

Planeamiento Constructivo del Revestimiento del Túnel de Conducción Principal del Proyecto Hidroeléctrico Balsa Inferior



Abstract

This document shows the process of the planning for the lining construction in the main conducting tunnel of the Balsa Inferior Hydroelectric Project (PHBI, acronym in Spanish) owned by Compañía Nacional de Fuerza y Luz S.A. (CNFL, acronym in Spanish).

The Instituto Costarricense de Electricidad (ICE, acronym in Spanish) is the responsible entity for the construction of the conducting and storage water works and a Brazilian consortium (OAS) is in charge of the execution of the dam and the power house.

The main objective of the project is the planning of the activities logistics as well as the identification of the necessary resources for the construction works.

An observation of the current construction tasks of the lining in the gravels of the PHBI was performed with the purpose of pointing out the strengths and weaknesses of the process, regarding the planning to be executed. In order to complete the requested information, the acquired experiences from other construction projects of power generation built by the ICE were taken into consideration.

It was established that the lining is going to be constructed in seven different stages. The period for its construction goes from July, of the current year, to May of next year. Part of these tasks should be performed simultaneously with the excavation.

The plan of work for the tunnel lining works was elaborated. Such document is a requirement for the construction of each part of the project. Some of the main aspects included are: the description of the work, the structural methodology, the planning and the control, the financial plan, the environmental management and the occupational safety plan. The plan of the works is included in the appendix of the current document.

Key words: Lining, conduction, access well, underground works and PHBI (acronym in Spanish).

Resumen

El presente documento muestra paso a paso la realización de la planificación de la construcción del revestimiento del túnel de conducción principal del Proyecto Hidroeléctrico Balsa Inferior (PHBI), propiedad de la Compañía Nacional de Fuerza y Luz S.A (CNFL).

El Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) es el ente encargado de la construcción de las obras de conducción y almacenamiento de agua y un consorcio brasileño OAS es el encargado de la construcción de la presa y la casa de máquinas.

El trabajo se enfoca en la planificación de la logística de las actividades, así como la identificación de los recursos necesarios para la construcción de las obras.

Se realizó la observación de las tareas que se realizan actualmente en la construcción del revestimiento de los túneles de los desagües del PHBI con el objeto de señalar las virtudes y debilidades del proceso, en miras a la planificación a llevar a cabo. Para completar la información requerida se tomó como referencia las experiencias adquiridas en otros proyectos de generación eléctrica construidos por el ICE.

Se definió la construcción del revestimiento en 7 etapas distintas. El plazo para su construcción abarca de julio del presente año a mayo del próximo. Parte de éstas labores deberán ser ejecutadas simultáneamente con la excavación.

Se elaboró el Plan de Obra (PO) del revestimiento del túnel. Éste documento es un requisito para la construcción de cada obra del proyecto. Entre los principales aspectos que incluye están: descripción de la obra, metodología constructiva, planeamiento y control, presupuesto, gestión ambiental y seguridad ocupacional. El plan de obra se adjunta al apéndice del presente documento.

Palabras clave: Revestimiento, conducción, pozo de acceso, obras subterráneas, PHBI.

Planeamiento Constructivo del Revestimiento del Túnel de Conducción Principal, del Proyecto Hidroeléctrico Balsa Inferior

IGNACIO ACUÑA FALLAS

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

Noviembre del 2012

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

Prefacio	1
Resumen ejecutivo	2
Introducción.....	6
Marco teórico.....	9
Metodología.....	17
Resultados	22
Análisis de resultados	43
Conclusiones	52
Recomendaciones	55
Apéndices.....	56
Anexos	61
Referencias	65

Prefacio

Entre los componentes de un proyecto hidroeléctrico se puede destacar el papel que tienen las obras encargadas de la conducción hidráulica tales como canales, túneles, tuberías entre otros, ya que conducen el agua que luego hará posible la generación de la energía eléctrica.

En el presente documento se describe el proceso llevado a cabo para definir la metodología constructiva y recursos necesarios para la construcción del revestimiento del túnel de conducción principal del PHBI.

Éste túnel conduce las aguas desde el sitio donde se encuentra la estación final del canal de unión de los túneles de los desgravadores hasta el canal de entrada del embalse.

Parte crucial de la ruta crítica del PHBI son la excavación y el revestimiento de este túnel, por ello la importancia de planificar cuidadosamente las obras de manera que la posibilidad de incurrir en atrasos y sobrecostos sea mínima.

Se agradece al ICE, especialmente al profesional encargado de Obras Subterráneas Didier Alpízar, profesionales, encargados y trabajadores de la excavación y obras civiles de todos los componentes del PHBI que de alguna u otra manera contribuyeron enormemente a la realización del presente proyecto de graduación.

Resumen ejecutivo

Ante la creciente demanda de energía eléctrica que experimenta nuestro país, la Compañía Nacional de Fuerza y Luz (empresa con la mayor cobertura de electricidad a nivel metropolitano) se ha preocupado por ampliar su capacidad instalada para satisfacer las necesidades de sus clientes. Por ello, se ha dado a la tarea de llevar a cabo el PHBI, el cual se ubica en el distrito de Santa Rita, en la Florencia de San Carlos, Alajuela. Tendrá un costo alrededor de \$200 millones y una capacidad de producción de 37 Megavatios suficiente para proveer la energía necesaria a 50 mil hogares. El plazo previsto para la duración de la construcción es de 3 años, finalizando obras en el segundo semestre del año 2013 (PHBI, 2012).

Dicho proyecto es administrado por la CNFL y ejecutado por otras empresas que han sido contratadas para la construcción de las diferentes obras. Una de ellas es el ICE, con amplia experiencia en la construcción de obras civiles y subterráneas para proyectos hidroeléctricos. A dicha entidad se le adjudicó la construcción de las obras subterráneas, el embalse, la tubería de presión y el tanque de oscilación. Las demás obras del proyecto como casa de máquinas, la presa y la subestación fueron encargadas al consorcio brasileño OAS-Engevix.

En la Figura # 1 se muestra un esquema con los diferentes componentes del PHBI:

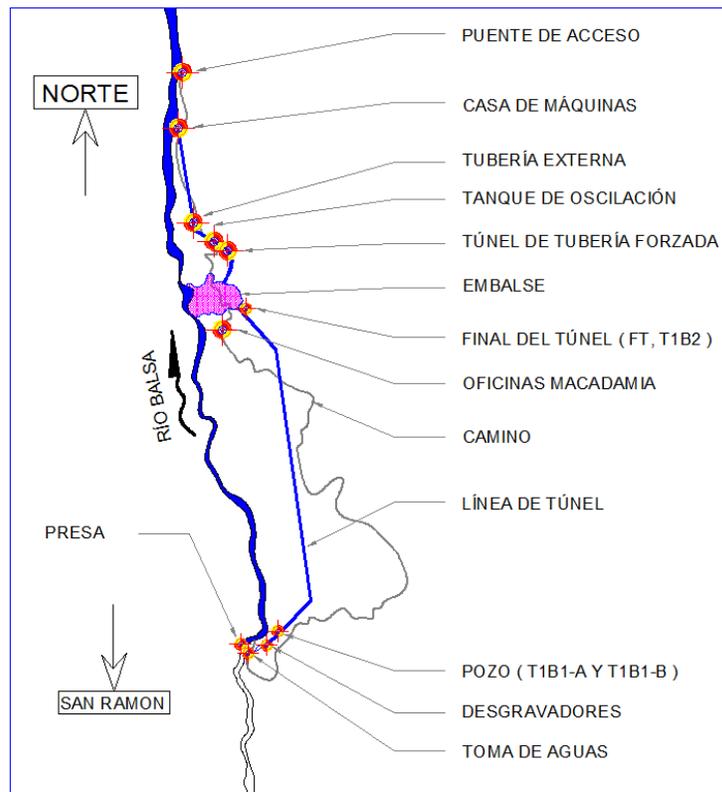


Figura # 1. Esquema General del Proyecto Hidroeléctrico Balsa Inferior.

La presente práctica profesional tiene como objetivo llevar a cabo un Plan de Obra (PO) para la construcción del revestimiento del túnel de conducción principal del PHBI. Este documento es de carácter obligatorio y debe ser realizado para cada una de las obras a construir en este proyecto. El mismo está compuesto por varios capítulos: propósito y alcance, campo de aplicación, definiciones, antecedentes, descripción de la obra, metodología constructiva, planeamiento y control, presupuesto, control de calidad, seguridad ocupacional y normativa ambiental (PHBI, 2012).

El presente trabajo tiene como objetivos específicos:

1. Realizar un planeamiento logístico de la ejecución de las obras del revestimiento.
2. Realizar un estudio estadístico de datos de rendimiento de colado de muros de concreto hidráulico en las obras de los túneles de los desgravadores, mediante herramientas de la estadística descriptiva, a fin de utilizarlo en el PO del revestimiento del túnel de conducción.
3. Seleccionar un método de encofrado que permita colar los muros del revestimiento del túnel de conducción principal en el menor tiempo posible.
4. Identificar y definir los recursos necesarios para la realización de las obras del revestimiento del túnel de conducción principal.
5. Establecer los flujos mensuales de entrega de acero, de uso de maquinaria, requerimiento de mano de obra y requerimiento de concreto diario para las obras del túnel de conducción principal.
6. Recalcular las cantidades de materiales requeridos para la construcción del revestimiento de los túneles de los desgravadores.
7. Establecer un flujo de entrega de acero de refuerzo para el revestimiento de los túneles de los desgravadores.
8. Elaborar una planificación para el colado de las obras de los túneles de los desgravadores.
9. Elaborar un modelo en tres dimensiones de las secciones variables de los desgravadores, y de los detalles de planos que requieran una mejor visualización por parte del equipo encargado de la construcción de las obras.
10. Elaborar la documentación necesaria para el ICE y para el TEC.

Como parte de la creación del PO se observó y se recopiló información referente a los procesos constructivos que se llevaron a cabo en la obra civil de los túneles de los desgravadores y la excavación del túnel principal de la conducción del PHBI, mediante visitas a las obras, entrevistas a los encargados tanto ingenieros como supervisores, encargados de cuadrilla, artesanos y peones.

El ingeniero a cargo de las obras facilitó datos y vivencias de otros proyectos que fueron clave para la realización de los ciclos y la programación de las tareas del revestimiento.

El procesamiento de los datos se realizó mediante programas de la plataforma de software Microsoft Office 2010, específicamente Excel, Project, Word, Paint además de programas de modelación en 2 y 3 dimensiones como Civilcad 2013 y Google Sketch Up V8.

El diseño del revestimiento del túnel de conducción principal del PHBI consta de dos sistemas constructivos. El primero se ubica en la corona de la sección y está compuesto por una capa de concreto lanzado, acero de refuerzo, drenajes y pernos anclados. El segundo se refiere a la sección inferior la cual está conformada por una losa de piso, ochavo y muros de concreto reforzado y drenajes, ver Figura # 2.

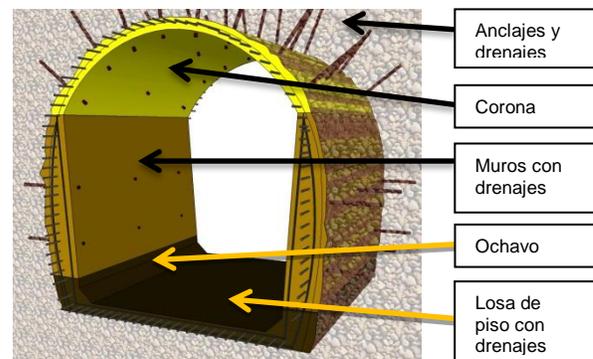


Figura # 2. Sección típica del revestimiento del túnel.

Para conformar dicho revestimiento se define su construcción en 7 etapas:

- I. Colocación de concreto lanzado primera etapa
- II. Colocación de acero en corona.
- III. Colocación de concreto lanzado etapa final.
- IV. Colocación de acero de losa y muros.
- V. Colado de losa, ochavo y arranque de muro.

- VI. Colado de muros.
- VII. Colocación de anclajes y drenajes.

Para las fases I, II y III se propone su realización en conjunto con las tareas de la excavación del túnel. Las demás fases (IV-VII) se iniciarán una vez terminada la excavación del mismo.

El presente documento contiene una planificación detallada de cada una de estas fases, envolviendo los siguientes aspectos:

- Campo de aplicación, dependencias internas y externas que colaboran con los procesos requeridos para llevar a cabo las obras.
- Descripción detallada de las obras a realizar, con sus respectivas anotaciones de planos y cubicaje de materiales.
- Metodología constructiva tomando en cuenta la logística para que las obras se realicen de la manera más eficiente posible. Incluye plazos y rendimientos esperados en cada tarea.
- Planeamiento y control del avance de las actividades. Se elaboró un cronograma detallado por estacionamientos del avance esperado para cada una de las actividades. Se adjunta el catálogo de cuentas facilitado por la oficina de planeamiento y control.
- Para la realización del presupuesto se le facilitó al ingeniero de las obras el requerimiento de materiales, mano de obra, y equipo, así como el cubicaje de los principales materiales requeridos.
- Se coordinó con las dependencias de seguridad laboral, gestión ambiental y control de calidad para que colaboraran con la generación de las especificaciones que regirían dichas obras bajo su debido consentimiento.

El plan de obra fue redactado con base en el formato de planes de obra elaborado por la Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL) de código PO-PHBI-IC-01. Este documento, por lo tanto, resume toda la información necesaria para llevar a cabo las obras en el tiempo y bajo las especificaciones técnicas y económicas establecidas.

Actualmente se construye el revestimiento de los túneles de los desgravadores del sistema de conducción del

PBHI. Durante el desarrollo del presente proyecto se brindó apoyo al ingeniero y al técnico encargado de las obras para la construcción de dicho revestimiento. Entre las tareas realizadas están:

- Planeamiento logístico y cubicaje de concreto del colado de la sección del desgravador 1.
- Cálculo de acero de refuerzo.
- Elaboración del flujo mensual del acero requerido.
- Elaboración de un modelo en tres dimensiones que facilitará la conceptualización de las obras.

Entre las principales conclusiones del presente proyecto de graduación según los objetivos establecidos están:

La construcción del revestimiento del túnel de conducción del PHBI se realizará en 7 etapas distintas.

Las fases constructivas I, II y III se realizarán en simultaneidad con el proceso de excavación del túnel principal para adelantar las tareas y ahorrar tiempo en miras a aminorar el atraso en las obras subterráneas.

Las fases constructivas IV, V, VI y VII se realizarán una vez finalizada la excavación del túnel principal.

Las fases constructivas III, IV, V, VI y VII que definen el proceso de construcción del revestimiento se harán en un solo sentido de avance (Pozo hacia FT), por las limitaciones de acceso en el FT, debido a los trabajos de ampliación del patio de trabajo en dicha zona.

Se obtuvo que el rendimiento promedio de encofrado en la construcción del túnel pantalón 1 y transición 1 fue de 0.09 m²/hh.

Se obtuvo que el rendimiento promedio de desencofrado en la construcción del túnel pantalón 1 y transición 1 fue de 0.9 m²/hh.

Es más viable la opción de encofrar los muros del revestimiento con un sistema de paneles de formaleta en lugar de utilizar un sistema de formaleta autotransportable (THF).

Se prevé la finalización de las obras del revestimiento para la tercera semana de mayo del año 2013.

Se requiere de 2188 toneladas de acero y de 30000 metros cúbicos de concreto para la construcción del revestimiento.

El máximo requerimiento de personal de mano de obra se presentará en febrero del año 2013 y será de 120 personas incluyendo: artesanos, auxiliares de artesano, operadores de maquinaria y peones.

Se obtuvo que el requerimiento máximo diario de concreto para las labores se presentara en marzo y abril del año 2013 con un valor de 408 metros cúbicos por día. Esta cantidad de concreto corresponde a 176 toneladas de cemento diarias.

Para las actividades simultáneas de colado de concreto de la losa de piso y los muros del revestimiento será necesaria la construcción de una tolva adicional en el patio del pozo para las labores de la descarga del concreto, pues actualmente se cuenta con solo una y presenta averías regularmente.

Se definió el requerimiento mensual de acero para la construcción del revestimiento de los túneles de los desgravadores para el II semestre del presente año, en cantidad de rollos según el diámetro de varilla requerido.

Se definió que la losa y sección variable del sedimentador del desgravador 1 se iba a colar en tres tramos. De longitud de 15.25, 12 y 10.75 metros.

Se definió que los muros del desgravador 1 se iban a colar en dos tramos. De longitud de 22.57 y 15.43 metros.

Se elaboró un modelo en tres dimensiones de las secciones variables de los túneles de los desgravadores, y de la sección de las placas de ajuste de la estructura de compuertas.

La logística de excavación y revestimiento a través de un pozo es compleja por las limitaciones de espacio en la base del pozo, el mantenimiento de la maquinaria de izaje, y todas las instalaciones que se deben proveer para la

evacuación de aguas, suplemento de aire y la movilización de personal en caso de emergencia.

Se elaboró el Plan de Obra para la construcción del revestimiento del túnel de conducción principal del PHBI con ayuda de las diferentes dependencias que le brindan servicio a las obras subterráneas del PHBI.

Se elaboró el presente documento bajo los lineamientos que estipula la Escuela de Ingeniería en Construcción del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Entre las principales recomendaciones del presente proyecto de graduación según los objetivos establecidos están:

Se debe planificar las compras y movimientos administrativos con suficiente antelación según su monto, de manera que se pueda concretar su trámite a tiempo con el objetivo de suplir satisfactoriamente los flujos mensuales de requerimiento de recursos de las actividades del revestimiento y de esta manera evitar atrasos por faltante de ellos.

Se recomienda llevar a cabo un control diario detallado a nivel escrito y fotográfico del avance de las obras controlando aspectos como rendimiento de labores, consumo de materiales, imprevistos que se van presentando sobre la marcha entre otros aspectos.

Es importante que durante la ejecución de las obras se lleve un estricto control de la seguridad ocupacional, con el fin velar por el cumplimiento del Plan de Seguridad Ocupacional (PSO) y de señalar las actividades de alto riesgo que hayan sido omitidas en el PSO o simplemente fueron subestimadas en él.

Es importante que a lo largo de las labores del revestimiento se lleve un control cruzado del plan de obra con miras a señalar los aspectos que éste ha dejado por fuera y aquellos que fueron indispensables haberlos incluido.

Introducción

El presente documento resume el trabajo realizado como proyecto de graduación bajo la modalidad de práctica profesional dirigida para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción.

Para la Escuela de Ingeniería en Construcción del Instituto Tecnológico de Costa Rica (EICO) es importante y provechoso que sus estudiantes se desarrollen en diversos campos de la construcción de nuestro país para expandir la huella de sus educandos y su mercado laboral. Un sector muy particular es la excavación y obra civil de túneles, estos temas que se desarrollan en el último semestre del plan 509 de la carrera, en el curso Procesos Constructivos de código CO-5057.

El Instituto Costarricense de Electricidad fue creado en el año de 1949 por medio de la legalización del Decreto – Ley No.449. Esta ley, emitida el 8 de abril de 1949, la declara una empresa autónoma tanto administrativa como financieramente. Esta institución tiene como responsabilidad proveer al país de servicios de electricidad y telecomunicaciones (Amador, 2010).

Posteriormente, en 1963 se le confirió al ICE un nuevo objetivo: el establecimiento, mejoramiento, extensión y operación de los servicios de comunicaciones telefónicas, radiotelegráficas y radiotelefónicas en el territorio nacional. Con el paso del tiempo, el Grupo ICE ha evolucionado como un grupo de empresas estatales, integrado por el ICE, Radiográfica Costarricense S.A. (RACSA) y la Compañía Nacional de Fuerza y Luz S.A. las cuales han trazado su trayectoria, mediante diversos proyectos de modernización desarrollados en las últimas décadas (Grupoice, 2012).

Costa Rica es un país de clima tropical debido a la proximidad con el Ecuador. Se conoce que las estaciones de lluvia y verano no tienen un periodo realmente definido, sino que cada año las duraciones de las mismas varían considerablemente (Govisitcostarica, 2012). Para

efectos prácticos se podría acotar que la estación lluviosa se extiende de mayo a diciembre, por lo tanto la peripecia de que un turista se tope con parajes húmedos de lluvias intermitentes a lo largo de su viaje por Costa Rica es muy alta (Horizontes, 2012).

La hidroelectricidad es una fuente de energía renovable indicada para Costa Rica, debido a las condiciones climáticas mencionadas anteriormente. Este tipo de energía aprovecha el movimiento del agua para convertirlo en corriente eléctrica comercial (Blanco, 2003). Para que esto sea posible un Proyecto Hidroeléctrico (PH) debe contar con los siguientes componentes: presa, desgravadores o desarenadores, canales de restitución de sedimentos, túneles de conducción y desvío, embalse, vertedores de excedencias, tomas de agua, túnel de tubería forzada, tanque de oscilación, tubería de alta presión, casa de máquinas, canales de restitución de agua, entre otros.

Al igual que otros proyectos de construcción el ciclo de vida de un proyecto hidroeléctrico se compone de varias etapas como: estudios preliminares, prediseño, estudios detallados en sitio, diseño final, construcción, operación, mantenimiento y cierre del proyecto. El presente trabajo se enfoca en el proceso de construcción del revestimiento del túnel de conducción principal del PHBI, ubicado en la margen derecha del río Balsa en el distrito de Santa Rita, en la Florencia de San Carlos, provincia de Alajuela, Costa Rica.

La práctica tuvo como objetivo la elaboración de un Plan de Obra para la construcción del revestimiento mencionado. El Project Management Institute (PMI) define el PO como un documento el cual tiene como objetivo incluir las acciones necesarias para definir, preparar, integrar y coordinar todos los planes subsidiarios. El plan de obra definió la manera en que el proyecto se ejecutara, se monitoreará, se controlará y se cerrará. El contenido del PO

variará en función del área de aplicación y de la complejidad del proyecto (Talledo, 2008).

El túnel de conducción tiene un largo de 3.347 kilómetros y una sección en herradura de 5.85 metros de altura. Éste se encarga de conducir el agua desde las estructuras de los túneles de los desgravadores hasta el embalse bajo una condición de flujo uniforme. Esto origina que el diseño del túnel responda al concepto de un canal subterráneo de sección trapezoidal con dos pequeños ochavos en sus esquinas inferiores.

El revestimiento en un túnel debe asegurar una adecuada seguridad estructural, absorbiendo las cargas de servicio de acuerdo con los criterios establecidos en el diseño. Hay casos donde el revestimiento posee simplemente la función estética de acabado; y en tales situaciones, la función estructural es atribuida al soporte temporal (colocado durante la etapa de excavación, generalmente concreto lanzado con fibras) (Maccaferri, 2010).

El diseño del revestimiento en este caso es distinto al que se ha realizado en la mayoría de los túneles excavados por el ICE, en los cuales el revestimiento se ha caracterizado por ser de una sección circular uniforme. El revestimiento del túnel del PHBI consta de dos sistemas constructivos: el primero se ubica en la corona y está compuesto por concreto lanzado y acero de refuerzo y el segundo da forma a la sección inferior del túnel la cual está conformada por: losa de piso, ochavo y los muros de la sección.

Dada esta condición de variabilidad de sistemas constructivos se propone su construcción en 7 etapas para independizar los procesos y garantizar la continuidad de las tareas, pues el acomodo del personal, maquinaria y equipo es distinto para cada proceso de construcción. Las fases que se definieron para la obra civil fueron:

- Colocación de concreto lanzado de primera etapa.
- Colocación de acero en corona.
- Colocación de concreto lanzado de segunda etapa.
- colocación de acero de losa de piso y muros
- Colado de losa de piso.
- Colado de muros.
- Colocación de anclajes y drenajes.

A lo largo del desarrollo del trabajo se expone como se definió la logística del proceso y los recursos requeridos para la realización de las obras. A continuación se presentan los objetivos del proyecto de graduación en cuestión.

Objetivo General

Elaborar un plan de obra para el revestimiento del túnel de conducción principal del Proyecto Hidroeléctrico de Balsa Inferior.

Objetivos específicos

Realizar un planeamiento logístico de la ejecución de las obras del revestimiento.

Realizar un estudio estadístico de datos de rendimiento de colado de muros de concreto hidráulico en las obras de los túneles de los desgravadores, mediante herramientas de la estadística descriptiva, a fin de utilizarlo en el PO del revestimiento del túnel de conducción.

Seleccionar un método de encofrado que permita colar los muros del revestimiento del túnel de conducción principal en el menor tiempo posible.

Identificar y definir los recursos necesarios para la realización de las obras del revestimiento del túnel de conducción principal.

Establecer los flujos mensuales de entrega de acero, de uso de maquinaria, requerimiento de mano de obra y requerimiento de concreto diario para las obras del túnel de conducción principal.

Reunir la información necesaria de las diferentes dependencias del proyecto para la redacción de las distintas cláusulas que conforman el plan de obra.

Recalcular las cantidades de materiales requeridos para la construcción del revestimiento de los túneles de los desgravadores.

Establecer un flujo de entrega de acero de refuerzo para el revestimiento de los túneles de los desgravadores.

Elaborar una planificación para el colado de las obras de los túneles de los desgravadores.

Elaborar un modelo en tres dimensiones de las secciones variables de los túneles de los desgravadores, y de los detalles de planos que requieran una mejor visualización por parte del equipo encargado de la construcción de las obras.

Elaborar la documentación necesaria para el ICE y para el TEC.

Marco teórico

El marco teórico tiene como objetivo dar al presente documento un sistema coordinado y coherente de conceptos y proposiciones que permitan abordar el tema de práctica dentro de un ámbito donde éste cobre sentido, incorporando los conocimientos previos relativos al mismo y ordenándolos de modo tal que resulten útil a nuestra tarea (Schanzer, 2012). De esta manera situaremos el ejercicio de ésta práctica profesional dirigida dentro de un conjunto de conocimientos, que permita orientar la búsqueda y ofrezca una conceptualización adecuada de los términos a utilizar.

Energía

Es la capacidad de un sistema físico para realizar trabajo. Existen varias manifestaciones como el calor, la energía cinética o mecánica, energía de la luz, potencial eléctrico, entre otras.

De acuerdo con la ley de la conservación, la energía total de un sistema permanece constante, sin embargo ésta se puede sufrir transformaciones de manifestación (Zimmerman, 2012).

La unidad de energía derivada del Sistema Internacional de Unidades es el Joule. Un joule (J) es el trabajo producido por una fuerza de 1 newton, cuyo punto de aplicación se desplaza 1 metro en la dirección de la fuerza. Su expresión en otras unidades SI sería: "N·m" y "m²·kg·s⁻²" (Universidad del País Vasco, 2012).

Fuentes de Energía

Fuentes de energía son los recursos existentes en la naturaleza de los que la humanidad puede obtener energía utilizable en sus actividades. El origen de casi todas las fuentes de energía es el

Sol, que "recarga los depósitos de energía". Las fuentes de energía se clasifican en dos grandes grupos: renovables y no renovables; según sean recursos "ilimitados" o "limitados" respectivamente.

Las Fuentes de energía renovables son aquellas que, tras ser utilizadas, se pueden regenerar de manera natural o artificial. Algunas de estas fuentes renovables están sometidas a ciclos que se mantienen de forma más o menos constante en la naturaleza. Existen varias fuentes de energía renovables, como son (Recio, 2012):

- Energía mareomotriz (mareas)
- Energía hidráulica (embalses)
- Energía eólica (viento)
- Energía solar (Sol)
- Energía de la biomasa (vegetación)

Energía Hidroeléctrica

El aprovechamiento de la energía potencial acumulada en el agua para generar electricidad es una forma clásica de obtener energía. Alrededor del 20% de la electricidad usada en el mundo procede de esta fuente.

La energía hidroeléctrica que se puede obtener en una zona depende de los cauces de agua y desniveles que tenga, y existe, por tanto, una cantidad máxima de energía que podemos obtener por este procedimiento. Se calcula que si se explotara toda la energía hidroeléctrica que el mundo entero puede dar, sólo se cubriría el 15% de la energía total que consumimos.

Desde el punto de vista ambiental la energía hidroeléctrica es una de las más limpias, aunque esto no quiere decir que sea totalmente inocua, porque los embalses que hay que construir suponen un impacto importante pues alteran considerablemente el ecosistema fluvial, se destruyen hábitats, se modifica el caudal del río y cambian las características del agua como

su temperatura, grado de oxigenación y otras sin dejar de lado el hecho de que producen un importante impacto paisajístico y humano (Tecnun, 2012).

Proyecto Hidroeléctrico

La función de una central hidroeléctrica es utilizar la energía potencial del agua almacenada en un embalse o aprovechar las masas de agua en movimiento que circulan por los ríos para transformarlas en energía mecánica y luego en eléctrica.

Un sistema de captación de agua provoca un desnivel que origina una cierta energía potencial acumulada. El paso del agua por la turbina desarrolla en la misma un movimiento giratorio que acciona el alternador y produce la corriente eléctrica (CICA, 2012). El esquema general de una central hidroeléctrica se muestra en la Figura # 3:

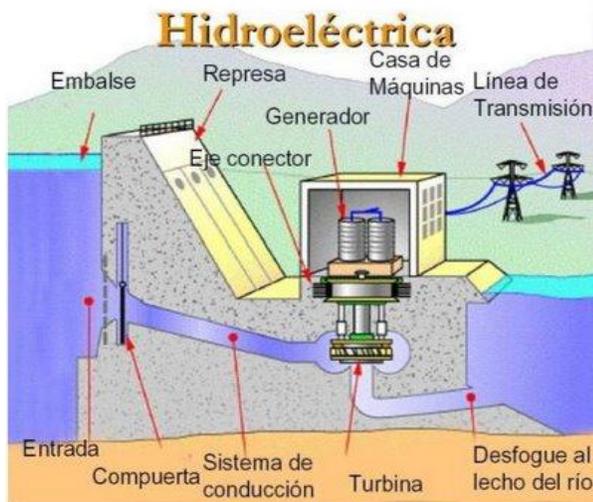


Figura # 3. Esquema de un proyecto hidroeléctrico, los diversos componentes mostrados se explican a continuación. Fuente: Universidad de Oriente (UDO).

- A. **Embalse:** Se denomina embalse a la acumulación de agua a partir de un caudal de agua que es tomado de un río o arroyo. El cuerpo de agua que alimenta el embalse es conducido por canales a cielo abierto o túneles de conducción y es generado al interrumpir el paso de agua en su cauce natural por medio de un elemento denominado presa.
- B. **Represa:** se encarga de contener el agua de un río y almacenarla en un embalse.

- C. **Entrada o toma de aguas:** Zona en la cual se realiza la captación del cuerpo de agua embalsado.
- D. **Compuerta:** Elemento que permite interrumpir el paso del agua proveniente de la toma de aguas. La compuerta se abre cuando se requiera la producción de energía.
- E. **Sistema de conducción:** La alimentación del agua a las turbinas se hace a través de un sistema complejo de canalizaciones a cielo abierto o subterráneamente. En el caso de los canales, se pueden realizar excavando el terreno o de forma artificial mediante estructuras de hormigón. La parte final del recorrido del agua desde la cámara de carga hasta las turbinas se realiza a través de una tubería forzada.
- F. **Tanque de oscilación:** son unos pozos de presión de las turbinas que se utilizan para evitar el llamado "golpe de ariete", que se produce cuando hay un cambio repentino de presión debido a la apertura o cierre rápido de las válvulas en una instalación hidráulica. Este elemento se encuentra dentro del sistema de conducción.
- G. **Turbina:** Elementos que transforman en energía mecánica la energía cinética de una corriente de agua.
- H. **Alternador/Generador:** Tipo de generador eléctrico destinado a transformar la energía mecánica en eléctrica.
- I. **Casa máquinas:** recinto donde se yacen las turbinas y todo el sistema de transformación de energía. Este lugar debe contar con equipos de levante transporte y carga para el manejo de los componentes del sistema de gran pesaje.
- J. **Vertedor de excedencias:** elementos que permiten liberar parte del agua que es retenida sin que pase por la sala de máquinas.
- K. **Destructores de energía:** se utilizan para evitar que la energía que posee el agua que cae desde los salientes de una presa de gran altura produzcan, al chocar contra el suelo, grandes erosiones en el terreno. Básicamente encontramos dos tipos de destructores de energía:
 - a. Los dientes o prismas de cemento, que provocan un aumento de la turbulencia y de los remolinos.
 - b. Los deflectores de salto de esquí, que disipan la energía haciendo aumentar la fricción del agua con el aire y a través del choque con el colchón de agua que encuentra a su caída.

Conducción de agua

Conforme las concentraciones urbanas fueron creciendo, las necesidades artesanales e industriales aumentaron, y por lo tanto se hizo

evidente que el sistema de abastecimiento de agua de las ciudades era insuficiente. Tales eran las limitaciones los sistemas tradicionales de suministro que, por ejemplo, a partir del siglo XVIII, se dejaron de limpiar calles, plazas y espacios públicos para no desaprovechar el escaso y preciado líquido. Sin embargo poco a poco fueron surgiendo soluciones. Durante el siglo XIX se comenzaron a construir grandes conducciones, que posibilitaron el transporte de importantes volúmenes de agua, redes de distribución y depósitos para su almacenamiento. La hidroelectricidad jugó un papel importante durante la Revolución Industrial ya que impulsó las industrias textiles, del cuero y los talleres de construcción de máquinas a principios del siglo XIX (EIA, 2012).

Túnel de conducción

El túnel principal del PHBI, es una obra cuya función es canalizar las aguas desde los túneles de los desgravadores hasta el embalse en una condición de flujo uniforme que no generará presión alguna en las paredes del revestimiento el cual está concebido como un canal en la parte inferior y en la parte superior está compuesto por una capa de concreto lanzado con acero de refuerzo.

Desgravadores

Una vez que el agua es tomada de su cauce natural en el sitio de presa de un proyecto hidroeléctrico, trae consigo gran cantidad de partículas suspendidas, gravas, arenas, o alguna otra miga la cual conviene ser separada de la masa de agua entrante.

Los sólidos pueden llegar a representar un problema de obstrucción más adelante en el recorrido del agua hasta el embalse, el cual a su vez se recomienda que esté lo más libre de sedimentos posible pues de lo contrario su capacidad de almacenaje se verá afectada por este volumen de partículas sólidas aportadas por el agua que es conducida desde la toma de aguas.

Para este proceso de desarenación se crearon en el PHBI dos estructuras paralelas denominadas desgravadores. En el PHBI las

obras de los túneles de los desgravadores están concebidas para operar individualmente de manera que se permita el mantenimiento y la facilidad para hacer algún trabajo que se requiera en uno de ellos. Ambos son obras idénticas capacitadas para operar en condiciones de caudal máximo.

Excavación de un túnel

Existen diferentes metodologías para excavar un túnel, incluido el trabajo manual, explosivos, un rápido calentamiento y enfriamiento, maquinaria para hacer túneles o una combinación de estos métodos (Arancibia, 2011).

Métodos de excavación

Los métodos de excavación dependen fundamentalmente del tipo de terreno a excavar. En el PHBI se ha presentado en la excavación tanto material rocoso y de buenas características mecánicas como materiales blandos. El túnel del PHBI ha sido excavado mediante el método de perforación y voladura (convencional). Las partes o procesos elementales que conforman el ciclo de trabajo característico para este método de excavación, son los siguientes (Gonzales, 2012):

- Replanteo en el frente del esquema de tiro.
- Perforación del medio.
- Carga de sección de excavación con explosivo.
- Voladura y ventilación.
- Retirada del escombros y saneo del frente, bóveda y hastiales.

Cavar un túnel a través de material blando es atravesar arcilla, limo, arena, grava o barro o alguna combinación de ellos formando algún patrón de material. En este tipo de obra el tiempo de auto soporte del terreno es un aspecto de suma importancia, pues la baja competitividad de los suelos hace que los derrumbes sean una amenaza constante. Por ello es común el uso de materiales como concreto y acero para conformar

un refuerzo temporal que aporte estabilidad a la sección excavada (Arancibia, 2011).

Es normal que a este tipo de excavación se le denomine "excavación manual" pues los trabajos deben realizados con equipo liviano como palas, perforadoras de roca y alguna que otra herramienta que facilite las tareas como lo puede ser una pala mecánica (Arancibia, 2011).

Soporte temporal

El objetivo de la colocación de elementos para el soporte temporal de la sección de excavación, es asegurar el medio geológico circundante. El cual puede ser de regular, mala o pésima condición mecánica. Este refuerzo de la sección debe ser capaz de brindar seguridad estructural al túnel mientras se termina la excavación y el proceso de construcción del revestimiento.

El soporte debe ser perfectamente diseñado para soportar las cargas que el macizo le transmite. Debido a las condiciones presentes en él, pueda ser que se requiera la colocación de uno o varios tipos de soportes (Valerín, 2007).

A continuación se mencionan varios tipos de soporte temporal que han sido utilizados para la construcción de excavaciones subterráneas en general:

- Pernos: Este tipo de soporte cumple la función de aumentar la fricción interna en el macizo rocoso, específicamente a lo largo de las discontinuidades. Este refuerzo es instalado dentro de la roca y se vuelve parte del macizo.
- Malla electrosoldada: se utiliza para reforzar el concreto lanzado. Ésta formada por una cuadrícula de varillas de acero que se encuentran soldadas en sus puntos de intersección. La malla se fija en la roca mediante pernos o tuercas.
- Arcos de acero: es mucho más económico reforzar la excavación con pernos, malla electrosoldada o concreto lanzado, pero si las cargas que el macizo le transmite al soporte son muy grandes, los arcos de acero son una buena opción. Cada una de sus partes se ensamblan para formar el arco de tal manera que quede bien cimentado y lateralmente rigidizado.

- Concreto lanzado: En algunos textos es definido como el concreto especial. La verdad es que no es solo una manera de colocar concreto ya que al igual que el convencional, requiere cumplir normas convencionales como: relación agua/cemento, consistencia adecuada y colocación correcta. Además contiene grandes ventajas en lo que son procesos constructivos, materiales y equipos. Esta técnica es utilizada en la construcción de túneles, estabilidad de taludes y operaciones mineras.

Revestimiento

El revestimiento de un túnel puede tener la función de aportar capacidad estructural a la sección excavada, dotar el mismo de una sección hidráulica ideal para el transporte del agua, ser parte de requerimientos estéticos de la obra civil o alguna combinación de las anteriores.

Tipos de revestimiento

Los revestimientos de túnel pueden ser "rígidos o flexibles". Los rígidos son revestimientos monolíticos de concreto de espesor relativamente considerable, con o sin refuerzo. Tales revestimientos son generalmente construidos después de que se ha completado la perforación del túnel, soportándose la tierra por medio de costillas de acero y entibado de madera que quedan luego enterrados dentro del recubrimiento de concreto. (Vivas, Zubizarreta, Núñez, & Lanz, 2011).

Los revestimientos flexibles comprenden aquellos tipos construidos a partir de segmentos comparativamente delgados, acoplados para formar anillos de revestimientos usualmente de 50-100 cm de longitud. Estos segmentos son de hierro fundido, acero o concreto y pueden unirse entre sí por medio de pernos. Los anillos del revestimiento se van colocando mientras el túnel va avanzando, realizándose una sola operación de revestimiento, y no dos como en el caso de revestimientos rígidos. El uso de revestimientos segmentados de concreto en sitios donde la mesa de agua sea alta, no se considera adecuado, ya que es difícil garantizar la

impermeabilidad de piezas delgadas de concreto producidas en serie (Vivas, Zubizarreta, Núñez, & Lanz, 2011).

Obra civil

Una vez excavado el túnel de conducción principal, se realiza la construcción de la sección del revestimiento bajo la dirección del ingeniero encargado de obra, los técnicos y encargados de cuadrillas.

Colocación de concreto convencional

El "Método para la Ejecución de la Obra Civil" (MEOC, código: PIR-CC-02) establece las siguientes especificaciones técnicas para los trabajos con concreto:

- Generalidades de producción: Su objetivo primordial es obtener una mezcla uniforme y constituida por las proporciones requeridas de agregados. Este apartado incluye además aspectos de la logística de la producción y de deberes contractuales a los cuales la planta de concreto se ve obligada a responder.
- Dosificación del concreto: El ingeniero constructor y el inspector velarán porque las especificaciones con respecto al tipo de sistema operativo de la planta, la dosificación de los componentes, el equipo de trabajo, el manejo del cemento y los controles del proceso se desarrollan con forme MEOC.
- Mezclado del concreto: Se detallan en el MEOC los aspectos de mezclado para asegurar que todos los componentes queden completamente entremezclados y todas las partículas de agregado completamente cubiertas con pasta de cemento, así como que el concreto descargado de la mezcladora sea uniforme y homogéneo en cada batida.
- Transporte: Se debe entregar el concreto al medio de transporte en el punto de descarga establecido sin alterar de manera significativa las propiedades requeridas, tales como relación A/C, revenimiento, contenido de aire y la homogeneidad del concreto. Se define en el MEOC las especificaciones que rigen la operación de las automezcladoras.

- Sistemas de bombeo: No se pueden utilizar tuberías de aluminio. La bomba debe tener un agitador incorporado en la tolva de almacenamiento. Debe utilizarse mortero o lechada de agua cemento para lubricar la tubería, para el cual previamente debe definirse el sitio de deposición. Debe cumplirse con lo indicado en el ACI 304.2R "Colocación de concreto mediante métodos de bombeo".
- Descarga: Salvo autorización expresa del inspector, no se permite descargar concreto que tenga más de noventa minutos de haberse mezclado. En el sitio de descarga se debe realizar las pruebas de revenimiento del concreto.
- Compactación: Todo concreto debe compactarse cuidadosamente por los medios adecuados durante su colocación y acomodarse enteramente alrededor del acero de refuerzo.
- Curado: Para el curado se puede utilizar el método de curado con agua o el método de curado con selladores o membranas.
- Reparaciones: La reparación de zonas que hayan quedado con defectos tales como hormigueros, porosidades y otros, deben repararse dentro de las 24 horas posteriores a la remoción del encofrado o cuando la inspección lo indique.

Colocación de concreto lanzado

El MEOC establece las especificaciones técnicas para la aplicación del concreto lanzado, tanto por la vía seca como por la húmeda. La aplicación de la normativa mencionada pretende garantizar que en las obras en las cuales se debe colocar concreto lanzado, se cumpla con las especificaciones y los estándares de los diseñadores y aquellos establecidos en las normas de calidad.

Se define en el método la normativa internacional que rige los procesos de manera técnica, la responsabilidad asignada a las dependencias de ingeniería, construcción y control de calidad. Además incluye, toda la información referente a los materiales, producción del concreto, proceso de transporte y descarga, preparación del sitio, colocación, curado y control de calidad.

Colocación de Acero

El MEOC establece las siguientes especificaciones técnicas para los trabajos con acero:

- **Generalidades:** Se establece el criterio de aceptación a partir del cumplimiento de la norma ASTM 615, o la norma ASTM A706, según se haya especificado. Ante cualquier omisión en los detalles de los planos, la colocación del acero se hará de acuerdo con las normas del Instituto Norteamericano del Concreto (ACI).
- **Preparación:** Se detallan aspectos de almacenamiento, estado del acero (limpieza), doblado y machotes de doblado de varilla.
- **Colocación:** Se detallan aspectos de manejo de armaduras previamente dobladas, amarre del acero, colocación de guías y arriostres, recubrimiento, entre otros.

Encofrado

Para el encofrado del ochavo y de los muros del revestimiento del túnel de conducción, se utilizará un sistema modular o sistema normalizado.

Este tipo de encofre generalmente está conformado de módulos prefabricados, principalmente de metal o plástico. Su empleo permite rapidez, precisión y seguridad utilizando herrajes de ensamblaje y otras piezas auxiliares necesarias. Es muy útil en obras de gran volumen (Namiburich, 2012).

Entre las principales especificaciones del encofrado incluidas en el MEOC se tienen:

- Los paneles de formaleta a usar deben estar libres de mortero o cualquier otra suciedad.
- Mientras se esté colocando el concreto se deben eliminar los desplomes para lo cual se deben estar verificando los alineamientos de la formaleta colocando una cuerda en los puntos de línea que pase de extremo a extremo por ambos lados de la formaleta.
- El encargado de las obras solicitará que las áreas involucradas realicen con anterioridad la verificación y revisión final de toda la formaleta cuando esté lista, según se indique en el protocolo de colocación de concreto.

Colocación de paneles de formaleta

Entre las principales especificaciones de la colocación del sistema de encofrado incluidas en el "Método para la ejecución de la obra civil" (MEOC, código: PIR-CC-02) se tienen:

- Las formaletas deben ser de construcción adecuada y tener la rigidez y la resistencia necesarias para evitar deformaciones fuera de las tolerancias especificadas en la tabla 10 del MEOC.
- Las formaletas deben estar adecuadamente apuntaladas de tal manera que conserven su forma, posición y soporten las presiones ejercidas por el concreto al ser colado y compactado.
- Para sostener la formaleta se usan perros y varillas de amarre, u otros accesorios adecuados suministrados por el fabricante. No se permiten amarras de alambre empotradas en el concreto.

Desencofrado

Entre las principales especificaciones del desencofrado incluidas en el MEOC están:

- La determinación del plazo de remoción de las formaletas se basa en el efecto resultante sobre el concreto, de manera que dicho plazo sea compatible con la seguridad del elemento.
- En general, mientras sea compatible con la seguridad del elemento y las especificaciones antes citadas, es recomendable la remoción más pronta posible de la formaleta, ya que esto permite, mejorar el acabado y favorece el curado.
- Inmediatamente después del retiro de las formaletas, todo alambre o pieza metálica (travesas) que se haya utilizado para sujetar las formaletas en su sitio y que sobresalga de la superficie terminada, debe ser quitado o cortado como mínimo 3cm debajo de dicha superficie y rellenado con mortero el agujero que se debe picar para dicho efecto.

Fallas del encofrado

Es indispensable que el adecuado encofrado de las obras. De modo que se asegure la integridad de la estructura de modo que no presente ningún tipo de falla. Las más comunes son (Chaverri, 2011):

- Inadecuado arriostramiento.
- Inapropiada remoción de puntales y apoyos.
- Vibración excesiva.
- Inestabilidad bajo los apoyos (asentamiento de soportes) o puntales desplomados.
- Control inadecuado en el colado del concreto.
- Descuido o falta de inspección en los detalles constructivos (materiales, erección, uniones, etc.)

Plan de obra

La guía de Pmbok define un plan de obra como “Plan para la Dirección del Proyecto”, el cual consiste en un documento que incluye las acciones necesarias para definir, preparar, integrar y coordinar todos los planes subsidiarios.

El plan para la dirección del proyecto define la manera en que el proyecto se ejecuta, se monitorea, se controla y se cierra. El contenido del plan para la dirección del proyecto variará en función del área de aplicación y de la complejidad del proyecto.

El plan para la dirección del proyecto se desarrolla a través de una serie de procesos integrados hasta llegar al cierre del proyecto. Este proceso da lugar a un plan para la dirección del proyecto que se elabora gradualmente por medio de actualizaciones, y se controla y se aprueba a través del proceso Realizar el Control Integrado de Cambios (Talledo, 2008).

El formato que se siguió para la elaboración del plan de obra fue confeccionado por el ICE y avalado por la CNFL. y aplica para todas las obras que se realicen en el PHBI.

Rendimiento de mano de obra

Corresponde a la determinación de la efectividad de las labores de un trabajador cuando desarrolla una tarea específica. Un rendimiento es un valor numérico que asigna una cantidad de material, volumen o área a un determinado tiempo.

Medición

La medición del rendimiento de mano de obra en las labores de construcción de obra civil, se realiza mediante la observación de las tareas, tomando en cuenta el tiempo que dura en realizarse la actividad, la cantidad de personal involucrado y el avance de la tarea en términos de área, volumen o cantidad.

Proyección de duración de tareas

Para obtener la duración de una actividad o tarea en el ámbito de la construcción de estructuras, se hace uso de rendimientos previamente establecidos según la experiencia del profesional a cargo o bases de datos que archiven información similar a la que se requiere.

Glosario

Andamio: es una estructura de carácter temporal, compuesta por plataformas con sus correspondientes soportes y defensas de protección, que se utilizan para sostener obreros y materiales, a fin de poder trabajar en sitios inaccesibles desde lugares firmes, en el curso de cualquier trabajo de construcción, mantenimiento o demolición.

Concreto lanzado con fibras: Es la combinación de concreto convencional con fibras de polipropileno, que al ser incorporadas ayudan a disminuir las fisuras por retracción plástica.

Flujo uniforme: Por definición el flujo uniforme es aquel con profundidad y velocidad constantes. Es el equivalente de un flujo en un canal abierto en tuberías, totalmente desarrollado. El flujo uniforme sólo puede ocurrir en un canal prismático recto, con una pendiente constante en el fondo.

Horahombre: Se refiere a la unidad que asigna el trabajo de un solo obrero a una unidad de tiempo en este caso la hora.

Kg/hh: Unidades de rendimiento de colocación de acero, corresponde respectivamente a kilogramo y hora hombre.

Ochavo: Sección inclinada que se forma justamente en el vértice entre dos superficies planas.

Ocmer: Máquina que se utiliza para proyectar concreto sobre una superficie dada. Es de baja capacidad, su rendimiento promedio de colocación ronda los 4 m³ por hora.

Pernos: En el caso de la obra civil de los túneles de los desgravadores se refiere a arreglos de varilla #8 que se insertan en el lecho rocoso con la finalidad de conformar un punto de anclaje para transmitir carga de soporte a la armadura de los muros de los desgravadores.

Puntales: Un puntal telescópico regulable de acero, es un apoyo provisional que trabaja a compresión y que se utiliza normalmente como soporte vertical temporal en las obras de construcción o para realizar funciones similares como evitar derrumbes en estructuras inestables.

Robojet: equipo especializado para proyección de concreto vía húmeda.

Telescópico: Se refiere a la característica de un elemento que está formado por una serie de piezas que se extienden y recogen para alcanzar distintas longitudes según sea la tarea que se vaya a ejecutar.

Verguiños: Conocidos comúnmente como ties, son segmentos de varilla #2 de grado 40 los

cuales anclan los paneles de formaleta a la armadura de acero de refuerzo por medio de unos elementos que se colocan en la cara exterior del sistema de encofrado denominados "Mariposas".

Metodología

Elaboración del plan de Obra

La elaboración de un Plan de Obra de un proyecto de construcción del ICE requiere de un conocimiento técnico y práctico muy amplio, dejando de lado las premisas de diseño pues éstas ya han sido elaboradas por el Centro de Servicio de Diseño (CSD). La metodología que se llevó a cabo tiene la finalidad de establecer la logística del proceso constructivo, definir los recursos necesarios para las tareas y su duración. En la Figura # 4 se muestra un esquema que resume los procedimientos llevados a cabo para la obtención de la información requerida.

Observación y recopilación de información de campo.

Como primer punto de la metodología se tiene la observación y recopilación de información de campo. Esto se refiere a la indagación de los procesos llevados a cabo en los frentes de trabajo. Para realizar una visita al campo con las comodidades y seguridad requeridas, se debe llevar consigo los siguientes artículos:

- Equipo de protección personal según sean las tareas que se estén realizando. Por lo general el equipo completo de un visitante a las obras subterráneas consiste en :
 - Casco
 - Chaleco
 - Botas Blindadas
 - Mascarilla
 - Orejeras
 - Capa
- Libreta de apuntes con portada resistente al agua.
- Cámara fotográfica.

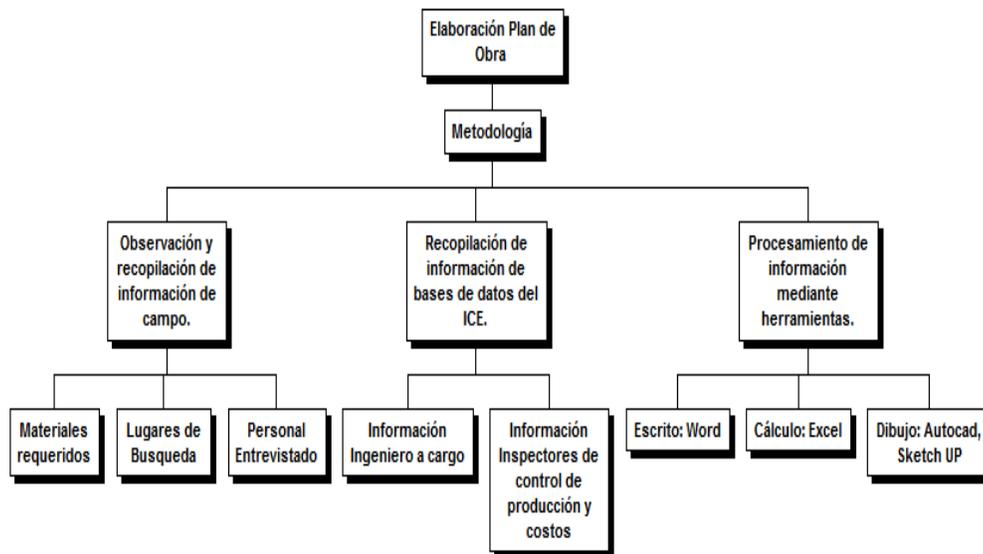


Figura # 4. Metodología del presente trabajo.

Una vez que se cuenta con el equipo mencionado anteriormente se procede a realizar las visitas a los diferentes frentes de trabajo. Los que se visitaron frecuentemente fueron (ver detalle de ubicación en la Figura # 25):

- Pozo: Inmediaciones donde se encuentran todas las instalaciones que acompañan las labores de excavación y revestimiento de los túneles de conducción. Los frentes de trabajo que se comunican mediante el pozo son el Túnel 1 Boca 1 A (T1B1A) y el Túnel 1 Boca 1 B (T1B1B). El primero es el acceso al túnel de conducción y el segundo corresponde al portal de entrada hacia los túneles de los desgravadores, en la Figura # 26 se muestra un detalle de dichos frentes de trabajo.
- Final del Túnel (FT): Lugar donde se encuentran los portales de entrada al Túnel 1 Boca 2 (T1B2) y todas las instalaciones que le dan servicio a él (ver Figura # 26).

En la Figura # 5 se muestra un esquema de la organización jerárquica del personal de los distintos frentes de trabajo de obras subterráneas. De ellos se entrevistó a las personas que laboran regularmente en el Pozo y en el FT.

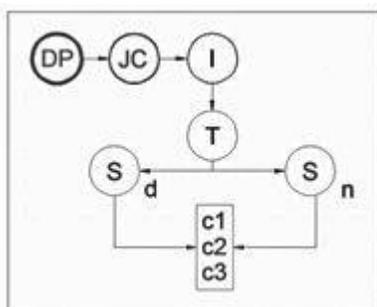


Figura # 5. Mapa jerárquico de organización de personal de obras subterráneas.

En la figura anterior se muestra que el encargado general es el Director del Proyecto (DP). Seguidamente se encuentra el Jefe de Construcción (JC) cuya tarea es controlar y coordinar las labores que se realizan en cada frente de trabajo.

El Ingeniero (I) es el encargado de obras subterráneas, conoce a fondo el proceso de excavación y de revestimiento. Está actualmente encargado de la excavación del túnel de conducción principal y del revestimiento de los

túneles de los desgravadores. Es la persona que más aportó a la presente práctica profesional pues posee el criterio y la experiencia necesaria como para construir críticas que aportarán al proceso de depuración de la planificación. Además aportó datos importantes para el desarrollo del trabajo como:

- Información organizacional del PHBI tanto a nivel administrativo como a nivel de construcción.
- Horarios de trabajo de cada uno de los trabajadores que participan en el proceso de excavación y de revestimiento de los túneles de los desgravadores.
- Rendimientos promedio o típicos de tareas llevadas a cabo en obras civiles similares.
- Planos constructivos vigentes tanto para el revestimiento del túnel de conducción como el de los túneles de los desgravadores.
- Explicación de la logística de movilización, de ventilación, de excavación, y suministro de recursos entre otros.

El Técnico (T) con más de 20 años de experiencia en la dirección de procesos de excavación y revestimiento de túneles de proyectos de generación eléctrica del ICE aportó información valiosa acerca de la maquinaria requerida para los procesos y aspectos de logística dentro de un túnel entre otros.

Por otro lado, también se contó con el criterio del técnico de la obra civil de los túneles de los desgravadores el cual aportó información acerca del armado de acero, colocación de formaleta y colado de concreto de manera muy gráfica pues simultáneamente a sus explicaciones se estaban realizando las tareas de construcción del desgravador 1, ver Figura # 28.

Por último, se llevaron a cabo charlas y sesiones de discusión en conjunto con el ingeniero y los técnicos mencionados con el objeto de aclarar cada una de las incógnitas que se fueron presentando a lo largo de la planificación de las obras.

Recopilación de información de bases de datos del ICE

La información requerida de proyectos anteriores del ICE fue brindada en gran parte por el ingeniero a cargo de obras subterráneas y el resto por los coordinadores de control de costos y producción situados en las oficinas del Pozo y del Final del Túnel.

Procesamiento de la información recopilada

La información recopilada fue utilizada para la realizar los cálculos que determinaron la duración de las actividades, fue incluida en el plan de obra para describir la metodología constructiva. A continuación se describe cada uno de éstos procesos de manera más detallada.

Planeamiento constructivo

Al inicio de la presente práctica profesional, en el PHBI se estaba trabajando en el revestimiento del túnel toma y de los túneles de los desgravadores. Se observó que la metodología constructiva consistía primero en construir el revestimiento de la corona del túnel y posteriormente la sección inferior correspondiente a la losa y a los muros de la siguiente manera:

- **Sección de la corona:** Se procedía a colocar el concreto de relleno de sobreexcavación en la corona en una primera etapa, luego se procedía a colocar el acero de refuerzo y por último se colocaba el concreto lanzado de etapa final para cubrir el acero.
- **Sección inferior:** Se colocaba el acero de refuerzo de los muros y de la losa simultáneamente y luego se colaba en una primera etapa la losa de piso, el ochavo y un arranque muro. Finalmente se colaba la sección de los muros.

La planificación de la logística constructiva del túnel principal se basó en la observación anteriormente mencionada y en el aporte de los encargados de las obras a partir de su experiencia.

Una vez reunida la información requerida para iniciar las labores de planificación del revestimiento se procedió a elaborar una tabla en Excel para determinar las duraciones de cada tarea con los siguientes datos:

- Consumo de materiales por metro de túnel.
- Rendimiento de colocación de los materiales.
- Jornada de trabajo.
- Factores de inacción y de eficiencia de los procesos.
- Cantidad de frentes de trabajo.
- Días de trabajo por bisemana (en caso que se fuera a realizar la tarea en conjunto con el proceso de excavación)
- Personal y maquinaria requerida.

El ejercicio consistía en la determinación del consumo de materiales por metro lineal del túnel a partir de las especificaciones de los planos vigentes. Luego se ingresó en la ecuación, el rendimiento de la tarea en términos de cantidad de material colocado por horahombre de trabajo.

La jornada de trabajo se definió en 24 horas debido a la necesidad que existe de terminar las obras lo antes posible. Los rendimientos y la cantidad de personal requerida inicialmente fueron brindados por el ingeniero a cargo.

Con la información mencionada anteriormente, se definió el avance diario en metros y a partir de la cantidad de días de trabajo por bisemana y se determinó la duración de las actividades en términos de bisemanas de trabajo.

Al pasar de las semanas se depuró los cálculos hasta llegar a obtener los plazos requeridos para la realización de las actividades mostradas en los Cuadro # 1 - # 6, #13 y #14.

Se definió el avance de la tarea por estacionamientos para los plazos definidos preliminarmente. Esto se realizó con ayuda del programa MS Project. El detalle de la programación se muestra en el anexo del plan de obra del apéndice Ap6 del presente escrito.

Como complemento de la planificación de las tareas, se crearon esquemas y dibujos que facilitaron la comprensión de los ciclos y los procesos propuestos, ver plan de obra en el apéndice Ap6 del presente trabajo.

Una vez obtenidas las duraciones de las actividades se procedió a realizar su programación.

Se seleccionó el método para el encofrado de los muros, como se muestra a continuación:

Selección de sistema de encofrado

Para el encofrado de los muros del revestimiento se contó con dos opciones:

1. El uso de un transportador hidráulico de formaleta (THF).
2. Encofrado por medio de paneles de formaleta.

La primera opción correspondía al método de encofrado que se ha utilizado anteriormente en proyectos del ICE donde la sección del revestimiento del túnel ha sido circular y uniforme. Un THF (conocido también como caballón) se ha utilizado para encofrar la sección completa de varios túneles y gracias a su característica telescópica ha permitido el colado de la sección de manera continua.

Para el túnel del PHBI se requería de un caballón hecho a la medida capaz de encofrar únicamente los muros de la sección, pues la losa, el ochavo y un arranque del muro ya habrían sido colados preliminarmente.

La segunda opción consistía en encofrar los muros mediante paneles de formaleta tal y como se encofraron los muros de los túneles de los desgravadores del PHBI.

Para escoger entre las dos opciones se calculó el avance diario máximo de cada uno de los métodos. Para el caso del THF se utilizó los rendimientos del caballón del Proyecto Hidroeléctrico Reventazón (PHR), ver Cuadro # 13.

Dentro la segunda opción, se realizó un estudio de rendimientos del colado de los muros de los desgravadores. Los datos se recopilaron por medio de un formulario elaborado para dichas tareas del revestimiento (ver apéndice Ap5).

Los rendimientos obtenidos incluyen el tiempo que se toma en la colocación de pernos anclados a la roca existente, verguños, arriostre superior de la formaleta por medio de puntales, andamios, colocación de elementos de madera y tornillo Richmond entre otros arreglos de apuntalamiento definidos por el técnico en el frente de trabajo.

Procesamiento de los datos obtenidos

El análisis de los datos se realizó mediante estadística descriptiva la cual es una ciencia que analiza series de datos con el fin de extraer conclusiones sobre el comportamiento de las variables involucradas en el proceso (Villalta, 2009).

Proyección del ciclo de encofrado y desencofrado a partir de los datos obtenidos

A partir de los rendimientos obtenidos en el PHBI, Proyecto Hidroeléctrico Pirrís (PHP) y PHR se realizó la proyección del tiempo que durarán en culminarse las tareas de la construcción de los muros del revestimiento del túnel de conducción a partir del uso de paneles de formaleta, ver Cuadro # 14.

Programación de las actividades

La programación de las actividades para el revestimiento de un túnel requiere un proceso iterativo de creación de escenarios de trabajo en los cuales se muestra las labores que están siendo realizadas. Esto es de gran utilidad ya que permite visualizar la continuidad de los procesos de manera que ninguna de las actividades se obstaculice entre sí, debido a que el acceso y la movilidad dentro de un túnel son limitados.

Se tomó en cuenta para dicha programación la limitación de acceso que existirá en el Final del Túnel debido a los trabajos de construcción para construir el canal de entrada del embalse y la ampliación del patio de trabajo y camino aledaños. La programación final de las actividades se observa en la Figura # 6.

Definición de recursos

Materiales: Los materiales requeridos para la construcción de las obras se determinaron mediante el cálculo de cantidades a partir de los planos de código ICE 799IEA7800300002 localizados en el expediente 0375. Los resultados se muestran en el Cuadro # 8.

Maquinaria: La maquinaria requerida se propuso a partir de la observación llevada a cabo en la

obra civil de los túneles de los desgravadores, donde se realizó cada una de las tareas que se realizarán en el revestimiento del túnel de conducción principal. Esto permitió la visualización de la maquinaria y equipo requerido. Los resultados se muestran en el cuadro # 7 y en la figura # 7.

Mano de Obra: La mano de obra se definió a partir de la observación de las actividades del revestimiento de los túneles de los desgravadores y del aporte del ingeniero a cargo y el técnico de la obra.

El ejercicio consistió en realizar unos esquemas a mano alzada de la ubicación de cada uno de los trabajadores durante el desarrollo de las actividades en el frente de trabajo, ver apéndice Ap3. Estos esquemas fueron analizados por los encargados de obra y se depuraron hasta obtener el requerimiento de personal definitivo mostrado en la Figura # 8.

Para llevar a cabo dichas labores se realizaron frecuentes visitas a la zona de los túneles de los desgravadores y se sostuvieron varias sesiones de discusión con el técnico de obra civil para tratar temas como:

- Dudas constructivas acerca de los planos.
- Corroboración de cubicajes de concreto para las coladas de la losa de piso, ochavo y arranque de muro.
- Requerimiento de materiales.
- Explicación detallada de ciertas tareas del proceso de revestimiento como colocación de pines y guías, cortado y doblado de acero, colocación de previstas para anclajes y drenajes entre otros.

La información elaborada se muestra al final del apartado de resultados.

Redacción del plan de obra

Para la redacción del plan de obra, se utilizó la guía para elaboración de planes de obra creada por el ICE y abalada por la CNFL. Este documento se redactó con la información recopilada en el campo de trabajo, bajo las premisas de la programación propuesta, con el criterio de las personas con experiencia, con el apoyo de las distintas dependencias que dan servicio a las obras subterráneas del PHBI y con los aspectos técnicos del diseño estructural incluidos en los planos vigentes de código ICE 799IEA7800300002 localizados en el expediente 0375.

Proceso constructivo de los desgravadores

A lo largo de la construcción de las obras del túnel pantalón 1, transición 1 y desgravador 1 se brindó apoyo a los encargados de las obras elaborando datos y herramientas para el cálculo de cantidades y requerimiento de materiales mediante el uso de programas de computación.

Resultados

Elaboración del plan de Obra

Se presenta en este apartado el resultado de la planificación logística realizada para el revestimiento bajo las premisas de diseño establecidas por el Centro de Servicio de Diseño. El Plan de Obra realizado se ubica en el Apéndice # 6.

Duración de las actividades

Para la metodología de avance se definieron 7 etapas en las cuales se construirá el revestimiento. A continuación se muestran una serie de cuadros que resumen el detalle de las variables que conforman el ciclo de cada etapa.

Etapa #1: Colocación del Relleno de Sobre Excavación y Primera Etapa de Concreto Lanzado.

En el Cuadro # 1 se muestra la primera etapa del revestimiento denominada Colocación del Relleno de Sobre Excavación y Primera Etapa de Concreto Lanzado.

El valor del concreto requerido por metro de túnel se definió a partir de la sección transversal del revestimiento mostrada en los planos vigentes a la fecha. Los factores de tiempos de inacción y eficiencia del proceso fueron definidos por el ingeniero a cargo de las obras. Los días laborales fueron definidos según lo permitía el proceso de excavación.

Cuadro # 1: Fase # 1 del revestimiento.

Colocación del Relleno Sobreexcavación y Primera Capa de Concreto Lanzado		
Estimado de concreto de relleno	2,00	m3/mL
Rendimiento de colocación de concreto lanzado	6,00	m3/h
Jornada de trabajo	24,00	h
Factor eficiencia horaria por tiempos de inacción	0,85	-
Eficiencia del proceso de lanzado de concreto	0,70	-
Volumen diario a colocar	85,68	m3
Longitud diaria a colocar por frente	42,00	mL/día
Tiempo total de colocación de relleno	80,00	días
Número de frentes	2,00	c/u
Tiempo total por frente	40,00	días
Días por bisemana laborados	3,00	días/bisemana
Bisemana de trabajo	<u>14,00</u>	bisemanas

Fuente (PHBI, 2012).

Etapa #2: Colocación de acero en corona.

En el cuadro # 2 se muestra la segunda etapa del revestimiento denominada Colocación de Acero en Corona.

El valor del acero requerido se definió a partir de la sección transversal del revestimiento mostrada en los planos vigentes. El rendimiento

de colocación del acero en la corona de la sección se definió a partir de la experiencia adquirida en el revestimiento de los túneles de los desgravadores del PHBI. Los días laborales se definieron de manera que la etapa # 2 no alcanzará las labores de excavación del túnel. La *condición normal* se refiere a periodo en el cual se coordinarán las labores con la excavación y la *condición post-tope* se refiere a la etapa en la cual la excavación ha finalizado.

Cuadro # 2: Fase # 2 del revestimiento.

Colocación de acero en corona		
Condición Normal		
<u>Tramos T1B1 y T1B2</u>	<u>2418,00</u>	<u>m</u>
Cantidad acero por metro lineal	140,00	Kg/mL
Rendimiento de colocación	15,00	kg/hh
Número de armadores por cuadrilla	6,00	personas
Jornada de trabajo	24,00	h
Factor eficiencia horaria por tiempos de inacción	0,85	-
Eficiencia del proceso	0,90	-
Cantidad de acero diario por cuadrilla	1652,40	Kg/día
Avance diario por cuadrilla	11,80	m/día
Número de cuadrillas	4,00	-
Avance diario total	47,20	m/día
Días totales en colocación de acero	52,00	días
Días por bisemana	4,00	días
Cantidad de bisemanas	<u>13,00</u>	bisemanas
Condición post-tope		
<u>Tramos T1B1 y T1B2</u>	<u>837,87</u>	<u>m</u>
Cantidad acero por metro lineal	140,00	Kg/mL
Rendimiento de colocación	15,00	kg/hh
Número de armadores por cuadrilla	6,00	personas
Jornada de trabajo	24,00	h
Factor eficiencia horaria por tiempos de inacción	0,85	-
Eficiencia del proceso	0,90	-
Cantidad de acero diario por cuadrilla	1652,40	Kg/día
Avance diario por cuadrilla	11,80	m/día
Número de cuadrillas	4,00	-
Avance diario total	47,20	m/día
Días totales en colocación de acero	18,00	días
Días por bisemana	14,00	días
Cantidad de bisemanas	<u>2,00</u>	bisemanas

Fuente (PHBI, 2012)

Etapa #3: Colocación de Concreto Lanzado de Etapa Final.

En el cuadro # 3 se muestra la tercera etapa del revestimiento denominada Colocación de Concreto Lanzado de Etapa Final.

El valor del concreto requerido por metro de túnel se definió a partir de la sección transversal del revestimiento mostrada en los planos vigentes.

La *condición normal* se refiere a periodo en el cual se coordinarán las labores con la excavación y la *condición post-tope* se refiere a la etapa en la cual la excavación ha finalizado.

Cuadro # 3: Fase # 3 del revestimiento.

Colocación de Concreto Lanzado Etapa Final		
Condición Normal		
Tramo T1B1	1674,00	m
Estimado de concreto sobre la malla	1,20	m3/mL
Rendimiento de colocación de concreto lanzado	8,00	m3/h
Jornada de trabajo	24,00	h
Factor eficiencia horaria por tiempos de inacción	0,85	-
Eficiencia del proceso de lanzado de concreto	0,70	-
Volumen diario a colocar	114,24	m3
Longitud diaria a colocar por frente	95,00	mL/día
Tiempo total de concreto lanzado	18,00	días
Número de frentes	1,00	-
Tiempo total por frente	18,00	días
Días por bisemana laborados	3,00	días/bisemana
Bisemana de trabajo	<u>6,00</u>	bisemanas
Condición post-tope		
Tramo T1B1	1581,87	m
Estimado de concreto sobre la malla	1,20	m3/mL
Rendimiento de colocación de concreto lanzado	8,00	m3/h
Jornada de trabajo	24,00	h
Factor eficiencia horaria por tiempos de inacción	0,85	-
Eficiencia del proceso de lanzado de concreto	0,70	-
Volumen diario a colocar	114,24	m3
Longitud diaria a colocar por frente	95,00	mL/día
Tiempo total de concreto lanzado	17,00	días
Número de frentes	1,00	-
Tiempo total por frente	17,00	días
Días por bisemana laborados	14,00	días/bisemana
Bisemana de trabajo	<u>2,00</u>	bisemanas

Fuente (PHBI, 2012).

Etapa #4: Colocación de Acero de Losa de Piso y Muros.

En el cuadro # 4 se muestra la cuarta etapa del revestimiento denominada Colocación de Acero de Losa de Piso y Muros.

El valor del acero requerido se definió a partir de la sección transversal del revestimiento mostrada en los planos vigentes. El rendimiento de colocación del acero para esta etapa se definió a partir de la experiencia adquirida en el revestimiento de los túneles de los desgravadores del PHBI y en otros proyectos del ICE.

Cuadro # 4: Fase # 4 del revestimiento

Colocación de Acero de Losa de Piso y Muros		
Cantidad de acero por metro lineal	535,00	Kg/mL
Rendimiento de colocación de acero	35,00	Kg/hh
Armadores en cada cuadrilla	8,00	personas
Jornada de trabajo	24,00	hra
Factor eficiencia horaria por tiempos de inacción	0,85	-
Eficiencia del proceso	0,90	-
Cantidad de acero diario por cuadrilla	5140,80	Kg/día
Avance diario por cuadrilla	9,61	m/día
Número de cuadrillas	5,00	c/u
Avance diario total	48,00	m/día
Avance diario total	25704,00	Kg/día
Días totales en colocación de acero	70,00	días
Días por bisemana	14,00	días
Cantidad de bisemanas	5,00	bisemanas

Fuente (PHBI, 2012).

Etapa #5: Colado de la Losa de Piso y Arranque de Muros.

En el Cuadro # 5 se muestra la quinta etapa del revestimiento denominada Colado de Losa de Piso y Arranque de Muros.

El valor del concreto requerido por metro de túnel se definió a partir de la sección transversal del revestimiento mostrada en los planos vigentes. La capacidad de bombeo se definió según la experiencia adquirida con el equipo utilizado en el colado de las secciones del revestimiento de los desgravadores del PHBI y en otros proyectos del ICE.

Ésta tarea se realizará de manera continua durante la bisemana incluyendo las salidas largas

del personal administrativo, por ello se establecen 14 días de trabajo.

Cuadro # 5: Fase # 5 del revestimiento

Colado de la Losa de Piso y Arranque de Muros		
Volumen por metro lineal	1,97	m3/mL
Capacidad de bombeo con una línea	12,00	m3/h
Jornada de trabajo	24,00	hra
Factor eficiencia horaria por tiempos de inacción	0,85	-
Eficiencia del proceso	0,85	-
Colocación diaria de concreto de losa	208,08	m3/día
Avance diario en losa	105,00	mL/día
Días totales de colado de losa	32,00	días
Días por bisemana	14,00	días
Cantidad de bisemanas	2,29	bisemanas

Fuente: (PHBI, 2012).

Etapa #6: Colado de Muros.

Para la determinación de la duración de la presente etapa se realizó un ejercicio de comparación entre dos métodos de encofrados que estaban a disposición, los resultados se muestran al final de la sección de resultados del presente escrito.

duración de la etapa # 7 asumiendo que el 50 % de la traza del túnel de conducción requería este tipo de soporte y drenaje.

Etapa #7: Colocación de Anclajes y Drenajes.

En el Cuadro # 6 se muestra la séptima etapa del revestimiento denominada Colocación de Anclajes y Drenajes.

Los cálculos se realizaron a partir de la sección transversal del revestimiento mostrada en los planos vigentes. El detalle final de la distribución de los anclajes y drenajes no estaba definida por la dependencia de Geotecnia y Diseño del PHBI para cuando se realizó el Plan de Obra, por lo tanto se llevó el cálculo de la

Cuadro # 6: Fase # 7 del revestimiento

Colocación de anclajes y drenajes		
Barrenación		
Distancia	1673,2	m
Cantidad de drenajes en corona	5857,0	c/u
Cantidad de drenajes Muro	3347,0	c/u
Cantidad de drenajes Piso	1674,0	c/u
Cantidad de anclajes	3347,0	c/u
Tiempo de barrenación promedio	3,0	min
Duración total de Barrenación	711,3	hra
Duración total de Barrenación	30,0	días
Factor eficiencia del equipo	0,9	-
Factor eficiencia de la tarea	1,0	-
Días por bisemana	14,0	días
Cantidad de bisemanas	3,0	c/u
Avance bisemanal en tramos de	558,0	m
Rendimiento de la actividad	46,2	m/día
Construcción de elementos		
Distancia	1673,2	m
Cantidad de drenajes en corona	5857,0	c/u
Cantidad de drenajes Muro	3347,0	c/u
Cantidad de drenajes Piso	1674,0	c/u
Cantidad de anclajes	3347,0	c/u
Frentes de trabajo - drenajes corona	2,0	c/u
Frentes de trabajo - drenajes muro	2,0	c/u
Frentes de trabajo - drenajes Piso	2,0	c/u
Frentes de trabajo - anclajes	4,0	c/u
Tiempo de contrucción drenaje corona	4,0	min
Tiempo de contrucción de drenaje muro	3,0	min
Tiempo de contrucción de drenaje piso	4,0	min
Tiempo de contrucción de anclaje	15,0	min
Duracion de contrucción drenajes corona	195,2	hra
Duracion de contrucción drenajes muro	83,7	hra
Duracion de contrucción drenajes piso	55,8	hra
Duracion de contrucción anclajes	209,2	hra
Duración total de construcción	543,9	hra
Duración total de construcción	23,0	días
Factor eficiencia del equipo	0,9	-
Factor eficiencia de la tarea	1,0	-
Días por bisemana	14,0	días
Cantidad de bisemanas	2,0	c/u
Avance bisemanal en tramos de	837,0	m
Rendimiento de la actividad	72,7	m/día

Fuente: (PHBI, 2012).

Programación de las actividades

A partir de las duraciones obtenidas se realizó la programación de las labores del revestimiento. Como parte del ejercicio se elaboró un diagrama de espacio tiempo que resume la logística del proceso.

En el eje de las abscisas de la Figura # 6 se muestra una escala de 0 a 3500 metros correspondiente a la longitud de la línea de túnel y en el eje de las ordenadas se muestra una escala de tiempo en meses. En la misma figura se encuentra la simbología correspondiente para su interpretación.

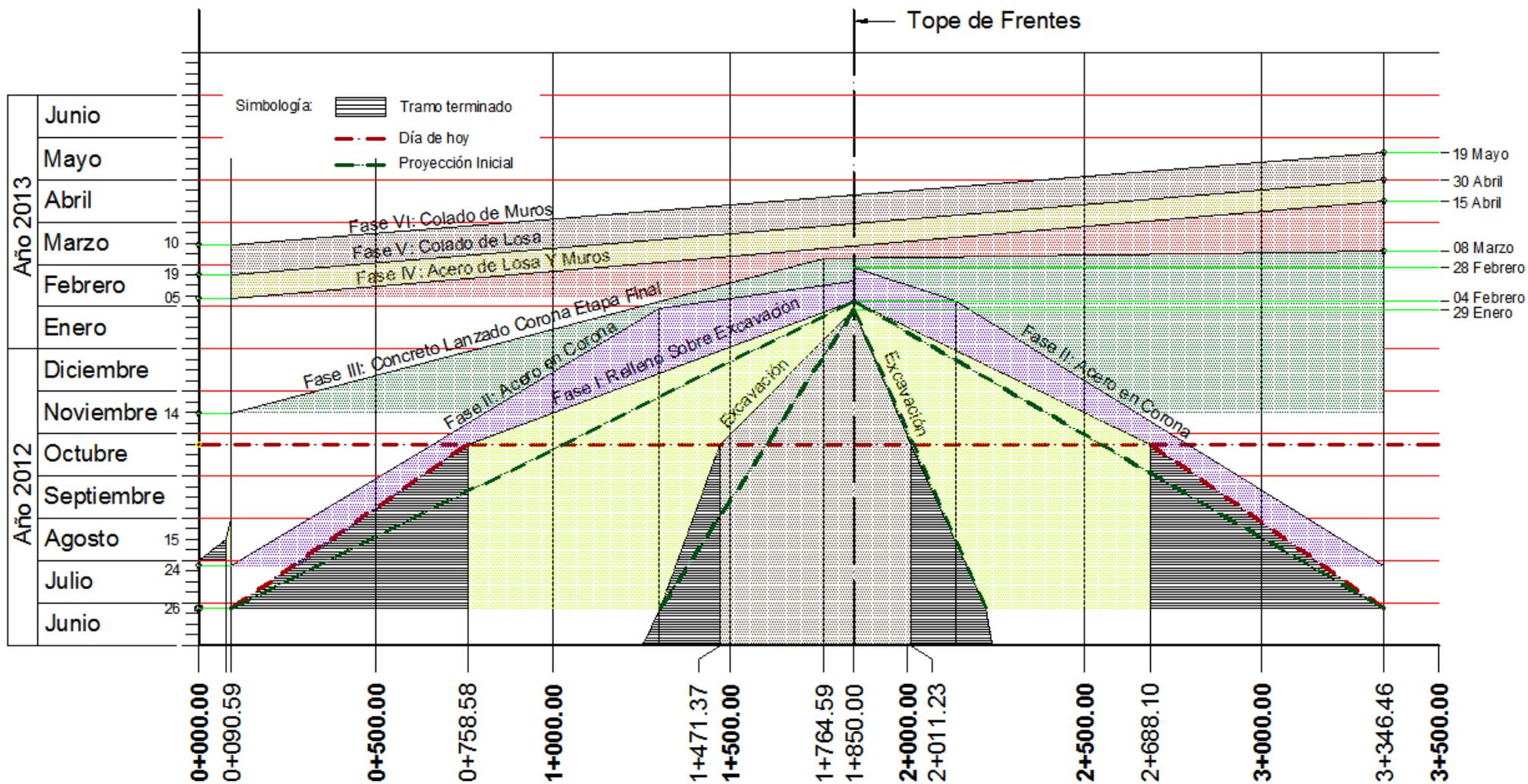


Figura # 6. Diagrama espacio tiempo de labores del revestimiento y excavación actualizado para finales de septiembre del presente año. Fuente: (PHBI, 2012)

Determinación de los recursos

Maquinaria, requerimiento

En el Cuadro # 7 se muestra el requerimiento de maquinaria definido para cada etapa del revestimiento. Este se definió a partir de la observación de los procesos llevados a cabo en el revestimiento de los túneles de los desgravadores del PHBI.

El equipo alquilado es todo aquel que disponga un contratista de maquinaria y la CNFL deberá hacerse cargo de los costos operativos del mismo. El equipo ICE es toda aquella

maquinara que es propiedad del ICE y es administrada por una dependencia externa denominada Maquinaria Equipo y Transporte (MET). El equipo menor propiedad del ICE y se maneja a nivel de cada proyecto.

Durante la ejecución de los proyectos del ICE se presenta un fenómeno de préstamo de equipo y materiales el cual la mayoría de las veces tiene un carácter devolutivo y se realiza con la finalidad de adquirir recursos que se requieran de manera inmediata y por aspectos de trámites de adquisición no se puedan adquirir de ésta manera.

Cuadro # 7. Maquinaria y equipo requeridos para la construcción del revestimiento.

Fase	Actividad	Equipo Alquilado		Equipo ICE		Equipo Menor			
		Automezcladora	Montacargas	Grua Liantas	Grua Torre	Bomba Putzmeister	Jumbo-Dosificador	Robojet	
1	Colocación del Relleno de Sobre Excavación y Primera Etapa de Concreto Lanzado	2		1	1			2	
2	Colocación de acero en corona		2						
3	Colocación de Concreto Lanzado de Etapa Final	1							1
4	Colocación de Acero de Losa de Piso y Muros								
5	Colado de la Losa de Piso y Arranque de Muros	1						1	1
6	Colado de Muros	3						1	1

Fuente: (PHBI, 2012).

Maquinaria, flujo

En la Figura # 7 se muestra el flujo mensual de maquinaria y equipo ICE requerido para las labores del revestimiento en el año 2013.

Este diagrama es gran utilidad porque siempre que se va a utilizar maquinaria en un proyecto del ICE se ven comprometidas con el proceso varias dependencias internas del

proyecto, las cuales se encargan de proporcionar en este caso la energía eléctrica o combustible necesario para el funcionamiento de las mismas. Por ello es útil que los encargados de cada área tengan presente con suficiente antelación el detalle de la maquinaria que se estará utilizando.

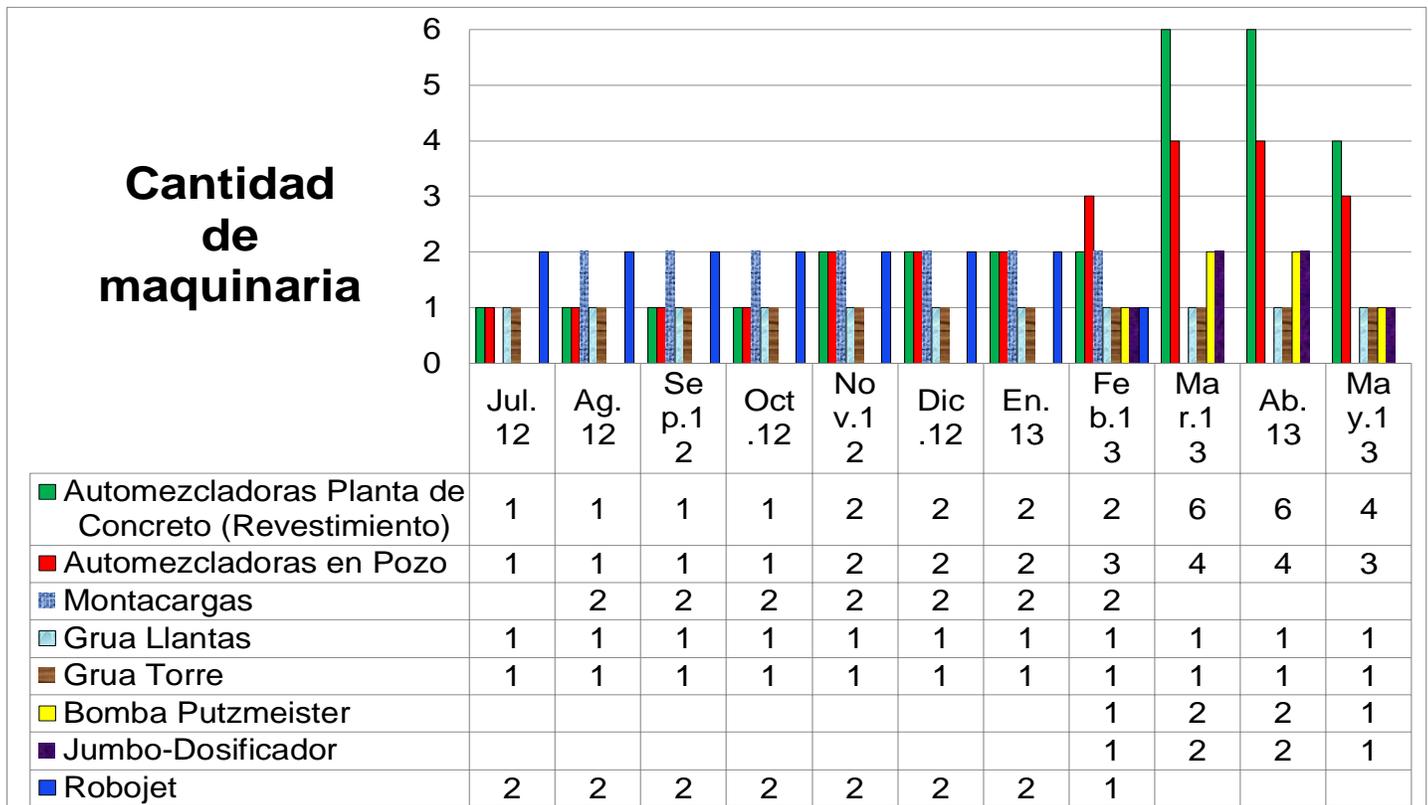


Figura # 7 Requerimiento mensual de maquinaria para las labores del revestimiento. Fuente: (PHBI, 2012).

Materiales

En el Cuadro # 8 se muestra requerimiento de materiales para cada etapa del revestimiento. Las cantidades se determinaron a partir de los planos oficiales y vigentes para las obras del revestimiento del túnel de conducción principal del PHBI.

El rubro de "Otros" contempla todos los materiales misceláneos que son difíciles de

cuantificar por su característica de ser muy numerosos y su costo es relativamente bajo con respecto a los principales materiales de construcción como lo son el acero y aquellos que conforman el concreto. Este porcentaje de 15% se aplica más que todo en el proceso presupuestario de la obra.

Cuadro # 8. Materiales requeridos para la construcción del revestimiento.

Fase	Actividad	Concreto 280 kg/cm ² (m ³)	Varilla Grado 60, (ton):			Otros (%)
			#4	#6	#8	
1	Colocación del Relleno de Sobre Excavación y Primera Etapa de Concreto Lanzado	5000				15%
2	Colocación de acero en corona	-	149			
3	Colocación de Concreto Lanzado de Etapa Final	4300				
4	Colocación de Acero de Losa de Piso y Muros	-	514	512	1042	
5	Colado de la Losa de Piso y Arranque de Muros	7500				
6	Colado de Muros	13200				

Fuente: (PHBI, 2012).

Requerimiento de concreto

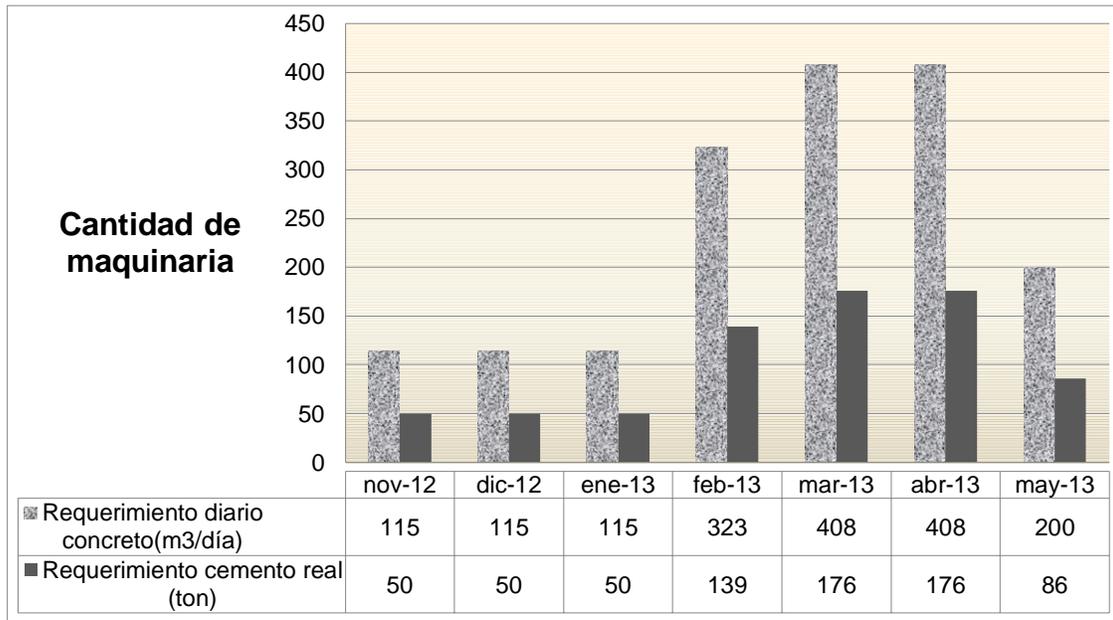
El concreto es un material vital para el proceso de excavación y revestimiento del túnel de conducción del PHBI, pues se requiere tanto de su uso para el soporte temporal como para conformar la sección definitiva del revestimiento.

El concreto está compuesto por cemento arena, piedra y agua y en cantidades específicas definidas según el diseño de mezcla. Por ello cuando se planificó las labores del revestimiento, se calculó el requerimiento total y mensual de concreto para conformar cada una de las etapas del revestimiento para que la persona que se encargue de la proveeduría del concreto podrá

planificar con suficiente antelación la compra, ingreso y almacenamiento de los diferentes componentes de la mezcla de concreto en el sitio del PHBI.

En el Cuadro # 9 se muestra el requerimiento diario y mensual de concreto para las labores del revestimiento durante la primera mitad del año 2013.

Cuadro # 9. Requerimiento diario-mensual de concreto y cemento.



Fuente: (PHBI, 2012).

Requerimiento de acero

Al igual que el concreto el acero es un material vital para el proceso de excavación y revestimiento del túnel de conducción del PHBI, pues se requiere tanto de su uso para el soporte temporal como para conformar la sección definitiva del revestimiento.

Durante el proceso de excavación se requirió de arcos de acero para conformar una sección de soporte temporal capaz de dotar al entorno la suficiente estabilidad como para continuar con las labores de excavación y trabajar en el revestimiento bajo condiciones seguras.

Durante el proceso de revestimiento de igual manera se requerirá de acero pero en este caso para conformar la sección del revestimiento. Se utilizará diferentes tipos de varilla, a continuación se menciona brevemente su uso:

- Varilla #3 grado 60: Se utilizará como refuerzo radial de la corona de la sección en varios tramos del túnel, se colocará con una separación de 15 centímetros.

- Varilla #4 grado 60: Se utilizará como refuerzo de la corona de la sección en varios tramos del túnel. Su colocación en ambas direcciones (radial y longitudinal) dará lugar a una malla con espaciamiento de 20 centímetros en ambas direcciones.
- Varilla #6 grado 60: Se utilizará como refuerzo de la sección inferior del túnel, como el gancho que se encuentra más cercano a la cara del concreto que estará en contacto con el agua de generación. Su separación será de 30 centímetros.
- Varilla #8 grado 60: Se utilizará como refuerzo de la sección inferior del túnel, como el gancho que se encuentra más cercano a la cara del concreto que estará en contacto con el medio geológico.

El detalle del acero a colocar se muestra en el Anexo 3 del Plan de Obra adjunto al Apéndice # 6 del presente escrito. En el Cuadro # 10 se muestra el requerimiento mensual de acero para el año 2013.

Cuadro # 10. Requerimiento mensual de acero de refuerzo para el revestimiento del túnel de conducción principal.

Sector	Sección	Tramo	Estacionamientos	Long.Tramo(m)	Inicio	Tipo Var	Consumo/ml (Kg)	% Adicional	Consumo tramo (Ton)	jul-12	ago-12	sep-12	oct-12	nov-12	dic-12	ene-13	feb-13	
ACERO DE CORONA	Sección 1 y 2	TRAMO 1:	T1B1 0+000,00 - 0+090,59	-	91	01/10/12	#4	34	30%	4,03								
		TRAMO 2:	T1B1 0+090,59 - 0+183,58	T1B2 3+346,46 - 3+253,46	186	24/07/12	#4	34	30%	8,23	8,23							
		TRAMO 3:	T1B1 0+183,59 - 0+276,59	T1B2 3+253,46 - 3+160,46	186	07/08/12	#4	34	30%	8,23	8,23							
		TRAMO 4:	T1B1 0+276,59 - 0+369,59	T1B2 3+160,46 - 3+067,46	186	21/08/12	#4	34	30%	8,23		8,23						
		TRAMO 5:	T1B1 0+369,59 - 0+462,59	T1B2 3+067,46 - 2+974,46	186	04/09/12	#4	34	30%	8,23		8,23						
		TRAMO 6:	T1B1 0+462,59 - 0+555,59	T1B2 2+974,46 - 2+881,46	186	18/09/12	#4	34	30%	8,23			8,23					
		TRAMO 7:	T1B1 0+555,59 - 0+648,59	T1B2 2+881,46 - 2+788,46	186	02/10/12	#4	34	30%	8,23			8,23					
		TRAMO 8:	T1B1 0+648,59 - 0+741,59	T1B2 2+788,46 - 2+695,46	186	17/10/12	#4	34	30%	8,23				8,23				
		TRAMO 9:	T1B1 0+741,59 - 0+834,59	T1B2 2+695,46 - 2+602,46	186	31/10/12	#4	34	30%	8,23				8,23				
		TRAMO 10:	T1B1 0+834,59 - 0+927,59	T1B2 2+602,46 - 2+509,46	186	14/11/12	#4	34	30%	8,23				8,23				
		TRAMO 11:	T1B1 0+927,59 - 1+020,59	T1B2 2+509,46 - 2+416,46	186	28/11/12	#4	34	30%	8,23					8,23			
		TRAMO 12:	T1B1 1+020,59 - 1+113,59	T1B2 2+416,46 - 2+323,46	186	12/12/12	#4	34	30%	8,23					8,23			
		TRAMO 13:	T1B1 1+113,59 - 1+206,59	T1B2 2+323,46 - 2+230,46	186	06/01/13	#4	34	30%	8,23						8,23		
		TRAMO 14:	T1B1 1+206,59 - 1+299,59	T1B2 2+230,46 - 2+137,46	186	19/01/13	#4	34	30%	8,23							8,23	
		TRAMO 15:	T1B1 1+299,59 - 1+850,00	T1B2 2+137,46 - 2+044,00	643	01/02/13	#4	34	30%	28,43								28,43
		TRAMO 16:	-	T1B2 2+044,00 - 1+850,00	194	15/02/13	#4	34	30%	8,58								8,58
ACERO DE LOSA Y MUROS	Sección 1	TRAMO 1:	T1B1 0+000,00 - 0+090,59	91	01/11/12	#4	114	30%	13,49								13,49	
						#6	102	30%	12,07								12,07	
						#8	236	30%	27,92									27,92
	Sección 2	TRAMO 2:	T1B1 0+090,59 - 0+400,00	309	05/02/13	#4	114	30%	45,8							45,8		
						#6	102	30%	40,98							40,98		
						#8	236	30%	94,81							94,81		
	Sección 2	TRAMO 3:	T1B1 0+400,00 - 0+760,59	361	05/02/13	#4	120	30%	56,32							56,32		
						#6	125	30%	58,67						58,67			
						#8	241	30%	113,11						113,11			
	Sección 2	TRAMO 3:	T1B1 0+760,59 - 1+430,59	670	19/02/13	#4	120	30%	104,52							104,52		
						#6	125	30%	108,88						108,88			
						#8	241	30%	209,92						209,92			
	Sección 2	TRAMO 4:	T1B1 1+430,59 - 2+100,59	670	05/03/13	#4	120	30%	104,52								104,52	
						#6	125	30%	108,88						108,88			
						#8	241	30%	209,92						209,92			
	Sección 2	TRAMO 5:	T1B1 2+100,59 - 2+700,00	599	19/03/13	#4	120	30%	93,45							93,45		
						#6	125	30%	97,34						97,34			
						#8	241	30%	187,67						187,67			
	Sección 1	TRAMO 6:	T1B1 2+700,00 - 2+770,59	71	02/04/13	#4	114	30%	10,53								10,53	
						#6	102	30%	9,42							9,42		
						#8	236	30%	21,79						21,79			
	Sección 1	TRAMO 6:	T1B1 2+770,59 - 3+346,46	575	02/04/13	#4	114	30%	85,22								85,22	
						#6	102	30%	76,25							76,25		
						#8	236	30%	176,41						176,41			
Total por mes (kg)										16,46	16,46	20,49	78,17	16,46	417,92	468,56	1181,4	
Total (kg)										2215,92								

Fuente: (PHBI, 2012).

PLANEAMIENTO CONSTRUCTIVO DEL REVESTIMIENTO DEL TÚNEL DE CONDUCCIÓN PRINCIPAL, DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO Balsa Inferior

Mano de obra

En la Figura # 8 se muestra la cantidad de personal requerido para la construcción del revestimiento del túnel de conducción principal

del PHBI. En la izquierda de la tabla se visualiza los diferentes puestos de personal que se requieren y debajo del gráfico de barras se muestra la cantidad por mes que se requiere para realizar las diferentes tareas del revestimiento.

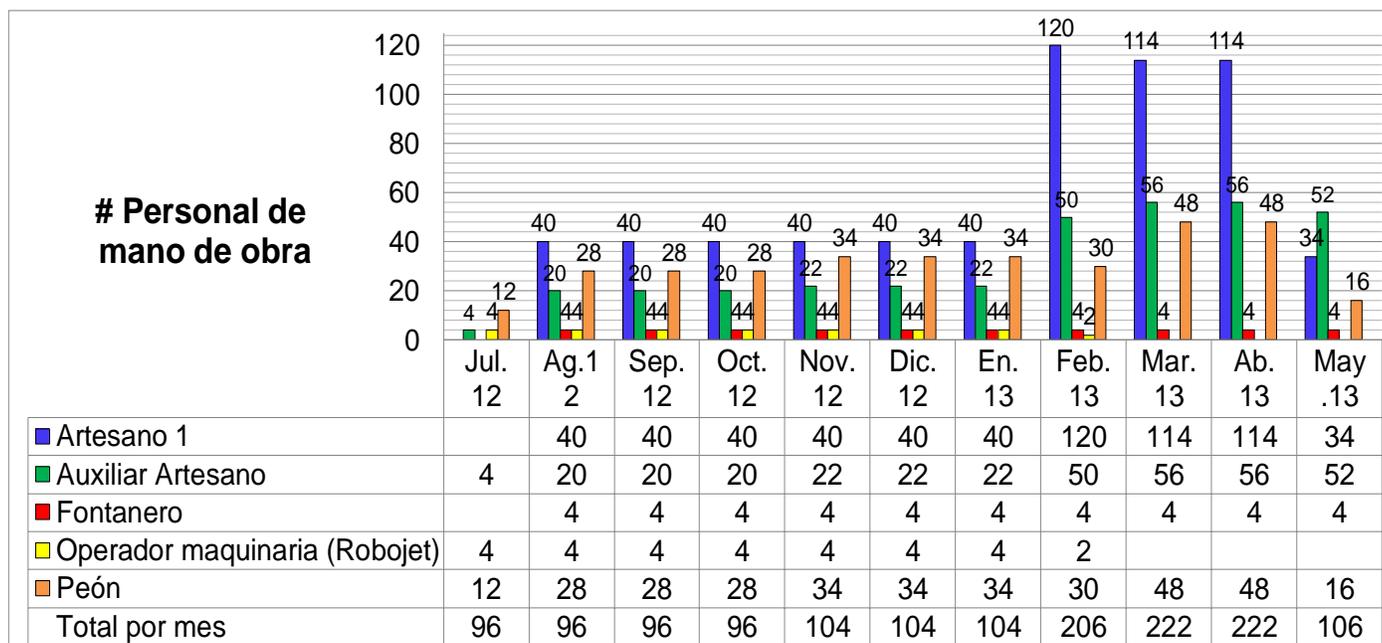


Figura # 8 Requerimiento mensual de mano de obra para las labores del revestimiento. Fuente: (PHBI, 2012).

Requerimiento de automezcladoras

Planta de concreto

En el PHBI existían varios frentes de trabajo como la tubería forzada, el túnel de tubería forzada, el embalse, el pozo entre otros (ver detalle de componentes del proyecto en la Figura # 1). Semanalmente en cada uno de ellos se generaba un requerimiento de concreto fresco para colar las diferentes estructuras que se estaban construyendo. Por ello, era indispensable para la dependencia de la planta de concreto que cada frente de trabajo generara una proyección del requerimiento de concreto que se presentaría en los meses venideros.

En el ejercicio de la presente práctica profesional como complemento al flujo de concreto que se realizó (ver Cuadro # 9), se llevó

acabo un ejercicio para determinar las automezcladoras que requería la planta de concreto para suplir el concreto fresco necesario el pozo y en el FT.

En la Figura # 9 se muestra el ejercicio gráfico que se realizó para determinar la cantidad de mezcladoras que se requerían para colocar 6, 12, 15 y 27 metros cúbicos en el Pozo y 6 y 8 metros cúbicos en el FT.

El análisis detallado de la Figura # 9 se encuentra en la sección de maquinaria del análisis de resultados del presente escrito.

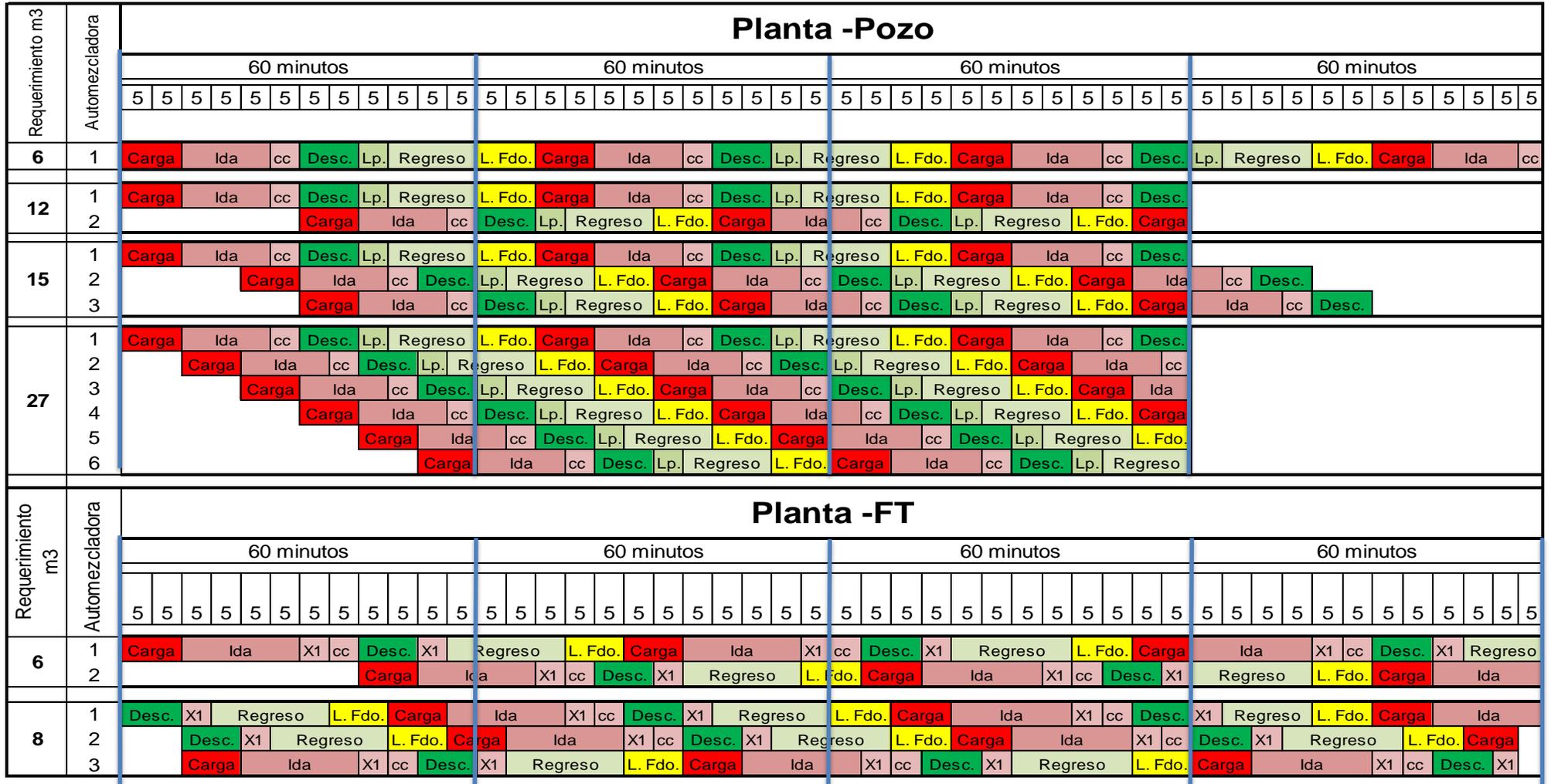


Figura # 9 Ciclos de las automezcladoras- Dependencia de la planta de concreto. Fuente: Autor.

Ciclo de automezcladoras Escenario # 1

Durante el desarrollo de la construcción del revestimiento se prevé un periodo en el cual se va a requerir de concreto fresco para dos actividades que se van a estar realizando de manera simultánea cinco días por bisemana, estas son el colado de la losa de piso y el colado de los muros. La primera actividad se realizará solo 5 días por bisemana mientras que el colado de los muros se realizará de manera continua. El requerimiento para cuando las actividades se realicen simultáneamente será de 27 metros cúbicos por día entre las dos actividades. El concreto fresco (como se explica detalladamente en el plan de obra) debe ingresar por el pozo y ser llevado por automezcladoras hasta el sitio de descarga. Conforme las actividades vayan avanzando el punto de descarga del concreto se irá alejando con respecto al pozo. Es por ello (y por la condición de que solo una vía de tránsito existe en el túnel debido a sus dimensiones) que se requiere de más automezcladoras conforme se vaya concretando el avance de las actividades. En la Figura # 10 se muestra el ciclo de las automezcladoras para el Escenario #1 el cual corresponde al instante en el cual se inicia el periodo del requerimiento de 27 metros cúbicos (es decir, las actividades llevan relativamente poco avance), y el punto de descarga del concreto se encuentra todavía relativamente cerca del pozo, por ello con solo 2 automezcladoras A1 y A2 se concretan 5 descargas de 6 metros cúbicos en una hora, cumpliendo así con el requerimiento establecido.



Figura # 10 Ciclos de automezcladoras escenario # 1.-Dependencia del pozo. Fuente: Autor.

Ciclo de automezcladoras Escenario # 2

En este caso el escenario #2 contempla el caso en el que la tarea de colado de losa esta por finalizar.. Esto implica que la tarea de colado de muros también habra tenido un desarrollo importante y por lo tanto ambos frentes de trabajo se encontraran relativamente alejados del pozo. El requerimiento para esta ocasión sigue siendo el mismo del escenario # 1 con 27 metros cubicos por hora. La única diferencia es que las automezcladoras deberan viajar mas para llegar al sitio de descarga dentro del túnel. Para calcular la cantidad de automezcladoras que se requieren para cumplir con el requerimiento de mezcla se realizo el ejercicio grafico mostrado en la figura # 11. En esta se muestra los tramos por cuales deben viajar las automezcladoras dentro del túnel (1, 2, 3, 4, 5 y 6) para concretar una descarga. Lo que se procura lograr con el diagrama mostrado en la figura # 10 es que se logren realizar 5 descargas de 6 metros cubicos en una hora y con ello suplir las necesidades de concreto a las labores de colado de la losa y los muros. Una vez finalizadas las labores de colado de la losa el requerimiento de concreto será de 15 metros cubicos por hora y por lo tanto se requeriran menos de 4 automezcladoras.

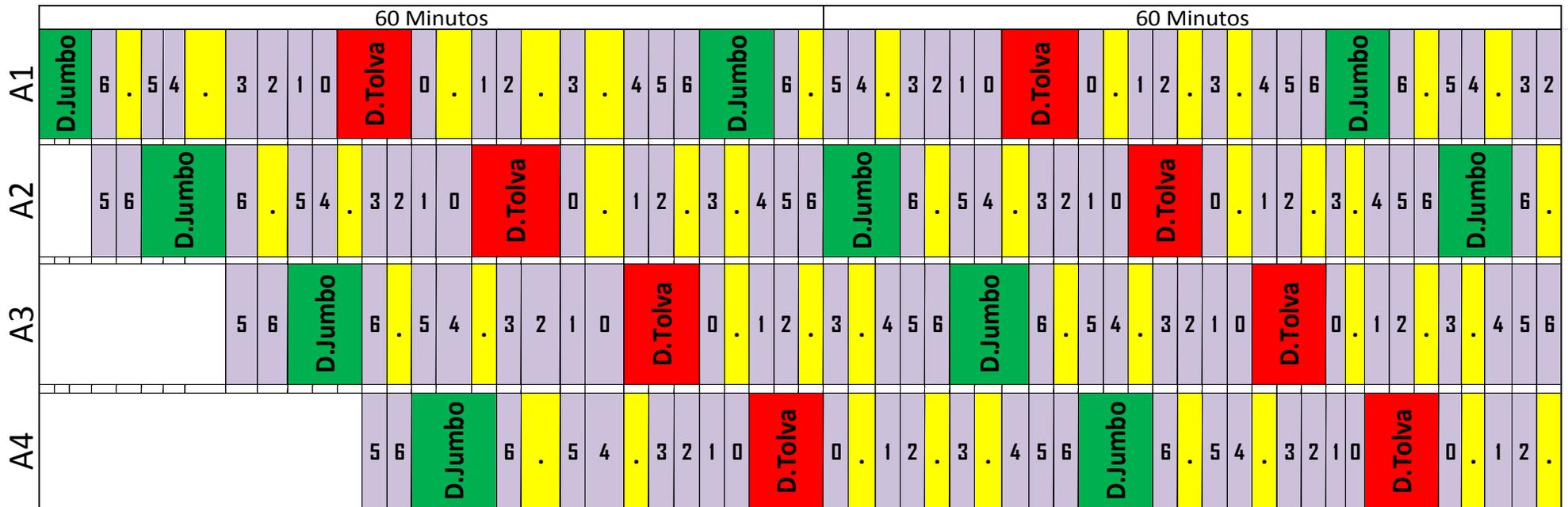


Figura # 11 Ciclos de las automezcladoras escenario #2-Dependencia del pozo. Fuente: Autor

Selección de sistema de encofrado

Los resultados de rendimiento para las tareas de encofrado y desencofrado de los muros de los túneles pantalón y transición de la línea del túnel Desgravador #1 se muestran a continuación en el Cuadro # 11 y en el Cuadro # 12:

Cuadro # 11: Rendimientos de Encofrado obtenidos en los desgravadores:

Lugar	Fecha	Dato	Unidad
Transición 1	12/07/2012	0,533	m ² /hh
Transición 1	13/07/2012	0,260	m ² /hh
Pantalón 1	18/07/2012	0,098	m ² /hh
Transición 1	19/07/2012	0,140	m ² /hh
Transición 1	20/07/2012	0,031	m ² /hh

Fuente: (PHBI, 2012).

Cuadro # 12: Rendimientos de Desencofrado obtenidos en los desgravadores:

Lugar	Fecha	Dato	Unidad
Toma	02/07/2012	1,650	m ² /hh
Toma	03/07/2012	0,734	m ² /hh
Toma	04/07/2012	0,710	m ² /hh
Pantalón 1	14/07/2012	1,185	m ² /hh
Transición 1	14/07/2012	0,434	m ² /hh

Fuente: (PHBI, 2012).

Luego de obtener los datos de campo se procede a realizar el procesamiento estadístico de la información, dando como resultado los siguientes histogramas:

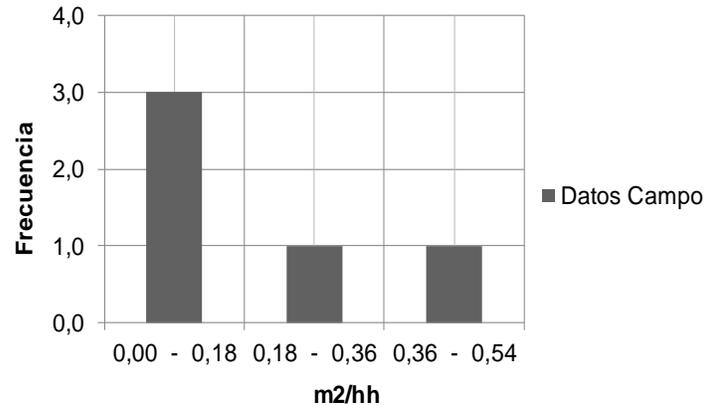


Figura # 12: Histograma de rendimiento de labores de encofrado. Fuente: Autor.

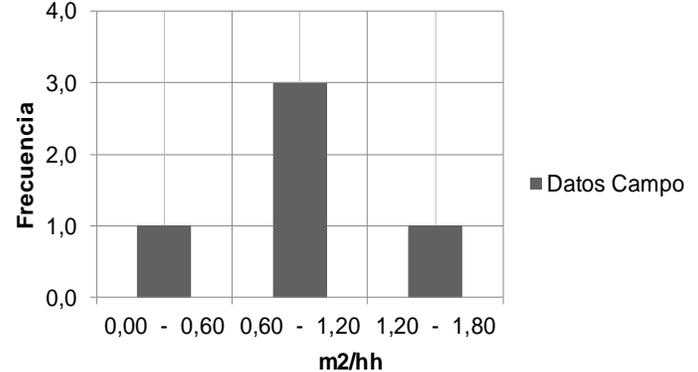


Figura # 13: Histograma de rendimiento de labores de desencofrado. Fuente: Autor.

Ciclos de encofrado

A partir del ciclo de formaleta telescópico utilizado en la construcción de casa de máquinas en el Proyecto Hidroeléctrico Reventazón se proyecta las duraciones de las actividades para las tareas del revestimiento en el túnel del PHBI con la implementación del THF. Los resultados del ejercicio se muestran en el siguiente cuadro:

Cuadro # 13: Duración de la obra civil de los muros del revestimiento del túnel de conducción del PHBI a partir de la utilización del THF.

Datos	Cantidad	Unidad
Longitud del Túnel	3346,46	m
muros	4	m3/m
Longitud de cada colada	25	mL
Volumen de cada colada	100	m3
Caudal bombeado por cada máquina	15	m3/h
Número de líneas de bombeo	1	udd
Duración de cada colada	6,7	hra
Tiempo de fragua	10	hra
Ciclo de formaleta supuesto	6	hra
Factor eficiencia horaria por tiempos de inacción	0,85	-
Eficiencia del proceso	0,95	-
Tiempo total de colada	27,37	hra
Tiempo total de colada	1,14	día
Rendimiento de la actividad	0,05	días/m
Rendimiento de la actividad	21,92	m/día
Duración total de la actividad	153	días

Fuentes: (PHBI, 2012), (PHR, 2011) y Autor.

Por otro lado, se realizó el ejercicio de calcular el ciclo ideal para el encofrado de los muros del revestimiento del túnel de conducción del PHBI por medio de paneles de formaleta de tipo DOKA de 2.7 metros de largo por 0.7 metros de ancho. Se iteró de manera que se obtuviera:

- La longitud ideal de avance diario.
- La cantidad de formaleta requerida.
- El personal requerido para obtener los rendimientos propuestos.

La información en resumen se muestra en el Cuadro # 14. Sin embargo el estudio detallado del ciclo se aprecia en el apéndice Ap4 del presente documento.

Cuadro # 14: Duración de la obra civil de los muros del revestimiento con la utilización de paneles de formaleta tipo DOKA.

Datos	Cantidad	Unidad
Longitud de Ciclo	50,00	m
Encofrado		
Formaleta requerida	6,86	m2/m
Formaleta por Ciclo	343,00	m2
Rendimiento Propuesto	1,10	m2/hh
Duración de Colocación	311,82	hh
Cantidad de Artesanos	9,00	Personas
Tiempo Colocación Real	34,65	Horas
Tiempo de Encofrado	1,5	Días
Colado		
Concreto requerido	4,00	m3/ml
Concreto por ciclo	200,00	m3
Capacidad de bombeo con una línea	15,00	m3/h
Factor eficiencia horaria por tiempos de inacción	0,85	-
Eficiencia del proceso	0,85	-
Tiempo de Colado	18,45	Horas
Tiempo de Colado	1	Días
Fragua		
Tiempo de Fragua	10,00	Horas
Tiempo de Fragua	0,50	Días
Desencofrado		
Formaleta por Ciclo	343,00	m2
Rendimiento Propuesto	2,11	m2/hh
Duración de Desencofrado	162,56	hh
Cantidad de Artesanos	8,00	Personas
Tiempo Desencofrado Real	20,32	Horas
Tiempo de Desencofrado	1	Días
Duración Total del Ciclo	4	Días

Fuentes: (PHBI, 2012), (PHP, 2010) y Autor.

Proceso constructivo de los desgravadores

A continuación se presentan los resultados de los cálculos realizados en la presente práctica profesional, para las labores de la planificación del proceso constructivo de los túneles de los desgravadores, llevada a cabo entre los meses de julio y octubre del presente año.

En el Cuadro # 15 se muestra el requerimiento de concreto para colar la losa de piso, la sección variable del canal de sedimentación, el ochavo y el arranque de muro del desgravador 1. En el Cuadro # 16 se muestra el requerimiento de concreto para colar los muros del túnel desgravador 1. El detalle de los tramos que fueron colados se muestra en la Figura # 26.

Cubicaje de concreto

Cuadro # 15. Requerimiento de concreto para la chorroa de concreto de la losa de piso y arranque de muros.

Tramo	Condición	Distancia (m)	Distancia (m)	Area transversal (m2)	Area media del tramo (m2)	Volumen Tramo (m3)	Volumen factorado (m3)	Valor sobreexcavación
Tramo 1	Inicio	0,00	15,25	7,30	8,35	127,32	140,06	10%
	Fin	15,25		9,40				
Tramo 2	Inicio	15,25	12,00	9,40	10,22	122,69	134,96	
	Fin	27,25		11,05				
Tramo 3	Inicio	27,25	10,75	11,05	11,79	126,73	139,41	
	Fin	38,00		12,53				

Fuente PHBI.

Cuadro # 16. Requerimiento de concreto para la chorroa de los muros.

Tramo	Condición	Distancia (m)	Distancia (m)	Area transversal (m2)	Area media del tramo (m2)	Volumen Tramo (m3)	Volumen factorado (m3)	Valor sobreexcavación
Tramo 1	Inicio	0,00	22,57	5,36	5,37	121,14	133,25	10%
	Fin	22,57		5,38				
Tramo 2	Inicio	22,57	15,43	5,38	5,38	83,08	91,39	
	Fin	38,00		5,39				

Fuente PHBI.

Requerimiento de acero

Se muestra en el requerimiento mensual en rollos de varilla, para la construcción del revestimiento de las distintas obras que componen el sistema de los túneles de los del PHBI.

Cuadro # 17. Requerimiento mensual de acero de refuerzo, revestimiento, desgravadores.

Tramo	Long del tramo (m)	Requerimiento 2012			En rollos de:
		Sep.	Oct.	Nov.	
Pantalón 1	15,0	1	-	-	450 Var. #3
		1	-	-	300 Var. #4
		1	-	-	120 Var. #6
Pantalón 2	15,0	0	-	-	450 Var. #3
		1	-	-	300 Var. #4
		1	-	-	120 Var. #6
Transición 2	15,1	-	0	-	450 Var. #3
		-	1	-	300 Var. #4
		-	4	-	120 Var. #6
Desgravador 2	46,0	-	-	0	450 Var. #3
		-	2	2	300 Var. #4
		-	6	5	120 Var. #6
Canal de Unión	30,0	-	-	0	450 Var. #3
		-	-	1	300 Var. #4
		-	-	7	120 Var. #6

Fuente PHBI, 2012.

Nicho de compuertas

El detalle y requerimiento de las placas de ajuste de las compuertas ubicadas en el pantalón 1 y 2 del sistema que compone los túneles de los desgravadores, se muestra en la Figura # 14 y el Cuadro # 18:

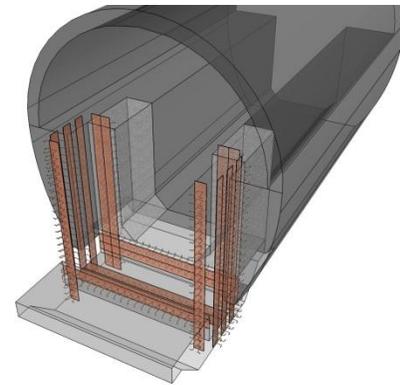


Figura # 14. Esquema de placas de ajuste.

Cuadro # 18. Requerimiento de placas de ajuste.

Elementos a solicitud			
Artículo	Descripción	Cantidad	Unidad
1	Viga Canal 6" x 3,55m largo x 6,35mm de espesor con ganchos @ 15 cm según detalle de planos.	24,00	c/u
2	Viga Canal 6" x 3,20m largo x 6,35mm de espesor con ganchos @ 15 cm según detalle de planos.	10,00	c/u

Fuente PHBI, 2012.

Sistema de entrepiso con viguetas pretensadas

En el Cuadro # 19 se muestra la cantidad requerida de viguetas y bloques para conformar el entrepiso que se posicionará en los muros de las secciones de los túneles de los desgravadores.

Cuadro # 19. Requerimiento de viguetas y bloques para el entrepiso de los desgravadores.

Tramo	#	Artículo	Tipo	Longitud Viguetas	Cantidad Viguetas (ml)	Cantidad Viguetas (unidades)	Cantidad Bloques	Cantidad Tapas
Toma	1	Vigueta	VIG15-0-R	3,80	562,40	148	2873	303
Pantalones	2	Vigueta	VIG15-0-R	2,40	168,00	70	782	131
C.Unión	3	Vigueta	VIG15-0-R	4,95	222,75	45	1034	240
Desgravadore	4	Vigueta	VIG20-A-D	6,33	771,65	122	3711	345
Total						385,0	8400,0	1019,0

Fuente: (PHBI, 2012).

Análisis de resultados

El presente apartado tiene como objetivo interpretar y discutir los resultados de la planificación detallada del revestimiento del túnel de conducción principal.

Elaboración del plan de obra

A continuación se presenta una breve descripción y análisis de los apartados del PO que fueron elaborados a partir de los resultados de la presente práctica.

Dependencias de apoyo

En cada frente de trabajo existen varios departamentos internos que le brindan apoyo a las obras en los temas de abastecimiento de materiales, mantenimiento de equipo, mano de obra, seguridad ocupacional, gestión ambiental, vigilancia, tecnología e información, planeamiento y control. Además hay otras dependencias encargadas de los servicios para el personal de trabajo como nutrición, hospedaje y transportes.

Existen también departamentos externos y comunes entre los proyectos de construcción del ICE como lo son el CSD, Centro de Servicio de Exploración Subterránea (CSES) y centro de apoyo a proyectos (CAP). Estas dependencias brindan apoyo en varias de las etapas de los proyectos ICE. El CSD y el CAP son quizás los que más injerencia tienen en la ejecución de las obras mientras que el CSES participa más que todo en el proceso de planificación.

El diseño de las obras fue ejecutado por el CSD. Este ente fue el facilitador de los planos vigentes aprobados en Julio del año 2012.

Planeamiento constructivo

Según la sección propuesta del revestimiento del túnel se propuso su construcción en 7 fases:

- Fase I: Colocación de concreto lanzado de primera etapa.
- Fase II: Colocación de acero en corona.

- Fase III: Colocación de concreto lanzado de etapa final.
- Fase IV: Colocación de acero de losa de piso y muros.
- Fase V: Colado de losa, ochavo y arranque de muro.
- Fase VI: Colado de muros.
- Fase VII: Colocación de anclajes y drenajes.

La descripción detallada y el proceso constructivo de cada una de estas fases se encuentra en el plan de obra adjunto en Apéndice # 6 del presente documento.

Fases constructivas

El proceso de observación que se realizó en el túnel toma y en los túneles de los desgravadores del PHBI permitió llegar a la conclusión de que el sistema constructivo que ahí se estaba realizando era funcional para el revestimiento del túnel de conducción principal por las siguientes razones:

- Trabajar primero en la construcción del revestimiento de la corona permite que se avancen las obras sin la necesidad de movilizar las instalaciones en el túnel como lo son: tuberías de evacuación de aguas, tuberías de abastecimiento de aire para el equipo de excavación e instalaciones eléctrica ya que se encuentran por debajo de altura a la cual comienza la capa de concreto lanzado.
- Al proponer el armado de acero solo en la corona se garantiza la libertad de paso dentro del túnel, ya que si se colocara acero de la losa se impediría el paso del equipo de llantas utilizado para las labores de excavación y abastecimiento de concreto para las labores de las demás fases del revestimiento.
- La filosofía de diseño de las secciones de los túneles de conducción del PHBI es en síntesis el mismo (a excepción de su escala). Como se muestra en la Figura # 15 se tiene en la corona una capa de concreto lanzado con acero de refuerzo (azul) y en la sección inferior un sistema de concreto reforzado (amarillo). Por lo tanto, utilizar la misma metodología de construcción para las obras del túnel principal sería aprovechar el aprendizaje adquirido por parte del personal

en la obra civil del túnel toma y de los túneles de los desgravadores.

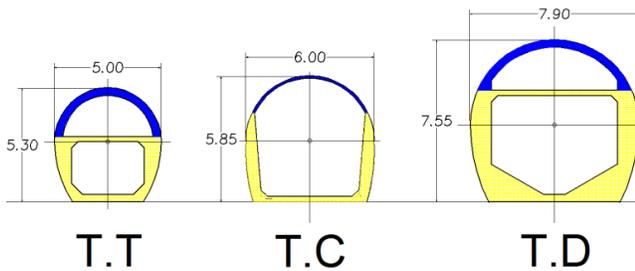


Figura # 15: Comparación de escala entre secciones de los túneles de la conducción del PHBI. Simbología: T.T: Túnel Toma, TC: Túnel de Conducción Principal, T.D: Túnel desgravador. (PHBI, 2012).

Una vez que se tuvo clara la metodología constructiva se procedió a calcular las duraciones de las distintas fases constructivas.

En el Cuadro # 1 se muestra como se determinó la duración para la fase # 1. El rendimiento de colocación de concreto lanzado en corona resulta de un promedio entre los rendimientos de colocación por medio de un Robojet y maquina lanzadora OCMER. Con el primero se coloca generalmente $8 \text{ m}^3/\text{hora}$ y con el segundo $4 \text{ m}^3/\text{hora}$.

El tiempo efectivo de trabajo se subestima con la aplicación del factor de "eficiencia del proceso de lanzado de concreto" debido a que muchas veces el proceso es interrumpido por inconvenientes de diversa índole, que generalmente tienen que ver con problemas de abastecimiento de materiales y averías del equipo. También se castiga el proceso mediante el factor "eficiencia horaria por tiempos de inacción" el cual tiene que ver con los tiempos muertos del personal como lapsos de alimentación y uso del servicio sanitario. La duración que se obtuvo luego del ciclo realizado fue de 14 bisemanas.

En el

Cuadro # 2 se muestra la determinación de la duración de las actividades para la fase del colocación de acero en corona. Se definen dos condiciones para su realización:

- Condición normal: Se refiere al desarrollo de las actividades en simultaneidad con el proceso de excavación.

- Condición post-tope: Se refiere al periodo de la tarea una vez que haya finalizado el proceso de excavación.

Se define un rendimiento de colocación de acero de $15 \text{ kg}/\text{hh}$. Este valor es relativamente bajo pues las labores en la corona del túnel son incómodas y más lentas debido a que el personal se moviliza con mayor precaución ya que son trabajos a casi 4 metros de altura. Según el criterio de los encargados de las obras, un armador de acero puede llegar a colocar hasta $35\text{-}40 \text{ kg}/\text{hh}$ en un revestimiento de túnel debido a que:

- El diámetro de varilla va desde 1,1 cm hasta 3,5 cm (varilla #4 -varilla #11).
- El acero longitudinal se coloca muy rápido pues solamente requiere de ser amarrado a las guías previamente instaladas.
- El acero circunferencial (Aros de acero) ya viene previamente doblado según el detalle de planos.

La duración obtenida para la fase # 2 fue de 13 bisemanas para la condición normal y de 2 bisemanas para la condición post-tope.

En el cuadro # 3 se muestra el cálculo de la duración de la colocación del concreto lanzado de etapa final. La nomenclatura de las condiciones de avance coincide con la utilizada en el cuadro #2. Para este caso se toma el rendimiento general para un Robojet de $8 \text{ m}^3/\text{hora}$. La jornada laboral es igualmente castigada como se hizo con la fase # 1.

En el cuadro # 4 se muestra como para la fase #4 del revestimiento referente a la colocación de de acero de losa de piso y muros se utilizó un rendimiento de $35 \text{ kg}/\text{hh}$. La duración total para la actividad se estimó en 5 bisemanas.

Para la determinación de la duración del colado de la losa de piso (Fase #5) y arranque de muros se tomó en cuenta que se va a utilizar solo una línea de bombeo de concreto tal y como se llevó a cabo en los procesos de revestimiento de los túneles de los desgravadores. La duración para esta actividad es de 2.3 bisemanas.

Para la fase #6, como se menciona en el apartado de metrología, fue necesaria la elaboración de un estudio para determinar el sistema de encofrado a utilizar.

Selección de sistema de encofrado

El ingeniero a cargo de las obras subterráneas ante la evidente necesidad de acortar el plazo de las actividades, había emitido la orden de trabajo del THF desde el mes de mayo del presente año con el fin de contar con él cuando fuera necesario y no hacer esperar las obras del revestimiento.

Sin embargo durante el mes de julio se realizan varios cálculos para el estudio de la selección del sistema de formaleta con el objeto de descartar la posibilidad de encofrar los muros del revestimiento bajo otro sistema. A continuación se presenta en análisis de los mismos.

En el Cuadro # 13 se muestra los parámetros que se tomaron en cuenta para la determinación de la duración de construcción de los muros del revestimiento por medio del THF. El consumo de concreto por metro lineal se calculó a partir del área transversal de los muros y se definió un porcentaje de incremento del 15 % por el concepto de sobre excavación. La duración de las obras se castiga por medio de inacción y eficiencia del proceso.

Se obtiene que la duración para colar los 25 metros de longitud que posee el caballón sería de 27.37 horas. Es decir se obtendría un avance de la tarea de 21.92 metros por día de trabajo.

Para obtener la duración del encofrado por medio de paneles de formaleta se realizó un estudio estadístico de los rendimientos de la colocación de paneles de formaleta en los muros de los túneles pantalón 1 y transición 1 (ver detalle en planta de las obras de los túneles de los desgravadores en la Figura # 26 del anexo).

El tiempo que hubo disponible para realizar las mediciones de rendimiento de encofrado y desencofrado fue limitado pues la urgencia para tomar la decisión sobre si continuar con la fabricación del THF o cancelarla era apremiante en su debido momento. Por ello la muestra de datos se resume a 5 mediciones para las labores de encofrado y desencofrado.

Como se aprecia en el Cuadro # 11 los datos de medición de campo arrojan valores dispersos entre sí, lo que da lugar a un porcentaje de variabilidad del 14.7 % (ver Ap1, Cuadro # 21). Mientras que para el desencofrado se obtuvo un 19.4 % (ver Ap2, Cuadro # 22) de variabilidad. Estos valores ponen en evidencia que las muestras recolectadas no tienen un adecuado nivel de precisión, sin embargo generan una idea

de la magnitud de los rendimientos que a la fecha se estaban obteniendo.

Las mediciones referentes al encofrado proyectan que la mayoría de los datos (60%) se encuentran en el rango inferior de la escala mostrada en la figura # 12, el cual comprende valores entre 0.00-0.18 m²/hh. Por otro lado las mediciones del desencofrado proyectan un rendimiento medio en el rango de 0.60-1.2 m²/hh, ver figura #13. Éste comportamiento señala el rango predominante (dentro de la amplitud de la muestra) de las mediciones.

Gracias a los datos obtenidos y a los procesos observados se puede inferir que a pesar de que la metodología constructiva de las secciones de los túneles de los desgravadores sea en esencia la misma que se utilizará en el túnel de conducción, no sería correcto proyectar las actividades con estos rendimientos obtenidos. Esto porque existen condiciones en los desgravadores que complican la realización de las obras, a continuación se mencionan:

- Las secciones son variables desde el túnel toma hasta la estación 0+000m del túnel de conducción. Notablemente la curva de aprendizaje del personal en este caso sería ineficiente en comparación con la que se espera obtener en las obras civiles del túnel de conducción, donde la sección del revestimiento es constante y los tramos son lineales.
- Otro aspecto que sobresale y permite proyectar un mayor rendimiento de encofrado por hora es el hecho de que los paneles que se utilizarán en el revestimiento de los muros del túnel principal son de mayor dimensión en comparación con el sistema Symons de encofrado que se estuvo utilizando en los desgravadores. El sistema DOKA propuesto por la empresa RENTECO consta de paneles de 2.7 metros de largo por 0.9 metros de ancho los cuales se deben fijar entre sí por una serie de grapas de rápida instalación. El bajo requerimiento de estas grapas (según indicaciones del subcontratista) permitiría la breve instalación del sistema. Más aun cuando se propone movilizar arreglos de hasta 5.4 metros de largo correspondientes a 8 paneles de formaleta, lo cual reduce la cantidad de uniones que hay que hacer para conformar un arreglo de formaleta

correspondiente a los 50 metros de longitud del ciclo de formaleta propuesto.

Se requiere por lo tanto de un rendimiento de encofrado real obtenido en condiciones similares al túnel de conducción principal para proyectar las tareas de encofrado. Ésta condición se presentó entre los años 2009-2010 en la construcción de casa máquinas del PHP donde se emplearon paneles de formaleta tipo EDILPONTE muy similares al sistema propuesto por el contratista (ver detalle del sistema en el plan de obra adjunto). En este lugar se obtuvo un rendimiento de 1.1 m²/hh en el encofrado de unos muros de 5 metros de altura correspondientes a las paredes del recinto.

En el Cuadro # 14 se muestra el ciclo que se definió para la construcción de los muros del túnel a partir del rendimiento de 1.1 m²/hh. Se define una cantidad de personal de modo que la duración del encofrado resultara en múltiplos de 0.5 días para hacer coincidir las casillas en el gráfico que permitió determinar el ciclo de la actividad (ver apéndice Ap4). Cada una de las tareas que conforman la actividad se planificó de manera que siguieran el esquema en múltiplos de medio día. La duración total del ciclo es de 4 días. Sin embargo se estarán realizando 4 ciclos al mismo tiempo de modo que las tareas sean continuas y se logre un avance diario lineal de 50 metros por día a ambas caras del túnel.

Finalmente otro aspecto que se debe tomar en cuenta es que el colado de los muros se realizará a 24 horas por día mientras que en los túneles de los desgravadores se realizó a 12 horas diarias pues la holgura de dicha actividad así lo permitía, esto evidentemente proyectará un mayor rendimiento diario en las tareas del túnel principal.

Si se compara el rendimiento de colado de muros por medio del THF de 21,92 m/día con el de 50 m/día del encofrado por medio de paneles de formaleta, es evidente que la segunda opción es la más conveniente.

Otro aspecto a favor que tenía el sistema de encofrado de paneles de formaleta era el bajo costo que representaba pues el THF estaba valorado en \$ 450000.00, incluyendo costos de fabricación, transporte al sitio y mantenimiento. Su fabricación estaba estimada inicialmente en 8 meses. Por otro lado la propuesta de la empresa RENTECO para el encofrado por medio de paneles es de \$ 20000.00 por mes, es decir \$

50000.00 para el total de la duración de la actividad. Esta diferencia representa un 89% menos con respecto al precio inicial del THF. Queda manifiesto por lo tanto que la segunda opción es más conveniente tanto por el rendimiento proyectado y por el costo de inversión.

Una vez realizado el estudio anterior se hace evidente que es necesaria la orden de cancelación del THF a finales del mes de Julio. Para ésta fecha ya se había comenzado con algunas labores de la fabricación del mismo como lo son: corte de piezas metálicas, acabado y almacenaje de las mismas.

La inversión realizada hasta finales de julio para la fabricación del THF no es dinero perdido, sino más bien es el precio de asegurar el criterio crítico que rige el planeamiento en un proyecto de construcción, en este caso el tiempo en miras a poner en funcionamiento lo antes posible el PHBI.

Programación de las actividades

Una vez definidos los métodos constructivos y las duraciones de las actividades se realiza programación de las mismas bajo las siguientes premisas:

- Parte del revestimiento se debe realizar en conjunto con las labores de la excavación, debido al retraso que presenta actualmente las obras subterráneas.
- A partir de marzo del año 2013 y durante 2.5 meses el ingreso al túnel por el FT se verá restringido por las labores de construcción del canal de entrada del embalse y la ampliación del patio de trabajo y camino aledaños.
- Las actividades que se realicen en serie se deben planificar de manera que las que van detrás nunca alcancen a las actividades delanteras.
- El desarrollo de una actividad nunca deberá impedir la realización de las otras que se realicen simultáneamente.
- El suministro de los materiales para el revestimiento una vez que el acceso al FT esté clausurado se deberá realizar todo por el Pozo.

Se parte de las premisas anteriores para realizar la programación de las actividades. El resultado se visualiza en el diagrama de espacio tiempo mostrado en la

Figura # 6. En este se muestra de manera gráfica como está concebida la logística del proceso.

En el eje de las abscisas se muestra una escala de 0 a 3500 metros correspondiente a la longitud de la línea de túnel. En el eje de las ordenadas se muestra una escala de tiempo en meses. La función de ésta figura es mostrar gráficamente la programación de las actividades de manera que rápidamente se pueda señalar la fecha en la que se estará trabajando para cada estacionamiento del túnel.

Se aprecia como la excavación está proyectada a finalizar el 29 de enero del 2013. Esta tarea se realiza desde dos frentes de trabajo, es por ello que su gráfica posee una pendiente positiva del lado izquierdo y una pendiente negativa del lado derecho, con respecto a la estación del tope de los frentes (1+850.00 m).

Durante la excavación la libertad de tránsito dentro del túnel para el equipo de llantas utilizado en las labores de la excavación es una limitante que se debe tomar en cuenta. Por ello se planeo trabajar en la corona del túnel para el plazo en el que las labores de la excavación no hayan finalizado, bajo las siguientes premisas:

- La fase I se realizará en los fines de semana largos de salida del personal de excavación. De esa manera no se interrumpirá las labores de extracción del material de la excavación con el Robojet que se utiliza para el lanzamiento de concreto.
- La fase II se realizará en simultaneidad con el proceso de excavación, ya que se ideó el uso de andamios de cuerpo que permitan el armado de acero de la corona y el paso de las vagonetas debajo de él. En el plan de obra adjunto al apéndice se muestran imágenes que ilustran éstos procesos.
- La fase III se realizará en coordinación con el proceso de excavación, ya que es una etapa que posee un avance lineal muy alto de 95 metros por día. Por ello basta con aprovechar los tiempos muertos de la excavación para su desarrollo.

Una vez que se ha finalizado la excavación se programa las actividades para construir la

sección inferior del revestimiento. Esto inicia con la colocación de acero de refuerzo a partir de febrero del año 2013. Las labores de colocación de concreto lanzado de sobreexcavación se finalizarán durante el mes de febrero desde los portales del FT, antes que se condene el acceso en dicha zona. Ésta actividad no se puede continuar realizando desde el pozo pues las labores de armado de acero de la losa y muros impedirían el acceso de las automezcladoras que alimentan el Robojet.

Las fases IV, V y VI se realizarán todas en un solo sentido de avance partiendo del pozo y llegando al FT (ver esquema en planta del PHBI en la Figura # 1), es por ello que su representación en el gráfico posee solo una pendiente positiva.

El diagrama de la Figura # 6 es muy útil para el control del avance de las obras, por ello fue presentado en las reuniones de coordinación celebradas bisemanalmente entre los encargados de obra, el jefe de construcción y el director del proyecto.

Recursos

Una vez concluida la planificación de las obras se realiza el cálculo de los recursos requeridos para conocer el costo y magnitud de las obras. Además se realiza el detalle del requerimiento mensual para facilitar la programación de las entregas de materiales por parte de la oficina de construcción del PHBI, los resultados se muestran en el Cuadro # 9, en el Cuadro # 10, en la Figura # 7 y en la Figura # 8.

En el Cuadro # 9 y en la Figura # 7 se muestra como el mayor requerimiento de concreto diario y de maquinaria se presentará en los meses de febrero, marzo y abril del año 2013, periodo durante el cual se estarán realizando las labores de colocación de concreto para la losa, ochavo y muros de la sección del revestimiento. En el cuadro # 11 se muestra el requerimiento de acero para cada mes de trabajo. Se requiere que para finales del mes de febrero del año 2013 todo el acero del revestimiento ya haya sido proveído por la oficina de construcción para evitar atrasos en el suministro del material.

En la Figura # 8 se muestra que en los meses de febrero, marzo y abril del año 2013 se requerirá la mayor cantidad del personal debido a que:

- En el mes de febrero la demanda de artesanos será la más alta pues se estará trabajando en la finalización de la colocación de acero en corona y se iniciará la colocación de acero de losa y muros.
- En los meses de marzo y abril se concentrará el desarrollo de las actividades de las fases IV, V y VI.

A continuación se resume y se analiza la información contenida en el plan de obra con respecto al requerimiento de los recursos.

Maquinaria

En el PHBI se hace uso de equipo alquilado y maquinaria perteneciente al ICE. Los requerimientos para los procesos se muestran en el cuadro # 7. Estos equipos representan los insumos necesarios para llevar a cabo cada una de las tareas del revestimiento.

El requerimiento se realizó a partir de un proceso de observación de la excavación del túnel de conducción principal y el revestimiento de los túneles de los desgravadores, además de todas las tareas asociadas con dichos procesos las cuales se realizan en los talleres y diversas instalaciones provisionales ubicadas en los patios de los distintos frentes de trabajo.

Por ello, es importante señalar que la maquinaria no solo es utilizada para el objetivo que fue creada, sino que también es empleada de manera que supla las necesidades de las tareas en las obras. Estas son muchas veces labores que requieren del ingenio de los encargados de las obras y los trabajadores mismos para dar continuidad a los procesos. Se mencionan a continuación varias de ellas:

- Traslado de materiales con el cargador: varillas, estañones, bombas de agua, cajas de explosivo, etc.
- Uso de cargador como remolque a algunos vehículos que requieren de cierto empuje en tramos del camino donde la pendiente es muy alta y la fricción o la adherencia de las llantas no es suficiente para el tránsito normalizado de los automotores.
- Izaje de personal en canastas mediante cargadores y palas mecánicas.

- Traslado de personas en carretillas remolcadas por minicargadores o retroexcavadoras.

Cuando se requiera colar la losa de piso y los muros, se presentará el mayor requerimiento de automezcladoras. Esto se concluye a partir de los ciclos realizados y mostrados en la Figura # 9, Figura # 10 y Figura # 11.

En la Figura # 9 se muestra una representación gráfica del ciclo o el recorrido que tienen que realizar las automezcladoras para proporcionar concreto a las labores del revestimiento del túnel de conducción principal. La simbología de dicha figura para el caso de la dependencia de la Planta de concreto al Pozo es la siguiente:

- Carga: proceso de llenado de la automezcladora en la planta de concreto.
- Ida: recorrido de la planta de concreto a la zona de la descarga.
- Cc: Proceso de revisión y protocolo por parte de con trol de calidad.
- Desc: Descarga del concreto contenido en la automezcladora dentro de la tolva que luego llevará el concreto a la base del pozo de acceso a los portales del túnel.
- Lp: Limpieza previa de la automezcladora así como el tiempo de maniobra del equipo para dar vuelta y emprender su camino de regreso.
- Regreso: recorrido de la automezcladora desde el sitio del pozo hasta la planta de concreto.
- L. Fdo: Limpieza a fondo que se le realiza a las automezcladoras en la planta de concreto.

Para el caso de la dependencia de la planta al FT, la simbología es la misma a excepción de "x1", la cual representa el recorrido que la automezcladora tiene que hacer dentro del túnel hasta llegar al punto donde se encuentre la tolva dosificadora. Para el caso del pozo esto no sucede pues dentro de él hay otras automezcladoras que reciben el concreto por medio de una tolva que se encarga de recibir la caída libre del concreto.

En la Figura # 10 y en la Figura # 11 se muestran los ciclos que se llevaron a cabo para determinar la cantidad de automezcladoras que se requerían según la demanda de concreto crítica en las

tareas del revestimiento. La simbología en este caso es la siguiente:

- D. Jumbo (verde): Se refiere al tiempo que se tarda en descargar el concreto en el jumbo dosificador en cual abastece las labores de la colocación de concreto.
- D. Tolva (rojo): se refiere a la descarga del concreto desde la tolva que recibe la mezcla en caída libre hasta las automezcladoras, este proceso se lleva a cabo en la base del pozo.
- Los números (1-6 y del 6-1): indican el recorrido que el equipo tiene que realizar dentro del túnel, siendo el 6 en este caso el tramo más alejado con respecto a la entrada al túnel.
- Las casillas de color amarillo: Indican el lapso que tienen que esperar las automezcladoras dentro de túnel en nichos de intercambio para darle espacio a las demás y de esta manera lograr que ellas nunca se interrumpan.

Finalmente, en la Figura # 7 se muestra el requerimiento mensual de automezcladoras que deben de estar dentro del pozo y aquellas que se encargarán de suministrar la mezcla desde la planta de concreto.

Materiales

Acero: Se determinó la cantidad de acero requerida para las labores del revestimiento del túnel principal (ver Cuadro # 8) según los planos vigentes. Luego, se elabora el requerimiento mensual de acero. Con este dato se planifica la cantidad con la que cada frente debe contar al inicio de cada mes (ver Cuadro # 10).

Concreto: El requerimiento teórico total se muestra en el Cuadro # 8. Dichas cantidades de concreto se basan en los planos de las obras e incluyen un porcentaje de sobreexcavación de un 15 %. Este factor se basa en el criterio de experiencia del ingeniero a cargo de las obras, el cual luego de haber visto gran cantidad se chorreas en túneles, notó que el efecto de aumento en el requerimiento de concreto por

efecto de sobre excavación era de un 15% aproximadamente.

En el Cuadro # 9 se muestra el requerimiento diario máximo de concreto y cemento para las labores de colado del revestimiento. Estos datos fueron de utilidad para la dependencia de la planta de concreto pues le permitió iniciar con la planificación de la logística del proceso para cumplir con los requerimientos descritos. Un aspecto a resaltar es que se requerirá la instalación de un nuevo silo de almacenamiento de cemento pues actualmente el que existe en la planta de concreto tiene una capacidad máxima de 230 toneladas de almacenamiento.

A partir del mes de enero del 2013 se requerirá duplicar la capacidad instalada de dicho silo pues se estarán realizando varias coladas simultáneamente con el proceso de excavación. El encargado de la planta de concreto tiene planeado instalar dos silos de 100 toneladas de capacidad y cubrir el faltante con camiones de 20 toneladas de capacidad. El requerimiento para las labores del revestimiento elaborado establece que durante el mes de marzo y abril del año 2013 se requiere de 176 toneladas diarias para cumplir con la demanda.

Otros: Corresponde a todos aquellos materiales o equipos requeridos para realizar las tareas pero que son de menor costo y su requerimiento es mucho mayor. Por su naturaleza son algo complicados de cuantificar. Entre ellos se puede mencionar alambre negro, gazas, cuerdas de alineación, herramientas de obrero, discos de corte entre otros. Para el cálculo del costo de esos insumos se asignará un porcentaje del total de los principales materiales requeridos (acero y concreto) con la finalidad de calcular su costo.

Mano de obra

Por otro lado se realizó el cálculo de mano de obra requerida y su respectivo flujo mensual, como se muestra en la Figura # 8.

Para el cálculo de estos rubros se realizó una observación de los procesos llevados a cabo en la construcción de los túneles de los desgravadores del PHBI. Además se crearon una serie de diagramas esquemáticos de cada una de las tareas para tener una idea más clara de los requerimientos (ver apéndice Ap3).

En el caso de la mano de obra, la mayoría del personal requerido ya había sido contratado para el segundo semestre del presente año para las labores del revestimiento en los túneles de los desgravadores y excavación en los dos frentes de trabajo. El personal extra que se requiera para completar los requerimientos mostrados en la Figura # 8 se contratará durante los primeros meses del año 2013.

Planeamiento y control

Este apartado se realizó en conjunto con el departamento de planeamiento y control del PHBI. A continuación se menciona los puntos que se tomaron en cuenta:

Programación: Se elaboró la programación detallada por estacionamientos de cada una de las actividades del revestimiento con la finalidad de brindar a la oficina de planeamiento y control un plan de trabajo al cual se le pueda ir dando seguimiento cada bisemana.

Registro contable: La oficina de planeamiento y control seleccionó una serie de cuentas dentro catálogo del PHBI, para ir cargando los costos que genera cada actividad diariamente.

Control y seguimiento: La CNFL definió la información a recopilar periódicamente, la forma en la que esta debe ser elaborada y la persona encargada de dicha labor. Esta información se resume en una matriz de comunicaciones.

Control de calidad: El ingeniero a cargo de dicha dependencia elaboró el requerimiento de las pruebas a realizar tomando en cuenta los siguientes aspectos: actividad, prueba a realizar, criterio de aceptación, norma o método de Ensayo y frecuencia.

Seguridad ocupacional

El departamento de seguridad ocupacional elaboró una evaluación del riesgo para la salud e integridad de las personas en cada una de las tareas del revestimiento. La matriz de riesgos y la

información más detallada se muestra en el plan de obra adjunto.

Gestión ambiental

La CNFL es una empresa comprometida con la protección del medio ambiente. Por ello la totalidad de las actividades realizadas en el PHBI son celosamente monitoreadas por el departamento de gestión ambiental del ICE y los delegados de la CNFL. En este apartado del plan de obra se detallan los siguientes puntos: Aguas residuales, derrames de hidrocarburos, manejo de residuos e inspección ambiental.

Costos

Los costos directos e indirectos fueron calculados por el ingeniero a cargo de las obras con el requerimiento de recursos previamente definido en el presente escrito.

Proceso constructivo de los desgravadores

Se definió la información requerida por el técnico de la obra civil de los túneles de los desgravadores.

Cubicaje

La estimación del concreto requerido para las tareas del revestimiento se hizo a partir de la modelación en tres dimensiones de los elementos a construir. Este ejercicio se realizó con la finalidad de facilitar el cálculo del área de las secciones para los tramos donde su disposición era variable.

Luego de obtener las secciones transversales en diversos estacionamientos de los túneles, se hizo una proyección del volumen mediante el ajuste de una recta que permitiera predecir el área transversal en cualquier punto de las obras. En Figura # 16 se muestra el modelo de la zona del túnel transición 1 y el túnel desgravador 1.

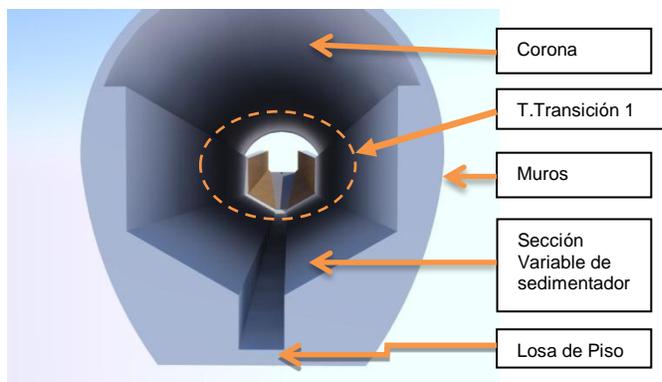


Figura # 16. Modelación del túnel de transición 1 y desgravador 1.

El cubicaje del volumen de concreto requerido a partir de dichos supuestos no toma en cuenta el porcentaje de volumen de sobreexcavación que se presenta en los túneles. Por ello se asignó un 15% como factor de aumento.

A partir de esta premisa se calcula la cantidad de concreto requerido para colar las diferentes secciones del revestimiento, los resultados se muestran en los Cuadro # 15 y Cuadro # 16.

Requerimiento de acero

Al inicio de la construcción de los túneles de los desgravadores los planos constructivos con los que se contaba eran preliminares y el detalle del acero no era el definitivo. Esto causó que el cálculo del tonelaje de acero requerido para el proceso de compra inicial arrojara un valor mucho menor al real. Es por ello que se hace una recalculación del requerimiento para conocer el faltante del material y hacer la solicitud respectiva para terminar las obras de los túneles de los desgravadores.

En el Cuadro # 17 se visualiza el flujo mensual solicitado por la oficina de construcción a mediados de agosto del presente año.

Nicho de compuertas

Se brindó apoyo al técnico de la obra con la elaboración de un modelo en tres dimensiones el cual visualizara claramente los trabajos que debían realizarse. Además se preparó la orden de trabajo para las placas de ajuste del sello de las compuertas (ver Cuadro # 18).

Sistema de entepiso con viguetas pretensadas

La CNFL solicitó al CSD la implementación de una losa monolítica que permitiera el tránsito de las personas por los túneles de los desgravadores, sin embargo por aspectos de tiempo se decide implementar el uso de un sistema prefabricado de entepiso EN/VB ofrecido por Productos de Concreto (PC). Se realizó el cálculo de las viguetas y bloques para el respectivo proceso de cotización.

Se elaboró por lo tanto un cartel de solicitud de compra como requisito para la CNFL. La empresa solicitada retroalimenta la solicitud con una propuesta que incluye:

- Las viguetas de entepiso de diferente tipo y longitud.
- Los bloques de los dos tipos requeridos según fuera el claro a cubrir.
- Los accesorios para evitar que el concreto fluya dentro de los bloques de entepiso una vez que se esté realizando la chorrea.
- Los costos asociados a los materiales y al transporte según las especificaciones incluidas en el cartel realizado.

Conclusiones

La construcción del revestimiento del túnel de conducción del PHBI se realizará en 7 etapas distintas: Colocación de concreto lanzado primera etapa, colocación de acero en corona, colocación de concreto lanzado etapa final, colocación de acero de losa y muros, colado de losa, ochavo y arranque de muro, colado de muros y colocación de anclajes y drenajes.

Las fases constructivas I, II y III se realizarán en simultaneidad con el proceso de excavación del túnel principal para adelantar las tareas y ahorrar tiempo en miras a aminorar el atraso en las obras subterráneas.

Las fases constructivas IV, V, VI y VII se realizarán una vez finalizada la excavación del túnel principal.

Las fases constructivas III, IV, V, VI y VII se harán en un solo sentido de avance (Pozo hacia FT), por las limitaciones de acceso en el FT, debido a los trabajos de ampliación del patio de trabajo en dicha zona.

Se obtuvo que el rendimiento promedio de encofrado en la construcción del túnel pantalón 1 y transición 1 fue de 0.09 m²/hh.

Se obtuvo que el rendimiento promedio de desencofrado en la construcción del túnel pantalón 1 y transición 1 fue de 0.9 m²/hh.

Es más viable la opción de encofrar los muros del revestimiento con un sistema de paneles de formaleta en lugar de utilizar un sistema de formaleta autotransportable (THF) según las siguientes consideraciones:

- El avance diario de diseño propuesto para el THF era de 21.92 m/día. La opción de aumentar este rendimiento de diseño

representa un crecimiento desproporcionado de su costo a tal punto que se vuelve injustificable dicha inversión aunado a que el tiempo de fabricación sería mayor, comprometiendo así la ruta crítica del proyecto. A diferencia, el sistema de encofrado mediante paneles proyecta un avance de 50 metros por día. Con estos valores de rendimiento se pasa de una duración total de 153 días con el THF a 75 días con el sistema de encofrado por medio de paneles de formaleta.

- El costo total del THF era en su momento (Mayo del año 2012) de \$ 450000.00 mientras que el costo por mes de alquiler de formaleta requerida según RENTECO era de \$ 20000.00, es decir \$ 50000.00 para el total de la duración de la actividad. Esta diferencia representa un 89% con respecto al precio inicial del THF.

Con los resultados del estudio de rendimientos obtenidos en los túneles de los desgravadores y la base de datos de proyectos anteriores del ICE, se calculó la duración de las actividades que conforman la construcción del revestimiento. La programación de las tareas se realizó a partir de las duraciones obtenidas y se prevé la finalización de la obra para la tercera semana de mayo del año 2013.

Se requiere de 2188 toneladas de acero y de 30000 metros cúbicos de concreto para la construcción del revestimiento.

Durante el proceso de revestimiento se requerirá de maquinaria y equipo ICE especializado. Se debe por lo tanto informar con la mayor antelación posible los requerimientos de equipo a la dependencia respectiva, pues su disponibilidad debe ser negociada con otros proyectos ICE en ejecución.

Para las actividades simultaneas de colado de concreto de la losa de piso y los muros del revestimiento será necesaria la construcción de una tolva adicional en el patio del pozo para las labores de la descarga del concreto, pues actualmente se cuenta con solo una y presenta averías regularmente. En un proceso crítico para el desarrollo de las obras, no se permite la posibilidad de que una falla en el sistema de conducción de concreto comprometa el abastecimiento de materiales en el frente de trabajo.

Se obtuvo que el requerimiento máximo diario de concreto para las labores se presentará en marzo y abril del año 2013 con un valor de 408 metros cúbicos por día. Esta cantidad de concreto corresponde a 176 toneladas de cemento diarias.

El máximo requerimiento de personal de mano de obra se presentará en febrero del año 2013 y será de 120 personas incluyendo: artesanos, auxiliares de artesano, operadores de maquinaria y peones.

En el mes de febrero del año 2013 se presentará el mayor y último requerimiento de acero con 1181.4 toneladas. La cantidad de acero restante se debió haber entregado antes de dicho mes según el flujo respectivo.

Se definió, con la dependencia de seguridad ocupacional, que las tareas críticas de la construcción del revestimiento son:

- Armado de acero en la corona del túnel a 4 metros de altura
- Colocación de concreto por medio de una manguera de alta presión de 6" de diámetro en andamios colocados en la parte superior de panales de formaleta.

Con dicha información se elaboró una matriz de riesgos ocupacionales para visualizar cuales tareas requieren de un control más frecuente y le indica a los trabajadores en que actividades deben ellos ser mucho más cuidadosos para evitar un accidente.

En conjunto con la oficina de gestión ambiental del ICE del PHBI, se redactaron las cláusulas ambientales que tratan la problemática de los procesos que involucran el manejo de aguas

cementerías residuales, residuos sólidos e hidrocarburos; De manera que los procesos asociados a la construcción de las obras contribuyan con el bienestar del medio ambiente.

Se definió el requerimiento mensual de acero para la construcción del revestimiento de los túneles de los desgravadores para el II semestre del presente año, en cantidad de rollos según el diámetro de varilla requerido. Los resultados se muestran en el Cuadro # 17.

Se definió que la losa y sección variable del sedimentador del túnel desgravador 1 se iba a colar en tres tramos. De longitud de 15.25, 12 y 10.75 metros.

Se definió que los muros del túnel desgravador 1 se iban a colar en dos tramos. De longitud de 22.57 y 15.43 metros.

Se elaboró un modelo en tres dimensiones de las secciones variables de los túneles de los desgravadores, y de la sección de las placas de ajuste de la estructura de compuertas (ver Figura # 14). El mismo se presentó al técnico y trabajadores de la obra con el objetivo de mostrar el trabajo que se debía realizar y aclarar cualquier duda que se presentara.

El tránsito libre para la maquinaria de acarreo de materiales, dentro de un túnel en proceso de revestimiento, es un factor determinante en la planificación de las tareas. En el caso que sea indispensable la realización de las tareas de manera simultánea, se debe adecuar la actividad ajena al proceso de excavación de manera que no se obstruya el claro libre dentro del túnel y que los trabajadores laboren bajo condiciones de seguridad.

La planificación de una obra de grandes dimensiones es un proceso iterativo que requiere del criterio de personas con experiencia como ingenieros, técnicos, supervisores, artesanos entre otros para lograr que la planificación sea lo más realista y eficiente posible.

La logística de excavación y revestimiento a través de un pozo es compleja por las limitaciones de espacio en la base del pozo, el mantenimiento de la maquinaria de izaje, y todas las instalaciones que se deben proveer para la

evacuación de aguas, suplemento de aire y la movilización de personal en caso de emergencia.

dependencias que le brindan servicio a las obras subterráneas del PHBI.

Las actividades que se realizan en un proyecto hidroeléctrico requieren de un soporte de mantenimiento las 24 horas del día. Para prevenir el fallo de una máquina en un proceso vital como la excavación del túnel o el revestimiento. En dado caso, el problema debe ser arreglado lo antes posible, pues un atraso en las labores puede generar pérdidas millonarias o atrasos nefastos para la ruta crítica del proyecto.

La planificación de una obra subterránea de grandes magnitudes debe prever que las condiciones iniciales para las cuales se planificó pueden variar más adelante por varias razones:

- Complicación de las condiciones geológicas.
- Mayor consumo de los materiales que inicialmente fueron presupuestados.
- Entre mayor sea la magnitud de una obra por construir más serán las variables involucradas que se deben de controlar.
- Entre mayor es la inversión de un proyecto, mayores pueden llegar a ser las pérdidas monetarias por una deficiente planificación de las tareas.

Por lo tanto es importante realizar ciertas prácticas que permitan afrontar cambios inminentes en una obra de la mejor manera.

A continuación se mencionan varias de ellas:

- Establecer un flujo de recursos mayor al requerido para suplir debidamente los procesos incluso cuando haya un mayor consumo de los materiales inesperado.
- Según la metodología definida para realizar compras de materiales en una empresa constructora, puede ser conveniente en las cláusulas de un cartel de compra de materiales especificar que una vez concluido el proceso se puede volver a requerir la adquisición (en las mismas condiciones contractuales que se definió la anterior) de los materiales en una cantidad específica (200% por citar un ejemplo).

Se elaboró el Plan de Obra para la construcción del revestimiento del túnel de conducción principal del PHBI con ayuda de las diferentes

Recomendaciones

Se debe planificar las compras y movimientos administrativos con suficiente antelación según su monto, de manera que se pueda concretar su trámite a tiempo con el objetivo de suplir satisfactoriamente los flujos mensuales de requerimiento de recursos de las actividades del revestimiento y de esta manera evitar atrasos por faltante de ellos.

Se recomienda llevar a cabo un control diario detallado a nivel escrito y fotográfico del avance de las obras controlando aspectos como rendimiento de labores, consumo de materiales, imprevistos que se van presentando sobre la marcha entre otros con el objetivo de:

- Generar la información necesaria para realizar informes bisemanales a presentar en la reunión de coordinación celebrada al final de cada bisemana.
- Llevar un control detallado del consumo real de recursos que permita planificar un flujo de insumos para los meses siguientes.
- Corroborar que los trabajos que están siendo realizados sigan los lineamientos descritos en el plan de obra adjunto.

Es importante que durante la ejecución de las obras se lleve un estricto control de la seguridad ocupacional, con el fin velar por el cumplimiento del Plan de Seguridad Ocupacional (PSO) y de señalar las actividades de alto riesgo que hayan sido omitidas en el PSO o simplemente fueron subestimadas en él.

Las reuniones requeridas por la dependencia de seguridad laboral para capacitación del personal, deben de ser tomadas en cuenta con suficiente antelación por el encargado de obra de manera que se incluyan en el cronograma de trabajo y se facilite su coordinación.

Se recomienda según la experiencia adquirida a lo largo de la realización del presente proyecto de graduación que el formato oficial brindado por la Escuela de Ingeniería en Construcción para el informe final de prácticas profesionales dirigidas se adecue al tema y objetivo que el estudiante desarrollará, de modo que si se volviera a realizar un Plan de Obra éste no tenga que aparecer en la sección de Apéndices, ya que esto resta protagonismo al documento que concibe la realización del presente proyecto de graduación.

Es importante que a lo largo de la labores del revestimiento se lleve un control cruzado del plan de obra con miras a señalar los aspectos que éste ha dejado por fuera y aquellos que fueron indispensables haberlos incluido con el objetivo de depurar cada vez más la información que se contiene en los Planes de Obra tanto para el desarrollo de proyectos de la CNFL como para el ICE.

Apéndices

En este capítulo se adjunta información estadística que ayudó a caracterizar los datos de rendimiento utilizados para el estudio de la selección del sistema de encofrado de los muros. Además, se presenta información que se generó en la elaboración del documento para la CNFL. Finalmente se adjunta el plan de obra que se elaboró a partir de la información generada en el presente proyecto de graduación. El detalle del contenido del presente apartado se presenta en el Cuadro # 20.

Cuadro # 20: Índice de apéndice.

Apéndice #1	Datos estadísticos rendimientos de encofrado
Apéndice #2	Datos estadísticos rendimientos de desencofrado
Apéndice #3	Esquema de mano de obra requerida para cada una de las fases del revestimiento
Apéndice #4	Ciclo encofrado de los muros del revestimiento
Apéndice #5	Formulario para obtención de rendimientos
Apéndice #6	Plan de Obra del Revestimeinto para la CNFL

Apéndice # 1

Cuadro # 21: Datos estadísticos de encofrado.

Dato (m2/hra)	Promedio	Desviación estandar	Coefficiente de variabilidad (%)
0,533	0,213	0,031	14,690
0,260			
0,098			
0,140			
0,031			

Fuente: Autor.

Apéndice # 2

Cuadro # 22: Datos estadísticos de desencofrado.

Dato (m2/hra)	Promedio	Desviación estandar	Coefficiente de variabilidad (%)
1,650	0,943	0,183	19,431
0,734			
0,710			
1,185			
0,434			

Fuente: Autor.

Apéndice # 3

A continuación se presentan los esquemas que se realizaron para estudiar la mano de obra requerida para cada una de las fases propuestas para el revestimiento. Se aclara que la cantidad de personal que se visualiza en dichas imágenes no necesariamente coincide con el personal que finalmente se calculó y que se muestra en la Figura # 8.

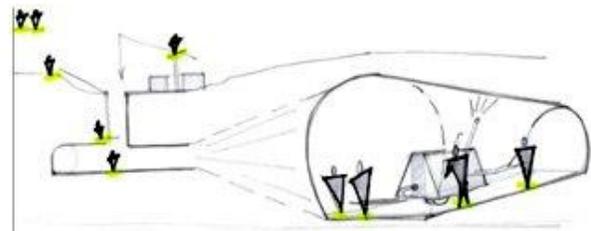


Figura # 17. Mano de obra requerida en fase I del revestimiento.
Fuente: Autor.

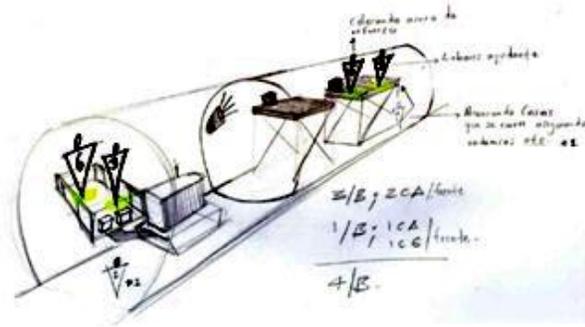


Figura # 18. Mano de obra requerida en fase II del revestimiento. Fuente: Autor.

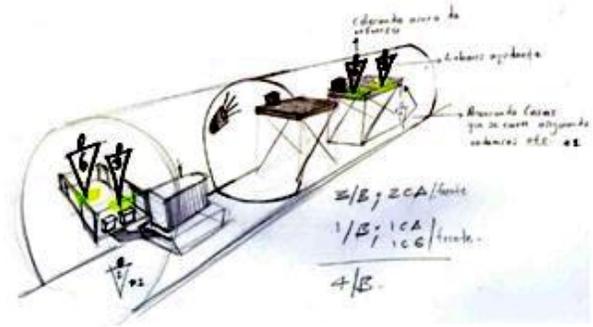


Figura # 22. Mano de obra requerida en fase VI del revestimiento. Fuente: Autor.

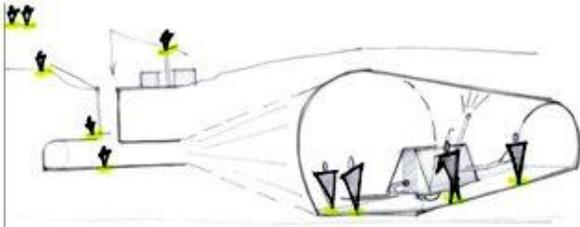


Figura # 19. Mano de obra requerida en fase III del revestimiento. Fuente: Autor.

Apéndice # 4

En la Figura # 23 se adjunta el detalle del ciclo para la construcción de los muros del revestimiento del PHBI.

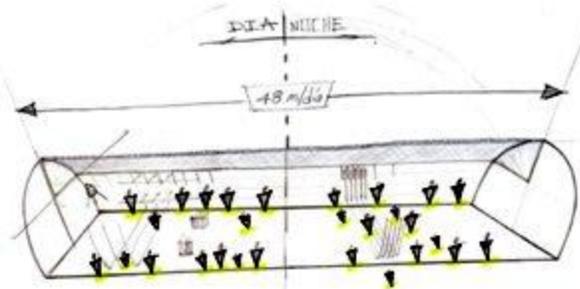


Figura # 20. Mano de obra requerida en fase IV del revestimiento. Fuente: Autor.

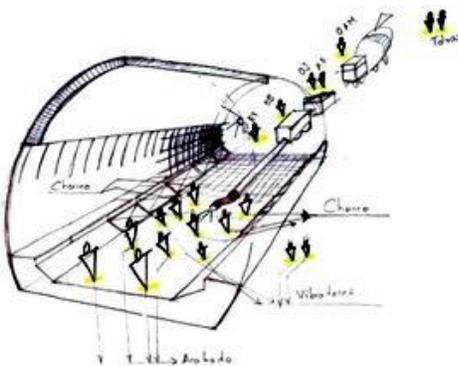


Figura # 21. Mano de obra requerida en fase V del revestimiento. Fuente: Autor.

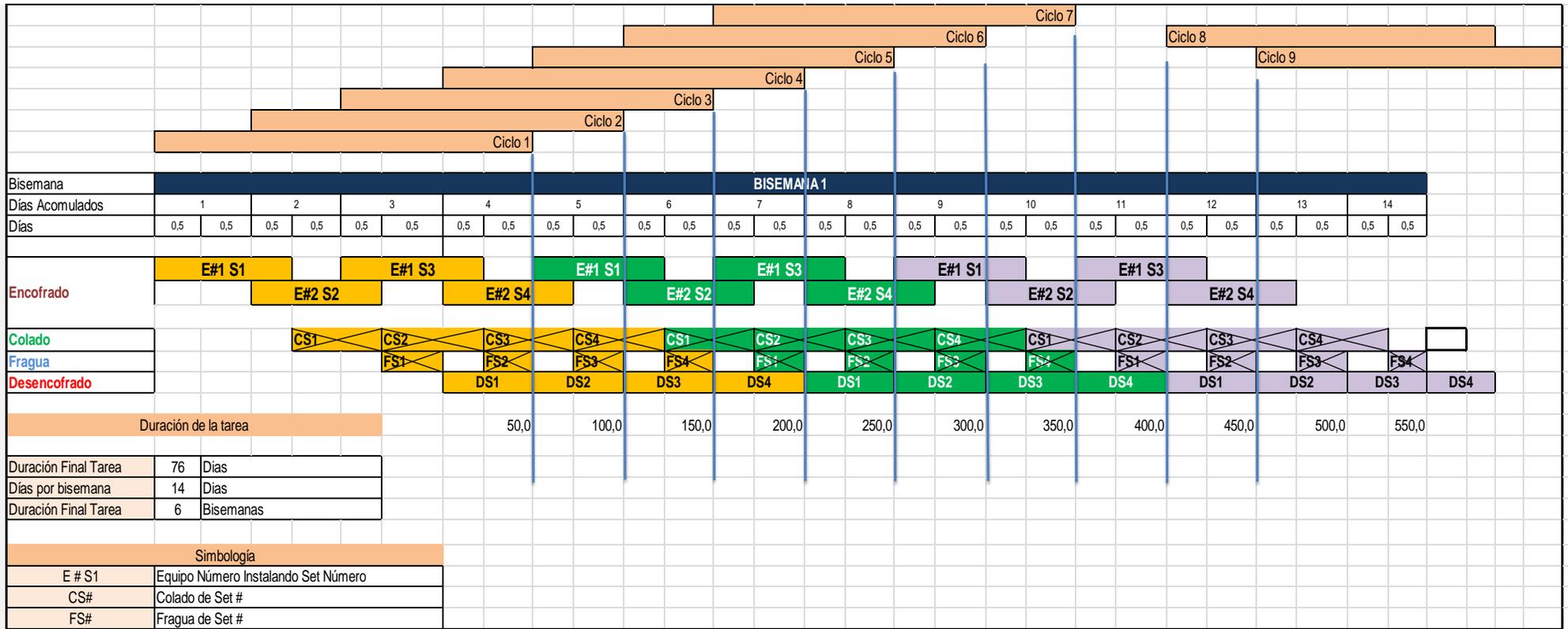


Figura # 23. Ciclo propuesta para el colado de los muros del revestimiento del PBHI. Fuente: Autor

Cada color (amarillo, verde y morado) representa gráficamente la cantidad de recursos requeridos para completar 4 ciclos de desencofrado y con ello garantizar la continuidad del proceso de colado y desencofrado del sistema propuesto. Cada cambio de color indica la reutilización de la formaleta con la que se comienza el ciclo. Estos cambios de color fueron definidos de manera que los ciclos sean totalmente reproducibles unos atrás del otro. Fue de esta manera como se definió el requerimiento de paneles de formaleta correspondientes de a 200 metros de línea de túnel a ambas caras.

Apéndice # 5

Se adjunta el Formulario que se utilizó para la obtención de los rendimientos de las tareas del

revestimiento en la zona de los túneles de los desgravadores.

Rendimientos de Revestimiento en obras de Túneles de Desgravadores			
Fecha:		# Formulario:	
Inspector:		Turno:	
Obra:		Artesanos (c.u):	
Colada	Tarea a evaluar	Unidades	Rendimiento
-	Coloc. Previstas-Pernos	Cant. Total/Tiempo Total Efectivo	
-	Coloc. Pines, Guías y Acero de Corona.	kg/hh	
-	Concreto lanzado	m3/hra	
-	Limpieza de rebote	m3	
1 y 2	Acero de Losa y Muros	kg/hh	
1	Formaleta Ochavo. y T. Richmond	m2/hh	
1	Formaleta Ochavo Variable. y T. Richmond	m2/hh	
1	Colado Losa	m3/hra	
1	Desenclavado y limpieza	m2/hra	
2	Formaleta Muros	m2/hh	
2	Colada Muros	m3/hra	
2	Desenclavado y limpieza	m2/hh	
-	Coloc.de plástico	m/hra	
-	Coloc. e inyección de pernos	Cant. Total/Tiempo Total Efectivo	
3	Coloc. de Viguetas (Incluye Bloques)	Cant. Total/Tiempo Total Efectivo	
3	Coloc. De Puntales	m2/hra	
3	Coloc. de Malla Elect	m2/hra	
3	Chorrea de Completamiento (Sobrelosa)	m3/hra	
-	Desenclavado y limpieza final	m2/hra	
Tiempo Improductivo			
	Actividad	Causa Tiempo Improductivo	Tiempo
Nota			
<p>Todos los tiempos asociados a los rendimientos anotados en este formulario se asumen como efectivos. Cuando exista un tiempo improductivo en un proceso, se debe especificar la causa que lo generó y la duración del mismo para la respectiva tarea. En dado caso, se deberá realizar el cálculo correspondiente para reflejar un rendimiento efectivo.</p>			

Figura # 24. Formulario para la obtención de rendimientos. Fuente: Autor.

Apéndice # 6

Se adjunta a este apéndice el plan de obra que se elaboró para la CNFL.

Anexos

Se muestra en este apartado imágenes y fotografías explicativas con el objetivo de ilustrar los diferentes escenarios y detalles que dan lugar

al presente ejercicio de práctica profesional dirigida.



Figura # 25. Túnel de conducción Principal del PHBI en etapa preliminar al revestimiento. (PHBI, 2012).

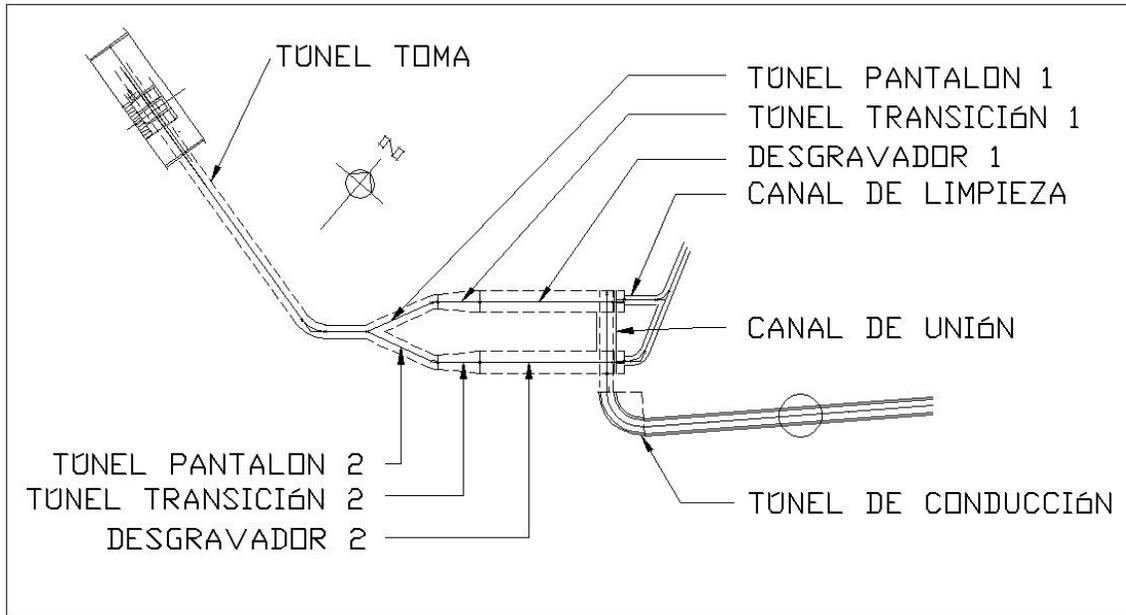


Figura # 26. Esquema de las obras de los túneles de los desgravadores. (PHBI, 2012).

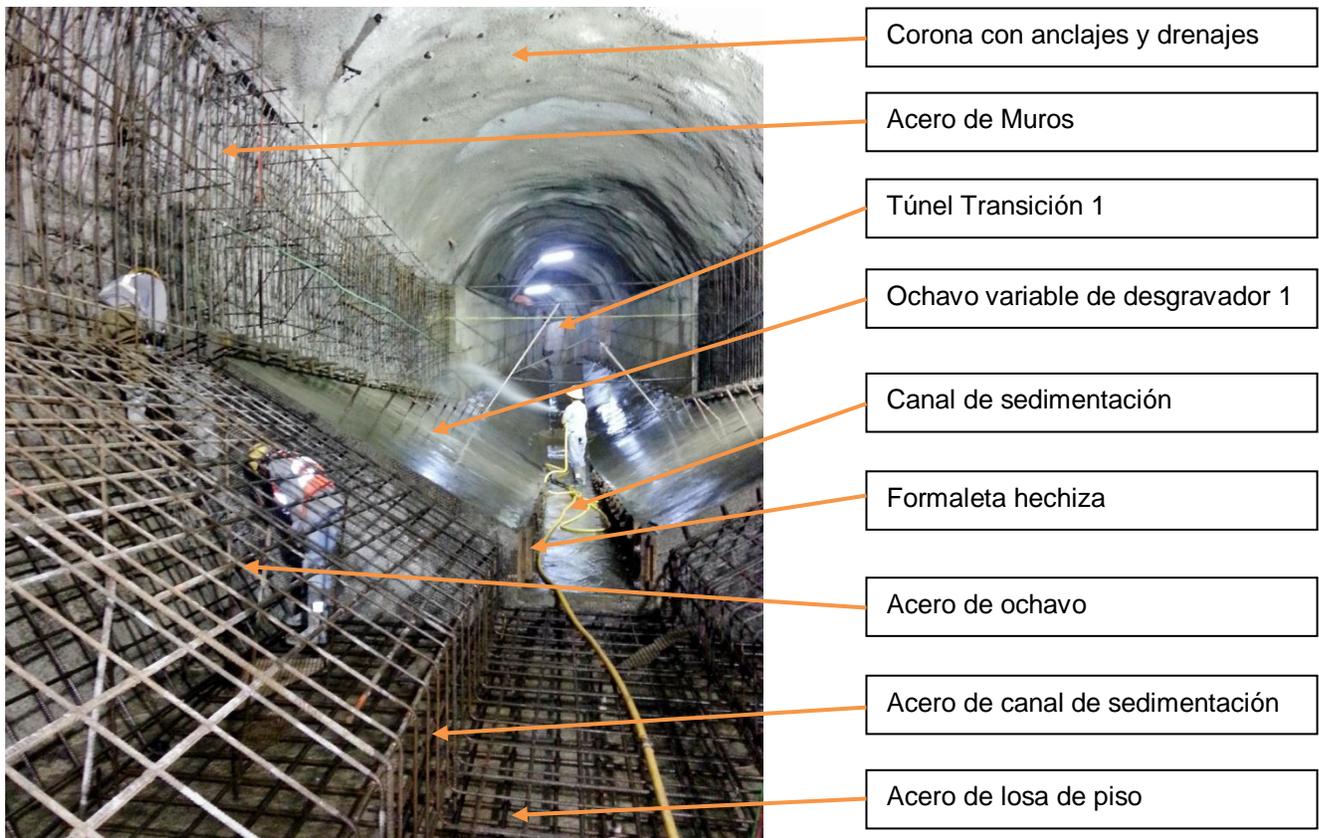


Figura # 27. Obras en construcción del túnel del desgravador 1. (PHBI, 2012).



Figura # 28. Colado de muros del túnel del desgravador 1. (PHBI, 2012).



Figura # 29. Obras del túnel del desgravador 1 cerca de su finalización. (PHBI, 2012).



Figura # 30. Proceso de excavación bajo en el método manual. (PHBI, 2012).



Figura # 31. Proceso de perforación del frente con el método de perforación y voladura (convencional). (PHBI, 2012).

Referencias

- Universidad del País Vasco. (- de - de 2012). Recuperado el 5 de Octubre de 2012, de Universidad del País Vasco: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/unidades/unidades/unidades.htm>
- Amador, I. (2010). *Plan de Gestión para la Normalización de los Laboratorios de Control de Calidad*. Tesis de Grado, Universidad para la Cooperación Internacional, San Jose, 104.
- Arancibia, F. (- de - de 2011). *Construcción de Túneles*. Recuperado el 7 de Octubre de 2012, de Ingeniería y Construcción: <http://facingyconst.blogspot.com/2011/02/construccion-de-tuneles.html>
- Blanco, F. (- de Diciembre de 2003). *Rincon de la ciencia*. Recuperado el 14 de Septiembre de 2012, de Rincon de la ciencia: <http://centros5.pntic.mec.es/ies.victoria.kent/Rincon-C/Curiosid/Rc-63/Rc-63b.htm>
- Chaverri, A. (2011). Encofrados. *Curso CO-5023 Construcción de estructuras temporales* (pág. 30). Cartago: TEC.
- CICA. (- de - de 2012). *Centrales Hidroeléctricas*. Recuperado el 6 de Octubre de 2012, de Centrales Hidroeléctricas: <http://thales.cica.es/rd/Recursos/rd99/ed99-0226-01/capitulo3.html#1>
- EIA. (- de - de 2012). *Acueductos Antiguos*. Recuperado el 5 de Octubre de 2012, de Acueductos Antiguos: http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/historia/acueductos_antiguos/Edad%20moderna.htm
- Gonzales, J. (- de - de 2012). *Fieras de la ingeniería*. Recuperado el 8 de Octubre de 2012, de Fieras de la ingeniería: <http://www.fierasdelaingenieria.com/metodos-de-excavacion-de-tuneles-mediante-perforacion-y-voladura/>
- Govisitcostarica. (- de - de 2012). *Govisitcostarica*. Recuperado el 14 de Septiembre de 2012, de Govisitcostarica: <http://www.govisitcostarica.co.cr/travellnfo/climate.asp>
- Grupoice. (3 de Mayo de 2012). *Grupoice*. Recuperado el 19 de Agosto de 2012, de Grupoice: http://www.grupoice.com/wps/portal/gice/acerca_ice/acerca_ice_así_somos/acerca_ice_así_somos_historia!/ut/p/c5/04_SB8K8xLLM9MSSzPy8xBz9CP0os_gQL0N_D2cLEwN_Vy8XA08zY09TUzNTi1Bnl6B8JC55gwBjE5J0GwRYugLIXX0tg8xcDQwMiNJtgAM4GhDQ7eeRn5uqX5AbGhpR7qglAPkP--s!/dl3
- Horizontes. (- de - de 2012). *Horizontes*. Recuperado el 14 de Septiembre de 2012, de Horizontes: <http://www.horizontes.com/geography>
- Maccaferri. (2010). *Sistemas para infraestructura vial, necesidades y soluciones*. Brasil: Maccaferri.
- Namiburich. (- de - de 2012). *Sistemas de encofrados*. Recuperado el 10 de Octubre de 2012, de Buenastareas: <http://www.buenastareas.com/ensayos/Sistemas-De-Encofrados/894395.html>
- PHBI. (2012). *Información de Proyecto*. Alajuela.
- PHP. (2010). *Información del proyecto*. Zona de Los Santos.

PHR. (2011). *Información del Proyecto*. Siquirres.

Recio, J. (- de - de 2012). *INTEF*. Recuperado el 5 de Octubre de 2012, de INTEF: http://newton.cnice.mec.es/materiales_didacticos/energia/no_renovables.htm?4&2%20%20%28intef,%202012%29%20%20%20http://recursostic.educacion.es/newton/web/

Schanzer, R. (_ de _ de 2012). *Facultad de humanidades y artes*. Recuperado el 28 de Octubre de 2012, de Facultad de humanidades y artes: http://www.fhumyar.unr.edu.ar/escuelas/3/materiales%20de%20catedras/trabajo%20de%20campo/marco_teorico.htm

Talledo, M. (2008). *Fundamentos para la dirección de proyectos*. Pennsylvania: Project Management Institute.

Tecnun. (2012). *Ciencias de la tierra y el medio ambiente*. España: Universidad de Navarra.

Valerín, P. (2007). Estandarización para el cierre de Obras Subterráneas. (pág. 150). San Jose: UCI.

Villalta, H. (2009). *Estadística Descriptiva Unidad II*. Cartago: ITCR.

Vivas, J., Zubizarreta, M., Núñez, R., & Lanz, L. (- de Octubre de 2011). *Revestimiento de túneles*. Recuperado el 8 de Octubre de 2012, de Scribd: <http://es.scribd.com/doc/77177001/29/REVESTIMIENTO-DE-TUNELES>

Zimmerman, A. (- de - de 2012). *Aboutphysics*. Recuperado el 5 de Octubre de 2012, de Aboutphysics: <http://physics.about.com/od/glossary/g/energy.htm>