



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

## **Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra**

“Materiales utilizados en la construcción del Túnel San Eduardo de la ciudad de Guayaquil: Características e Importancia de su uso”

### **TESIS DE GRADO**

Previo a la obtención del Título de:

### **INGENIERO CIVIL**

Presentada por:

Oscar Joel Méndez Trelles

Teófilo Fernando Vallejo Remache

**GUAYAQUIL – ECUADOR**

Año: 2009

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos a Dios primeramente, quien nos ha brindado todos los medios necesarios para la realización de este documento.

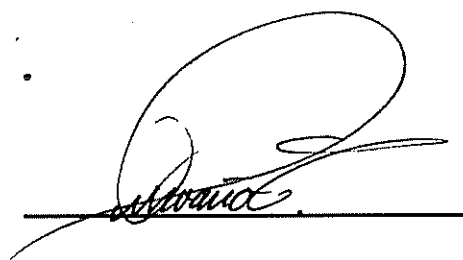
A nuestros padres y familiares.

A todas las personas que de uno u otro modo colaboraron en la realización de este trabajo y al Ing. Marco Suarez, Director de la Tesina, por su invaluable ayuda.

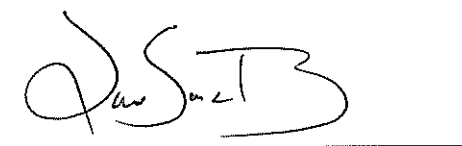
## **DEDICATORIA**

A nuestros padres. Amigos,  
compañeros y profesores  
que nos acompañaron en  
todo momento.

## TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

A handwritten signature in black ink, featuring a large, stylized initial 'G' and 'P' that loops together. Below the signature is a solid horizontal line.

**Msc. Gastón Proaño Cadena**

A handwritten signature in black ink, consisting of the initials 'MSR' in a stylized, cursive font. Below the signature is a solid horizontal line.

**Ing. Marco Suarez Rodríguez**

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, le corresponde; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL.”

(Reglamento de Graduación de la Espol).



---

**Oscar Méndez Trelles**



---

**Teófilo Vallejo Remache**

# CONTENIDO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>INTRODUCCIÓN .....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>CAPITULO 1.....</b>  | <b>2</b>  |
| 1. DATOS GENERALES DEL PROYECTO. ....   | 2         |
| 1.1. Descripción del Proyecto .....   | 2         |
| 1.1.1. Localización .....   | 4         |
| 1.1.2. Características generales de las obras de acceso a los túneles.<br>6     |           |
| 1.1.3. Características técnicas de los estudios definitivos de los<br>túneles 9 |           |
| <b>CAPITULO 2.....</b>  | <b>15</b> |
| 2. ESTUDIO GEOLOGICO Y GEOTECNICO DEL CERRO SAN<br>EDUARDO.....                 | 15        |
| 2.1. Introducción .....   | 15        |
| 2.2. Geología y Geotecnia del Macizo Rocoso.....                                | 16        |
| 2.3. Clasificación del Macizo Rocoso .....                                      | 17        |
| 2.3.1. Clasificación RMR.....   | 18        |
| 2.3.2. Clasificación Q de Barton.....   | 22        |
| 2.4. Perforaciones Ejecutadas.....  | 24        |
| 2.5. Ensayos Ejecutados sobre Muestras de Recuperación. ....                    | 29        |
| <b>CAPITULO 3.....</b>  | <b>31</b> |
| 3. MATERIALES ESPECÍFICOS.....  | 31        |
| 3.1. Introducción .....   | 31        |
| 3.2. Hormigón .....   | 32        |
| 3.3. Hormigón simple.....   | 33        |
| 3.3.1. Hormigón armado .....  | 35        |
| 3.3.2. Hormigón Lanzado.....  | 37        |
| 3.3.2.1. Colocación del Hormigón Lanzado .....                                  | 38        |
| 3.3.2.2. Áridos .....   | 40        |
| 3.3.2.3. Fibra de acero.....  | 42        |
| 3.3.2.4. Características de la Fibra de Acero.....                              | 43        |
| 3.3.3. Fibras poliméricas (Polipropileno).....                                  | 46        |
| 3.3.4. Aditivos .....   | 48        |
| 3.3.4.1. Características de los aditivos .....                                  | 49        |
| 3.3.5. Ensayos realizados.....  | 59        |
| 3.4. Acero de Refuerzo.....   | 60        |
| 3.4.1. Pernos de anclaje .....  | 61        |
| 3.4.2. Mallas de acero.....   | 63        |

|                        |  |            |
|------------------------|--|------------|
| 3.5.                   | Protección del Hormigón .....                                | 64         |
| 3.6.                   | Encofrados .....   | 68         |
| 3.7.                   | Iluminación y Ventilación .....                              | 69         |
| 3.7.1.                 | Ventilación del Túnel.....                                   | 70         |
| 3.7.2.                 | Evacuación de humos.....                                     | 72         |
| 3.7.3.                 | Ventilación de las salidas de emergencia. ....               | 74         |
| 3.7.4.                 | Climatización de las salas de operación .....                | 74         |
| 3.7.5.                 | Instrumentos de medición de aire .....                       | 75         |
| 3.7.6.                 | Detectores de incendio .....                                 | 75         |
| <b>CAPÍTULO 4.</b>     | <b>.....</b>   | <b>77</b>  |
| 4.                     | PROCESO CONSTRUCTIVO.....                                    | 77         |
| 4.1.                   | Introducción.....  | 77         |
| 4.2.                   | Estudios Preliminares.....                                   | 79         |
| 4.3.                   | Métodos Constructivos.....                                   | 90         |
| 4.4.                   | Fase Constructiva.....                                       | 91         |
| 4.4.1.                 | Método Utilizado en la Construcción de los Túneles. ....     | 93         |
| 4.5.                   | Ejecución de la Fase Constructiva. ....                      | 96         |
| 4.5.1.                 | Portales (Fase Constructiva).....                            | 97         |
| 4.5.1.1.               | Portal Norte - Sostenimiento Externo (Fase Constructiva). 99 |            |
| 4.5.1.2.               | Portal Norte - Sostenimiento Primario (Calota).....          | 100        |
| 4.5.1.3.               | Fases de Trabajo en Calota – Portal Norte. (Tipo I) .....    | 102        |
| 4.5.2.                 | Fase Constructiva en Calota - Portal Sur. (Tipo I) .....     | 107        |
| 4.5.2.1.               | Sostenimiento – Portal Sur. ....                             | 108        |
| 4.5.2.2.               | Fases de Trabajo en Calota – Portal Sur.....                 | 109        |
| 4.5.3.                 | Fase Constructiva en Destroza (Portal Norte y Sur). ....     | 113        |
| 4.5.3.1.               | Procedimiento Constructivo en la destroza. (Tipo II). ....   | 114        |
| 4.5.4.                 | Impermeabilización. ....                                     | 115        |
| 4.5.5.                 | Revestimientos y Drenaje. ....                               | 116        |
| <b>CONCLUSIONES.</b>   | <b>.....</b>   | <b>117</b> |
| <b>RECOMENDACIONES</b> | <b>.....</b>   | <b>119</b> |
| <b>BIBLIOGRAFIA.</b>   | <b>.....</b>   | <b>121</b> |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Fig.1.1. Ubicación de los Túneles. ....  | 4  |
| Fig.1.2. Vías de Acceso al Túnel. ....   | 6  |
| Fig.1.3. Detalles de la sección transversal típica en los diseños viales de cada túnel ..... | 14 |
| Cuadro 2.1.- Clasificación geomecánica según el índice RMR. ....                             | 20 |
| Fig.2.1. Planta Geológico/ Geotécnico.....   | 27 |
| Fig.2.2. Perfil Geológico/ Geotécnico.....   | 28 |
| Figura 3.1. Colocación Hormigón Simple en la Vía.....  | 35 |
| Figura 3.2. Elementos de hormigón armado en los accesos del túnel. ....                      | 36 |
| Figura 3.3. Colocación de Hormigón Proyectado en los taludes de los portales del túnel.....  | 39 |
| Figura 3.4. Colocación de Hormigón Proyectado en el revestimiento interior del túnel. ....   | 40 |
| Figura 3.5. Tipos de Fibra de acero. ....  | 45 |
| Figura 3.6. Pernos de anclaje. ....  | 62 |
| Figura 3.7. Mallas de acero.....   | 64 |
| Figura 3.8. Colocación de membrana impermeable. ....   | 66 |
| Figura 3.9. Impermeabilización del túnel. ....   | 67 |
| Figura 3.10. Encofrado del revestimiento del túnel. ....                                     | 69 |
| Figura 3.11. Colocación de sistema de ventilación. ....                                      | 72 |
| Fig.4.1 Muestra de los sondeos ( S – 6). ....  | 81 |
| Fig.4.2 Estabilización de Taludes. ....  | 87 |
| Fig.4.3 Sección de un Túnel. ....  | 91 |
| Fig.4.4 Áreas de trabajo de excavación del Túnel. ....                                       | 92 |
| Fig. 4.5. Vista Frontal - Portal Norte.....  | 98 |
| Fig.4.6 Vista Frontal - Portal Sur.....  | 98 |



|  |     |
|--|-----|
| Fig.4.7 Malla Electro soldada y Hormigón lanzado.....              | 100 |
| Fig.4.8. Soporte Primario o Paraguas.....                          | 101 |
| Fig.4.9. Excavación Inicial – Portal Norte .....                   | 102 |
| Fig. 4.10. Jumbo Tamrock .....                                     | 104 |
| Fig. 4.11. Detonación de Explosivos .....                          | 105 |
| Fig.4.12. Excavadora. ....   | 105 |
| Fig. 4.13. Colocación de Pernos.....                               | 106 |
| Fig.4.14. Proyectado de hormigón. ....                             | 107 |
| Fig. 4.15. Excavación por voladura – Portal sur.....               | 108 |
| Fig.4. 16. Sostenimiento de taludes- Portal Sur.....               | 109 |
| Fig.4.17a. Plan de Perforación para Voladura. ....                 | 111 |
| Fig.4.17b. Plan de Perforación para Voladura - Macizo Rocoso.....  | 112 |
| Fig. 4.17c. Ejecución del Plan de Perforación. ....                | 112 |
| Fig.4.18. Áreas de trabajo de excavación del Túnel - Destroza..... | 113 |
| Fig.4.19. Geomembrana. ....  | 115 |

## **INTRODUCCIÓN**

Sabiendo que un túnel es una obra de ingeniería que para su construcción, requiere de técnicas, productos, materiales, equipos especiales y de estudios geológicos, geotécnicos e hidráulicos.

Este documento se ha desarrollado como trabajo de fin de carrera y está enfocado al análisis de los materiales que se utilizaron en la construcción de los Túneles que atraviesan el Cerro San Eduardo, sus características e importancia. También se hace una breve descripción de datos generales relacionados con los estudios ejecutados antes de la construcción del túnel, y durante el proceso constructivo de los túneles.

Una vez definido el proyecto de construcción del túnel, se debe conocer las condiciones y características del lugar, eligiendo el proceso constructivo que conviene para su caso en particular. Además, según las dimensiones del proyecto, se considera otros factores relacionados, como son: seguridad, economía y durabilidad de la obra.

# **CAPITULO 1**

## **1. DATOS GENERALES DEL PROYECTO.**

### **1.1. Descripción del Proyecto**

El proyecto de construcción de los Túneles del Cerro San Eduardo, se circunscribió dentro del Plan de Mejoras de la Infraestructura Vial que llevó a cabo la M. I. Municipalidad de Guayaquil, y que incluye una propuesta importante que consiste en incorporar un nuevo enlace vial de aprox. 3.315 m. que conecte el intercambiador del Km 4.5 que distribuye el tráfico motorizado de

las avenidas El Bombero, vía a Daule y Avenida Carlos Julio Arosemena Tola, con la avenida Barcelona.

La intención del Proyecto es mejorar las condiciones de tráfico de la red vial de la ciudad de Guayaquil dentro del Plan de Mejoras de la Infraestructura Vial que lleva a cabo la M. I. Municipalidad de Guayaquil, reducir los costos operativos de los usuarios, mejorar los índices de congestión, reducir accidentes de tránsito y consumo de los combustibles, disminuyendo el tiempo de recorrido y demás aspectos socioeconómicos y ambientales de la ciudad.

### 1.1.1. Localización



Fig.1.1. Ubicación de los Túneles.

El Proyecto "Túneles del Cerro San Eduardo", está ubicado en el noroeste de la Ciudad de Guayaquil, transversalmente en el cerro del mismo nombre. Su longitud es de 1295 m medida en el eje central, esto es en el baricentro de los dos túneles, y 2.42

Km. de vías de acceso. Según el Esquema de la Red Vial Fundamental de la ciudad de Guayaquil para el año 2010, está categorizado como una V4 (fig. 1.1.).

El Proyecto de los " Túneles Cerro San Eduardo ", no sólo une vialmente el sector suroeste con el noroeste de la ciudad, sino que es un estructurador de la red vial principal de la ciudad; así tenemos que une la Av. Assad Bucarám (calle 29-V4) y al suroeste de la ciudad con la Av. Martha Bucarám de Roldós que es una V3, la Av. del Bombero (V3), y la Av. Carlos Julio Arosemena (V4), Av. José Rodríguez Bonin (V3).

En la figura 1.2 se indica la posición del túnel con respecto a las otras obras del desarrollo vial existente.



Fig.1.2. Vías de Acceso al Túnel.

### 1.1.2. Características generales de las obras de acceso a los túneles.

- Consta de 7 tramos, dos de los cuales son intersecciones a nivel (de diamante), una es un intercambiador de tres niveles, tres son segmentos viales y uno es de túneles; y además, se han definido sus características funcionales y geométricas.

- A la altura de la Av. Barcelona, se plantea la incorporación de un intercambiador del tipo diamante con paso elevado, que pudiera ser implementado en dos etapas.

La primera fase del proyecto (año 2005), es construir un intercambiador a nivel tipo glorieta con ramales directos de giro a la derecha; y la segunda fase (año 2015) es construir un tablero elevado para la conexión directa de los túneles con los carriles del puente Gómez Rendón.

Por razones de la M. I. Municipalidad de Guayaquil, los Estudios y Diseños Definitivos del proyecto, "TÚNELES DEL CERRO SAN EDUARDO – ENLACE VIAL DEL INTERCAMBIADOR DEL KM 4.5 (AV. DEL BOMBERO, AV. MARTHA DE ROLDÓS Y AVE CARLOS JULIOS AROSEMENA) CON LA AVENIDA DE BARCELONA, EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL" fue elaborado en dos partes distintas.

Parte 1: El diseño definitivo del Intercambiador del Km. 4.5 fue entregado en su totalidad el día 09.01.2005 y contempla los siguientes estudios:



- Topografía
- Geología y Geotecnia
- Vial
- Impacto Ambiental
- Actividades y acciones de ejecución y operación del proyecto.
- Estructural
- Estudios complementarios
- Drenaje
- Iluminación
- Costos y Presupuesto

Parte 2: El diseño definitivo de los túneles y los enlaces viales contempla los siguientes estudios:

- Topografía
- Geología y Geotecnia
- Diseño de los túneles
- Diseño enlaces viales
- Impacto ambiental

- Instalaciones en los túneles
- Estudios complementarios
- Estudios complementarios viales
- Drenaje vial
- Iluminación vial
- Costos y presupuesto

A continuación se describe el diseño definitivo de los túneles y los enlaces viales.

### **1.1.3. Características técnicas de los estudios definitivos de los túneles**

- Dos túneles paralelos cada uno de 3 carriles.
- La separación entre los dos túneles  $\approx 13,5$  m.
- La mayor cobertura sobre el túnel en la parte central  $\approx 150$  m.
- Longitud de los túneles (natural)  $\approx$  es de 1280 m medidos en el eje central

- Longitud total de los túneles (natural y artificial)  $\approx 1295$  m.
- El área de excavación del túnel  $\approx 102$  m<sup>2</sup>.
- Longitud de paradas de emergencia central  $\approx 49$  m.
- El área de excavación en sector de paradas de emergencia central  $\approx 132$  m<sup>2</sup>.
- Separación entre Galerías de escape 300 m – 350 m
- Revestimiento exterior con hormigón lanzado.
- Revestimiento interior impermeable con hormigón in-situ.

Por conveniencia, se trazaron dos ejes, uno para cada túnel, aunque se especificó que ambos tendrían las mismas cotas y pendientes.

En cuanto al bombeo, en los diseños se ha establecido el uso de gradientes transversales que fluctuarán juiciosamente entre el  $-3\%$  y el  $+3\%$ , que representan los peraltes requeridos en las curvas horizontales dispuestas a lo largo de su alineamiento.

#### **1.1.4. Características técnicas de los túneles**

El diseño geométrico vial de los segmentos constitutivos de los túneles del cerro San Eduardo, se realizó en sujeción al estudio de tráfico, en especial, en cuanto a anchos de calzada, conceptos funcionales de operación y seguridad vial; que permitieran definir su geometría de acuerdo a los estándares internacionales.

Dos túneles fueron diseñados como obra definitiva:

Uno funciona para el tránsito vehicular en el sentido Norte-Sur; mientras que el otro opera para el tránsito Sur-Norte; ambos con una velocidad de diseño de 70 km/h. Un segmento de los túneles es bajo tierra y el otro a cielo abierto.

El alineamiento definido para el segmento bajo tierra, está compuesto por tramos rectos y por tramos curvos (curvas horizontales de 500, 815.11 y 828.58 metros de radio). Respecto al perfil longitudinal, este segmento está compuesto por una tangente con 3,95% de pendiente y por dos curvas

verticales, una cóncava y una convexa en sus extremos para empalmar a las tangentes de los otros segmentos viales que son a cielo abierto.

La clasificación funcional asignada al segmento bajo tierra es de "vía arterial" con velocidad de diseño de 70 Km/h, (acceso controlado, prohibido el cruce de peatones y paraderos, etc.).

De manera general, la sección de cada túnel está distribuida de la siguiente manera:

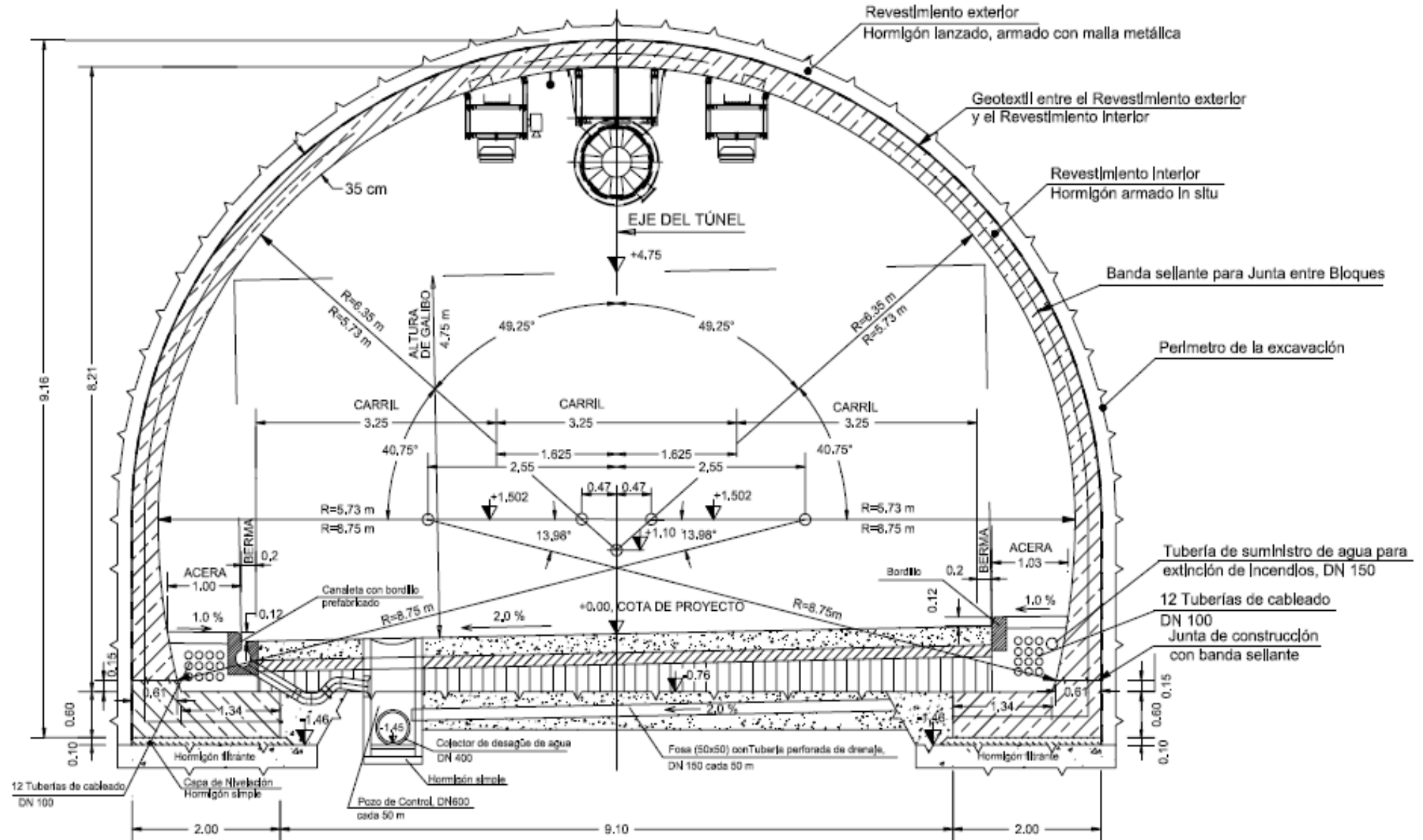
- (1) Dos veredas de seguridad de 1,0 metros de ancho, una a c/lado del túnel.
- (2) Una cuneta de 0,20 metros a cada lado.
- (3) Tres carriles de 3,25 metros cada uno.

Se ha establecido en los diseños la necesidad de tener un gálibo libre no menor a 4.75 m. Además, en el arranque, de los portales Norte y Sur, los túneles estarán separados aproximadamente 7 metros, y aumentando progresivamente esta separación a 15 metros a partir de los 100 primeros metros

de túneles para evitar cualquier interferencia entre ellos durante su construcción.

En la figura 1.3 se muestra la sección transversal típica del diseño de construcción del túnel.

Fig.1.3. Detalles de la sección transversal típica en los diseños viales de cada túnel



# **CAPITULO 2**

## **2. ESTUDIO GEOLÓGICO Y GEOTÉCNICO DEL CERRO SAN EDUARDO.**

### **2.1. Introducción**

Antes de comenzar el proceso constructivo de toda obra civil, se deberán realizar diferentes actividades que permiten comparar los estudios realizados en oficina, datos recibidos de laboratorio, planos, etc., con lo que encontremos en el lugar donde se realizará la construcción del proyecto determinado.



En el caso de los túneles, es muy importante la información del estudio Geológico – Geotécnico, ya que determina el grado de dificultad y el costo de la excavación subterránea, conocimiento necesario para proyectar adecuadamente el túnel, para evitar sobrecostos, accidentes, retrasos e imprevistos.

## **2.2. Geología y Geotecnia del Macizo Rocoso.**

Los túneles atravesarán el macizo rocoso del cerro San Eduardo, por lo cual es importante el estudio del mismo, su observación ha sido facilitada por el afloramiento de los estratos rocosos expuestos en sus laderas.

La calidad de la roca observada en las laderas está fuertemente afectada por procesos de meteorización, pero al interior del macizo rocoso, la calidad de la misma mejora de manera substancial.

A través del mapeo geológico se pudo identificar los diferentes tipos de roca; rumbo, buzamiento de la estratificación, fallas y diaclasas.

Para complementar el estudio geotécnico de observación, se realizaron calicatas y perforaciones profundas en diferentes sectores del trazado, las cuales nos permitieron en algunos casos confirmar los datos obtenidos del mapeo original y en otros casos obtener datos más exactos de la litografía del sector. Para obtener los niveles freáticos fue necesario hacer controles piezométricos.

En quebradas, esteros, laderas y zonas aledañas al área del proyecto, se realizó un levantamiento estadístico de los diferentes sistemas de discontinuidades y se desarrolló por medio del método de Red de SCHMIDT una evaluación estadística de los sistemas de discontinuidades.

### **2.3. Clasificación del Macizo Rocoso**

Para la clasificación del macizo rocoso, se utiliza varios métodos puntuales de la exploración geotécnica, ya que permiten obtener parámetros de resistencia y deformabilidad del macizo y estimar el sostenimiento del túnel.

Las clasificaciones geomecánicas más utilizadas en túneles son la RMR (Rock Mass Rating) y la clasificación de Barton, llamado Q de Barton. Si bien ambas fueron desarrolladas para estimar sostenimientos, el parámetro RMR se ha ido consolidando como un índice geomecánico para la evaluación de las propiedades del macizo rocoso, usándose igualmente para la evaluación del sostenimiento. A continuación se describe las clasificaciones utilizados en el estudio de los túneles de San Eduardo.

### **2.3.1. Clasificación RMR**

Desarrollada por Bieniawski en 1973, con actualizaciones en 1979 y 1989, constituye un sistema de clasificación de macizos rocosos que permite a su vez relacionar índices de calidad con parámetros geotectónicos del macizo, aparece en la excavación y sostenimiento en túneles. Esta clasificación tiene en cuenta los siguientes parámetros geomecánicos:

- Resistencia Uniaxial de la Matriz Rocosa.
- Grados de fracturación en grados de RQD.

- Espaciado de las discontinuidades.
- Condiciones de las discontinuidades.
- Condiciones hidrogeológicas.
- Orientaciones de las discontinuidades con respecto a la excavación.

La incidencia de estos parámetros en el comportamiento geomecánico de un macizo se expresa por medio del índice de calidad RMR, que varía de 0 a 100.

Para aplicar la clasificación RMR se divide el macizo rocoso en zonas o tramos que representen características geológicas más o menos uniformes de acuerdo con las observaciones hechas en campo, en las que se lleva a cabo la toma de datos y medidas referentes a las propiedades y características de la matriz rocosa y de las discontinuidades.

Una vez obtenidas las puntuaciones que resultan de aplicar los cinco parámetros de clasificación, se efectúa las correcciones por orientación de discontinuidades y se obtiene un valor

numérico con el que se clasifica finalmente el macizo rocoso. Esta clasificación distingue cinco clases, cuyo significado geotectónico se expresa en el cuadro 2.1.; a cada clase de macizo se le asigna una calidad y unas características geotécnicas.

| <b>CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA</b><br>(Bieniawski) |  |              |
|--|--|--------------|
| <b>R.M.R.</b>                                    | <b>Calificación<br/>del Macizo Rcoso</b> | <b>Clase</b> |
| 81 - 100   | <b>Muy bueno</b>                         | <b>I</b>     |
| 61 - 80  | <b>Bueno</b>                             | <b>II</b>    |
| 41 - 60  | <b>Medio</b>                             | <b>III</b>   |
| 21 - 40  | <b>Malo</b>                              | <b>IV</b>    |
| 0 - 20   | <b>Muy malo</b>                          | <b>V</b>     |

Cuadro 2.1.- Clasificación geomecánica según el índice RMR.

Así, un macizo rocoso clasificado muy bueno (Clase I), será macizo rocoso duro, poco fracturado, sin filtraciones importantes y poco meteorizadas, presentando muy pocos

problemas frente a su estabilidad y resistencia. Se puede deducir que tendrá una capacidad portante alta, permitirá la excavación de taludes con altas pendientes y no precisará medidas de estabilización y refuerzo en túneles.

Utilizando el RMR para clasificar las rocas según su meteorización se empleó el siguiente criterio:

- Grado I: Roca fresca

Sin síntomas visible de meteorización.

- Grado II: Roca ligeramente meteorizada

La meteorización penetra ligeramente en la roca por medio de las juntas más importantes presentándose con un cambio de color, generalmente del gris al parduzco o amarillento.

- Grado III: Roca moderadamente meteorizada

La meteorización se extiende a través de toda la masa rocosa, pero conserva suficiente resistencia para no ser desmenuzada con la mano, podrían presentarse nódulos de roca desmenuzables con la mano.

- Grado IV: Roca altamente meteorizada

La meteorización se extiende para toda la masa rocosa y puede desmenuzarse fácilmente con la mano.

- Grado V: Roca completamente meteorizada

La información recogida sirvió para confirmar y detallar la secuencia rocosa ya establecida por el mapeo geológico.

### 2.3.2. Clasificación Q de Barton

Desarrollada por Barton, Lien y Lunde en 1974, a partir del estudio de un gran número de túneles, constituyendo un sistema de clasificación de macizos rocosos que permite estimar parámetros geotécnicos del macizo y diseñar sostenimientos para túneles y cavernas subterráneas. El índice Q está basado en una evaluación numérica de seis parámetros dados por la expresión:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF}$$

Donde:

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

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

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

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

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

Los tres factores de la expresión representan:

$\left(\frac{RQD}{l_n}\right)$  : El tamaño de los bloques

$\left(\frac{J_r}{J_a}\right)$  : La resistencia al corte entre los bloques

$\left(\frac{J_w}{SRF}\right)$  : La influencia del estado tensional.

El índice Q varía entre 0.001 y 1000, con la siguiente clasificación del macizo rocoso:

Entre 0.001 y 0.01: Roca excepcionalmente mala

0.01 y 0.1: Roca extremadamente mala



|             |                              |
|-------------|------------------------------|
| 0.1 y 1:    | Roca muy mala                |
| 1 y 4:      | Roca mala                    |
| 4 y 10:     | Roca Media                   |
| 10 y 40:    | Roca buena                   |
| 40 y 100:   | Roca muy buena               |
| 100 y 400:  | Roca extremadamente buena.   |
| 400 y 1000: | Roca excepcionalmente buena. |

Las perforaciones con recuperación de testigos sirvieron también para establecer la secuencia de las diaclasas al interior del macizo, además para realizar los ensayos de laboratorio que incluyen la estimación de la permeabilidad de la roca para precisar el nivel de infiltración de agua que podría afectar a los túneles y finalmente estas perforaciones fueron utilizadas como pozos de control piezométrico del agua subterránea.

#### **2.4. Perforaciones Ejecutadas.**

Se ejecutaron nueve perforaciones para el estudio geológico-geotécnico de los túneles, S-1, S-2, S-3 y S-4 en el curso del

estudio de factibilidad y la S-5, S-6, S-7, S-8 y S-9 durante la fase de estudios del diseño definitivo.

Las perforaciones fueron realizadas tomando énfasis en las zonas de portales debido a que las mismas son consideradas áreas críticas del proyecto. En el Portal Sur se contó con los resultados de ensayos obtenidos en el sondeo S- 1, realizado en fase de factibilidad, además se complementó con la información obtenida de los sondeos, S-6 y S-9.

En el Portal Norte se contó con los resultados de los ensayos obtenidos en el sondeo S-4, realizado en fase de factibilidad, además se complementó con la información de los sondeos S-5 y SIN-03, realizados en la fase de estudio del diseño definitivo, con esta información y conociéndose la disposición de los estratos se pudo identificar las condiciones del subsuelo en este sector.

En el trazado del túnel se ejecutaron perforaciones con recuperaciones de testigos, los sondeos, S-2 y S-3, realizados en etapa de factibilidad, llegaron hasta 10 m por debajo de la solera,

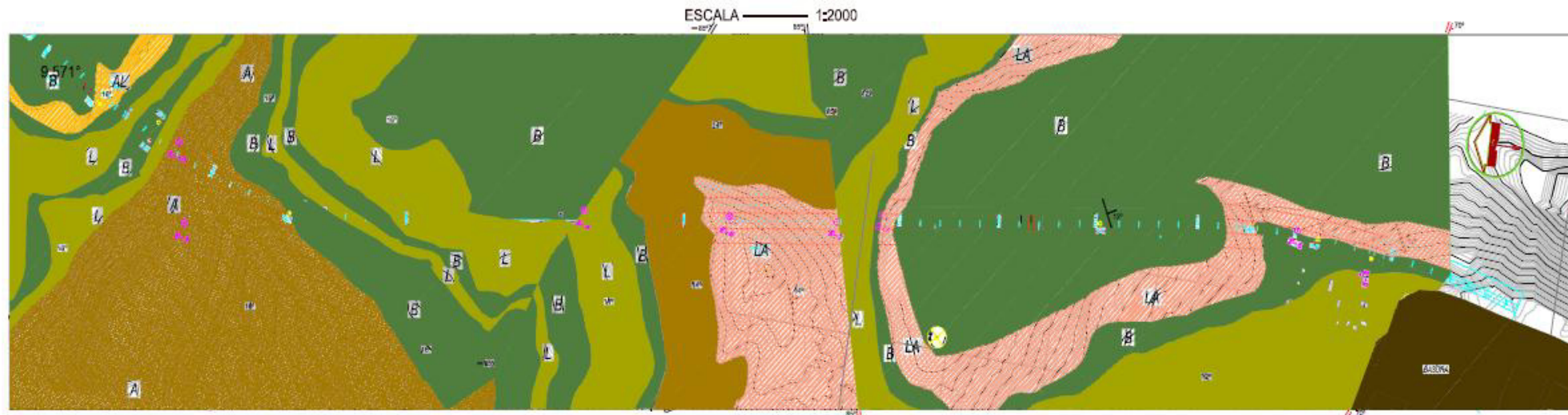
los sondeos S-7 y S-8, que fueron ejecutados en etapa de diseño definitivo, también llegaron hasta 10 m por debajo de la solera.

El sondeo S-8 fue ejecutado con la intención de conocer la litología e interceptar una falla inferida que fue detectada por medio de la interpretación de fotografías aéreas.

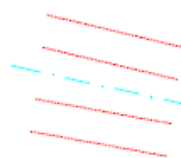
Se desarrolló por medio del método de Red de SCHMIDT una evaluación estadística de los sistemas de discontinuidades.

En la figura 2.1 se muestra la planta geológico-geotécnica de los túneles y en la figura 2.2 el perfil geológico-geotécnico con respecto al eje del túnel.

Fig.2.1. Planta Geológico/ Geotécnico



**SIMBOLOGÍA**



-TUNELES

S-9



-SONDEO GEOTECNICO

E-2



-ESTACIONES GEOMECANICAS



CURVAS DE NIVEL

SIN-03



SONDEOS INTERCAMBIADOR NORTE

C-01



-CALICATAS

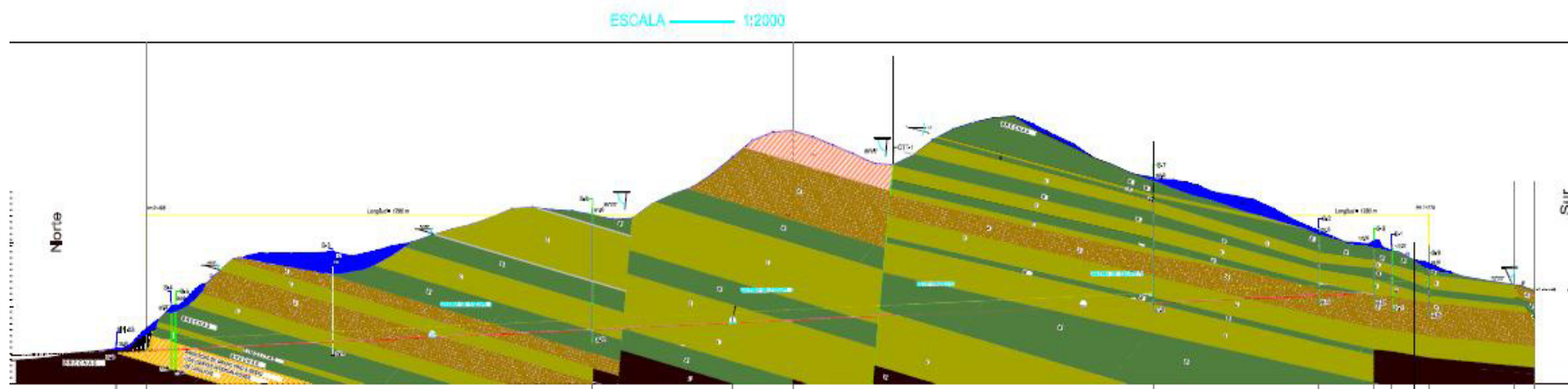


FALLA GEOLOGICA



FALLA GEOLOGICA INFERIDA

Fig.2.2. Perfil Geológico/ Geotécnico

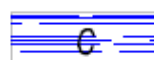


## SIMBOLOGÍA

S-5 a S-9 SONDEOS DURANTE EL DISEÑO DEFINITIVO

S-1 a S-4 SONDEOS DURANTE EL ESTUDIO DE FACTIBILIDAD

CTT-1 CALICATA TRAZA



DEPOSITO COLUVIAL



BRECHA GRIS VERDOSA CON CLASTOS REDONDEADOS A SUB REDONDEADOS DE HASTA UN (1) cm. DE DIAMETRO



ARENISCAS DE GRANO FINO MEDIO GRIS GRIS VERDOSO Y ROJISOS DE HASTA DOS (2) cm. DE DIAMETRO CON CIERTOS CLASTOS SUB REDONDEADOS DE COLORES GRIS DE GRANO FINO A MEDIO BIEN CEMENTADA



ARENISCA FINA CON CIERTA INTERCALACIONES DE LIMOLITA



DIRECCION DEL BUZAMIENTO APARENTE DE ESTRATIFICACION



DIRECCION DEL BUZAMIENTO DE FALLA



RUMBO Y BUZAMIENTO DE ESTRATOS



RUMBO Y BUZAMIENTO DE FALLAS



LIMOLITA LIGERAMENTE CALCAREA



LIMOLITA VERDOSA INTERCALADAS CON ARENISCAS GRIS-VERDOSAS



FALLA GEOLOGICA



FALLA GEOLOGICA INFERIDA

## **2.5. Ensayos Ejecutados sobre Muestras de Recuperación.**

Sobre las muestras de los testigos recuperados, en el tramo comprendido entre los 10 m por debajo de la solera y 10 m por encima del techo de los túneles, se realizaron los siguientes ensayos:

- Ensayo de compresión simple
- Ensayo de carga directa (point load tests)
- Ensayo de corte directo y ángulo de fricción
- Peso Específico, Absorción y Porosidad
- Ensayos del módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson
- Ensayo Brasileo (resistencia a la tensión)
- Ensayo petrográfico de láminas delgadas

Con los datos geológicos/geotécnicos recabados de las fuentes antes mencionadas se efectuaron las clasificaciones geomecánicas del valor RMR de Bieniawski y la Q de Barton. Esta clasificación geomecánica fue la base para la determinación de las diferentes clases de excavación y sostenimiento para los túneles de San Eduardo.

Algunas perforaciones fueron instaladas con piezómetros para la observación del comportamiento del agua subterránea. Con las instalaciones de los piezómetros se controlará el comportamiento del nivel freático en el área del túnel.

# **CAPITULO 3**

## **3. MATERIALES ESPECÍFICOS**

### **3.1. Introducción**

Este capítulo es de gran importancia por el proceso de construcción, debido a que se refiere a los materiales que se utilizaron en la construcción de los túneles del cerro San Eduardo.



En todo el proceso constructivo del túnel San Eduardo se utilizaron una variedad de materiales, entre los principales materiales están el hormigón, en sus diferentes tipos, acero de refuerzo, geotextiles de revestimiento, y otros materiales para uso en obras menores dentro del túnel.

### **3.2. Hormigón**

El hormigón es utilizado en las obras civiles ya sean de pequeña o de gran importancia para el desarrollo del proyecto del Túnel. En el Túnel San Eduardo se utilizó aproximadamente 65249 m<sup>3</sup> de hormigón, en todas las fases en las que comprendía, hormigón simple, hormigón armado y hormigón proyectado.

En el proyecto se utilizaron varios tipos de hormigones, y por su importancia en la ejecución de la obra se aplica en la construcción de la vía para el tránsito vehicular, el sostenimiento y recubrimiento final del túnel, estabilización de los taludes de los

portales del túnel, y obras menores dentro y fuera del mismo. A continuación se describe cada uno de ellos.

### **3.3. Hormigón simple**

El diseño del Túnel San Eduardo, especificaba el uso de este tipo de hormigón en varios elementos no estructurales del proyecto, estos hormigones son de características específicas para los elementos diseñados.

El hormigón simple que se utilizó de baja resistencia, es el de mayor uso en la construcción de elementos menores, de cuales cabe mencionar las aceras de la vía dentro del Túnel, las cajas de registro de las diferentes conexiones como las de AA.LL., cajas de tendido eléctrico y conexiones de circuito cerrado, entre otras.

Una de las características más importantes en la construcción del túnel San Eduardo fue que, el material obtenido por la perforación

fue reutilizado en la construcción de las vías de acceso y vía del túnel, siendo esta colocada como material de base y sub-base del pavimento. Se utilizó 13000 m<sup>3</sup> de hormigón simple en la construcción de bordillos, aceras y pavimento de la vía.

Las resistencias de estos hormigones fueron de 21 MPa para las aceras y elementos menores como cajas de registro y de control de las instalaciones, y de 30 MPa en la construcción del pavimento de la vía y del revestimiento final.

La figura 3.1 indica la aplicación de este tipo de hormigón en la construcción de la vía del túnel.



Figura 3.1. Colocación Hormigón Simple en la Vía.

### 3.3.1. Hormigón armado

El Hormigón armado, por definición, es la combinación del hormigón simple con acero de refuerzo, este tipo de hormigón se utiliza en la construcción de elementos estructurales.

En el Túnel San Eduardo existen varios elementos de hormigón armado, uno de los más importantes es el Revestimiento Interior

del Túnel, que está constituido por hormigón simple y por mallas de acero en toda su longitud.

Otro elemento de hormigón armado son los portales del Túnel, que están constituidos por una sección de túnel artificial en las dos entradas, tanto en el portal norte como en el portal sur.

La figura 3.2 indica el estado y construcción de los portales de acceso a los túneles.



Figura 3.2. Elementos de hormigón armado en los accesos del túnel.

### **3.3.2. Hormigón Lanzado**

El Hormigón Lanzado o Proyectado es un tipo de hormigón especial que es muy utilizado en la actualidad en gran cantidad de obras civiles, debido a que sus características físicas y mecánicas son mejoradas por su especial preparación.

Este hormigón es diferente al hormigón tradicional, ya que tiene una dosificación, una preparación especial, que puede ser complementada con aditivos y materiales especiales, dependiendo del resultado que se requiera en obra.

El hormigón lanzado se utilizó en dos etapas para la construcción del túnel; en la primera etapa constó en la estabilización de los taludes de los portales del túnel, tanto en el portal norte como en el portal sur, y en la segunda etapa consta en la utilización como sostenimiento del túnel.

Una de las características muy importantes fue que el hormigón debía cumplir con las resistencias iniciales adecuadas para poder cumplir con los tiempos de ejecución de la obra. Los requerimientos iniciales de resistencia fueron en una capa de gunitado con espesor aproximado entre 15 y 17 cm de espesor, con resistencias iniciales de 5 MPa a las 6 horas y de 10 MPa a las 24 horas.

#### **3.3.2.1. Colocación del Hormigón Lanzado**

El hormigón es lanzado mediante bomba de pistón hasta la boquilla de proyección, donde se halla la reducción de sección. En la boquilla se añade aire a una presión aproximadamente de unos 5-7 bar y a razón de 7-15 m<sup>3</sup> por minuto. Con ello se consigue incrementar la velocidad del hormigón y su compactación y adherencia a la superficie sobre la que se proyecta.

Asimismo en la boquilla se añadirán también los aditivos acelerantes-activadores de fraguado. La distancia de la boquilla se regulará de modo que no exceda de 1,5 m. Simultáneamente, se recomienda proyectar a distancias no inferiores a 0.5 m, por razones de rebote.

La figura 3.3 indica la aplicación y colocación del hormigón lanzado en los taludes de ingreso a los túneles. La figura 3.4 indica el gunitado en el interior del los túneles.



Figura 3.3. Colocación de Hormigón Proyectado en los taludes de los portales del túnel.





Figura 3.4. Colocación de Hormigón Proyectado en el revestimiento interior del túnel.

### 3.3.2.2. Áridos

Es uno de los materiales más importantes en la preparación del hormigón. Se ajustará la curva granulométrica de los áridos según el método patrón dado por las normas ASTM, tomando para ello las curvas granulométricas de cada una de las fracciones de que se disponga.

En particular se empleó una curva de áridos de tamaño máximo 10-12 mm para facilitar el correcto bombeado del hormigón sin bloqueos en la boquilla y para reducir el rebote. Por ello, el contenido en áridos superiores a 8 mm no excedió el 10%, hecho que implicó trabajar con elevadas cantidades de fracción 0/5 (entre 70-80%). El contenido en finos, por otra parte, se situó entre el 4 y el 8%. El déficit de finos se compensó dosificando más cemento y micro sílice. En el caso contrario, un exceso de finos demandaría más agua, con lo que se tendrá que aumentar la cantidad de aditivo reductor de agua.

Se controló especialmente la ausencia de sustancias químicas que puedan provocar reacciones incontroladas con otros componentes del hormigón.

### **3.3.2.3. Fibra de acero**

Una de las especificaciones que se recomienda en la actualidad, en la utilización del hormigón lanzado, es la de elementos especiales como parte de la dosificación de estos hormigones especiales.

Existen muchos de estos elementos especiales, que de acuerdo con las características que se quieran dar a los hormigones se los dosifica; en el caso de obras subterráneas como túneles, una de las características más importantes que debe poseer el hormigón utilizado principalmente, en los recubrimientos y en el sostenimiento final, es la impermeabilidad del hormigón y la alta resistencia a los esfuerzos cortantes que se puedan presentar en la vida útil de la obra.

Cuando se utiliza este tipo de hormigones, la colocación de una armadura que brinde las características antes

mencionadas, resulta muy costoso; pero con la investigación de nuevas tecnologías, hoy en día se utiliza elementos especiales como las **Fibras de Acero**, que le da al hormigón propiedades mecánicas mejores que la de un hormigón convencional.

#### **3.3.2.4. Características de la Fibra de Acero**

Las fibras de alambre de acero se fabrican a partir de alambre de acero trefilado de primera calidad, con una gama de diámetros entre 0,4 y 1,2 mm, con resistencias a la tracción de 1.000 N/mm o superiores y formas rectas, onduladas o con acodamientos terminales, diseñados de forma que contribuyen a mejorar la adherencia con el hormigón.

Las fibras de acero con relaciones longitud/ diámetro ( $l / d$ ) bajas se fabrican como fibras individuales. Por el contrario,

las fibras con relaciones  $l / d$  elevadas se presentan en forma de peines en los que las fibras se encuentran unidas con un adhesivo soluble en agua, consiguiéndose la distribución uniforme requerida.

Existe una gran variedad en tipos de fibra de acero para hormigones, que son muy utilizados de acuerdo a las características de las mismas y de las propiedades que se requiere obtener en el hormigón. Entre los principales tipos de fibra de acero se tiene las siguientes:

- Tipo gancho
- Tipo ondulado
- Fibra plana
- Micro fibra

En la figura 3.5 se indica algunos de los tipos de fibra de acero que se utilizan en la actualidad en la dosificación de hormigones especiales.



(a) Tipo gancho

(b) Tipo Micro fibra



(c) Tipo plana

(d) Tipo ondulado

Figura 3.5. Tipos de Fibra de acero.

El tipo de fibra que se utilizó en la construcción del túnel San Eduardo, fue la fibra tipo gancho, con diámetros de 0,8 mm, con resistencia a la tracción de 1.100 N/mm.

### **3.3.3. Fibras poliméricas (Polipropileno)**

Estas fibras sintéticas están formadas por diferentes materiales poliméricos extrusionados y luego cortados, pueden adicionarse en forma homogénea a hormigones y morteros.

Sirven en forma óptima para reducir las fisuras originadas en la retracción plástica del hormigón (empleadas en soleras y pavimentos). Presentan mejor comportamiento frente a las llamas, usando en estos casos, un mayor número de fibras por unidad de peso.

Entre las características más importantes de las Fibras de Polipropileno están las siguientes:

- Bajo peso.
- Alta resistencia a la tracción.
- Inerte químicamente respecto a todos los cementos y áridos.
- Distribución tridimensional y extraordinaria adherencia en la matriz de hormigón.

- Módulo de elasticidad adaptado al proceso de fraguado del hormigón.
- Compatible con el medio ambiente, imputrescible y anticorrosivo.

En la preparación del hormigón y como resultado de su flexibilidad durante el mezclado y compactación, es posible ajustar y consolidar una estructura de grano adecuada a la curva granulométrica óptima para el producto final.

En el hormigón fresco reduce la formación de micro-fisuras en el fraguado, responsables de la aparición posterior de fisuras de retracción.

En el hormigón endurecido:

- Aumenta la resistencia al impacto y la estabilidad dimensional.
- Aumenta la resistencia al fuego.
- Aumenta el índice de tenacidad y disminuye la permeabilidad.
- Mejora el comportamiento del hormigón frente a la abrasión.



El uso de la Fibra de Polipropileno en los túneles de San Eduardo alcanzó aproximadamente entre 0.6% y el 1% en la mezcla de hormigón que se utilizó en el revestimiento y sostenimiento del túnel.

#### **3.3.4. Aditivos**

Un componente muy importante en la preparación de hormigones especiales, son los aditivos, que ayudan a obtener las propiedades que son necesarias para obras de gran importancia, ya sea mayor resistencia, impermeabilidad, trabajabilidad, etc.

Los aditivos son compuestos químicos que aparecen en la construcción moderna, nacen de la necesidad de mejorar la calidad de los hormigones para obras de gran importancia como túneles, presas y muchas obras que por su complejidad hacen necesario el uso de materiales especiales en su construcción.

En el túnel San Eduardo, el uso de aditivos especialmente en el hormigón proyectado fue muy importante, existen varios tipos de aditivos que mejoraban la trabajabilidad del hormigón para que no pierda sus propiedades por el tiempo en que este demoraba en llegar de la planta hacia la obra. Otros aditivos fueron utilizados como acelerantes de fraguado y aditivo para aumentar la impermeabilidad del hormigón.

#### **3.3.4.1. Características de los aditivos**

Entre los aditivos más importantes utilizados en el hormigón proyectado colocado en el túnel San Eduardo tenemos:

- a) **SIGUNIT L-480 AF:** es un aditivo líquido, acelerante del fraguado libre de álcalis para hormigón y mortero por vía húmeda o seca. No contiene cloruros. Los porcentajes utilizados fueron entre **6-10%**.

Sigunit L-480 AF es un acelerante que puede utilizarse en el lanzador de hormigón o mortero tanto por vía seca como por vía húmeda, en las siguientes aplicaciones:

- Estabilización de túneles
- Muros de contención
- Protección de taludes
- Canales
- Piscinas, estanques
- Reparación de estructuras
- Inyección o relleno con mezclas de cemento

El efecto acelerante del Sigunit L-480 AF depende del contenido de cemento, edad y tipo de substrato, de la temperatura, espesor de la capa y sistema de lanzado.

En el proceso por vía húmeda, la relación agua/cemento de la mezcla de hormigón es fundamental, en el proceso por vía seca la cantidad y calibración del agua son parámetros que influyen en el efecto de aceleración del Sigunit L-480 AF.

- Las siguientes ventajas se obtienen al usar el Sigunit L-480 AF como acelerante en trabajos de lanzado de hormigón:
- Libre de álcalis.
- Si es usado correctamente, la disminución de las resistencias finales del hormigón acelerado es mínima.
- No hay contaminación adicional en el lugar de trabajo y aguas circundantes porque el producto es libre de álcalis.
- Considerable reducción del rebote.
- Mejora la adherencia a la roca y hormigón, haciendo más fácil la aplicación sobre cabeza.
- Libre de cloruros, por lo tanto no ataca al hierro de refuerzo.

**b) SIKAFUME:** es un aditivo en polvo basado en la tecnología sílica. Contiene partículas reactiva de dióxido de sílice extremadamente finas (0.1  $\mu\text{m}$ ). La presencia de SikaFume otorga una gran cohesión interna y retención de agua, permitiendo una mayor estabilidad de

la mezcla fresca. Los porcentajes utilizados fueron del **10%**.

En el hormigón endurecido, la reactividad latente de la microsilice forma enlaces químicos con la cal libre del cemento, produciendo una matriz mucho más densa, resistente e impermeable. No contiene cloruros ni otras sustancias dañinas para el hormigón.

Entre los usos más importantes están:

- Hormigón de alta resistencia.
- Hormigón proyectado vía seca y vía húmeda.
- Estructuras en ambiente marino y otros ambientes agresivos.
- Hormigón bombeable.
- Pavimentos y estructuras de alta resistencia al desgaste.
- Morteros y lechadas de inyección.
- Hormigón bajo agua.

Entre las ventajas más importantes que se logra en el hormigón están los siguientes:

- Excelente trabajabilidad.
- Alta cohesión y mínima exudación.
- Incremento de la durabilidad.
- Alta resistencia inicial.
- Alta resistencia final.
- Alta resistencia a la abrasión.
- Alta impermeabilidad.
- Mayor protección contra la corrosión.

c) **SIKA RETARDER:** Es un aditivo líquido retardante de fraguado altamente eficaz. Cumple norma ASTM C 494 como tipo B. Los porcentajes utilizados fueron entre el **0,2-0,3%**.

Sika Retarder se usa como un aditivo retardante en hormigón masivo y estructural donde una extensión controlada de tiempo de fraguado es requerida:

- Grandes volúmenes de hormigón.
- Prevención de juntas frías
- Juntas de construcción sin encofrado.
- Largos recorridos en mixer.
- Condiciones de colocación difícil.
- Temperaturas elevadas.
- Hormigón re vibrado.

Sika Retarder proporciona las siguientes propiedades:

- Tiempo controlado de fraguado.
- Libre de cloruros.
- No ataca el refuerzo.

La proporción de retraso lograda depende directamente de la proporción de dosificación, que a su vez es influenciada por la calidad de cemento y agregados, relación agua/cemento y temperaturas.

En muchos casos es aconsejable llevar a cabo ensayos con mezclas para establecer el porcentaje de la dosificación exacta requerida.

- Sika Retarder es compatible con todos los tipos de cemento Portland.
- Sika Retarder no debe usarse con agentes anticongelantes.
- Sika Retarder Líquido debe ser distribuido directamente en el agua de la mezcla o adicionado simultáneamente dentro del mixer.

**d) SIKAMENT N 100:** es un aditivo líquido, color café, compuesto por resinas sintéticas. Súper plastificante, reductor de agua de alto poder y economizador de cemento. No contiene cloruros. Los porcentajes utilizados fueron de **1,2%**.

Sikament-N 100 tiene tres usos básicos.



- **Como súper plastificante:**

Adicionándolo a una mezcla de consistencia normal se consigue fluidificar el concreto o mortero facilitando su colocación y su bombeabilidad en elementos esbeltos densamente armados y en la construcción de estructuras civiles prefabricadas.

Permite recuperar el asentamiento del concreto premezclado sin alterar sus tiempos de fraguado ante demoras en la colocación del mismo.

- **Como reductor de agua de alto poder:**

Adicionándolo disuelto en la última porción del agua de amasado permite reducir, de acuerdo con la dosis usada, hasta un 30% del agua de la mezcla, consiguiéndose la misma manejabilidad inicial y obteniéndose un incremento considerable de las resistencias a todas las edades. Sikament-N 100 es ideal para la elaboración de prefabricados y concretos de altas resistencias finales.

Mediante su uso la impermeabilidad y durabilidad del concreto o mortero se ven incrementadas notablemente.

- **Como economizador de cemento:**

Se puede aprovechar la reducción del agua lograda, para disminuir el contenido de cemento y hacer más económico el diseño de las mezclas especialmente aquellas de consistencia fluida como bombeables.

El Sikament-N 100 puede ser usado como súper plastificante en concretos elaborados con adiciones de microsilica. El Sikament-N 100 proporciona los siguientes beneficios tanto en el concreto fresco como en el concreto endurecido.

Como súper plastificante:

- Mejora considerablemente la trabajabilidad de la mezcla.
- Facilita el bombeo y colocación del concreto a mayores alturas y a distancias más largas.

- Disminuye el riesgo de hormigueros en el concreto de estructuras densamente armadas y esbeltas.
- Mejora considerablemente el acabado del concreto y reproduce la textura de la formaleta.
- Se puede emplear para recuperar el asentamiento perdido en el concreto premezclado ya que no retarda el fraguado del mismo en climas medios y fríos.
- Evita la segregación y disminuye la exudación del concreto fluido.
- Disminuye los tiempos de vibrado del concreto.

Puede redosificarse el material hasta completar una dosis del 2% del peso del cemento sin alterar la calidad.

- **Como reductor de agua de alto poder:**

Entre las principales características están:

- Aumenta la resistencia inicial del concreto hasta un 80% aprox.

- Incrementa la resistencia final del concreto en un 40% aprox. a los 28 días de edad.
- Reduce considerablemente la permeabilidad del concreto, aumentando su durabilidad.
- Densifica el concreto y mejora su adherencia al acero de refuerzo.
- Reduce en alto grado la exudación y la retracción plástica.
- Gran economía en los diseños por la reducción de cemento alcanzable.

### 3.3.5. Ensayos realizados

Para el control de la correcta ejecución de los trabajos podrán tomarse muestras del hormigón (según norma **AASHTO Ensayos de hormigón fresco-Toma de muestras**) para la realización de los siguientes ensayos:

- Consistencia según INEN-GP 22, ASTM - C143.

- Obtención, preparación y ensayo a compresión o tracción de probetas testigo para hormigón proyectado según ASTM C39.
- Determinación del contenido de fibras de acero INEN PRO 1855.

Para el control de la correcta ejecución de los trabajos realizados podrán realizarse los siguientes ensayos:

- Determinación del tiempo de fraguado
- Determinación del rechazo.
- Determinación de la resistencia a compresión “in situ”.
- Resistencia a compresión a edades tempranas, ASTM, CI72, CI92, C31 y C39.

### **3.4. Acero de Refuerzo**

Uno de los rubros de mayor importancia en el túnel San Eduardo fue el acero de refuerzo, debido a la gran importancia que este tiene en los elementos estructurales.

Cabe anotar que durante la construcción de los túneles, el acero de refuerzo estuvo presente en varias etapas, principalmente como elemento de sostenimiento y refuerzo que cubre los esfuerzos cortantes y tensores que se podrían presentar en caso de un evento sísmico.

#### **3.4.1. Pernos de anclaje**

En la construcción de túneles en la actualidad, los métodos y sistemas constructivos consideran y recomiendan dar un sostenimiento del túnel inmediatamente después que se realiza la perforación, debido a la descompresión del núcleo rocoso y de los esfuerzos que se presentan después de la perforación.

Uno de los pasos que primero se realiza en el sostenimiento del túnel es el uso de pernos de anclaje, las características de los pernos son considerados en el diseño, como longitud, diámetro,

resistencias, colocación y ubicación, etc. En la figura 3.6 se indica las características de los pernos de anclaje.

En el túnel San Eduardo los pernos de anclaje fueron muy utilizados en el proceso constructivo, cuyas características se detallan a continuación:

- Longitud de 4 a 6 metros
- Diámetro de 25 milímetros
- Resistencia a la tracción de 15 Toneladas (300 MPa)



Figura 3.6. Pernos de anclaje.

### 3.4.2. Mallas de acero

La presencia de elementos de hormigón armado en el túnel, llevo a la necesidad de colocar acero de refuerzo. Debido a los diseños y a las características del hormigón utilizado, se utilizó mallas de acero.

Las mallas de acero se utilizaron en la estabilización de los taludes de los portales de los túneles y en el sostenimiento de los mismos, para dar mayor resistencia a los esfuerzos cortantes al hormigón proyectado que se colocó. Las dimensiones de la malla de acero fueron de 150 x 150 x 7 mm, con resistencia a la tracción de 420 MPa.

Además cabe destacar que también se utilizó arcos metálicos cada 1 m, este acero fue de características tipo W de alma llena, acero A 36, que le dieron al túnel una mayor resistencia a los esfuerzos presentes en este tipo de construcción. La figura 3.7 indica el tipo de malla de acero utilizada.





Figura 3.7. Mallas de acero.

### **3.5. Protección del Hormigón**

Uno de los problemas que se presentan en obras subterráneas, es la presencia de filtraciones y sub-presiones, que suelen ser un problema para la estructura del túnel, ya que pueden contener elementos químicos que corroen el hormigón. Este y otros problemas que se presentan por las filtraciones de agua son solucionados por diversas técnicas, utilizando diversos materiales, que ayudan a minimizar los efectos producidos por la presencia de las filtraciones en la estructura del túnel.

En el caso del túnel San Eduardo, las soluciones que se adoptaron para evitar los problemas mencionados, fue en primer lugar la utilización de aditivos que mejoraban la impermeabilidad del hormigón proyectado que se utilizó como recubrimiento del túnel.

Pero para precautelar la estructura del sostenimiento del túnel, que fue de hormigón armado, se utilizó una capa impermeable entre el recubrimiento y el sostenimiento final del túnel.

Esta capa consistió en una membrana de PVC y un GEOTEXTIL, que da la impermeabilidad al túnel y canaliza las infiltraciones hacia el sistema de conducción de aguas del túnel. El PVC además de conducir las aguas, da la protección al geotextil de la superficie irregular del recubrimiento del túnel. La figura 3.8 muestra la tarea de colocación de la geomembrana.



Figura 3.8. Colocación de membrana impermeable.

El geotextil compuesto por tejidos de filamentos continuos 100% poliéster unidos por agujado, absorbe gran parte de los esfuerzos mecánicos que actúan sobre la membrana impermeable, aumentando su resistencia a la tracción, al rasgado y en especial al punzonamiento.

Para la colocación, la unión entre paños puede efectuarse por termo fusión manual o automática, o por soldadura química. Los paños incluyen una banda de 5 cm libre de geotextil a fin de

facilitar su solape y unión. La figura 3.9 indica el proceso de impermeabilización del túnel.

En el control de calidad de la membrana, se realiza ensayos de Tracción (ASTM D 4632), Elongación (ASTM D 4632), Punzonamiento y Rasgado.



Figura 3.9. Impermeabilización del túnel.

### **3.6. Encofrados**

La complejidad e importancia de la obra, que dentro de sus diseños estaba la construcción del sostenimiento definitivo del túnel constituido por hormigón armado colocado en obra. Esto implicaba que para poder dar la forma de diseño, se tenía que utilizar una estructura provisional que solucione este requerimiento.

La estructura principal se llama encofrado y se caracteriza por ser una estructura provisional, que constituye en el molde que da la forma a la obra, puede ser de varios materiales como madera o metálico como los más importantes.

El encofrado que se requería no podía ser el tradicional por sus altos costos que implicaría su construcción, por esto, la solución fue la construcción del encofrado en estructura metálica, que consistió en encofrado tipo arco metálico. La figura 3.10 muestra la estructura metálica que se utilizó como encofrado en la construcción de los túneles.



Figura 3.10. Encofrado del revestimiento del túnel.

### 3.7. Iluminación y Ventilación

Por disposiciones y normas internacionales todo túnel debe tener un correcto y eficaz sistema de iluminación y ventilación, por ello es muy importante el uso de materiales adecuados para un correcto funcionamiento y que de el servicio eficiente a los usuarios del Túnel.

Por ello en el Túnel San Eduardo se utilizó una variedad de materiales como cables eléctricos, de comunicaciones, materiales de ductos de ventilación, de tendido eléctrico y conexiones varias tanto subterráneas como suspendidas en el techo del túnel.

El túnel consta de los siguientes sistemas:

SISTEMA DE ILUMINACIÓN

SISTEMAS DE MEDICIÓN DE AIRE

SISTEMA DE VENTILACIÓN

SISTEMA DE CABLEADO

SISTEMA DE CONTROL Y SUPERVISIÓN

SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO.

### **3.7.1. Ventilación del Túnel**

El tráfico en una sola dirección produce en caso de un flujo libre en ambos ductos del túnel, siempre una ventilación longitudinal

natural suficiente a través del efecto pistón, de tal manera que por regla general no debe ponerse en funcionamiento la ventilación mecánica.

Solamente en caso de tráfico muy lento o de congestionamiento, será necesario poner en funcionamiento los ventiladores de propulsión con ventilación longitudinal. Los ventiladores se necesitan también para la evacuación de humos en caso de incendio. Los ventiladores son fabricados con silenciadores de acero anticorrosivo.

La figura 3.11 muestra una vista de la colocación de los sistemas de ventilación artificial de los túneles.





Figura 3.11. Colocación de sistema de ventilación.

### **3.7.2. Evacuación de humos**

En caso de incendio, los ventiladores de propulsión soplan el humo y los gases provocados por el incendio hacia el portal de salida, para evitar una propagación en dirección a los congestionamientos de vehículos.

Los ventiladores deben ser termoestables y en caso de temperaturas de 250 °C funcionar más de 90 minutos. En cada ducto del túnel probablemente serán necesarios 12 ventiladores de propulsión, ubicados cada uno a una distancia de 100 m, montados al techo del túnel. La potencia de cada ventilador es de aproximadamente 22 Kw.

Los ventiladores están dotados de aspas asimétricas, de tal manera de conseguir un buen impulso/rendimiento en la dirección principal de impulso. Estos están equipados con convertidores de frecuencias para regulación de velocidad y para el control de las diferentes corrientes de aire en casos de congestionamiento e incendio.

Los convertidores de frecuencia también sirven para el arranque suave de los ventiladores. En caso de incendio se cambiará, el sentido de rotación de los ventiladores en el ducto paralelo, de tal manera de evitar el retroceso de los humos y de los gases inflamables, al lado de los portales.

### **3.7.3. Ventilación de las salidas de emergencia.**

Las tres galerías de conexión entre los ductos paralelos tienen puertas especiales de escape, comportándose éstas como puertas esclusa, con ventiladores axiales para la ventilación con aire fresco comprimido proveniente del ducto del túnel libre de humo.

### **3.7.4. Climatización de las salas de operación**

Cada sala de operación recibe aparatos de aire acondicionado independientes para la regulación de la temperatura del ambiente, a un máximo de 25 °C y una humedad ambiental del 50%.

### **3.7.5. Instrumentos de medición de aire**

En cada uno de los ductos del túnel se instalaron los siguientes detectores para el control de ventilación del túnel y evacuación de humos:

- Tres analizadores electro-químicos de gas Monóxido de carbono (CO), para el control de la concentración de CO.
- Tres Medidores de opacidad del aire para controlar el alcance de la visibilidad en el túnel con medidores de dispersión de luz.
- Tres Medidores con ultra sonido de la velocidad de circulación de aire para determinar la corriente de aire.

### **3.7.6. Detectores de incendio**

En cada ducto de túnel se instaló un cable de detector lineal de incendios. Para reconocer rápidamente un incendio y tener el

control de ocurrencia, todos los medidores de aire tienen funciones adicionales:

- Contenido de CO del gas inflamable (Analizador de gas)
- Contenido de humo del gas (Medidor de opacidad)
- Temperatura del gas (Medidor de velocidad)
- Alarmas manuales se colocarán cada 150 m. en las estaciones de emergencia.
- Los humos serán también detectados por el control mediante video-cámaras.

# CAPÍTULO 4.

## 4. PROCESO CONSTRUCTIVO.

### 4.1. Introducción.

En la antigüedad los túneles se excavaban con secciones pequeñas, entibadas con madera, utilizando picas y cuñas para arrancar el terreno, ampliando poco a poco la sección. En el siglo XIX se produce un gran empuje en la actividad tunelera que llega hasta nuestros días, con la perforación de importantes túneles ferroviarios en los Alpes y

otros lugares montañosos de Europa y América. En este sentido, existen algunos métodos para la construcción de túneles, que varían en su proceso constructivo.

La mayoría de los túneles se construyen para salvar un obstáculo natural y permitir el acceso a vías de comunicación para transporte urbano (metros), transversales y conducciones; o para unir islas o estrechos y para pasos fluviales, en cuyo caso el trazado se efectúa bajo una lamina de agua. Las excavaciones subterráneas están estrechamente relacionadas con la energía y los recursos minerales (aprovechamientos hidroeléctricos, centrales, explotaciones mineras, almacenamientos subterráneos, entre otras.).

El aprovechamiento del espacio subterráneo constituye en la actualidad una de las alternativas más idóneas para el desarrollo de vías rápidas de comunicación. A pesar de su mayor costo con respecto a otras soluciones de superficie, presenta cada vez mayores ventajas, tanto desde el punto de vista medio ambiental como funcional (acortamiento de distancias, seguridad, menor impacto ambiental, etc.).

Los túneles son de las obras de ingeniería una de mayor dificultad, tanto su proyecto como su construcción. Esta dificultad depende en gran medida de la longitud y sección del túnel, del terreno a atravesar y de las condiciones hidrogeológicas.

Dentro de la amplia variedad de usos del espacio subterráneo, gran parte de los túneles se excavan para infraestructuras del transporte, basándose su diseño en la seguridad y la economía.

En este capítulo se presentara el método que se utilizó en el proceso constructivo de los “Túneles del Cerro San Eduardo”, los diferentes pasos a seguir en la construcción de dicho túnel y la maquinaria utilizada.

#### **4.2. Estudios Preliminares.**

Las investigaciones geológicas de los túneles son, en general, más costosas que en otras obras de ingeniería civil. Sin embargo, el no



dedicar suficientes medios a estos estudios puede conducir a situaciones imprevistas. Cuando el terreno no se investiga, el terreno es un riesgo.

En etapas de factibilidad e ingeniería básica, deben hacerse una serie de estudios geológicos y geotécnicos, como por ejemplo:

- **Sondeos a rotación**

Los sondeos a rotación pueden perforar cualquier tipo de suelo o roca hasta profundidades muy elevadas y con distintas inclinaciones. La profundidad habitual no excede los 100 metros, aunque pueden alcanzarse los 1,000 metros. La extracción de testigos es continua y el porcentaje de recuperación del testigo con respecto a la longitud perforada puede ser muy alto, dependiendo del sistema de extracción.

### ■ Inspecciones visuales

Las inspecciones visuales consisten en la visita de los técnicos respectivos, para la verificación y corroboración de los diferentes datos obtenidos mediante los métodos de estudio aplicados al terreno, como fotografías aéreas, planos cartográficos, entre otros.

La figura 4.1 muestra los testigos obtenidos en una de las perforaciones para su posterior análisis en laboratorio.



Fig.4.1 Muestra de los sondeos (S – 6).

### ■ **Análisis de los sondeos**

En el análisis de los sondeos, se estudia detalladamente los testigos obtenidos en los sondeos, registrando los siguientes datos:

Básicos: proyecto, nombre y número de referencia, localización, número de sondeo, coordenadas, inclinación y orientación, fecha, contratista, supervisor y sondista.

Método de perforación: máquina, tipo de perforación, diámetro, características de los útiles de perforación, tipos de lodos (si se emplearan), tipo de circulación (directa o inversa) y otras características técnicas.

Progreso de perforación: maniobras, metros de avance, velocidad de avance, resistencia al avance, recuperación, pérdidas y filtraciones de fluidos, inestabilidades de las paredes, averías, niveles freáticos, número de golpes para la hincada de las muestras, ensayos realizados.

### ■ **Elaboración de informe geológico.**

Se basa en la descripción del análisis de los sondeos realizados en el campo, detallando con precisión la calidad de la roca, su estratigrafía, grados de meteorización, etc.

Generalmente se describen los problemas encontrados en las muestras tomadas y las soluciones que se deben tomar en cuenta para llevar a cabo una excavación segura y un adecuado sostenimiento. Ya que si no se toma en cuenta las soluciones que se muestra en el informe, se corre el riesgo de que en cualquier momento falle la masa rocosa en lugares que no se tomaron las medidas pertinentes.

### ■ **Estudio de resultados obtenidos**

Se deberán analizar los resultados obtenidos de los sondeos, en los diferentes lugares que se realizaron, con el fin de establecer la clase de excavación y sostenimiento que se utilizara para cada avance en la fase de construcción.

### ■ Ejecución de informe geotécnico

En el informe geotécnico muestra las características resistentes del macizo rocoso, así como las principales dificultades geotécnicas y las soluciones propuestas para afrontar con éxito la ejecución de la obra.

En la ejecución del informe geotécnico se realizan todos los procedimientos ingenieriles necesarios para cumplir con lo que especificado en el informe geotécnico.

### ❖ Geología del Trazado del túnel.

Para la definición del trazado de un túnel, deben considerarse diversas características geológicas:

- Tipos de roca y sus propiedades.
- Orientación de discontinuidades respecto al eje del túnel, influye en la dificultad para la de excavación y sus condiciones de estabilidad.
- Condiciones favorables es que discontinuidades manteen hacia el sentido de avance de la excavación.
- Presencia de fallas, su orientación y espesor.

### ❖ **Condiciones de aguas subterráneas.**

La roca puede contener agua en su matriz o en las fracturas, a diversas condiciones de presión que dependen de la profundidad.

Las rocas muy fracturadas o permeables, como areniscas o calizas son especialmente importantes. También puede haber bolsones de gravas o rocas más permeables. Antes de la construcción se debe determinar la ubicación y cantidades de agua. Los costos suben al menos 20% por necesidad de soporte impermeable y drenaje.

Ante flujos altos, puede bajarse el nivel general del agua o tratar el suelo (ejemplo el congelamiento).

### ❖ **Sectorización geotécnica.**

A partir de una sección en que se proyecta la geología de superficie, más información de sondajes y ensayos de laboratorio, se asigna una clasificación de macizo rocoso o calidad de roca a los distintos sectores a lo largo del túnel (o porcentajes dentro de cada uno).

Luego se suman en km los sectores de igual calidad, determinando % de calidades de roca.

#### ❖ **Estabilidad**

La estabilidad será tomada en cuenta en el exterior como interiormente, en el caso de los túneles del cerro San Eduardo, tanto en el lado sur como en el norte se utiliza el hormigón proyectado (hormigón de un tamaño de 12 milímetros, mezclado con cemento, agua y aditivos).

La figura 4.1 muestra el proceso de estabilización de taludes mediante el uso de hormigón proyectado, mallas de acero y pernos de anclaje.



Fig.4.2 Estabilización de Taludes.

Este material, facilita el bombeo y el fraguado rápido. “Se lo llama hormigón proyectado porque pasa por la máquina PM 500 (robot de Gunita) que tiene la particularidad de mezclar el hormigón con aire a la salida y lo lanza con mucha presión hacia la pared”.

La excavación requiere de un sostenimiento. En el lado sur de los túneles San Eduardo, ubicado en el cerro del mismo nombre; en el norte (av. Carlos Julio Arosemena) se trabaja en la preparación del portal para el frente de acceso.



Por cuestiones de estabilidad del terreno, no se puede comenzar la construcción del túnel sin una preparación previa. En esta etapa se hacen los taludes (se saca parte de la tierra o roca de pendientes o laderas) para dejar el área en condiciones idóneas para el paso de los obreros.

En el talud o ladera, se recomienda dejar bermas (especie de escalones), para evitar que este tenga mucha altura y así mejorar la estabilidad del terreno. Para la construcción previa del talud y las bermas, en la roca se colocan mallas electro soldadas, la cual se compacta en la pared con el hormigón.

Una vez que se concluya la elaboración de los portales se construirán las viseras que tienen la función de dar al túnel estabilidad previa y garantizar la continuidad del sostenimiento (firmeza) de la estructura.

La visera, aclara, está formada por cerchas (perfiles metálicos HEB 100, curvados con la forma del túnel) que se colocan en forma de costillas a un metro de distancia cada una, a la entrada del túnel. “Los primeros 20 metros excavados de cada uno de los túneles, es decir,

sus cuatro frentes, contarán sistemáticamente con el sostenimiento de las cerchas”.

❖ **Geotecnia de portales.**

El portal, es la excavación previa que se hace para entrar en el túnel. “Son como los portales de las casas”. Y esta obra también necesita un estudio previo de la clase de roca y discontinuidades para realizar una estabilidad inicial para comenzar la construcción de los túneles.

❖ **Geotecnia para obras anexas.**

También se debe conocer bien geotécnicamente hablando el lugar cercano a los túneles, para poder construir con seguridad las obras que sirven de ayuda al mejor desarrollo del túnel, tanto en la parte eléctrica como sanitaria y ambiental.

### **4.3. Métodos Constructivos.**

Con la ayuda de la tecnología, el trabajo de la ingeniería se facilita un poco, ayuda a minimizar problemas futuros, tiempo de ejecución y control. Debido a estos aspectos podemos citar algunos métodos de construcción de túneles que son utilizados en todo el mundo:

- Medios mecánicos
- Perforación y voladura
- Tuneladora TBM
- Rozadora

Para tomar la decisión de utilizar cada uno de estos métodos, dependerá de algunos criterios tales como:

- Longitud del túnel
- Sección del Túnel
- Calidad del macizo rocoso
- Ubicación y entorno (medio ambiente)
- Experiencias anteriores

#### 4.4. Fase Constructiva.

Antes de continuar con la parte constructiva de los “Túneles del Cerro San Eduardo”, se mostrara gráficamente las partes de de la sección de un túnel, para una mejor comprensión en la explicación de las diferentes actividades que se citaran a continuación.

La figura 4.3 indica la sección típica del túnel contenida en el proyecto.

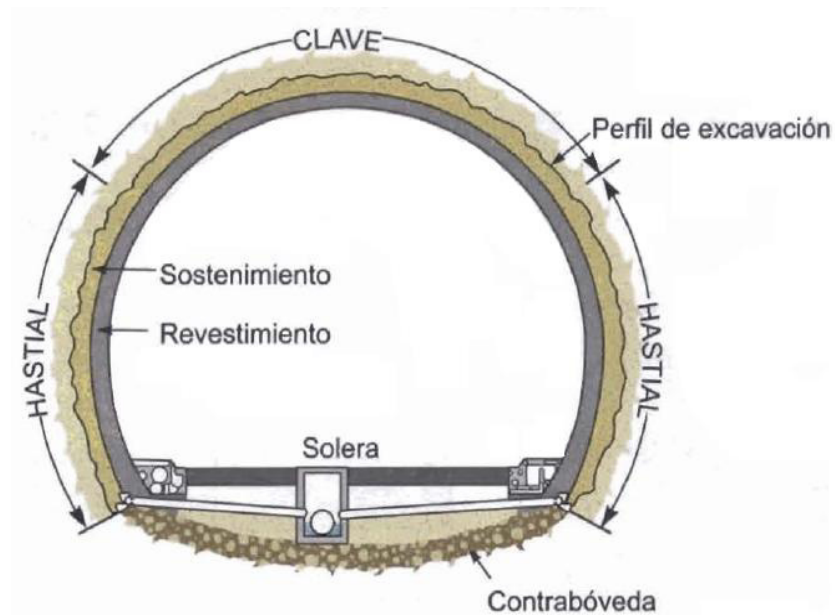


Fig.4.3 Sección de un Túnel.

Como se visualiza en la fig.4.3, la parte superior del túnel se la conoce como clave, sus lados o partes laterales, hastiales y la parte de abajo o por donde pasaran los vehículos se la llama solera.

En la fig.4.4 se muestra las áreas de trabajo de excavación de las cuales se compone un túnel. Estas son la calota y destroza; la calota como se muestra en la figura antes mencionada, es la parte superior en el interior del túnel, la cual es excavada primero en el caso de los túneles del cerro San Eduardo. La destroza es la parte inferior del interior del túnel, la cual se realiza la excavación después de la calota.

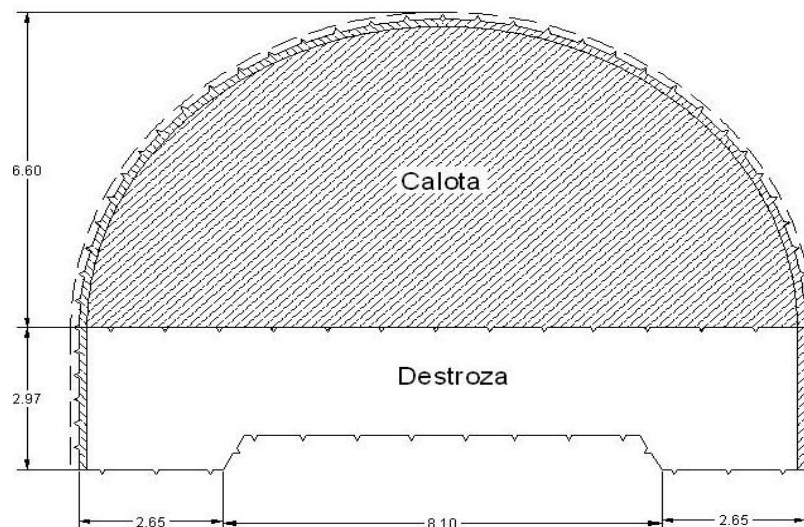


Fig.4.4 Áreas de trabajo de excavación del Túnel.

#### **4.4.1. Método Utilizado en la Construcción de los Túneles.**

Para la construcción de los “Túneles del Cerro san Eduardo”, se utilizo el método constructivo para túneles llamado NATM (Nuevo Método Austríaco), constituye un procedimiento especial de construcción de túneles, desarrollado en Austria por Rabcewicz y otros, en los años cuarenta, en base a observaciones sobre el comportamiento geológico de los macizos rocosos y las relaciones entre las deformaciones radiales y los sostenimientos. Es aplicable en todo tipo de terrenos, incluyendo los blandos y con escasos recubrimiento.

Sus principios básicos se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Aplicación inmediata de un sostenimiento provisional semirrígido de hormigón proyectado, bulones y excepcionalmente cerchas.
- Auscultación y medidas in situ de deformaciones/tiempos (medidas de convergencia).
- Eventual refuerzo del sostenimiento.

- Construcción de un revestimiento definitivo en función de la información anterior obtenida.

El principio del NATM es lograr que el terreno que rodea a la excavación actúe como un anillo portante, llegando a construir un elemento fundamental de sostenimiento activo. Por lo tanto, se deben reunir las siguientes condiciones:

1.- Evitar la meteorización y la descompresión de la masa rocosa, ya que estos procesos reducen considerablemente la resistencia al corte. Se aplica de forma inmediata hormigón proyectado o gunita a la superficie excavada en toda la sección.

2. Las rocas diaclasadas son muy sensibles a los esfuerzos uniaxiales, por tanto, como complemento gunita, se instalan bulones.

3. Cada cambio o reajuste en el estado de tensiones del macizo crea perturbaciones y roturas en la roca circundante a la excavación. Por ello se debe excavar, a ser posible, a sección

completa, y evitar excavaciones parciales o al menos reducirlas a un máximo de tres.

4. Puesto que el anillo de la roca que circunda a la excavación debe ser lo más resistente posible, se debe evitar la concentración excesiva de tensiones en esas secciones; en consecuencia, se debe evitar las esquinas y salientes prominentes, adoptando secciones redondeadas, especialmente en los pies de las excavaciones parciales.

5. La construcción de un túnel no debe ser considerada estáticamente como una estructura tipo arco sino como un tubo. Un tubo tiene mucha mayor capacidad portante, pero actúa como tal únicamente si está cerrado en toda su sección. Por lo tanto siempre que se trate de excavar un terreno de mala calidad, se deberá cerrar la solera con una contra bóveda, procedimientos similares.



6. Es preciso llevar a cabo el control de las deformaciones y de los sostenimientos a lo largo del tiempo durante la excavación, así como una asistencia técnica especializada. Para medir estas deformaciones se utilizaron extensómetros y celdas de presión con medidas a convergencia.

#### **4.5. Ejecución de la Fase Constructiva.**

En la parte constructiva de este método se estableció una programación adecuada, para un mejor desempeño de la maquinaria, materiales y mano de obra. Teniendo los siguientes pasos de construcción:

- Portales
- Avances en Calota
- Avances en Destroza
- Impermeabilización
- Revestimiento
- Instalaciones definitivas

#### **4.5.1. Portales (Fase Constructiva)**

Cuando hablamos acerca de portales nos referimos a la parte frontal de los túneles, es decir en la entrada y salida del túnel, cuando recién comenzamos a excavar para darle forma a nuestro túnel. La figura 4.5 muestra la vista frontal del portal norte de los túneles.

El segmento túneles comienza en el Portal Norte ubicado en la Abs 0+485 (Cota eje: 27.91 msnm) y termina en la Abs 1+780 (Cota eje: 79.07 msnm) donde estará ubicado el Portal Sur. Por lo tanto, este segmento queda definido en 1295 metros con una pendiente longitudinal de 3,95%.

La figura 4.5 muestra la vista frontal del portal norte de los túneles y en la figura 4.6 muestra la vista frontal del portal sur.

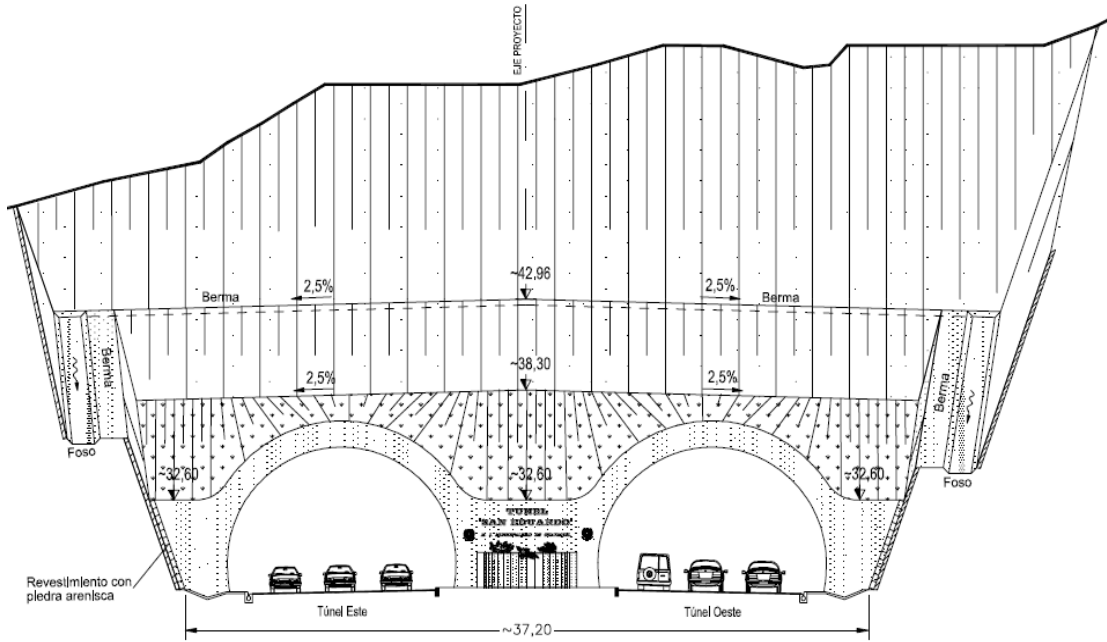


Fig. 4.5. Vista Frontal - Portal Norte.

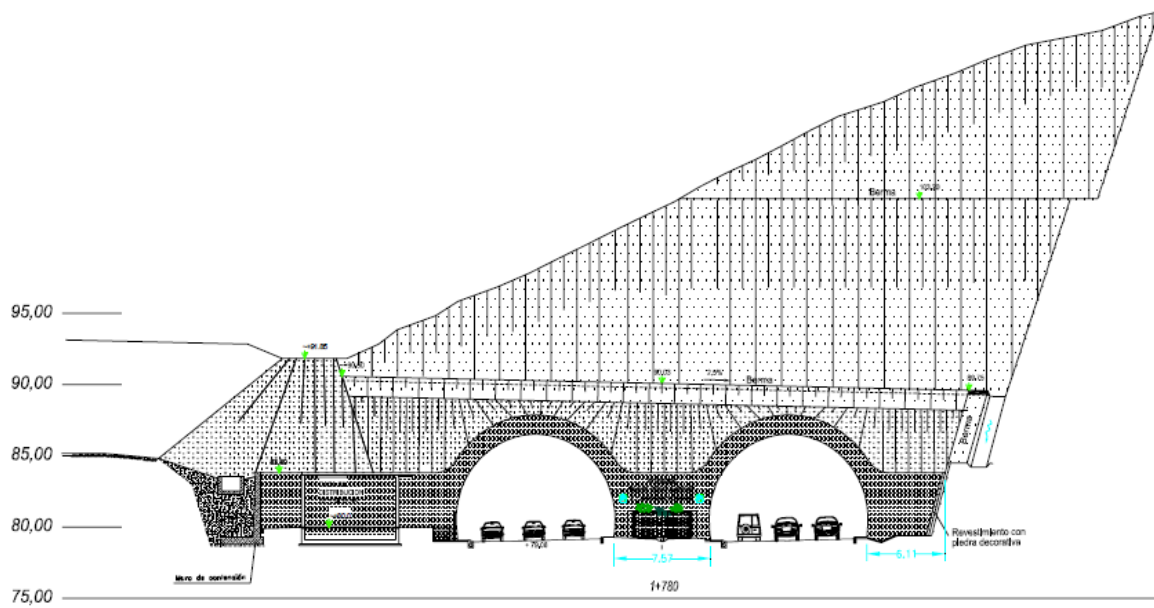


Fig.4.6 Vista Frontal - Portal Sur.

#### **4.5.1.1. Portal Norte - Sostenimiento Externo (Fase Constructiva).**

El sostenimiento externo se realizo antes de comenzar con la excavación de los túneles, debido a que el macizo rocoso tenía que soportar alteraciones, y naturalmente no soportaría sin una buena estabilización del mismo. La figura 4.7 indica la colocación del sostenimiento externo de los portales de los túneles.

La estabilización consistió en pernos 6 m de largo y con un diámetro de  $\varnothing$  25 mm, hormigón lanzado e= 15 cm, malla electro soldada de 150x150x8 mm.

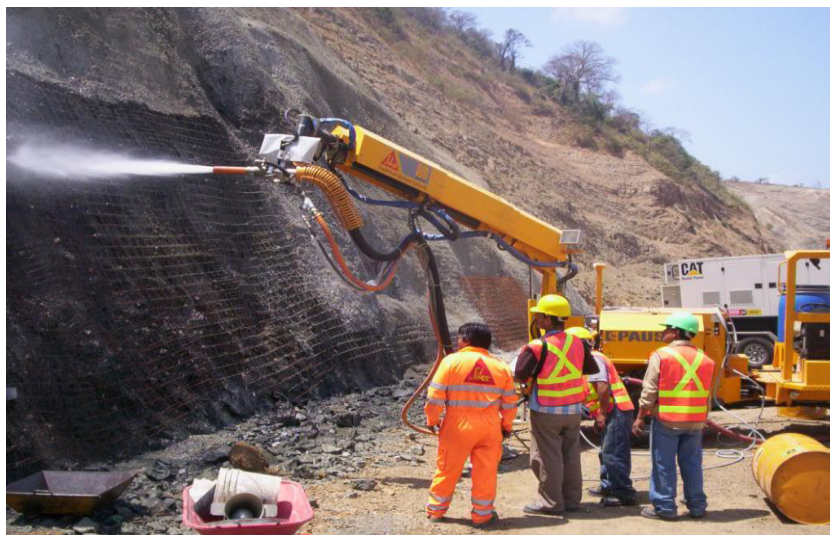


Fig.4.7 Malla Electro soldada y Hormigón lanzado.

#### 4.5.1.2. Portal Norte - Sostenimiento Primario (Calota).

En los túneles del Portal Norte se realizó antes de la excavación un soporte primario, que consistió en la colocación de tubos de acero en forma perimetral alrededor de cada túnel, que tiene la función como la de un paraguas en el clave, este soporte actúa como sostenimiento preventivo en caso de la descompresión de la roca en el momento de la excavación y es temporal.

Los tubos que componen el paraguas tienen una longitud de 12 m y un diámetro de  $\varnothing$  6". Se puede realizar la excavación hasta 9 m en lo largo de los tubos, ya que los otros 3 m restantes, sirven de traslape para la siguiente parte del sostenimiento de la misma forma.

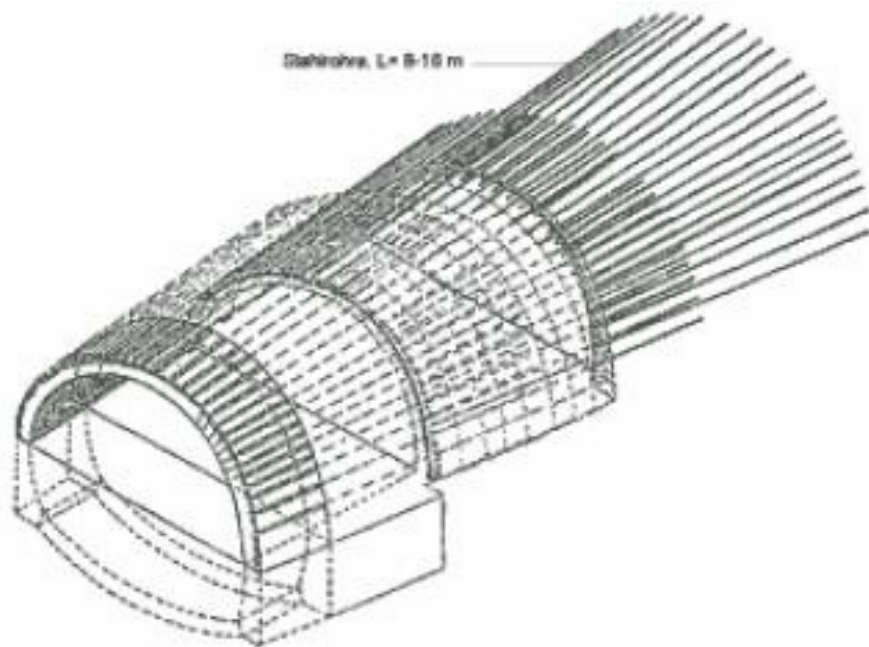


Fig.4.8. Soporte Primario o Paraguas.

#### 4.5.1.3. Fases de Trabajo en Calota – Portal Norte. (Tipo I)

Después del sostenimiento primario (paraguas). Se realiza la primera excavación, en este caso es una excavación mecánica, para retirar el suelo, hasta llegar a la roca dura.

La figura 4.9 indica la fase inicial de las excavaciones en el lecho rocoso del cerro San Eduardo.



Fig.4.9. Excavación Inicial – Portal Norte

- Se retira los escombros de la excavación del primer avance y se coloca inmediatamente el hormigón lanzado con un espesor mayor o igual a 3 cm, en los hastiales y el clave en la parte de la calota.
- Luego se realiza la colocación de la malla de acero exterior.
- Colocación del acero, en caso de ser requerido de acuerdo con el tipo de excavación y sostenimiento adoptado por el constructor basado en la calificación del macizo rocoso.
- Colocación del hormigón lanzado hasta un espesor de 15 cm.
- Colocación de pernos de anclaje.
- Colocación de malla de acero interior.
- Colocación de Hormigón lanzado hasta un espesor de 20 cm.
- Evaluar el macizo rocoso para establecer el tipo de excavación y sostenimiento a utilizar en la próxima excavación.
- Continuar con la próxima excavación.



- Siguiendo excavación: Debido a los estudios realizados al macizo rocoso, después del primer avance se utilizó excavaciones con voladura, debido a que la resistencia de la roca era mayor. Esta excavación consistía en perforar agujeros que luego eran rellenados con explosivos, estos agujeros se los perforaban con una máquina llamada Jumbo, una máquina de tres brazos, robotizada. (Fig.4.10)



Fig. 4.10. Jumbo Tamrock

Después se realiza la detonación de los explosivos, fracturando la roca, dejando una cavidad, estos explosivos

tienen fulminantes para retardar la explosión para que sea en secuencia (Fig.4.11.)

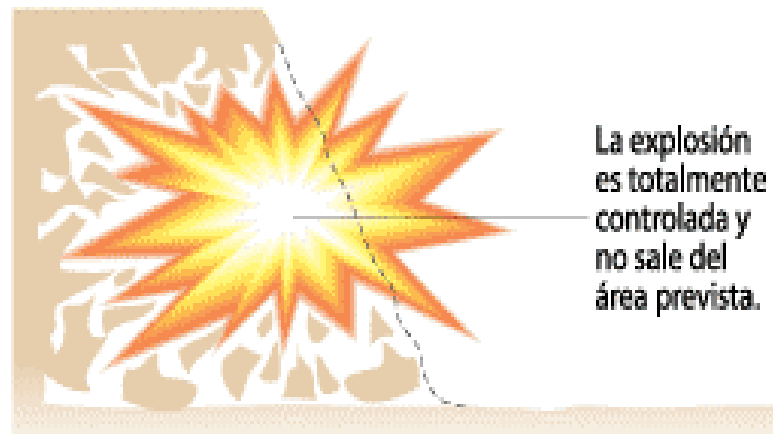


Fig. 4.11. Detonación de Explosivos

Luego se recogen los escombros con una pala mecánica y volquetes para despejar la cavidad. (Ver Fig.4.12)

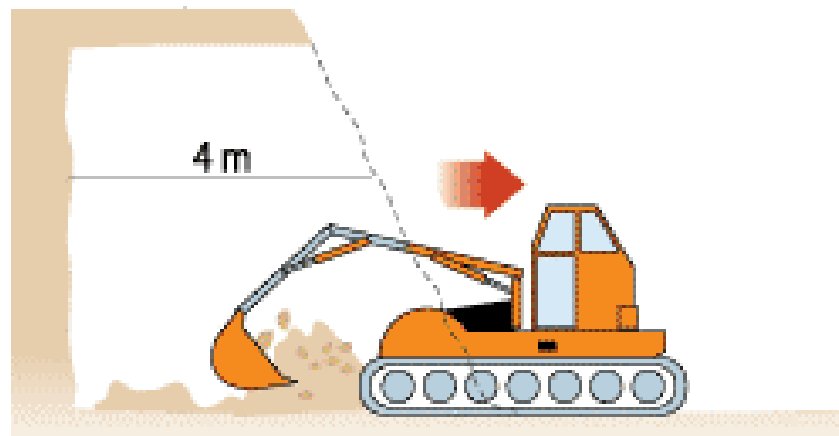


Fig.4.12. Excavadora.

Con la maquina Jumbo Tamrock, se coloca pernos para estabilizar las paredes de los túneles, debido a que la explosión debilita la roca. (Ver Fig. 4.13.)

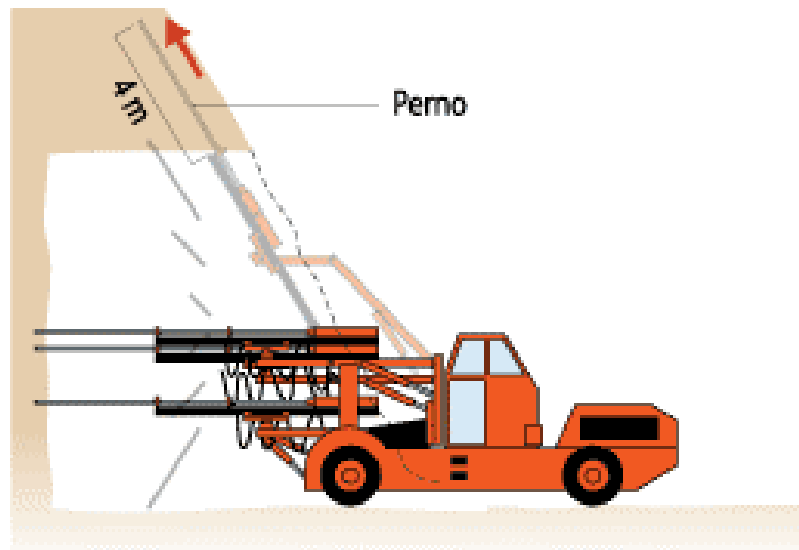


Fig. 4.13. Colocación de Pernos.

Después de haber estabilizado la roca, se coloca hormigón proyectado ya que la roca es sensible a los esfuerzos uniaxiales.

Este hormigón se coloca con una maquinaria con un control manual, que permite al operario estar muy una distancia

segura en el momento de proyectar el hormigón. Ver (Fig. 4.14)

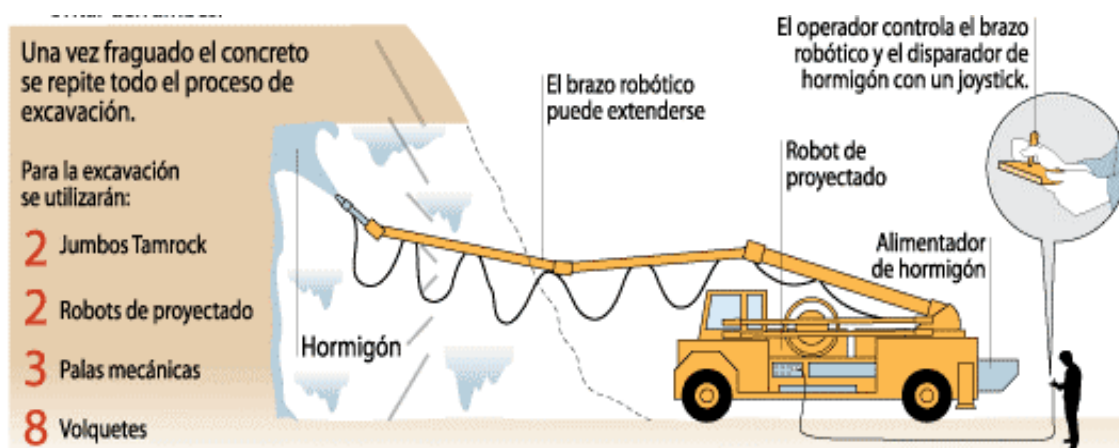


Fig.4.14. Proyectado de hormigón.

#### 4.5.2. Fase Constructiva en Calota - Portal Sur. (Tipo I)

En el portal Sur, la primera excavación se realizó con el proceso de voladura, debido a que el volumen que se retiraría sería mucho mayor, para comenzar estabilizar el terreno y luego darle forma a los túneles. La figura 4.15 muestra la excavación realizada en el portal sur mediante el método de la voladura.



Fig. 4.15. Excavación por voladura – Portal sur.

#### 4.5.2.1. Sostenimiento – Portal Sur.

El sostenimiento de este portal fue grande, debido a que el talud era muy grande. Los pernos que se utilizaron fueron de 6 m de longitud y un diámetro de  $\varnothing$  25 mm. El hormigón lanzado con un espesor de 15 cm y una malla electro soldada de 150x150x8 mm. La figura 4.16 muestra



Fig.4.16. Sostenimiento de taludes- Portal Sur

#### 4.5.2.2. Fases de Trabajo en Calota – Portal Sur.

En el caso del Portal norte, se comenzó con un sostenimiento primario, y después se realizaron las excavaciones siguientes. En cambio en el Portal Sur se comenzó con excavaciones por voladura debido a la dureza de la roca en ese sitio. De ahí que el procedimiento es el mismo que en el Portal Norte.

El procedimiento para trabajar en la calota del Portal Sur es el siguiente:

- Excavación de la calota hasta la distancia del avance.
- Colocación inmediata del hormigón lanzado, hasta un espesor de 3 cm.
- Colocación de la malla de acero.
- Colocación de pernos de anclaje
- Colocación de hormigón lanzado con un espesor de hasta 15 cm.
- Evaluar el macizo rocoso para establecer el tipo de excavación y sostenimiento a utilizar en la próxima excavación.
- Continuar con la próxima excavación.

Las excavaciones por voladura tenían volúmenes hasta 300 m<sup>3</sup>/voladura, estas excavaciones tienen su plan de perforación, se diseña que carga se empleara. El tipo de explosivo que se utiliza es la dinamita encartuchada.

El esquema de las perforaciones que se realizaron para colocar los explosivos (Fig.4.17a.). En la fig.4.17b, observamos las perforaciones realizadas por la maquina jumbo con tres brazos electro - hidráulicos, para luego colocar la carga del explosivo, para obtener nuestro primer avance.

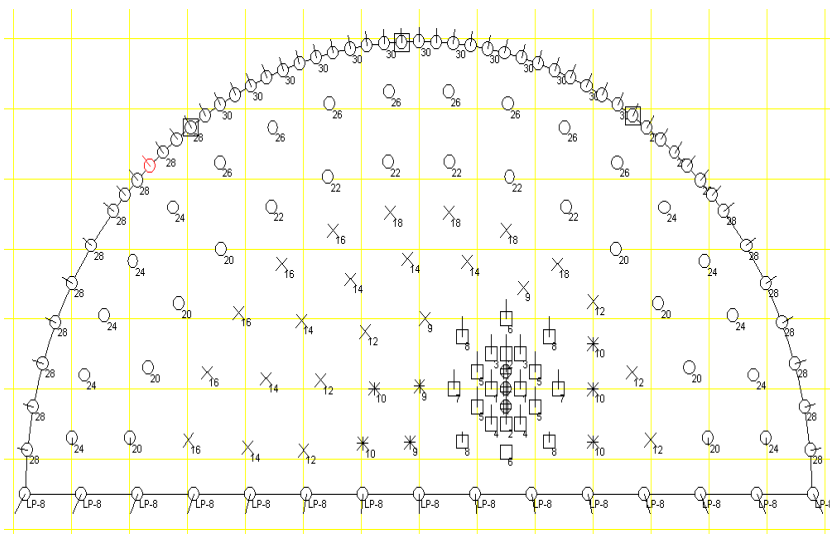


Fig.4.17a. Plan de Perforación para Voladura.

En la fig.4.17c, observamos la colocación de los explosivos con su cable detonante, en las diferentes perforaciones.





Fig.4.17b. Plan de Perforación para Voladura - Macizo Rocoso.



Fig. 4.17c. Ejecución del Plan de Perforación.

#### 4.5.3. Fase Constructiva en Destroza (Portal Norte y Sur).

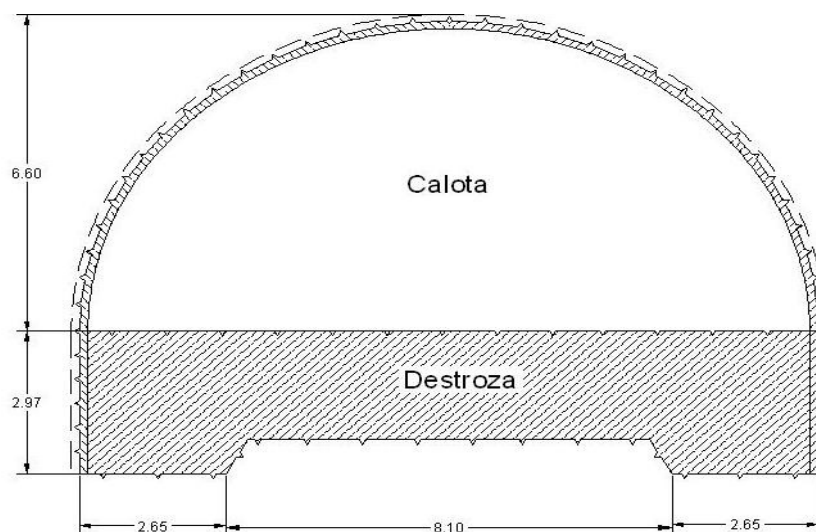


Fig.4.18. Áreas de trabajo de excavación del Túnel - Destroza.

En la parte constructiva de la destroza en todos los túneles se utilizó el mismo procedimiento, dependiendo de la clasificación del macizo rocoso tomada en cuenta en la construcción de la calota.

En la destroza se realizó la excavación de la parte inferior aproximadamente 3 m. El sistema constructivo es similar al de la calota, se duplica el rendimiento y se usa de los mismos equipos.

#### **4.5.3.1. Procedimiento Constructivo en la destroza. (Tipo II).**

1. Excavación de la destroza hasta la distancia del avance.
2. Colocación del hormigón lanzado hasta un espesor de 3 cm.
3. Colocación de la Malla de acero exterior.
4. Alargamiento del arco de acero c/2 arcos.
  - 4.1 Extender el arco hasta el fondo de la destroza.
  - 4.2 El siguiente arco no es extendido,
  - 4.3 Continuar el proceso sucesivamente. (4.1 y 4.2).

Continuando con el procedimiento, después de colocar el arco, seguimos con lo siguiente:

- 1 Colocación de hormigón lanzado.
- 2 Colocación de pernos de anclaje.
- 3 Colocación de malle de acero interior.
- 4 Colocación de hormigón lanzado, hasta un espesor de 15 cm.
- 5 Continuar con la próxima excavación.

#### 4.5.4. Impermeabilización.

Antes de colocar el hormigón definitivo se debe tener una buena impermeabilización del túnel, debido a las filtraciones que existen en el macizo rocoso. Para esto se realizó la colocación de una lámina impermeable en la bóveda del túnel.



Fig.4.19. Geomembrana.

En el clave y hastiales del túnel, fue colocada entre el sostenimiento y el revestimiento, una lámina de PVC más un geotextil, los cuales se encargan de canalizar el agua hasta el sistema de drenaje que se encuentra debajo de la acera.

#### **4.5.5. Revestimientos y Drenaje.**

El hormigón definitivo del túnel, fue colocado con una armadura de acero y en un encofrado en forma de arco. Un hormigón de 30 MPa, fue bombeado con un avance de 12 m de túnel por día.

El drenaje que colecta le agua de las filtraciones del macizo rocoso, se encuentra colocado debajo de la solera, siendo guiada por medio del geotextil, ubicado en la parte del clave y hastiales del túnel, este flujo de agua llega a un medio poroso el cual llaga a la tubería que saca este flujo de agua hacia la parte externa del túnel, esta tubería está conectada con el drenaje de la ciudad. Para lo cual se colocaron tuberías de hormigón, para llegar al colector principal que lleva el agua lluvias de la ciudad de Guayaquil.

El drenaje de la vía es coloca en el lado de pendiente negativa, esto ayuda a coleccionar el agua que exista en la calzada. Esta tubería esta también conectada con el drenaje de la ciudad.

## **CONCLUSIONES.**

1. En un proceso constructivo primordialmente siempre se debe tomarse en cuenta las técnicas, métodos, equipos, el equipo humano y el material que se utiliza en una obra.
2. Los túneles del Cerro San Eduardo son una obra de gran importancia para la ciudad de Guayaquil, ya que se concibió como una solución al congestionamiento vehicular en el Sur-Oeste de la ciudad.

- 3.El túnel es una obra muy compleja desde el punto de vista técnico, donde las especificaciones técnicas debieron ser seguidas, tanto en el proceso constructivo, como en el uso de los materiales específicos en la obra.
  
- 4.El control de calidad en el uso de los materiales fue muy rígido, para que la obra no tenga inconvenientes en su ejecución y en tiempo de vida útil de la misma. Estos materiales fueron sometidos a pruebas tanto en campo como en laboratorio para verificar si cumplen con las especificaciones del proyecto.
  
- 5.Como conclusión final, está que, los controles a los procesos de construcción y al uso de todos los materiales en la construcción de una obra, deben ser los adecuados en el sitio como en el laboratorio, ya que esto podría afectar en el buen desarrollo de una obra.

## **RECOMENDACIONES**

1. Es muy importante tener presente en todo tipo de obras, desde su planteamiento como proyecto hasta su culminación, el proceso constructivo que se llevará a cabo en la ejecución de la obra.
2. El uso de equipo especializado en este tipo de obras y adecuado para la correcta colocación de los materiales en la obra, también deben ser pasados por control de calidad, entre los materiales específicos, el uso adecuado de otro tipo de materiales como aditivos, que son utilizados para mejorar las características de los elementos que conforman la obra.



3. Realizar las perforaciones del macizo rocoso, que nos piden en las especificaciones técnicas es muy importante, ya que nos dará seguridad en el momento de trabajar en el túnel. Y si se necesitaren más perforaciones de las requeridas, se deberá utilizar mucho criterio para dichas perforaciones, pues si gastamos un poco más de dinero en las perforaciones nos ahorraremos a futuro, no solo dinero sino pérdidas que nos costarían mucho más que unas cuantas perforaciones.

4. En toda clase de obras civiles, es muy recomendable realizar una buena programación, ya que nos ayudará a llevar un mejor control tanto en materiales, mano de obra y equipos.

5. Cumplir con todas las normas de seguridad, para evitar accidentes futuros.

## **BIBLIOGRAFÍA.**

Libro Gonzales De Vallejo Luis I. – Ingeniería Geológica – Pearson, Pertice Hall.

<http://html.rincondelvago.com/altimetria.html>.

<http://www.ventilacion->

[tuneles.es/casos\\_practicos/tuneles\\_de\\_cerro\\_san\\_eduardo/resumen\\_ejecutivo\\_del\\_tuneles.pdf](http://www.ventilacion-tuneles.es/casos_practicos/tuneles_de_cerro_san_eduardo/resumen_ejecutivo_del_tuneles.pdf).

<http://www.eluniverso.com/2006/11/20/0001/18/68290D9A2F454CC18C8C72361D1A667E.html>.

[www.edingaps.com\\_productos\\_fibras-de-acero.pdf](http://www.edingaps.com_productos_fibras-de-acero.pdf)

<http://www.sika.com.ec/construccion/cliente/lista.php>

Apuntes de la Materia de Obras Subterráneas, FICT – ESPOL, 2009.

<http://blogs.monografias.com/geologia-peligros-naturales-geotecnologia/2009/09/25/sondeos-geotecnicos-y-calicatas/>