



## Hydroelectric Power Plant Renace II Project

**Manuel de Cabo**, Subterra Ingeniería, Madrid, España

**Antonio Alonso**, Proacon, Madrid, España

**José Luís Orgaz**, Cobra, Madrid, España

RESUMEN: El Proyecto Hidroeléctrico Renace II, ubicado en el municipio de San Pedro Carchá, departamento de Alta Verapaz, Guatemala, se encuentra situado inmediatamente aguas abajo de la Casa de Máquinas de Renace I, construida y en funcionamiento desde abril de 2004, constituyendo el segundo de los tres elementos previstos de la cascada del aprovechamiento del Río Cahabón.

Dicho proyecto engloba la construcción de dos túneles, denominados Túnel 1 y Túnel 2. El túnel 1 posee unos 3,5 km de longitud y comunica la obra de toma con el desarenador, mientras que el túnel 2 posee 3,9 km y se proyectó en sustitución del canal de conducción presente en el diseño inicial.

### 1 DISEÑO GEOMÉTRICO DE LOS TÚNELES

El trazado horizontal de ambos túneles ha sido diseñado en base a los siguientes criterios: disminución máxima de la intersección o afección con las dolinas presentes en el área de implantación, minimización de la afección sobre el túnel de las fallas presentes en el área de implantación y minimización de la longitud del trazado. En cuanto al trazado en alzado posee una limitación de la pendiente máxima del túnel al 12%, con objeto de facilitar las labores de construcción del mismo, así como una dotación de cobertera suficiente para no suponer un condicionante sobre la estabilidad de la excavación.

El túnel 1 tendrá una longitud de 3.418,96 m, desde la progresiva 0+021,90 a la 3+440,86. Con objeto de acelerar al máximo las labores de construcción del túnel se contempló la construcción de un acceso intermedio o Adit, con una longitud de 427 metros y pendiente del -12.13%, que interseca al túnel 1 en el P.K. 2+044,45.

La sección útil del túnel 1 se encuentra constituida por una geometría en baúl de 5,7 m de ancho y alto, disponiendo, por tanto, de una sección útil de 29m<sup>2</sup>. Respecto al Adit, para su definición ha predominado la generación de una geometría que facilite el proceso constructivo, así se ha adoptado una sección en baúl de 6,5 m de anchura.

El túnel 2 tendrá una longitud de 3.900,27 m, desde la progresiva 0+000,00 a la 3+900,27. Se proyectó la construcción de tres accesos intermedios o Adit, denominados consecutivamente Adit 1, 2 y 3, aunque finalmente se desestimó la ejecución del Adit 1. El Adit 2 posee una longitud de 286,70 metros, con una pendiente de -11,97%, intersecando al túnel en el P.K. 1+848,81, mientras que el Adit 3 posee una longitud de 277 metros,

con una pendiente de -12,95%, intersecando al túnel en el P.K. 3+270,27.

Se han diseñado tres secciones geométricas distintas, en función de las presiones hidráulicas que debe soportar el revestimiento del túnel 2 y del recubrimiento del mismo. Se diferencian dos secciones tipo con revestimiento de concreto reforzado, de 25 y 30 cm de espesor respectivamente. La sección libre está constituida por un arco de 2,30 metros de radio y hastiales rectos a los que se redondearán en su parte inferior. La sección de excavación se encuentra constituida por arcos de media circunferencia de 2,55 y 2,60 metros de radio rematados mediante hastiales verticales. La anchura libre en el piso oscila entre 5,10 y 5,20 metros. La tercera sección tipo posee un revestimiento de blindaje de acero, con una sección útil en forma de circunferencia de 3,40 metros de diámetro. La excavación tendrá una sección en herradura con un radio de 1,85 metros y un ancho de base útil de 3,68 metros, con objeto de permitir el movimiento de los equipos de excavación. Los Adit del túnel 2 poseen la misma geometría que el del túnel 1.

### 2 DATOS GEOLÓGICOS

Desde el punto de vista geológico, el proyecto se sitúa en la denominada Cordillera Central de Guatemala, que constituye una de las cuatro provincias geológicas principales en que se divide Guatemala. Dicha cordillera, que forma parte del sistema de cordilleras que se extienden desde México hasta las Islas de la Bahía en Honduras, se caracteriza por ser un área de pliegues y cabalgamientos que afectan a rocas sedimentarias cretácicas de naturaleza calcárea, denominadas Formación Cobán.

### 2.1 Estratigrafía

Esta formación ocupa una gran extensión y está constituida por una gruesa secuencia de calizas, dolomías y evaporitas (anhidritas), del Cretácico. Esta secuencia puede dividirse en dos miembros, el Miembro dolomítico inferior y el Miembro de caliza superior. Concretamente, el área de estudio se ubica en el denominado Miembro Superior, formado por un macizo de caliza masiva con algunas intercalaciones de dolomías y brechas que pueden llegar a los 20 cm de tamaño, afectado por un proceso kárstico de gran desarrollo. Recubriendo la formación rocosa pueden reconocerse depósitos de naturaleza aluvial asociados al Río Cahabón, constituidos por cantos rodados englobados en una escasa matriz de naturaleza arenosa, así como depósitos coluvio-eluviales producto de la alteración del propio sustrato rocoso, formados por arcillas de descalcificación de color marrón rojizo, englobando fragmentos del sustrato rocoso de naturaleza calcárea.

### 2.2 Tectónica y sismicidad

Teniendo en cuenta la tectónica, basándose en el mapeo de detalle realizado y en la revisión de imágenes satelitales, se reconocieron en el área una importante red de fallas y fracturas que se agrupan en tres sistemas principales, acordes con la estructura regional, con las siguientes orientaciones. Un primer sistema, ampliamente representado, de orientación NNO – SSE a NO – SE. Un segundo sistema con orientación NE – SO. Y un tercer sistema, con menor representación y dirección media E – O, cuya orientación varía a lo largo del área estudiada. En relación a la sismicidad el proyecto, de acuerdo a las Normas Estructurales de AGIES NR-2:2000, se ubica en la zona 3, según el mapa de macrozonificación sísmica de Guatemala, considerándose adecuada una aceleración sísmica básica máxima de 0,35g a nivel de basamento rocoso, correspondiente a un periodo de retorno de 475 años.

### 2.3 Hidrogeología y karstificación

Dentro de las condiciones hidrogeológicas, destaca un sistema acuífero formado por calizas y dolomías con extensas áreas de circulación kárstica, lo que hace que muestre complejos sistemas de circulación subterránea asociados a grandes cavernas y fracturas, con los niveles de agua subterránea normalmente profundos y muy variados.

La geomorfología de la zona destaca por su típica topografía kárstica. Esta litología, unida a las condiciones climáticas de la región y a los procesos erosivos, ha permitido el desarrollo de formas específicas, como torres kársticas, cuevas, cenotes, siguanes, mogotes, sistemas de cuevas y ríos subterráneos, que tienen su origen en los sistemas de pliegues y fallas existentes. Aproximadamente el 80% del área de estudio presenta un karst de tipo

cónico, mientras que el restante es de tipo torres. Este relieve kárstico ocasiona una baja densidad de drenaje fluvial, con la pérdida total de drenaje superficial. Por otra parte, el endokarst en el interior del macizo rocoso es prácticamente desconocido, sin embargo, existe la presencia de cavidades y cavernas métricas a decamétricas, como ha podido observarse en los resultados del reconocimiento geofísico realizado en la zona, y posteriormente comprobarse en la propia excavación de los túneles.

## 3 DATOS GEOMECAÑICOS

Para la elaboración del estudio geotécnico se realizó una importante campaña de investigación geotécnica y a partir de la cartografía geológica efectuada, a base de prospección geofísica, sondeos, y ensayos; cuya información se completó con la toma de datos estructurales del macizo rocoso. Las prospecciones de campo han consistido en lo siguiente:

7 sondeos a rotación, cuatro en el túnel 1 y tres en el túnel 2, que totalizan 477,5 metros lineales de perforación (313,5 metros en el túnel 1 y 164 metros en el túnel 2). Para el estudio de permeabilidad se realizaron 15 ensayos Lugeon y 2 ensayos Lefranc.

4 perfiles de tomografía eléctrica, dos de ellos en cada túnel, alcanzándose una longitud total investigada de 4.780 metros lineales.

12 perfiles de tomografía sísmica de refracción, con una longitud aproximada de 1.240 metros lineales.

Tomando como base la cartografía geológico-geotécnica llevada a cabo en la zona, así como la información obtenida de los perfiles eléctricos, se realizaron dos perfiles geológico-geotécnicos del Túnel 1 y Túnel 2. Un extracto de los mismos, en sus puntos más singulares, se muestra en la Figura 1.

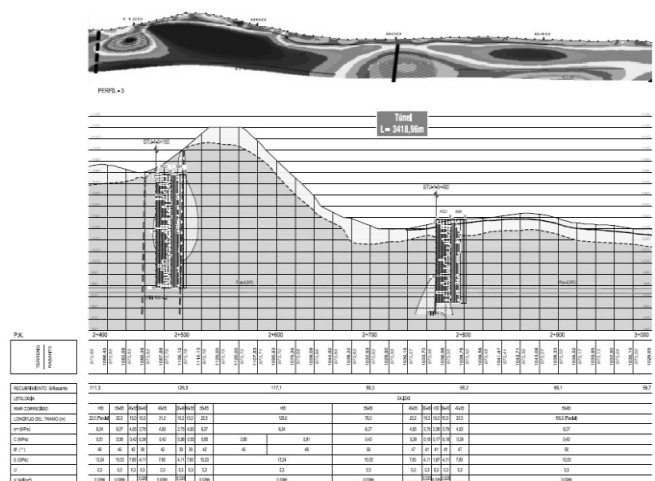


Figura 1. Segmento del perfil geológico-geotécnico del Túnel 1.

Una vez obtenidos los resultados de los ensayos de laboratorio, se realizó un análisis pormenorizado de los mismos, para, finalmente, establecer modelos constitutivos acordes al tipo de terreno, que proporcionan sus parámetros resistentes y deformacionales. Como resultado de la caracterización de la roca intacta se obtuvieron los parámetros que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros a nivel de roca intacta de la Formación Cobán.

Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	$\sigma_{ci}$ (MPa)	Ei (MPa)	C. Poisson (v)	mi
2,66	40	35.000	0.30	10

En la Tabla 2 se resumen los módulos elásticos para cada una de las secciones tipo, calculados a partir del valor de Ei estimado anteriormente, teniendo en cuenta la correlación de Bieniawski-Galera (1995).

Tabla 2. Módulos elásticos calculados para el macizo rocoso.

Secciones Tipo	Em (MPa)
ST-1 (RMR= 65)	13.238
ST-1 (RMR= 55)	10.028
ST-1 (RMR= 45)	7.596
ST-1 (RMR= 35)	4.110
ST-1 (RMR= 25)	1.868

Por último, los parámetros resistentes para las discontinuidades se incluyen en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros resistentes de las discontinuidades.

Propiedades de las discontinuidades	c (MPa)	$\phi^\circ$
Macizo rocoso sano	0,08	42
Macizo rocoso alterado	0,01	32

#### 4 SECCIONES TIPO DE SOSTENIMIENTO

En la Tabla 4 se muestran las secciones tipo de sostenimiento, establecidas para cada una de las excavaciones subterráneas proyectadas.

Tabla 4. Secciones tipo de Sostenimiento de los Túneles 1, 2 y Accesos Intermedios del Proyecto Hidroeléctrico Renace II.

Sección Tipo	Ámbito de aplicación RMR corregido	Sostenimiento
Túnel	>65	Sellado: 3 cm concreto lanzado C25/30 reforzado con fibras. Pernos 160 kN 16 l=1,8 m. Puntuales
	II 55-65	Sellado: 3 cm concreto lanzado C25/30 reforzado con fibras. Pernos 160 kN l=1,8 m. espaciados 2,0 m (L) x 2,0 m (T)
	III 40-55	Sellado: 3 cm concreto lanzado C25/30 reforzado con fibras. Sostenimiento: 3 cm concreto lanzado C25/30 reforzado con fibras. Pernos 160 kN l=1,8 m. espaciados 2,0 m (L) x 1,5 m (T)

Túnel Camisa	IV 30-40	Sellado: 3 cm concreto lanzado C25/30 reforzado con fibras. Sostenimiento: 10 cm concreto lanzado C25/30 reforzado con fibras. marcos reticulados espaciadas 1,5 m longitudinalmente
	V <30	Sellado: 3 cm concreto lanzado C25/30 reforzado con fibras. Sostenimiento: 12 cm concreto lanzado C25/30 reforzado con fibras. Marcos reticulados espaciados 1,0 m longitudinalmente
	I >55	Sellado: 3 cm concreto lanzado C25/30 reforzado con fibras. Pernos 160 kN l=1,8 m. espaciados 2,0 m (L) x 2,0 m (T)
ADITS	II 40-55	Sellado: 3 cm concreto lanzado C25/30 reforzado con fibras. Sostenimiento: 3 cm concreto lanzado C25/30 reforzado con fibras. Pernos 160 kN l=1,8 m. espaciados 2,0 m (L) x 1,5 m (T)
	III <40	Sellado: 3 cm concreto lanzado C25/30 reforzado con fibras. Sostenimiento: 12 cm concreto lanzado C25/30 reforzado con fibras. Marcos reticulados espaciados 1,0 m longitudinalmente
	I >65	Sellado: 5 cm concreto lanzado C25/30 reforzado con fibras. Pernos 160 kN l=4.0 m. puntuales
ADITS	Ib 50-65	Sellado: 5 cm concreto lanzado C25/30 reforzado con fibras. Sostenimiento: 3 cm concreto lanzado C25/30 reforzado con fibras. Pernos 160 kN l=4.0 m. espaciados 2,0 m (L) x 2,5 m (T)
	II 35-50	Sellado: 5 cm concreto lanzado C25/30 reforzado con fibras. Sostenimiento: 5 cm concreto lanzado C25/30 reforzado con fibras. Pernos 160 kN l=4,0 m. espaciados 1,5 m (L) x 2,0 m (T)
	III <35	Sellado: 3 cm concreto lanzado C25/30 reforzado con fibras. Sostenimiento: 15 cm concreto lanzado C25/30 reforzado con fibras. Marcos reticulados espaciados 1,0 m longitudinalmente

#### 5 TRATAMIENTO DE CAVIDADES KARSTICAS

Actualmente se está desarrollando la excavación y sostenimiento de los túneles 1 y 2.

Como ejemplo podemos citar que durante los trabajos de excavación del túnel 1, en el entorno del P.K. 3+130, se ha interceptado una cavidad kárstica que afecta a la toda sección de excavación, como puede observarse en las Fotografías 1 y 2. La geometría de esta caverna abarca de clave a piso y discurre por el hastial derecho con una profundidad de al menos 25 m hacia la clave y de unos 7 m en el hastial.



Fotografía 1. Vista general de la caverna aparecida entre los PP.KK. 3+132.0 y 3+124.0 en el frente 4 del Túnel 1.



Fotografía 2. Micropilotes colocados como parte del sostenimiento especial para cavernas aplicado en el frente 4 de excavación del Túnel 1.

En la fase de diseño se previó la posibilidad de que se interceptaran cavidades kársticas que pudiesen comprometer tanto la estabilidad del túnel durante su construcción como la funcionalidad del mismo en la fase de servicio. Para ello se definió el siguiente criterio de actuación, diferenciando entre si estas afectan a la bóveda o a la solera del túnel, o en este ejemplo donde la caverna se presentó en toda la sección tanto en piso como en clave.

- a) En la bóveda
  - Colocación de marcos reticulados espaciados 1,0 m longitudinalmente y arriostrados entre sí mediante tresillones. Colocación de chapas tipo Bernold a modo de encofrado perdido contra los marcos metálicos.
  - Bombeo de una capa de concreto C/25/30 para la formación de una bóveda de 1,0 m de espesor.

- Relleno de la cavidad en el trasdós de la bóveda mediante inyección de lechada de bentonita-cemento.
- b) En solera
  - Relleno de la cavidad mediante concreto C25/30
  - Ejecución de micropilotes de cimentación ubicados equidistantemente cada 3,0 m de separación longitudinal y empotrados 2 metros en terreno sano.
  - Construcción de una losa de arriostamiento de concreto C25/30 de 30 cm de espesor.

En la Figura 2 se presentan las medidas previstas para el paso de zonas con cavidades.

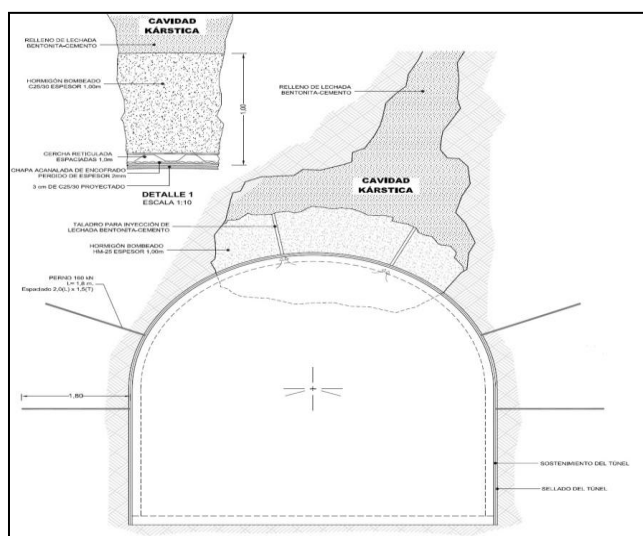


Figura 2. Medidas previstas ante cavidades que afecten a la bóveda.

### 5.1 Excavación y revestimiento de los túneles hidráulicos en la Central Renace 2

Se trata de la excavación de dos túneles dentro del proyecto de la Central Hidroeléctrica Renace 2.

- T1 con 3.419 m y una sección de 33 m<sup>2</sup>
- T2 con 4.030 m y una sección de 22 m<sup>2</sup>
- Tres accesos o ADIT totalizando 1.010 m con sección de 36 m<sup>2</sup>

La empresa PROACON se encarga de la ejecución de 1.700 metros del T1 y la totalidad del T2.

El T1 se ataca desde el boca Este, F4, hasta llegar a un acceso intermedio, ADIT 1, a partir de aquí es otra empresa quien se encarga de la excavación hasta llegar a la boca Oeste.

Para la ejecución del T2 se optó por la solución de hacer dos accesos directos intermedios, Acceso 2 y Acceso 3, con el fin de poder atacar simultáneamente el túnel por cinco frentes.

Los trabajos de excavación se comenzaron en el Acceso 2 haciendo labores de emboquille mediante excavación

mecánica durante los primeros metros, para a continuación comenzar con excavación mediante perforación y voladura que será el método escogido para la realización del túnel.

La longitud del Acceso 2 es de 288 m con sección de 36 m<sup>2</sup> hasta la traza del túnel donde se comienza el ataque de dos frentes, F2 y F3, simultáneamente ya con sección de túnel de 22 m<sup>2</sup>.

La excavación de la boca de entrada, F1, se comienza directamente con la sección de túnel de 22 m<sup>2</sup>. También se comienzan los trabajos del otro acceso directo al interior del túnel, Acceso 3.

La longitud del Acceso 3 es de 289 m llegando desde superficie hasta la traza del túnel donde se bifurca en los frentes F4 y F5.

Los accesos directos al túnel Acceso 2 y Acceso 3 se hacen con una pendiente negativa del 13 %.

El F1 tiene una pendiente negativa del 12% durante los primeros 451 m para luego pasar a una pendiente del 3%. Desde este frente se realizarán aproximadamente 850 m hasta calar con el F2 que con pendiente positiva del 3% arranca desde el Acceso 2 y se harán aproximadamente 950 m hasta el calar con el F1.

El F3 arranca desde el interior de Acceso 2 y con pendiente negativa del 3,5% avanza hacia el F4, estando previsto hacer unos 650 m los mismos que se harán desde el F4 hasta calar con el F3.

Por último, el F5 arranca desde el interior del Acceso 3 y con pendiente negativa del 12% se harán aproximadamente 650 m hasta la salida del túnel y donde enlazará con la tubería de presión que llevará el agua hasta la casa de máquinas donde se encuentran instaladas las turbinas de la central hidroeléctrica.

#### 5.1.1 Sistema de excavación

Se han considerado un total de 3.900 m lineales en T2 más 1.700 m lineales en T1 más 577 m lineales de Acceso 2 y Acceso 3 de túnel en mina, que serán ejecutables mediante perforación y voladura. Sólo está prevista la excavación con medios mecánicos para el saneo del contorno de excavación y en zonas especialmente fracturadas.

Dadas las reducidas dimensiones de las distintas secciones la excavación del túnel se realizará en una sola fase. Sección completa.

Para la realización de la perforación y la voladura, está prevista la utilización de jumbos electrohidráulicos de dos brazos. La máxima longitud de perforación que se puede alcanzar con estos jumbos es de 5.50 m. El diámetro de perforación será de 48 a 51 milímetros.

Para la carga de la voladura está prevista la utilización de una plataforma elevadora autodesplazable para situar a los operarios en altura.

El desescombro será realizado por palas de perfil bajo, scooptram con una capacidad de carga de 10 toneladas. Para un mayor rendimiento en este proceso del ciclo se han ejecutado “anchurones” a lo largo del túnel cada 400

m con el fin de optimizar los tiempos de desescombro del frente.

Los bulones necesarios para conseguir incrementar la estabilidad total del terreno se perforarán con el jumbo y se colocarán bulones tipo Swellex de 1,8 m de longitud en una malla que variará en función del sostenimiento indicado en cada caso.

Simultáneamente con la excavación del túnel y el bulonado, se colocan capas de hormigón proyectado en un espesor variable entre 3 y 15 cm dependiendo del sostenimiento en cada momento.

La colocación de éstas capas de hormigón, será realizada mediante un robot electrohidráulico cuya capacidad de proyección está comprendida de forma variable entre 0-30 m<sup>3</sup>/hora.

#### 5.1.2 Excavación mediante perforación y voladura

En este apartado se realizará una descripción de los diferentes procesos y técnicas de ejecución que deberán emplearse para construir un túnel con perforación y voladura. Se exponen brevemente los procesos básicos específicos (excavación, sostenimiento y revestimiento), así como la maquinaria y medios auxiliares más adecuados para abordar la construcción del túnel.

Actualmente, la construcción de túneles en roca se realizará en su mayor parte empleando una tecnología de sostenimiento basada en el empleo de bulones, hormigón proyectado, fibra metálica, mallazo y cerchas. El túnel se excavará mediante explosivos. El proceso de excavación sigue un proceso de avances cíclicos, que consta de las siguientes etapas:

1. Perforación de los taladros
2. Carga de explosivos y voladura
3. Ventilación
4. Carga del escombro y transporte a lugar de acopio
5. Saneo
6. Colocación del sostenimiento
7. Replanteo de la siguiente voladura

Los tiempos de ciclos obtenidos por frente varían entre 9 y 12 horas, dependiendo las condiciones de terreno y el sostenimiento aplicado.

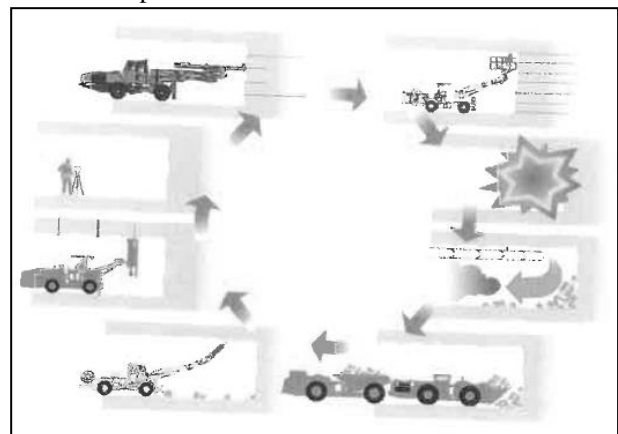


Figura 3. Ciclo de excavación con explosivos.

### 5.1.3 Voladuras: parámetros del cuele, destroza, zapateras y contorno

La voladura consistirá en una malla de tiros, con la realización de un cuele del tipo cuatro secciones, para la apertura de un hueco central en frente del túnel, con rotura progresiva hacia el hueco creado por el cuele. Se efectuará como complemento de lo anterior, una voladura de recorte en todo el perímetro lateral para conseguir una superficie residual de la roca del túnel lo más sana posible. La perforación de estos ritos de recorte será realizada con un espaciamiento de 60 cm entre sí.

El explosivo principal será a granel de tipo ANFO. Su colocación en los barrenos se realizará mediante un sistema de carga neumática del explosivo. Se utilizará explosivo emulsión para su iniciación.

Los tiros de franqueo se perforarán con una malla aproximada de 1.2 m x 1.2 m.

El cebado de todos los tiros del túnel será en fondo, mediante la utilización de detonadores de retardo, en cuele, destroza y el recorte.

En función de los diferentes tipos de terreno a atravesar, se prevén distintas longitudes de avance, comprendidas entre un avance máximo de 4.5 m para los terrenos de mejores características geotécnicas hasta un avance de 1.5 m por pase para los terrenos de peor calidad.

La eficiencia de disparo o avance medio a lo largo de la obra está en un 90%.

### 5.1.4 Perforación

Para la realización de la perforación de la voladura se utilizan jumbos electrohidráulicos. La máxima longitud de perforación que se puede alcanzar con estos jumbos es de 5.50 m. El diámetro de perforación será de 48 a 51 mm.

Para ejecutar los seis frentes existentes a la vez se cuenta con seis jumbos:

- Túnel 1 y Túnel 2 F1: Jumbo Sandvik DT820 dos brazos con corredera de 16 pies lo que permite una perforación útil de 4.5 m.
- Túnel 2 F2 y F3: Jumbo Sandvik DD321 dos brazos con corredera de 14 pies y una de ellas extensible de 8 a 14 pies.
- Túnel 2 F4 y F5: Jumbo Atlas Copco E2 dos brazos con corredera de 18 pies. En este frente se apoya la perforación de los bulones con un jumbo Atlas Copco Boomer H226 de un brazo con corredera de 12 pies.

Además de estos jumbos se cuenta con la presencia de otros dos Jumbos Axera T08 de 14 y de 16 pies que se utilizan como refuerzo en el caso de coincidir los ciclos de perforación.

Para la ejecución de la obra se consumirán 340 t de Anfo, 140 t de emulsión hidrogel, 105 km de cordón detonante y 140.000 detonadores.

### 5.1.5 Ventilación

Uno de los grandes problemas a los que nos enfrentamos a la hora de ejecutar el túnel es el de ventilar las áreas de trabajo, cuanto más en secciones pequeñas donde el diámetro de la manga de ventilación está limitado y se tienen largas distancias como en este caso.

Este problema se solventó con la colocación de potentes ventiladores capaces de ventilar a distancias mayores del kilómetro con tubería de 1.000 m y en caso de los Accesos repartiendo la ventilación hacia dos frentes:

- Túnel 1: Ventilador marca Flack con dos motores de 125 kW.
- Túnel 2 (frente 1): Ventilador marca Flack con dos motores de 125 kW.
- Acceso 2- Túnel 2 (frente 2 y 3): Ventilador marca Zitron con un motor de 150 kW
- Acceso 3- Túnel 2 (frente 4 y 5): Ventilador Zitron con dos motores de 125 kW.

En reserva se disponen de dos ventiladores Westing house de 125 kw y tres ventiladores de 30 kw utilizados en las primeras fases de la obra.

### 5.1.6 Desescombro

Para la realización del desescombro se han ejecutado "culatones" transversales con dimensiones de 5 m de ancho por 4 de alto y 12 metros de profundidad cada 400 m aproximadamente con el fin de hacer segundas cargas y optimizar el ciclo de desescombro a un máximo de 2.5 horas.

El desescombro se ha hecho con palas de perfil bajo reforzando en algunos casos con palas cargadoras convencionales.

- T1 y T2 F1: CAT R-1600 con capacidad de carga de 6 m<sup>3</sup> y Atlas Copco Wagner con capacidad de carga 6 m<sup>3</sup>.
- F2 y F3: CAT R-1600 con capacidad de carga de 6 m<sup>3</sup> y pala cargadora CAT 966
- F4 y F5: CAT T-1600 con capacidad de carga de 6 m<sup>3</sup> y SANDVIK EJC145 con capacidad de carga de 3.5 m<sup>3</sup>.

### 5.1.7 Saneamiento de la voladura

Posterior a la retirada del material del frente de voladura se realiza una campaña de saneo de aquellas piedras que han quedado desprendidas del macizo y puedan caer, para evitar accidentes en los operarios que entran a realizar las labores en el frente de trabajo.

Para este trabajo se dispone de 5 retroexcavadoras sobre orugas de 7 t equipadas con martillos de 1.5 t.

### 5.1.8 Sostenimiento

Una vez saneado el frente se define a través del departamento de geología y geotecnia destinado en la obra el RMR medio de la roca en el frente de trabajo y se toma la decisión de cuál es el sostenimiento adecuado a ejecutar.

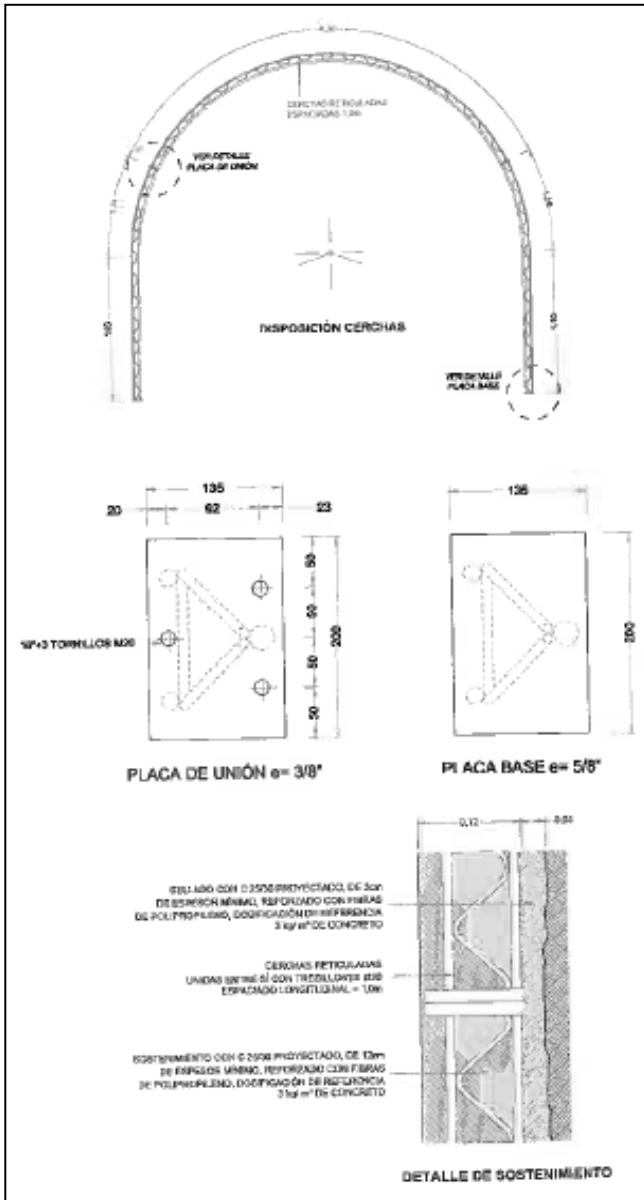


Figura 4. Instalaciones de cerchas reticuladas.

En esta obra y dependiendo del RMR se puede optar por la colocación de bulones de anclaje tipo Swellex, para lo cual se hace uso de los jumbos para la perforación y posterior colocación e inflado de los bulones y bien si la roca es de peor calidad se colocan cerchas reticuladas.

Una vez colocado el sostenimiento definido se procede a proyectar una capa de hormigón proyectado en todo el perímetro del túnel para formar un arco resistente de hormigón que contrarreste las presiones del terreno y poder seguir avanzando con seguridad.

Para esta operación se utilizan robot de lanzamiento de hormigón tipo PM 500 y similar de los cuales se disponen 5 ud en obra.

### 5.1.9 Secciones tipo y sostenimientos

A continuación se presentan en las siguientes figuras las secciones tipo de sostenimiento.

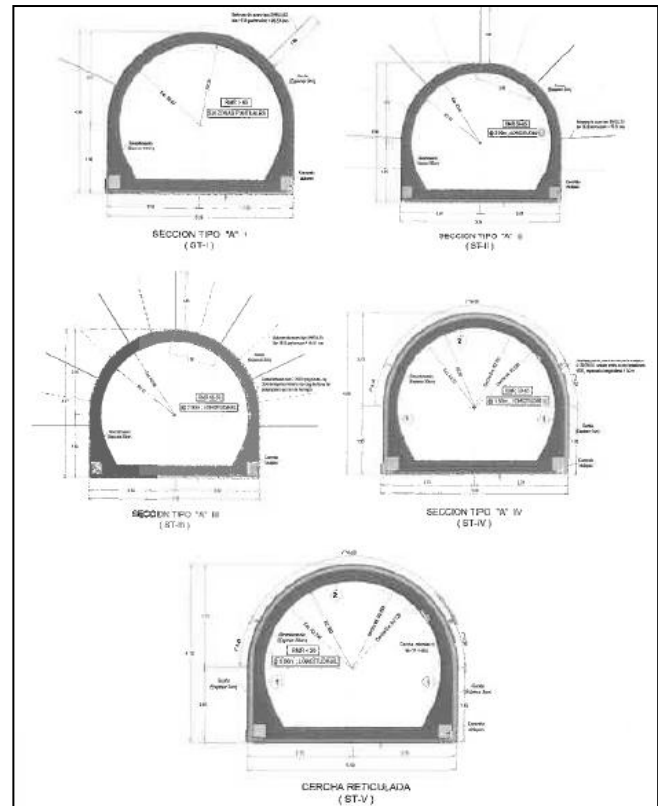


Figura 5. Secciones tipo – túnel-2.

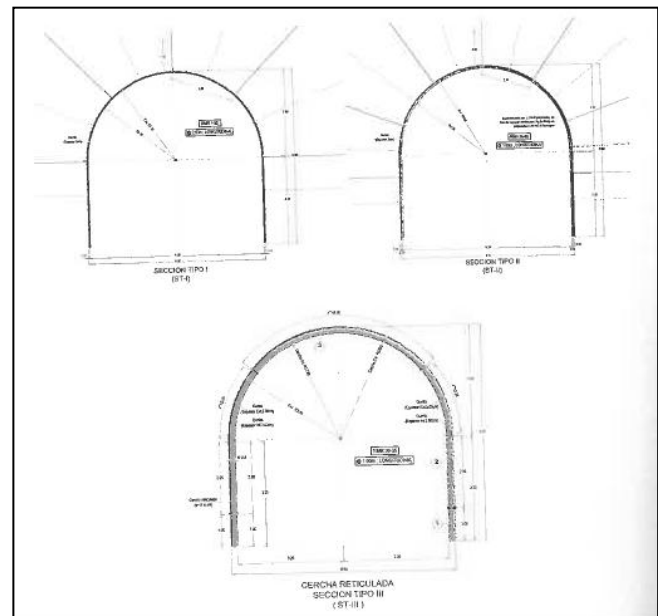


Figura 6. Secciones tipo – Adits

5.1.10 *Equipos de trabajo (personal)*

Para el desarrollo del presente proyecto se han dado empleo a más de 300 personas teniendo puntas cercanas a los 225 trabajadores, pertenecientes a 12 países diferentes.

El volumen de expatriados empleados en la obra ha sido de 66 trabajadores siendo el resto de Guatemala, de los cuales la gran mayoría pertenecen a las aldeas y comunidades de las zonas en las que se encuentra el proyecto en el departamento de alta Verapaz.

La distribución del personal que está trabajando en el proyecto con la empresa Proacon son 16 trabajadores entre dirección, producción, oficina técnica y administración.

El resto de operarios que está participando en la construcción del Túnel se ha distribuido entre capataces técnicos manipuladores de maquinaria especializada en túneles, oficiales, ayudantes y peones, además de un equipo de 18 mecánicos y electricistas que se han ocupado de las instalaciones y el mantenimiento del extenso parque de maquinaria empleado.

A los efectos de acortar los plazos de ejecución de la obra, el trabajo se ha realizado de forma continuada sin parar en ningún momento los frentes de trabajo, distribuyendo el personal en turnos según el modelo Alemán.

5.1.11 *Revestimiento*

En el Túnel 2 se le aplicará un tratamiento de revestimiento con hormigón armado para soportar las presiones interiores del agua en el túnel.

Se han proyectado dos espesores de revestimiento y varias secciones de armado según avance de túnel y aumento de presiones.

Para la ejecución del revestimiento se han fabricado expresamente para la obra dos carros de encofrado con funcionamiento hidráulico de 24 m. Compuestos por tres módulos de 8 m cada uno, que proporciona un avance diario de 24 de túnel revestido.

El revestimiento de hormigón se realizará con un refuerzo mediante barras corrugadas grado 60 con la siguiente estructura de armado, ver Figura 7.

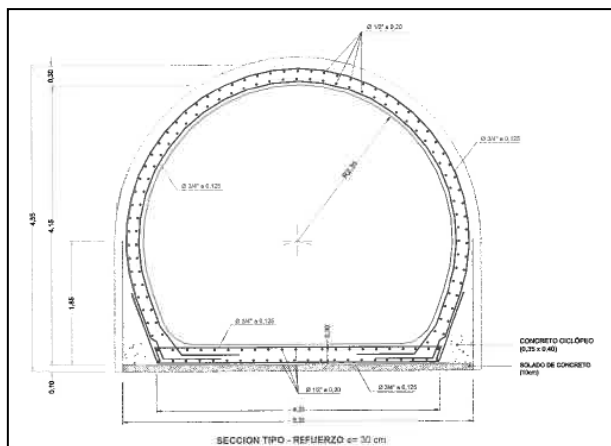


Figura 7. Refuerzo estructural – Túnel 2.