

OPTIMIZACIÓN DEL USO DE UNA ROZADORA PARA LA EXCAVACIÓN DEL TÚNEL DEL PROYECTO DE AMPLIACIÓN DE LA PLANTA CACHÍ



Abstract

The construction of tunnels is an activity that is performed in our country mainly as part of the works necessary for the generation of electrical energy, generally using the conventional methodology for excavation.

As a result of a consultancy to the Cachí Plant Expansion project, was born the idea of using a roadheader, being this the first time that a miner would be used for digging a tunnel in Costa Rica.

The intention of this project is, in addition to creating a spreadsheet of yields of progress that is reliable; to analyze scenarios in order to be able to propose ideas on how to optimize the use of the roadheader; taking into account the geometrical and geotechnical characteristics of the tunnel and at the same time that involve the necessary activities to comply with a cycle of excavation as the extraction of materials and implementation of temporary support.

The performance calculations are based on cycles of excavation with times of activities already known and used, from these results, is the times that could be reduced and what activities can be done in parallel are discussed, due to the facilities that the ripper presents.

It is shown that the use of the roadheader significantly reduces the time of completion of the tunnel to dig, achieving compressed dead times and placing tasks in parallel, while this is not possible with the conventional method.

Key words: construction – performance – optimization - roadheader – excavation cycle.

Resumen

La construcción de túneles es una actividad que se realiza en nuestro país principalmente como parte de las obras necesarias para la generación de energía eléctrica, generalmente utilizando metodología convencional para la excavación.

A raíz de una consultoría para el Proyecto de Ampliación de la Planta Cachí, nació la idea de utilizar una máquina rozadora, siendo esta la primera vez que se utilizaría una minadora para la excavación de un túnel en Costa Rica.

Por esto, la intención de este proyecto es, además de crear una hoja de cálculo de rendimientos de avance que sea confiable; analizar escenarios que permitan plantear ideas de cómo optimizar el uso de la rozadora en el trabajo de ampliación de la planta; tomando en cuenta las características geométricas y geotécnicas del túnel y al mismo tiempo que se involucren las actividades necesarias para cumplir un ciclo de excavación como la extracción de material y la puesta de soporte temporal.

Los cálculos de rendimiento se basan en ciclos de excavación con tiempos de actividades ya conocidos y utilizados, donde a partir de estos resultados se analiza cuáles son los tiempos que se pueden reducir y qué actividades se pueden realizar en forma paralela debido a las facilidades que presenta la rozadora.

Se demuestra que el uso de la rozadora reduce significativamente los tiempos de ejecución del túnel a excavar, logrando comprimir tiempos muertos y colocando tareas de manera paralela, lo que con el método convencional no se podría.

Palabras clave: construcción-rendimiento-optimización – rozadora – ciclo de excavación

Optimización del uso de una rozadora para la excavación del túnel del Proyecto de Ampliación de la Planta Cachí

ALBERTO SOLANO QUIRÓS

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Agosto del 2011

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

Prefacio	1
Resumen ejecutivo.....	2
Introducción.....	4
Marco teórico	6
Métodos de excavación de túneles	7
Máquinas rozadoras	10
Criterios de elección de una rozadora.....	13
Generalidades del Proyecto.....	16
Etapas constructivas del túnel	17
Excavación del túnel	19
Caracterización geotécnica	19
Planeamiento constructivo de la excavación ..	21
Rozadora en el Proyecto Ampliación de la Planta Hidroeléctrica Cachí	24
Posibles riesgos en la excavación utilizando la rozadora	26
Ciclos de excavación del túnel con rozadora	29
Control de producción y costos (Formulario F10)	35
Metodología	36
Resultados	38
Análisis de los resultados.....	60
Conclusiones.....	65
Recomendaciones	67
Apéndices	68
Anexos	69
Referencias	70

Prefacio

Para la satisfacción de la demanda energética se debe recurrir a la construcción de proyectos para generación, generalmente hidroeléctricos, lo que en su mayoría implica la construcción de obras subterráneas como túneles para la conducción de aguas, pozos y galerías.

Estas obras a su vez tienen un peso económico importante sobre el proyecto, por lo que se convierten en elementos de decisión en cuanto a la ejecución del mismo.

Actualmente es común observar que para la ejecución de este tipo de proyectos se utilice el método de excavación convencional de perforación y voladura, como lo fue en la excavación del túnel del Proyecto Hidroeléctrico Pirrís, en el que se obtuvieron buenos resultados.

No obstante, ¿por qué no aprovechar los avances que se han logrado con respecto a otros equipos, con el fin de obtener aun mejores resultados y mayor seguridad para el personal al frente de la construcción del túnel?

En el Proyecto de Ampliación Planta Cachí, se pretende utilizar la rozadora como un nuevo equipo que satisfaga los requerimientos del proyecto, por lo que se espera alcanzar muy buenos resultados.

Estos resultados no dependen únicamente de la maquinaria, sino también de la organización de obra que se planifique, por lo que en este trabajo se proyecta optimizar el uso de esta rozadora en torno al proceso constructivo que se debe seguir en la excavación, definiendo el escenario con el mejor desempeño como propuesta de una secuencia de actividades que conforman el ciclo de excavación.

Dedico este trabajo a mi familia, en especial a mis padres que me han apoyado en todo momento durante el desarrollo del proyecto.

Se le agradece al Ing. Oldemar Ramírez Escribano por su labor como profesor guía y revisión del proyecto final.

Además, se les agradece a todas las personas que conforman el Proyecto Ampliación Planta Hidroeléctrica Cachí, Instituto Costarricense de Electricidad, por su tiempo y colaboración, en especial a:

Ing. Luis Fernández Fernández, jefe de SETEC, por su valioso tiempo, consejos y ayuda en el desarrollo de la práctica a través de su guía profesional.

Ing. Ricardo Guevara, Ing. de túnel, por sus consejos y facilitación de datos para la realización del proyecto.

Sr. Gustavo Fuente Alfaro, jefe administrativo, por su ayuda y facilitación de asuntos administrativos dentro del proyecto.

Ing. Ignacio Arguedas Gamboa e Ing. Ricardo Porras, por brindarme la oportunidad de realizar la práctica profesional en el ICE.

Resumen ejecutivo

La Planta Hidroeléctrica Cachí fue construida por el Instituto Costarricense de Electricidad entre los años 1962-67. La capacidad instalada actualmente es de 108 MW, con una generación promedio anual de 657.47 GWh. (ICE, "Informe de factibilidad del Proyecto Ampliación Planta Cachí")

Hoy por hoy, debido al constante crecimiento en la demanda eléctrica nacional, surge la necesidad de crear nuevos proyectos para suplir esta insuficiencia y proyectarlos a futuro. El proyecto Ampliación de la Planta Hidroeléctrica Cachí forma parte de este plan de expansión de generación para atender la futura demanda a partir del segundo semestre del 2013. Otro punto importante del desarrollo de este proyecto es que hace uso de energías renovables, por lo que su importancia es aun mayor por la disminución de la dependencia de los combustibles fósiles como fuentes de producción.

La excavación del túnel es la principal actividad que se va a desarrollar en el Proyecto de Ampliación Cachí, donde no se debe afectar el funcionamiento del túnel existente ni la operación de la planta, además de otras implicaciones que deben cumplirse; como abatir lo menos posible el nivel freático del macizo y no afectar los acuíferos que son fuente de suministro de agua potable a las poblaciones de la zona.

El nuevo túnel se construirá de forma paralela al túnel en funcionamiento, a una distancia mínima de 15 m en la parte de la toma de aguas y una distancia máxima de 50 m durante la mayor parte del trazo. El diámetro de excavación será de 5,0 m para un área de sección de 20,63 m².

En el documento de consultoría sobre la evaluación del sistema constructivo del túnel ampliación Cachí (Della Valle, 2009), surgió la idea de utilizar una rozadora para la excavación del túnel en Cachí, la cual se determinó factible después de una serie de estudios y perforaciones

realizadas, la maquina que se utilizo en el modelo propuesto por el consultor fue una de 80 KW en la cabeza de corte, donde luego el ICE adquiere una maquina de 200KW en la cabeza de corte.

A partir de esta nueva compra surge la necesidad de recalcular los rendimientos propuestos por el consultor debido al nuevo tamaño de la maquina.

Este equipo es considerablemente grande para las características del proyecto, su potencia en la cabeza de corte permite excavar rocas de hasta 100 MPa en valores de resistencia a la compresión simple, cuando las características mecánicas de la roca del Proyecto de Ampliación Cachí se encuentran en promedio de 20 – 30 MPa. La máquina se muestra en la figura 1.

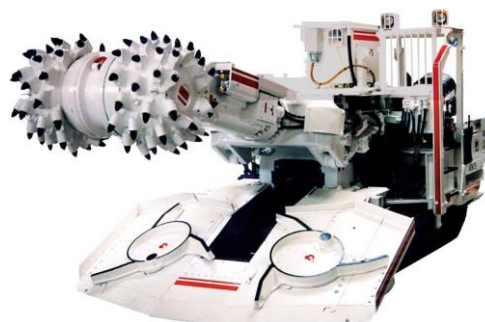


Figura 1. Rozadora Sandvik Modelo MT360
Fuente. Manual de operación de la rozadora Sandvik MT360

Las máquinas rozadoras generalmente tienen un diseño modular, esto a consecuencia de que muchas veces debe realizarse el montaje o reparación de la misma en espacios reducidos. Este equipo va montado sobre orugas y se traslada a bajas velocidades.

La definición de los tramos donde se utilizará la rozadora se debe a que la presencia de agua es mucho menor que en los tramos donde se utilizará voladura, ya que la afluencia de agua obliga a realizar el tratamiento de inyección al avance (actividad que se explica en

la página 32), lo que significa retirar la rozadora del túnel para hacer ingresar jumbos y equipos de perforación para realizar la actividad, y esto produce pérdidas considerables en avances diarios.

Debido al poco conocimiento que existe en el país sobre la utilización de esta metodología de excavación y maquinaria, surge la necesidad de crear una hoja para el cálculo de rendimientos para el uso de la rozadora, y de esta manera poder aplicar, de acuerdo con las características del terreno, estos rendimientos, para realizar una correcta planificación para la excavación de un proyecto.

Es de suma importancia tomar en cuenta que el equipo de la rozadora necesita de una organización y logística con capacidad para lograr el mejor desempeño de la máquina, por lo que a partir de los cálculos realizados se plantearon dos propuestas de cómo optimizar su uso y lograr mejores avances de excavación.

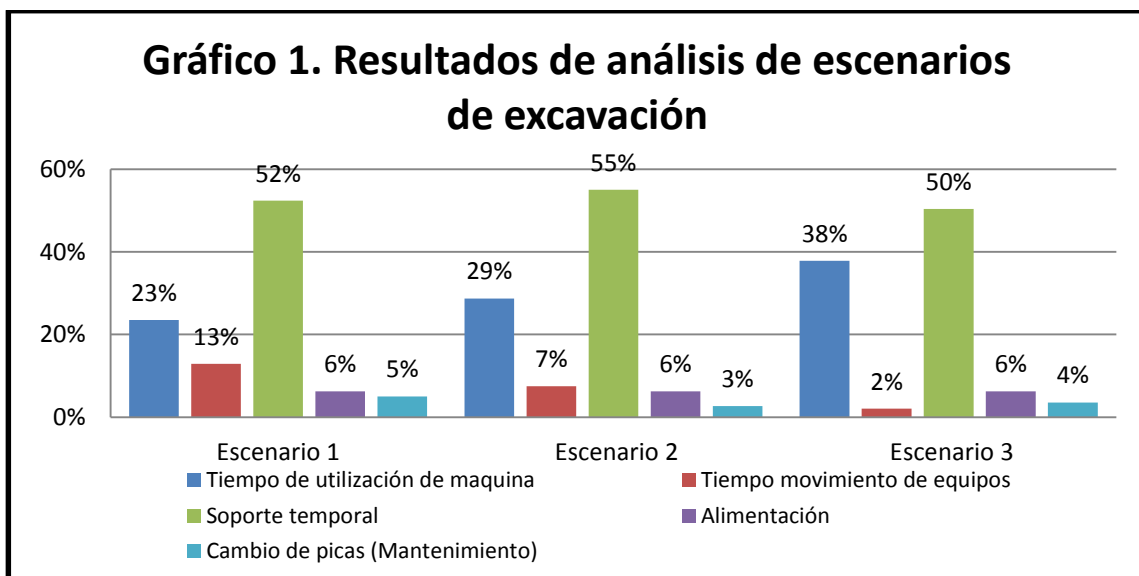
Para esto, con base en los rendimientos calculados por el consultor y según la fórmula extraída de la revista “Las maquinas rozadoras en túneles y minas” (Cornejo L, 1985), se calcularon los nuevos rendimientos de acuerdo a la potencia de corte de la maquina adquirida, donde se obtuvo un incremento en los rendimientos de más de un 50% con respecto a la máquina de 80 kw en la cabeza de corte. Donde se obtuvo un rendimiento promedio de 10 m/día con respecto a los 4 m/día realizados con la máquina de 80 kW.

Luego se realizaron modulaciones en diferentes escenarios de excavación con el fin de determinar la mejor opción de excavación, tomando en cuenta los soportes a colocar y característica de roca existente.

Con estas modulaciones se concluyó que con la utilización de la rozadora, existen otras actividades que complementan el ciclo de excavación que pueden realizarse de manera paralela; de manera que el uso de la rozadora se puede incrementar desde un 23% a un 38%.

Otra importante conclusión que se obtuvo a partir de las modulaciones es que en las mejores condiciones de roca 5 vagones de carga continua no serán suficientemente efectivos realizando la extracción para después de los 1000m, por lo que se plantea un sistema de 4 vagones donde 2 se mantengan siempre en compañía de la rozadora y los otros 2 en movimiento alcanzando así superar los 1500m de excavación para luego pasar a 6 vagones y cubrir la longitud más larga de excavación con rozadora sin ningún problema, optimizando la utilización de la máquina rozadora que a su vez logra mucho mejores avances de excavación, como se muestra en el gráfico 1.

Los rendimientos propuestos van a servir de parámetro para que, una vez entrada en funcionamiento la máquina, pueda existir un control sobre su desempeño y a su vez recopilar datos para que en próximos túneles estos cálculos puedan ser utilizados ya con bases prácticas.



Introducción

En desarrollos hidroeléctricos, la excavación de túneles es una de las actividades más complejas; que a su vez involucra varias ramas de la ingeniería como la geotecnia, geología y construcción. Factores geológicos, topográficos y tecnológicos pueden afectar de gran manera el diseño y construcción del túnel, por esta razón se debe realizar una investigación formal por parte de cada una de las áreas involucradas; con estos resultados se determinarán aspectos importantes como el sitio de trazo del túnel, dimensiones básicas o problemas que pueden presentarse durante la construcción.

En la actualidad existen varios métodos de excavación de túneles en el mercado, por lo que se debe prestar atención a estas alternativas tecnológicas considerando aspectos económicos y plazos de ejecución. La experiencia de varias empresas encargadas de construir túneles; (hoy en día) muestran que los proyectos tuneleros son una de las obras civiles con mayor nivel de imprevistos, debido a su alta complejidad, lo que genera mayor costo económico.

En nuestro país, el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) se ha encargado de la mayoría de proyectos con túneles, generalmente para proyectos hidroeléctricos, los cuales se utilizan para la conducción de agua desde la toma hasta la tubería de alta presión que abastecen la planta con el caudal necesario para la generación eléctrica.

En la actualidad, uno de los grandes problemas en relación con estos proyectos son los cálculos previos para la estimación de rendimientos y tiempos de ejecución de una excavación, debido a las diferentes características de roca o suelo presentes, la topografía, la presencia de agua (nivel freático y/o acuíferos)), método de tunelación, así como factores como la experiencia de los obreros que se encargarán de la excavación. Es importante mencionar que existe poca información en cuanto al cálculo de rendimientos debido a las causas

antes mencionadas y la variación que hay de un proyecto a otro.

En el ICE existen bases de datos referentes a rendimientos y tiempos de ejecución de túneles ya concluidos, los cuales se realizaron por el método convencional de perforación y voladura, además estos rendimientos reflejan la experiencia y conocimientos de ingenieros y técnicos que se han desempeñado en el campo durante muchos años.

En el caso del Proyecto de Ampliación PH Cachí, se utilizará un método semimecanizado para la excavación del túnel con el uso de una rozadora o minadora, lo que genera que los rendimientos antes mencionados no sean los adecuados para cálculos de tiempo de ejecución; por lo que se hace necesario contar con una guía de cálculo de rendimientos y tiempos de ejecución apropiada además de una recopilación de datos en el periodo de construcción, proporcionando al ICE referencias importantes que se utilizarán en túneles futuros donde se haga uso de la rozadora.

En el presente proyecto, se espera llevar a cabo el cálculo de rendimientos y tiempo de ejecución para el uso de la minadora en el túnel de ampliación Cachí, con base en ciclos definidos por el ICE y el criterio de los ingenieros a cargo del túnel según su experiencia en proyectos anteriormente realizados. Se valorará cómo afectan los diferentes soportes temporales que se pretenden colocar según el tipo de roca en el ciclo de excavación. También se propondrán soluciones para recopilar información de rendimientos reales de la maquinaria en funcionamiento, para que estos pueden ser bases de cálculo para proyectos futuros, además el ICE plantea realizar mantenimiento preventivo sobre la rozadora, por lo que dentro del proyecto se modelarán varios escenarios para realizar esta actividad, con el fin de encontrar el mejor escenario donde se optimice la producción.

Es importante mencionar que los rendimientos de carácter teórico pueden verse

lejos de la realidad en comparación con los que se obtengan una vez en la etapa de construcción del túnel; debido a todos aquellos aspectos que alteren de una u otra forma el correcto desenvolvimiento del ciclo de excavación.

La presencia de agua es uno de estos aspectos a considerar, se conoce que el nivel freático es de los principales contratiempos de las obras subterráneas, en caso de que aguas subterráneas aparezca durante el proceso de excavación, este puede afectar grandemente todo el ciclo de trabajo, disminuyendo en alto grado los rendimientos de los obreros y hasta de la misma maquinaria, lo que genera atrasos en

cada uno de los componentes del ciclo de excavación.

También otros de los factores que afectan de manera directa el ciclo de excavación son las fallas y fracturas presentes en el macizo, la dirección de las diaclasas y las características específicas del terreno.

Cada proyecto tiene factores que inciden directamente en el proceso de excavación, por lo que los rendimientos teóricos obtenidos son propios del Proyecto de Ampliación PH Cachí, por lo que estos podrán servir únicamente como base de cálculo para otros proyectos donde se utilicen metodologías similares a futuro.

Marco teórico

A través de los años, el avance en la ciencia y tecnología ha permitido al hombre lograr importantes progresos en cuanto a líneas de transporte; obstáculos naturales como montañas, ríos u océanos han dejado de ser limitantes para alcanzar un constante desarrollo. Los túneles han sido una solución aceptada para superar todas estas dificultades presentadas por la naturaleza; debido a que su principal propósito es el garantizar el transporte o paso directo a través de dichos obstáculos, estos se han utilizado para facilitar el transporte de personas a través de vehículos y trenes, transporte de agua potable y transporte de datos, puntos importantes dentro del esquema socioeconómico de la población mundial.

Factores como dimensiones, forma y revestimiento del túnel dependen principalmente de cuál vaya a ser el fin del mismo, por lo que son de gran importancia las diferentes consideraciones y métodos constructivos que se tomen en cuenta.

Para aclarar un poco más lo mencionado anteriormente, a continuación se explican algunos factores que son relacionados con la función de cada túnel:

1. El trazo o localización del túnel, el cual puede ser sumergido, a través de macizos montañosos o hasta por debajo de zonas urbanas.

2. El terreno por donde irá el trazo del túnel puede ser muy variable, suelos o rocas con diferentes características, por lo que el comportamiento de la excavación es variable también.

3. El agua es otro factor importante que varía el comportamiento de la excavación.

4. La geometría del túnel es definida generalmente por la naturaleza del terreno, características del material y el método constructivo que se utilice, esta geometría puede ser variable, círculos, herraduras, rectángulos, hasta cualquier forma pensable, mientras que se le aplique el correcto diseño de soporte temporal para resistir la carga impuesta.

5. El método constructivo también es muy variable, generalmente este depende de factores económicos, tiempos de ejecución y características del terreno, propios de cada proyecto. En la actualidad existen metodologías constructivas para obras subterráneas como por ejemplo métodos convencionales como la perforación con barrenos y voladuras, métodos semiconvencionales como el uso de rozadoras y martillos de impacto y los métodos mecanizados como el uso de máquinas tuneladoras TBM (Tunnel Boring Machine).

Dentro del material electrónico suministrado por el profesor Ing. Marco Tapia para el curso de Procesos Constructivos, se muestra una clasificación de túneles según su fin o uso. (Tapia, M. 2010)

A. Transporte:

- Tuberías de alta presión.
- Redes de utilidades y servicios (electricidad, agua potable).
- Túneles para transporte de bienes y personas.

B. Producción:

- Biodiversidad subsuperficial.
- Parques y producción agrícola.
- Recursos naturales como carbón.
- Almacenamiento y extracción de aguas, plantas de tratamiento.

C. Estructuras urbanas:

- Estacionamientos, estaciones subterráneas, oficinas, habitación, centros comerciales.

D. Almacenamiento:

- Basura y desechos peligrosos.
- Descontaminación y limpieza.
- Gases.
- Alimentos y bienes.

E. Conservación, archivo y registro:

- Herencia cultural y arqueología.
- Valores de la biodiversidad y ciencias de la tierra.

Métodos de excavación de túneles

Como se ha mencionado anteriormente, el método de construcción que se determine para un túnel depende principalmente de las características encontradas en el trazo donde pasará la estructura, las diferencias de comportamiento de los materiales y la presencia de agua, así como de fallas que determinarán cuál es la mejor opción de metodología a escoger a través de un estudio por parte de las áreas de ingeniería responsables; otros aspectos que determinan el tipo de método a utilizar son factores financieros, plazos de ejecución y experiencia que se tenga en relación con este tema.

La excavación de un túnel se constituye de varios procesos, estos se organizan de manera que se pueda excavar la mayor longitud del túnel en el menor tiempo posible, usando la menor cantidad de recursos posibles, esto garantizando:

- La estabilidad permanente de la obra.
- Que no existan condiciones peligrosas para las personas que laboran en el túnel.
- Que no se den daños ambientales irreparables en el entorno del túnel.
- Que se satisfagan los requisitos económicos- financieros.

A continuación se explicará brevemente en qué consisten algunas de las metodologías que existen actualmente para la excavación de túneles.

Métodos convencionales

Este tipo de método de excavación se basa principalmente en realizar ciclos como parte del proceso constructivo, generalmente estos ciclos consisten en excavación, remoción o extracción de escombros y la instalación de soportes. Una ventaja que proporciona este método es que se

pueden realizar excavaciones en cualquier geometría de sección.

Cut and cover (Cortar y cubrir)

Esta metodología se aplica a túneles superficiales donde se excava desde la superficie la totalidad o parte del hueco que irá a ocupar el túnel, éste se construye en el hueco a cielo abierto y por último se cubre la parte superior, este método ocupa de un sistema de sostenimiento acorde con las cargas impuestas del material que cubre el túnel. Existen dos formas de aplicar el método cut and cover, que son "bottom up" y "top down".

Además, existen algunos otros métodos variación del cut and cover como lo son el "Doorframe slab method" y el método "Caisson". (Tapia, M. 2010)

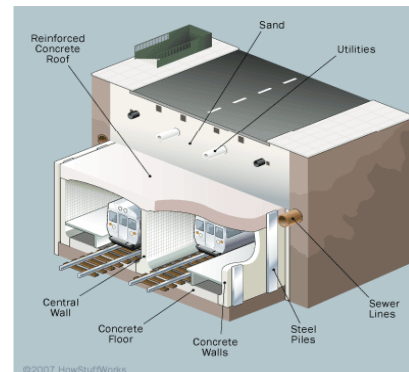


Figura 2. Excavación mecanizada, método Cut and Cover.
Fuente: Material del Curso Proceso Constructivos.

Perforación y voladura (Drill and blast)

El método convencional de perforación y voladura, ha sido uno de los métodos más utilizados para la excavación de túneles, debido a la confiabilidad y buenos resultados que se logran, principalmente este consiste en el barrenado de una serie de huecos ya predeterminados por una plantilla de voladura y marcados en el frente del tope con equipos de topografía, estos huecos son rellenos con explosivos, los cuales se hacen explotar, después de realizada la voladura se debe dejar un tiempo considerable para la salida de humo y polvo provocado por la explosión. Las voladuras derriban el frente del túnel, en este

punto ingresa maquinaria con el fin de realizar el desconche del material o tirar abajo todo material que aún quede en el perímetro del túnel, luego se realiza la extracción de escombros con equipos montados en vías ferroviarias o equipos en llantas de hule; una vez extraído el material suelto, se procede a realizar el soporte apropiado de la roca. (Tapia, M. 2010)

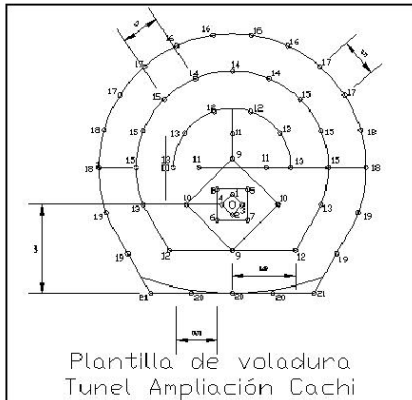


Figura 3. . Plantilla de voladura

Fuente: Informe de Factibilidad Proyecto Ampliación Planta Cachi.

Método NATM

El NATM fue desarrollado en Austria entre 1957 y 1965. “El principio fundamental del NATM puede explicarse como el concepto de transformar a las rocas que rodean el perfil de un túnel, de un elemento que ejerce carga a un elemento capaz de resistir carga (arco de sustentación). Mediante

elementos de sostenimiento tales como concreto lanzado y pernos de anclaje en roca, y adoptando la secuencia de excavación y los procedimientos de sostenimiento correctos, podrá lograrse la acción conjugada entre el revestimiento del túnel y la masa rocosa.

El método sugiere la adopción de determinados principios en la secuencia de trabajo que concierne a la excavación y el sostenimiento, para que la masa rocosa que rodea la cavidad se convierta en el principal elemento de sostenimiento en la estructura de un túnel.

Los elementos principales de sostenimiento en la aplicación del NATM son el concreto lanzado y los pernos de anclaje; la adhesión del concreto lanzado a la mayoría de los tipos de roca es muy grande, una capa delgada del mismo actúa como material de encastramiento y esfuerzo para la superficie de propiedades físicas menores. Los pernos de anclaje aplicados en rocas extremadamente trituradas o expansivas resulta un medio ideal de estabilización debido a su capacidad de resistencia a la tracción casi ilimitada.

La palabra “método” en la traducción al inglés ha conducido a confusiones. El hecho es que el NATM es una filosofía o concepción de diseño del sostenimiento y no un método de construcción o algún tipo particular de sostenimiento”. (De la Sota, 2007)”

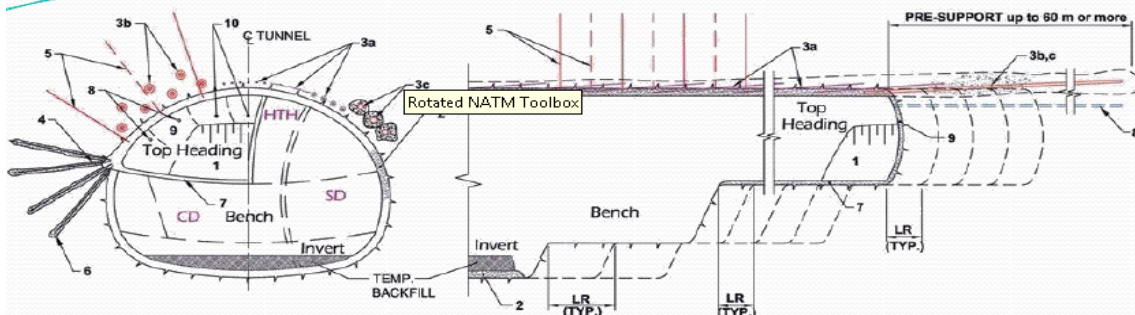


Figura 4. . Método NATM

Fuente: Material del Curso Proceso Constructivos.

Método de excavación convencional mecanizada

Para esta metodología se involucra maquinaria que realiza la trituración de la roca. Muchas veces la escogencia de esta maquinaria depende de la calidad de roca presente en sitio y las necesidades específicas del proyecto (se mencionaran más adelante), ya que esto puede implicar la compra de alguno de estos equipos, además de la capacitación del personal o mano de obra para el uso de la maquinaria. Las máquinas que se utilizan en esta metodología son la rozadora, los martillos de impacto y excavadoras convencionales.

La excavación del frente del túnel puede ser a sección completa o parcial, con o sin prerreforzamiento según el diseño que se realice para este.

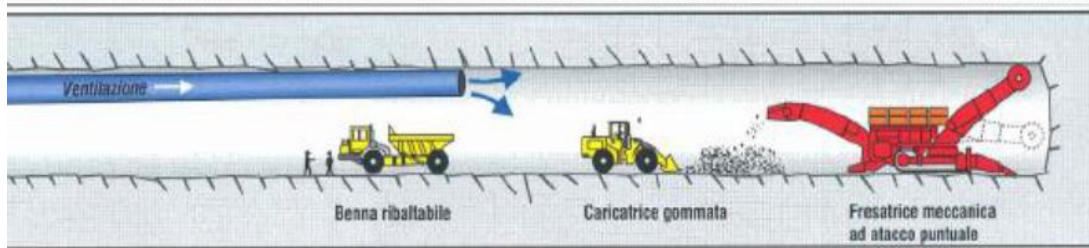


Figura 5. Método convencional mecanizado con rozadora.
Fuente. Material del curso Procesos constructivos

Método mecanizado

Este método de excavación de túneles utiliza un equipo llamado tuneladora, TBM (por sus siglas en inglés de Tunnel Boring Machine), la cual es capaz de excavar túneles a sección completa. Además dentro del sistema de la máquina estas tienen la capacidad de colaborar en la colocación del sostenimiento del túnel en forma definitiva o provisional.

Estos equipos realizan la excavación por medio de una cabeza giratoria, el empuje necesario para lograr el avance de la máquina se da gracias a un sistema de gatos hidráulicos sobre su perímetro que se apoyan en el último anillo de sostenimiento colocado, de esta manera se obtiene un punto fijo de donde será empujada la cabeza de corte, en la parte posterior de esta se colocan todos los equipos complementarios al proceso de excavación, estos equipos están

Las ventajas que puede presentar esta metodología es que debido a la capacidad de los equipos de trituración de roca, se obtienen beneficios como:

- Menor sobreexcavación con menor cantidad de sostenimiento y revestimiento por el mejor perfilado de la excavación.
- Avance continuo con mejores y mayores rendimientos.
- Menor disturbio del macizo rocoso por las vibraciones que ocasionan las voladuras, lo que previene desprendimientos de roca imprevistos.
- Reutilización de la maquinaria en otros túneles.

montados sobre plataformas que se mueven en un solo conjunto con la cabeza de corte sobre rieles también colocados por la misma máquina, en esta zona están colocados los equipos de ventilación, depósitos de mortero y sistemas de evacuación del material excavado.

Las condiciones de uso de esta metodología dependen generalmente de las condiciones de la masa rocosa, porque si este escenario geológico es muy cambiante, no se recomienda el uso de las TBM, ya que estas máquinas son hechas a la medida del túnel, lo que hace que no tengan mucha flexibilidad con grandes cambios en aspectos geológicos del túnel, características geométricas como cambios de curvaturas muy bruscos ni tampoco son aptas para el uso de esta metodología.

Otro punto a considerar para el uso de TBM es la longitud del túnel, ya que el elevado costo de compra de un equipo como este, además de los tiempos de fabricación, transporte e instalación;

deben equiparse con avances de excavación, por lo que para lograr un buen equilibrio en el factor económico es bueno utilizarla en túneles de gran longitud.

Los rendimientos obtenidos con tuneladoras de cabeza giratoria son muy altos, si estos se comparan con los de otras metodologías de excavación de túneles. (Tapia, M. 2010)

Máquinas rozadoras

Las máquinas rozadoras generalmente tienen un diseño modular, esto a consecuencia de que muchas veces debe realizarse el montaje o reparación de la misma en espacios reducidos. Este equipo va montado sobre orugas y se traslada a bajas velocidades.

Según el artículo publicado en la Revista de Obras Públicas “La máquina rozadora en túneles y minas” (Alvares L,1985), se establece una clasificación para la rozadora de la siguiente manera.

- Máquinas ligeras, las cuales pesan menos de 20 toneladas y tienen una potencia de corte menor a los 50 kW.
- Máquinas de peso medio, las cuales tienen un peso de entre 20 y 40 toneladas, una potencia de corte menor a los 100 kW.
- Máquinas pesadas, las cuales pesan de entre 40 y 60 toneladas, tienen una potencia de corte de entre 110 y 220 kW.
- Máquinas muy pesadas, las cuales tienen un peso superior a 60 toneladas, con una potencia en la cabeza de corte mayor a 220 kW.

También se pueden encontrar diferentes tipos de rozadoras con el fin de resolver diferentes trabajos en la minería y en la obra civil, las cuales son: (en la parte de anexos se encuentran fotografías de los diferentes tipos de rozadoras).

- Rozadoras de brazo.
- Rozadora de tambor.
- Rozador de cadenas.

- Equipos especiales.

Estos equipos realizan el trabajo de corte mediante una cabeza cortante, la cual está equipada con herramientas de corte o picas que inciden sobre la roca y que va montada en un brazo articulado, además cuentan con un sistema para recoger el material excavado y transportarlo del frente de excavación hasta la parte trasera de la máquina.

Se movilizan sobre orugas a velocidades muy bajas.

Componentes principales de una rozadora

La siguiente información se extrae del artículo “Apuntes de la asignatura de túneles” de la Universidad Politécnica de Cataluña.(Alonso E, 2002)

Chasis y tren de rodaje

El chasis sirve de soporte y elemento de ensamble de las demás partes de la máquina, es de construcción robusta. El traslado no suele superar velocidades de 5 m/min, por lo que viene dispuesto para desacoplar el tren de rodaje para remolcarlo de forma más rápida.

Brazo y dispositivo de giro

El brazo está compuesto por el motor y la cabeza de corte. Existen brazos con diseños monobloque y también articulados.

La vibración del brazo durante el corte depende de su estabilidad global, tanto vertical como horizontal. La estabilidad vertical afecta el corte ascendente o en elevación, mientras que la estabilidad lateral depende de la anchura de la base de montaje y del brazo sobre el dispositivo de giro.

Equipo eléctrico

Comprende los motores, dispositivo de mando, cables y la instalación de alambrado, estos

motores son robustos y suelen ir refrigerados por agua.

Sistema hidráulico

Está compuesto por las bombas, depósito hidráulico y los instrumentos necesarios de control y regulación. El aceite hidráulico que se utiliza normalmente es difícilmente inflamable y los sistemas funcionan con presiones bajas. (No superan los 20 MPa).

Cabeza de corte

La cabeza de corte generalmente define el sistema de trabajo; según la configuración geométrica del movimiento de la cabeza se clasifican en:

Cabeza de eje longitudinal: El giro es perpendicular al frente de excavación, las picas están situadas sobre una hélice similar a un sacacorchos, las velocidades típicas de rotación varían entre 20 y 65 RPM.

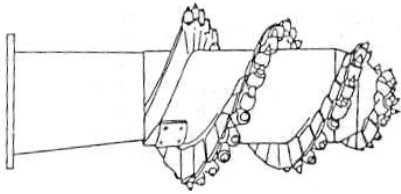


Figura 6. Cabeza de corte axial.
Fuente. Revista de Obras Públicas, publicación: Las máquinas rozadoras en túneles y minas

Cabeza de eje transversal: El giro es paralelo al frente de excavación, el par de corte es proporcionado por el motor que acciona la cabeza de corte, la fuerza horizontal se ejerce con el giro del brazo y la fuerza vertical con el peso de la rozadora. Las velocidades varían entre 45 y 100 RPM

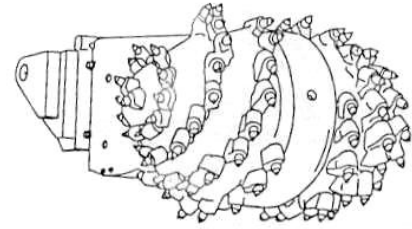


Figura 7. Cabeza de corte transversal.
Fuente. Revista de Obras Públicas, publicación: Las máquinas rozadoras en túneles y minas

En cuanto al uso o escogencia de alguno de los dos tipos de cabeza de corte se pueden obtener diferentes ventajas, por ejemplo el perfilado de las excavaciones es mucho mejor con las cabezas de corte axial, ya que las transversales producen sobre-excavaciones por la propia geometría de la cabeza. Y el rendimiento de una de cabeza de corte transversal es un 25% más alto que las de corte axial debido a los tiempos muertos de anclaje.

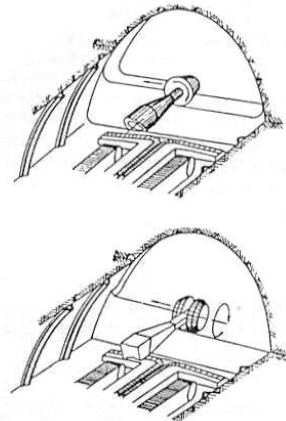


Figura 8. Perfiles de excavación de ambos tipos de cabeza de corte
Fuente. Revista de Obras Públicas, publicación: Las máquinas rozadoras en túneles y minas.

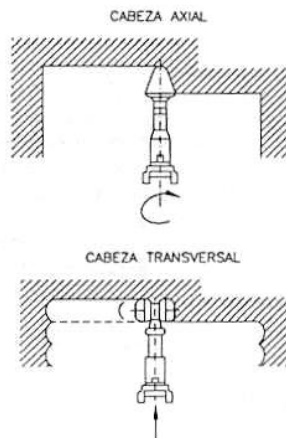


Figura 9. Sistemas de trabajo con cabeza axial y transversal
Fuente. Revista de Obras Públicas, publicación: Las máquinas rozadoras en túneles y minas.

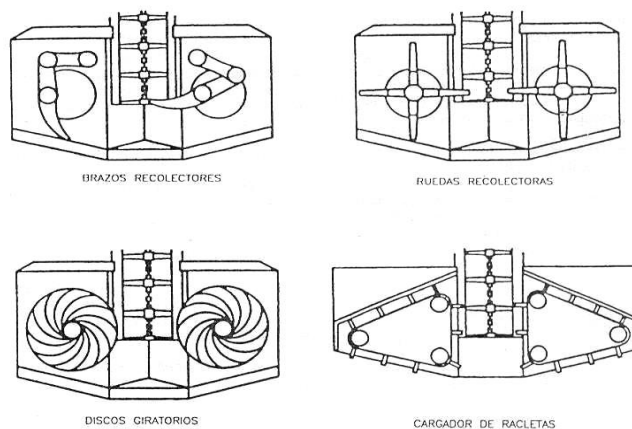


Figura 10. Sistemas de trabajo con cabeza axial y transversal
Fuente. Revista de Obras Públicas, publicación: Las máquinas rozadoras en túneles y minas

Sistema de recogida y carga

Estos sistemas de recogida y carga de material rocoso son diferentes en los distintos tipos de máquina rozadora, entre ellos podemos encontrar (Figura 10):

- Brazos recolectores.
- Ruedas recolectoras.
- Discos giratorios.
- Cargador de regletas.

Los sistemas de carga van montados sobre una plataforma de carga, que puede ser subida y bajada hidráulicamente.

Una vez que el material ha sido recogido pasa a unos transportadores (bandas), estos suelen ir montados en el centro o los laterales de

la máquina, la velocidad de estas bandas transportadoras suele ser inferior a 1 m/s.

Consola de control

Esta consola se sitúa a un lado o centro de la máquina, donde el operador tenga una buena vista de los movimientos de corte. Hay equipos que disponen de sistemas de control y alineación de la excavación, lo que permite un trazo exacto de la obra evitando sobreexcavaciones.

Portapicas y picas

Los portapicas son elementos soldados a la cabeza de corte, en este se fijan las picas mediante anillos de retención o grapas anulares de montaje rápido.

Las picas son las herramientas de corte, existen dos: las picas radiales, las cuales se utilizan en el arranque de rocas blandas, y picas tangenciales que tienen forma cónica y son diseñadas para soportar la fricción con la roca.

La elección del tipo de pica depende de la dureza y abrasividad del material, así como de la potencia de la cabeza de corte.

Equipo complementario

Supresor de aire

El roce del equipo con la roca produce una cantidad de polvo importante, que debe ser controlada, debido a factores de seguridad, en el frente del túnel. Razón por la que estos equipos de minería cuentan con supresores de aire que los acompañan durante los tiempos de roza.

Estos equipos se escogen dependiendo de las características del túnel, tipo de rozadora y método de trabajo; ya sea por vía húmeda o seca.

Los supresores son equipos que a través de un ducto flexible que llega al tope del túnel, recogen el polvo del medio, luego es tratado (por medio de filtros) de manera tal que al salir nuevamente al ambiente es apto para las personas.

Transformador

Este equipo suplementario, cumple la función de alimentar eléctricamente a la rozadora. Por lo que siempre debe estar acompañándola.

Criterios de elección de una rozadora

Resistencia a la compresión simple de la roca

La elección de una rozadora se hace por el tamaño de la misma y la potencia de la cabeza de corte, esta última tiene una relación cercana con la resistencia a la compresión simple de la roca, en la siguiente tabla extraída del documento escrito por el ingeniero en minas Laureano Cornejo Álvarez "Las máquinas rozadoras en túneles y minas", se muestra la relación directa entre estos dos parámetros.

Resistencia de la roca Rc kg/cm ²	Potencia de la cabeza de corte (kw)
200	30
300	50
400	70
500	90
600	103
700	116
800	130
900	165
1000	200
1200	300

Figura 11. Resistencia de la roca según potencia de la cabeza de corte.

Fuente. Revista de Obras Públicas, publicación: Las máquinas rozadoras en túneles y minas

Condicionantes geométricos

La sección de túnel va a determinar las dimensiones de la máquina, por lo que si la excavación se realiza en sección completa debe buscarse una que tenga la capacidad de excavar una sección mucho mayor a la establecida por el túnel a construir.

Rendimiento de rozado

Inicialmente se debe calcular lo que se conoce como tasa neta de corte (NCR por sus siglas en inglés), el cual es otro punto determinante en la escogencia de la máquina, este se deriva de la potencia de corte y resistencia de la roca a la compresión simple, este dato se mide como producción horaria en m³/h.

El problema de esta referencia se genera debido a que toma en cuenta el 100% de utilización de la máquina en contacto directo contra el frente de excavación, por lo que lograr estas producciones depende de una muy buena logística de excavación, siendo difíciles de alcanzar en sitio, debido a los diferentes tiempos muertos que se pueden presentar, tales como cambio de operador, problemas con el flujo eléctrico, la extracción del material, etc.

En la fórmula siguiente se describe la manera de cálculo de la tasa neta de corte.

$$NCR = \frac{k}{\sigma} * N \dots\dots\dots \text{Ec. 1}$$

Donde:

- NCR = Tasa neta de corte (m³/h)
- K = Es el coeficiente de correlación, generalmente se utiliza el valor de 7.
- N = Potencia instalada de la cabeza de corte (kW).
- σ = Resistencia a la compresión simple de la roca (MPa).

Los resultados de esta fórmula irán en función de los resultados de la resistencia a la compresión simple de la roca presente en el macizo, los cuales se determinaron mediante estadística descriptiva luego de una serie de perforaciones que se han realizado como parte del proyecto.

A su vez los datos de RCS fueron clasificados según las condiciones geotécnicas encontradas, mediante método RMR o Rock Mass Rating (Bieniawski, 1989) el cual muestra un número o clase que indica la situación de estabilidad del macizo rocoso. (Se presenta un "paper" sobre el método de clasificación en el anexo 1. Estos datos están proporcionados y resumidos en la siguiente tabla.

CUADRO 1. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE DE LAS ROCAS A EXCAVAR		
Clase de roca de Bieniawski RMR	Resistencia a la compresión simple σ _c (MPa)	Resistencia a la compresión simple σ _c (kg/cm ²)
II	30	315,8
III	20	203,9
IV	15	153,0

Son varios los factores que se pueden mencionar que afectan directamente a la producción de la rozadora, estos son difíciles de controlar y de tomar en cuenta a la hora de calcular de manera teórica estos datos, porque varían según la planificación que se tenga, además de factores imprevistos en el desarrollo del túnel.

Es por esto que en el artículo publicado en la Revista de Obras Públicas de España (Cornejo, 1985), genera una fórmula que toma en cuenta varios factores, que según sea el caso disminuyen la producción de la rozadora. Como por ejemplo se sabe que si las condiciones en el frente de excavación son pobres se tendrá que detener la producción de la rozadora, con el fin de realizar el soporte necesario para continuar la excavación sin poner en riesgo el equipo de trabajo.

La fórmula desarrollada por el Ing. Álvarez (Cornejo, 1985), toma los resultados de la tasa neta de corte y los afecta por factores que disminuyen la producción de la rozadora obteniendo un resultado final expresado en rendimiento de excavación (m³/día) de la siguiente manera.

$$Rexc = Ce * NCR * n * C1 * Cd \dots\dots\dots \text{Ec. 2}$$

Donde:

- Rexc = es el rendimiento de excavación en m³/día.
- Ce = Coeficiente de eficiencia. (Referirse a anexo 6)
- n = Número de horas trabajadas al día, el cual depende de la planificación del proyecto.

C1 = Coeficiente de tiempos muertos, o tiempo no disponible. (Referirse a anexo 6)

Cd = Coeficiente de tiempo disponible para el rozado según las condiciones de trabajo. (Referirse a anexo 6)

Si se desea conocer el rendimiento de avance expresado en metros por día, únicamente se debe dividir el resultado de rendimiento de excavación entre el área de la sección del túnel.

$$Avance\ día = \frac{R_{exc}}{A_{sec\ túnel}} \dots\dots\dots Ec. 3$$

En el documento de consultoría (Della Valle, 2009) se muestra unos datos de producción horaria (NCR) de acuerdo con la ecuación 1 y los datos de compresión simple de roca del cuadro 3, en los cuales se utilizó una máquina con una potencia en la cabeza de corte de 80 kW, además hace la salvedad de que lograr esos rendimientos es prácticamente inalcanzable, por lo que a través de experiencia da datos de producción horaria tomando en cuenta los tiempos muertos que se incurren en la obra.

A partir de estos datos y los ciclos proporcionados por el ICE, se estimaron las velocidades de avance, considerando dos diferentes valores de avance por ciclo de excavación (2,3 m por las clases de roca II y III y 1,5 m por las clases de roca IV y V), manteniendo los mismos tiempos sugeridos por el ICE para las operaciones de instalación de soporte provisionales (malla electrosoldada, pernos, concreto lanzado y arcos de acero) y los tiempos de cambios de equipo.

CUADRO 2. RESUMEN DE DATOS DE PRODUCCIONES Y AVANCES DIARIOS			
Clase de roca según RMR	Producción horaria teórica (m3/h)	Producción Horaria neta efectiva (m3/h)	Avance diario (m/día)
II	18	10	6,66
III	28	20	10,15
IV	37	25	4,86
V	112	30	5,04

Figura 12. Datos de producciones y avances diarios propuestos.

Fuente. Informe sobre la evaluación del sistema constructivo del túnel del Proyecto Ampliación Cachi

Generalidades del Proyecto

El Proyecto Hidroeléctrico Cachí (PH Cachí) se ubica en la provincia de Cartago, entre los cantones de Paraíso y Jiménez, en los distritos de Cachí y Tucurrique. El área de influencia directa se localiza en las comunidades de Urasca, San Jerónimo, Guatuso, San Miguel y El Congo, como se observa en parte de la Hoja Cartográfica Istarú IGN en la figura 1. El proyecto se encuentra en la cuenca del río Reventazón y pertenece al Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).

La Planta Hidroeléctrica Cachí fue construida por el ICE entre los años 1962-67 con una potencia inicial de 64 MW (dos unidades Francis de eje vertical). En el año 1978, se amplió la planta anexando una tercera unidad de 36.10 MW a la tubería de presión existente por medio de una tubería de desvío derivada de la conducción principal. La capacidad instalada del complejo Cachí actualmente es de 108 MW, con una generación promedio anual de 657.47 GWh.

Debido al constante crecimiento en la demanda eléctrica nacional, surge la necesidad de crear nuevos proyectos para suplir esta escasez y proyectarlos a futuro. Es importante mencionar que esta ampliación parte del plan de expansión de la generación para atender la futura demanda a partir del segundo semestre del 2013. Otro punto importante del desarrollo de este

proyecto es que hace uso de energías renovables, por lo que su importancia es mayor por la disminución de la dependencia de los combustibles fósiles como fuentes de producción.

En el informe de factibilidad del proyecto, se presenta que entre los principales escenarios que marcan la necesidad de realizar una ampliación y modernización de la actual planta se encuentran las altas pérdidas que presenta la tubería reforzada, las cuales se estiman en un 17,1% y normalmente para este tipo de proyectos no debería sobrepasar un 10%. Al mismo tiempo, en época de lluvia se tienen grandes cantidades de excedentes de agua que deben ser vertidos debido a que las instalaciones existentes no permiten su aprovechamiento, el promedio de éste volumen anual es del orden del 40% del volumen de escorrentía de la cuenca.

Esta ampliación requiere de un segundo túnel de conducción que tendrá una longitud de 5950 m, un diámetro revestido de 3,8 m para un caudal de 54 m³/s, un tanque de oscilación, una tubería reforzada de 470 m y la ampliación del edificio para la nueva turbina que tendrá una capacidad de generación de 40MVA. Dando como resultado un incremento en la producción de electricidad de 60 MW.

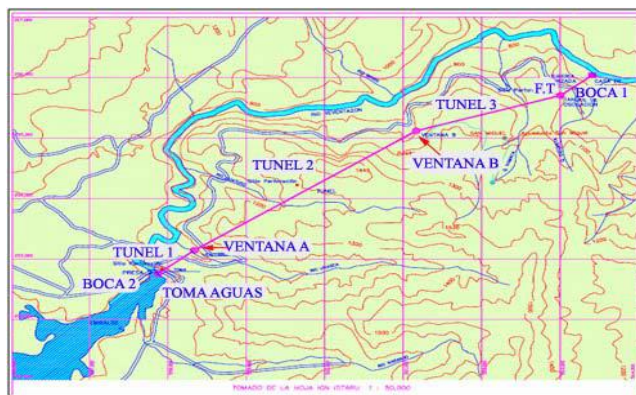


Figura 13. Planta del túnel a construir
Fuente. Informe de Factibilidad Proyecto Ampliación Cachí

Etapas constructivas del túnel

Para el PH Ampliación Planta Cachí se construirá un túnel de 5950 m de longitud paralelo al existente, con un diámetro de excavación de 5,0 m en sección de herradura clásica y un diámetro revestido de 3,9 m.

La construcción del nuevo túnel debe respetar varios condicionantes tanto de tipo mecánico-constructivo como de tipo ambiental. Lo más importante es que la planta actual tendrá que mantener su capacidad de generación a lo largo de la construcción del segundo túnel, por lo que deben evitarse afectaciones a este en operación tales como las vibraciones debido a las voladuras, la descompresión del macizo o la reducción excesiva del nivel freático, que son de los principales problemas que hay que evitar.

Para la ejecución de las obras subterráneas se plantean cuatro etapas que son:

- Excavación
- Revestimiento de concreto
- Blindaje en acero
- Inyección.

Aunque el tema a desarrollar en este documento es la excavación del túnel por medio de la rozadora, igualmente se explica brevemente en qué consisten las demás etapas correspondientes a la construcción del túnel, dejando la explicación de la excavación como otro capítulo aparte.

Revestimiento de concreto

Una vez terminada la excavación del túnel y habiendo garantizado su estabilidad inicial, se continúa con el revestimiento de concreto con un espesor mínimo de 35 cm, finalmente el diámetro revestido terminado será de 3,9 m.

Sección excavación y revestimiento

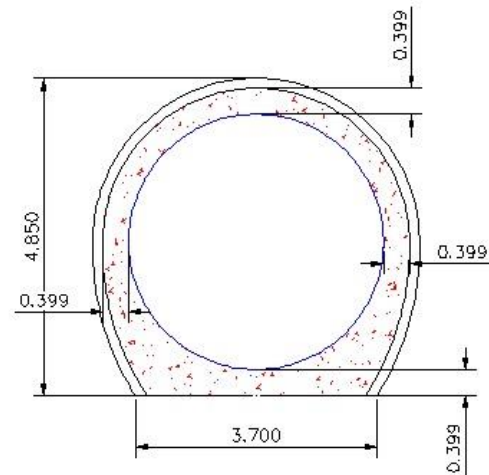


Figura 14. Sección de túnel revestida.

Fuente. Informe de Factibilidad Proyecto Ampliación Cachí

La colocación del concreto será en un solo proceso, completando toda la sección o lo que se conoce como “full face”, para esta actividad se utilizará formaleta compuesta por seis tramos de 9 m cada uno, lo que quiere decir que se tiene una longitud total de 54 m. Se espera lograr un rendimiento promedio de avance en esta actividad de 30 m/día colocando de manera continua el revestimiento.

Blindaje de acero

La parte de aguas abajo del túnel demanda ser blindada con tubería de acero, esto en al menos 100 metros de longitud, dependiendo de las características de hidrología del sitio.

Cada tubo tiene una longitud de 9 metros, además la cara interior del tubo será recubierta con pintura. La colocación del blindaje será puesta bajo el siguiente proceso cíclico: introducción del tubo, armado y soldado del mismo y colocación de concreto de relleno.

Inyección

Se realizarán inyecciones en el revestimiento de concreto para el relleno de la corona, este se hace para completar la sección que en el revestimiento de concreto quedó vacía en la parte superior.

Se prevé que el inicio de la inyección será una vez que el revestimiento del concreto lleve un avance de 2 kilómetros, además de esto se planea instalar dos centrales de inyección integradas por los siguientes elementos:

- 1 Silo para cemento
- 1 Compresor
- 1 Mezclador
- 2 Agitadores
- 2 Bombas de inyección

Excavación del túnel

La excavación del túnel es la principal actividad que se va a desarrollar en el Proyecto de Ampliación Cachí, donde no se debe afectar el funcionamiento del túnel existente ni la operación de la Planta, además de otras implicaciones que deben cumplirse; como abatir lo menos posible el nivel freático del macizo y no afectar los acuíferos que son fuente de suministro de agua potable a las poblaciones de la zona.

Por esta razón, se han definido diferentes medidas para satisfacer los requerimientos como una auscultación permanente, inyección de lechada en zonas donde sea necesario un tratamiento previo, perforaciones exploratorias y finalmente en zonas sensibles el uso de la rozadora con el fin de reducir vibraciones producidas por la voladura.

Caracterización geotécnica

Basándose en los levantamientos geológicos disponibles del túnel existente y las nuevas perforaciones realizadas a la fecha, se tiene que. La litología presente corresponde a la formación Doán principalmente, son rocas de origen ígneo, compuestas por brechas lávicas en diferentes estados de alteración, también se pueden encontrar rocas blandas, tobas compactas, diques y brechas en su gran mayoría, además se encontraron 15 fallas geológicas con espesor variable entre 1 m y 29 m, la longitud total de los tramos de falla fue de 218 m.

El consultor Nicolás Della Valle, en la consultoría para el P.H. Cachí, expresa que según lo observado en el sitio y a razón de varias conversaciones con geólogos, considera que en algunos casos lo que se ha indicado como "falla" no es tal. Se trataría más bien de zonas diaclasadas que han sufrido fenómenos de cizallamiento y desplazamiento típicos de las fallas.

La figura 15 muestra la distribución de roca encontrada en el túnel actual, esta formación

geológica es la que tiene influencia directa sobre las obras del proyecto debido a que cada una de estos tipos de roca presentan características físicas y mecánicas diferentes que deben ser tomadas en cuenta en el diseño del túnel a construir.

Tipo de Roca	Porcentaje
Brechas	60,75 %
Lavas	18,85 %
Fallas	3,63 %
Tobas	10,03 %
Diques	2,45 %
Brecha lávica	2,51 %
Conglomerado	1,78 %

Figura 15. Distribución del tipo de roca en el túnel actual
Fuente. Informe de Factibilidad Proyecto Ampliación Cachí

Para el Proyecto de Ampliación Cachí, la caracterización geotécnica se aplicó principalmente a las brechas y lavas ya que son los tipos de rocas que se encuentran en mayor cantidad durante el trazo del túnel a construir; por lo que fueron los tipos de roca a los que se les practicaron ensayos de laboratorio a partir de testigos y muestreos que se realizaron en el sitio, siendo las brechas las que componen el primer grupo de importancia para las obras del proyecto y las lavas se constituyen en un segundo grupo.

A otros materiales como tobas y las rocas ígneas que constituyen los diques intrusivos, significan un tercer grupo de importancia, no fue posible realizarles ensayos de laboratorio, sus datos se conocen a partir de información generada en la excavación del primer túnel.

A continuación se muestran figuras donde se puede observar el grado de fracturamiento de la roca presente en el túnel a

excavar. Para este caso solo se muestran imágenes de la perforación #1 y #3 en las figuras 16 y 17, para las figuras de las demás perforaciones referirse al anexo 7. Estas figuras corresponden aproximadamente a la profundidad que se excavará el túnel.



Figura 16. Perforación PHCHT2 – 1 de 132,6m a 138,9m.

Fuente. Informe de Factibilidad Proyecto Ampliación Cachí.



Figura 17. Perforación PHCHT2 – 3 (Tanque de Oscilación) de 65,15m a 74,85m.

Fuente. Informe de Factibilidad Proyecto Ampliación Cachí.

Los diferentes ensayos que se le practicaron a las muestras de las diferentes perforaciones sirvieron para determinar propiedades físicas y mecánicas de la roca intacta, tales como:

- Resistencia a la compresión simple.
- Dureza
- Velocidad de onda
- Densidad
- Abrasión (Los Ángeles)

Para efectos del desarrollo del trabajo se explicará únicamente la propiedad mecánica resistencia a la compresión simple, ya que este es uno de los aspectos de la roca intacta más utilizados a nivel internacional para estimar el comportamiento de la roca y un parámetro importante en el cálculo de rendimientos teóricos para el uso de la rozadora.

En el Informe de Factibilidad del Proyecto Ampliación Cachí se especifica que para este parámetro han realizado 47 ensayos con medición de deformación, obteniendo valores promedio de 26,9 MPa, con un valor mínimo de 3,3 MPa y un valor máximo encontrado de 92,0 MPa; de donde la mayor cantidad de muestras varió de entre los 16,0 MPa a los 41,0 MPa.

Según la variación de la Resistencia a la Compresión simple se puede clasificar la matriz rocosa como blanda a moderadamente dura.

En la siguiente figura se resumen los datos analizados en el Informe de Factibilidad del Proyecto Ampliación Cachí.

<i>Proyecto Ampliación CH Cachí - Túnel 2</i>	
<i>Estadística Descriptiva</i>	<i>BRECHAS Y LAVAS</i>
<i>Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)</i>	
Media	26,9
Error típico	2,9
Mediana	20,4
Moda	4,0
Desviación estándar	20,2
Varianza de la muestra	408,9
Rango	88,7
Mínimo	3,3
Máximo	92,0
Suma	1264,7
Cuenta	47,0
Nivel de confianza (95,0%)	5,9

Figura 18. Estadística descriptiva de Resistencia a la Compresión Simple.

Fuente. Informe de Factibilidad Proyecto Ampliación Cachí.

Una vez que se determinaron los diferentes parámetros geotécnicos, se procedió a realizar una clasificación por el comportamiento geomecánico de las diferentes clases de macizo. De acuerdo con la versión actualizada del perfil geológico del túnel, se pueden esperar varias clases de macizo según el sistema de clasificación de macizos rocosos "Rock Mass Rating" (RMR), que en este caso van desde la clase II hasta la clase V.

En la siguiente figura del Informe de Factibilidad Proyecto de Ampliación Cachí, se muestran los datos obtenidos en la clasificación de roca presente en el túnel según el RMR y la resistencia a la compresión simple que va ligada al mismo.

Clase de Macizo Rocoso	σ_c (Mpa)
RMR	
II	30,0
III	20,0
IV	15,0
V	5,0

Figura 19. Clasificación de roca según RMR.
Fuente. Informe de Factibilidad Proyecto Ampliación Cachí.

Con la clasificación del macizo rocoso, se definieron zonas de comportamiento geotécnico similar para la estimación del soporte temporal de la excavación, además estos datos son la base de cálculo para el rendimiento de la rozadora. También, conforme se avance en el desarrollo del proyecto, se corroborará si las condiciones y características son las que se esperaban, en caso de no realizar el cambio respectivo en cuanto al diseño de soporte temporal.

En el cuadro siguiente se muestra la distribución de roca que se encuentra en el tramo por donde pasará el túnel según la clasificación RMR, estos datos servirán para hacer una estimación del ademe a utilizar ya que cada tipo de roca requiere un ademe diferente, de acuerdo con su calidad. Más adelante se explicará sobre el soporte temporal que se prevé utilizar en la construcción del túnel.

CUADRO 3. DISTANCIAS PRESENTES DE ROCA SEGÚN SU CLASIFICACIÓN RMR					
Long total de túnel = 5970 m					
Datos	Clasificación de roca según RMR				
	I	II	III	IV	V
Long. presente en el túnel (m)	0	1632	3411,8	926,4	0
% del túnel	0,0%	7,33%	7,15%	5,52%	0,0%

Se observa en la distribución de roca, que existe una alta presencia de rocas tipo II y III, lo que significa una ventaja para la construcción del túnel, ya que implica una menor utilización de ademe debido a la calidad de la roca, esperando lograr así mejores rendimientos con avances promedios diarios.

Planeamiento constructivo de la excavación

El nuevo túnel se construirá de forma paralela al existente, a una distancia mínima de 15 m en la parte de la toma de aguas y una distancia máxima de 50 m durante la mayor parte del trazo. El diámetro de excavación será de 5,0 m para un área de sección de 20,63 m².

El planeamiento constructivo de la excavación del túnel de ampliación en el PH Cachí como se observa en la Cuadro 4; plantea cuatro frentes de trabajo, los cuales inician sus actividades de avance a partir de la ventana B y la ventana A lo más simultáneamente posible, además un posible frente extra que empezaría desde el tanque de oscilación en sentido hacia la toma hasta entroncar con el frente número 4, como se observa en la figura 20 del gráfico ferrocarrilero. Se planea el inicio de la construcción del túnel para el 14 de junio del 2011 en la ventana A, una duración de proyecto de 965 días naturales por lo que la fecha de finalización sería el 3 de febrero del 2014.

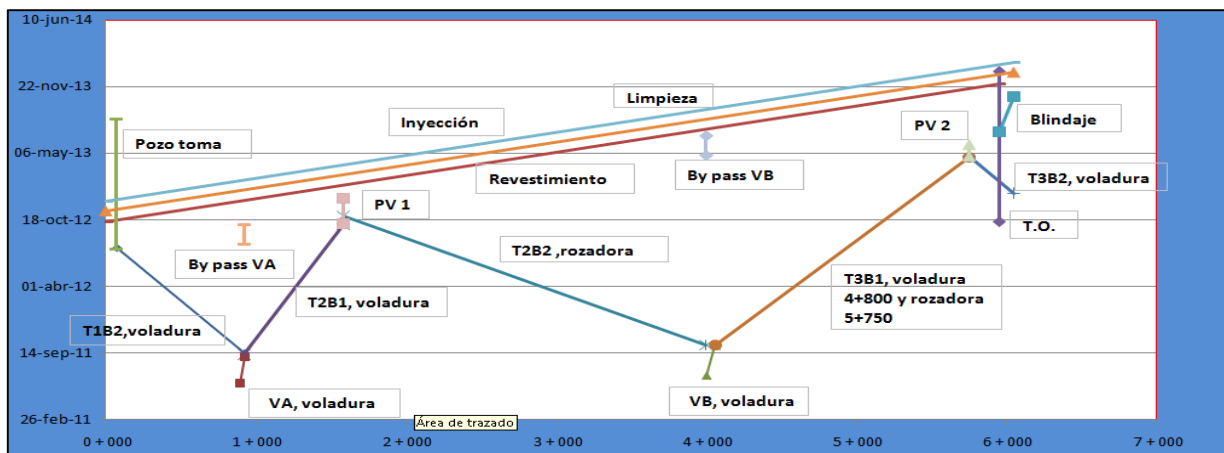


Figura 20. Gráfico Ferrocarrilero del PA Cachí.
Fuente. Documentos del Proyecto.

Para la construcción de este túnel se utilizarán dos métodos de excavación de donde se obtuvieron rendimientos promedio en rocas con resistencia a la compresión simple de entre 15 y 30 MPa (en su mayoría brechas). En los frentes de trabajo 1, 2 y 4 se proyectan realizar el avance mediante el método convencional de perforación y voladura, utilizando emulsión o gel acuoso con sostén de la voladura, la cual recibe la señal eléctrica a una velocidad mínima de 5000 m/s y fulminantes no electrónicos. La figura 3 muestra la plantilla de voladura que se utilizará en el proyecto, que prevé la ejecución en cada frente de 55 perforaciones de 38 mm de diámetro para la voladura.

El otro método de excavación que se pondrá en práctica en el proyecto es mediante el uso de una máquina rozadora o minadora; esta máquina iniciará la excavación a partir de la ventana B en sentido aguas abajo – aguas arriba. El tramo de excavación que se realizará mediante

este método convencional mecanizado tendrá una longitud de 3370 m, lo que significa aproximadamente un 60% de la longitud total del túnel. Al ser esta la primera vez que se utiliza este método de excavación en el país, hay poca información y conocimiento sobre estos equipos y metodologías de trabajo en campo.

Para el frente T3B1, se utilizará inicialmente el método convencional, una vez finalizada labores por la rozadora en el frente T2B2, este equipo será trasladado al frente T3B1, por lo que en el gráfico se observa una sola línea de rendimientos al no conocer los rendimientos actuales de la nueva máquina.

Debido al poco conocimiento de los rendimientos con rozadora, se decidió mantener el mismo rendimiento en el trazo que marca T3B1, tramo que será revisado para poder expresar las diferencias en rendimientos de una metodología con otra.

CUADRO 4. DISTRIBUCIÓN DE TRAMOS DE TÚNEL

Frente de trabajo	Método de excavación	Estacionamiento inicial (m)	Estacionamiento final (m)	Longitud de tramo (m)
1	Perforación y voladura	0 + 924	0 + 070	854
2	Perforación y voladura	0 + 924	1 + 580	656
3	Rozadora (T2B2 y T3B1)	4 + 000	1 + 580	2420
		4 + 800	6 + 000	950
4	Perforación y voladura	4 + 000	4 + 800	800
5	Perforación y voladura	6 + 000	5 + 750	250

Esta nueva metodología pretende incrementar los rendimientos y avances de perforación, por ende una mayor eficiencia y una disminución en los costos del proyecto; para lograr estos objetivos de la manera más óptima hay varios factores que entran en juego, uno de ellos es lograr el mejor rendimiento de todos los equipos en el proceso, esto a su vez depende de los ciclos de trabajo, para los cuales no existe experiencia previa que permita optimizar de manera efectiva los rendimientos de la rozadora.

Tratamiento de inyección al avance

Debido a los requerimientos establecidos en la construcción del túnel, con el fin de no abatir y de mantener en lo posible los niveles freáticos existentes, además de dejar inalterada la presión hidrostática alrededor del túnel existente, se realizará un tratamiento de inyección al avance en zonas que se considere necesario, con inyecciones de lechada de cemento, lo que aumentaría la impermeabilidad del medio rocoso hacia el frente de excavación y mejora la condición geomecánica de los materiales a excavar; evitando el drenaje de los manantiales utilizados por varias comunidades locales.

Se utilizaron criterios de acuerdo con los análisis previos realizados con base en la excavación y operación del túnel actual, además de las diferentes pruebas realizadas al macizo rocoso y las perforaciones exploratorias, para definir las zonas a inyectar.

El tratamiento de inyección al avance consiste en; crear una plantilla de perforación del frente del túnel, donde básicamente la cantidad de perforaciones a realizar dependerá de la calidad del material, presión del medio y la presencia de agua, se espera que sea un mínimo de 12 perforaciones de aproximadamente 15 m de longitud, estos abanicos se traslaparían 5 metros, lo que significa que habría avances cada 10 m quedando siempre 5 m doblemente sellado al realizarse el tratamiento. Las perforaciones llevan una determinada inclinación que también dependerá del medio, logrando producir un cono de tratamiento. A éstas se le inyectará una lechada de concreto con presiones que varían de entre 1 – 40 kg/cm².

A continuación se muestran figuras del esquema de plantilla de perforación a utilizar y un esquema de la zona tratada con inyección.

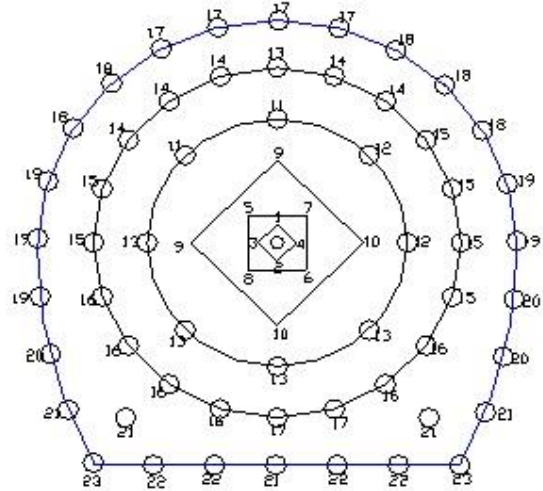


Figura 21. Plantilla de perforación para el tratamiento de inyección al avance.
Fuente. Informe de Factibilidad Proyecto Ampliación Cachí.

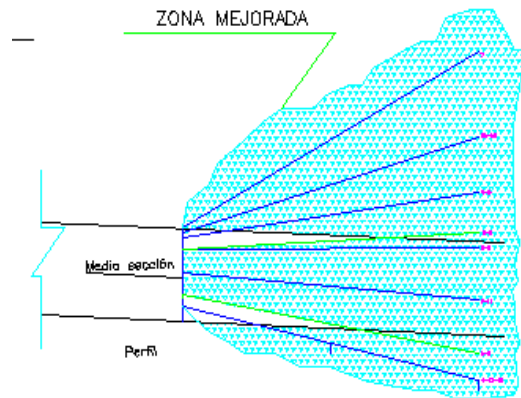


Figura 22. Esquema de la zona tratada con inyección
Fuente. Informe de Factibilidad Proyecto Ampliación Cachí.

Este tratamiento logra un mejoramiento notable en el terreno circundante además de la impermeabilización del mismo, a su vez la aplicación del tratamiento trae abajo los

rendimientos de excavación con los métodos a utilizar.

Más adelante en la sección de rendimiento se comentará más acerca de este tema.

Equipo a utilizar

Se plantea que los diferentes frentes de trabajo se movilicen por medio de vía férrea, además los equipos se movilizarán de la misma manera. Para mostrar más claro los equipos a utilizar, éstos se separan de acuerdo con el método de excavación.

Por el método de perforación y voladura se proyecta utilizar:

- Cargador de perfil bajo
- Jumbo de dos brazos
- Locomotoras
- Vagones Lanzaderas (Citrón)
- Ventiladores
- Compresor de aire
- Equipo de colocado de pernos

Por el método convencional mecanizado se proyecta utilizar:

- Rozadora
- Transformador
- Locomotoras
- Vagones Lanzaderas (Citrón)
- Ventiladores
- Compresor de aire
- Supresor de polvo
- Bandas transportadoras
- Equipo de colocado de pernos

Rozadora en el Proyecto Ampliación de la Planta Hidroeléctrica Cachí

Después de una serie de estudios y perforaciones realizadas, se determinó factible la utilización de una rozadora, esto se debe

principalmente a dos razones: la primera es que la resistencia del macizo es baja en valores de la resistencia a la compresión simple y de velocidad P, valores que son manejables con una máquina minadora; como segunda razón se tiene que se evitaría en una alta longitud de tramo del túnel el uso de explosivos minimizando la influencia debido a las vibraciones sobre el túnel existente.

Además, a estas razones se suma que el equipo tiene un costo aceptable y un buen desempeño, ya que de manera teórica se pueden conseguir rendimientos superiores a los obtenidos con el método tradicional de perforación y voladura.

La máquina rozadora que se utilizará es una Sandvik Roadheader Tuneneling MT360, traída al país por una casa distribuidora de equipos de minería de nombre TECUN.

Tiene un brazo articulado de cabeza transversal y un peso aproximado de 57 toneladas por lo que es clasificada como una máquina pesada con una potencia en la cabeza de corte de 200 kW, el sistema de carga de este equipo de ruedas recolectoras es en formas de estrellas.

El modelo de este equipo no tiene consola de control, sino que está equipado con una cámara que transmite video al operario del frente del túnel, por lo que a partir de la experiencia del operador y el equipo de topografía, se puede dar un mejor trazo a la excavación.

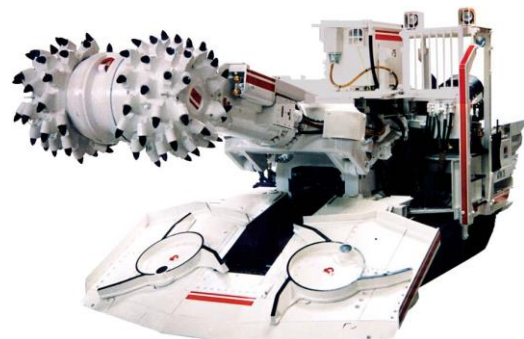


Figura 23. Rozadora Sandvik Modelo MT360
Fuente. Manual de operación de la rozadora Sandvik MT360

Esta máquina es considerablemente grande para las necesidades del proyecto, su potencia en la cabeza de corte permite excavar rocas de hasta 100 MPa en compresión simple,

esto por cuanto las características mecánicas de la roca del Proyecto de Ampliación Cachí se encuentran en el promedio 20 – 30 MPa. Se decidió la compra de una máquina mucho más grande y robusta con el fin de proyectar el uso de la misma en futuros proyectos, y prevenir que se encuentren mejores características de roca.

Las picas que se utilizarán se determinaron por medio de un estudio que hizo la empresa encargada de construir la rozadora. Para este fin el ICE, a partir de las perforaciones de investigación que se realizaron para el túnel, envió a la empresa Sandvik muestras de roca de los sitios. Determinando que la pica más conveniente es la tangencial de cuerpo pesado modelo Q7 AU 3870, con una punta de corte diseñada para materiales de medio a duros.

Este modelo de maquinaria es de gran potencia, por lo que una adecuada planificación de obra puede lograr muy buenos resultados. Como se mencionó anteriormente, la longitud del túnel es de 5970 m, de los cuales 3370 m corresponden al tramo donde se utilizará la rozadora para realizar la excavación.

Es importante tomar en cuenta cómo se encuentran distribuidas las calidades de roca en el tramo donde se utilizará esta minadora, ya que según la fórmula de tasa neta de corte, se esperan mucho mejores rendimientos en roca de menor calidad en cuanto a la resistencia a la compresión simple, aunque esta condición no siempre se cumple debido a que en términos de avance, rocas de menor resistencia requieren más colocación de soporte temporal aumentando los tiempos por ciclo.

En el cuadro se muestra la distribución de roca según la clasificación RMR en el tramo donde se utilizará la rozadora. Donde resulta claro que las características del túnel se prestan favorables, ya que la roca III según su RMR es la que tiene mayor presencia.

Estos tramos donde se utilizará esta metodología de excavación quedan más claros en el plano de perfil geotécnico que se encuentra en el anexo 8, el cual fue facilitado por el área de

geotecnia del Proyecto de Ampliación de la Represa Hidroeléctrica Cachí. Este plano fue modificado, con el fin de dejar más claros los datos que son importantes para el cálculo de los rendimientos de la minadora, además los tipos de roca presentes en los tramos por donde va excavar la misma.

De este se extrajo el cuadro 5 donde se describe de manera porcentual la distribución de roca presente según su RMR a lo largo del trazo donde se pretende utilizar la rozadora.

CUADRO 5. DISTRIBUCIÓN DE ROCA DEL TRAMO DE TÚNEL DONDE SE UTILIZARÁ LA ROZADORA					
Long de túnel de uso de la rozadora = 3371 Corresponde a un % del túnel = 56%					
Datos	Clasificación de roca según RMR				
	I	II	III	IV	V
Long presente en el túnel (m)	0	1098	1939	333,7	0
% de excavación	0,0%	2,58%	57,52%	9,90%	0,0%

La definición de los tramos donde se utilizará la rozadora es debido a que la presencia de agua es mucho menor que en los tramos donde se utilizará voladura, ya que la afluencia de agua obliga a realizar el tratamiento de inyección al avance, lo que significa retirar la rozadora del túnel para hacer ingresar jumbos y equipos de perforación para realizar la actividad, lo que produce pérdidas considerables en los avances diarios

Posibles riesgos en la excavación utilizando la rozadora.

Un riesgo se define como una característica física o química de un material, proceso o instalación que tiene el potencial de causar daños a las personas, a la comunidad o al medio ambiente.

Los estudios de evaluación de riesgos (ER) ofrecen a las organizaciones una serie de datos que contribuyan a mejorar la seguridad y la gestión de los riesgos, con la finalidad de reducir o eliminar los riesgos inherentes a los diversos tipos de actividades y procesos. De esta forma, estos estudios son "esfuerzos organizados para la identificación y el análisis de las situaciones de riesgo asociadas a las actividades de los procesos". En resumen, los estudios de ER se utilizan para detectar aquellos puntos débiles en el diseño y el funcionamiento de las instalaciones que pueden ocasionar vertidos accidentales de productos químicos, incendios, explosiones y otros daños con consecuencias adversa

En el caso del proyecto la utilización de metodología es completamente nueva por lo que existen una serie temas en cuanto a riesgos que deben ser analizar para de esta manera prevenir y conocer una posible acción a seguir.

Dentro de este capítulo se intenta analizar los posibles riegos que afecten directamente a la producción de la rozadora, esto principalmente por los alcances del trabajo. Se sabe que existen muchos más riegos que deben analizarse mediante una evaluación de riegos, con el fin de prevenir eventuales situaciones que no solo afecten a la producción sino a también a la integridad de la maquina y más importante al personal que se encuentra en el frente de excavación.

En el cuadro 6 a continuación se muestra un análisis de riego mediante una matriz de riego, donde se evalúan una serie de situaciones que pueden afectar la utilización de la maquina, ya sea disminuyendo la producción de la misma o hasta parando sus actividades.

En este análisis además se presentan posibles acciones que ayuden a prevenir los posibles riesgos, y algunas acciones en caso de que el ocurra la acción de riego.

Es importante mencionar que ante cualquier eventualidad hay responsables directos, para tomar acciones o asumir responsabilidades. Dentro de la matriz no se aclaran cuales serian los posibles responsables ya que es un tema aun por revisar dentro del proyecto.

Una vez entrada en funcionamiento el equipo de la rozadora, la constante evaluación de riegos fortalecerá aun más el plan de riesgos, ya que debido al poco conocimiento sobre el tema, pueden quedar una serie de riesgos sin analizar. Riesgos que pueden ser observados y entendidos en la etapa de excavación.

CUADRO 6. MATRIZ DE RIESGOS

UBICACIÓN	ACTIVIDAD	A REALIZAR	RIESGO	COMENTARIOS	RESPUESTA AL RIESGO	
Excavación del túnel Proyecto Ampliación Cachí, mediante el uso de una rozadora.	Excavación con rozadora	Excavación en zonas de fallas	Desprendimientos de material del frente del túnel.	En las zonas de falla, el material es inestable, por lo que existe una alta probabilidad de desprendimientos de grandes segmentos que pongan en riesgo el frente de trabajo.	Realizar avances cortos, para asegurar con el debido sostenimiento el frente del túnel, además de proteger la integridad de la rozadora.	
			Colapso del frente del túnel	En las zonas de falla, debido a la inestabilidad del material, se vuelven en zonas muy propensas a que el frente del túnel colapse.	Realizar soluciones para aumentar la seguridad en el avance como lo son túneles piloto.	
		Excavación con fuertes filtraciones de agua	Derrumbes	Las filtraciones de agua al frente del túnel inestabilizan el terreno además de aplicarle presiones que pueden finalizar en un colapso de las paredes del túnel.	Si representa un riesgo para la integridad del equipo, se recomienda el cambio de equipo de excavación, mientras se pasa zona de falla.	Liberar presiones que puedan provocar el colapso del frente. (Presiones de agua)
					Se pueden realizar túneles piloto con el fin de drenar las cantidades de agua	Utilizar bombas para drenar el agua, se debe analizar si es posible el avance con rozadora.
		Excavación en zonas con dureza y abrasividad mayores a las especificaciones de la maquina	Uso excesivo de picas	Uno de los parámetros que se utilizo para la compra de la maquina fue una resistencia a la compresión simple promedio de entre 15 y 30 MPA, pero dentro del macizo pueden existir pico que superen estos valores, los que pueden influir sobre el funcionamiento de la maquina.	Evaluar la posibilidad de cambiar metodología de excavación, a métodos manuales, donde se coordine si es posible realizar un cambio en la maquinaria de un frente a otro.	
			Perdida de producción de la rozadora		Planear que en zonas de alta dureza y abracividad se puedan realizar una mayor constancia en las revisiones de picas, con el fin de no extralimitar y correr el riesgo de dañar la cabeza de corte	
			Aumento de mantenimiento			
		Riegos con el uso de la rozadora	Posibilidad de incendio	Durante la excavación existe el riesgo de incendio, para el cual se debe tener un plan de emergencia ante estas situaciones.	Informar y tener planes de emergencia frente a un incendio con las respectivas medidas de seguridad, lugares fijos de extintores y tomas de agua. Una correcta marcación de rutas de escape.	

CONTINUACIÓN CUADRO 6.

	Excavación con rozadora	Riegos con el uso de la rozadora	Averías de la maquina	Todo equipo en trabajos de alto impacto está expuesto a averías que no se pueden prevenir, por lo que se debe contar con soluciones rápidas para no afectar la producción de excavación.	Capacitar a los técnicos de mantenimiento para que en casos de avería pueda tomar acciones rápidas.
			Averías en sistema eléctrico que abastece de energía la rozadora	Los equipos a utilizar en el túnel son eléctrico, por lo que se debe mantener un estricto control y mantenimiento sobre las instalaciones que abastecen de energía a los diferentes equipos	Realizar mantenimientos preventivos, en caso de avería, evaluar la condición y de ser necesario se para el avance o se cambia metodología mientras se hacen las reparaciones respectivas sobre la rozadora.
			Avería en el supresor de aire	El supresor de aire es un equipo complementario de la rozadora, que su función es minimizar la contaminación por polvo provocada por el roce contra la roca, y	Al frente del túnel junto con la rozadora debe haber un técnico encargado en velar por el buen funcionamiento de las redes eléctricas de suministro.
					Mantenimiento preventivo de las piezas que forman el supresor, revisión y limpieza continúa de los filtros de polvo.
					En caso de falla, contar con mascarillas diseñadas para entornos cargados de polvo para el frente de trabajo.
<p>Nota: La poca experiencia sobre la metodología con equipos rozadora en el país, puede dejar una serie de riegos de ser analizados, por lo que es importante ya entrado el equipo en funcionamiento, realizar evaluaciones periódicas de riesgo con el fin de disminuir posibles eventualidades que reduzcan los rendimientos propuestos además de la seguridad al frente del túnel.</p>					

Ciclos de excavación del túnel con rozadora

La excavación de túneles se considera cíclica, llevando a cabo una serie de actividades o fases de trabajo, que se ordenan de manera lógica velando por la seguridad del frente de excavación y al concluir este grupo de actividades, se inicia un segundo grupo y así sucesivamente.

En este caso, al utilizar una rozadora uno de los principales fines es lograr la mayor continuidad en el uso de la misma; logrando ciclos mucho más extensos con mejores avances.

Para el caso del túnel a construir, se debe realizar una planificación de obra para el uso de esta máquina buscando desempeño óptimo, donde se tienen que tomar en cuenta las características del túnel y la máquina minadora a utilizar.

El ciclo de excavación para este túnel utilizando rozadora se puede considerar integrado por las siguientes actividades.

- Rozado
- Carga y extracción de escombros
- Tiempo de colocación de soporte temporal
- Tratamiento de inyección al avance

El desarrollo de los temas a continuación se logró gracias a entrevistas y aportes de conocimientos del Ing. Luis Fernández Fernández.

Variables que afectan en cada actividad

Esta sección explica en qué consiste cada una de las actividades que componen el ciclo de excavación, cuáles pueden ser aquellas variables que deben ser manejadas y observadas para de esta manera disminuir los tiempos muertos.

Rozado

Esta actividad pretende realizar el mayor avance de excavación en el menor tiempo posible, principalmente depende de la calidad de roca, ya que la máquina de acuerdo con la potencia de la cabeza de corte, puede alcanzar una producción esperada.

En esta actividad pueden presentarse una serie de factores fuera de control que lleguen a disminuir el rendimiento del rozado (acción del equipo al triturar la roca), en el sentido de que hay que detener la máquina minadora; como por ejemplo, la presencia de polvo que se genera contra el roce de la roca, razón por lo que se cuenta con un equipo complementario que es un supresor de polvo para evitar este problema. Otro inconveniente que se puede presentar son cortes en el suministro eléctrico o hasta fallas mecánicas en el equipo, que paralicen el flujo continuo del rozado.

Para evitar en la medida de lo posible estos problemas, se va a realizar un mantenimiento preventivo de la máquina, el cual va a ser programado conforme la experiencia que se vaya adquiriendo con el avance del túnel. Inicialmente se va a procurar realizar este mantenimiento con la mayor regularidad posible.

Marcado de tope: Esta subactividad consiste en marcar el perímetro de la sección de túnel a rozar, generalmente se hace con pintura. Con equipos más avanzados se puede hacer proyectando la imagen de la plantilla de la sección a excavar en el frente del túnel.

Esta puede ser crítica al inicio del túnel, la máquina rozadora al no tener consola de control necesita que se realice el marcado de tope; tomando en cuenta la curva de aprendizaje, se espera que pasado el tiempo los operadores

necesiten menos de esta actividad ya que observando el perfil del túnel pueden inferir la dirección con la que deben continuar.

Carga y extracción de escombros

Esta actividad radica en cargar todo el material suelto resultante del rozado. La rozadora por sí sola está equipada con un equipo de carga al frente de la misma por medio de unos brazos hidráulicos recolectores, los cuales guían el material suelto a una banda transportadora a su parte trasera. Es por esto que esta actividad no necesariamente afecta el ciclo de excavación, ya que la rozadora va efectuando la actividad paralelamente con su avance.

Después del proceso se pueden presentar dos tipos de carga: uno en el que la minadora simplemente deja acumular el material mientras que un cargador lo traslada a las vagonetas para extraerlo del túnel, o una segunda opción sería que la minadora deposite este material directamente en vagones para ser extraído por vía férrea.

Igualmente puede significar un problema que afecte directamente el ciclo de excavación si se acumula material, debido a ciclos de extracción más lentos, lo que provocaría la detención del rozado.

Para el caso del túnel del Proyecto Ampliación de la Planta Hidroeléctrica Cachí, será por medio de vía férrea, se describirá el proceso para una mejor comprensión.

Para la extracción utilizando equipo de vía férrea, se recurrirá al sistema denominado "Shuttletrain", también conocido como "tren de piso deslizante". Este sistema consiste en una serie de carritos especiales o vagones remolcados por una locomotora, donde cada uno de estos vagones en su piso posee una banda transportadora o piso deslizante, que ira transfiriendo el material de un carrito a otro; una vez que el carrito que está inmediatamente después de la locomotora está lleno el material se seguirá transfiriendo al vagón siguiente y así sucesivamente.

Por estar colocados en serie, la descarga final de un carro es la carga inicial del siguiente, esto convierte al sistema en una longitud de tren unitario. Para estos sistemas existen dos tipos de carros:

Acarreo de recorrido corto: el proceso se inicia cuando el primer carro esté totalmente cargado, se procede a transferir la carga de escombros al segundo, este al estar completamente cargado se lleva de botadero, mientras tanto el primer carro está siendo cargado de nuevo.

Acarreo de túnel largo: Esta opción propone un proceso de carga de escombros y acarreo continuo por avance, colocando la cantidad necesaria de vagones para dar a abasto con la cantidad de volumen suelto. Los vagones poseen paredes laterales y no tienen la frontal ni la posterior, éstos carros deben permanecer acoplados durante toda la etapa de carga y transporte de los escombros.

Para la carga de los vagones, puede utilizarse una pala de cargador tipo "Hägglöader" que utiliza brazos excavadores para recoger los escombros y colocarlos sobre una banda transportadora, la cual transfiere la carga al carro para su transporte respectivo. Se pueden adaptar a los diferentes vehículos de acarreo, en cuanto a altura de maquinaria se refiere, además trabajan de manera continua.

Para la estimación de los tiempos, se consideran los siguientes aspectos:

Velocidad de la locomotora: dependiendo de la locomotora que se esté utilizando, así será la rapidez con que el tren se traslade del sitio del botadero al tope del túnel.

Tiempo de conexión y carga (Tcc): en esta etapa se procede a hacer la conexión de los carros de piso deslizante y el cargador, a la fuente de poder eléctrica o neumática. El tiempo se puede estimar en 1,5 minutos por vagón, por lo que el total está en función del número de carros que se utilicen, por lo que se puede suponer una relación de orden lineal que involucre ambas variables. Cuando finaliza esta etapa, se inicia el proceso de carga.

$$T_{cc} = 1,50 \times \# \text{ de vagones} \dots\dots\dots Ec 4$$

Tiempo de limpieza (TI): es necesario realizar una limpieza entre los rieles de la vía, esto toma un tiempo aproximado de 3 a 5 minutos.

Tiempo de carga (Tc): es un proceso continuo, mientras que la carga se transfiere a otros carros, los cuales son llenados uno a uno, hasta que la etapa de carga y limpieza de piso ha sido completada. El tiempo de esta actividad viene

dado por la capacidad de producción por hora de la rozadora.

Tiempo de desconexión (Td): una vez finalizado el proceso de carga, se pasa a desconectar los carros y el cargador de la planta de poder. Esto toma un tiempo aproximado de 1 a 3 minutos.

Tiempo de viaje al botadero (Tv): consiste en llevar los vagones cargados al botadero, este tiempo depende de la distancia del botadero al tope del túnel.

$$Tv = \frac{\text{Dist.al botadero (m)}}{\text{Vel.tren (m/min)}} \dots\dots\dots \text{Ec 5}$$

Tiempo de conexión (Tcx): al llegar al sitio del botadero, se conectan nuevamente los carros a la máquina de poder, esto con el fin de llevar a cabo el proceso de descarga. Este tiempo de conexión se estima por lo general en 1 a 2 minutos.

Tiempo de descarga (Tdc): la estimación del tiempo de descarga total de los escombros depende de la velocidad de descarga de cada uno de los carros, la cual es de aproximadamente de 5 minutos por cada carro

Tiempo de colocación de soporte temporal

Gonzales, L (2004) en el libro *Ingeniería Geológica* señala que la determinación del soporte temporal puede ser mediante una relación directa con el RMR ("Rock Mass Rating) de la roca presente, para la cual genera una tabla que permite ver la relación antes mencionada, tabla que se puede observar en el anexo 2.

Para el proyecto, la determinación del soporte temporal se realizó con base en estudios de geotecnia, a partir de los informes realizados para el túnel en funcionamiento y una serie de perforaciones ejecutadas para el túnel a construir, además se toman en cuenta las características de hidrogeología y el tiempo de sostenimiento.

A continuación se definen los tipos de soporte temporal que se utilizarán según la necesidad geológica que prevalece en el sitio de trabajo, esto es indispensable para la modelación del ciclo de excavación. Se debe considerar el incremento de tiempo por la colocación del soporte temporal, el cual se define como las actividades necesarias para brindarle a la sección excavada el sustento necesario, en cuanto a resistencia y seguridad, para luego continuar con

el siguiente ciclo de excavación. Es lógico integrar el tiempo de soporte temporal al ciclo de excavación.

Se tiene previsto utilizar los siguientes tipos de soporte temporal:

- Roca Desnuda (RD)
- Pernos de anclaje. (PE)
- Concreto Lanzado (CL)
- Arcos de acero (AA @ distancia entre centros de cada arco)

Los rendimientos y tiempos de los siguientes soportes temporales, son con base en la memoria de cálculo de obras subterráneas del Proyecto Hidroeléctrico Pirrís y visitas de campo a un túnel carretero para el Proyecto Hidroeléctrico Reventazón.

Roca desnuda (RD)

Esta condición de soporte se da en rocas de buenas características, por lo que no se requiere de ningún soporte temporal, por lo tanto no se incrementa el tiempo ciclo de excavación.



Figura 24. Foto del túnel Carretero en Reventazón, Roca Desnuda.

Pernos de anclaje (PE)

La colocación de pernos es una actividad que depende de las características del frente del túnel, se pueden presentar dos tipos de pernos según sea el caso: pernos sistemáticos, son una serie de pernos que se colocan de forma ordenada con una separación establecida, esta condición de pernos se presenta cuando es una sección amplia donde se presentan problemas de

sostenimiento; por otro lado, están los pernos puntuales, los cuales se colocan en puntos problemáticos pero a su vez puntuales y se colocan los necesarios para darle el sostén a esa zona.

Para estimar el tiempo de colocación de pernos se deben considerar aspectos como el número de pernos a colocar, el cual es variable dependiendo de las condiciones geológicas, el largo del perno y la cantidad de máquinas perforadoras a utilizar. Generalmente el tiempo de colocación es de 3 minutos por perno, pero además de esto se deben tomar en cuenta otras actividades a realizar para la colocación de pernos como la entrada de equipos para barrenar, la barrenación de los huecos donde se colocarán los pernos y la salida de los equipos.



Figura 25. Foto del túnel Carretero en Reventazón, pernos puntuales.

Concreto Lanzado (CL).

Hay aspectos que influyen en la determinación de tiempos de colocación tales como la sobreexcavación, donde se excava la roca más allá del perímetro establecido, y el rebote del concreto donde se considera la pérdida de concreto por el efecto del lanzamiento de concreto al chocar contra la pared de la superficie del túnel.

Para el espesor de la capa de concreto lanzado se estima un valor recomendable de 7,5 centímetros, el valor utilizado en el rendimiento para el modelo es de 10 centímetros, dato utilizado en el informe.

También conocer el espesor de la capa de concreto lanzado, la cual por lo general oscila

entre valores de 5 a 15 centímetros, es recomendable al menos un valor de 7,50 centímetros. Para el modelo se utiliza un espesor de 10 cm.

Otro punto importante es el equipo que se utiliza para lanzar concreto, este puede marcar el rendimiento de la actividad, utilizando un equipo vía húmeda, que marca un rendimiento de 30 min/m³ aproximadamente.



Figura 26. Foto del túnel Carretero en Reventazón, colocación de concreto lanzado.



Figura 27. Foto del túnel Carretero en Reventazón, soporte concreto lanzado.

Para el túnel a construir es importante recalcar que no se utilizará malla electrosoldada, para cumplir las mismas funciones estructurales, se le añadirá al concreto una fibra sintética.



Figura 28. Foto del túnel Carretero en Reventazón, fibra sintética que se le añadirá al concreto lazando para sustituir malla electrosoldada

Arcos de acero (AA @ distancia entre centros de cada arco)

Esta actividad depende principalmente de las habilidades del personal dentro de la cuadrilla de tuneleros para realizar el montaje y colocación de los arcos de acero, estos están definidos por la configuración de la sección del túnel. Según la información observada en la memoria de cálculo ya mencionada, se utiliza un rendimiento de 11,8 minutos/metro.



Figura 29. Foto del túnel Carretero en Reventazón, soporte temporal arcos de acero.

Generalmente se realizan combinaciones de los diferentes tipos de soporte ya explicados, con el fin de dar una mayor seguridad de trabajo en el frente del túnel, en la modulación se

tomarán en cuenta estas combinaciones para determinar tiempos más exactos en los ciclos de excavación.

Algunas de las combinaciones que se usarán en el túnel de Ampliación del Proyecto Hidroeléctrico Cachí son:

- CL + PE
- RD + AA @ 1,25m
- RD + AA @ 1,0m
- RD + AA + CL @1,25m
- RD + AA + CL @1,0m

Tratamiento de inyección al avance

Este tratamiento es una actividad que por la cantidad de perforaciones que se tienen que realizar y la profundidad de las mismas, va a consumir tiempo considerable, reduciendo el avance por ciclos.

La duración de la actividad para 20 huecos a profundidad de 15 metros cada uno, anda por encima de 24 horas de duración, por lo que cuando se deba realizar inyección, se ponderarán los tiempos de las diferentes actividades del ciclo para conocer el avance diario promedio.

Simulaciones del ciclo de excavación con rozadora

En general la construcción de túneles es percibida como proyecto de alto riesgo, por lo que la planificación es fundamental con el fin de ahorrar tiempo y costo, para que resulte en proyectos de construcción productivos. Parte importante de esta planificación es tomar la decisión de determinar la secuencia más óptima del método constructivo a desarrollar, logrando mejores resultados en avance sin comprometer la seguridad del personal trabajando al frente del túnel.

Con el uso de simulaciones los puntos mencionados anteriormente pueden ser analizados y controlados.

Según la literatura relacionada con el tema de construcción de túneles se concluye que

el ciclo de excavación se compone de tres principales procesos, que son la excavación, la remoción de escombros y la colocación de soporte temporal. Todas las actividades en cuestión están relacionadas entre sí, y con el fin de optimizar la productividad, todo el proceso debe ser analizado. Las mejoras en el proceso de excavación son inútiles si no se optimiza sincronizadamente con mejoras en la remoción de escombros.

Se pueden mencionar razones importantes para el uso de la simulación en la construcción de túneles como:

Planificación del proyecto: el uso de simulación facilita la planificación de la secuencia de las actividades de trabajo.

Identificación de cuellos de botella: se pueden detectar problemas en el proceso de construcción mediante simulaciones.

Ofrece una comparación de escenarios alternativos de túnel: permite predecir resultados utilizando diferentes escenarios.

Para este proyecto, el método de excavación con rozadora es por primera vez usado en el país, por lo que no se tienen datos reales que ayuden a realizar la planificación de la excavación, es por esto que se opta por la utilización de simulación para lograr un acercamiento más real a los avances diarios esperados.

Los rendimientos de la maquinaria minadora fueron calculados según las fórmulas antes presentadas, estos datos serán incorporados dentro de simulaciones para conocer los diferentes resultados de avance que se pueden obtener con diferentes escenarios.

Las actividades de remoción de escombros y colocación de soporte temporal son procesos conocidos, por lo que se cuenta con datos de rendimientos reales medidos en campo en el túnel carretero que se está realizando en Reventazón, con recomendaciones del Ing. William Aguilar el día 12 de abril del presente año y datos recopilados del proyecto Hidroeléctrico Pirrís. Igualmente estos datos serán base de las simulaciones.

Hay otras actividades secundarias que también forman parte del ciclo de excavación las cuales se tomaron en cuenta para realizar las simulaciones; tales como:

- El cambio de turno, el cual puede disminuir los rendimientos de avance si estos no están bien coordinados.
- Los tiempos de comida.
- El marcado de tope, que como se menciono anteriormente, es una actividad que al inicio puede ser crítica, luego cuando el operador del equipo adquiere experiencia en el uso de la minadora se irá disminuyendo esta actividad.
- El mantenimiento del equipo es una actividad indispensable que debe realizarse con regularidad para mantener la vida útil de la maquinaria y prevenir daños graves en el equipo por piezas desgastables.

Con respecto a la extracción del material, la rozadora tiene la capacidad de realizar esta actividad de forma paralela con la excavación, por lo que la extracción no debería adicionar tiempo al ciclo. Se debe verificar esto, en caso de no ser así, buscar soluciones para lograr la mayor continuidad del proceso, y así minimizar los tiempos generados por extracción al ciclo.

Esta simulación de extracción se basa en los datos de tiempos vistos en la simulación de excavación, ya que se podrá saber cuáles son los tiempos donde se puede realizar la actividad de extracción sin afectar la excavación.

Actualmente la idea para realizar la extracción es por vía férrea utilizando vagones lanzadera, los cuales a través de un piso deslizante tienen la capacidad de ir trasladando el material excavado de un vagón a otro. Para esto, luego de la excavación, la rozadora a través de su sistema de recogida traslada el material excavado a una banda transportadora, que trasporta el material a los vagones lanzadera.

En este momento se planea colocar cinco vagones lanzadera, y una vez que estos estén llenos se procederá al traslado del material desde el frente del túnel al botadero.

Se debe lograr con estas simulaciones del proceso de extracción encontrar posibles fallas del sistema para prevenir tiempos muertos que le agreguen tiempo improductivo al ciclo de excavación.

Control de producción y costos (Formulario F10)

El control de costos y producción es una herramienta que se debe implementar en el desarrollo de todo proyecto.

Desde inicios de un proyecto se debe planificar de qué manera se va a realizar el seguimiento y control de producción con el fin de mantener dentro de los parámetros establecidos en la planificación los resultados que se esperan obtener en el desarrollo constructivo. Esta producción o rendimiento va directamente relacionada con los costos planificados, por lo que el control inmediato puede llegar a prevenir desde el punto económico el desplome de un proyecto.

Para el Proyecto de Ampliación PH Cachí, una vez que la rozadora entre en funcionamiento, es importante llevar un control específico de cómo se está desempeñando el equipo ya que esta máquina significa una nueva metodología de excavación de túneles para el país, en este caso en el ICE, por lo que es importante crear esta base de datos para futuros proyectos.

Igualmente se debe controlar el consumo de las piezas desgastables realizando comparaciones de acuerdo con lo planificado y conforme a los datos recopilados, de esta manera, si no se están logrando los valores de los rendimientos esperados, poder estar en condiciones conforme a esos datos; de encontrar razones que puedan estar generando problemas en producción y así trabajar en ellas para poder levantar esos rendimientos; tomando en cuenta la relación que existe entre la potencia de la máquina y la geología existente.

Con un correcto control en la producción y consumo de piezas se pueden realizar proyecciones más reales en cuanto al consumo de picas en lo que restaría del proyecto, rendimientos obtenidos durante el proyecto y posibles a obtener.

Se pretende también a través de esta información crear una base de datos que permite funcionar como plataforma para el cálculo de avances, tiempos de ejecución y costos de proyectos futuros donde se utilice la excavación por rozadora.

Actualmente, dentro del ICE existe un departamento de la UEN PySA, llamado “Centro de Servicio a Proyectos” (CAP), que se encarga de administrar estos datos y, como tal, crear los debidos controles sobre la producción, rendimientos y avances de las diferentes actividades que se realizan en los proyectos del ICE; que para este caso serían obras subterráneas, específicamente en la obra túnel, mediante la implementación de formularios que son día a día llenados por inspectores que se encuentran en la obra, para que luego el ingeniero a cargo proceda a revisar los datos obtenidos de la obra determinada.

Para proyectos con obras subterráneas, el CAP creó un formulario con el que se pretende recopilar información necesaria acerca los rendimientos de las diferentes actividades que componen el ciclo de excavación de un túnel (Formulario F.10, anexo 10). Esto fue desarrollado para perforación y voladura, donde se toman en cuenta variables que para esta nueva metodología no funcionarían, por lo que se decidió adaptar este formulario para la implementación del sistema de excavación con rozadora.

Para determinar los datos que deben revisarse se hizo una investigación de diferentes proyectos a nivel internacional donde se ha utilizado la rozadora como método de excavación. A partir de esta información se planteó una hoja de control, que sirvió para incorporar ítems importantes en el formulario F-10 (nomenclatura establecida por el CAP), que será utilizado para el control de producción de la rozadora. La hoja se presenta en el apéndice 10.

Metodología

La práctica dirigida se desarrolló en el Proyecto Ampliación Cachí, ubicado en los cantones de Paraíso y Jiménez, distritos de Cachí y Tucurrique de la provincia de Cartago. Esta práctica se cumplió entre los meses de febrero y julio del año 2011, en el Departamento de Soporte Técnico, específicamente en el área de obras subterráneas.

El Proyecto Ampliación Cachí es ejecutado con personal y recursos del Instituto Costarricense de Electricidad, institución estatal y principal desarrolladora de proyectos de generación eléctrica del país. El procedimiento utilizado para cumplir con los objetivos planteados en la realización de la práctica profesional dirigida está clasificado en etapas. La clasificación utilizada está relacionada con cada uno de los objetivos propuestos, con el fin de tener una mayor claridad en la obtención de los resultados.

El desarrollo de este proyecto de optimización del uso de la rozadora se realizó en cuatro etapas:

1. La aplicación de la rozadora depende de elementos como: la calidad de la roca, la cantidad de agua y nivel freático en el macizo rocoso, la cercanía al túnel existente, fallas o estructuras geológicas existentes. Por lo que en esta primera etapa se realizó una cuidadosa recopilación de la información que existe hasta la fecha, la cual ha sido archivada, desde la construcción del primer túnel que está actualmente en operación, además de todos los estudios realizados hasta ahora para la construcción del nuevo túnel, para esto se consultó con el área de ingeniería del proyecto específicamente con el geólogo del proyecto el cual brindó la información solicitada.

A partir de esta información se armó lo que es el perfil geológico del túnel, perfil que da la posibilidad de conocer el comportamiento de la roca en tramos solicitados. De esta forma se pretende lograr la optimización en el uso de esta

rozadora con base en las características del terreno a excavar.

Luego se agruparon los tramos de túnel que se excavarán con rozadora, concentrándolos en que mantengan iguales características mecánicas (RMR) e iguales requerimientos de soporte temporal. A partir de la extracción de esta información se pudo levantar un estudio del terreno por donde pasara en excavación la rozadora y separar cada uno de estos tramos con el fin de poder aplicarle el correspondiente rendimiento a los diferentes tramos según su semejanza en características.

Dentro de esta etapa de investigación también se recopiló la información de manuales y datos enviados por la compañía (SANVIK ®) que se encargó de la manufactura de la rozadora. De esta serie de documentos se extrajo los requerimientos de la minadora en cuanto a calidades de roca, resistencia a la compresión simple y abrasividad. Uno de los documentos que más se revisó fue el de consultoría hecha para el proyecto de ampliación Cachí redactado por el experto en túneles Nicolas Della Valle. Documento que sirvió de referencia para realizar comparaciones con los rendimientos obtenidos por el consultor además se obtuvo de este la fórmula para el cálculo de rendimientos.

2. Como una segunda etapa se identificó y estructuró el proceso constructivo que ha venido utilizando el ICE en la construcción de túneles, son los ciclos asociados a la metodología manual y de perforación y voladura; esta información se tomó como base para formular la hoja de cálculo de rendimientos con rozadora, donde los tiempos de diferentes actividades como colocación de soporte temporal y extracción son recopilados de bases de datos del ICE. Para esta hoja de cálculo se utilizó el programa Microsoft Excel el cual facilitó su realización, también se tomó en cuenta las características extraídas del perfil geológico y los requerimientos de la máquina.

3. Como una tercera etapa, la rozadora requiere una organización de obra diferente a la acostumbrada por el ICE. No permite, por su mantenimiento, tener una operación continua, las jornadas de trabajo deben ser ajustadas tomando en cuenta los tiempos donde la maquinaria se encuentra parada para su mantenimiento. Se evaluaron los diferentes tiempos que afectan un día de excavación y con datos de otros proyectos se les asignó un tiempo respectivo, además de los tiempos esperados para mantenimiento y uso de la rozadora. A partir de esto realizaron modulaciones mediante diagramas Gant de los diferentes escenarios a visualizar, cuales actividades se pueden realizar en momentos donde se ejecuten otras actividades (de forma paralela) con el fin de reducir tiempos muertos. Se tomaron en cuenta todos estos factores para poder determinar en cuál caso se obtiene una optimización del proceso.

4. Como cuarta y última etapa se conoce que los sistemas de control de avance y costos

son también particulares, ya que este tipo de maquinaria no ha sido utilizada en el país, de ahí la importancia de mantener un buen control de costos, por lo que en esta parte del desarrollo de la práctica se propuso una plantilla que toma en cuenta los diferentes factores relacionados con el uso de la máquina, con los cuales se puede determinar el rendimiento real de la rozadora, cuál es su producción y algunos costos asociados como el consumo de las picas, esta plantilla será para uso en el momento de construcción del túnel.

Para apoyo en el desarrollo de esta parte se consultó con el área de planeamiento y control del proyecto, los cuales brindaron los formularios que se utilizan para llevar controles de costos y rendimientos, formularios que se adaptaron para el correcto uso con la rozadora.

Resultados

En este capítulo se van a expresar de manera lógica los resultados mediante una serie de cuadros, figuras y gráficos; que se obtuvieron luego de la investigación realizada, visitas de campo y reuniones con profesionales.

Con respecto al cálculo de rendimientos, en el cuadro 7 se muestran los resultados de la tasa neta de corte (NCR) según la Ecuación 1 y los datos de compresión simple mostrados en la figura 17.

Hay que tomar en cuenta que estos datos de NCR consideran la cabeza de corte siempre a contacto directo con la roca al frente de la excavación.

CUADRO 7. CÁLCULO DE TASA NETA DE CORTE				
Clase de Macizo Rocoso RMR	k	n (Kw)	Resistencia a la compresión simple σ_c (MPa)	NCR (m^3/h)
II	7	200	30	46,7
III	7	200	20	70,0
IV	7	200	15	93,3

Una vez obtenidos los resultados teóricos de NCR, se procedió a afectarlos según los coeficientes presentados en la ecuación 2, los valores que se utilizaron para cada coeficiente fueron: (las tablas para estos coeficientes se pueden consultar en el anexo 6):

$$C_e = 0,52$$

$$C_1 = 0,90$$

$$C_d = \text{se define por el ciclo de excavación.}$$

$$n = 24 \text{ horas}$$

Obteniendo así los valores de tasa neta de corte esperada (producción esperada), de acuerdo al tipo de roca en el que se esté excavando.

CUADRO 8. PRODUCCIÓN ESPERADA DE LA ROZADORA SEGÚN TIPO DE ROCA		
Clase de Macizo Rocoso RMR	NCR teórico (m^3/h)	NCR esperado (m^3/h)
II	46,7	21
III	70,0	31,5
IV	93,3	42

Estas producciones son únicamente de la rozadora trabajando en excavación.

Debido a las características geomecánicas y geométricas del túnel, no se puede tener una excavación continua, además hay que tomar en cuenta las actividades que complementan el ciclo de excavación como la remoción de escombros y colocación de soporte temporal.

Por lo que fue necesario contar con rendimientos de otras maquinarias que están involucradas en el proceso tal como jumbos y equipos para colocar concreto lanzado (libas). Para esto, se utilizaron datos de rendimientos logrados en la excavación del túnel del Proyecto hidroeléctrico Pirrís brindados por el Ing. William Aguilar Núñez (Ing a cargo del nuevo túnel), además se realizaron visitas de campo al túnel carretero que se está realizando actualmente en el Proyecto de Ampliación Cachí en Reventazón, para corroborar estos datos.

De acuerdo con estos datos de rendimiento de maquinaria y tiempos de colocación de soporte temporal, además de las producciones de la rozadora de acuerdo con el

tipo de roca; se realizó el cuadro 9, donde se calcula el avance diario que se podría esperar. Para este caso solo se presentará el ejemplo donde se aplique soporte de concreto lanzado, malla electrosoldada y arcos de acero a cada

metro en una roca tipo IV, sin inyección al avance y en el cuadro 10 el mismo ejemplo pero con inyección al avance. Los demás cuadros se pueden consultar en los apéndices 3,4 y 5.

CUADRO 9. CÁLCULO DE RENDIMIENTO ESPERADO					
Soporte : RD + CL + ME + AA (@ 1,0 M)	Tipo de soporte				
		RD + CL + AA (@ 1,0 M)			
	Datos del túnel		Cant	unidad	
		Área de túnel	20,63	m ²	
		Perímetro de túnel	12,80	m	
		Tipo de material	IV	Lavas y brechas	
		Avance promedio:	1	m	
		Espesor concreto	0,1	m	
	Actividades a realizar				
	1	Acomodo de equipo		15	min
	2	Rozado	Rendimiento. esperado	42	m ³ /h
			Volumen unitario	20,63	m ³ /m
			Tiempo de rozado	29,47	min
	3	Colocación malla	Área de colocación	0	m ²
			Persona colocando	0	C.U.
			Rendimiento.	25,91	min*PER/m ²
			Tiempo total	0	min
	4	Movilización de equipos (Rozadora - Equipos - Rozadora)	Tiempo estimado	55	min
	5	Concreto lanzado	Área de concreto	1,3	m ²
			Volumen concreto	1,3	m ³
			% de rebote	25%	%
			Volumen total	1,6	m ³
			Rendimiento	22,8	min/m ³
			Tiempo colocación de CL	36,5	min
	6	Colocación arco @ 1,0 m	Rendimiento.	16,4	min/m
			Tiempo total	209,92	min
	Tratamiento				
	1	Inyección al avance	0	1 = si hay , 0 = no hay	
TIEMPO DE CICLO		340,87	min		
RENDIMIENTO ESPERADO		4,22	m/día		

CUADRO 10. CÁLCULO DE RENDIMIENTO ESPERADO, CON INYECCIÓN AL AVANCE

Soporte : RD + CL + ME + AA (@ 1,0 M)	Tipo de soporte				Tratamiento					
	RD + CL + ME + AA (@ 1,0 M)				Inyección al avance					
	Datos del túnel			Cant	unidad	Actividades a realizar				
	Área de túnel			20,63	m ²	1	Marcado de tope	Rendimiento utilizado	0,49	min/HUE CO
	Perímetro de túnel			12,80	m			# de huecos	20,00	C.U.
	Tipo de material			IV	Lavas y brechas			Tiempo de marcado de tope	9,80	min
	Avance promedio:			1	m	2	Movilización de equipos (Rozadora - Jumbo - Rozadora)	Tiempo estimado	82	min
	Espesor concreto			0,1	m	3	Barrenada	# de huecos	20,00	C.U.
	Actividades a realizar							Barrenada promedia	15,00	m
	1	Acomodo de equipo			15	min		metros a barrenar	300,00	m
	2	Rozado	Rendimiento esperado	42	m ³ /h			Máquinas a utilizar	2,00	C.U.
			Volumen unitario	20,63	m ³ /m			Rendimiento	1,93	min*maq/m
			Tiempo de rozado	29,47	min			Tiempo de barrenada	289,50	min.
	3	Colocación malla	Área de colocación	0	m ²					
			Persona colocando	0	C.U.					
			Rendimiento	25,91	min*PER/m ²					
			Tiempo total	0	min					
	4	Movilización de equipos (Rozadora - Equipos - Rozadora)	Tiempo estimado	55	min					
	5	Concreto lanzado	Área de concreto	1,3	m ²					
			Volumen concreto	1,3	m ³					
			% de rebote	25%	%					
			Volumen Total	1,6	m ³					
			Rendimiento	22,8	min/m ³					
			Tiempo colocación de CL	36,5	min					
	6	Colocación arco @ 1,0 m	Rendimiento	16,4	min/m					
			Tiempo total	209,92	min					
	Tratamiento									
	1	Inyección al avance			1	1 = si hay , 0 = no hay				
TIEMPO DE CICLO			463,62	min						
RENDIMIENTO ESPERADO			3,1	m/día						
								Total	1841,3	min
				Con inyección al avance				Roca tipo IV		

De esta manera se calculó cada una de las condiciones posibles según el soporte temporal y tipo de roca tomando en cuenta si hay que realizar tratamientos de inyección al avance o no, los cuales disminuyen el avance esperado por día.

En el proyecto, según el informe de factibilidad, solamente se utilizarán roca desnuda, soportes de concreto lanzado y posibilidad de pernos para la roca tipo II, arcos a cada 1,25 metros, concreto lanzado y con posibilidad de usar pernos para la roca tipo III. Para la roca tipo IV, arcos a cada metro con concreto lanzado y con posibilidad de pernos.

Por lo que los resultados se enfocarán en los avances esperados para estas configuraciones.

Es importante mencionar que para el proyecto de ampliación PH Cachí se utilizará fibra sintética que va adicionada al concreto lanzado, la cual viene a sustituir las funciones estructurales de la malla electrosoldada.

El cuadro 11 muestra un resumen de los avances esperados que se proyectan a usar dentro del Proyecto Ampliación PH Cachí.

CUADRO 11. RESUMEN DE RENDIMIENTOS DE AVANCE, SEGÚN SOPORTE TEMPORAL POSIBLE A USAR EN EL PROYECTO						
Soporte temporal	Tipo de roca según RMR					
	II		III		IV	
	Sin inyección	Con Inyección	Sin inyección	Con Inyección	Sin inyección	Con Inyección
Roca desnuda	22	7,6	-	-	-	-
RD + PE	12,2	6	14,9	6,5	-	-
CL	11,7	5,9	14,2	6,4	-	-
RD + AA @ 1,25m	-	-	6,6	4,3	6,9	4,34
RD + AA @ 1,0m	-	-	5,5	3,8	5,7	3,9
AA @1,25m + CL	-	-	4,9	3,4	5,1	3,5
AA @1,0m + CL	-	-	4,2	3,2	4,3	3,2

Como se ha mencionado en este trabajo, el ICE recibió una consultoría por parte del experto en túneles Nicolás Della Valle, en esa oportunidad el profesional proporcionó la idea de utilizar una máquina rozadora para la excavación del túnel del proyecto ampliación PH Cachí, en el informe el experto muestra datos de avance que se pueden obtener con este tipo de maquinaria.

Para la realización del informe en ese momento; se tomó como base una rozadora pequeña con una potencia en la cabeza de corte de 80 kW, determinando avances diarios mostrados en el cuadro 12.

A partir de los datos expresados por Della Valle se realizó el gráfico ferrocarrilero que se presenta en la figura 19, gráfico que se interpreta como la secuencia constructiva que seguiría el proyecto y sus tiempos de ejecución asociados a una fecha.

El cuadro siguiente muestra la comparación de los avances que se obtuvieron a partir de la consultoría y los nuevos avances que se podrían obtener con el equipo que se adquirió, una rozadora con una potencia de corte de 200 Kw.

CUADRO 12. COMPARACIÓN DE DATOS EN CONDICIONES SEMEJANTES DE SOPORTE Y AVANCE POR CICLO					
Tipo de roca	Condiciones de soporte	Avance por ciclo (m)	Rendimientos		
			Consultor	Sin iny	Con iny
II	CL + PE (coloc en paralelo)	2,3	6,6	11,7	5,9
III	CL + PE (coloc en paralelo)	2,3	10,15	13,9	6,4
IV	CL + PE + AA @ 1,5 m	1,5	4,86	5,8	3,9

Con estos nuevos avances obtenidos y de acuerdo al tipo de roca que se puede observar en el plano del perfil geológico anexo 8, los tramos donde se utilizará la rozadora. Se realizó un análisis PERT con el fin de determinar un rendimiento esperado de la rozadora en todo el tramo donde se utilizará.

En este análisis se tomaron los valores de rendimientos brindados por el consultor, como negativos (ya que es una maquina menor), esto debido a las complicaciones de espacio por lo que existe la posibilidad de que no se le pueda sacar el máximo provecho a la rozadora, los rendimientos mostrados en el cuadro 10, fueron tomados como los más esperados y por último el rendimiento optimista se tomó como la suma porcentual de la diferencia entre el rendimiento negativo y el rendimiento más esperado.

Una vez obtenidos los diferentes rendimientos para el análisis según la

configuración de soporte temporal, se calcularon los tiempos de duración por cada tramo según las características de roca y cómo se excave (con o sin inyección al avance y el soporte temporal a colocar).

El cuadro 13 muestra el ejemplo de cómo se calcularon los tiempos de ejecución por tramo en este caso para la sección de túnel T3B1 con rozadora utilizando los rendimientos más esperados.

Para las otras secciones de túnel excavadas con rozadora ver apéndice 6.

CUADRO 13. TIEMPOS DE EJECUCIÓN DEL TRAMO T3B1 UTILIZANDO RENDIMIENTOS MÁS PROBABLES

Obra	Estacionamiento		Longitud (m)	Tipo de roca	RMR	Resistencia a la compresión simple (Mpa)	Soporte propuesto	Tratamiento (Inyección al avance)	Rendimiento esperado (m/día)	Duración (Días naturales)	
	Inicial	Final									
T3B1 Rozadora	4 + 800	4 + 822	22	Br pf	III	20	RD + PE	Si	6,5	3,4	
	4 + 822	4 + 881	59	Br pf - Dique intrusivo	II	30	RD	No	22	2,7	
	4 + 881	4 + 982	101	Dique - Br pf	III	20	RD + PE	Si	6,5	15,5	
	4 + 982	5 + 011	29	Dique	II	30	RD		7,7	3,8	
	5 + 011	5 + 032	21	Falla	III	20	AA @ 1,0M - CL	No	3,1	6,8	
	5 + 032	5 + 181	149	Br pf			RD + PE		14,7	10,1	
	5 + 181	5 + 198	17	Falla	IV	15	AA @ 1,0M - CL		3,1	5,5	
	5 + 198	5 + 486	288	Br pf - Dique	II	30	RD		22	13,1	
	5 + 486	5 + 513	27	Lav pf - Dique	IV	15	AA @ 1,25M - CL		4,6	5,9	
	5 + 513	5 + 556	43	Lav br - Falla	III	20	RD + PE		28	1,5	
	5 + 556	5 + 573	17	Falla - Dique	IV	15	AA @ 1,25M - CL		4,6	3,7	
	5 + 573	5 + 645	72	Dique	III	20	RD + PE		28	2,6	
	5 + 645	5 + 661	16	Dique	IV	15	AA @ 1,25M - CL		6,47	2,5	
	5 + 661	5 + 707	46	Br pf	III	20	RD + PE		28	1,6	
	5 + 707	5 + 750	43	Falla - Br pf	IV	15	AA @ 1,25M - CL		4,6	9,3	
	Total	4 + 800	5 + 750	950						10,0	88,0

Así se calcularon los diferentes tiempos de ejecución de los tramos donde se utilizará la rozadora, a partir de estos datos se realizó un gráfico donde se muestra la variación de

rendimiento por estacionamiento, gráfico con el cual se determinó un rendimiento promedio (optimista, más esperado, negativo) de excavación con rozadora.

Gráfico 2. Variación de tiempos de ejecución según rendimientos Pesimistas vs. Estación

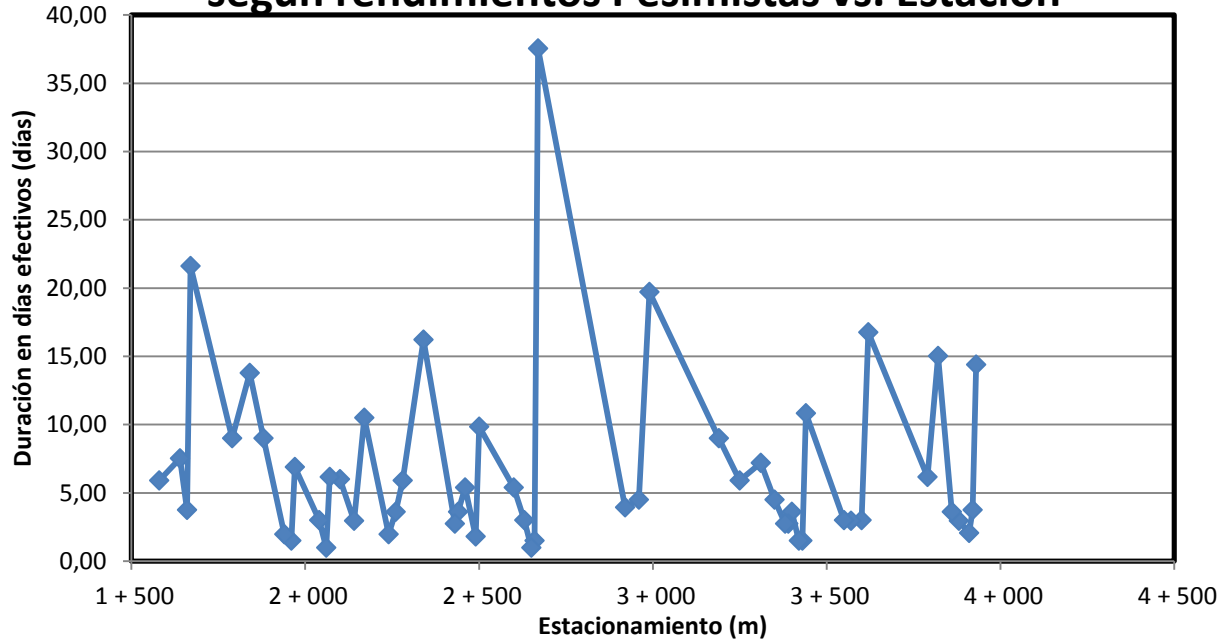


Gráfico 3. Variación de tiempos de ejecución según rendimientos más probables vs. Estación

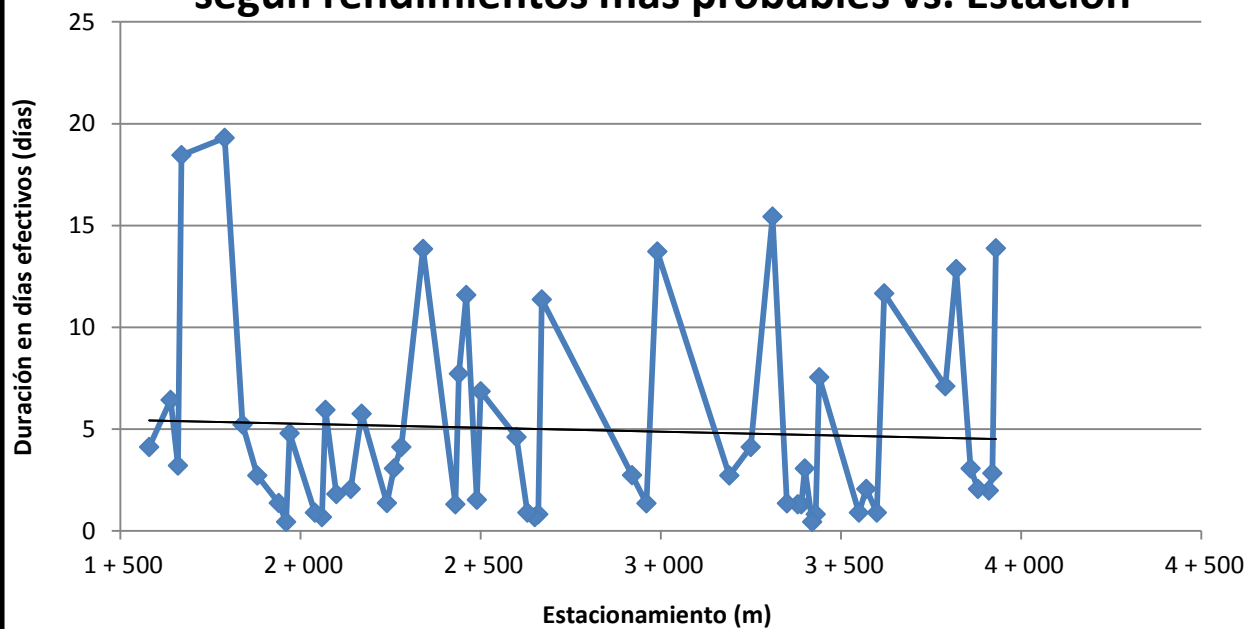


Gráfico 4. Variación de tiempos de ejecución según rendimientos Optimistas vs. Estación

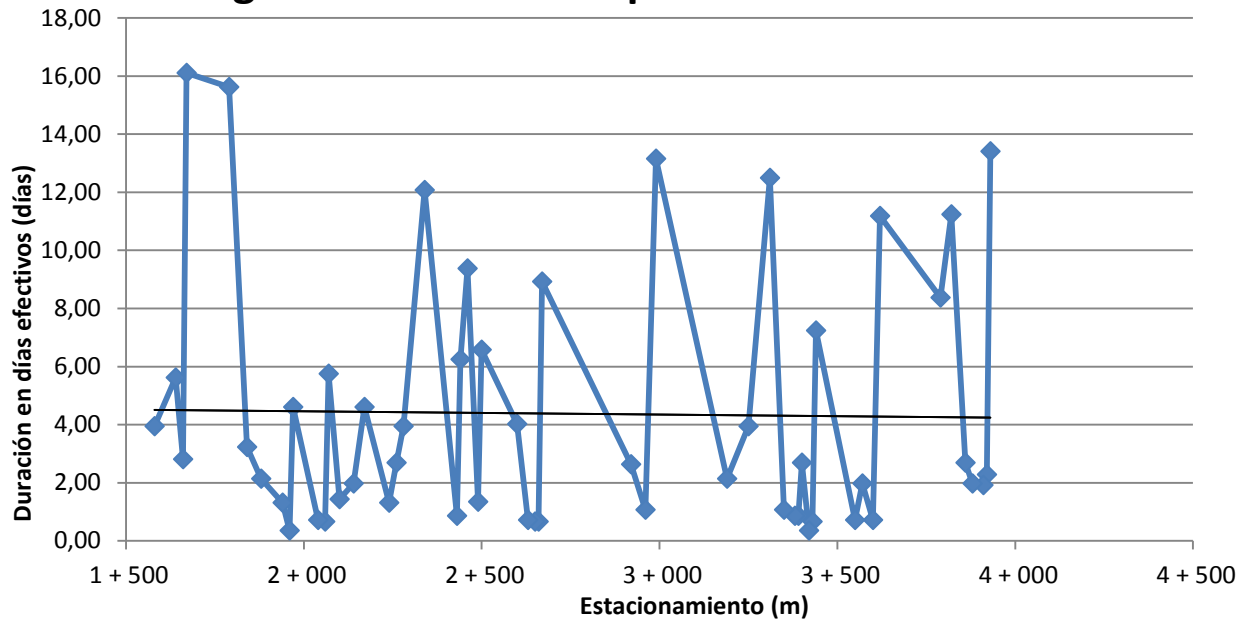
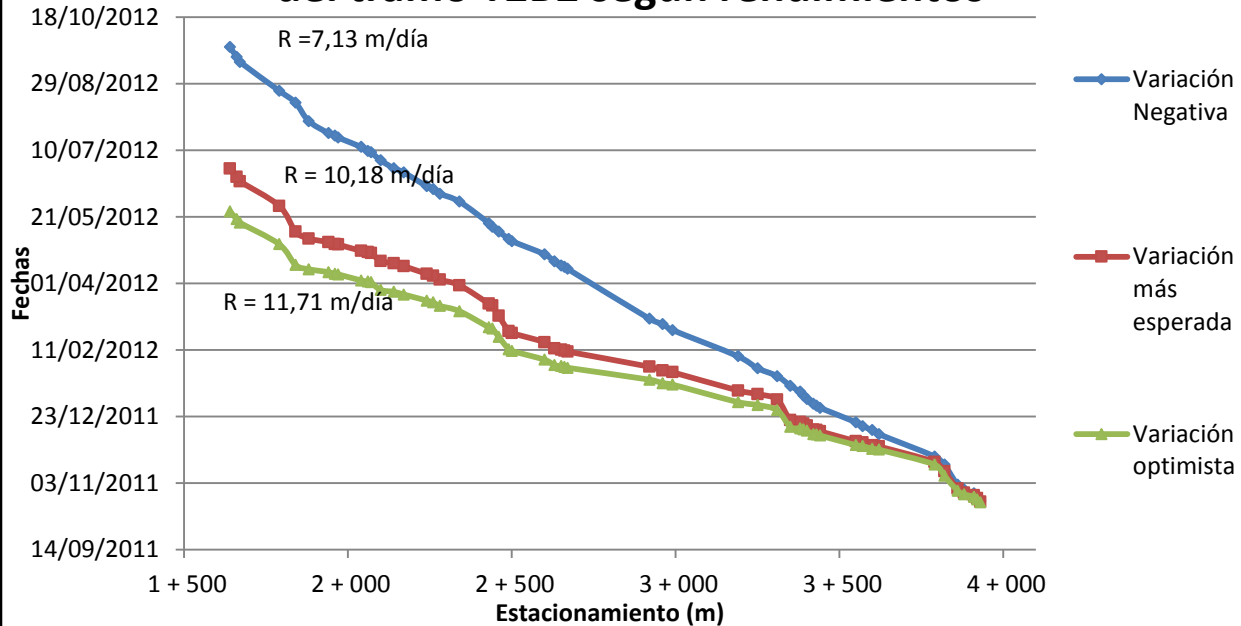


Gráfico 5. Comparación del tiempo de ejecución del tramo T2B2 según rendimientos



Una vez obtenidos los diferentes rendimientos que se muestran en el cuadro 14, se realizó un análisis PERT, dato que se utilizó para reformular el gráfico ferroviario.

En el cuadro siguiente se presentan los datos con los que se formuló el gráfico ferroviario, donde; los rendimientos presentados para las demás actividades que complementan la construcción del túnel fueron brindados por el Ingeniero William Aguilar, ingeniero a cargo del túnel de ampliación Cachí.

Se utilizó la misma fecha de inicio de obras propuesta, que es el 14 de junio del 2011.

CUADRO 14. RENDIMIENTOS UTILIZADOS PARA ANÁLISIS PERT			
Rendimientos (m/día)			
Pesimista	Más probable	Optimista	Pert
7,13	10,18	11,71	9,9

CUADRO 15. PLANIFICACIÓN DEL TÚNEL							
Obra	Rendimiento	Estación inicial	Estación final	Longitud (m)	Fecha inicio	Fecha fin	Duración (días efectivos)
Ampliación VA	0,42	0 + 894	0 + 924	30	14-jun-11	02-sep-11	71
Excavación T1-B2	3,00	0 + 924	0 + 070	854	13-sep-11	25-jul-12	285
By pass VA	0,65	0 + 924	0 + 924	35	03-ago-12	02-oct-12	54
Ampliación VB	0,75	4 + 000	4 + 060	60	07-jul-11	04-oct-11	80
Excavación T2-B1	3,00	0 + 924	1 + 580	656	09-sep-11	09-may-12	219
Excavación T2-B2 (Rozadora)	10,00	4 + 000	1 + 580	2420	06-oct-11	01-jul-12	242
By pass VB	0,93	4 + 000	4 + 000	50	12-jul-12	10-sep-12	54
Excavación T3-B1 (Voladura)	3,00	4 + 060	4 + 800	740	07-oct-11	07-jul-12	247
Excavación T3-B1 (Rozadora)	10,00	4 + 800	5 + 750	950	11-jul-12	25-oct-12	95
Excavación T3-B2	3,00	6 + 050	5 + 750	300	06-ene-13	27-abr-13	100
Pozo de ventilación 1		1 + 580	1 + 580	500	10-may-12	26-jul-12	70
Pozo de ventilación 2		5 + 750	5 + 750	150	27-oct-12	01-dic-12	32
Excavación pozo torre de compuertas	0.8m/día excav + 0.5m /día blindaje y relleno (70m h)	0 + 070	0 + 070	0	30-jul-12	27-ago-13	354
Excavación, blindaje y relleno tanque de oscilación	0.50m/día excav + 0.3m/día blindaje y relleno (74m h)	5 + 951	5 + 951	0	26-jul-12	20-oct-13	406

Continuación cuadro 14.

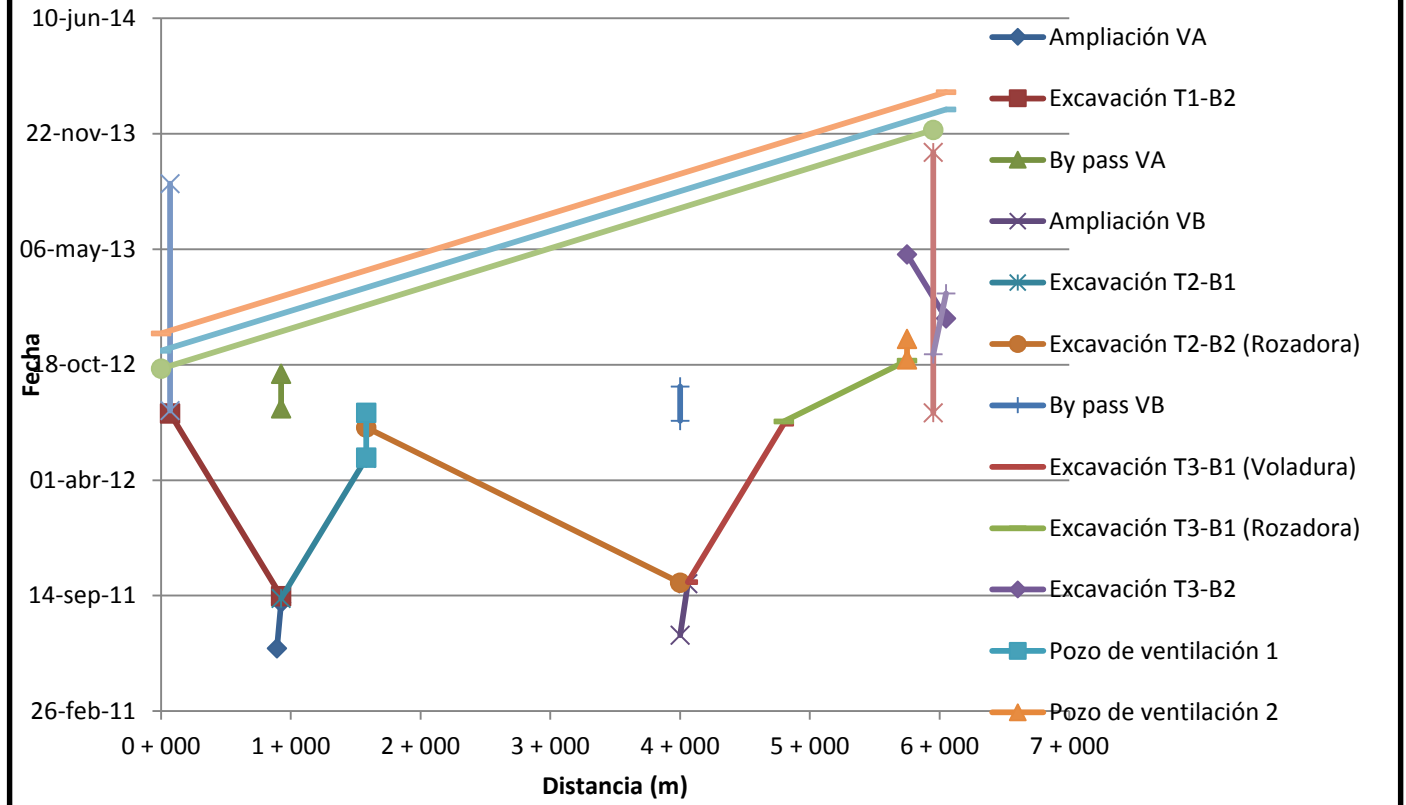
Revestimiento túnel	16m/día (22 días/mes)	0 + 000	5 + 951	5951	11-oct-12	28-nov-13	372
Blindaje túnel	4m/día	5 + 951	6 + 051	100	05-nov-12	18-feb-13	95
Inyección	16.5m/día	0 + 000	6 + 051	6051	11-nov-12	02-ene-14	376
Limpieza		0 + 000	6 + 051	6051	11-dic-12	01-feb-14	376
					Duración del proyecto 963 días		

Los datos del cuadro anterior se utilizaron para reformular el gráfico ferroviario.

En el gráfico 6, se realiza una propuesta donde la sección de túnel T3B1, se ejecuta

continua hasta la salida en el tanque de oscilación, de esta manera se reduce un frente de trabajo y también el tiempo de ejecución.

**Gráfico 6. Programa de obras subterráneas
Proyecto Ampliación PH Cachí**



Para lograr una optimización más acertada del uso de la rozadora, se realizaron simulaciones del proceso de excavación donde se utilizan los principios de los diagramas de Gantt. Para este proceso se proponen tres posibles escenarios.

En el primero simula un ciclo de excavación normal, en el cual a partir de un avance de excavación con rozadora según se establezca (marcado por la puesta de arcos de acero); se debe colocar todo el soporte temporal previsto, una vez terminada la colocación del soporte se continúa con el siguiente ciclo, el cual comienza con la colocación de la rozadora al frente del túnel.

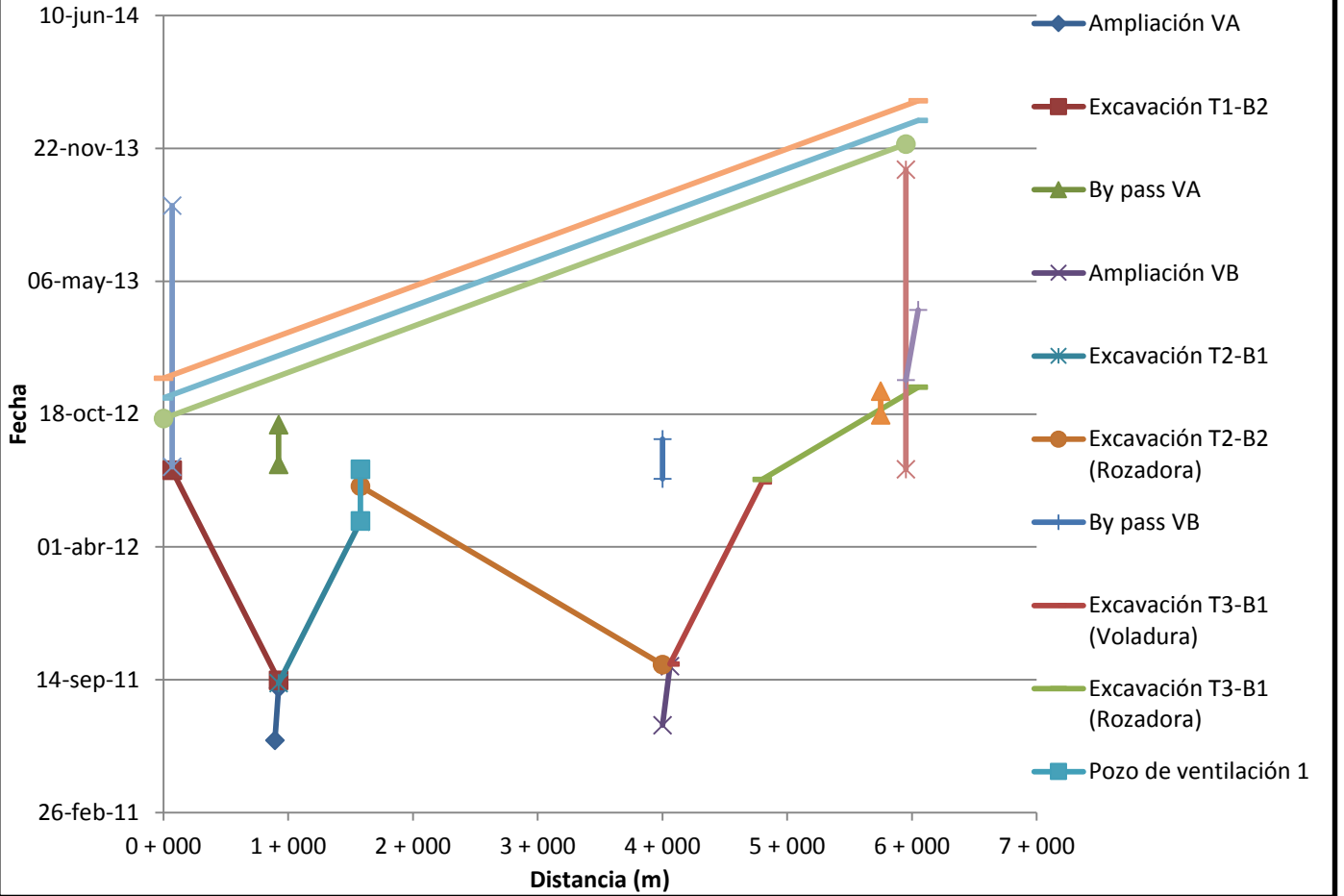
En el cuadro 16 se muestra esta primera simulación para el caso de roca tipo III donde el avance de excavación es de 1,25 metros por ciclo debido a la colocación de arcos, las demás simulaciones del primer caso se pueden observar en el apéndice 7.

El segundo caso (cuadro 17 y 18) presenta una opción donde se propone un avance de excavación de 10 metros por ciclo, donde únicamente se van colocando arcos según sea necesario en esta etapa inicial de excavación, al terminar este avance se procede a completar el soporte temporal faltante y concluir el ciclo. El ejemplo siguiente corresponde a la simulación de la roca tipo III para este escenario. (Apéndice 8)

El tercer caso (cuadro 19 y 20) le da la mayor continuidad de excavación a la rozadora, donde igualmente se van colocando arcos donde se requieran y 30 metros más atrás vienen equipos colocando el soporte temporal faltante (concreto lanzado).

Para tener mucho más claro el ciclo que se propone en el tercer escenario, se muestra cómo se trabaja a nivel de días en el cuadro 20.

Gráfico 6. Propuesta de programa de obras subterráneas Proyecto Ampliación PH Cachí



CUADRO 16. CICLO DE EXCAVACIÓN EN ROCA TIPO III, ESCENARIO 1

Clasificación de roca	III																									
Resist. a la compresión (Mpa)	20																									
Avance de (m/día)	4,78																									
Duración Ciclo (h)	5,80																									
Línea de tiempo de un día de actividad en la excavación del túnel. (Cada cuadro supone una hora de trabajo)																										
Hora		6 am	7 am	8 am	9 am	10 am	11 am	12 md	1 pm	2 pm	3 pm	4 pm	5 pm	6 pm	7 pm	8 pm	9 pm	10 pm	11 pm	12 mn	1 am	2 am	3 am	4 am	5 am	Total horas
Soporte esperado	RD																									
	PE																									
	CL						0,4	0,3					0,6	0,1					0,3	0,4					0,1	2,2
	AA @ 1,25		0,4	1	1	1	0,1		0,1	1	1	1,0	0,4			0,8	1	1	0,7		0,1	1	1	0,5	0,9	14,0
Movimiento de equipos		0,4					0,4	0,4						0,4	0,2	0,2				0,4	0,4				2,6	
Tiempo de rozado (horas)	0,6	0,2					0,3	0,54						0,5	0,3					0,2	0,5				3,3	
Acomodo de equipo (horas)	0,2																								0,2	
Mantenimiento programado	0,2																								0,2	
Cambio de jornada laboral	+													+												
Comidas			+				0,5				+				0,5				+					0,5	1,5	
Marcado de tope					+								+						+							

"+" : Actividades que no suman tiempo al ciclo de trabajo

CUADRO 17. CICLO DE EXCAVACIÓN EN ROCA TIPO III (DÍA 1), ESCENARIO 2

Clasificación de roca		III																								
Resist. a la compresión (Mpa)		20																								
Avance de (m/día)		5,95																								
Duración Ciclo (h)		43,1																								
Día 1																										
Línea de tiempo de un día de actividad en la excavación del túnel. (Cada cuadro supone una hora de trabajo)																										
Hora		6 am	7 am	8 am	9 am	10 am	11 am	12 md	1 pm	2 pm	3 pm	4 pm	5 pm	6 pm	7 pm	8 pm	9 pm	10 pm	11 pm	12 mn	1 am	2 am	3 am	4 am	5 am	Total horas
Soporte esperado	RD																									
	PE																									
	CL																									
	AA @ 1,25		0,8	1	1	1	0,2	0,5	1	1	1	0,2	1	1	0,5	0,8	0,4	1	1	1	0,2	1	1	0,5	1	17,9
Movimiento de equipos																										
Tiempo de rozado (horas)		0,6	0,2			0,3	0,5				0,8				0,2	0,6				0,8					4,2	
Acomodo de equipo (horas)		0,2																							0,2	
Mantenimiento programado		0,2			+					+				+					+				+		0,2	
Cambio de jornada laboral																										
Comidas				+		0,5					+				0,5				+				0,5		1,5	
Marcado de tope						+				+					+					+					+	
		24																								

"+" : Actividades que no suman tiempo al ciclo de trabajo

CUADRO 18. CICLO DE EXCAVACIÓN EN ROCA TIPO III (DÍA 2), ESCENARIO 2.

Día 2

Línea de tiempo de un día de actividad en la excavación del túnel. (Cada cuadro supone una hora de trabajo)

Hora		6 am	7 am	8 am	9 am	10 am	11 am	12 md	1 pm	2 pm	3 pm	4 pm	5 pm	6 pm	7 pm	8 pm	9 pm	10 pm	11 pm	12 mn	1 am	2 am	3 am	4 am	5 am	Total horas	
Soporte esperado	RD																										
	PE																										
	CL																1	1	1	1	1	1				6,0	
	AA @ 1,25	0,2	1	1	1	0,3	0,4	1	1	1	0,2	1,0	1	1	0,3								0,2	0,5	1	12,1	
Movimiento de equipos															0,4							0,4			0,8		
Tiempo de rozado (horas)	0,8				0,7	0,1				0,8				0,2	0,6							0,4			3,6		
Acomodo de equipo (horas)																											
Mantenimiento programado			+					+				+							+					+			
Cambio de jornada laboral																											
Comidas			+			0,5					+			0,5					+				0,5		1,5		
Marcado de tope				+						+				+								+					
24																											

"+" : Actividades que no suman tiempo al ciclo de trabajo

CUADRO 19. CICLO DE EXCAVACIÓN EN ROCA TIPO III, ESCENARIO 3

Clasificación de roca		III																				Total horas			
Resist. a la compresión (Mpa)		20																							
Avance de (m/día)		6,41																							
Duración Ciclo (días)		4,75																							
Línea de tiempo de un día de actividad en la excavación del túnel. (Cada cuadro supone una hora de trabajo)																									
Hora		6 am	7 am	8 am	9 am	10 am	11 am	12 md	1 pm	2 pm	3 pm	4 pm	5 pm	6 pm	7 pm	8 pm	9 pm	10 pm	11 pm	12 mn	1 am	2 am	3 am	4 am	5 am
Soporte esperado	RD																								
	PE																								
	CL (30 m atrás)																								0,0
	AA @ 1,25		0,8	1	1	1	0,2	0,5	1	1	1	0,2	1	1	0,5	0,8	0,4	1	1	1	0,2	1	1	0,5	1
Movimiento de equipos																									0,0
Tiempo de rozado (horas)		0,6	0,2				0,3	0,5				0,8				0,2	0,6				0,8				4,2
Acomodo de equipo (horas)		0,2																							0,2
Mantenimiento programado		0,2			+					+					+					+				+	0,2
Cambio de jornada laboral																									
Comidas					+			0,5			+					0,5				+				0,5	1,5
Marcado de tope						+				+					+					+				+	

24

"+" : Actividades que no suman tiempo al ciclo de trabajo

CUADRO 20. CICLO DE EXCAVACIÓN EN ROCA TIPO III, ESCENARIO 3

Línea de tiempo de un mes de actividad en la excavación del túnel. (Cada cuadro supone una hora de trabajo)

Días		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	Total días
Soporte esperado	RD																									
	PE																									
	CL					0,75				0,75				0,75				0,75				0,75				
	AA @ 1,25 M	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	17,8
Movimiento de equipos																										
Tiempo de rozado (horas)		0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	4,32
Acomodo de equipos		0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,216
Mantenimiento programado		0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,216
Comida		0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	1,44

Una vez modulado el ciclo de excavación, se verificó que la extracción de material no aumente el tiempo del ciclo generando tiempos muertos que disminuyan el rendimiento esperado, al parar la producción de la rozadora.

Se modeló el sistema actual de cinco vagones y se evaluaron opciones que puedan optimizar este proceso.

Una de estas posibles soluciones fue la opción donde se utilizarían solamente cuatro vagones, de estos; dos se mantienen junto con la rozadora, sirviendo de continuidad a la

producción de la máquina; y la roca excavada pueda ser depositada en estos vagones, mientras los otros dos realizan el proceso de extracción, así una vez que estos vagones lleguen nuevamente al frente del túnel, los dos que estaban de fondo trasladan el material para nuevamente realizar el proceso de extracción.

En el cuadro siguiente se muestran los datos necesarios para el cálculo de tiempos de extracción.

CUADRO 21. PRODUCCIONES DE LA ROZADORA SEGÚN TIPO DE ROCA.						
Tipo de roca (RMR)	Rozadora		Vagones Citrón			
	Producción (m ³ /h)	Producción promedio (m ³ /h)	Vagones Citrón disponibles	Velocidad (km/h)		Capacidad (m ³)
				Cargado	Descargado	
II	21,0	31,5	5	10	5	11
III	31,5					
IV	42,0					

Con base en la información anterior se moduló el caso que se planea actualmente para la extracción de material, donde una vez cargados los cinco vagones disponibles, estos realizarán la extracción de escombros del frente del túnel al botadero, para luego volver al frente de excavación e iniciar nuevamente el proceso.

Inicialmente se verificó si los vagones disponibles son suficientes en capacidad para darle continuidad a la extracción con una producción promedio de la rozadora de 31,5 m³/h, aplicando un 60% de hinchamiento por quebrado al volumen en banco de la roca.

CUADRO 22. CONDICIÓN DE CAPACIDAD PARA VAGONES CITRÓN					
Tipo de roca (RMR)	Avance esperado de rozado (m)	Duración (h)	Volumen excavado (m ³)	Vagones necesarios	Condición
II	2,3	2,26	75,9	6	Crítica
III	2,3	1,50	75,6	6	Crítica
	1,25	0,8	41,3	3	Aceptable
IV	1	0,5	33,0	3	Aceptable

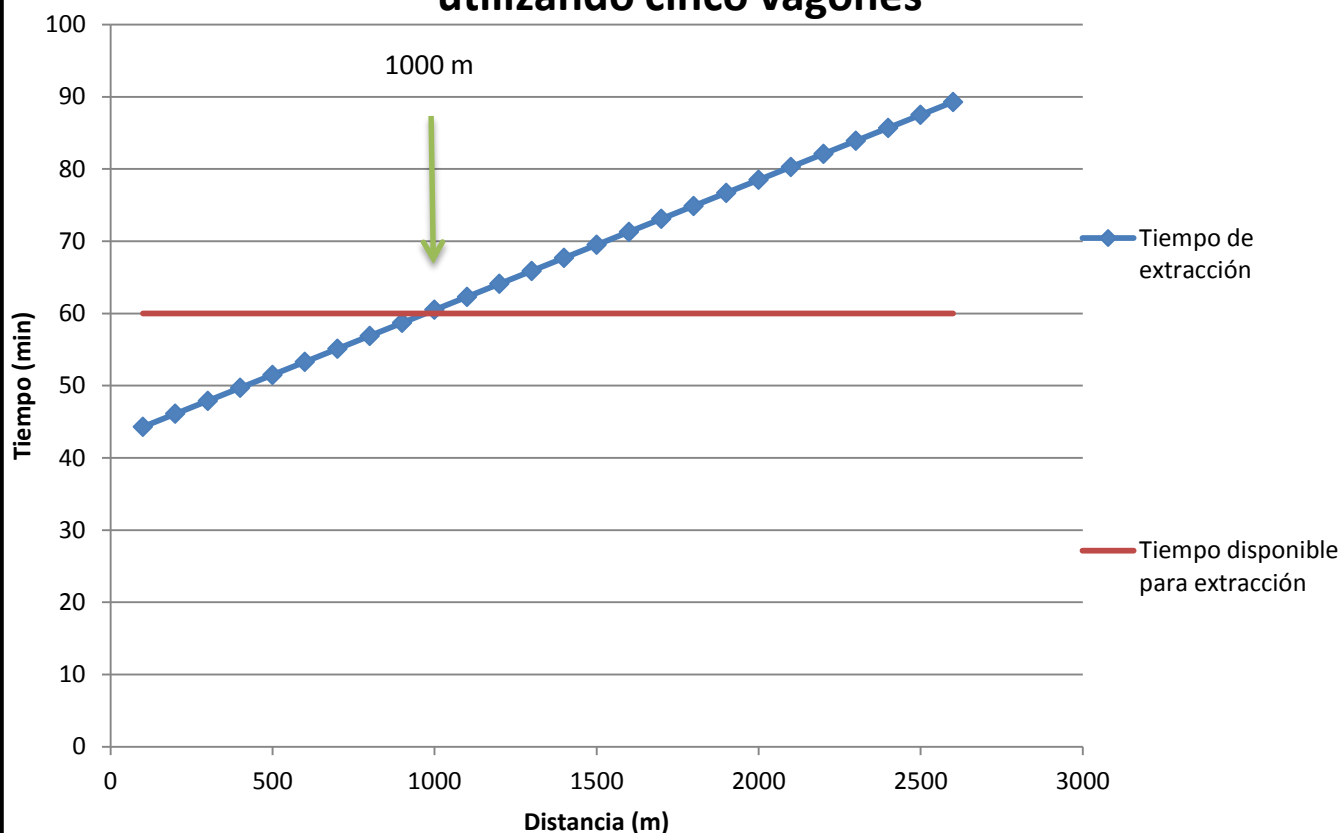
Luego se calculó el tiempo que dura la extracción de material según la distancia de avance, que incide sobre el tiempo de recorrido.

En el cuadro siguiente se muestran los diferentes tiempos que se tomaron para determinar el tiempo de acarreo para cinco vagones marca Citrón.

CUADRO 23. TIEMPO DE ACARREO PARA 5 VAGONES PROPUESTA 1		
Conexión y carga (TCC)	7,5	min
Limpieza (TL)	5	min
Desconexión (TD)	2	min
Viaje al botadero	Depende de la distancia.	min
Conexión en botadero (TCX)	3	min
Descarga (TDC)	25	min
Tiempo total	42,5	min

A partir de estos datos se generó el siguiente gráfico donde se determinó que este sistema de excavación es apto hasta un avance de 1000 metros.

Gráfico 7. Tiempo de extracción de material utilizando cinco vagones



Luego se realizaron los cálculos respectivos para evaluar la opción propuesta de utilizar dos vagones para realizar la extracción y dejar otros dos que se muevan junto con la rozadora, para tener un total de cuatro vagones únicamente.

Igual se mantiene la producción promedio de 31,5 m³/h.

El tiempo de duración para llenar dos vagones es de 53 minutos.

En el cuadro 24 se muestran los tiempos que conforman la actividad de acarreo de material para dos vagones citrón.

Se determina que mediante este sistema de extracción se pueden alcanzar 1572 m de avance sin afectar la continuidad de la excavación, los datos se muestran el gráfico 8.

CUADRO 24. TIEMPOS DE ACARREO PARA 2 VAGONES

Conexión y carga (TCC)	3	min
Limpieza (TL)	5	min
Desconexión (TD)	4	min
Viaje al botadero	Depende de la distancia.	min
Conexión en botadero (TCX)	3	min
Descarga (TDC)	10	min
Tiempo total	25	min

Una vez superada la distancia 1572 m de avance se plantea aumentar a una cantidad a seis vagones citrón, para cumplir las necesidades de tiempo y no parar la producción de la rozadora. En el cuadro 25 se muestran los datos de tiempos que conforman el acarreo.

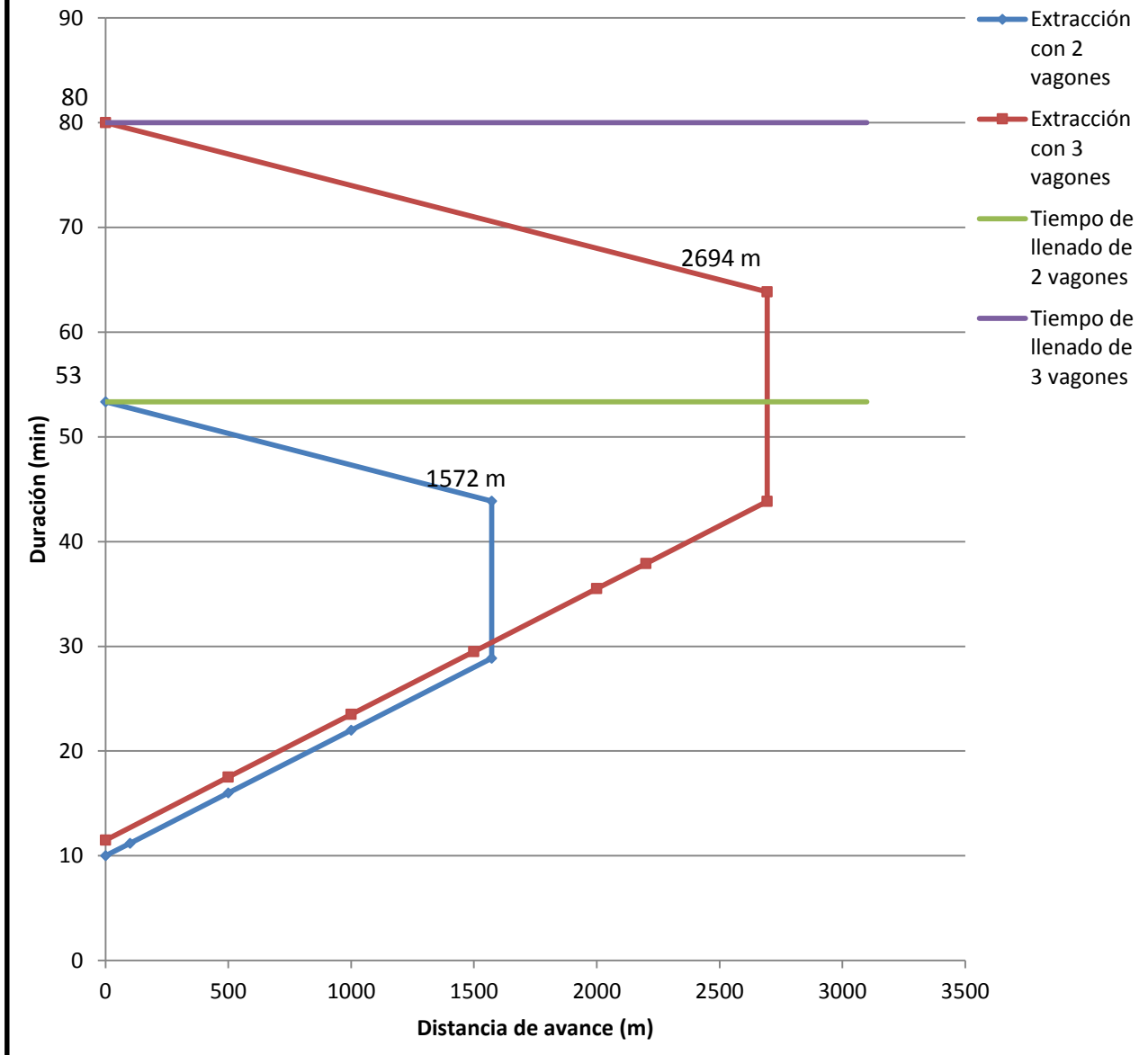
CUADRO 25. TIEMPOS DE ACARREO PARA 3 VAGONES		
Conexión y carga (TCC)	4,5	min
Limpieza (TL)	5	min
Desconexión (TD)	2	min
Viaje al botadero	Depende de dist.	min
Conexión en botadero (TCX)	3	min
Descarga (TDC)	15	min
Tiempo total	29,5	min

De esta manera, utilizando seis vagones, dejando tres junto con la rozadora y utilizando los otros tres para realizar la extracción se puede alcanzar una distancia de 2694 m de avance.

Según el plano geológico del proyecto y la planificación actual, la rozadora se utilizará en tramos inferiores a los 2420 m, por lo que esta nueva propuesta cumple con las necesidades solicitadas.

En el gráfico se muestra lo explicado anteriormente.

Gráfico 8. Comportamiento de extracción a una producción promedio de 31,5 m³/h.



Una vez revisados los sistemas de extracción se realizó una visión general del comportamiento de cada una de las diferentes modulaciones, suponiendo que la extracción de material no afecta la producción de la rozadora.

A continuación se presentan los resultados del comportamiento de cada uno de los ciclos propuestos anteriormente.

Gráfico 9. Distribución de tiempos en el escenario 1

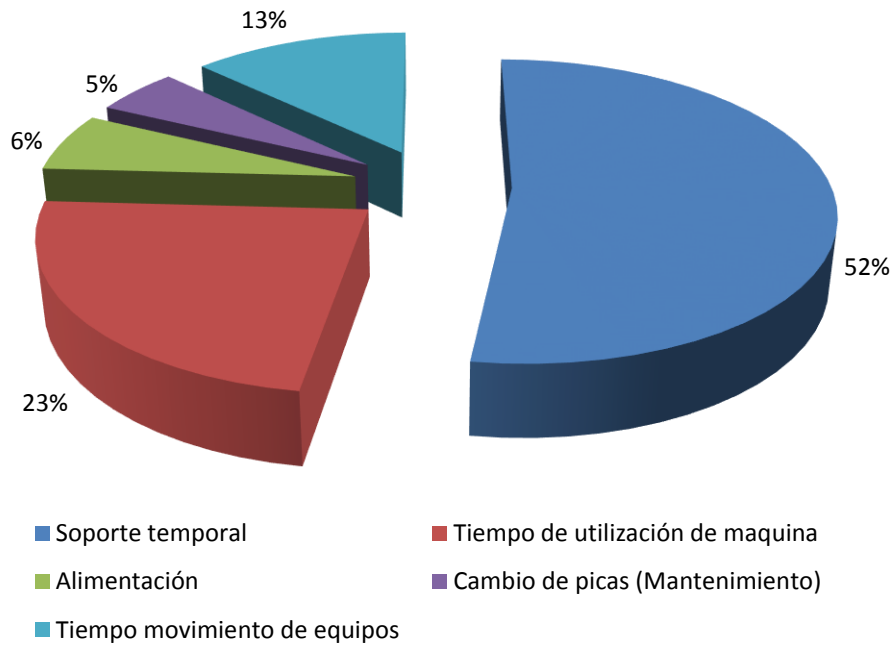


Gráfico 10. Distribución de tiempos, escenario 2

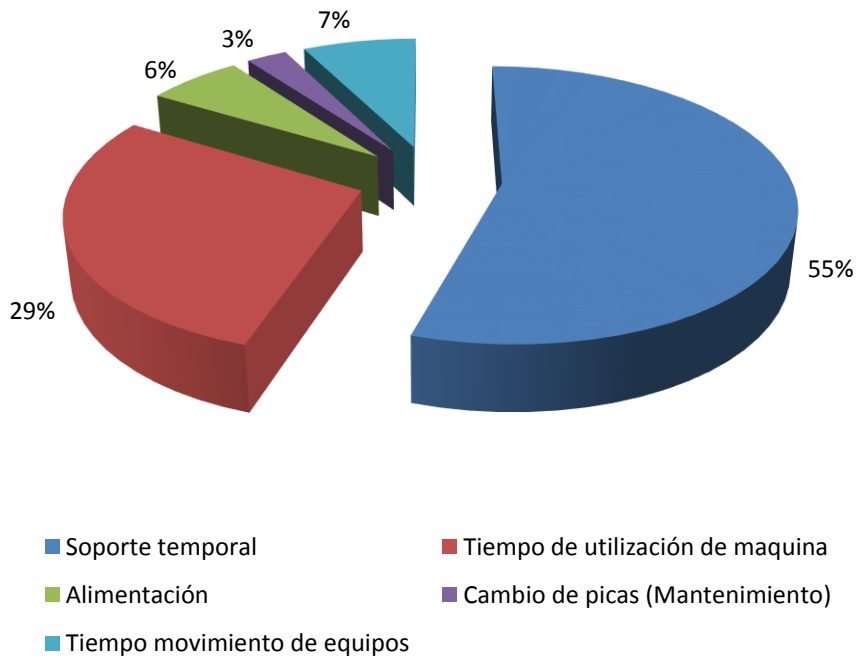
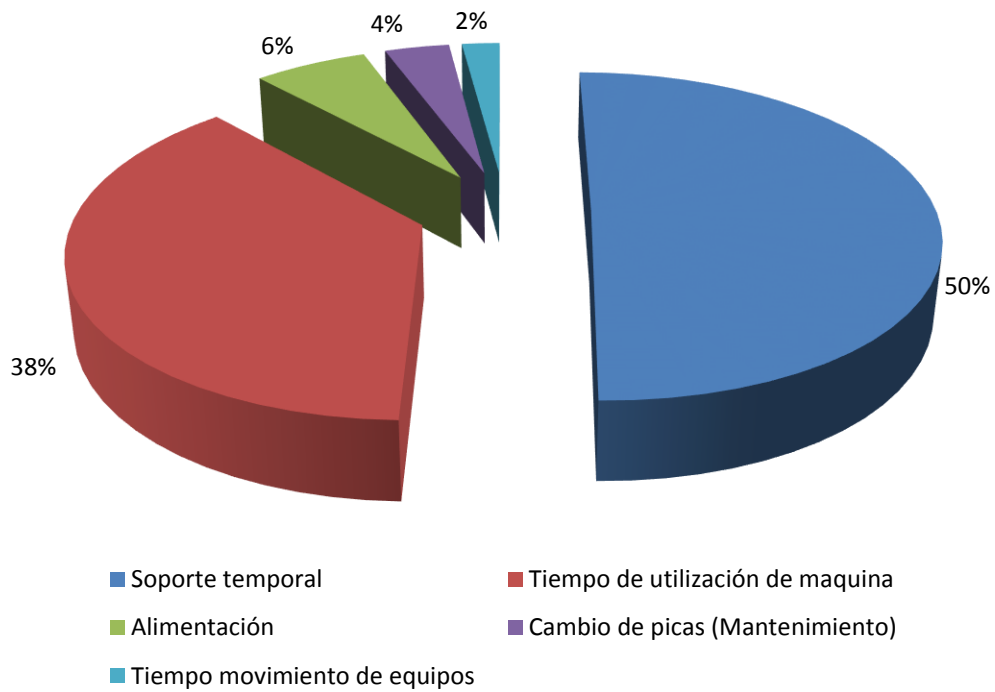


Gráfico 11. Distribución de tiempos, escenario 3



Análisis de los resultados

Para lograr una optimización en la planificación del uso de la rozadora para la excavación del túnel del Proyecto Ampliación Planta Cachí, inicialmente fue necesario ajustar los rendimientos de avances con los que se contaba, avances brindados por el consultor y experto en túneles Nicolás Della Valle, los cuales se pueden observar en el cuadro 12.

En ese momento se realizó el análisis de propuestas de excavación, donde el supuesto de usar una rozadora se calculó con una máquina de 80 kW de potencia en la cabeza de corte; por lo que los datos de avances propuestos por el consultor no corresponden a la minadora que se va a utilizar, ya que; luego de tomada la decisión de utilizar una rozadora como método de excavación, se realizó la compra de una máquina de 200 kW en la cabeza de corte, con el fin de poder ser utilizada en futuros proyectos de excavación de túneles del ICE con características geomecánicas de roca mucho mayores a las que se encuentran en el túnel a excavarse en Cachí.

Para calcular los rendimientos de esta nueva máquina, se utilizó la ecuación 1, descrita en el informe de consultoría sobre la evaluación del sistema constructivo del túnel del Proyecto Ampliación Cachí, pero aplicando además la variación propuesta por el ingeniero en minas Álvarez, L. 1985, donde a partir de sus tablas (apéndice 6) se determinan los factores a usar para afectar la tasa neta de corte.

Los factores que se usaron para determinar la producción esperada de la rozadora, se consideraron de manera conservadora como es el caso del coeficiente C_e (coeficiente de eficiencia) aplicando un valor de 0,52, pues la excavación con rozadora es una nueva metodología que se va a incorporar al país por lo que puede existir un mayor número de errores que afecten la producción al inicio del proyecto.

Es posible que al inicio de las actividades con este equipo se obtengan resultados muy cercanos a los rendimientos propuestos, pero

luego de un tiempo y debido a la curva de aprendizaje del operador con la minadora y los demás trabajadores en el ciclo completo de excavación mediante este método; los rendimientos de producción aumenten.

Es importante aclarar lo anterior, ya que existe una diferencia entre rendimiento de avance y rendimiento de producción, pues el de avance involucra todo el ciclo de excavación, es decir todas las actividades complementarias como rozado, soporte temporal y extracción. Este rendimiento de avance puede ser mejorado mediante una buena planificación de obra. Por otra parte, el rendimiento de producción es únicamente referido a la máquina y es posible que aumente el rendimiento de producción después de la curva de aprendizaje y no el de avance.

El coeficiente de tiempos muertos C_1 utilizado fue de 90%, lo que implica que existe un 10% de tiempos muertos. Se considera que este factor es bajo ya que en la realidad existen tiempos improductivos que son difíciles de controlar en obra, aun así se utilizó únicamente para valorar tiempos que no se tomen en cuenta en la modulación del ciclo de excavación, tiempos como cuando el operador de la máquina cambia la cabeza de corte de un lugar a otro sin rozar, cuando hay cambio de operadores y se detiene el roce o algunos otros donde no se realicen trabajos de roza.

Una vez obtenidas las producciones esperadas por tipo de roca, se calcularon los rendimientos de avance esperados, donde se toman las diferentes actividades que componen el ciclo. Se observa claramente que cuando se realiza la actividad de inyección al avance, los rendimientos decaen en gran medida, en porcentajes variables según el tipo de roca donde se esté excavando. La actividad de inyección al avance según el cuadro 9 tiene una duración de 1840 minutos, por lo que para calcular el avance diario cuando se efectúa este tratamiento, se realizó un promedio de tiempo de cuánto significa

el tratamiento por día para la excavación (tiempo de ciclo + tiempo de tratamiento / avance total). De esta manera se calcularon los avances esperados cuando se realiza el tratamiento de inyección al avance.

Como se observa en el cuadro 11, era de esperarse que; los avances calculados con esta nueva máquina sean mucho mayores a los brindados por el consultor. Con respecto al tipo de roca IV; no se puede hacer una relación directa entre estos datos, ya que en esa oportunidad, Della Valle propuso avances de 1,5 m para este tipo de roca, avances que son marcados por la puesta de arcos con separaciones de 1,5 metros, para el caso actual en el informe de factibilidad se define que para la roca tipo IV, se realizará puesta de arcos con separaciones de un metro.

Un dato más comparable para este mismo escenario de excavación en roca tipo IV, colocando soporte temporal de arcos a cada 1,5 m y concreto lanzado, sería un avance de 5,8 metros por día sin inyección al avance y de 3,9 metros por día con inyección al avance como se observa en el cuadro 12. Con esta comparación bajo las mismas condiciones sí es posible afirmar un aumento en avances diarios, aproximadamente en más de un metro por día, a pesar de que el cálculo se realizó de manera conservadora, con este equipo de 200 kW en la cabeza de corte.

Es importante mencionar que la rozadora permite un mejor perfilado del túnel, por lo que los tiempos de colocación de arcos se pueden ver reducidos, esto porque mediante perforación y voladura muchas veces se dan sobreexcavaciones en los sitios donde se va a colocar el arco, lo que implica utilizar otros equipos para mejorar esta situación.

En los gráficos 2, 3 y 4 de variación de tiempos de ejecución versus estacionamiento se observa que la mayoría de datos de tiempos de ejecución es menor al promedio, más que todo es porque en la mayoría de los tramos del túnel la roca a excavar es tipo III (aproximadamente 58%), lo cual es una ventaja porque es una roca que permite por sus características una menor colocación de soporte temporal y a la rozadora lograr avances rápidos con una producción promedio de 31,5 m³/h, excepto en zonas de falla o presencia de agua.

Una vez que se obtuvieron los nuevos rendimientos de avance, se decidió realizar un

análisis PERT para estos datos, y de esta manera se logra obtener un valor de rendimiento de avance con el que se podrían planificar hitos importantes dentro de la obra como lo son el tope de dos frentes de túneles, además de poder realizar un plan de obra más acertado. Este valor debe representar un rendimiento promedio de toda la sección donde se va a utilizar la rozadora. Además, con este análisis se busca plantear una banda de parámetros para realizar el control de obra una vez en desarrollo.

Para este análisis se decidió utilizar los rendimientos brindados por el consultor Della Valle, como rendimientos negativos, considerando la experiencia del mismo en proyectos como este. Para los rendimientos más esperados se utilizaron los descritos en el cuadro 12, en cuanto a los rendimientos optimistas se utilizó la relación de diferencia entre los más esperados y los más probables.

Una vez establecidos los valores de rendimientos bajo condiciones pesimistas, más probable y optimista; se determinó la duración total del tramo de acuerdo con las condiciones de soporte y del estrato como se muestra en el cuadro 13, determinando los rendimientos promedio que se observan en el gráfico 4.

Se determinó después del análisis PERT que el valor de rendimiento esperado durante el tramo de uso de la rozadora es de 10 m/día, como se muestra en el cuadro 13. A partir de este nuevo dato se procedió a reformular la planificación en tiempos de ejecución de la excavación del túnel para las secciones donde se utilizará la rozadora. Inicialmente se tenía que para el tramo T2B2 (tramo sentido Ventana B – Ventana A), tramo con una longitud de 2420 m un tiempo de ejecución de 350 días efectivos y para el tramo T3B1 (tramo sentido Ventana B – Tanque de Oscilación) de longitud 950 m un tiempo de ejecución de 260 días. Con los nuevos rendimientos propuestos después del análisis PERT se obtiene que estos tiempos de ejecución se pueden reducir a 242 y 95 días efectivos, respectivamente, como se muestra en el cuadro 15, de esta manera se reformuló el gráfico ferroviario (gráfico 5)

Aun reduciendo de esta manera los tiempos de ejecución en los tramos donde se utilizará la rozadora, no se reduce el tiempo total del proyecto (963 días); esto se debe a que la actividad crítica es el tramo T1B2 que va de la Ventana A a la toma de aguas; tramo que se

excavará mediante el método de perforación y voladura. Dificultades de espacio se presentan en la entrada a la ventana A como para poder cambiar el método de excavación en este tramo de túnel.

También se realizó una propuesta, como se observa en el gráfico 6, donde se eliminó el tramo T3B2 realizado con voladura, para que la rozadora continúe por esos 300 metros de más en el tramo T3B1, pasando el tiempo de ejecución de 95 días a 125 días efectivos, lo que significan 30 días más a diferencia de los 80 días efectivos que se duraría con el método de perforación y voladura, además de esta manera se estaría ahorrando un frente de trabajo reduciendo los costos de excavación.

En los cuadros del 16 al 20 se muestran diagramas de Gantt de un ciclo de excavación (en roca tipo III, sin inyección al avance), donde se sigue el orden lógico de las actividades diarias, además de su respectivo tiempo de ejecución, de esta manera se puede observar gráficamente tiempos donde se pueden realizar actividades en paralelo y así reducir tiempos muertos, mejorando el avance diario. De esta forma, se decidió que algunas actividades se pueden realizar paralelas para no afectar el tiempo del ciclo.

El cuadro 16 muestra el escenario 1 de un ciclo de excavación, donde las actividades se van dando una seguida de otra una vez alcanzado el avance establecido, en este caso lo marcan los arcos separados a 1,25 m. Aplicando esta ejecución de obra se pueden alcanzar 4,8 metros por día, la diferencia en avance que se observa con el cuadro 11 en las mismas condiciones de roca y soporte; se debe a que se colocó la actividad de acomodo de equipo dentro de la actividad de movimientos de equipo, logrando así alcanzar 30 cm más por día. Otras actividades que se colocaron en paralelo fueron marcado de tope y cambio de jornada, además dentro de la simulación se prevé realizar el mantenimiento preventivo en los momentos donde se están colocando arcos o concreto lanzado y que se deba parar la producción de la rozadora.

El cuadro 17 muestra el segundo escenario, donde se planeó realizar avances de 10 metros de excavación, con la puesta de arcos respectivos en este caso separados a 1,25m, pero en lo que se refiere al concreto lanzado dejar esta actividad hasta que se alcance el

avance deseado (de 10 metros), para de esta forma lograr reducir tiempo en cambio y movilización de equipos.

El ciclo mediante esta ejecución de obra duraría aproximadamente 43 horas, donde el primer día y medio se enfatiza en la puesta de arcos y excavación y en la segunda mitad se realizaría el cambio de equipos para continuar con la chorrea de concreto en los 10 metros excavados. Como se muestra en el cuadro, se pueden alcanzar avances de 5,95 metros por día. Igualmente se observa cómo se colocaron algunas actividades de forma paralela permitiendo aumentar el rendimiento de avance por día.

El cuadro 19 supone el escenario 3, donde se proponen avances de excavación de 30 metros, realizado el ademe respectivo, e igualmente que en el caso anterior dejar el concreto lanzado una vez que se alcance la excavación deseada.

La duración del ciclo sería aproximadamente de 4,75 días para tener un segmento de 30 metros terminados, como se observa en el cuadro 19 se dedicarían cuatro días para lo que corresponde a la excavación y la puesta de arcos, y el quinto día para realizar la chorrea de concreto, de esta manera se pueden alcanzar hasta 6,41 metros por día de avance.

Una vez que se analizó las diferentes propuestas y modulaciones del ciclo de excavación, se prosiguió a corroborar que la extracción de material no afecte aumentando tiempo al ciclo de excavación ya que en condiciones ideales la rozadora tiene la capacidad de realizar la excavación y extracción de manera paralela, por lo que si hay aumentos; estos tiempos se pueden contabilizar como improductivos.

En este caso, el principal problema para lograr la optimización en el ciclo de extracción es de carácter geométrico, ya que con las dimensiones del túnel es difícil manejar diferentes equipos al mismo tiempo, pues debe hacerse una logística para sacar y meter equipos en el menor tiempo posible, en el apéndice 11 se describe el proceso de cambio de equipos cuando se va a realizar la actividad de inyección al avance. Igualmente se buscó la mejor configuración de extracción para, en la medida de lo posible, evitar el aumento del tiempo improductivo dentro del ciclo.

En el cuadro 21 se observan los datos que se utilizaron para realizar los cálculos de

tiempos de extracción, la producción promedio de la rozadora se determinó ya que la roca tipo III es la condición que se encuentra en más cantidad dentro del túnel (aproximadamente en un 58%).

Es importante señalar que todos los cálculos se realizaron tomando en cuenta la condición más crítica que se puede presentar, esta se daría en buenas condiciones de roca, característica que permite mayor continuidad de avance en rozado, generando lógicamente un flujo continuo de material; material que la configuración de extracción debe lograr mantener.

Luego de estos se prueban dos condiciones importantes, la primera es por capacidad de los vagones, ya que actualmente se planea utilizar cinco vagones y como se observa en el cuadro 21, realizando avances promedio de 2,3 en roca tipo II y III, no sería posible realizar la extracción en términos de capacidad, para realizar efectivamente la extracción con estas condiciones se ocuparía un mínimo de seis vagones. Por lo que se sugiere realizar avances de 2 m para lograr utilizar únicamente cinco vagones citrón.

Una vez analizada la condición de capacidad, se analizó por tiempo (segunda condición), ya que en una extracción eficiente no se debe afectar el rozado. Esta se analizó para el caso de la condición más crítica de rozado, donde se tendría un tiempo aproximado para realizar la extracción de una hora como se observa en el apéndice 6, tiempo en el que la producción de la rozadora estaría detenida para realizar maniobras de soporte temporal.

Según el gráfico 7, al utilizar cinco vagones para la extracción se duraría un tiempo de extracción de equipos de 42,5 minutos en maniobras de conexión y desconexión más el tiempo de acuerdo a la distancia entre el frente del túnel y el botadero, por lo que es factible utilizar esta propuesta hasta los 1000 m de avance, una vez lograda una distancia mayor a esta entre el botadero y frente de túnel, el ciclo de extracción se vuelve ineficiente y empieza a aumentar tiempos improductivos al ciclo global de excavación disminuyendo los rendimientos de avance.

En la propuesta 2, el tiempo para maniobras de conexión y desconexión calculado fue de 25 minutos donde solo dos vagones se utilizarán para la movilización de material, mientras que otros dos se quedarán junto con la

rozadora. Con este sistema se puede lograr un avance de hasta 1572 m, sin que se vea afectada la producción de la rozadora, una vez alcanzado este avance se deberán colocar dos vagones más, uno para utilizarlo en movimiento de materia y el otro se quedaría con la rozadora, el nuevo tiempo de conexión y desconexión sería de 30 minutos, alcanzando hasta 2694 m de avance.

Inicialmente al utilizar dos vagones para la extracción; se lograrían avances de 0,85m por cada extracción de vagones, que significa una movilización de volumen total de 28 m³. La duración de llenado de los vagones de reserva es de 53 minutos, tiempo con el que se dispone para realizar la extracción y no afectar la producción. Al pasar a tres vagones el volumen a movilizar es de 42 m³ permitiendo avances de 1,3 m por ciclo de extracción. El tiempo de llenado para estos tres vagones es de 80 minutos. (Ver gráfico 8)

De esta manera se verifica que mediante este sistema de extracción utilizando vagones de reserva (junto a la rozadora) se pueden cubrir los tramos más largos por donde se utilizará la máquina sin afectar la producción de la misma.

Lo importante en el ciclo de extracción es garantizar la continuación de la producción de la rozadora cuando las características de roca lo permitan, con esto se lograrían mucho mejores avances por día.

Una vez analizadas todas las actividades que complementan el ciclo global de excavación, se realizó una distribución de tiempo para cada una de las propuestas de excavación, para ver de una manera más clara el comportamiento del ciclo durante un día. Además se determinó que realizando un buen control sobre la extracción de material, esta no llega a afectar el ciclo, por lo que únicamente la puesta de soporte temporal y rozado fueron las actividades principales tomadas en cuenta para esta distribución.

En los gráficos del 9 al 11 se indican los resultados obtenidos después de analizar las diferentes actividades que se involucran en el ciclo de excavación en un día de 24 horas laboradas, donde se determinó que la extracción de material no va a ser un problema en generación de tiempos improductivos si se mantienen los vagones requeridos para darle continuidad a la rozadora por lo que no se toma en cuenta en este ciclo.

Es importante mencionar que este porcentaje de utilización es el coeficiente CD, que se mencionó anteriormente, donde para el

escenario actual se obtiene un 23%, siendo un dato bajo principalmente a la geometría del túnel y las dimensiones de la rozadora, ya que por espacio se debe extraer el equipo para ingresar los equipos de inyección y concreto lanzado, actividad que demora mucho tiempo.

A partir de estos gráficos se determinó que la actividad que se debe reducir es el cambio de equipos y de acuerdo con los escenarios propuestos, si esto se logra se ve incrementado el porcentaje de uso de la rozadora, lo que beneficia el rendimiento de avance de excavación.

Para los siguientes escenarios se limitó la actividad de cambio de equipos al aumentar el avance de excavación, pero esta propuesta debe ser evaluada en el sitio por un profesional que certifique la calidad (geólogo, Ing. Geotecnista) del material para no arriesgar el frente del túnel, porque únicamente se estarán colocando los arcos de aceros requeridos sin el sello de concreto lanzado, lo que podría exponer al personal y a la máquina a la caída de rocas del techo del túnel.

Con estas propuestas se logró disminuir el tiempo de la actividad de cambio de equipo de un 13% en la propuesta actual a un 7 y 2% en las propuestas realizadas, mejorando el coeficiente de utilización de la máquina de un 23% a un 29 y 38%

Conclusiones

Antes de exponer las conclusiones del trabajo es importante aclarar que el proyecto se desarrollo desde un punto de vista teórico, que la veracidad de estos datos deberán verificarse con referencias reales de la excavación del túnel mediante rozadora.

De las conclusiones obtenidas mediante el desarrollo del trabajo se cuenta con:

- Según los análisis realizados la nueva rozadora de una potencia de 200 kW en la cabeza de corte, incrementa los rendimientos de avance en un 50%, respecto a la rozadora de 80 kW propuesta en el informe del consultor Della Valle. De acuerdo con la capacidad de la rozadora, estos rendimientos podrían ser aun más altos, pero debido a las complejidades geométricas, características geomecánicas de la roca y tratamientos especiales que se deben realizar, se redujeron significativamente los rendimientos esperados, además de ser conservadores en el cálculo de los mismos al ser una nueva metodología a utilizarse en el país.
- A pesar de que la rozadora logre mejores rendimientos en avances diarios de excavación, la duración total del proyecto no disminuye debido a que el tramo de túnel crítico dentro de la planificación actual que va de la ventana A a la toma de aguas por aproximadamente 890 m no se realiza con la minadora, sino con perforación y voladura. Esto se debe a dificultades geométricas en la ventana que imposibilitan el ingreso del equipo.
- Siguiendo el planeamiento de excavación actual (escenario1), la rozadora lograría un coeficiente de utilización (CD) del 23% en un día laboral de 24 horas. Utilizando el escenario 2, este coeficiente puede mejorar alcanzando un 29% y con el escenario 3 alcanzar un 38%. Esto se logra principalmente por la reducción en tiempos para realizar cambio de equipos, logrando darle una mayor continuidad de excavación a la rozadora. Se observa que los coeficientes obtenidos se encuentra dentro de los parámetros establecidos por el Ing Laureano Alvarez como se observa en la tabla 10 del anexo 6.
- El optar por alguno de los escenarios propuestos dependerá de las características que se presenten a la hora de la excavación, y se debe respaldar por profesionales que certifiquen la calidad del material, ya que lo que se refiere a la propuesta 2 y 3 implica no aplicar concreto lanzado hasta alcanzar más de 10 metros de excavación únicamente colocando los arcos de acero; lo que podría arriesgar el frente del túnel.
- Actividades como la colocación de soporte temporal, permiten realizar tareas de manera paralela como manteniendo de la rozadora, marcado de tope y cambio de cuadrilla de trabajo; con el fin de minimizar la afectación sobre el tiempo total del ciclo de excavación lo que a su vez consigue mejores avances por día.
- Con el sistema de utilizar cinco vagones para realizar la extracción de material, se pierde efectividad a los 1000 metros de avance en excavación, por lo que se puede optar por un sistema de dos vagones que acompañen siempre a la rozadora, mientras los otros dos vagones se encarguen de realizar el movimiento del material, de esta manera se puede alcanzar un avance de 1572 m sin perder efectividad, una vez alcanzado ese avance incluir dos vagones más, uno para realizar la extracción, para un total de 3, y el otro para que se quede con la rozadora, con lo que se podrían alcanzar hasta 2694 m de avance, de manera que se supla el tramo más largo donde se utilizará este equipo.

- La rozadora permite un mejor perfilado del túnel en comparación con el método convencional de perforación y voladura, lo que puede llegar a disminuir tiempo en colocación de soporte temporal como arcos y concreto lanzado, lo que a su vez significa un menor costo sobre la actividad.
- Las dificultades en geometría van a ser los principales obstáculos para lograr el mejor rendimiento de la rozadora, la máquina por sí sola puede lograr producciones muy altas, pero a cada reparación, imprevisto o actividad especial que se tenga que realizar como inyección al avance, se requiere extraer el equipo del frente del túnel, implicando tiempos muy largos en cambio de equipos, lo que baja el rendimiento.
- Con la propuesta actual la rozadora se utilizaría aproximadamente un 49% de la longitud del túnel, lo que significan unos 2850 m.
- La rozadora por sí sola tiene una gran capacidad de producción si es beneficiada por las características del terreno, por lo que para poder aumentar los rendimientos de avance, se requiere realizar una minuciosa planificación para las actividades complementarias, sobre todo en lo que se refiere a la extracción de material, esto por la capacidad de la máquina de realizar esta actividad de forma paralela con la excavación.

Recomendaciones

- Hay que recordar que el trabajo desarrollado fue de carácter teórico debido a que no se pudo observar la maquina en funcionamiento dentro del proyecto, por lo que sería importante darle un seguimiento al trabajo, con apoyo del Proyecto Ampliación Cachí, para poder corroborar los datos encontrados, realizar comparaciones entre rendimientos teóricos y reales.
- Lograr una continuación de este proyecto a la etapa constructiva del túnel, se pueden calcular correlaciones geotécnicas para el uso de una rozadora. Parámetros como este podrían facilitar la planificación del uso de un equipo como estos en futuros proyectos.
- Con un análisis de la maquina en funcionamiento se pueden depurar aun mas tiempos muertos y factores que disminuyan la producción esperada, con lo que se pueden buscar soluciones o acciones correctivas para evitar esto.
- Para darle un aumento en producción a la rozadora se puede tomar en cuenta no sacar el equipo cuando se tenga que realizar colocaciones de concreto lanzado, de esta manera se reducen los tiempos por cambio de equipos. Para esto se puede buscar una solución con algún sistema que cubra la rozadora para evitar que esta sea afectada por las salpicaduras de concreto. La rozadora cuenta con una plataforma al frente lo que podría facilitar la colocación de concreto.
- Para la extracción se determinó la distancia máxima posible entre el frente del túnel y botadero necesaria para que esta cumpla en no afectar la producción de la rozadora, para evitar problemas debería involucrarse un factor de seguridad en distancia y aumentar los vagones en dos unidades por lo menos 100m antes de alcanzar la distancia máxima.
- El control sobre la producción es un punto muy importante en el desarrollo del proyecto, ya que con datos actualizados se pueden realizar proyecciones de rendimientos para actualizar tiempos de ejecución en excavación de tramos del túnel y consumo de herramientas desgastables (picas)
- Detallar un análisis de riesgos de excavación con rozadora donde se especifiquen responsables directos, y acciones a tomar en caso de cualquier eventualidad. No solo que se tome riesgos que disminuyan la producción, sino también riesgos hace la propia maquina y personal del frente.

Apéndices

En esta sección se incluyen los siguientes apéndices realizados en hojas de Excel.

Apéndice 1: Datos generales con los que se realizaron los cálculos de rendimientos de avance.

Apéndice 2: Desglose de tiempos en movimiento de equipos para realizar la inyección al avance.

Apéndice 3: Tablas de cálculo de rendimiento de avance en roca tipo II.

Apéndice 4: Tablas de cálculo de rendimiento de avance en roca tipo III.

Apéndice 5: Tablas de cálculo de rendimiento de avance en roca tipo IV.

Apéndice 6: Tiempo de ejecución del tramo T2B2, utilizando rendimientos más probables.

Apéndice 7: Modulación de ciclo de excavación en escenario actual.

Apéndice 8: Modulación de ciclo de excavación en escenario 2 con avance promedio de 10 m de excavación.

Apéndice 9: Modulación de ciclo de excavación en escenario 3 con avance promedio de 30 m de excavación.

Apéndice 10: Propuesta de hoja de control de rendimientos y avance.

Anexos

Como anexos podemos citar los siguientes:

Anexo 1: Criterios para la clasificación RMR (Método Bienanski).

Anexo 2: Recomendaciones para el sostenimiento en túneles, según la clasificación RMR.

Anexo 3: Afiche técnico de la rozadora a utilizar en el Proyecto Ampliación PH Cachí.

Anexo 4: Distribución normal del frente de excavación con rozadora.

Anexo 5: Gráfico de tiempo autoportante del frente del túnel.

Anexo 6: Tablas de coeficientes usados para el cálculo de rendimientos teóricos de la rozadora (NCR)

Anexo 7: Fotografías de las perforaciones realizadas para el proyecto Ampliación PH Cachí, aproximadamente a la profundidad del túnel.

Anexo 8: Perfil geológico del túnel, Proyecto Ampliación PH Cachí.

Anexo 9: Formulario F-10 – Excavación de túnel.

Anexo 10: Distribución en planta de la rozadora al frente del túnel.

Referencias

Alonso, E. 2002 "Apuntes de la asignatura de Túneles. Teoría 2ª Parte.: Rozadoras". UPC, E.T.S.E.C.C.P.B. Edición 2002.

Cornejo, L. (1985). Capítulo 4, Las máquinas rozadoras en túneles y minas. *Revista de Obras Públicas*. España 1985 (177p).

Della Valle, N (2009). *Informe sobre la evaluación del sistema constructivo del túnel de ampliación Cachí*. Tunnelconsult, SPC

De la Sota (2007) (s.f) Recuperado en mayo de 2011 de http://www.danotario.com/manuales/METODO_A_USTRIACO_NATM.pdf

García, P. (1997).Capítulo 7, *Excavaciones con minadores*. Manual de Túneles y Obras Subterráneas. Editor: Carlos López Jimeno et al. Madrid: Gráficas Arias Montano, 1997 (1082p.) 1ª edición.

Gonzales, Luis et.al (2004). *Ingeniería Geológica*. Pearson Education, Madrid 2003. 1º Edición.

Sandvik Mining and Construction G.m,b.H. (2008). *Manual de operación Sandvik Roadheader Tunneling MT360, N° de máquina 158*. Israel.

Tapia, M. (2010). *Material del Curso Procesos Constructivos*. Tecnológico de Costa Rica.

Unidad Estratégica de Negocios, Proyectos y Servicios Asociados (UEN PySA) (2010). "Informe de factibilidad del Proyecto Ampliación Planta Cachí". Instituto Costarricense de Electricidad.

Entrevistas:

Ing. Luis Fernández Fernández, Jefatura de Coordinación, ICE.

Ing. William Aguilar Núñez, Construcción, ICE

Geólogo Oldemar Ramírez Escribano.

Sitios Web:

http://es.wikipedia.org/wiki/Clasificaci%C3%B3n_geomec%C3%A1nica_de_Bienawiski_o_RMR

Recuperado en mayo de 2011