26.24kg/m \quad (30)$$

- Gasto de SE por metros cúbicos de roca a arrancar

$$G_v = \frac{Q_r}{V_r} = \frac{26.24}{30.61} = 0.85 kg/m^3 \quad (31)$$

- Gasto de detonadores por metros de avance

$$N_{dl} = \frac{N}{l} = \frac{52}{1} = 52 \quad (32)$$

- Gasto de detonadores por metros cúbicos de avance.

$$N_{dl} = \frac{N}{l} = \frac{52}{30.61} = 1.69 \quad (33)$$



Tabla 5. Resultados de la LMR, para ubicar los barrenos de corte

Seccion de corte	Valor de la LMR	Lado de la Seccion	Valor de la LMR	Lado de la Seccion
1	$B1=1.5*D2$	$L1=1.41*B1$	$B1=0.12$	$L1=0.16$
2	$B2=1.4*B1$	$L2=2.12*B2$	$B2=0.16$	$L2=0.33$
3	$B3=2.10*B2$	$L3=2.12*B3$	$B3=0.33$	$L3=0.69$
4	$B4=2.12*B3$	$L4=2.12*B4$	$B4=0.69$	$L4=0.69$

Como resultado del cálculo se diseñó un pasaporte de perforación y voladura que se muestra en la figura 9.

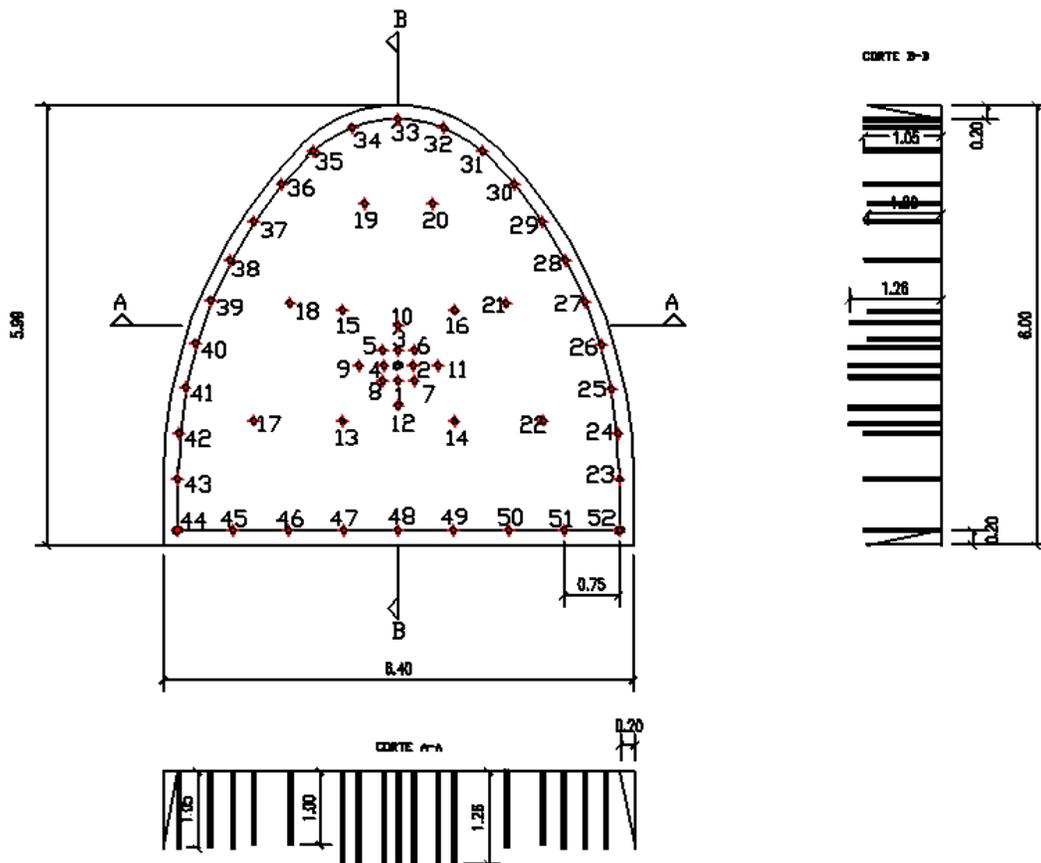


Figura 9. Patrón de voladura

En el gráfico 3 se demuestra una comparación de los datos que obtuvo el DrC Yoandro Diéguez García en el patrón de voladura para la sección 1 en su trabajo de



doctorado, y el patrón de voladura realizado en el trasvase para el tramo IV con respecto al patrón de voladura propuesto en este trabajo. Se puede ver a simple vista que existe entre los valores una gran diferencia en los costos, en los volúmenes de roca a arrancar, en los gastos de detonadores y de sustancia explosiva como en los metros de perforación. Esto demuestra que el pasaporte propuesto en este Trabajo de Diploma será de gran utilidad en la entidad, ya que se ahorrará tanto en presupuesto, como en materiales. (Ver Anexo 10, 11 y 13)

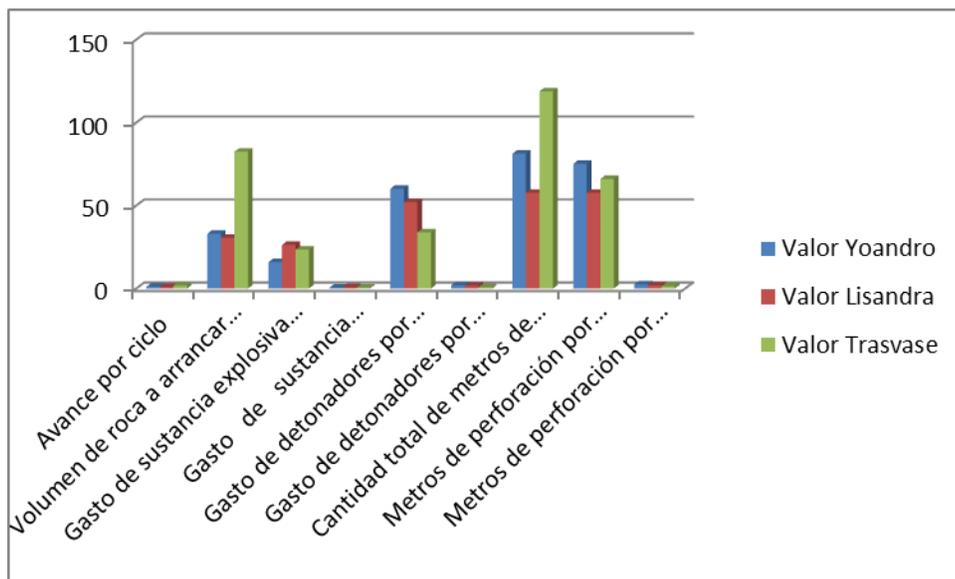


Gráfico 3. Comparación entre los índice técnico económico

### 3.4. Medidas para mejorar la efectividad y la eficiencia en los procesos tecnológicos

1. Actualizar en tiempo real las características litoestructurales y las propiedades físico-mecánicas en los frentes de laboreo, por su influencia sobre los pasaportes de voladura y sostenimiento.
2. Se propone un nuevo pasaporte de perforación y voladura similar al propuesto por el Dr. C. Yoandro Diéguez García, por lo que se espera resultados similares en el túnel tramo IV.
3. Se propone que una vez realizada la voladura los topógrafos realicen el cálculo de la diferencia del área de proyecto con respecto al real, con el fin de



solicitar con precisión la cantidad de hormigón por metro de avance necesario para el sostenimiento del frente y evitar con ello gastos innecesarios por este concepto.

4. Con respecto al escombro se propone que realicen la carga y transporte en cuanto se termine la ventilación, porque de no ser así se debe esperar a que se evacúe el material para continuar con las demás actividades y eso traería como consecuencia aumento de tiempo en el ciclograma de trabajo.



## **CONCLUSIONES**

1. A partir de la caracterización de los procesos tecnológicos que se ejecutan durante la construcción del Tramo IV en el trasvase Este Oeste, se identificó a la excavación y sostenimiento como los de mayor incidencia en la eficiencia calidad de la construcción.
2. Considerando las deficiencia que afecta los diferentes procesos tecnológicos se proponen 4 medidas para mejorar la efectividad y la eficiencia en los procesos tecnológicos dentro de las que sobresale “Actualizar en tiempo real las características litoestructurales y las propiedades físico-mecánicas en los frentes de laboreo, por su influencia sobre los pasaportes de voladura y sostenimiento”



## **RECOMENDACIONES**

1. Mejorar los sistemas de ventilación, para disminuir las horas de ventilación.
2. Proponer hormigoneras móviles para disminuir las horas de traslado de los trompos desde la planta hacia el frente de trabajo.
3. Realizar un nuevo pasaporte a medida que cambien las condiciones lito estructurales del macizo en el frente de trabajo.
4. No utilizar los nichos de volteo cercanos al frente para depositar el escombros ya que produce atraso durante el proceso de gunitado.
5. Proponer el software ContExc desarrollado en el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, para que realicen la evaluación cualitativa del macizo mediante las clasificaciones de Barton y Bienawski además ante la presencia de abundante agua emplear la propuesta realizada por Cuesta.



## BIBLIOGRAFÍA

1. (s.f.). *Manual Práctico de Voladura, EXSA.*
2. Alberto Rey Sabín, Gabriel Pardo Fernandez, Raúl Hurtado Agra. (2010). *Túneles y Obras Subterráneas*. <http://www.ebah.com.br>. Recuperado el mayo de 2017
3. Alfredo Avello, g. d. (2006). (F. Dialnet, Entrevistador)
4. Alvarez, I. c. (2014). *Nuevas Tendencias en los Revestimientos de Túneles.*
5. Arias, R. O. (2014). *Trabajo de Diploma de Construcción Civil.*
6. Brunner, A. (1958). (Patente Austriaca Nº 197851).
7. Cuesta Recio A, (2010), *Procedimiento para elegir la técnica de control de las filtraciones que afectan las excavaciones subterráneas en macizos rocosos poco porosos y agrietados.* Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas.
8. Dehispa. Los trasvase de España. (s.f.).
9. Diéguez García Y (2014). *Metodología para el Diseño de Voladuras de Contorno en el Laboreo de Excavaciones Subterráneas Horizontales.* Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas.
10. García, Y. D. (2014). *Metodología Para el Diseño de Voladuras de Contorno en el Laboreo de Excavaciones.* Moa.
11. Gómez, A. (s.f.). *Comité de túneles y obras subterráneas, entidad coordinada por CDT.*
12. González de Vallejo. I. 1998. *Las clasificaciones geomecánicas para túneles.* Ingeotúneles: Carlos López Jimeno \_\_ Madrid. I. T. S. de Ingenieros de Minas. U. P. Madrid. T – I, 25 – 66p.
13. González de Vallejo., L., et al. (2002). *Ingeniería Geológica.* Madrid.
14. Jimeno, C. L. (s.f.). *Ingeo Túnel Volumen2.*



15. Jose Bernaola Alonso, Jorge Castilla Gómez, Juan Herrera Herbert. (2013). *Perforación de rocas en Minería*. Madrid.
16. López, C. 1998. Estefanía Puebla. S. Túneles hidrotécnicos. Ingeo túneles: Madrid. I. T. S. De Ingenieros de Minas. U. P. Madrid. T I, 345 – 369p
17. Noguel, J. O. (1998). *Fracmentació de rocas con explosivos*. La Habana: Felix Varela.
18. Palmstrom. A. Caracterización de Macizos Rocosos mediante el RMI y sus aplicaciones en mecánica de rocas. Ingeo túneles: Carlos López Jimeno \_ Madrid. 1998. I. T. S. de Ingenieros de Minas. U. P. Madrid. TII, 79–107p.
19. Proenza, J. 1998. Mineralización de cromitas en la Faja Ofiolítica Mayarí-Baracoa (Cuba). El ejemplo del Yacimiento Mercedita. Tesis doctoral. Universidad de Barcelona. 227 p.
20. Raúl Hurtado Agra, Alberto Rey Sabin, Gabriel Pardo Fernández. (2010). Túneles y Obras subterráneas.
21. Roberto Blanco Torrens, Gilberto Sargentón Romero. (2009). *Proyecto de Construcción Subterránea*. La habana: Felix Varela.
22. Rouco Suárez I, 2015, Evaluación de la estabilidad y propuesta de sostenimiento para el túnel Levisa-Mayarí Tramo IV. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
23. Soto Saavedra P.R. (2004) Construcción de Túneles. Título de Constructor Civil. Universidad austral de chile. Facultad de ciencias de la ingeniería .Escuela de Construcción Civil.
24. Torrens, R. B. (s.f.). *Laboreo de Excavaciones Horizontales*.
25. Ubierna, J. A. (1997). *Historia de los túneles y su evolución histórica, Manual de túneles y obras subterráneas*. Madrid.
26. Yoandro Diéguez García, Jose Otaño Noguel, Gilberto Sargentón Romero . (2014). Diseño de Voladura de Contorno en túneles. *Minerí y Geología/ v 30 n. 3 julio septiembre/ página 49-66*.



Yuan, Y., et al.(2000). Tunnel Waterproofing Practices in China. *Tunneling and Underground Space Technology*, 15(2), 227-233.

Zapata, Y. N. (2013). *Diseño de voladura de contorno para el laboreo de Túneles*. Academia Española.

Zhang, J., & Shen, B. (2004). Coal mining under aquifers in China: a case study. *International Journal of Rock Mechanical & Mining Sciences*, 41, 629- 639.



# ANEXOS

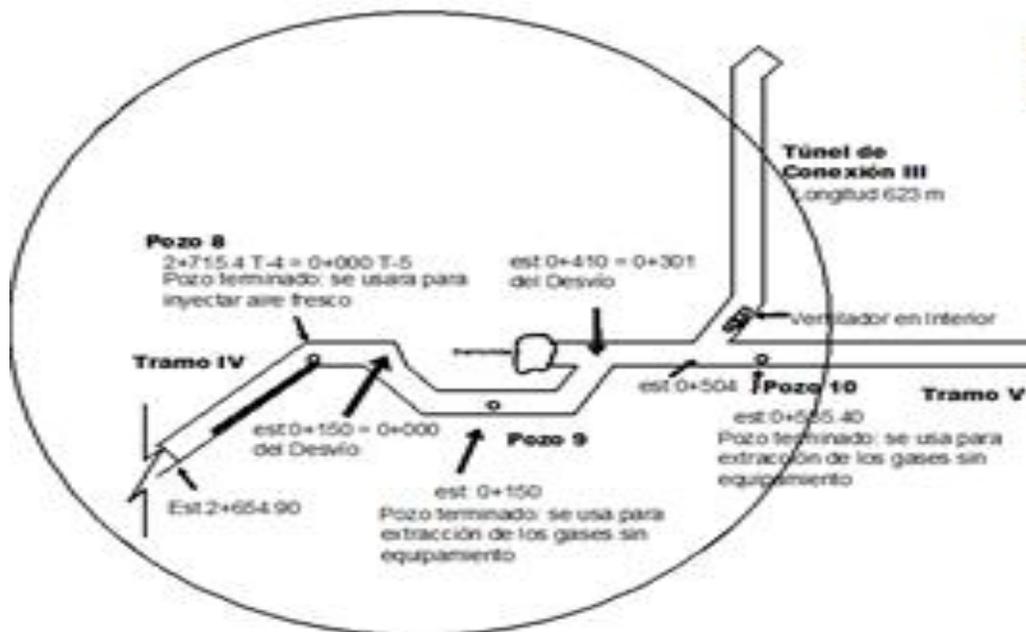


Anexo1. Túnel Levisa Mayarí Tramo IV Conexión II a Conexión IIIB.



Anexo 2 Esquema de ventilación.

Esquema de Ventilación  
Conexión II tramo IV





Anexo 3. Tabla 1: Forma de la sección típica 4.

<b>Sección Típica 4</b>					
Dimensiones de la excavación					
Ancho de sección (m)	Altura total sección (m)	Alto pared recta (m)	Área de sección (m <sup>2</sup> )	Perímetro sección (m)	Avance posible por ciclo (m)
6,4	6	0,92	30,61	21,24	1
<b>Etapas de laboreo</b>					
I Etapa	Excavación con perforación y voladura: 1 m				
II Etapa	Hormigón lanzado con 5 cm de espesor después de cada voladura y avanzar hasta 3 m si el frente lo permite				

Anexo 4. Sustancia explosiva utilizada en el tramo 4 Conexión II (Senatel Magnafrac)





Anexo 5. Tipos de detonadores no eléctricos.



Anexo 6. Conductos de ventilacion utilizados en el túnel.



Anexo 7. Bulones y anclas.





Anexo 8. Anclas



Anexo 9. Pozo de ventilación.





Anexo 10. Tabla 2: Resultados de los índices técnicos económicos.

Índices	Valor Yoandro	Valor Lisandra	Valor Trasvase
Avance por ciclo (m)	1,08	1	1,8
Volumen de roca arrancado en el macizo (m <sup>3</sup> )	33,06	30,61	82,53
Gasto de sustancia explosiva por metro de avance (kg/m)	15,87	26,24	23,43
Gasto de sustancia explosiva por metro cúbico de avance (kg/m <sup>3</sup> )	0,52	0,85	0,51
Gasto de detonadores por metro de avance (u/m)	60,18	52	33,88
Gasto de detonadores por metro cúbico de avance (u/m <sup>3</sup> )	1,97	1,69	0,73
Cantidad total de metros de perforación (m)	81,2	57,66	118,83
Metros de perforación por metro de avance (m/m)	75,18	57,66	66,01
Metros de perforación por metro cúbico de avance (m/m <sup>3</sup> )	2,46	1,99	1,43



Anexo 11. Tabla 3: Ciclograma de trabajo para 1m de avance (planificado y real)

Tramo	Fronte de Trabajo	Actividad	Actividad Ciclo	Tiempo de Unitario Planificado o Hrs (1 ml)	Tiempo Unitario Real Hrs (1 ml)	Tiempo Unitario Real Hrs (1 ml)	Tiempo Unitario Real Hrs (1 ml)	MEDIA Unitario Real Hrs (1 ml)	
Tramo IV	Conexión III		Traslado e Instalación Jumbo	0.72	0.23	0.25	0.26	0.25	
			Barrenación	0.70	1.15	1.02	1.00	1.02	
			Desinstalación y Traslado	0.63	0.25	0.23	0.25	0.25	
			Carga y Voladura	0.60	1.58	1.75	1.50	1.58	
			Ventilación	2.50	2.50	2.58	2.40	2.50	
			Escombro	1.76	2.00	2.10	2.08	2.08	
			Ventilación	2.50	2.00	2.00	2.25	2.00	
			Traslado e Instalación PM	0.46	0.41	0.50	0.33	0.41	
			Lubricación	0.25	0.08	0.16	0.08	0.08	
			Proyección de Hormigón	0.20	0.70	0.75	0.66	0.70	
	Piso			Desinstalación y Traslado PM	0.63	0.75	0.66	0.50	0.66
				Parada Tecnológica y Ventilación	1.37	2.00	2.25	2.10	2.10
				Traslado e Instalación Jumbo	0.72	0.30	0.25	0.25	0.25
				Barrenación	0.47	0.75	0.05	0.58	0.58
				Desinstalación y Traslado	0.63	0.25	0.25	0.23	0.25
				Traslado e instalación Máquina de Pasta de Cemento	0.83	0.33	0.41	0.50	0.41
				Preparación pasta de Cemento	0.29	0.33	0.33	0.41	0.33
				Colocación Bulones	1.17	0.75	0.83	0.75	0.75
				Limpieza de Máquina de Pasta de Cemento	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
				Desinstalación y Traslado	0.67	0.41	0.33	0.26	0.33
			Parada Tecnológica	3.33	2.00	2.05	2.00	2.00	
			Traslado e Instalación PM	0.46	0.41	0.36	0.33	0.35	
			Lubricación	0.25	0.08	0.16	0.10	0.10	
			Proyección de Hormigón	0.59	0.33	0.70	0.75	0.70	
			Desinstalación y Traslado PM	0.63	0.75	0.66	0.70	0.70	
			Parada Tecnológica y Ventilación	1.37	2.00	2.15	2.10	2.10	
			Preparación de Rasante	0.44	0.75	0.63	0.70	0.75	
			Encofrado	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	
			Homigonado y terminación	0.19	2.00	2.16	2.10	2.10	
			Parada Tecnológica	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	
			<b>30.94</b>	<b>31.67</b>	<b>32.34</b>	<b>31.75</b>	<b>31.91</b>		



Anexo 12. Tabla 4: Comparación entre el costo planificado y real de las actividades para un metro de avance.

<b>PRESUPUESTO POR PARTIDAS GRUESAS TÚNEL LEVISA-MAYARÍ TRAMO IV Frente Conexión II- Conexión III</b>			
<b>Actividad</b>	<b>U/M</b>	<b>Costo Unitario Plan</b>	<b>Costo Unitario Real</b>
Excavación	m	\$4.698,04	\$4.744,05
Sostenimiento	m	\$1.012,61	\$1.406,75
Bulonado	m	\$2.978,96	\$2.709,94
Revestimiento c/ Fibra	m	\$1.872,15	\$2.073,45
Piso definitivo C/Fibra	m	\$659,37	\$639,10

Anexo 13. Tabla 5: Datos generales del pasaporte propuesto en este trabajo de diploma.

<b>Índice</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>
Sección de la excavación	m <sup>2</sup>	30.61
Fortaleza de la roca Según Protodiakonov		3
Máquina Perforadora Tipo Jumbo Axera 06	u	1
Número de barrenos por ciclo Total	u	52
Corte	m	16
Arranque	m	6
Contorno	m	30
Coefficiente de utilización de los barrenos		0.9
Gasto de Sustancia Explosiva/Por ciclo	kg	26.14
Por metros cúbicos	kg	0.9
Por metros de avance	kg	26.14
Medios de explosión/Tipo de detonadores no eléctricos		
Por metros de avance	u	52
Por metros cúbicos	u	1.8
Relleno Material/Cantidad		
Avance del frente por ciclo	m	1
Salida de roca por ciclo (en el macizo)	m <sup>3</sup>	30.61



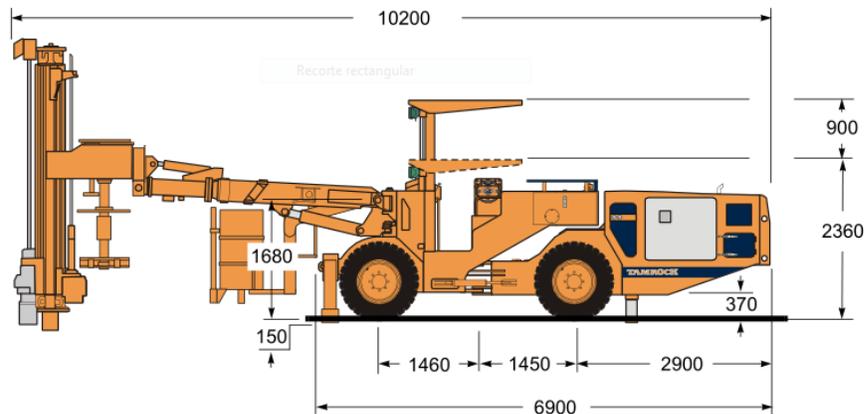
Anexo 14. Tabla 6: Parámetros de las cargas de los barrenos.

No de barrenos	Grupo de barrenos	Cantidad de barrenos	Longitud de los barrenos	Ángulo de inclinación	
				Vertical	Horizontal
1-16	Corte	16	1,26	87,75	0
17-22	Arranque	6	1	90	0
23-52	Contorno	30	1,058	86,58	86,58
23-31	Repié	9	1,05	86,58	86,58

Continuación Tabla 6.

No de barrenos	Magnitud de la carga		Coeficiente de llenado	Tipos de detonadores	Intervalo de retardo	Orden de explosión
	Vertical	Horizontal				
1-16	0,62	1,37	0,69	eléctrico	0	I
17-22	0,52	1,15	0,58	no eléctrico	25	II
23-52	0,44	1	0,54	no eléctrico	50	IV
23-31	0,44	1	0,54	no eléctrico	50	III

Anexo 15. ROBOT 06-126 XL Cement.





Anexo 16. Datos de la máquina Robolt 06-126 XL Cement.

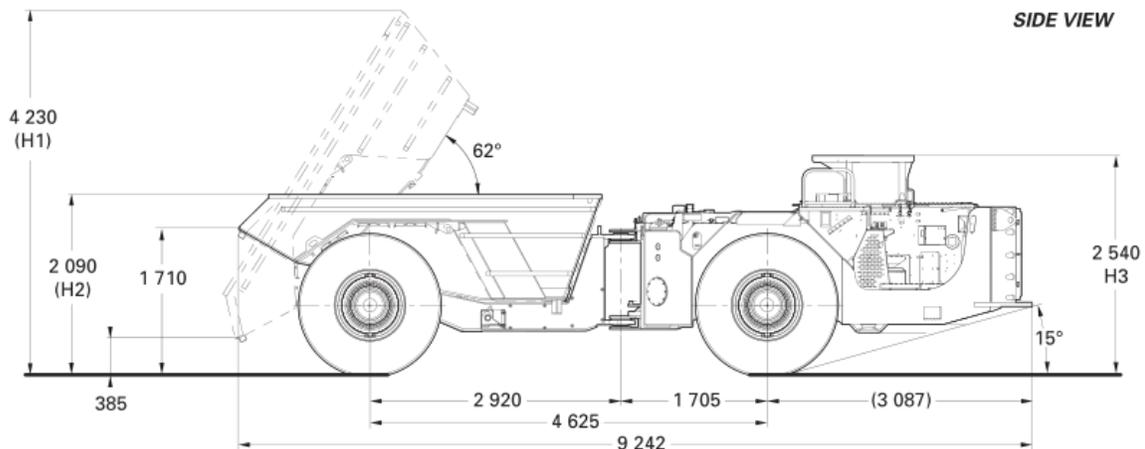
### PORTADOR

Modelo	CB 06
Motor Diesel	Deutz BF4M 1012 C, 70 kW (95hp)
- Escape	Catalizador
Transmisión hidrostática de automoción	
Caja de transferencia	Reductora Clark-Hurth
Ejes, delantero y trasero	Case New Holland D63
- Oscilación	Eje trasero, 2 x 10°
- Neumáticos	12.00 x 20
Dirección	Chásis articulado, 2 x 37°
Frenos	
- Servicio	Transmisión hidrostática
- Emergencia y aparcamiento	Frenos de disco múltiple, hidráulicos en baño de aceite en ambos ejes
Estabilizadores	2 patas, delante 2 gatos hidráulicos, atrás
Techo de seguridad	Hidráulico, FOPS
- Posibilidad de bajada	900 mm
Depósito de combustible	160 litros
Tanque de aceite hidráulico	330 + 50 litros

### CIRCUITO DE AIRE

Compresor	C 1000, de tornillo
- Capacidad	1.1 m <sup>3</sup> a 7 bar
Motor eléctrico	7.5 kW (10 hp)

Anexo 17. Dumper (Moaz).





## Anexo 18. Características del Dumper

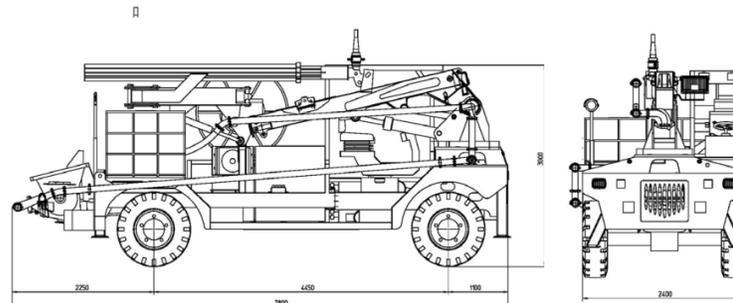
### ELECTRICAL SYSTEM

System voltage: Start & accessories 24 V	<input checked="" type="radio"/>
Mine duty high output alternator: 140 Amps	<input checked="" type="radio"/>
Isolation switch lockout	<input checked="" type="radio"/>
24/12V converter	<input checked="" type="radio"/>
Driving lights LED: 8 x 40W	<input checked="" type="radio"/>
Tail and brake lights	<input checked="" type="radio"/>
Detachable service light (Required for CE Approval Vehicles)	<input type="radio"/>
Amber strobe light - Ignition on	<input type="radio"/>

### POWER UNIT

Arctic oil	<input type="radio"/>
Block heater (240V)	<input type="radio"/>
Corrosion Resistant Radiator	<input type="radio"/>

## Anexo 19. SIKA PM 4 207



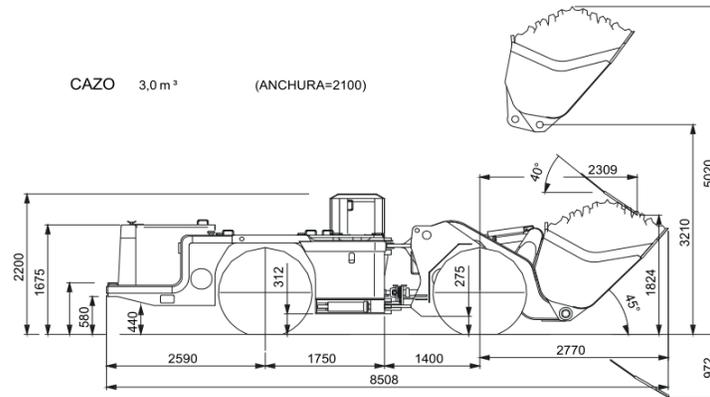
Peso total: 14.950 kg. (Peso incluido compresor o contrapeso equivalente)  
 Largo: 7800 mm      Altura: 3000 mm      Ancho: 2400 mm

## Anexo 20 Datos del motor de la PM.

<b>Motor:</b>		
Motor eléctrico 400/440V / 50/60 Hz 1500/1800 1/min.	kW	55
<b>Chasis c/tracción a las cuatro ruedas:</b>		
<b>Motor Diesel 4 cilindros Deutz</b>	kW	75
Eje delantero direccional	kg	7.500
Eje trasero direccional	kg.	7.500
4 frenos de disco en baño de aceite		
Transmisión hidrostática de 2 velocidades		
Ángulos de vadeo (delantero/trasero)		24°/27°
<b>Bomba de aditivos sincronizada:</b>		
<b>Campo de regulación máx</b>	l/min	12
Presión máxima	bar	15
Depósito de aditivos	l	1x1.000



## Anexo 21 Dimensiones del Toro 400.



## Anexo 22 Datos del motor del Toro 400.

### Motor Estándar

Motor Diesel	Deutz BF6L 413 FW
Potencia	102 kW/2300 r/min (139 hp)
Par	487 Nm 1500 r/min
Número de cilindros	V 6
Desplazamiento	9572 cm <sup>3</sup>
Sistema de refrigeración	Enfriado por agua
Principio de combustión	4-tiempos/cámara turbulenta
Sistema eléctrico	24V
Filtración de aire	Donaldson
Sistema de escape	Purificador catalítico, silenciador y tubo de escape
Capacidad tanque combustible	180 l (47 gal.)