

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN – TACNA

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

**ESTUDIO GEOLÓGICO – GEOTÉCNICO PARA
LA APLICACIÓN DEL MÉTODO NATM EN LA
EXCAVACIÓN Y SOSTENIMIENTO DEL TÚNEL
WAYRASENCCA DEL CORREDOR VIAL
INTEROCEÁNICO SUR,
PERÚ – BRASIL**

TESIS

Presentada por:

Bach. Sméykal Fiorella Córdova Chipó

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO DE MINAS

TACNA – PERÚ

2017

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN – TACNA

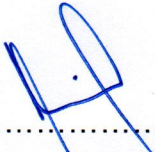
Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

ESTUDIO GEOLÓGICO – GEOTÉCNICO PARA LA APLICACIÓN
DEL MÉTODO NATM EN LA EXCAVACIÓN Y SOSTENIMIENTO DEL
TÚNEL WAYRASENCCA DEL CORREDOR VIAL
INTEROCEÁNICO SUR, PERÚ – BRASIL

Tesis sustentada y aprobada el 06 de diciembre del 2016, estando
integrado el Jurado Calificador por:

PRESIDENTE


.....
Dr. Julio Miguel Fernández Prado

SECRETARIO


.....
MSc. Salomón Medardo Ortiz Quintanilla

VOCAL


.....
MSc. Carlos Huisa Ccori

ASESOR


.....
Dr. Edgar Faustino Taya Osorio

DEDICATORIA

A Dios por permitirme lograr la carrera, a mis padres por todo el apoyo, a Dasha por ser la luz que ilumina mi vida.

AGRADECIMIENTO

Agradezco en primer lugar a mi alma mater, Universidad Jorge Basadre Grohmann, Facultad de Ingeniería, Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, a todos los docentes que durante mis años de estudio y que gracias a su esfuerzo y dedicación a la enseñanza, me supieron ofrecer los conocimientos base para mi desenvolvimiento profesional.

De manera muy especial al Ing. Osmerivaldo de Sá Alves, por su constante apoyo, por haberme brindado la oportunidad de aprender a su lado, como también compartirme sus diversos conocimientos y experiencia en el campo laboral, y a todas aquellas personas que fueron intermediarias para hacer posible el presente trabajo.

CONTENIDO

| Tema | Pág. |
|--|-------------|
| DEDICATORIA | iii |
| AGRADECIMIENTO | iv |
| ÍNDICE DE TABLAS | xii |
| ÍNDICE DE FIGURAS | xiv |
| ÍNDICE DE ANEXOS | xvii |
| RESUMEN | xviii |
| | |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| CAPÍTULO I | |
| PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | |
| | |
| 1.1.Descripción del problema | 3 |
| 1.1.1 Antecedentes del problema | 3 |
| 1.1.2 Problemática de la investigación | 3 |
| 1.2.Formulación del problema | 4 |
| 1.2.1 Problema general | 4 |
| 1.2.2 Problemas específicos | 4 |
| 1.3.Justificación e importancia | 5 |

| | |
|------------------------------------|---|
| 1.4. Alcance y limitaciones | 6 |
| 1.5. Objetivos | 7 |
| 1.5.1. Objetivo general | 7 |
| 1.5.2. Objetivos específicos | 7 |
| 1.6. Hipótesis | 8 |
| 1.6.1. Hipótesis general | 8 |
| 1.6.2. Hipótesis específicas | 8 |
| 1.7. Variables de la investigación | 9 |
| 1.7.1. Variable independiente | 9 |
| 1.7.2. Variable dependiente | 9 |
| 1.7.3. Indicadores | 9 |

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

| | |
|--|----|
| 2.1. Antecedentes del estudio | 11 |
| 2.2. Bases teóricas | 13 |
| 2.2.1. Métodos de excavación | 13 |
| 2.2.2. Excavación del túnel | 14 |
| 2.2.3. Elección del equipo de excavación | 17 |
| 2.2.4. Elección del método de excavación | 22 |
| 2.2.5. Análisis numérico | 25 |
| 2.2.6. El nuevo método tunelero austriaco NATM | 25 |
| 2.2.7. Generalidades del NATM | 28 |

| | | |
|-----------|--|----|
| 2.2.8 | Principios básicos del NATM | 31 |
| 2.2.9 | Interacción excavación - sostenimiento, curvas características | 34 |
| 2.2.10 | Condiciones aplicables del NATM en tipo de roca | 43 |
| 2.2.11 | Comparación del método NATM de otros métodos por medio de costos | 44 |
| 2.2.12 | Metodología adoptada para la excavación del túnel Wayrasencca | 48 |
| 2.2.13 | Estudio histórico | 49 |
| 2.2.13.1. | Ubicación | 50 |
| 2.2.13.2. | Accesibilidad | 52 |
| 2.2.13.3. | Fisiografía y topografía | 54 |
| 2.2.13.4. | Clima | 54 |
| 2.2.14 | Diseño geométrico | 55 |
| 2.2.14.1 | Generalidades | 55 |
| 2.2.14.2 | Estudios preliminares | 57 |
| 2.2.15 | Estudio geológico | 59 |
| 2.2.15.1 | Fisiografía | 59 |
| 2.2.15.2 | Geología regional | 60 |
| 2.2.15.3 | Geología local | 62 |
| 2.2.15.4 | Riesgos geológicos | 64 |
| 2.2.15.5 | Marco geológico del túnel | 65 |
| 2.2.16 | Estudio geotécnico | 69 |
| 2.2.16.1 | Estudios geotécnicos de superficie | 70 |

| | | |
|--------------------|---|-----|
| 2.2.16.2 | Trabajos de prospección geofísica | 75 |
| 2.2.16.3 | Sondeos geotécnicos | 76 |
| 2.2.16.4 | Resultados de los trabajos de geotecnia | 79 |
| 2.2.16.5 | Caracterización geotécnica del tramo | 81 |
| 2.2.17 | Excavación en suelo | 83 |
| 2.2.17.1 | Excavación en la galería piloto | 86 |
| 2.2.17.2 | Excavación del ensanche de calota | 88 |
| 2.2.17.3 | Excavación de la destroza central | 91 |
| 2.2.17.4 | Excavación de los hastiales | 91 |
| 2.2.17.5 | Excavación de la solera (invert) | 93 |
| 2.2.18 | Excavación en roca | 94 |
| 2.2.18.1 | Excavación de la calota | 97 |
| 2.2.18.2 | Excavación de la destroza central | 98 |
| 2.2.18.3 | Excavación de los hastiales | 100 |
| 2.2.19 | Falso túnel | 101 |
| 2.2.20 | Portales | 102 |
| 2.2.21 | Servicios auxiliares | 103 |
| 2.3 | Definición de términos | 116 |
| CAPÍTULO III | | |
| MARCO METODOLÓGICO | | |
| 3.1 | Tipo de investigación | 118 |
| 3.1.1 | De acuerdo al fin que se persigue | 118 |

| | |
|---|-----|
| 3.1.2 De acuerdo a los tipos de datos analizados | 118 |
| 3.2 Diseño de investigación | 118 |
| 3.3 Muestra | 118 |
| 3.4 Procedimientos de desarrollo | 119 |
| 3.4.1 Proceso para diseño de túnel | 119 |
| 3.5 Materiales y equipos | 120 |
| 3.6 Técnicas e instrumentos para recolección de datos | 121 |
| 3.6.1 Diámetros de perforación para sondeo geotécnicos | 121 |
| 3.6.2 Clasificación del macizo rocoso según Nick Barton | 121 |
| 3.6.3 Clasificación del macizo rocoso según Z.T. Bieniawski | 123 |
| 3.7 Procesamiento y análisis de datos. | 124 |
| 3.7.1 Parámetros de resistencia de las discontinuidades | 124 |
| 3.7.2 Parámetros de resistencia de shotcrete | 128 |
| 3.7.3 Análisis dimensional de los tipos de cuñas por sector sostenimiento según Barton | 129 |
| 3.7.4 Criterios para la implantación del túnel | 133 |
| 3.7.5 Geometría del trazado | 134 |
| 3.7.6 Sección transversal | 136 |

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

| | |
|-------------------------------|-----|
| 4.1 Diseño del túnel en suelo | 141 |
| 4.1.1 Sección de excavación | 142 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 4.1.2 | Pre - Dimensionamiento del sostenimiento | 144 |
| 4.1.3 | Dimensionamiento del enfilaje en suelo | 147 |
| 4.1.4 | Verificación de las solicitaciones en el sostenimiento y revestimiento | 151 |
| 4.1.5 | Sostenimiento adoptado para el túnel en suelo | 152 |
| 4.2 | Diseño del túnel en roca | 153 |
| 4.2.1 | Sección de excavación | 153 |
| 4.2.2 | Dimensionamiento del túnel en roca | 155 |
| 4.2.3 | Sostenimiento adoptado para el túnel en roca | 157 |
| 4.2.4 | Verificación de los enfilajes en roca muy fracturada | 159 |
| 4.3 | Resultado del análisis numérico | 160 |
| 4.3.1 | Túnel en la entrada | 160 |
| 4.3.2 | Túnel en roca | 161 |
| 4.3.3 | Túnel en la salida | 161 |
| 4.4 | Características técnicas de las inyecciones requeridas | 162 |
| 4.4.1 | Enfilajes de suelo | 162 |
| 4.4.2 | Marcha - Avanti | 164 |
| 4.4.3 | Anclajes interiores | 164 |
| 4.4.4 | Anclajes externos | 170 |
| 4.5 | Diseño de voladuras según sectorización túnel Wayrasencca | 172 |
| 4.6 | Diseño de portal entrada | 182 |
| 4.6.1 | Configuración del portal | 182 |
| 4.6.2 | Configuración de la zona de acceso | 185 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 4.6.3 | Análisis de estabilidad de taludes | 185 |
| 4.6.4 | Sostenimiento o fortificación | 187 |
| 4.6.5 | Secuencia constructiva | 189 |
| 4.7 | Diseño de portal salida | 190 |
| 4.7.1 | Configuración del portal | 190 |
| 4.7.2 | Configuración del sector superior al portal | 192 |
| 4.7.3 | Análisis de estabilidad de taludes | 192 |
| 4.7.4 | Sostenimiento o fortificación | 193 |
| 4.7.5 | Secuencia constructiva | 195 |
| 4.8 | Discusión | 195 |
| | CONCLUSIONES | 200 |
| | RECOMENDACIONES | 202 |
| | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 203 |
| | ANEXOS | 208 |

ÍNDICE DE TABLAS

| Tabla | Pág. |
|---|-------------|
| Tabla 1 Presupuesto excavación - sostenimiento túnel Wayrasencca | 46 |
| Tabla 2 Costos de adquisición de TBM en el mundo | 47 |
| Tabla 3 Resumen estratigráfico del área del túnel | 69 |
| Tabla 4 Resultados de los parámetros geotécnicos – trincheras anteriores | 72 |
| Tabla 5 Resultados de los parámetros geotécnicos – trincheras finales | 74 |
| Tabla 6 Descripción de los materiales encontrados (ensayo Lugeon) | 77 |
| Tabla 7 Análisis y ensayos realizados en laboratorio | 80 |
| Tabla 8 Valoración del macizo rocoso en túnel | 82 |
| Tabla 9 Caracterización de los materiales y equipos | 120 |
| Tabla 10 Diámetros codificados de perforación para sondeos a diamantina | 121 |
| Tabla 11 Clasificación del macizo rocoso según Barton | 122 |
| Tabla 12 Valoración del macizo rocoso según Bieniawski | 124 |
| Tabla 13 Parámetros de resistencia de discontinuidades | 127 |
| Tabla 14 Parámetros de resistencia | 128 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 15 Coeficiente de soporte según tipo de excavación, ESR | 129 |
| Tabla 16 Guía sostenimiento primario según el RMR | 131 |
| Tabla 17 Tipo de excavación y sostenimiento para roca | 132 |
| Tabla 18 Características geométricas típicas del trazado | 134 |
| Tabla 19 Datos básicos de los vehículos de diseño | 135 |
| Tabla 20 Parámetros de enfilajes | 148 |
| Tabla 21 Tipo de excavación y sostenimiento para túnel en suelo | 152 |
| Tabla 22 Tipo de excavación y sostenimiento para roca – Túnel | |
| Wayrasencca | 158 |
| Tabla 23 Resumen de la configuración del portal y acceso | 187 |
| Tabla 24 Configuración del portal y banqueta superior | 193 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| Figura | Pág. |
|--|-------------|
| Figura 1. Gráfica tiempo - estabilidad vs longitud del túnel | 26 |
| Figura 2. Comparación entre método tradicional y el NATM | 30 |
| Figura 3. Sostenimiento entre método tradicional y el NATM | 30 |
| Figura 4. Esquema de una sección longitudinal del avance de un túnel | 35 |
| Figura 5. Distintas curvas en un gráfico - desplazamiento | 37 |
| Figura 6. Distintas opciones a la hora de elegir el sostenimiento | 38 |
| Figura 7. Influencia de la rigidez del revestimiento | 39 |
| Figura 8. Ubicación del proyecto | 51 |
| Figura 9. Accesibilidad del proyecto | 53 |
| Figura 10. Imagen satelital de sector Wayrasencca | 57 |
| Figura 11. Planta topográfica | 58 |
| Figura 12. Leyenda geológica regional | 61 |
| Figura 13. Geología local | 63 |
| Figura 14. Sondeos rotatorios | 78 |
| Figura 15. Túnel piloto | 84 |
| Figura 16. Sección en suelo | 85 |

| | |
|---|-----|
| Figura 17. Sección en roca | 96 |
| Figura 18. Frente después de voladura | 99 |
| Figura 19. Sistema típico de drenaje – de punteras de sección y DHP | 106 |
| Figura 20. Sistema típico de drenaje – en suelo de túnel | 107 |
| Figura 21. Sistema típico de drenaje – en paredes de túnel | 109 |
| Figura 22. Diagrama de flujo para el diseño de túnel | 119 |
| Figura 23. Tipo de falla en pernos de roca | 128 |
| Figura 24. Tipo de falla de una capa de shotcrete | 129 |
| Figura 25. Ábaco sostenimiento del macizo rocoso según Barton | 130 |
| Figura 26. Sección típica de túnel – en recta | 139 |
| Figura 27. Sección típica de túnel – en curva | 140 |
| Figura 28. Túnel en suelo | 143 |
| Figura 29. Túnel en roca | 154 |
| Figura 30. Detalle de enfilaje en suelo | 163 |
| Figura 31. Sostenimiento con pernos | 169 |
| Figura 32. Voladura en sección tipo 2 – en calota | 173 |
| Figura 33. Voladura en sección tipo 2 – en destroza | 174 |
| Figura 34. Voladura en sección tipo 2 – en hastiales | 175 |
| Figura 35. Voladura en sección tipo 3 – en calota | 176 |
| Figura 36. Voladura en sección tipo 3 – en destroza | 177 |
| Figura 37. Voladura en sección tipo 3 – en hastiales | 178 |

| | |
|--|-----|
| Figura 38. Voladura en sección tipo 4 – en calota | 179 |
| Figura 39. Voladura en sección tipo 4 – en destroza | 180 |
| Figura 40. Voladura en sección tipo 4 – en hastiales | 181 |
| Figura 41. Sostenimiento de talud – portal entrada | 184 |
| Figura 42. Portal entrada – sostenimiento inicial | 188 |
| Figura 43. Sostenimiento de talud – portal salida | 191 |
| Figura 44. Portal salida – sostenimiento inicial | 194 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| Anexo | Pág. |
|---|-------------|
| ANEXO A. Temas que influyen en una correcta construcción de túneles en forma de matriz simplificada | 209 |
| ANEXO B. Cronograma de operaciones | 210 |
| ANEXO C. Modelo geológico | 211 |
| ANEXO D. Instalación de pernos – planta portal entrada | 212 |
| ANEXO E. Instalación de pernos – planta portal salida | 213 |
| ANEXO F. Galería piloto | 214 |
| ANEXO G. Categoría de sostenimiento 2 | 215 |
| ANEXO H. Categoría de sostenimiento 3 | 216 |
| ANEXO I. Categoría de sostenimiento 4 | 217 |
| ANEXO J. Categoría de sostenimiento 5a | 218 |
| ANEXO K. Categoría de sostenimiento 5 | 219 |
| ANEXO L. Categoría de sostenimiento 6 | 220 |
| ANEXO M. Categoría de sostenimiento 6a | 221 |

RESUMEN

Ante los continuos derrumbes y desprendimientos de roca que originan accidentes y pérdidas económicas en la vía, se ha planteado la idea de atravesar la montaña con un túnel de aproximadamente 745 m de longitud aplicando el método NATM para la excavación y sostenimiento del túnel. Esta solución va acompañada de una descarga puntual en taludes antes y después del túnel que se encuentran en situación inestable y que significan un riesgo para el tránsito peatonal y vehicular.

Se realiza un estudio geológico – geomecánico con la finalidad de determinar el tipo de material (suelo o roca) que conforman la montaña y a su vez para determinar el comportamiento del macizo rocoso; con el resultado de dichos estudios, se plantea el diseño para la excavación y sostenimiento del túnel que lleva el nombre de la montaña que atravesará; la aplicación del método en el diseño se basa trabajar sobre material fluvio glacial en los extremos del túnel y en el centro con roca de regular y mala calidad. Para ello se han establecido diferentes secciones de excavación y sostenimiento acordes a estos materiales.

INTRODUCCIÓN

Un túnel se construye para conseguir la comunicación de dos lugares, si bien, existen varias razones para su construcción, en nuestro caso es para comunicar un tramo de carretera donde ocurren constantemente derrumbes y deslizamiento de roca, que como principal consecuencia de estos son los accidentes en dicho tramo.

El presente trabajo radica en conocer, detallar y reflejar los aspectos propios de la aplicación del Nuevo Método Tunelero Austriaco NATM para la excavación y sostenimiento de un túnel basándose en los resultados de estudios geológicos y geotécnicos necesarios para el sector crítico km 237 + 380 al km 238 + 453 túnel Wayrasencca. Para ello se ha considerado todos los aspectos técnicos, económicos y de cuidado ambiental, con la finalidad de no afectar en exceso las características geomorfológicas del paisaje montañoso de origen, para ello, se ha dividido el presente estudio en V capítulos a tratar.

En el capítulo I: Planteamiento del problema, se conoce el problema y se plantea la solución que brinda mayor seguridad.

En el capítulo II: Marco teórico, permite hacer referencia a los antecedentes del estudio, base teóricas y definición de términos.

En el capítulo III: Marco metodológico, se expone tipo y diseño de la investigación a desarrollarse, la muestra, la operacionalización de variables, los materiales y equipos necesarios para la aplicación del método, las técnicas e instrumentos para la recolección de datos, así como también procesamiento y análisis de datos.

En el capítulo IV: Resultados y discusión, se expone el diseño geométrico, el estudio geológico y geotécnico, se define el diseño del túnel en suelo y en roca, el resultado del análisis numérico, las características técnicas de las inyecciones requeridas, y el diseño de voladuras según sectorización del túnel Wayrasencca, el diseño de los portales entrada y salida; se analiza los resultados conseguidos en toda la investigación para la aplicación del método NATM en la excavación y sostenimiento del túnel, se realiza una discusión haciendo una comparación entre otros túneles ejecutados con el mismo método.

Se finaliza con las conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas, y anexos.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

1.1.1 Antecedentes del problema

Un túnel es una obra subterránea que con el tiempo ha venido siendo más común su presencia, y que para su construcción se comienza con una investigación sobre las condiciones y comportamiento del terreno que permiten la determinación del método de excavación y sostenimiento. En el corredor vial interoceánico sur, Perú – Brasil, en el sector crítico del km 237 + 380 al km 238 + 453, se registra derrumbes y caídas de rocas constantemente, generando accidentes, que traen como consecuencia pérdidas humanas y económicas, congestión vehicular entre otros.

1.1.2 Problemática de la investigación

En vista de este problema se plantea la construcción de un túnel, aplicando el método NATM para la excavación y

sostenimiento tomando en cuenta todos los parámetros y aspectos geológicos y geotécnicos; con lo que se busca obtener un efecto que permita la estabilidad del macizo que deberá otorgar la seguridad del tránsito vehicular y peatonal.

1.2. Formulación del problema

1.2.1 Problema general

¿Qué estudios se realizan para la aplicación del método NATM en la excavación y sostenimiento del túnel Wayrasencca en el sector crítico km 237 + 380 al km 238 + 453 del corredor vial interoceánico sur, Perú - Brasil?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cómo el estudio geológico - geotécnico determina la aplicación del método NATM en la excavación y sostenimiento del túnel Wayrasencca?
- ¿Cómo se aplica el método NATM en la excavación y sostenimiento del túnel Wayrasencca?

1.3. Justificación e importancia

Mediante un estudio geológico - geotécnico podremos conocer más a fondo el comportamiento del macizo rocoso y suelo en el sector crítico del km 237 + 380 al km 238 + 453 del corredor vial interoceánico sur, Perú – Brasil, y realizar la aplicación del método NATM en la excavación y sostenimiento del túnel Wayrasencca.

Una vez se tenga definido el tipo de material que conforma el sector crítico por donde se propone la construcción del túnel, se plantea la excavación y sostenimiento del macizo tomando como base los fundamentos teóricos y aplicativos del método NATM.

El presente trabajo busca hacer el diseño adecuado para la construcción de un túnel, que tiene como finalidad el evitar accidentes por derrumbes y deslizamientos de roca.

En el método NATM toma como base fundamental en su aplicación los resultados de los estudios geológicos – geotécnicos, la estratigrafía y los rasgos estructurales, las características físicas, químicas y la mecánica de rocas, juegan un papel importante pues a base de ellos sabremos cómo hacer la excavación y sostenimiento tanto en roca y suelo. Actualmente existen varios métodos para la construcción de túneles, tales como:

- Método por Tuneladora TBM (Tunnel Boring Machine), para túneles de sección y longitudes extensas.
- NATM (Nuevo Método Tunelero Austriaco), es un método flexible, se aplica sobre condiciones geomecánicas desconocidas de consistencia de la roca durante el trabajo de tunelación.
- Método Cut and Cover, es un método de construcción para túneles superficiales.

1.4. Alcance y limitaciones

La investigación realizada tendrá un alcance de estudio que abarcará la formación y conformación del suelo y macizo rocoso, como también el comportamiento de estos ante los cambios que se les pueda aplicar para conseguir su estabilidad mediante el sostenimiento aplicado por el método NATM.

La posible limitación será el propio avance del proyecto durante su ejecución debido a las alteraciones del suelo y macizo rocoso que se puedan dar durante las épocas de lluvias, originando una mayor filtración de agua durante la excavación, y que a su vez requieren de un reforzamiento extra en el sostenimiento, como también originan acumulación de aguas en el interior del túnel, las mismas que tienen

que ser drenadas para poder continuar con un nuevo avance de sección.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Realizar un estudio geológico – geotécnico para la aplicación del método NATM en la excavación y sostenimiento del túnel Wayrasencca en el sector crítico km 237 + 380 al km 238 + 453 del corredor vial interoceánico sur, Perú – Brasil.

1.5.2. Objetivos específicos

- Determinar la aplicación del método NATM en la excavación y sostenimiento del túnel Wayrasencca mediante los resultados del estudio geológico - geotécnico.

- Aplicar el método NATM en la excavación y sostenimiento del túnel Wayrasencca diferenciando el diseño para cada tipo de material que conforman las secciones del tramo longitudinal del túnel.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis general

El estudio geológico – geotécnico son la base fundamental para la aplicación del método NATM en la excavación y sostenimiento del túnel Wayrasencca en el sector crítico km 237 + 380 al km 238 + 453 del corredor vial interoceánico sur, Perú – Brasil.

1.6.2. Hipótesis específicas

- Los resultados de un estudio geológico – geotécnico son los únicos que determinan la aplicación del método NATM en la excavación y sostenimiento del túnel Wayrasencca.

- La aplicación del método NATM en la excavación y sostenimiento del túnel es diferente para cada tipo de material encontrado sea suelo o roca.

1.7. Variables de la investigación

En la aplicación del método NATM para la excavación y sostenimiento del túnel Wayrasencca se tiene variables independientes y dependientes.

1.7.1. Variable independiente

X = Estudio geológico - geotécnico.

1.7.2. Variable dependiente

Y = Método NATM.

1.7.3. Indicadores

X = Estudio geológico - geotécnico

Indicadores:

X₁ = Estratigrafía.

X₂ = Litología.

X₃ = Geología estructural.

X₄ = Clasificación de la roca.

X₅ = Q de Barton.

X₆ = RMR.

Y = Método NATM.

Indicadores:

Y_1 = Sección del túnel.

Y_2 = Espesor del shotcrete.

Y_3 = Longitud de enfilajes.

Y_4 = Diámetro de enfilajes.

Y_5 = Relación agua/cemento de lechada.

Y_6 = Tipo de malla metálica.

Y_7 = Sección de cimbra.

Y_8 = Diámetro de taladro.

Y_9 = Longitud de taladro.

Y_{10} = Geomembrana.

Y_{11} = Longitud de pernos.

Y_{12} = Diámetro de pernos.

Y_{13} = Longitud de Dhp.

Y_{14} = Diámetro de Dhp.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del estudio

a) Un proyecto similar se realizó en Nariño, Colombia, donde el Ing. Germán Rueda, director del proyecto “Túnel de Daza” indicó que el método que se utilizó fue el método NATM para la excavación y sostenimiento del terreno. Proyecto inaugurado en el año 2012.

- Longitud: 1 710 m.
- Método aplicado sobre material: Macizo rocoso.
- Longitud de avance: entre 0,30 m y 2,5 m; según la calidad del terreno encontrado.
- Sostenimiento: Arcos tipo celosía (vigas formadas con varillas de acero unidad con soldadura).
- Concreto: Tratado con aditivos químicos para hacerlo manejable y acelerar el fraguado. Lanzado con una bomba.
- Fibras: Tipo sintéticas para mejorar sus características mecánicas.

- Resistencia a la compresión del concreto: 25 MPa a los 28 días.
- Terminada la excavación, el túnel se impermeabilizó para impedir la entrada de flujos de agua y, posteriormente, se le dio un acabado con concreto lanzado.

b) Cabe mencionar la aplicación del método NATM en el proyecto del túnel de Hojarcada, que es el segundo más grande de la línea de alta velocidad que comunicará Madrid con Valencia. El director del proyecto Santiago Cobo, indicó que el método se adecúa al terreno debido a las diferentes circunstancias especiales del terreno. Proyecto inaugurado en el año 2010.

- Longitud: 3 957 m.
- Método aplicado sobre Material: Suelo y Macizo rocoso.
- Maquinaria empleada: Rozadoras pesadas.
- Sostenimiento: Arcos tipo celosía (vigas formadas con varillas de acero unidas con soldadura).
- Concreto: Tratado con aditivos químicos para hacerlo manejable y acelerar el fraguado. Lanzado con una bomba.

2.2. Bases teóricas

A lo largo del siglo XIX, los túneles se han ido excavando con diferentes metodologías de excavación que adoptaron el nombre del país en que se han desarrollado. Los métodos de excavación cronológicamente y que se centran principalmente en las diferentes secuencias de excavación.

2.2.1. Métodos de excavación

Navarro, S. et al. (2010) describen:

- **El método Inglés:** Recibe su nombre por haber sido aplicado en túneles a través del tipo de terreno que usualmente se localiza en Inglaterra, como son las arcillas y areniscas. Su principal característica es proceder el avance de la perforación a sección completa del túnel, en una sola operación. (p. 15, parte I).
- **El método Alemán:** Este sistema fue desarrollado por Wiebeking en 1814, siguiendo el sistema de núcleo central, empleado en la construcción de las amplias bóvedas de cerveza de Baviera. (p. 15, parte I).

- **El método Alemán modificado:** Se aplica en el caso en que durante la operación de perforación del túnel, a través de un terreno bastante firme, surja la aparición de agua, lo que origina una alteración en el método clásico Alemán en cuanto a las etapas sucesivas de ataque del frente. (p. 15, parte I).
- **El método Belga:** Se basa en los principios que permitieron la construcción, en 1828 del túnel de Charleroi en el canal que enlaza Bruselas y Charleroi. (p. 15, parte I).
- **El método Austriaco:** Los austriacos desarrollaron un plan de trabajo basado en la utilización de puntales de madera formando un sistema de entibación, procedimiento aplicado en las minas de Friburgo y en la construcción de túneles. (p. 15, parte I).

2.2.2. Excavación del túnel

Navarro, S. et al. (2010) describen:

a) Partición de la sección

Bieniawski recomendaba la excavación a sección completa para rocas de buena calidad ($RMR > 60$). La

mejora de los equipamientos permite actualmente excavar a sección completa, con rendimientos altos cuando las necesidades de sostenimiento son reducidas. En las categorías medias a malas ($20 < \text{RMR} < 60$) Bieniawski recomendaba sección partida en dos fases, y para las muy malas ($\text{RMR} < 20$) galerías múltiples. (p.14, parte II).

- **Sección completa ($\text{RMR} > 60$):** A partir de $\text{RMR} > 50$ y recomendable (con buena mecanización) para $\text{RMR} > 60$.
- **Bóveda y destroza ($\text{RMR} > 30$):** En general, podrán excavarse completamente por separado la bóveda y la destroza siempre que la calidad del macizo rocoso no sea mala o muy mala.
- **Galería de avance ($10 < \text{RMR} < 40$):** Una galería de avance llevada ligeramente por adelantado puede ser útil en terrenos de calidad media y túneles de gran anchura o terrenos de calidad mala y de ancho medio (10 m -12 m).
- **Galerías múltiples ($0 < \text{RMR} < 30$):** Se trata del llamado método alemán (con dos o cuatro galerías excavadas previamente en los hastiales) o de métodos más complejos con galerías tangentes excavadas y hormigonadas sucesivamente. Son sistemas adecuados para túneles en

macizos rocosos de calidad mala a muy mala (que son una transición a los suelos).

- **Contrabóveda ($0 < \text{RMR} < 30$):** Necesaria cuando la sección puede cerrarse por la base. Es un método complementario con todos los demás, que requiere una construcción muy próxima a los frentes de excavación.

b) Longitud de pase

En el estado actual de la mecanización no son prácticos avances superiores a 5 m (que son posibles a partir de $\text{RMR} > 60$, lo que coincide con el intervalo donde se puede recomendar la excavación a sección completa). (p.15, parte II).

- Para macizos de calidad media a mala se recomienda graduar la longitud de pase variándola entre 4 m ($\text{RMR} = 60$) y 1 m ($20 < \text{RMR} < 30$).
- Los macizos de calidad muy mala ($20 > \text{RMR}$) requieren pases muy reducidos inferiores a 1 m.

2.2.3 Elección del equipo de excavación

Elegir el método de excavación más adecuado según Navarro, S. et al. (2010) afirman que deben de considerar:

- Organización general del túnel y a sus necesidades de sostenimientos.
- Cualquier método es posible en casi todos los casos, pero solo resulta adecuado en determinados intervalos.
- La dureza y agresividad de la roca es una limitación añadida para los métodos de excavación mecanizada. (p.15, parte II).

a) TBM (Tuneladoras): RMR > 60

Ventajoso cuando las necesidades de sostenimientos son reducidas, y ese sostenimiento puede instalarse detrás de la cabeza de perforación (RMR > 60). El empleo de topos puede presentar una serie de limitaciones, donde la mayoría están ligadas a la geometría del túnel. En efecto:

- La sección debe ser circular y la longitud tal que permita asumir una inversión elevada y unos gastos igualmente importantes de transporte y montaje en obra.

- El radio de curvatura mínimo está alrededor de los 300 m, aunque son deseables al menos 500 m.
- La pendiente máxima debe ser tal que permita una circulación fluida de trenes y está en un entorno máximo del 3,5 - 4 %. Esta pendiente se puede superar en el caso de extracción de escombros por cintas, pero no hay que olvidar que, aún en este caso, es necesario disponer de vía para poder introducir al frente del túnel materiales, repuestos, etc.
- La geología y la geotecnia de los terrenos a atravesar. Así, en terrenos excesivamente blandos o con problemas de sostenimientos podrían desaconsejar el sistema, ya que se podría encarecer considerablemente.
- Las fallas son un enemigo mortal de los topes, ya que los sostenimientos no pueden actuar como pronto hasta el paso de los espaldines de protección y como en estos casos de fallas el avance suele ser lento, los tiempos que transcurren son demasiado largos, favoreciéndose el desprendimiento del terreno.
- La alta abrasividad de algunas rocas así como los contenidos elevados de sílice pueden producir elevados

desgastes en los cortadores y cangilones de la cabeza, pudiendo llegar a invalidar la solución topo por puro problema económico. (p.17, parte II).

b) Rozadora: $30 < \text{RMR} < 90$

Máquina de ataque puntual y cuerpo bajo y compacto. Puede utilizarse en gran variedad de terrenos. Las ventajas que ofrece el empleo de rozadoras son:

- Es un sistema que admite alta mecanización
- Reduce sobrexcautación en relación al uso de explosivos.
- No altera prácticamente las características iniciales de la roca.
- Reduce el sostenimiento frente al uso del explosivo.
- Se adapta mejor a la ejecución por fases.
- En comparación con una TBM, presenta ventajas:
- Flexibilidad para adaptarse a cualquier cambio de terreno.
- Se puede utilizar en una amplia gama de secciones, tanto en relación con su forma como con sus dimensiones.
- Su instalación es fácil y económica.
- El porcentaje de mano de obra especializada es pequeño.

- En rocas de mala calidad permite un mejor acceso al frente para efectuar los trabajos de sostenimiento permite efectuar la excavación en fases, lo que es decisivo en terrenos de mala calidad.
- El mayor rendimiento de avance del TBM es neutralizado por la incidencia del tiempo de los trabajos de sostenimiento. (p.18, parte II).

c) Fresado: RMR < 30

Son máquinas que montan una fresa de potencia media sobre un brazo de retroexcavadora. (p.20, parte II).

d) Escarificación / pala: RMR < 20

Los macizos de calidad muy mala pueden excavar prácticamente como suelos con palas convencionales y/o escarificarse (excavar la destroza o contrabóveda). (p.20, parte II).

e) Otros métodos de excavación

En la búsqueda de mayores rendimientos de excavación por procedimientos con energía mecánica y

energía por reacción química explosiva, se continuará experimentando con técnicas de fragmentación del macizo rocoso como:

- Energía hidráulica, cañón de agua (Rusia tiene desarrollado un cañón de agua, está en fase experimental).
- Utilización de ultrasonidos.
- Utilización de la tecnología del rayo láser de materia, este laser emitirá un haz constante de ondas de materia, mil veces más pequeño que un rayo de luz.
- Energía térmica, chorro de llama combinado con partículas abrasivas.
- Utilización de rayo de electrones.
- Técnica de ablandamiento de roca con productos químicos.
- La Unión Europea ha fijado para 2020, en el Plan Estratégico, el desarrollo de tecnología nueva para fragmentación de macizo rocoso (tecnología láser).
(p. 78).

2.2.4 Elección del método de excavación

La selección del método constructivo de un túnel viene regida por una serie de factores de diversa índole; Navarro, S. et al. (2010), describen los siguientes factores:

- Geotécnicos, en cuanto a las características del terreno, lo que puede condicionar el aplicar un método u otro.
- Otros económicos, en cuanto a la posibilidad de utilizar métodos en que se necesita una importante inversión, como en el caso de las tuneladoras.
- Otras sociales y medio - ambientales, en cuanto a la seguridad del método, la afección al entorno, la presencia de obstáculos naturales y artificiales (ríos, pozos, cimentaciones existentes, minas, etc.).

Pueden enumerarse, a tal efecto, los siguientes condicionantes:

- Las características del terreno, junto con la profundidad a la que se quiere desarrollar la obra subterránea. Si existen rellenos y suelos blandos importantes, el túnel tiene que desarrollarse (en principio) por debajo de ellos, dejando un

recubrimiento de terreno “resistente” del orden de un diámetro por encima de la clave. El término “resistente” puede considerarse natural o artificial (con tratamientos del terreno previos). La presencia de niveles freáticos colgados y continuos en el terreno pueden condicionar el método constructivo y transformarlo en una obra de túnel artificial (a cielo abierto); en general, puede decirse que hasta una profundidad de excavación en área urbana de unos 15 m a 18 m es más económico el realizar un túnel entre pantallas continuas que excavada subterráneamente.

- El plazo de la obra, ya que ello puede obligar en algunos procedimientos a abrir numerosos frentes de ataque, lo que puede encarecer la obra o bien, puede alargarse el plazo si se necesita construir una tuneladora nueva y tiene algún condicionante especial (características de arranque, diámetro, etc). Ello puede obligar a utilizar varios sistemas – no mecanizados totalmente – para aprovechar la geometría del problema, las características geotécnicas, etc., y acortar el plazo de ejecución.
- La longitud del tramo, lo que puede hacer viable el uso de una TBM o no. Para túneles de varios kilómetros (5 - 6) de

longitud puede ser rentable o suficientemente amortizable una TBM nueva.

- El nivel tecnológico de la zona, que puede permitir el utilizar medios muy mecanizados, por existencia de personal especializado, talleres de reparación, etc., disminuyendo la mano de obra.
- La posibilidad de amortización de maquinaria en la propia obra u otras futuras. La inversión en máquinas TBM nuevas y de gran diámetro es importante (15 a 60 millones de euros) y tiene que contemplar el presente y el futuro de la tuneladora, los planes de infraestructuras, los cambios políticos, etc.
- El espacio disponible en los extremos del túnel o zonas intermedias, con los problemas de interferencia a otros servicios (caso urbano) o los de impacto ambiental.
- La existencia de obstáculos especiales. Como tales pueden considerarse la presencia de fallas, contactos entre terrenos, otros túneles, pozos, vaguadas rellenas, zonas de terreno contaminados por keroseno y gases, ruinas históricas, etc. (p.21, parte II).

2.2.5 Análisis numérico

López Jimeno, C. et al. (2005) afirman:

Los túneles someros, especialmente en terrenos blandos o rocas débiles, tienen asientos superficiales límites. En esta situación lo mejor es aplicar un sostenimiento del túnel rígido y un cierre de la contrabóveda también rígido. El cierre invertido rápido es conseguido mejor por los métodos de excavación a sección completa, o por métodos de excavación múltiples tal como el bien conocido de galería de avance y contrabóveda del NATM. (p. 337).

2.2.6 El nuevo método tunelero austriaco NATM

Navarro, S. et al., (2010) describen:

El nuevo método austriaco (NATM) fue desarrollado por los profesores L.V. Rabcewicz y L. Müller durante los años 1957 y 1965, llegando a ser patentado en Austria en 1958.

Uno de sus puntos de partida fue la clasificación geomecánica del macizo rocoso que establece siete categorías de roca a partir de la relación entre tiempo de

estabilidad de la excavación y la luz o dimensión libre sin sostener (Figura 1), comprobándose que un aumento de la anchura del túnel significa una reducción en el tiempo de colocación del sostenimiento. Siendo el tiempo de estabilidad de la excavación uno de las bases del NATM.

De lo anterior, se deriva que el concepto de que el terreno que circunda una excavación subterránea, se convierte en un componente estructural que soporta cargas mediante la activación del cuerpo anular de soporte.

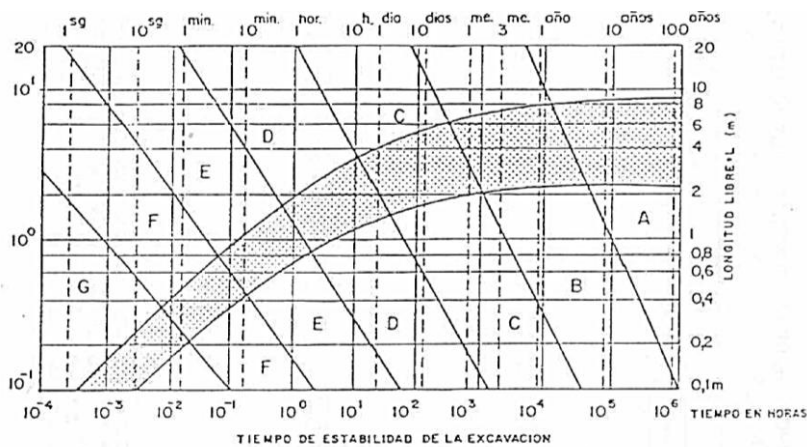


Figura 1. Gráfica tiempo - estabilidad vs longitud del túnel.
Fuente: Geotecnia aplicada a la construcción de túneles, 2010.

Se trata de conseguir que la roca sea el principal elemento del sostenimiento, realizando la excavación y su sostenimiento de tal forma que el macizo rocoso y el

sostenimiento (reducido ahora a su mínima expresión) puedan deformarse para que el nivel tensional que corresponde al equilibrio sea el más bajo posible. Esta filosofía constructiva implica un buen conocimiento del macizo rocoso, la utilización de sostenimientos deformables (y por tanto flexibles) y su optimización mediante medidas de control. (p.31, parte II).

López Jimeno, C. et al. (2005) describen:

En el método NATM el sostenimiento inicial de la roca está proporcionado por un revestimiento primario de hormigón proyectado incluyendo cerchas metálicas y mallazo, y bulones de roca. Este sostenimiento reduce las presiones de las rocas a través de los movimientos. La presión es redistribuida a la roca circundante a “anillo portante de carga” de la roca y es así movilizada. Es solamente después de que las deformaciones de la roca se han atenuado cuando es instalado el revestimiento final. Esto hace que el revestimiento final esté sometido a bajas tensiones, permitiendo la colocación de un revestimiento de un espesor significativamente menor. (p. 336).

2.2.7 Generalidades del NATM

Santoyo, E. et al. (2013) mencionan:

Este método fue desarrollado para túneles profundos excavados en las formaciones de rocas sometidas a las grandes presiones típicas de los Alpes Austríacos y como se mencionó antes, se basa en aceptar que la excavación induce a una cierta relajación de esfuerzos que reduce las cargas que debe soportar el ademe del túnel reforzado. Algunos críticos de este método afirman que no fue una novedad porque ya era práctica usual en Europa, otros dicen que solo se trata de un enfoque peculiar de diseño y que no constituye un método. Por su parte, los que lo aplican se valen de modelos del elemento finito, con los que simulan como las propiedades mecánicas de los suelos o rocas, la densidad y la longitud de penetración del anclaje, el ademe de concreto lanzado reforzado con acero y mediante iteraciones demuestran que los esfuerzos y deformaciones sean tolerables y que los asentamientos en la superficie sean aceptables. (p. 6).

Rey Sabin, A. et al. (2010) afirman que:

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

Por este motivo, será necesario adoptar métodos constructivos que permitan evitar y limitar al máximo los efectos de dicha descompresión en la zona de la excavación. Esta descompresión del terreno va acompañada de un efecto de dilatación y de una pérdida irremediable de sus características geomecánicas, de tal forma, que en un terreno descomprimido, la estabilidad del conjunto solo puede ser asegurada mediante la ejecución de un sostenimiento del terreno adecuado a su comportamiento tenso - deformacional. (p. 14).

En el NATM la formación perimetral de la roca o terreno se integra dentro del arco resistente total. De esta manera, el terreno forma parte en sí mismo de la estructura.

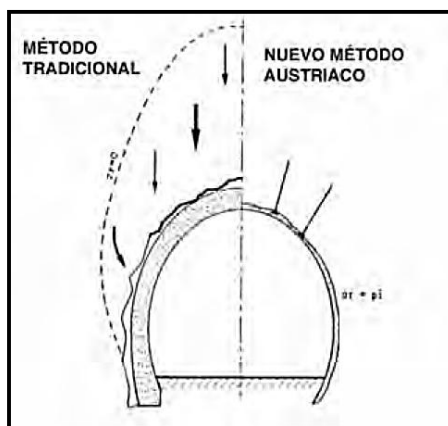


Figura 2. Comparación entre método tradicional y el NATM
Fuente: Geotecnia aplicada a la construcción de túneles, 2010.

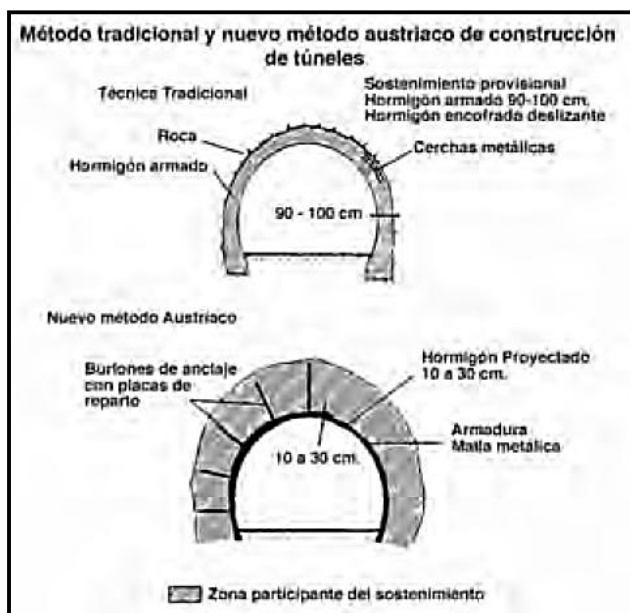


Figura 3. Sostenimiento entre método tradicional y el NATM
Fuente: Geotecnia aplicada a la construcción de túneles, 2010.

Consecuencia a ello, la correcta aplicación del NATM supone:

- a) Ejecución de procedimientos de excavación cuidadosos.
- b) Elección de la mejor sección de excavación posible, permitiendo además su adaptación a las condiciones específicas mecánicas de la roca y distribución de tensiones.
- c) El sistema de excavación deberá de adaptarse a las propiedades del terreno encontrado. La estabilidad del frente sin sostenimiento, la elección correcta de la voladura y la longitud del avance, juegan un importante papel para elegir el método operacional más factible y económico.

2.2.8 Principios básicos del NATM

Navarro, S. et al. (2010) afirman:

El NATM no nos dice lo que hemos de hacer, sino que nos indica cómo hemos de hacer las cosas, por lo que algunos autores coinciden en denominarlo como una filosofía de trabajo. Los preceptos básicos más importantes con los que trabaja el NATM son:

- Utilizar la roca como elemento resistente frente a las cargas que se van a ir produciendo durante la excavación.

- La resistencia de macizo debe conservarse y movilizarse lo más posible. Esto implica dañar la roca lo menos posible durante la excavación.
- Debe controlarse la deformación, mediante la instalación de un sostenimiento inicial.
- El sostenimiento inicial debe ser flexible y proteger al macizo de todos los efectos que entraña la apertura de una cavidad, debe contrarrestar en cierta medida los efectos de pérdida de presión de confinamiento en el perímetro de excavación.
- El tiempo de colocación del sostenimiento y el cierre del anillo son de vital importancia para controlar las deformaciones.
- La longitud del tramo sin sostener ha de ser la mínima posible.
- Debe procederse a medir continua y cuidadosamente las deformaciones (convergencias), colocando si es necesario un refuerzo de sostenimiento primario. Esta práctica, llevada a cabo de forma sistemática, forma parte de lo que se denomina proceso de auscultación, y es algo

que tiene una importancia crítica en la aplicación del método. (p.36, parte II).

Rey SabiN, A. et al. (2010) atribuyen que:

- El sistema está concebido como una estructura combinada, consistente en una formación del terreno alrededor de la excavación, y varios métodos de sostenimiento, tales como, hormigón proyectado, bulones, cerchas, etc.
- El estado tridimensional de la tensión y los esfuerzos son compatibles con las propiedades geomecánicas del terreno.
- Necesidad de realización de ensayos sobre muestras del terreno tanto “in situ” como en el laboratorio. En todo momento se deberán tener en cuenta los valores geomecánicos del terreno, su variabilidad a largo plazo así como los efectos producidos por las filtraciones de agua existentes.
- En algunas ocasiones será importante que la propia estructura del soporte tenga una suficiente elasticidad, por

lo que en dichos casos ciertas zonas del revestimiento se deberán realizar con un sostenimiento ligero.

- La ejecución del sostenimiento y la colocación de los bulones de anclaje se realizará en el momento apropiado, con el fin de formar una estructura combinada con el terreno circundante próximo.
- El periodo de excavación sin sostenimiento, así como la ejecución de una contrabóveda, se considerará en función de la distribución de las presiones del terreno, y teniendo en cuenta las características geológicas del mismo, además de los tiempos de las operaciones de excavación.
- El revestimiento definitivo se dimensionará de acuerdo con los cambios de presión resultantes de la alteración del terreno. (p.15 - 16).

2.2.9 Interacción excavación - sostenimiento, curvas características

Navarro, S. et al. (2010) afirman:

Supongamos un túnel profundo de forma que, con buena aproximación, se pueda prescindir en el entorno del túnel del gradiente de tensiones que introduce la gravedad (en la

práctica ello supone recubrimientos de al menos 10 veces el diámetro).

Se supone también un estado isótropo de tensiones de intensidad p_0 . Consideremos (Figura 4) el avance de la excavación y cuatro secciones significativas. Lejos del frente, en la roca (sección AA'), sobre el futuro contorno teórico del túnel actúa la tensión p_0 . Esta sección aún no se ha deformado, de manera que el desplazamiento radial, u_i de los puntos de la sección teórica del túnel es nulo.

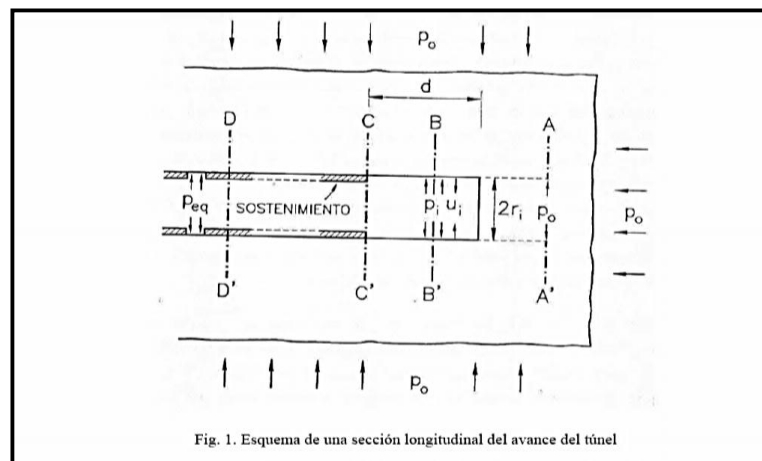


Figura 4. Esquema de una sección longitudinal del avance de un túnel.
Fuente: Geotecnia aplicada a la construcción de túneles, 2010.

En la sección BB', ya excavada y próxima al frente, la tensión p_0 ha desaparecido y el contorno del túnel ha experimentado un desplazamiento hacia el interior (u_i). La

relación entre p_i y u_i constituye la denominada curva característica o curva de convergencia del túnel (CC) y solo depende de las propiedades del terreno (para una geometría circular). Esta relación se ha representado, de forma cualitativa en la Figura 6.

Lo normal, sin embargo, es que a una cierta distancia del frente d (sección CC') se coloque un determinado sostenimiento (bulones, hormigón proyectado, cerchas, revestimientos continuos o una combinación de alguno de ellos) que inmediatamente entrará en carga al menos por dos razones:

- El progresivo alejamiento del frente lo que supone la disminución virtual de la carga p_i y por tanto un incremento de deformación radial.
- Deformaciones diferidas de la roca al transcurrir el tiempo.

En primera aproximación el revestimiento reaccionará con una determinada rigidez constante (k) frente a deformaciones impuestas. (p.31, parte II).

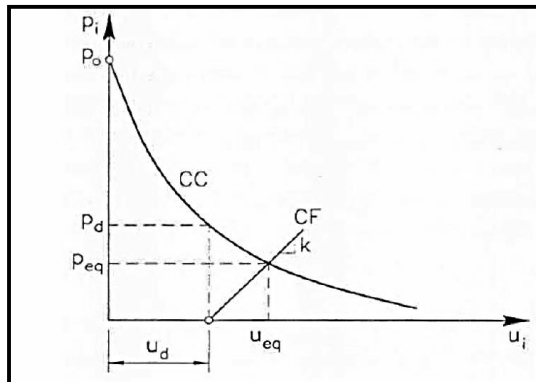


Figura 5. Distintas curvas en un gráfico - desplazamiento
 Fuente: Geotecnia aplicada a la construcción de túneles, 2010.

Teniendo en cuenta que se instala una vez que la roca se ha deformado una magnitud u_d , la respuesta del revestimiento se puede escribir:

$$p_t = k (u_t - u_d) \quad [1]$$

El desplazamiento u_d corresponde a una determinada presión virtual sobre el túnel p_d . La ecuación anterior se denomina CF (curva de confinamiento).

Finalmente, túnel y revestimiento alcanzarán una posición única de equilibrio (sección DD') cuando se alcancen la presión y desplazamiento (p_{eq} , u_{eq}) comunes a las dos curvas CC y CF. Para una determinada curva CC el proyectista o constructor puede optar por la instalación de un

revestimiento muy próximo al frente (u_{d1}) o lejos de él (u_{d2}), Figura 7. Puede también elegir la rigidez del sostenimiento (rígido k_1 ; deformable k_n). En principio, cuanto más rígido sea un sostenimiento y más próximo al frente se instale, mayor será la presión de equilibrio que ha de soportar y menor el desplazamiento radial (o convergencia) del túnel. (p.33, parte II).

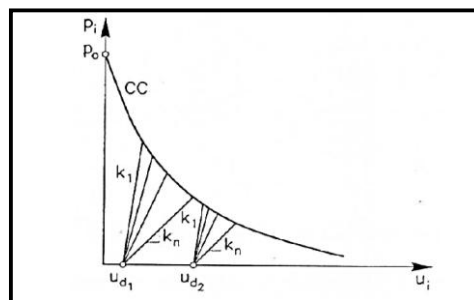


Figura 6. Distintas opciones a la hora de elegir el sostenimiento.
Fuente: Geotecnia aplicada a la construcción de túneles, 2010.

De la simple observación de las figuras 5 y 6, se deduce inmediatamente que es lo que pretende el NATM, optimizar el momento de colocar el sostenimiento, así como su naturaleza (rigidez en la curva), de forma que la excavación quede estabilizada con una deformación aceptable y con un sostenimiento mínimo (cumpliendo con seguridad y economía).

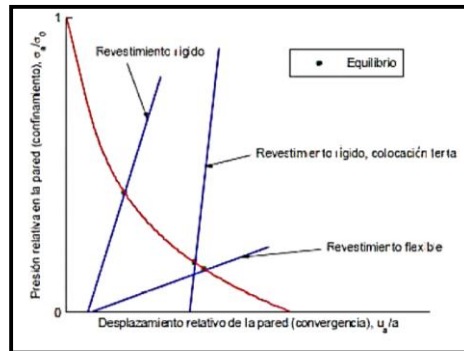


Figura 7. Influencia de la rigidez del revestimiento.

Fuente: Geotecnia aplicada a la construcción de túneles, 2010.

En la Figura 7 se puede comprobar que al disminuir la rigidez del revestimiento, rebajamos el punto de equilibrio con la curva de confinamiento del túnel, de manera que confiamos cada vez más la estabilidad de la excavación a la matriz rocosa donde se encuentra. Por otro lado, al disminuir la rigidez del revestimiento disminuye el coste de la misma.

Para aplicar este método es necesario:

- Determinar la curva CC, mediante los datos obtenidos en el estudio geotécnico, para cada uno de los tramos en los que haya dividido el macizo rocoso a atravesar.
- Determinar la rigidez del sostenimiento (k), para cada uno de los tramos.

- Determinar la deformación del túnel u_d (o de forma equivalente, p_d) correspondiente a la instalación del sostenimiento, buscando que este sea el mínimo necesario para estabilizar la excavación de una forma económica y segura de forma que se logre una deformación o convergencia mínima, de entre el 1 - 2 % del diámetro de la excavación.
- Una vez definido el sostenimiento inicial que debemos emplear, empieza el aspecto más interesante del NATM que consiste en rectificar, según avanza la excavación, este sostenimiento inicial mediante la obtención de las curvas reales a través de la auscultación.

Obteniéndose parejas de valores presión - convergencia, que permiten comparar las curvas teóricas con las curvas reales, pudiendo tomar decisiones sobre aligerar el sostenimiento proyectado o colocar uno más rígido.

Para determinar la curva característica del terreno se considerará sucesivamente el comportamiento elástico y elastoplástico del terreno. Se presentan soluciones para dos criterios de rotura:

- a) Criterio de Mohr - Coulomb**, por ser de uso generalizado, tanto en macizos rocosos como en suelos. Permite de forma natural tratar condiciones no drenadas ($c = c_u, \phi = 0$) y puramente friccionales ($c = 0, \phi$).
- b) Criterio de Hoek - Brown**, por su fidelidad para reproducir las envolventes de rotura no lineales observadas en rocas.

En el NATM se alcanza la convergencia de equilibrio y el sostenimiento a aplicar, tras un proceso de observaciones en el tiempo y la aplicación flexible del sostenimiento. Interesa en general conseguir que las curvas convergencia - tiempo tiendan asintóticamente al equilibrio. Las aceleraciones inesperadas de los movimientos desencadenan en general el refuerzo del sostenimiento. Interesa, por un lado, que la roca no trabaje exclusivamente en régimen elástico (por antieconómico) ni que se alcancen plastificaciones excesivas con espesores de plastificación superiores al radio del túnel, que degraden en exceso la roca, lo que supone un cambio en el material y unas convergencias altas. En rocas de calidad buena y media, las convergencias no suelen superar algunos mm. Son comunes

en rocas de peor calidad convergencias del orden de centímetros. Convergencias de decímetros son ya excesivas.

Entra en juego el aspecto económico, siempre decisivo en ingeniería civil y que también caracteriza a este método. Sostenimientos más rígidos implican un mayor coste económico, pues las tensiones a resistir son mayores. Por este motivo, el nuevo método austriaco, aprovecha el comportamiento del macizo rocoso, haciendo que la propia roca contribuya a la estabilidad del túnel, al dejar que ésta se deforme hasta un punto adecuado, en que el sostenimiento que requerirá no habrá de soportar tensiones tan elevadas y hará que éste resulte más económico. Además, podremos colocar los diferentes sistemas de sostenimiento a una cierta distancia del frente (en España, por lo general, la longitud excavada es inferior al diámetro del túnel) con lo que se mejorará la seguridad de los operarios que allí trabajen. Igualmente se trabaja con dos o más sistemas de sostenimiento (Figura 6), permitiendo conjugar las bondades de los mismos, eliminando sus carencias. (p.35, parte II).

2.2.10 Condiciones aplicables del NATM en tipo de roca

López Jimeno, C. et al. (2005) afirman: “El clásico NATM solamente puede ser usado en condiciones de suelo relativamente buenas y con tensiones primarias normales”. (p. 336).

Rey Sabin, A. et al. (2010) afirma que:

Una excavación del túnel sin la utilización de explosivos, ejecutado mediante pica, pala mecánica o rozadora limita estas perturbaciones en el terreno, y propicia una menor descompresión del medio. Mediante la realización de un sostenimiento previo podremos asegurar el terreno y limitar su descompresión al mínimo posible. Con esta filosofía nació lo que se conoce como sistema NATM o nuevo método austriaco de construcción de túneles. (p. 14).

En consecuencia a la forma en que se desarrolla y trabaja, se afirma que el método NATM “no es aplicable en roca tipo I y tipo II”. Esto debido que el método es una forma de trabajo, de como llevar la secuencia de construcción por etapas (avance,

hastiales, destroza, invert o contrabóveda) valiendose de los resultados de los controles de las deformaciones del macizo.

Se resalta que cuando el túnel atraviesa tipo de roca I y II, la excavación es de frente completo, sea mediante explosivos o TBM (si las dimensiones y presupuesto del túnel permiten la adquisición de este equipo).

En cuanto al sostenimiento en roca I y II, no se requiere de un sostenimiento complejo, más que de pernos de anclaje (se utiliza las tablas geomecánicas), y una ligera capa de hormigón lanzado solo por estética de las paredes del túnel.

2.2.11 Comparación del método NATM de otros métodos por medio de costos

López Jimeno, C. et al. (2005) afirman que:

De las consideraciones anteriores se deduce que no es posible establecer una regla general de cual es el método más económico de los dos. Para cada nuevo proyecto debe ser realizada una evaluación específica de las condiciones y de los riesgos. La longitud del túnel, la sección de excavación y especialmente la geología encontrada

influirán en la decisión sobre un método es más económico.
(p. 350).

En forma general para cada túnel hay un diseño que se adecúa a las condiciones que presenta su geología y dimensiones, por lo que no se puede determinar directamente un método por medio de costos.

Para el túnel Wayrasencca, conocemos la geología, dimensiones (longitud, sección > 13 m, debido que es para dos carriles de circulación), y profundidad ya que atraviesa una montaña. Los estudios realizados muestran datos con los que se afirma que el único método posible de ejecutar la excavación es el NATM.

Se sabe que los costos del presupuesto inicial de todo proyecto siempre varían en el transcurso de la ejecución, esto debido a los imprevistos, situaciones no consideradas, como también incidentes generados por la misma naturaleza del terreno, lo cual hacen que el costo se eleve.

Tabla 1
Presupuesto excavación - sostenimiento túnel Wayrasencca

| PRESUPUESTO EXCAVACIÓN Y SOSTENIMIENTO DE TÚNEL | | | | | | |
|--|---|--------|------------|-----------|---------------|----------------------|
| Proyecto: Corredor Vial Interocéanico Sur Corredor Tramo N°4 | | | | | | |
| Sector crítico - túnel Wayrasencca km 237+380 al km 238+453.55 At. 238+340 Ad. | | | | | | |
| PARTIDA | DESCRIPCION | UNIDAD | CANTIDAD | P.U. | PARCIAL | PARCIAL TUNEL |
| 100 | OBRAS DE PRELIMINARES | | | | | 106 102,52 |
| 102 | Topografía y georeferenciación | km | 1,07 | 427,98 | 327,60 | |
| 103 | Mantenimiento de tránsito y seguridad Vial | mes | 4,00 | 22 812,56 | 91 250,24 | |
| 104 | Derecho de canteras | m3 | 30 299,83 | 0,82 | 14 524,68 | |
| 200 | MOVIMIENTO DE TIERRAS | | | | | 847 448,28 |
| 230.C | Perno autopercutor 30 mm. | m | 5 787,00 | 146,44 | 847 448,28 | |
| 400 | PAVIMENTO ASFALTICO | | | | | 11,87 |
| 409 | Emulsión asfáltica | GLN | 5,82 | 2,04 | 11,87 | |
| 500 | OBRAS DE ARTE Y DRENAJE | | | | | 318 238,68 |
| 545 | Dren horizontal profundo D=4" | m | 988,00 | 352,11 | 288 730,20 | |
| 556 | Ducto para fibra óptica | m | 2 296,38 | 12,85 | 29 508,48 | |
| 900 | PROTECCION AMBIENTAL | | | | | 59 488,62 |
| 901.6 Construcción de depósitos de materiales excedentes | | | | | | |
| 901.61 | Acondicionamiento de material DME | m3 | 124 023,04 | 1,01 | 59 488,62 | |
| 1100 | TUNELES | | | | | 12 474 095,66 |
| 1103.A | Excavación de túnel en coluvio aluvional | m3 | 17 374,72 | 49,76 | 864 566,32 | |
| 1104 | Excavación de túnel en roca suelta | m3 | 27 115,90 | 79,88 | 2 166 018,09 | |
| 1105 | Excavación de túnel en roca fija | m3 | 14 409,00 | 73,90 | 1 064 825,10 | |
| 1106 | Perfilado de subrasante en túnel | m2 | 6 415,91 | 12,58 | 80 712,11 | |
| 1107 | Desquinche en túnel | m2 | 11 905,45 | 22,25 | 264 896,26 | |
| 1108 | Concreto lanzado - shotcrete en túnel | m3 | 5 094,18 | 216,14 | 1 101 056,52 | |
| 1110.A | Pernos de anclaje 25mm. Full grouting | m | 19 752,00 | 43,15 | 852 298,80 | |
| 1111 | Fibras metálicas para concreto lanzado | kg | 113 797,95 | 2,75 | 312 944,36 | |
| 1112.A | Cimbra metálica tipo celosía (m) | m | 1 513,08 | 123,82 | 187 349,57 | |
| 1113.A | Malla electrosoldada de reforzamiento para túnel - Q257 | m2 | 14 011,21 | 40,50 | 567 454,17 | |
| 1114.A | Plancha acanalada | m2 | 545,87 | 228,71 | 124 845,93 | |
| 1115 | Concreto hidráulico fc=100 kg/cm2 en túnel | m3 | 52,18 | 70,87 | 3 698,15 | |
| 1116 | Concreto hidráulico fc=175 kg/cm2 en túnel | m3 | 576,99 | 80,41 | 46 395,45 | |
| 1117 | Concreto hidráulico fc=280 kg/cm2 en túnel | m3 | 1 535,53 | 112,08 | 172 101,84 | |
| 1118 | Encofrado y desencofrado en túnel | m2 | 5 417,99 | 22,91 | 124 126,33 | |
| 1119 | Acero de refuerzo en túnel | kg | 88 869,78 | 1,26 | 111 975,92 | |
| 1120 | Junta de dilatación | m | 118,40 | 111,39 | 13 188,58 | |
| 1121 | Junta aserrada | m | 1 095,20 | 58,72 | 64 310,14 | |
| 1122 | Junta de construcción | m | 1 490,92 | 31,06 | 46 307,98 | |
| 1126 | Geotextil en túnel | m2 | 8 806,93 | 2,70 | 23 778,70 | |
| 1128 | Sub base granular en túnel | m3 | 1 382,77 | 10,01 | 13 841,48 | |
| 1129 | Filtro drenante en túnel | m3 | 5 821,54 | 27,87 | 162 246,45 | |
| 1130 | Transporte de material granular < 1 km para Túnel | m3/km | 3 016,83 | 1,83 | 5 520,80 | |
| 1131 | Transporte de material a eliminar < 1 km para Túnel | m3/km | 29 597,06 | 1,95 | 57 714,27 | |
| 1132 | Transporte de concreto < 1 km para Túnel | m3/km | 1 579,62 | 7,67 | 12 115,69 | |
| 1133 | Marcas en el pavimento en túnel | m2 | 298,18 | 9,65 | 2 877,48 | |
| 1134 | Tachas delineadoras en túnel | UND. | 1 149,00 | 5,57 | 6 399,93 | |
| 1135 | Instalaciones eléctricas para túnel | m | 765,46 | 530,49 | 406 068,88 | |
| 1136 | Sistema de ventilación para túnel | m | 765,46 | 493,21 | 377 532,53 | |
| 1137 | Sistema presurizado para túnel | m | 765,46 | 267,54 | 204 791,17 | |
| 1138 | Instalación de enfilajes en suelo | | | | 2 370 487,90 | |
| 1143 | Sistema de drenaje para sectores de filtración | | | | 13 968,44 | |
| 1145 | Inyecciones de consolidación | | | | 417 317,40 | |
| 1146 | Inyecciones químicas | | | | 11 897,48 | |
| 1147 | Instalación y lectura de celdas de presión | | | | 157 706,08 | |
| 1148 | Instalación y mediciones de convergencia | | | | 60 759,36 | |
| COSTO DIRECTO (A) | | | | | 13 805 385,63 | 13 805 385,63 |
| GASTOS GENERALES (35.5%) (B) | | | | | | 4 900 911,90 |
| UTILIDADES (10%) (C) | | | | | | 1 380 538,56 |
| TOTAL (A) + (B) + (C) | | | | | | 20 086 836,09 |

Fuente: Departamento de túneles, CCT4, 2010.

Para una comparación de una excavación utilizando una TBM, se recopila los precios de diferentes TBM usadas en el mundo para la excavación de túneles.

Tabla 2
Costos de adquisición de TBM en el mundo

| TBM UTILIZADAS EN EL MUNDO | | | | | |
|----------------------------|---------------------|----------------------|--------------|--------------|--------------|
| Item | País | Túnel/ TBM | Diámetro TBM | Longitud TBM | Costo |
| 1 | Suiza/ Alpes Suizos | San Gotardo | 10,00 m | 400 m | € 21 000 00 |
| 2 | España/ Madrid | M- 30/ Dulcinea | 15,20 m | 100 m | € 40 000 00 |
| 3 | España/ Madrid | M- 30/ Tizona | 15,20 m | 100 m | € 40 000 00 |
| 4 | Inglaterra/ Londres | Crossrail/ Elizabeth | 7,10 m | 150 m | \$ 15 000 00 |

Fuente: Elaboración propia

Se tiene el presupuesto para la excavación y sostenimiento para el túnel Wayrasencca el cual tiene una longitud de 745 m, con un costo total de \$ 20 086 836,09 y cómo podemos ver en la Tabla 2, nos muestra el costo de diferentes TBM, por lo que podemos comparar y decir que para el túnel Wayrasencca no se puede utilizar un TBM.

El costo elevado y las curvas de radio giro no son los suficientemente grandes para que una tuneladora sea la indicada para la excavación.

Estas tuneladoras justifican su costo por ser usadas en túneles mayores a 5 km, por lo que a este túnel el único método aplicable es el NATM que a su vez permite (por ser el

más flexible) hacer la excavación en curvas con radio de giro menores como indica el diseño del Wayrasencca, algo que una TBM no podría hacer.

En relación con los demás métodos existentes no se puede hacer una comparación por medio de costos por lo que no son aplicables debido a las condiciones complejas que presenta la geología de la montaña.

2.2.12 Metodología adoptada para la excavación del túnel Wayrasencca

Para la ejecución de la excavación y sostenimiento del túnel aplicando el denominado método NATM, se basa en observar y recopilar la información de la formación del terreno que atravesará el túnel, como base se toma estudios geológicos y estudios geotécnicos. Según los estudios se debe tomar en cuenta dos tipos de comportamiento distintos, uno en suelo y otro en roca.

2.2.13 Estudio histórico

El 04 de agosto del 2005, la República del Perú en calidad de concedente, representado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones e INTERSUR Concesiones S.A., en calidad de concesionario suscribieron el contrato de concesión para la construcción, conservación y explotación de la infraestructura de servicio público del tramo vial, proyecto corredor vial interoceánico sur, Perú - Brasil, tramo 4: Azángaro – Puente Inambari. El subtramo km 237 + 380 al km 238 + 453, ha sido detectado y calificado como sector crítico y potencialmente inestable en la etapa de elaboración del PID (Proyecto de Ingeniería de Detalle), sub tramo km 233 + 000 - km 290 + 400.

Durante el inicio de las obras de excavación en este sector y más propiamente en la temporada de lluvias (Enero – Febrero 2009) ocurrieron deslizamientos de gran magnitud en el sector del km 237 + 730 al km 238 + 020, que obstruyeron el pase por la vía por periodos de tiempo largos, poniendo en riesgo además la seguridad de los usuarios, lo que hacía impracticable continuar con la ejecución del PID en dicho sector. Este hecho dio inicio a trabajos de investigación para el desarrollo de alternativas de paso para este sector crítico.

Luego de ampliar los estudios y efectuar el monitoreo del área en estudio, se presenta 03 alternativas de solución para el sector crítico km 237 + 380 al km 238 + 453 (Wayrasencca); de las cuales la más aceptable y viable, que brinda la seguridad requerida para dicho sector es la construcción de un túnel, con trabajos de descarga y sostenimiento de taludes en los tramos contiguos a los portales de ingreso y salida.

2.2.13.1. Ubicación

El corredor interoceánico sur – Perú Brasil, Tramo 4: “Azángaro – Inambari” se encuentra ubicado en el departamento de Puno, entre las provincias de Azángaro y Carabaya, teniendo como coordenada de origen 371 657 E, 8 352 315 N (Azángaro) y coordenada final 350 096 E, 8 541 963 N (Inambari). Tramo: km 233 + 000 (Ollachea) al km 290 + 400 (San Gabán). Ver Figura 8.

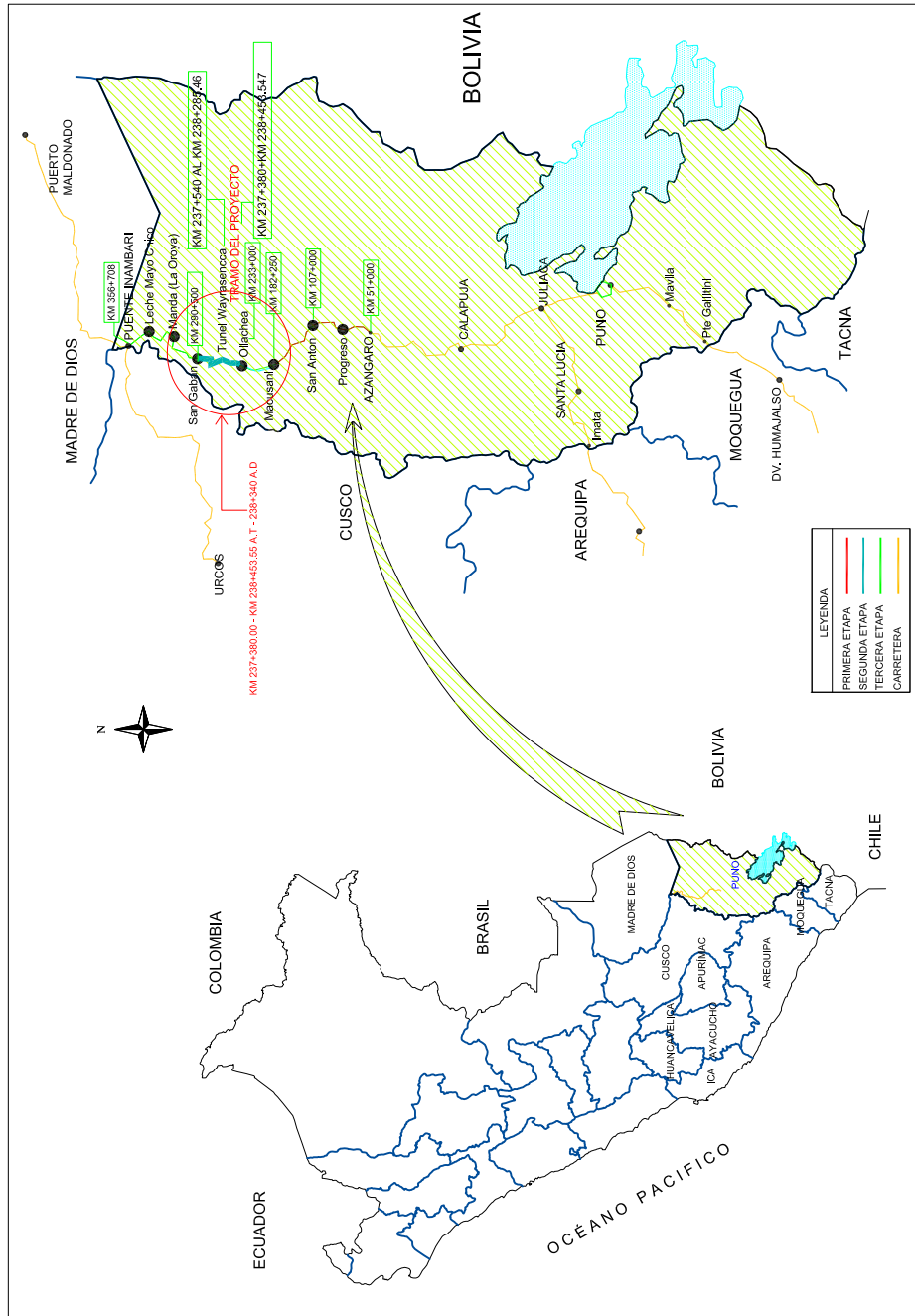


Figura 8. Ubicación del proyecto.
Fuente: Departamento de túneles, CCT4, 2012.

2.2.13.2. Accesibilidad

El acceso a la zona del proyecto se realiza de la siguiente manera: Primero, vía aérea hasta la ciudad de Juliaca (Puno) y continuar por vía terrestre; también por vía terrestre hasta la ciudad de Juliaca; luego se continúa por la carretera – Ruta 3 S en dirección a la salida hacia la ciudad del Cusco, pasando por la localidad de Calapuja que se encuentra en la progresiva km 1 289 (referida a la carretera que viene desde el Cusco) hasta llegar al desvío que va hacia la localidad del Cusco (km 1 288) lado izquierdo, y la localidad de Azángaro hacia el lado derecho, iniciándose allí una nueva progresiva denominada km 00 + 000 – Ruta 531 - para luego continuar hasta el km 46 + 000 ingreso a la localidad de Azángaro ya sobre la Ruta 106; la otra vía terrestre a seguir es llegando de Cusco o Puerto Maldonado hasta Mazuco, lugar de donde se toma la ruta con dirección a San Gabán km 290 + 500, para luego seguir la ruta hasta llegar a la zona del Túnel Wayrasencca. Ver Figura 9.

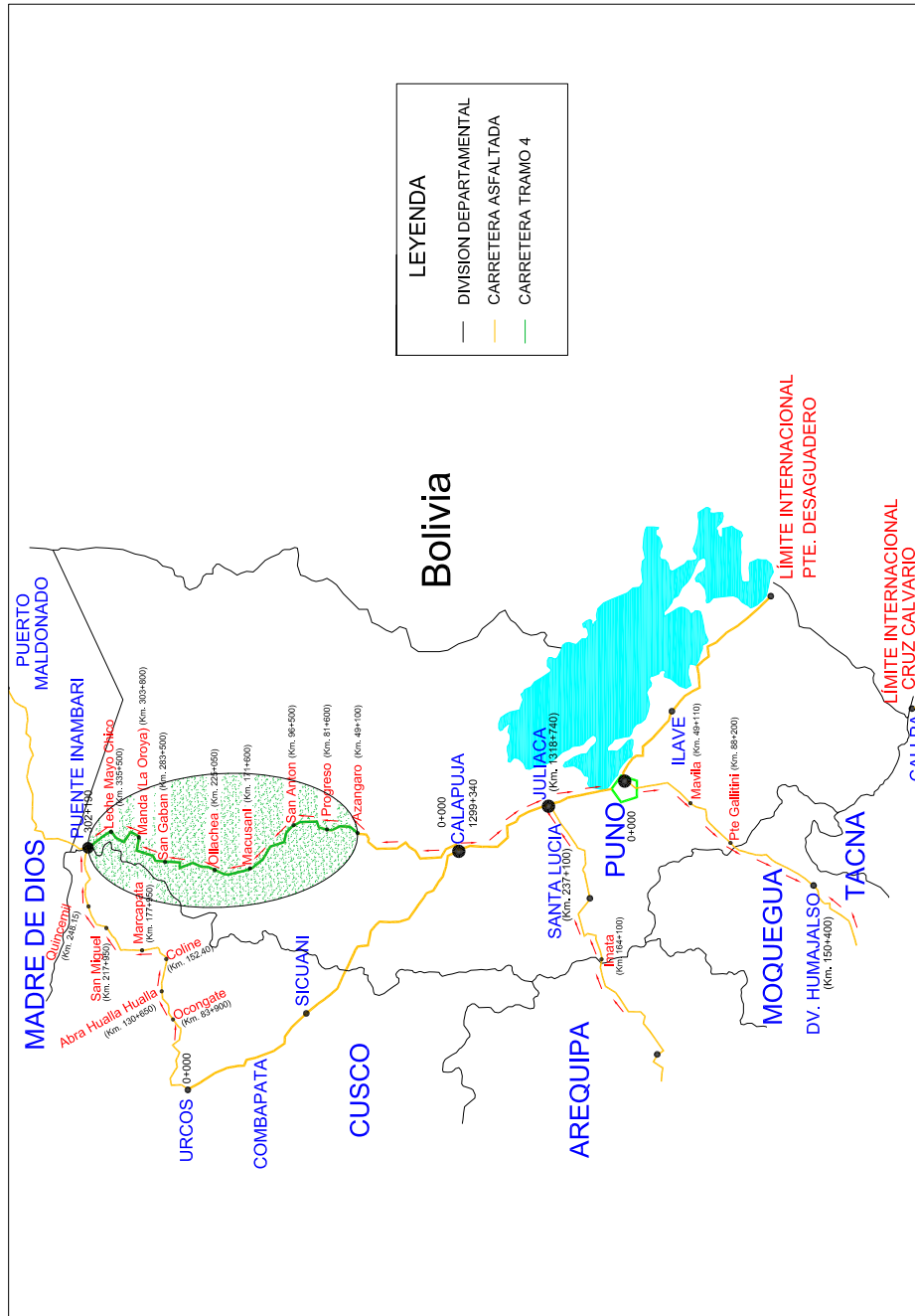


Figura 9. Accesibilidad del proyecto.
Fuente: Departamento de túneles, CCT4, 2012.

2.2.13.3. Fisiografía y topografía

La vía se encuentra ubicada en una zona de topografía preponderantemente ondulada a montañosa. La topografía de la región, en general es abrupta. La superficie ha tenido como principal agente modelador la erosión fluvial. De esta manera, se han formado profundos valles que alternan con elevaciones de fuertes pendientes.

2.2.13.4. Clima

El clima de la región es variado, se caracteriza por tener un clima templado y húmedo. El período de lluvias es desde el mes de octubre a marzo, el periodo de estiaje se inicia desde el mes de abril a setiembre. La información utilizada, para caracterizar el clima en el área de estudio, corresponde a la estación de Uruhuasi, Ollachea, Tabinapampa, Corani y Macusani, zonas ubicadas próximos a la zona de estudio.

2.2.14 Diseño geométrico

2.2.14.1 Generalidades

a. Ubicación

El sector crítico Wayrasencca está ubicado entre los paralelos 13 – 14 sur y entre los meridianos 70 – 71 oeste, entre las localidades de Ollachea y Uruhuasi. Precisamente entre las progresivas km 237 + 380 al km 238 + 453,547 Atrás 28 + 340 Adelante, de la carretera interoceánica sur – tramo 4: Azángaro – puente Inambari.

Sector crítico Wayrasencca:

Inicio: km 237 + 380

Fin: km 238 + 453, 547

Túnel Wayrasencca:

Inicio túnel: km 237 + 540

Fin de túnel: km 238 + 285, 46

b. Topografía

El levantamiento topográfico fue generado mediante un levantamiento convencional en los accesos de los túneles y sobre la misma montaña de emplazamiento.

c. Criterios generales para el diseño

El sector crítico Wayrasencca se caracteriza por tener un tramo como carretera típica y otro tramo como túnel. Se considera usar los mismos parámetros de diseño para ambos tramos.

Longitud de túnel proyectado: 745,46 m (sin incluir falso túnel a la entrada y a la salida)

Inicio de túnel: km 237 + 540

Fin de túnel: km 238 + 285,46

2.2.14.2 Estudios preliminares

a. Trabajos topográficos

En este sentido como primera medida se ha realizado un levantamiento prolijo y a detalle de la topografía del sector que comprende todo el macizo en estudio.

Se han generado planos mostrando la montaña con las curvas de nivel y el camino existente además de todos los detalles posibles como ser torres de alta tensión, postes de baja tensión, caminos peatonales, quebradas, flujos de agua, etc. Ver Figura 11.

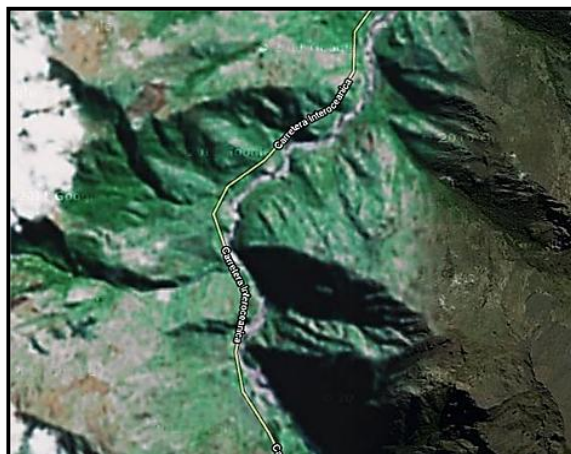


Figura 10. Imagen satelital de sector Wayrasencca.

Fuente: Departamento de geología, CCT4, 2010.

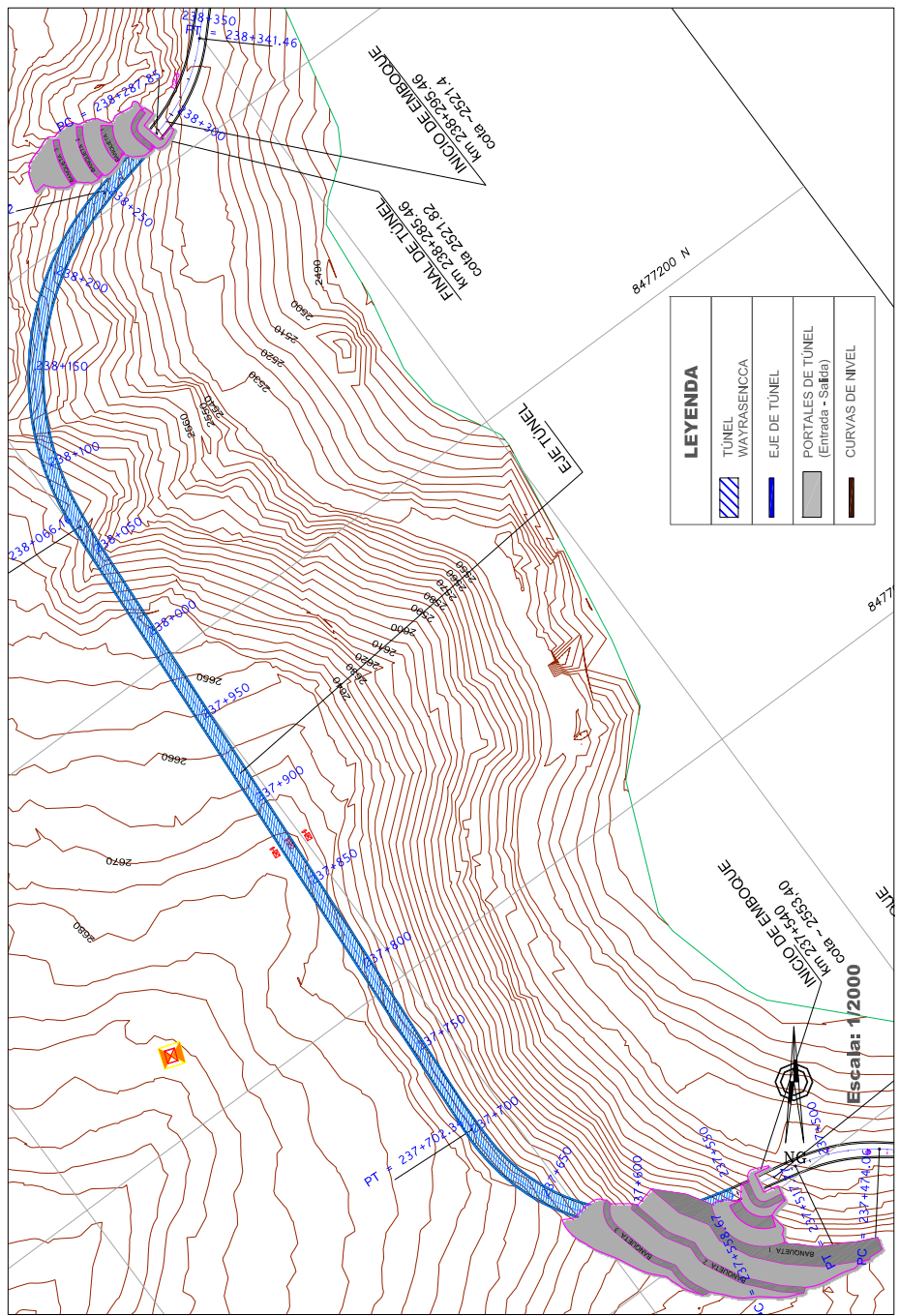


Figura 11. Planta topográfica.
Fuente: Departamento de túneles, CCT4, 2012.

2.2.15 Estudio geológico

Las condiciones geológicas de la región y del sector de emplazamiento del Túnel Wayrasencca son bastante complejas, como consecuencia de la geomorfología extrema y de las condiciones climáticas de elevada humedad, las mismas que ocasionan diversos fenómenos de inestabilidad en el terreno.

2.2.15.1 Fisiografía

El sector crítico de Wayrasencca, está rodeado de altas montañas, formando serranías abruptas con pendientes de 35°; 60° hasta 80° propias de cordillera con topografía muy accidentada, caracterizada por extensos afloramientos de rocas sedimentarias pertenecientes a la edad Paleozoica, cubiertas parcialmente por secuencia volcánica reciente.

2.2.15.2 Geología regional

Las unidades geológicas con mayor distribución en la zona, corresponden mayormente a rocas sedimentarias marinas y en menor grado, a rocas metamórficas, principalmente del tipo Metalimolitas, Metacuarcitas (Cuarcitas).

Los suelos o sedimentos no consolidados presentan una distribución más restringida, que se limita principalmente a las laderas de los valles principales de relieve suave, a los fondos de las quebradas, costados de los ríos y a los bordes de algunas lagunas locales, que tipifican esta región.

| LEYENDA | | | | | | |
|--------------|-------------|----------------|------------------------------|------------------|---------------------------|-------|
| ERA | SISTEMA | SERIE | UNIDADES LITOESTRATIGRAFICAS | ROCAS INTRUSIVAS | | |
| CENOZOICO | CUATERNARIO | HOLOCENO | ALUVIALES | Qh-al | | |
| | | | DEP. FLUVIO GLACIARES | Qh-fg | | |
| | | | MORRENAS | Qh- | | |
| | NEÓGENO | PLEISTOCENO | FM. Quenamari | M. YAPAMAYO | | Np-ya |
| | | | | M. SAPANUTA | | Nm-sa |
| PALEOGENO | PLIOCENO | | | | | |
| | MIOCENO | | | | | |
| MESOZOICO | CRETÁCICO | | | INDETERMINADO | K-ind | |
| | JURÁSICO | | | | Jim-si SIENITA NEFELÍNICA | |
| | TRIÁSICO | INFERIOR | | | Pmt-gr GRANITO | |
| PALEOZOICO | PÉRMICO | SUPERIOR | GRUPO MITU | Ps-mi | | |
| | | INFERIOR | GRUPO COPACABANA | Pi-c | | |
| | CERBONIFERO | PENSILVANIANO | GRUPO TARMA | Cs-t | | |
| | | MISSIPIANO | GRUPO AMBO | Ci-a | | |
| | DEVÓNICO | INFERIOR | FM. ANANEA | SD-a | | |
| | SILÚRICO | SUPERIOR | | | | |
| | ORDOVÍCIO | CARADOCIANO | FM. SANDIA | Os-s | | |
| | | LLANDEILIANO | | | | |
| LLAMVIRNIANO | | GRUPO SAN JOSE | Oi-si | | | |
| ARENIGIANO | | | | | | |

Figura 12. Leyenda geológica regional.

Fuente: Departamento de geología, CCT4, 2010.

2.2.15.3 Geología local

La geología del área del túnel está basada, principalmente en el mapeo geológico – geotécnico llevado a cabo por el consorcio INTERSUR S.A., y parcialmente, en los mapas geológicos regionales elaborados por Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET). También en las imágenes satelitales del Google Earth. Ver Figura 13.

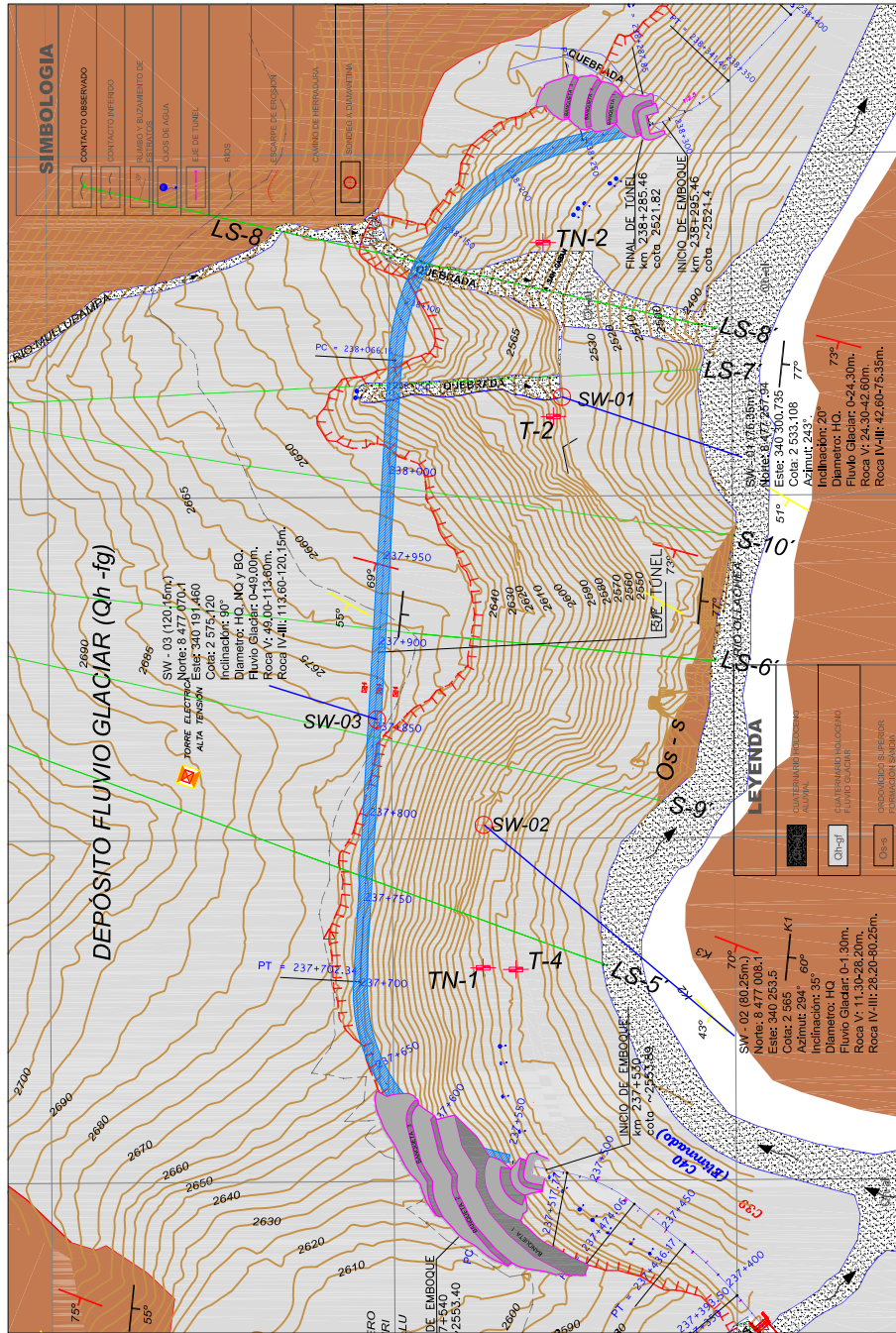


Figura 13. Geología local.
 Fuente: Departamento de túneles, CCT4, 2012.

2.2.15.4 Riesgos geológicos

Para su identificación se ha efectuado la revisión de antecedentes disponibles, incluyendo antecedentes virtuales (fotografías, filmaciones etc.) la cartografía geológica a escala regional o local y la individualización de las áreas de peligros geológicos reconocidos.

Los riesgos detectados están relacionados a peligros naturales como:

- Eventos de flujos aluvionales, debido a elevadas crecidas de ríos y principales quebradas involucrados.
- Procesos de inestabilidad de laderas y taludes altos con deslizamientos, flujos, derrumbes, caída de bloques, eventuales remociones en masa que puedan producirse como resultado de la saturación de materiales en épocas de lluvias y por posible actividad sísmica en la zona.

- Eventuales reactivaciones de fallas geológicas regionales, producto del marco tectónico de la región.
- Hidrogeología; posibilidad de encontrar aguas subterráneas en las excavaciones.
- Se incluyen aquí otros peligros naturales de origen hidrometeorológico, tales como tormentas eléctricas, vientos, entre otros.

2.2.15.5 Marco geológico del túnel

a. Mapeo geológico

El mapeo geológico superficial de la zona se realizó utilizando bases topográficas detalladas, sobre las cuales se incorporaron los trazados preliminares del túnel. Además, el mapeo se complementó con el análisis de imágenes satelitales.

Herramientas y equipos empleados:

- Martillo geológico.
- Brújula tipo Brunton.

- Lupas 15x – 10x
- Cámara fotográfica digital de 12 mp.
- Esclerómetro (0,7 joules).
- Bolsas plásticas para muestreo de rocas y suelo.

Previamente se llevaron a cabo las siguientes actividades:

- Análisis de imágenes satelitales disponibles, que permitió una primera visión de las rocas del sector y además de su irregularidad topográfica y baja cubierta vegetal.
- Reconocimiento de los sitios de emplazamiento de las obras del proyecto, en particular los trazados y zonas de portales del túnel.

b. Metodología del levantamiento de datos

Para el levantamiento de los datos en terreno se han levantado y documentado “Estaciones Geotécnicas”, para unidades roca y suelo.

c. Metodología de la descripción unidades roca

Para el mapeo de roca, se utilizaron los parámetros de acuerdo al índice de calidad de la roca según Nick Barton (Q) y Bieniawski (RMR). El mapeo geológico - geotécnico se enfocó en:

- Definición visual y distribución en área de las diferentes unidades de roca reconocidas.
- Caracterización litológica y composicional de las diferentes unidades de roca.
- Estimación visual de las condiciones de alteración/meteorización.
- Estimación en terreno de la resistencia uniaxial de las unidades de roca.
- Descripción y caracterización geotécnica preliminar del macizo rocoso en afloramientos.
- Medición y descripción de los planos de discontinuidad (fallas, diaclasas, fracturas, foliación, etc.), incluyendo la determinación del número de diaclasas o familias de discontinuidades, dirección, forma, continuidad,

espaciamiento, rugosidad, materiales de relleno y condiciones de agua de las discontinuidades.

d. Metodología de la descripción de unidades en suelo

Para las unidades de suelo, el mapeo geológico - geotécnico se enfocó en:

- Definición en laboratorio, de las diferentes unidades de suelo reconocidas y estimación del origen geológico.
- Estimación visual de las características geotécnicas de estas unidades de suelo, tales como: distribución del tamaño y forma de los bloques, granulometría, humedad, compactación, peso específico etc.

e. Litoestratigrafía

Las rocas que afloran corresponden al basamento que infrayace al depósito fluvio glaciar compuesto por la siguiente litología:

- Rocas sedimentarias: Areniscas y Pelitas.
- Rocas metamórficas: Metalimolitas y Metacuarcitas (Cuarcitas).

Tabla 3
Resumen estratigráfico del área del túnel.

| | | |
|----------------------------|--------------|---|
| CUATERNARIO (Q) | Qh-al | Depósitos aluviales Bloques, gravas, arenas, limos, arcillas con distribución heterométrica de bloques. |
| | Qh-fg | Depósitos fluvio glaciar Mezcla de bloques, gravas, arenas, limos, arcillas con distribución heterométrica de bloque. |
| | Qh-m | Depósitos morrénicos Mezclas de gravas, arenas, limos, arcillas y bloques. |

Fuente: Departamento de geología, CCT4, 2010.

➤ **Contacto suelo – roca**

El depósito fluvio glaciar en la entrada del túnel abarca 160 m aproximadamente, desde el km 237 + 700 se espera que el túnel este emplazado en roca tipo V.

2.2.16 Estudio geotécnico

Al iniciar el proyecto para una excavación subterránea, es posible que no exista información adecuada o suficiente sobre el macizo a la profundidad donde se tiene que realizar la

excavación. En estas circunstancias, la roca que aflora en la superficie será la que proporciona la mayor información sobre la litología y las características estructurales del terreno. En el caso particular del sector Wayrasencca, al tratarse de un depósito fluvio glaciar muy amplio y de gran espesor no se puede ver roca aflorante en las cercanías al trazado del túnel, salvo en orillas de río Ollachea, en la parte superior del macizo o en la ladera opuesta.

Por consiguiente, se ha procedido a realizar un trabajo minucioso de interpretación geológica, investigaciones geofísicas a detalle y sondeos rotatorios, para contar con la mayor cantidad de datos que permitan una mayor aproximación de la situación geológica y geotécnica en el desarrollo del trazado del túnel.

2.2.16.1 Estudios geotécnicos de superficie

a. Trabajos anteriores

Consistieron en la excavación de forma manual de 5 trincheras, con la finalidad de obtener valores de algunos parámetros que

interesan para el estudio de estabilidad de los taludes en las laderas del sector crítico.

➤ **Excavación de trincheras**

La excavación de trincheras se realizó en las progresivas del trazado que seguía el camino existente.

- **T1** km 237 + 850, profundidad 4 m, no hay agua.
- **T2** km 238 + 000, profundidad 4 m, no hay agua.
- **T3** km 237 + 720, profundidad 4 m, no hay agua.
- **T4** km 237 + 635, profundidad 4 m, no hay agua.
- **T5** km 237 + 410, profundidad 4 m, no hay agua.

De estos puntos investigados, los de mayor interés por su cercanía a los portales del túnel son los siguientes:

- **T4** ubicación cercana al portal de entrada.
- **T2** ubicación cercana al portal de salida.

Tabla 4
Resultados de los parámetros geotécnicos – trincheras anteriores.

| Tipo de ensayo - parámetros | Trinchera 4 | Trinchera 2 |
|--|--------------------|--------------------|
| Local | Entrada al túnel | Salida del túnel |
| Progresiva | 237 + 635 | 238 + 000 |
| Ensayo de clasificación | | |
| Índice de plasticidad | 8 % | No presenta |
| Granulometría | 62 % Grava | 62 % Grava |
| | 20 % Arena | 20 % Arena |
| | 18 % Finos | 20 % Finos |
| Clasificación AASHTO | Gravas arcillosas | Gravas limosas |
| Ensayos químicos | | |
| Suelo | Sales solubles | 83 ppm |
| | Cloruros | 21 ppm |
| | Sulfatos | 7 ppm |
| Agua | Sales solubles | 43 ppm |
| | Cloruros | 6 ppm |
| | Sulfatos | 11 ppm |
| Ensayo de determinación de pH | | |
| pH en suelo | 6,85 | |
| pH en agua | 6,29 | |
| Ensayo de densidad | | |
| Densidad natural húmeda (kg/m ³) | 1 860 | 1 870 |
| Densidad seca (kg/m ³) | 1 710 | 1 770 |
| Humedad natural (%) | 9,0 | 5,6 |
| Ensayo de permeabilidad | | |
| Permeabilidad (cm/s) | 2,39 E-03 | 1,59 E-03 |
| Ensayo de corte directo | | |
| Cohesión (kg/cm ²) | -- | 0,02 |
| Angulo de fricción (grados) | -- | 33,65 |

Fuente: Departamento de geotecnia, CCT4, 2010.

Se observa que las concentraciones de sales, cloruros y sulfatos, se encuentran dentro de los

límites permisibles, por lo que, no es necesaria ninguna medida de protección para el concreto, ni para el acero.

b. Trabajos en etapa final

En esta etapa del estudio se realizaron excavaciones para el muestreo de suelos en ambos portales del túnel previsto y consistieron en la excavación manual a cielo abierto de 2 trincheras, que se describen a continuación:

➤ **Excavación de trincheras**

- **TN-01** km 237 + 640, profundidad 2 m, no hay agua.
- **TN-02** km 238 + 138, profundidad 2 m, no hay agua.

Las muestras obtenidas han sido enviadas al laboratorio de suelos de la UNI (Universidad Nacional de Ingeniería) para su procesamiento, están codificadas de la siguiente manera:

- **TN-01** con el nombre de M-3.
- **TN-02** con el nombre de M-4.

➤ **Ensayos estándar de clasificación.**

Con las muestras obtenidas en las trincheras, se realizaron ensayos estándar de clasificación de suelos y de propiedades físicas, consistentes en: análisis granulométrico por tamizado, límites de Atterberg, contenido de humedad.

Tabla 5
Resultados de los parámetros geotécnicos – trincheras finales.

| Tipo de Ensayo - Parámetros | Trinchera TN-1 (M-3) | Trinchera TN-2 (M-4) |
|--|---------------------------------|-----------------------------------|
| Local | Entrada al túnel | Salida del túnel |
| Progresiva | 237 + 640 | 238 + 138 |
| Ensayo de clasificación | | |
| Índice de plasticidad | 9% | 6% |
| Granulometría | 54 % Grava | 60 % Grava |
| | 22 % Arena | 16 % Arena |
| | 24 % Finos | 24 % Finos |
| Clasificación AASHTO | A – 2 - 4 (0) | A - 1b (0) |
| Clasificación de suelo | Grava arcillosa con arena | Grava arcillo limosa con arena |
| Ensayo de densidad | | |
| Densidad natural húmeda (kg/m ³) | 2 280 | 2 120 |
| Densidad seca (kg/m ³) | 2 075 | 1 931 |
| Humedad natural (%) | 9,9 | 9,8 |
| Ensayo de corte directo | | |
| Esfuerzo cortante (kg/cm ²) | 1, 2, y 4 | 1, 2, y 4 |
| | Humedad 6,5 % | Humedad 9,1 % |
| Cohesión (kg/cm ²) | 0 | 0,6 |
| Angulo de fricción (grados) | 35 | 37,5 |

Fuente: Departamento de geotecnia, CCT4, 2010.

2.2.16.2 Trabajos de prospección geofísica

En la etapa de diseño final se realizaron trabajos de prospección geofísica a detalle con un importante volumen de investigaciones consistentes en una red de líneas sísmicas que abarca todo el sector de estudio y sondeos eléctricos de verificación en los puntos más relevantes. Fueron ejecutados 15 sondeos eléctricos verticales SEV y 8 perfiles de refracción sísmica en líneas que han sido escogidas para contar con el máximo de cobertura areal del sector investigado. Estos perfiles son adicionales y complementarios a las tres líneas ejecutadas anteriormente.

El objetivo principal de las investigaciones geofísicas ha sido diferenciar los depósitos no consolidados según su grado de compactación, determinar la base de los depósitos sueltos y diferenciar el macizo rocoso según su grado de conservación distinguiendo la zona de alteración.

De acuerdo al informe geofísico, sobre las conclusiones del Sondeo Eléctrico Vertical (SEV),

indica que no fue posible determinar la presencia de agua como tal. Sin embargo, de acuerdo con los datos de la geosísmica, es posible determinar aproximadamente el nivel freático, apoyado por sondeos y observaciones en campo:

2.2.16.3 Sondeos geotécnicos

La recuperación de núcleos por medio de la barrenación con diamantina es uno de los métodos más importantes de la exploración del subsuelo ya que la broca diamantada cortará cualquier material sin importar la dureza del mismo, lo que permitirá obtener muestras relativamente inalteradas que en nuestro caso particular del túnel Wayrasencca la recuperación de las muestras se realizó cada 1,5 m.

En nuestro caso se eligió el diámetro HQ para la perforación SW-1, para SW-2 eligiéndose el diámetro NQ, y BQ para la perforación SW-3.

Tabla 6
 Descripción de los materiales encontrados (ensayo Lugeon).

| Sondeo | Profundidad (m) | Descripción del material | Clasificación (RMR) | Permeabilidad (cm/seg) |
|--------|-----------------|--------------------------|---------------------|--|
| SW-01 | 00,0 - 24,3 | Fluvio glaciar | | 4,91 E-3 4,87 E-3 |
| | 24,3 - 42,6 | Roca muy fracturada | Roca V | 3,13 E-3 1,57 E-3 |
| | 42,6 - 75,3 | Roca fracturada | Roca IV-III | 4,60 E-4 2,37 E-3* 2,07 E-3 2,31 E-3* |
| SW-02 | 00,0 - 11,3 | Fluvio glaciar | | 1,01 E-2 |
| | 11,3 - 28,2 | Roca muy fracturada | Roca V | 7,52 E-3 |
| | 28,2 - 80,2 | Roca fracturada | Roca IV-III | 0,00 E0 1,95 E-3* 5,83 E-3 0,00 E0 |
| SW-03 | 00,0 - 39,00 | Fluvio glaciar | | |
| | 39,00 - 113,60 | Roca muy fracturada | Roca V | |
| | 113,60 - 120,15 | Roca fracturada | Roca IV-III | |

Fuente: Departamento de geotecnia, CCT4, 2010.

La ubicación de los sondeos realizados se muestra en la Figura 14.

2.2.16.4 Resultados de los trabajos de geotecnia

La finalidad de los trabajos de geotecnia, ha sido la de obtener mayor información acerca de las características del subsuelo y de parámetros de los materiales existentes en él. Se hicieron pruebas sobre roca, que según inferencia, son del basamento rocoso.

- Resistencia a la compresión simple: 70,7 MPa.
- Módulo elástico: 7,47 GPa.
- Poisson: 0,31.

Como resultado de los trabajos se han elaborado los perfiles geotécnicos que permiten definir el perfil geológico - geotécnico del túnel que se presenta como plano base para la sectorización del túnel. Los materiales previstos a encontrar en la excavación son:

- Material fluvio – glaciar (de cobertura).
- Roca muy fracturada (formación Sandia).
- Roca moderadamente fracturada (formación Sandia).
- Basamento rocoso (formación Sandia).

Tabla 7
Análisis y ensayos realizados en laboratorio.

| CODIGO MUESTRA | T4 | M-3 | T2 | M-4 | SW-03 | SW-02 | SW-01 |
|---|-------------------|---------------------------|----------------|------------------------|----------------|--------------------------|--------------------------|
| Tipo de muestreo | Trinchera | Trinchera | Trinchera | Trinchera | Sondeo | Sondeo | Sondeo |
| Profundidad alcanzada (m) | 4,00 | 2,00 | 4,00 | 2,00 | 120,15 | 80,25 | 75,35 |
| Progresiva en el eje de túnel | 237 + 635 | 237 + 640 | 238 + 000 | 238 + 138 | 237 + 856* | 237 + 770 | 237 + 970 |
| Material | Fluvió-glaciár | Fluvió-glaciár | Fluvió-glaciár | Fluvió-glaciár | Fluvió-glaciár | Roca moderada fracturada | Roca moderada fracturada |
| Sección a analizar en talud | Talud a entrada | Talud a entrada | Talud a salida | Talud a salida | | | |
| Tipo de sección en túnel | | 6 a | | 6 a | 3 | 4 | 3 |
| Clasificación SUCS | Gravas arcillosas | Grava arcillosa con Arena | Gravas limosas | Grava limosa con arena | | | |
| Peso específico aparente | | | | | | 27,34 | 27,72 |
| Densidad húmeda | 1,86 | 2,28 | 1,87 | 2,12 | | 2,79 | 2,83 |
| Densidad seca (gr/cm ³) | 1,71 | 2,07 | 1,77 | 1,93 | | 2,79 | 2,83 |
| Humedad natural (%) | 9,00 | 9,90 | 5,60 | 9,80 | | | |
| Absorción (%) | | | | | | 0,17 | 0,2 |
| Cohesión aparente (kN/m ²) | | 0 | 2 | 60 | | | |
| Angulo de fricción (°) | | 35,00 | 33,60 | 37,50 | | | |
| Grado de permeabilidad | Permeable | | Permeable | | | | |
| Resistencia a compresión simple (MPa) | | | | | | 71,90 | 102,10 |
| Módulo elástico E (GPa) | | | | | | 12,22 | 11,41 |
| Poisson | | | | | | 0,29 | 0,30 |
| Cohesión aparente (MPa) | | | | | | 82,00 | 98,00 |
| Angulo de fricción interna residual (°) | | | | | | 27,10 | 25,80 |
| Resistencia a tracción simple (MPa) | | | | | | 10,12 | 9,99 |

Fuente: Departamento de geotecnia, CCT4, 2010.

2.2.16.5 Caracterización geotécnica del tramo

Al presentarse un manto de suelo bastante espeso que ha sido identificado como un depósito fluvio glaciar, apoyado sobre lecho rocoso. La clasificación geotécnica del terreno que atravesará el túnel Wayrasencca, se debe dividir en dos sistemas de clasificaciones: una de suelo y otra en roca.

a. Clasificación del depósito fluvio glaciar

En base a los ensayos realizados en muestras obtenidas de las trincheras excavadas en los taludes de entrada y salida del túnel, se puede establecer como determinante la clasificación del suelo que estos arrojen. Las capas de suelo presentes en la zona de los portales del túnel, sometidas a ensayos estándar de suelos, se debe complementar que existen fuerte presencia de bloques de roca que están inmersos en la matriz de suelo, lo que conforma un conglomerado compacto entre suelo y bloques de roca.

b. Distribución geotécnica del túnel

Con todos los conocimientos de la geología del sector, el desarrollo de los trabajos de geotecnia, y de los sistemas de clasificación de macizos rocosos, se ha procedido a elaborar el perfil geológico geotécnico del tramo que va a atravesar el túnel, con lo que se ha podido dividir el tramo en grandes unidades nítidamente diferenciadas.

Tabla 8
Valoración del macizo rocoso en túnel.

| Tramo | Unidad Litológica | Observaciones |
|-----------------------|-------------------------|--|
| 237 + 540 a 237 + 700 | Depósito fluvio glacial | Suelo (Grava arcillosa) |
| 237 + 700 a 237 + 790 | Roca muy fracturada | Roca Clase V (Metalimolita) |
| 237 + 790 a 237 + 950 | Roca fracturada | Roca clase IV–III (Metalimolita y Metacuarcita) |
| 237 + 950 a 237 + 990 | Basamento rocoso | Roca clase II (Metacuarcita) |
| 237 + 990 a 238 + 110 | Roca fracturada | Roca clase IV–III (Metalimolita y Metacuarcita) |
| 238 + 110 a 238 + 255 | Roca muy fracturada | Roca clase V (Metalimolita) |
| 238 + 255 a 238 + 285 | Depósito fluvio glacial | Suelo (Grava limosa) |

Fuente: Departamento de geotecnia, CCT4, 2010.

2.2.17 Excavación en suelo

Por contar con poca cohesión el suelo fluvio glacial, se deberá tener mucho cuidado en la excavación subterránea especialmente en el sector de los portales. Ver Figura 15 y Figura 16.

La sección se la divide en cinco partes a saber:

- 1) Galería Piloto.**
- 2) Ensanche de Calota**
- 3) Destroza central**
- 4) Hastiales**
- 5) Solera.**

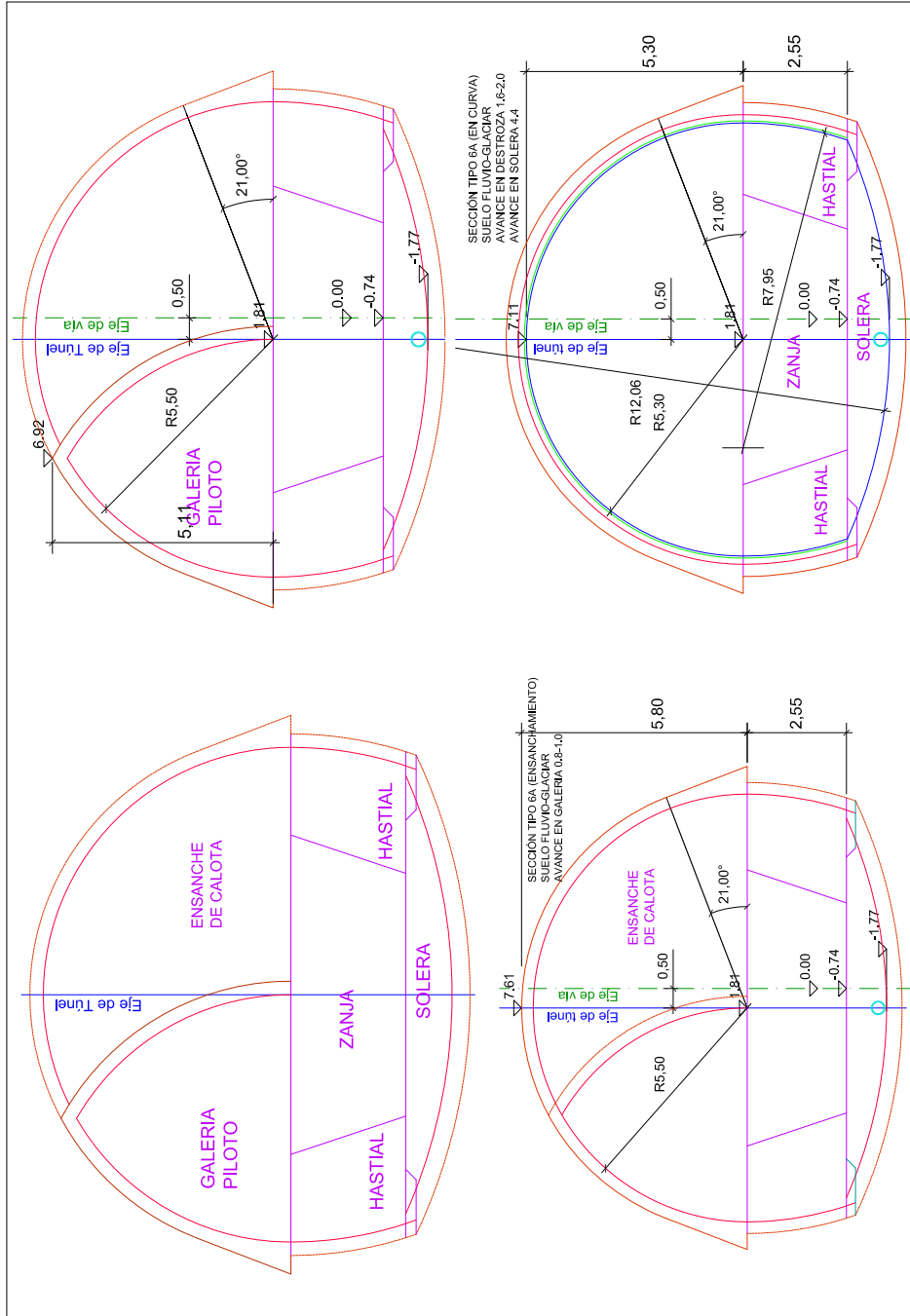


Figura 15. Túnel piloto.
Fuente: Departamento de túneles, CCT4, 2012.

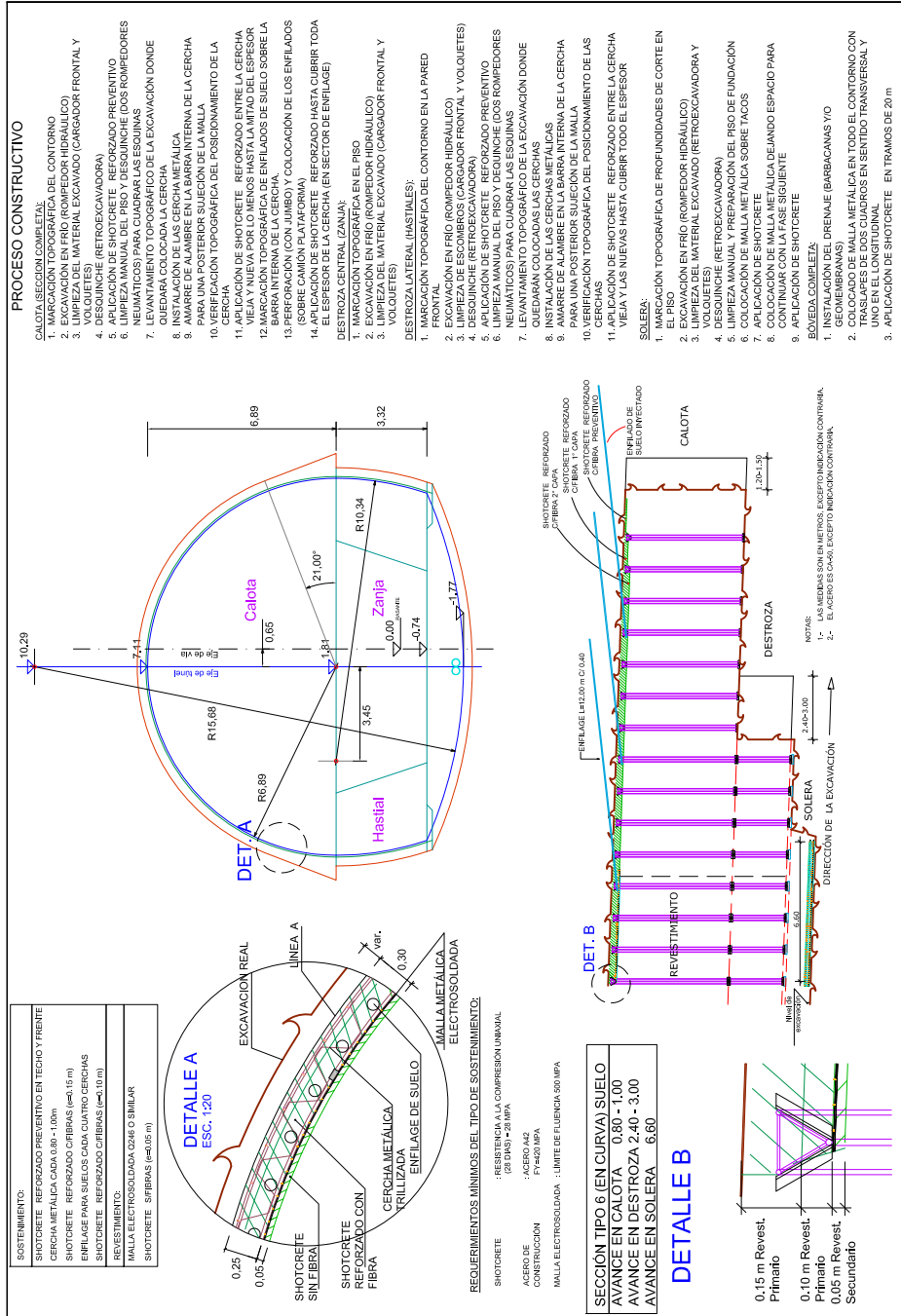


Figura 16. Sección en suelo.
Fuente: Departamento de túneles, CCT4, 2012.

2.2.17.1 Excavación en la galería piloto

Se realizará la excavación de una galería tipo exploratoria que permita observar el comportamiento del suelo hacia la excavación del túnel. Por ello el avance será muy cuidadoso con la finalidad de evitar cualquier riesgo de derrumbe.

La secuencia ejecutiva se detalla a continuación:

- **Paso 1.** Se excavará de forma mecanizada o “en frío”, sin el uso de explosivos. Para ello se empleará equipo hidráulico que solamente rasgará el material y éste caerá sin mayor esfuerzo, este equipo es la retroexcavadora pequeña y con un cargador frontal
- **Paso 2.** En el techo de la parte excavada y en la pared frontal de la misma, se debe colocar una capa de hormigón lanzado para reforzar este y trabajar con mayor seguridad durante la colocación de la cercha o cimbra.
- **Paso 3.** Se colocará la cimbra trillizada uniendo los segmentos en su posición definitiva por medio de los

tornillos de sujeción, la verticalidad es fijada por medio de las barras separadoras que conectarán a la cimbra antigua contigua.

- **Paso 4.** Se procede a marcar los puntos donde se instalarán los enfilajes que delimitarán el área del túnel piloto, los mismos que tendrán la función de dar sostenimiento mientras se realiza la excavación del mismo.
- **Paso 5.** Se realiza la inyección de los enfilajes con la lechada de concreto.
- **Paso 6.** Se colocará delante de los enfilajes planchas metálicas acanaladas inicialmente, para luego continuar con la malla a medida que se profundice en el avance, estas serán colocadas detrás de la cercha (plancha acanalada o malla respectivamente según el avance) esta malla estará bien conectada a la cimbra mediante alambre de amarre.

- **Paso 7.** Se aplicará una capa gruesa de hormigón lanzado incorporada con fibra de acero, para llegar a cubrir casi la totalidad del espesor de la cimbra.
- **Paso 8.** Se volverá a marcar puntos para instalar los enfilajes en ambos lados (derecho e izquierdo), seguidos de la inyección de lechada, colocación de malla y lanzado de shotcrete hasta cubrir todo el espesor de la cimbra, todo esto en conjunto proporciona el sostenimiento necesario para una excavación en suelo, dentro de una sección pequeña, como lo es un túnel piloto.
- **Paso 9.** Se procederá a un nuevo avance, conjuntamente dependiendo del comportamiento del macizo rocoso, que indicará si continúa roca de mejor calidad o si es suelo, y de ser suelo, continuar con la excavación a sección completa.

2.2.17.2 Excavación del ensanche de calota

Es la porción complementaria a la galería piloto. Su secuencia ejecutiva es como sigue:

- **Paso 1.** Se excavará de forma mecanizada o “en frío”, es decir sin el uso de explosivos. Para ello se empleará equipo hidráulico que solamente rasgará el material y éste caerá sin mayor esfuerzo, este equipo puede ser el martillo demoledor o picador montado en una oruga grande, y también el uso de una retroexcavadora pequeña.

- **Paso 2.** En el techo de la parte excavada y en la pared frontal de la misma, se debe colocar una capa de hormigón lanzado para reforzar las paredes, techo y núcleo (que tiene la función de dar sostenimiento al frente éste debe de tener un aproximado de 5 m), todo esto para trabajar con mayor seguridad durante la colocación de la cimbra.

- **Paso 3.** Se colocará la cimbra trillizada uniendo los segmentos en su posición definitiva por medio de los tornillos de sujeción, la verticalidad es fijada por medio de las barras separadoras que conectarán a la cimbra antigua contigua.

- **Paso 4.** Se colocará la malla alrededor de la cimbra, esta malla estará bien conectada a la cimbra mediante alambre de amarre.
- **Paso 5.** Se aplicará una capa gruesa de hormigón lanzado incorporada con fibra de acero, para llegar a cubrir casi la totalidad del espesor de la cimbra.
- **Paso 6.** Se marcan los puntos para luego perforar e instalar los enfilajes de suelo (cada tramo indicado en planos) en casi toda la periferia de la cimbra.
- **Paso 7.** Terminada la perforación de enfilajes, se procederá a la inyección con lechada de cemento.
- **Paso 8.** Se aplicará nuevamente hormigón lanzado hasta cubrir en su totalidad la cimbra y los enfilajes, que se encuentran sobre la cimbra.
- **Paso 9.** Se procederá con un nuevo avance.
- **Paso 10.** Se perforarán e instalarán anclajes que van con refuerzo adicional en las esquinas de la sección, una vez que el hormigón haya adquirido la suficiente dureza.

2.2.17.3 Excavación de la destroza central

Esta parte de la destroza que está dividida del hastial se justifica plenamente con el objetivo de tener una longitud mayor de avance, puesto que en esta etapa no se instala ningún tipo de sostenimiento.

- **Paso 1.** Se excava de forma mecanizada o “en frío”, esto es para evitar perturbaciones en el conjunto del macizo. Para ello es suficiente una retroexcavadora de gran capacidad.

2.2.17.4 Excavación de los hastiales

La parte de la destroza que está cortada al extremo con los hastiales, e irán siendo excavados uno desfasado del otro que está en frente, esto se hará para evitar deformaciones excesivas por la simultaneidad de su excavación.

La secuencia de construcción es como sigue:

- **Paso 1.** Se excavará de forma mecanizada o “en frío”, es decir sin el uso de explosivos.

- **Paso 2.** Se colocará una capa delgada de hormigón lanzado para prevenir la caída de bloques que pueden ocasionar una sobreexcavación no deseada.

- **Paso 3.** Se colocarán dos segmentos correspondientes a las patas de las cimbras trillizadas uniéndolos a la cimbra de la media bóveda por medio de los tornillos de sujeción, estos segmentos de cimbra estarán sobre una galleta o bloque de hormigón con cemento, el mismo que servirá como base sólida garantizando la separación con el suelo evitando que estos segmentos se hundan; además de las respectivas barras separadoras que conectarán a la cimbra antigua contigua las que proporcionan el espacio entre cimbra y cimbra indicado en los planos.

- **Paso 4.** Se aplicará la totalidad de la capa de shotcrete incorporado con fibra de acero, para llegar a cubrir la totalidad del espesor de la cimbra.

- **Paso 5.** Se procede con un nuevo avance.

2.2.17.5 Excavación de la solera (invert)

Es la última parte a excavar y es en forma de contrabóveda, con la cual se termina la sección completa del frente de túnel en suelo.

La secuencia ejecutiva se detalla a continuación:

- **Paso 1.** Una vez que el topógrafo haya marcado las alturas de corte en el piso, el equipo procederá a excavar de forma mecanizada, hasta llegar a los niveles permitidos.

- **Paso 2.** Se colocará la malla metálica sobre galletas o bloques de hormigón con cemento que garanticen la separación respecto del suelo, clavando en el suelo unas barras delgadas de acero que sobresalgan para amarrar la malla de la última capa. Si existiera presencia de agua se dejará tubos de PVC clavadas en el piso y amarradas en las barras de acero para posterior funcionamiento como barbacana, estos no se dispondrán en el eje puesto que ahí se colocará el tubo del drenaje subterráneo.

- **Paso 3.** Se aplicará el hormigón lanzado en sucesivas capas hasta llegar al espesor de diseño.
- **Paso 4.** Se colocará la segunda malla metálica sobre el shotcrete e irá fuertemente amarrada a las barras de espera dejadas anteriormente.
- **Paso 5.** Se aplicará la última capa de shotcrete en sucesivas capas hasta llegar al espesor de diseño.
- **Paso 6.** Se procede nuevo avance de ensanche

2.2.18 Excavación en roca

La excavación prevista para el túnel en roca es a sección completa. En caso de que las condiciones de la roca sean diferentes a las previstas, se aplicará el método constructivo de sección parcializada que se detalla a continuación:

La parte que toque excavar en roca, se realizará con voladura en función a la dureza de la misma. La carga explosiva trabaja de diferente forma, según la profundidad, la inclinación y la densidad de carga en los taladros. La excavación de túneles en roca depende considerablemente de cuatro elementos:

- 1) Máquinas perforadoras.
- 2) Brocas.
- 3) Barrenos.
- 4) Explosivos.

Cuando el túnel atraviesa roca de mayor dureza se estima un desgaste gradual de las brocas y barrenos; así los tiempos de perforación irán creciendo de acuerdo al incremento en dureza de la roca. Ver Figura 17.

La sección se la divide en cuatro partes a saber:

- 1) Calota (con galería piloto eventualmente).
- 2) Destroza central.
- 3) Hastiales (izquierdo y derecho).

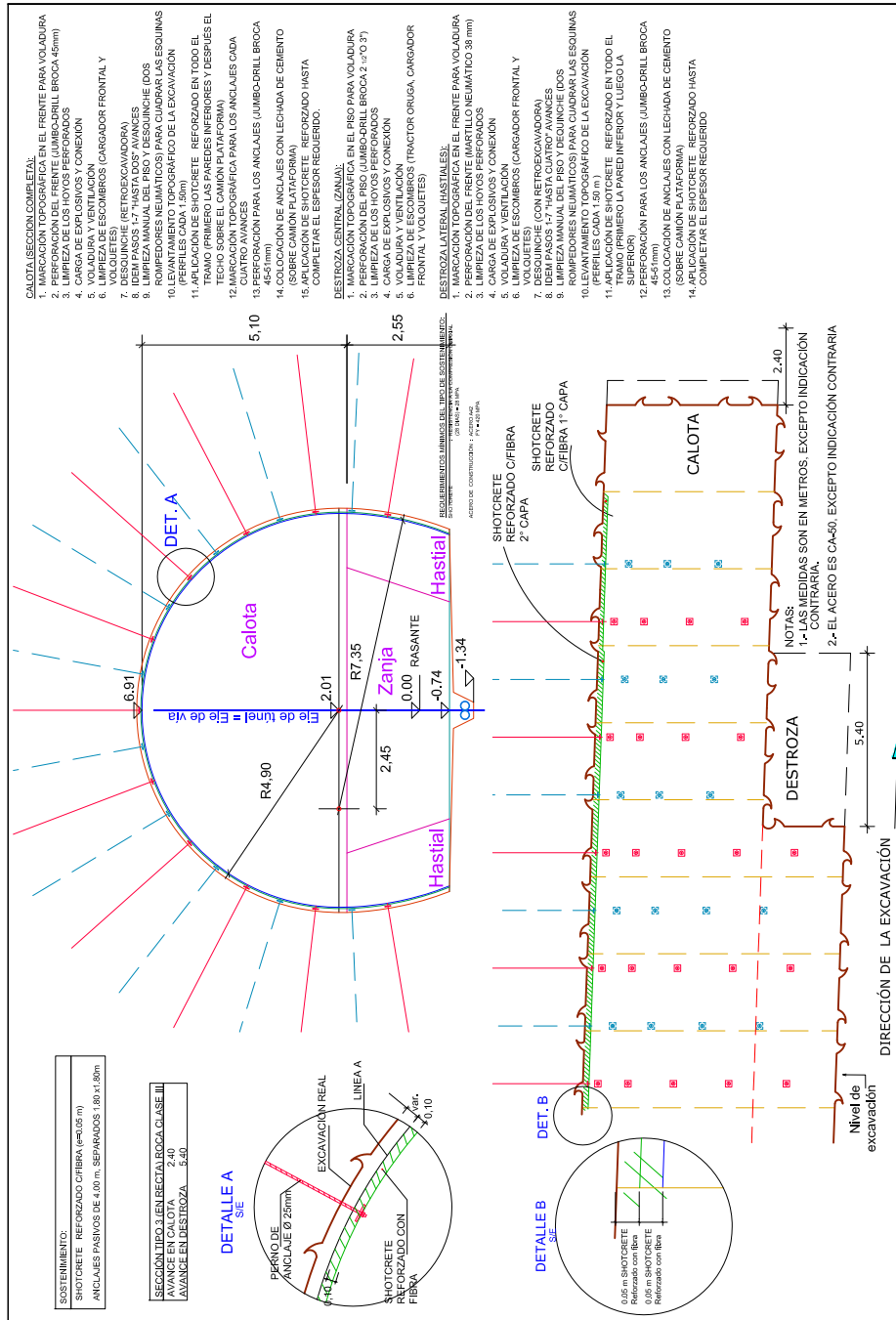


Figura 17. Sección en roca.
 Fuente: Departamento de túneles, CCT4, 2012.

2.2.18.1 Excavación de la calota

Se realizará con los métodos conocidos de voladura de contorno controlado.

La secuencia ejecutiva se detalla a continuación:

- **Paso 1.** Se perforará con jumbo drill, los taladros marcados por topografía dependiendo del método seleccionado previamente:
 - ✓ Cuña en abanico.
 - ✓ Cuña en V.
 - ✓ Cuña en taladros paralelos.
- **Paso 2.** Se cargará el explosivo y se realiza la voladura.
- **Paso 3.** Se retirarán los escombros y luego se desquincha hasta retirar todos los bloques sueltos o aflojados
- **Paso 4.** En el techo de la parte excavada, se colocará una capa de hormigón lanzado para

reforzar este de manera preventiva y trabajar con mayor seguridad.

- **Paso 5.** Se procede a marcar los puntos correspondientes en las paredes, formando un arco alrededor del frente para la instalación del sostenimiento (marcha - avanti).
- **Paso 6.** Se perforará e instalará los marcha – avanti (enfilajes de roca), formando un arco de 90° reforzado.
- **Paso 7.** Se aplicará una capa gruesa de hormigón lanzado reforzado con fibra de acero, este espesor será el indicado en los planos de diseño.
- **Paso 8.** Se procederá con un nuevo avance.

2.2.18.2 Excavación de la destroza central

Esta parte de la destroza que está dividida del hastial, se la ejecuta con la finalidad de no dañar con la vibración de las voladura sobre las paredes inferiores de la media bóveda, y así obtener un avance mayor en longitud y en volumen de excavación.

La secuencia ejecutiva se detalla a continuación:

- **Paso 1.** Una vez que el topógrafo ha marcado la ubicación de los taladros, con cierto grado de inclinación en los barrenos con la finalidad de tener mayor facilidad de disparo de los fragmentos rocosos.
- **Paso 2.** Se cargará el explosivo y se realiza la voladura.
- **Paso 3.** Se retira los escombros hasta llegar al nivel de piso, eliminando las rocas con ángulos cortantes.
- **Pasó 4.** Se procede con un nuevo avance.

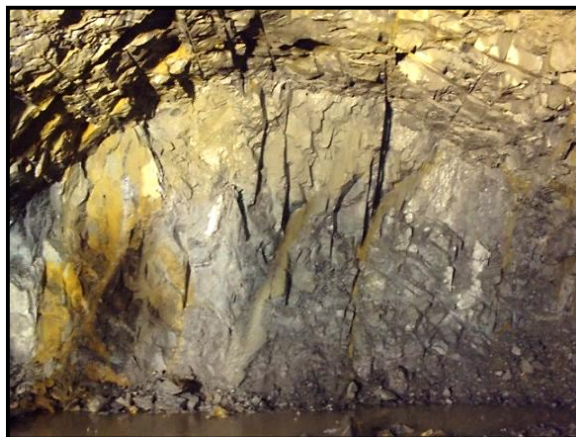


Figura 18. Frente después de voladura.

Fuente: Departamento de túneles, CCT4, 2010.

2.2.18.3 Excavación de los hastiales

La parte de la destroza que está cortada al extremo son los hastiales, e irán siendo excavados uno desfasado de la pared de enfrente, esto para evitar deformaciones simultáneas en una misma sección.

La secuencia de construcción es como sigue:

- **Paso 1.** Se perfora los taladros marcados por topografía en la línea perimetral de la pared y en el cuerpo del hastial, en dirección longitudinal del túnel.
- **Paso 2.** Se cargará el explosivo y se realiza la voladura.
- **Paso 3.** Se retira los escombros y luego se desquincha hasta retirar todos los bloques sueltos.
- **Paso 4.** Se aplicará una capa gruesa de hormigón lanzado reforzado con fibra de acero, este espesor será el indicado en los planos de diseño.
- **Paso 5.** Se procede con un nuevo avance.
- **Paso 6.** Se perforan e instalan anclajes sistemáticos.

2.2.19 Falso túnel

Es conveniente proteger la zona del portal del túnel que generalmente queda expuesto a cualquier caída de bloque de rocas al menos en tiempo de lluvias; y la mejor manera de proteger al usuario, es construyendo una estructura denominada falso túnel.

Esta estructura de hormigón y acero, se rellenará con material fino para que sirva de amortiguador contra el impacto que ocasionen los bloques, este relleno de amortiguamiento también forma parte en el cálculo de la estabilización del talud para alcanzar los factores de seguridad necesarios (estático y pseudo - estático), por el peso que aporta en la base del talud. Por otro lado se tiene considerado proyectar un muro para contener el derrame del relleno del falso túnel.

2.2.20 Portales

El potencial suceso de un accidente en túneles es más bajo que en la vía libre; sin embargo, el daño que pueda ocurrir en el túnel es mucho mayor, especialmente en caso de incendio. La zona de emboque representa la más crítica del túnel por un efecto físico del cuerpo humano, porque el ojo del conductor precisa de un tiempo de adaptación cuando cambia el ambiente claro del exterior al oscuro del túnel.

Para compensar este efecto, normalmente se colocan dispositivos de señalización intensa de pinturas reflectantes ante el alumbrado del automóvil en la zona de entrada al túnel.

Los portales en el túnel cumplen con:

- **Función de seguridad**

Como aviso del cambio de situación en la ruta de circulación del vehículo.

- **Función constructiva**

Como un refuerzo contra choque de un camión.

- **Función estética**

Pone de relieve la importancia de la obra.

2.2.21 Servicios auxiliares

a. Sistema de drenaje para el túnel

- **En construcción**

Durante la construcción, el agua que se presente en los frentes de trabajo deberá ser evacuado mediante el uso de bombas y redes de tuberías temporales de bombeo para mantener el frente de excavación libre de agua y en condiciones de operación.

El sistema de drenaje en los portales deberá estar orientado a evitar las descargas de aguas con contenidos de sólidos y aceites a los cauces naturales de quebradas y ríos sin antes ser tratada en una piscina de decantación y un sistema separador de aceites que permitan separar la fracción sólida y los aceites residuales. De esta forma, las posibles aguas excedentes que sea necesario descargar a los cauces naturales cumplirán con las normas peruanas.

- **En servicio**

El sistema de drenaje del túnel previsto para la etapa de servicio, se basa en la captación de infiltraciones singulares que perjudiquen al usuario y también en evitar goteos permanentes que desgasten el pavimento en un largo plazo. Como se trata de un túnel que atravesará suelo y roca, entonces el sistema de drenaje es diferenciado.

- **Para el sector de túnel en suelo**

Se basa en la captación de agua contenida en el suelo circundante a la cavidad, se extrae el agua por medio de tubería de PVC perforado y con pendiente en descenso hacia el túnel, este dispositivo es el DHP y estará dispuesto cada 10 m o menos si fuera necesario, en las paredes inferiores de la sección. El agua proveniente de este dispositivo al quedar expuesto fuera de las capas de hormigón lanzado, caerá directamente hacia el canal de drenaje lateral.

Como se observa en el perfil geológico - geotécnico el túnel atraviesa suelo en los extremos y roca en el centro, por tanto se ha dispuesto el drenaje subterráneo conducido por una tubería que se ubique en el centro de la sección. El tubo recolectará el agua que circula por la capa de material filtrante, y estará protegido por una manta geotextil. Ver Figura 19 y Figura 20.

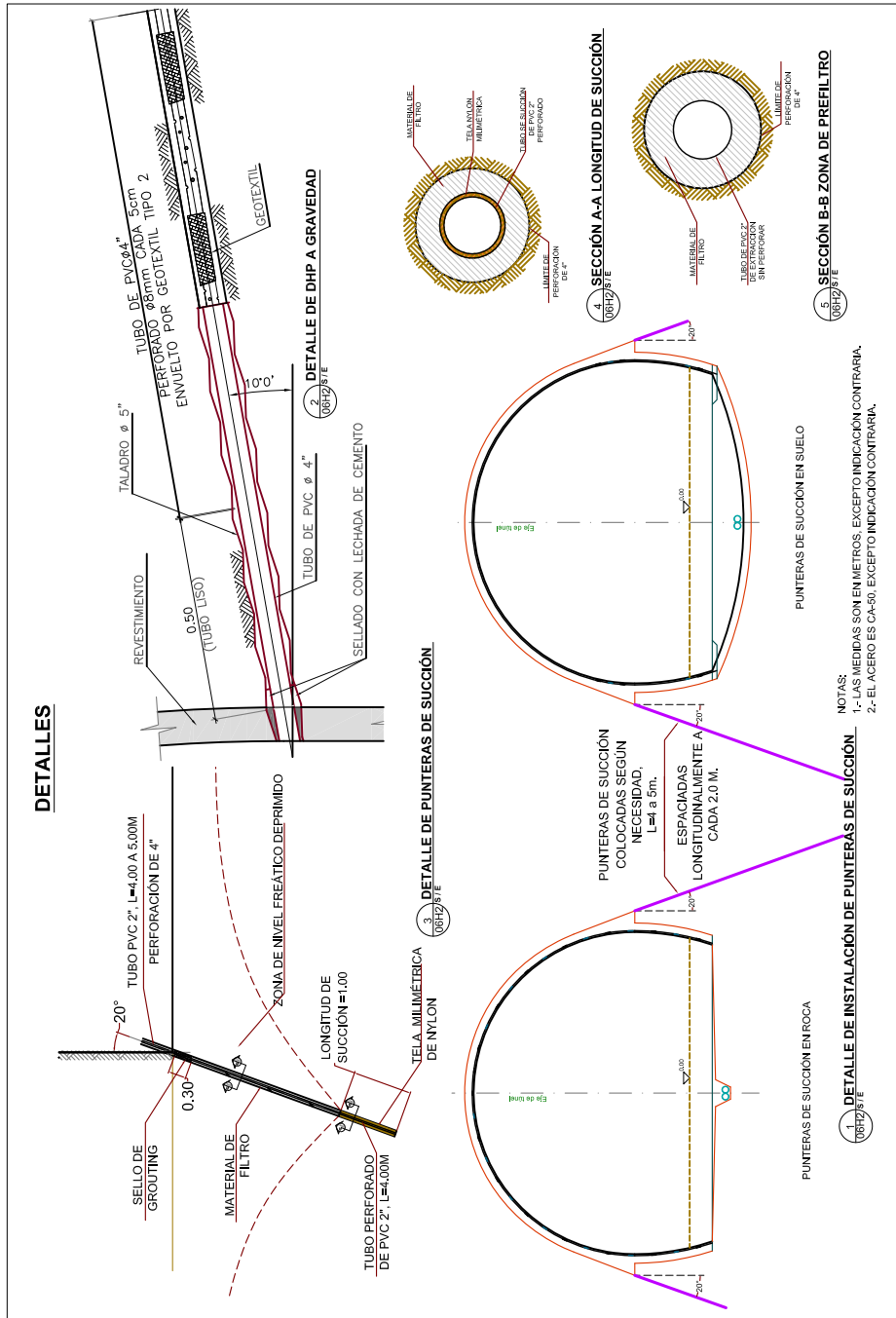


Figura 19. Sistema típico de drenaje - de punteras de succión y DHP.
 Fuente: Departamento de túneles, CCT4, 2012.

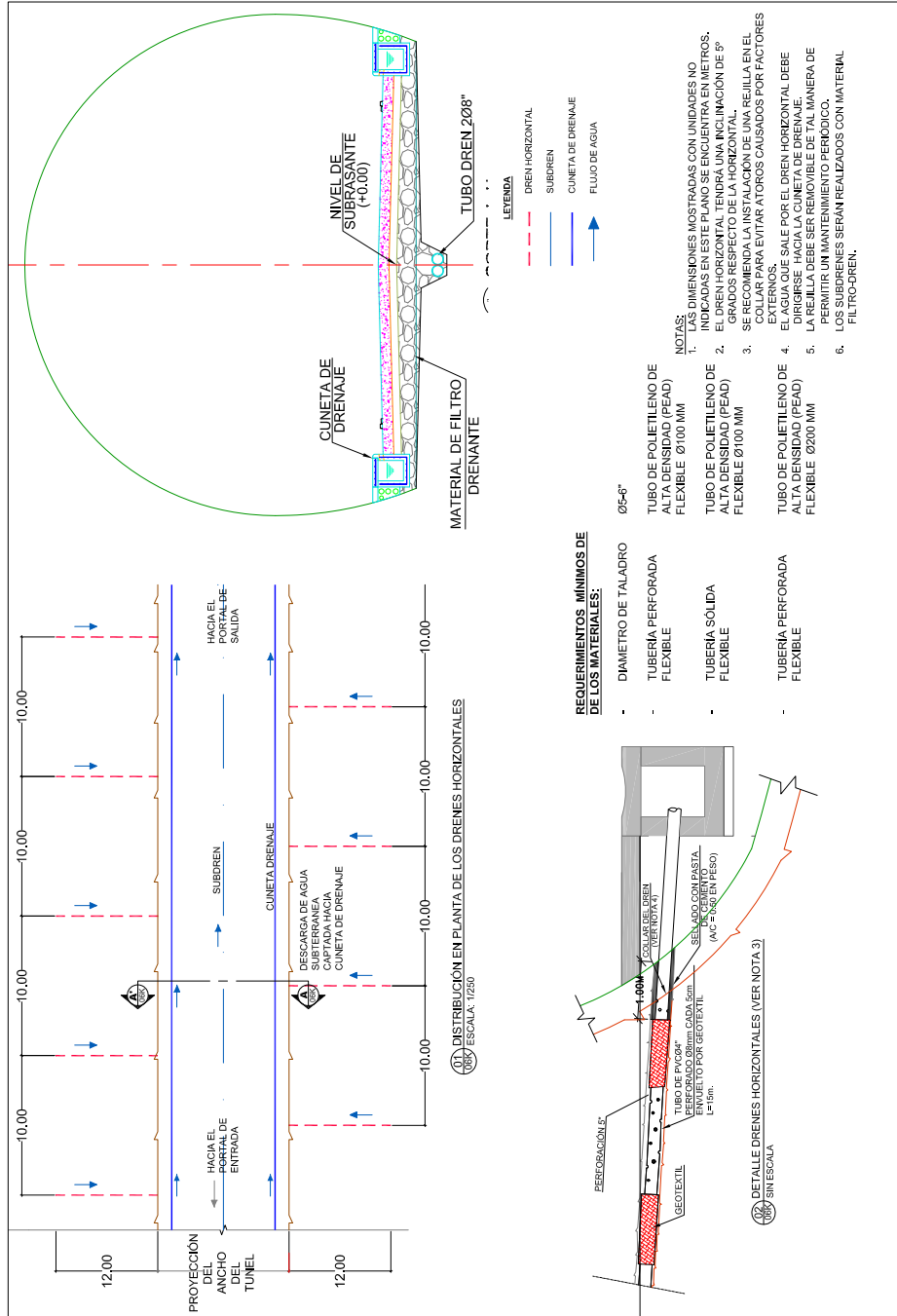


Figura 20. Sistema típico de drenaje - en suelo de túnel.
Fuente: Departamento de túneles, CCT4, 2012.

➤ **Para el sector de túnel en roca**

Se basa en la captación de infiltraciones singulares que circulan a través de las discontinuidades de la roca, que se pueden captar por medio de mantas o geotextiles drenantes que captarán el agua en las paredes del túnel y la conduzcan hacia el piso, es decir hacia la capa de material drenante. Una vez allá el agua se conducirá por pendiente hacia el tubo principal de subdrenaje. Ver Figura 21.

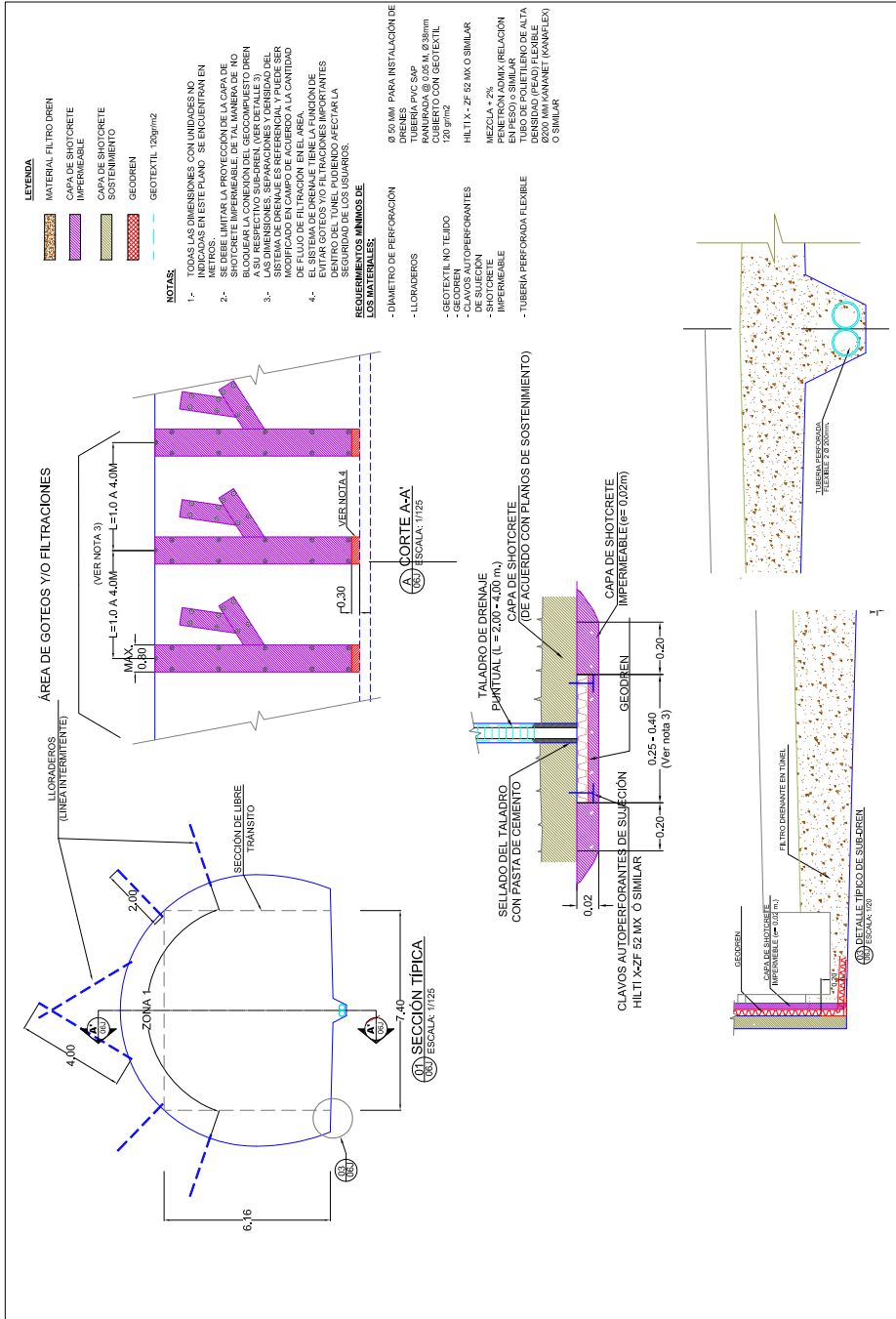


Figura 21. Sistema típico de drenaje - en paredes de túnel.
Fuente: Departamento de túneles, CCT4, 2012.

➤ **Drenaje de la plataforma**

A pesar de los cuidados de impermeabilización de las paredes del túnel, quedarán algunos goteos que caerán sobre la losa del pavimento, el agua que se supone será escaso, se evacuará por medio de un canal lateral que permitirá su drenaje hacia fuera del túnel.

b. Instrumentación y monitoreo

La instrumentación y monitoreo proporciona la base necesaria para mantener niveles de seguridad apropiados durante la construcción del túnel, así como también introducir mejoras en los sistemas de excavación y sostenimiento.

El programa descrito a continuación es una formalización de las actividades esenciales que hacen parte de las rutinas de obra. Los conceptos y criterios de las rutinas presentadas, pueden ser alteradas en función de las singularidades que se manifiestan a lo largo de la ejecución de la obra.

- **Proyecto de instrumentación**

El monitoreo de la excavación subterránea es realizada mediante lecturas de desplazamientos, constituido por los siguientes instrumentos:

- ✓ Punto de control de deformaciones con lectores ópticos en la periferia de la excavación subterránea.
- ✓ Punto de control de asentamiento en las banquetas del portal de entrada y salida.
- ✓ Punto de monitoreo del abatimiento de nivel freático.

Otros instrumentos como extensómetros y celdas de presión radial y tangencial serán utilizados en lugares y momentos específicos.

- **Instalación, inicio y frecuencia de lecturas**

Se instalarán estaciones de control de asentamiento en las banquetas de los portales y en los rellenos que se conformen sobre el falso túnel, y la frecuencia de lecturas estará de acuerdo al ritmo de excavación del túnel. Las estaciones de control de desplazamientos dentro del túnel (convergencias) deberán ser iniciadas

inmediatamente, a la menor distancia del frente de excavación, las lecturas deberán ser diarias en principio, su frecuencia y la interrupción de las mismas serán analizadas y autorizadas individualmente para cada estación de control.

La frecuencia de monitoreo será :

- ✓ La lectura inicial de la sección de convergencia, se realizará a 1 m del frente de excavación.
- ✓ Hasta los 20 m de distancia del frente se harán lecturas diarias.
- ✓ Hasta los 40 m de distancia del frente se harán dos lecturas por semana.
- ✓ Pasado los 40 m se hará una lectura por semana.

Y respecto a la distancia entre las estaciones de lectura:

- ✓ En la sección 3 y 4, se instalarán secciones de convergencia cada 50 m.
- ✓ En la sección 5 y 5a, se instalarán secciones de convergencia cada 30 m.
- ✓ En la sección 6 (suelo), se instalarán secciones de convergencia y celdas de presión cada 20 m.

- ✓ En la sección 6a (suelo – zona de portal), se instalarán secciones de convergencia y celdas de presión cada 10 m.

La indicación de las secciones de convergencia y las celdas de presión es referencial y se ajustará a las condiciones geológicas y geotécnicas encontradas.

La instrumentación o monitoreo de los túneles durante su excavación hace parte importante del proceso de construcción de un túnele y tiene como objetivo principal preservar la seguridad del equipo y de los trabajadores involucrados en su construcción.

- **Presentación de los resultados de instrumentación**

Las lecturas de instrumentación realizadas deberán ser presentadas en forma de gráficos y cuadros. La evolución de las deformaciones y asentamientos deberán ser presentados en función del tiempo (d x t) y en función de la distancia al frente de excavación de la calota, destroza y solera (d x d).

Para la instrumentación interna, los niveles de atención serán introducidos en los gráficos, tanto para las estaciones en suelo como en roca o mixtas. Para la instrumentación externa no se definirá en el gráfico un nivel de atención explícito. Formará parte de la presentación de resultados, como mínimo, el inicio y final de tratamientos especiales, así como eventos perjudiciales tales como atraso en la instalación de soportes y fisuras que puedan ocurrir. Como también eventos que puedan influir en las lecturas de instrumentación como por ejemplo lluvias intensas, paralización de las excavaciones, variaciones bruscas de los aspectos geológicos, que también pueden incluirse en los gráficos.

- **Criterio para el acompañamiento de la instrumentación**

Se pondrá especial atención en la interpretación diaria de los resultados para secciones de medición distantes hasta 20 m del frente de excavación.

Se establecerán en el proyecto tres niveles de referencia para los desplazamientos o deformaciones:

- **Esperado.-** Que corresponde al desplazamiento obtenido en los cálculos efectuados utilizando los parámetros de la roca utilizados en base a los estudios realizados.
 - **Crítico.-** Representa un estado de pre - rotura del sostenimiento antecesor al colapso.
 - **Alerta.-** Es el nivel intermedio entre el esperado y crítico.
- **Análisis de la instrumentación**

El análisis de la instrumentación será controlada en reportes mensuales elaborados individualmente para cada uno de los frentes del túnel (entrada y salida); estos incluirán de ser necesario, la presentación de gráficos, condiciones de seguridad y estabilidad global, así como la definición de nuevos valores de niveles de “alerta y críticos”.

2.3 Definición de términos

El NATM, tiene como filosofía el autoapoye de la roca, así que el sostenimiento propuesto por el método, consiste en:

- **Hormigón lanzado o shotcrete**

Cuyo objetivo principal es la estabilización inmediata de la roca recién expuesta. Los espesores de las capas serán como máximo 10 cm. En medio del hormigón lanzado estará inmersa la malla metálica como refuerzo. Esta reforzado con fibra metálica.

- **Anclajes sistemáticos**

Fijados a la roca con cápsulas de resina en la cabeza e inyectados en todo el resto de su longitud, y que al estar dispuestos en dirección radial al eje del túnel conformará el “arco de roca armada”.

- **Cerchas metálicas livianas**

Para protección del personal durante la excavación.

- **Monitoreo**

Intenso para las deformaciones ocurrentes durante la excavación con la finalidad de validar el soporte o fortificarlo.

- **Excavación parcializada**

Debe guardar una distancia prudente en cuanto al avance de una etapa respecto a la otra, con la finalidad de cerrar el “anillo cuanto antes”.

Para el método de Barton, el soporte consiste en:

- **Anclajes**

Inyectados en toda su longitud, y dispuestos en forma radial, pero de acuerdo a la disminución de calidad del macizo.

- **Arcos armados o cimbra**

Que consisten en barras de acero corrugado que se amoldan de mejor manera a las irregularidades de la excavación; haciendo posible la disminución del consumo de hormigón lanzado.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo de investigación

3.1.1 De acuerdo al fin que se persigue

La investigación que se realizará es de tipo Aplicada.

3.1.2 De acuerdo a los tipos de datos analizados

La investigación que se realizará es de tipo Cuantitativa.

3.2 Diseño de investigación

El diseño del método de investigación será No Experimental, y según su función del control de las variables, el tipo de investigación es Descriptiva.

3.3 Muestra

Sector crítico km 237 + 380 al km 238 + 453 del corredor vial interoceánico sur, Perú – Brasil

3.4 Procedimientos de desarrollo

3.4.1 Proceso para diseño de túnel

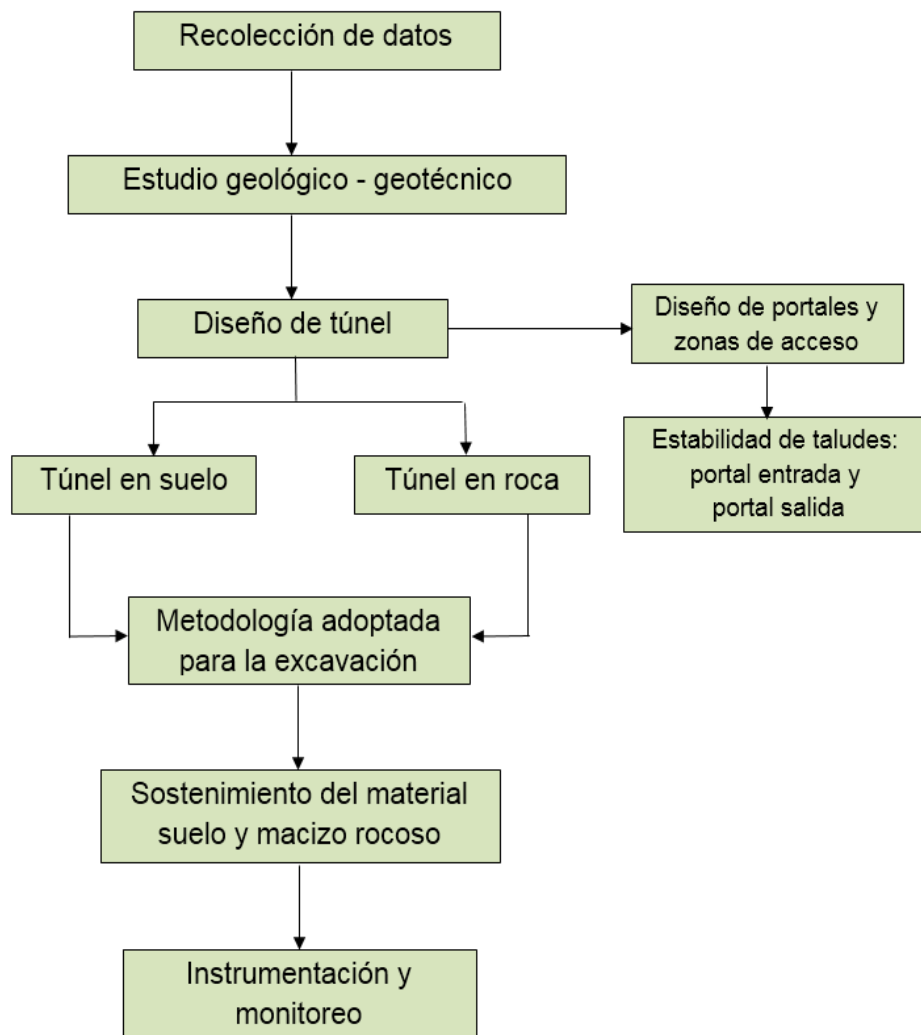


Figura 22. Diagrama de flujo para el diseño de túnel.

Fuente: Departamento de geología, CCT4, 2010.

3.5 Materiales y equipos

Se emplearán lo siguientes materiales y equipos.

Tabla 9
Caracterización de los materiales y equipos.

| Detalle de materiales y equipo |
|---|
| Explosivos |
| Accesorios de explosivos |
| Agua |
| Cemento |
| Aditivos |
| Fibra |
| Pernos |
| Enfilajes |
| Jumbo electrohidráulico |
| Compresora |
| Bombas de agua sumergibles |
| Shotcretera Aliva 264, 257 o Robot |
| Elevadores o Telehandler |
| Equipo de Inyección |
| Camión Utilitario |
| Grupo electrógeno de 450 Kv. |
| Grupo electrógeno de 450 Kv. (repuesto) |
| Mixer de 7 m ³ . |
| Planta concreto |
| Retroexcavadora |
| Cargador frontal |
| Taller electromecánico |

Fuente: Departamento de túneles, CCT4, 2010.

3.6 Técnicas e instrumentos para recolección de datos

3.6.1 Diámetros de perforación para sondeo geotécnicos

Tabla 10

Diámetros codificados de perforación para sondeos a diamantina.

| Código | Diámetro perforación | Diámetro del testigo | Diámetro seleccionado |
|---------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| EQ | 38 mm | 21 mm | - |
| AQ | 48 mm | 30 mm | - |
| BQ | 60 mm | 42 mm | SW-3 |
| NQ | 76 mm | 48 mm | SW-2 |
| HQ | 100 mm | 76 mm | SW-1 |

Fuente: Departamento de geotecnia, CCT4, 2010.

3.6.2 Clasificación del macizo rocoso según Nick Barton

Esta clasificación simplemente señalaremos los parámetros fundamentales que toma en cuenta, tales como:

- RQD, índice de calidad de la roca (según Deere).
- Jn, índice referido al número de sistemas de fisuras.
- Jr, índice referido a la rugosidad de las fisuras.
- Ja, índice referido al grado de alteración de las paredes de las fisuras.
- Jw índice referido al caudal de agua en las fisuras.
- SRF, índice del estado de tensión del macizo.

- Q, índice que indica la descripción de la calidad del macizo rocoso.

Con los valores asignados a los parámetros, se calcula el valor numérico del índice Q de la siguiente manera:

$$Q = \left(\frac{RQD}{Jn}\right) \times \left(\frac{Jr}{Ja}\right) \times \left(\frac{Jw}{SRF}\right) \quad [2]$$

Este valor de Q, nos indica la descripción de la calidad del macizo rocoso.

Tabla 11
Clasificación del macizo rocoso según Barton.

| DESCRIPCIÓN | VALOR "Q" |
|------------------------|--------------|
| Excepcionalmente buena | 400 – 1000 |
| Extremadamente buena | 100 – 400 |
| Muy buena | 40 – 100 |
| Buena | 10 – 40 |
| Regular | 4 – 10 |
| Mala | 1 – 4 |
| Muy mala | 0,1 – 1 |
| Extremadamente mala | 0,01 – 0,1 |
| Excepcionalmente mala | 0,001 – 0,01 |

Fuente: Ingeniería de la clasificación del macizo rocoso para el diseño del soporte de túneles, Nick Barton, 1974.

3.6.3 Clasificación del macizo rocoso según Z.T. Bieniawski

La evaluación de calidad de macizos rocosos Rock Mass Rating (RMR) es realizada mediante la atribución de factores a los 5 parámetros que intervienen:

- Resistencia a compresión de la roca inalterada.
- RQD, índice de calidad de la roca, según Deere.
- Espaciamiento de las fisuras.
- Condiciones físicas y geométricas de discontinuidades.
- Presencia de agua subterránea.

Esta sumatoria de valores debe ser corregida con un ajuste debido a cómo se presentan orientadas las discontinuidades respecto al trazado del túnel. En la Tabla 12 se presenta la clasificación del macizo para los distintos valores que se obtenga y, además se hace una estimación de la cohesión y ángulo de fricción del macizo.

Tabla 12
 Valoración del macizo rocoso según Bieniawski.

| Valoración RMR | | Menor a 20 | 21 a 40 | 41 a 60 | 61 a 80 | 81 a 100 |
|------------------------|---------------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Clasificación N° | | V | IV | III | II | I |
| Descripción de la roca | | Muy mala | Mala | Regular | Buena | Muy buena |
| Parámetro | Cohesión (MPa) | < 0,1 | 0,1 - 0,2 | 0,2 - 0,3 | 0,3 - 0,4 | > 0,4 |
| Geotecnia | Angulo fricción (°) | < 15 | 15 - 25 | 25 - 35 | 35 - 45 | > 45 |

Fuente: Ingeniería de la clasificación del macizo rocoso; Bieniawski Z.T., 1989.

3.7 Procesamiento y análisis de datos.

3.7.1 Parámetros de resistencia de las discontinuidades

Usamos el criterio Barton – Bandis (1979), para determinar la resistencia al corte de las discontinuidades abiertas. El modelo considera cambios en la resistencia con el esfuerzo normal y la rugosidad. Efectos de cohesión aparente están incorporados en:

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan[JRC \cdot \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_r] \quad [3]$$

ϕ_r : Ángulo de fricción residual.

JRC : Coeficiente de rugosidad de la junta.

JCS : Resistencia a la compresión simple de las paredes de la discontinuidad.

Los parámetros ϕ_r y JCS dependen del grado de meteorización. Para la determinación del ángulo de fricción residual, consideramos que las paredes de la discontinuidad están meteorizadas, por lo que usamos el martillo Schmidt:

$$\phi_r = (\phi_r - 20^\circ) + 20 \left(\frac{r}{R} \right) \quad [4]$$

r : Rebote del martillo en superficie meteorizada.

R : Rebote del martillo en superficie sana.

Para la determinación de estos parámetros usamos el software RocData.

a. Determinación del ángulo de fricción residual:

El tipo de roca según sus parámetros de resistencia lo clasificamos como Siltstone, los parámetros r y R se determinan del reporte de campo adjunto.

El ángulo de fricción residual es de 18,255 1°.

b. Determinación del coeficiente de rugosidad de la discontinuidad (JCR):

Se hace una clasificación según el perfil de la rugosidad de la junta. El valor del coeficiente de rugosidad es de 9,00.

c. Resistencia a la compresión de la paredes de la discontinuidad (JCS):

Consideramos la roca como roca dura (strong rock).

d. Parámetros de resistencia equivalentes Mohr – Coulomb:

Usamos el software RocData para el cálculo de los parámetros Mohr – Coulomb.

Se determina una cohesión $C = 0,047$ Mpa y un ángulo de fricción $f = 33,34^\circ$ como parámetros de resistencia al corte de las discontinuidades.

Para el análisis de la estabilidad de las cuñas del túnel Wayrasencca se ha usado los siguientes parámetros de resistencia de las discontinuidades:

Tabla 13
Parámetros de resistencia de discontinuidades.

| Tipo de material | Cohesión (t/m²) | $\Phi(^{\circ})$ |
|-------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| Diaclasas | 4,70 | 33,34 |

Fuente: Departamento de geología, CCT4, 2010.

➤ **Tipos de falla**

- 1) Falla por adherencia.
- 2) Falla por tensión.
- 3) Falla de la placa.
- 4) Falla por corte.

Los pernos y las placas tienen una categoría de 10 t, la Falla 2 y Falla 3 ocurrirán cuando la capacidad del perno y la placa es superada, respectivamente; la Falla 1 depende de dos factores: la longitud del perno que sobrepasa la cuña o longitud de empotramiento y su resistencia al corte. La resistencia al corte depende del tipo de roca, y se ha asumido un valor de 1,5 MPa (valor a ser comprobado por pruebas posteriores).

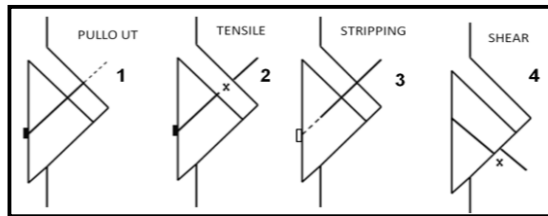


Figura 23. Tipo de falla en pernos de roca.

Fuente: Departamento de geología; CCT4; 2010.

Capacidad del perno a tensión 17,86 t; capacidad de la placa 10 t y resistencia de adherencia 11,94 t/m (la menor).

Tabla 14
Parámetros de resistencia.

| Parámetro | Valor | Unidad |
|---------------------------------------|---------|--------|
| Resistencia al corte de la lechada | 2,00 | Mpa |
| Diámetro perno de roca | 25,00 | mm |
| Perímetro del perno de roca | 0,07854 | m |
| Resistencia movilizada por la lechada | 11,94 | t/m |

Fuente: Departamento de geología, CCT4, 2010.

3.7.2 Parámetros de resistencia de shotcrete

Según el tipo de cuña formada, el peso de la cuña actúa como un peso en la capa de shotcrete, y puede fallar por:

- 1) Falla por corte.
- 2) Falla por tensión diagonal.
- 3) Falla por adherencia del shotcrete a la roca.
- 4) Falla por flexión.

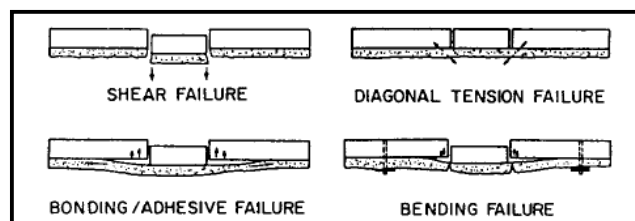


Figura 24. Tipo de falla de una capa de shotcrete.

Fuente: Departamento de geología; CCT4; 2010.

Resistencia al corte del shotcrete de 200 t/m² (2 MPa).

3.7.3 Análisis dimensional de los tipos de cuñas por sector sostenimiento según Barton

Al haber compilado una gran variedad de excavaciones para elaborar un método que estime el sostenimiento más adecuado para un tipo de excavación subterránea.

Tabla 15
Coeficiente de soporte según tipo de excavación, ESR.

| Categoría | Tipo de Excavación | ESR |
|-----------|---|-------|
| A | Excavación temporal para minería. | 3 – 5 |
| B | Excavación minera permanente, túneles de aducción de agua, túnel piloto. | 1,6 |
| C | Sala de almacenamiento, planta de tratamiento de aguas túnel de ferrocarril, túnel de acceso, chimeneas. | 1,3 |
| D | Central hidroeléctrica, túneles importantes de camino o ferrocarril, cavernas de defensa civil, intersecciones. | 1,0 |
| E | Central nuclear subterránea, estación de ferrocarril, fabricas. | 0,8 |

Fuente: Ingeniería de la clasificación del macizo rocoso para el diseño del soporte de túneles, Nick Barton, 1974.

Según Tabla 15

$$D_e = 10 / 1,0 = 10 \text{ m}$$

Longitud máxima sin soporte: $S = 2$

Soporte para el Tipo de Excavación ESR = 0,4

Conformando la siguiente secuencia de tipos de roca:

- Clase I $Q = 200$; $ESR = 1$; $S = 17$ metros sin soporte
- Clase II $Q = 40$; $ESR = 1$; $S = 9$ metros sin soporte
- Clase III $Q = 4$; $ESR = 1$; $S = 4$ metros sin soporte
- Clase IV $Q = 0,4$; $ESR = 1$; $S = 1,4$ metros sin soporte
- Clase V $Q = 0,04$; $ESR = 1$; $S = 0,6$ metros sin soporte

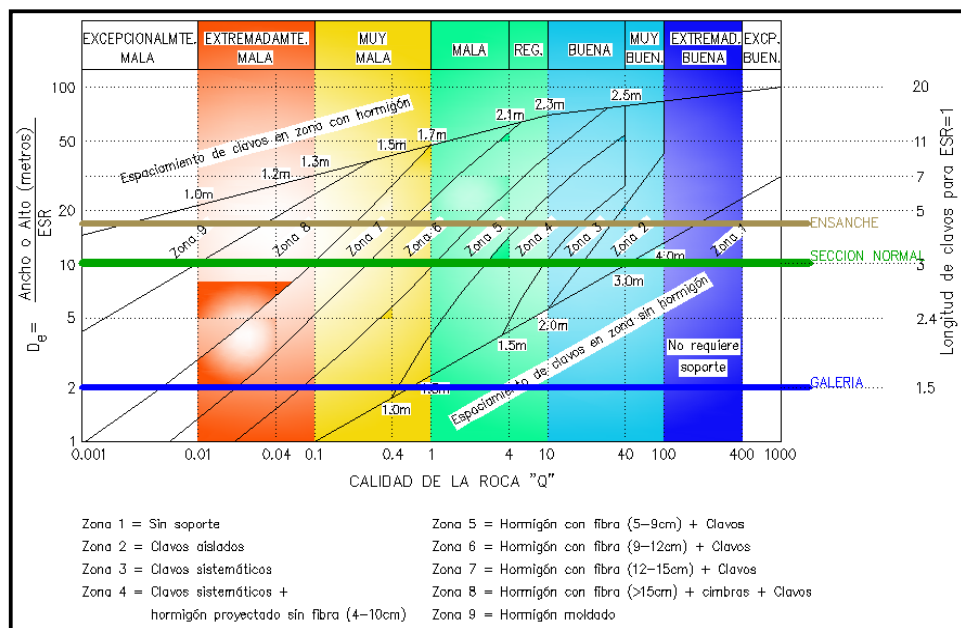


Figura 25. Ábaco sostenimiento del macizo rocoso según Barton.

Fuente: Ingeniería de la clasificación del macizo rocoso para el diseño del soporte de túneles, Nick Barton, 1974.

a. Sostenimiento según Bieniawski

Está idealizado para una sección en herradura de 10 m de diámetro y que soporta una presión de 25 MPa, equivalente a 1 000 m de cobertura. Según Tabla 16.

Tabla 16
Guía sostenimiento primario según el RMR.

| Clase Macizo | Tipo de Excavación | Soportes Primarios | | |
|--------------|--|---|--|--|
| | | Pernos - Malla | Hormigón Lanzado | Perfil Metálico |
| I | Sección completa. Avance hasta de 3 m | Generalmente no requiere soporte con la excepción de pernos ocasionales. | | |
| II | Sección completa. Avance de 1 m a 1,5 m. Soporte completo a 20 m del frente. | Pernos sistemáticos de 3 m espaciados a 2,5 m. Malla ocasional en ciertas zonas de techo. | Hormigón lanzado sin fibra 5 cm en el techo si fuera necesario. | Ninguna |
| III | Sección completa. Calota y banqueo | Pernos sistemáticos de 4 m espaciados a 2 m en techo y paredes. Malla en el techo | Hormigón lanzado sin fibra de 5 cm a 10 cm en el techo, 3 cm en las paredes. | Ninguna |
| IV | Sección completa. Calota y banqueo. Avance de 1 m a 1,5 m. Instalación del soporte junto a la excavación. | Pernos sistemáticos de 4 m y 5 m de longitud. Espaciados de 1 m a 1,5 m. Malla en el techo y las paredes. | Hormigón lanzado sin fibra 10 cm a 15 cm en el techo, 10 cm en las paredes. | Perfiles livianos, espaciados a 1,5 m uno de otro. |
| V | Secciones múltiples. Avance de 0,5 m a 1,5 m. Instalación del soporte junto a la excavación, hormigón lanzado luego de cada juego. | Pernos sistemáticos de 5 m y 6 m de longitud, espaciados de 1 m a 1,5 m. Pernos en la solera inclusive. Malla en el techo y las paredes | Hormigón lanzado sin fibra 10 cm a 15 cm en el techo, 10 cm en las paredes. | Perfiles medianos a pesados, espaciados a 0,8 m uno de otro, cerrados a través de la solera. |

Fuente: Ingeniería de la clasificación del macizo rocoso, Bieniawski, Z.T., 1989.

b. Sostenimiento adoptado para el túnel en roca

Con los elementos anteriormente citados se definen el tipo de excavación y los sostenimientos adecuados para cada clase de terreno a encontrar.

Tabla 17
Tipo de excavación y sostenimiento para roca.

| Clase de Roca y Sostenimiento | | Q' SISTEM (1992) |
|-------------------------------|--------------------|---|
| V Muy Mala | Tipo de excavación | De = 10/1 0,6 m máximo >15 cm c/fibra L = 3,00 m 1,0 x 1,0 – 1,3 x 1,3 Si |
| | Avance calota (m) | |
| | Claro sin ademe | |
| | Hº lanzado (cm) | |
| | Anclajes | |
| IV Mala | Tipo de excavación | De = 10/1 1,4 m máximo 9 - 15 cm c/fibra L = 3,00 m 1,3 x 1,3 – 1,7 x 1,7 |
| | Avance calota (m) | |
| | Claro sin ademe | |
| | Hº lanzado (cm) | |
| | Anclajes | |
| III Regular | Tipo de excavación | De = 10/1 9,00 m máximo 0 - 4 cm s/fibra L = 3,00 m 2,3 x 2,3 – 2,5 x 2,5 |
| | Avance calota (m) | |
| | Claro sin ademe | |
| | Hº lanzado (cm) | |
| | Anclajes | |
| II Buena | Tipo de excavación | De = 10/1 9,00 m máximo 0 - 4 cm s/fibra L = 3,00 m 2,3 x 2,3 – 2,5 x 2,5 |
| | Avance calota (m) | |
| | Claro sin ademe | |
| | Hº lanzado (cm) | |
| | Anclajes | |
| | Cercha | |
| | Malla | |

Fuente: Ingeniería de la clasificación del macizo rocoso para el diseño del soporte de túneles, Nick Barton, 1974.

3.7.4 Criterios para la implantación del túnel

Un túnel es una obra singular y se diferencia de los diseños estructurales habituales, por producirse en formaciones geológicas caracterizadas en general por su heterogeneidad y anisotropía, cuyo conocimiento previo resulta en la práctica, siempre limitado.

Para la implementación del túnel, se han tomado en cuenta las siguientes consideraciones:

- ✓ Evaluación geológica y geotécnica del sector a atravesar con carretera y con túnel.
- ✓ Conveniencia técnica y ambiental entre la posibilidad de un gran corte de talud y un pequeño orificio en la montaña.
- ✓ La seguridad que ofrece el túnel ante una carretera con taludes muy altos.
- ✓ El costo de construcción, que generalmente es mayor en un túnel versus carretera, pero a la larga constituye una estructura más segura para tramos inestables y requiere de menor mantenimiento.

3.7.5 Geometría del trazado

El diseño del trazado para el túnel está sujeto a las mismas limitaciones y recomendaciones generales aplicables al diseño geométrico de una carretera, excepto algunas particularidades específicas concernientes a los túneles. La velocidad de diseño para la carretera debe ser la misma que para el túnel en virtud a que esta es relativamente baja. Es así, que se han respetado los valores correspondientes a esta velocidad de diseño; y se ha visto la necesidad de adoptar una sección de túnel diferente en curva, más ensanchada, que en la tangente.

Tabla 18
Características geométricas típicas del trazado.

| PARÁMETRO | VALORES |
|-----------------------------------|--|
| Velocidad | 30,00 km/h |
| Ancho de calzada | 6,00 m |
| Ancho de berma-cuneta | 0,70 m |
| Ancho de plataforma | 7,40 m |
| Radio mínimo | 25,00 m |
| Pendiente máxima longitudinal | 8,00 % |
| Bombeo de la calzada | 2,50 % |
| Longitud mínima de curva vertical | 80,00 m |
| Peralte máximo | 8,00 % |
| Peralte | De acuerdo al manual de diseño de carreteras del MTC |
| Sobreechancho | |
| Longitud y curvas de transición | |

Fuente: Normas DG, 2001.

El túnel es una sección cerrada, es decir que sus paredes laterales impiden ver un obstáculo en frente, se deberá evitar diseñar curvas con radios muy pequeños dentro de él. Un aspecto que aliviana este detalle es que el túnel tiene paredes con una curvatura cóncava que aparte del ancho de la acera, le dará un espacio adicional libre de visibilidad.

a. Criterios y controles básicos para el diseño

La geometría de diseño será según normas DG - 2001.

Tabla 19
Datos básicos de los vehículos de diseño.

| Tipo de vehículo | Nomenclatura | Alto total (m) | Ancho total (m) | Largo total (m) | Longitud entre ejes (m) | Distancia entre eje posterior y parte delantera (m) | Radio mínimo rueda externa delantera (m) | Radio mínimo rueda trasera (m) |
|------------------------------------|--------------|----------------|-----------------|-----------------|-------------------------|---|--|--------------------------------|
| Vehículo Ligero | VL | 1,30 | 2,10 | 5,80 | 3,40 | 4,30 | 7,30 | 4,20 |
| Ómnibus de 2 ejes | B2 | 4,10 | 2,60 | 9,10 | 6,10 | 7,30 | 12,80 | 8,50 |
| Ómnibus de 3 Ejes | B3 | 4,10 | 2,60 | 12,10 | 7,60 | 9,70 | 12,80 | 7,40 |
| Camión Simple 2 Ejes | C2 | 4,10 | 2,60 | 9,10 | 6,10 | 7,30 | 12,80 | 8,50 |
| Camión Simple 3 Ejes o Más | C3/C4 | 4,10 | 2,60 | 12,20 | 7,60 | 9,70 | 12,80 | 7,40 |
| Combinación de Camiones | | | | | | | | |
| Semirremolque tándem | T2S1/2/3 | 4,10 | 2,60 | 15,20 | 4,00 / 7,00 | 13,40 | 12,20 | 5,80 |
| Semirremolque tándem | T3S1/2/3 | 4,10 | 2,60 | 16,70 | 4,90 / 7,90 | 14,90 | 13,70 | 5,90 |
| Remolque 2 Ejes + 1 doble (tándem) | C2 – R2 /3 | 4,10 | 2,60 | 19,90 | 3,80 / 6,10 / 6,40 | 18,80 | 13,70 | 6,80 |

Fuente: Tabla 202.01 normas DG, 2001.

La elección del vehículo de diseño camión tipo C2, se basa en considerar que este vehículo sea el mismo del diseño de todo el tramo.

3.7.6 Sección transversal

La sección transversal de un túnel bidireccional debe tener el ancho suficiente para que crucen los camiones de alto tonelaje por la vía con un adecuado margen de seguridad.

Es así que se respeta el ancho de berma mínimo establecido para la carretera de 0,70 m dejando este ancho de plataforma como una banda de guiado óptico donde estará dispuesta la señalización horizontal.

Las aceras laterales están diseñadas para contar con la amplitud suficiente que permita la circulación libre de una persona. Adicionalmente, a esta estructura, se ha visto la necesidad de aprovechar un espacio lateral para la colocación de tubos de PVC que en un futuro puedan ser empleados como ductos para cableados de instalaciones eléctricas o de telecomunicaciones.

Las pendientes transversales de la calzada cumplen con las normas de diseño geométrico y cuentan con los peraltes necesarios como para que circulen los vehículos a la misma velocidad que en la carretera. Concomitantemente, los sobreeanchos están considerados llegando hasta su máximo valor en el sector donde se desarrollan las curvas.

Para el diseño de la sección transversal del túnel, se han considerado las siguientes dimensiones:

- ✓ Gálibo vertical libre 5,0 m.
- ✓ Número de carriles 2.
- ✓ Ancho de carriles 3,0 m.
- ✓ Sobreeancho máximo 0,9 m.
- ✓ Bermas (a cada lado) 0,7 m.
- ✓ Bombeo normal 2,5 %
- ✓ Peralte máximo 5,5 %

La sección normal geométrica del túnel tiene la forma de bóveda (en suelo) y de herradura (en roca), está compuesta de un medio arco circular en la parte superior y otro con radio mayor para formar la pared inferior. Esta sección está pensada

para un túnel en suelo o roca muy fracturada que es nuestro caso.

Considerando, las curvas que existen al interior del túnel, se ha adoptado dos secciones diferentes en cuanto a dimensiones para atender el efecto del sobreebanco y peralte de las mismas. Es decir que se tiene una sección para el túnel que se ubique en la recta y otra en la curva.

Adicionalmente, en el sector en curva se tiene previsto atravesarlo en dos diferentes tipos de materiales: suelo y roca; por tanto se ha pensado también en diseñar la sección con solera en suelo y sin solera en roca. Ver Figura 26 y Figura 27.

Así, se tienen tres formas de secciones para el túnel:

- ✓ Sección en curva (atraviesa suelo).
- ✓ Sección en curva (atraviesa roca).
- ✓ Sección en tangente (atraviesa roca).

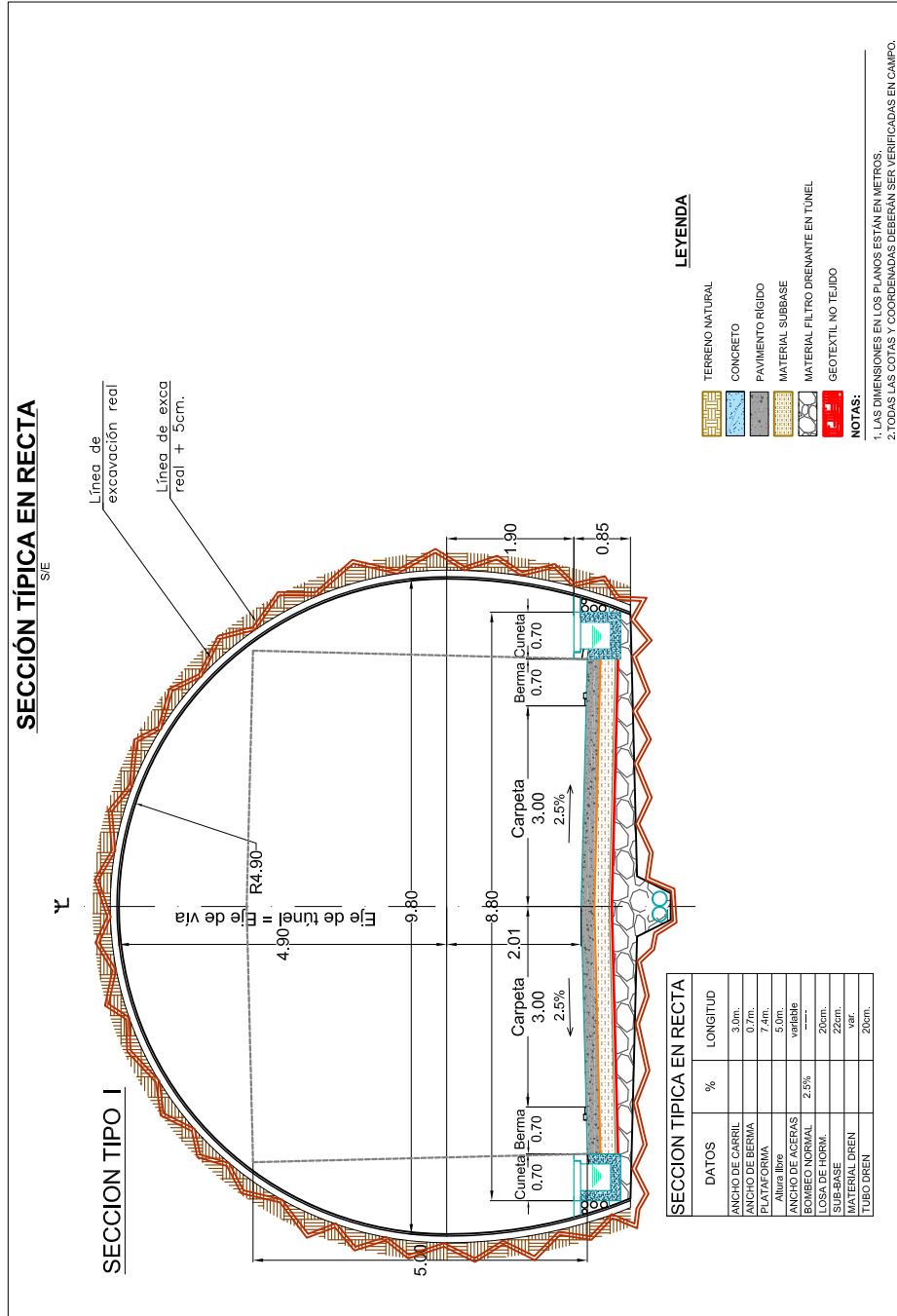


Figura 26. Sección típica de túnel - en recta.
Fuente: Departamento de túneles, CCT4, 2012.

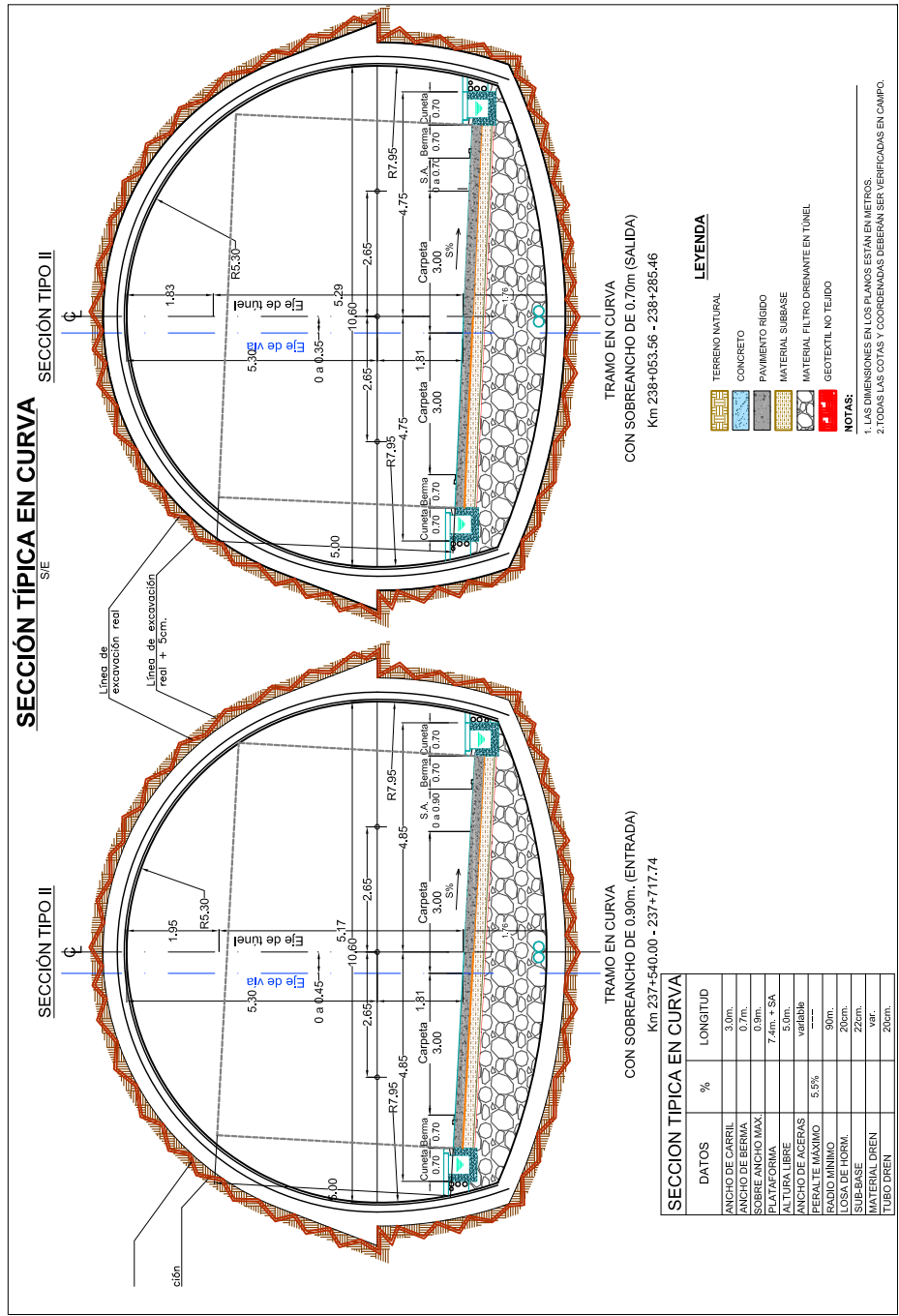


Figura 27. Sección típica de túnel - en curva.
Fuente: Departamento de túneles, CCT4, 2012.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Diseño del túnel en suelo

De acuerdo con la revisión de las informaciones obtenidas de las investigaciones geotécnicas, los mecanismos de inestabilidad estimados son:

- Carga hidráulica de hasta 20 metros.
- Pérdida de material en el suelo por infiltración.
- Pérdida de capacidad portante del suelo por influencia del agua, y su influencia en la cimentación del marco reticulado, sobre todo cuando se procede a excavar el invert.
- Sobre carga a los elementos de sostenimiento, debido a longitudes de avance sin sostenimiento muy largas.
- Desmoronamiento del suelo, incrementando su potencial con la presencia de agua subterránea.
- Presencia de bloques de roca de gran tamaño, que pueden obligar a realizar voladuras localizadas o el uso de martillo hidráulico para perfilar la sección.

4.1.1 Sección de excavación

Para el tramo en suelo se ha seleccionado una sección tipo bóveda. Este límite de sección libre cumple con los requerimientos de gálibo mínimo de proyecto. Esta sección de excavación sería excavada en tres fases: calota, destroza y solera. Ver Figura 28.

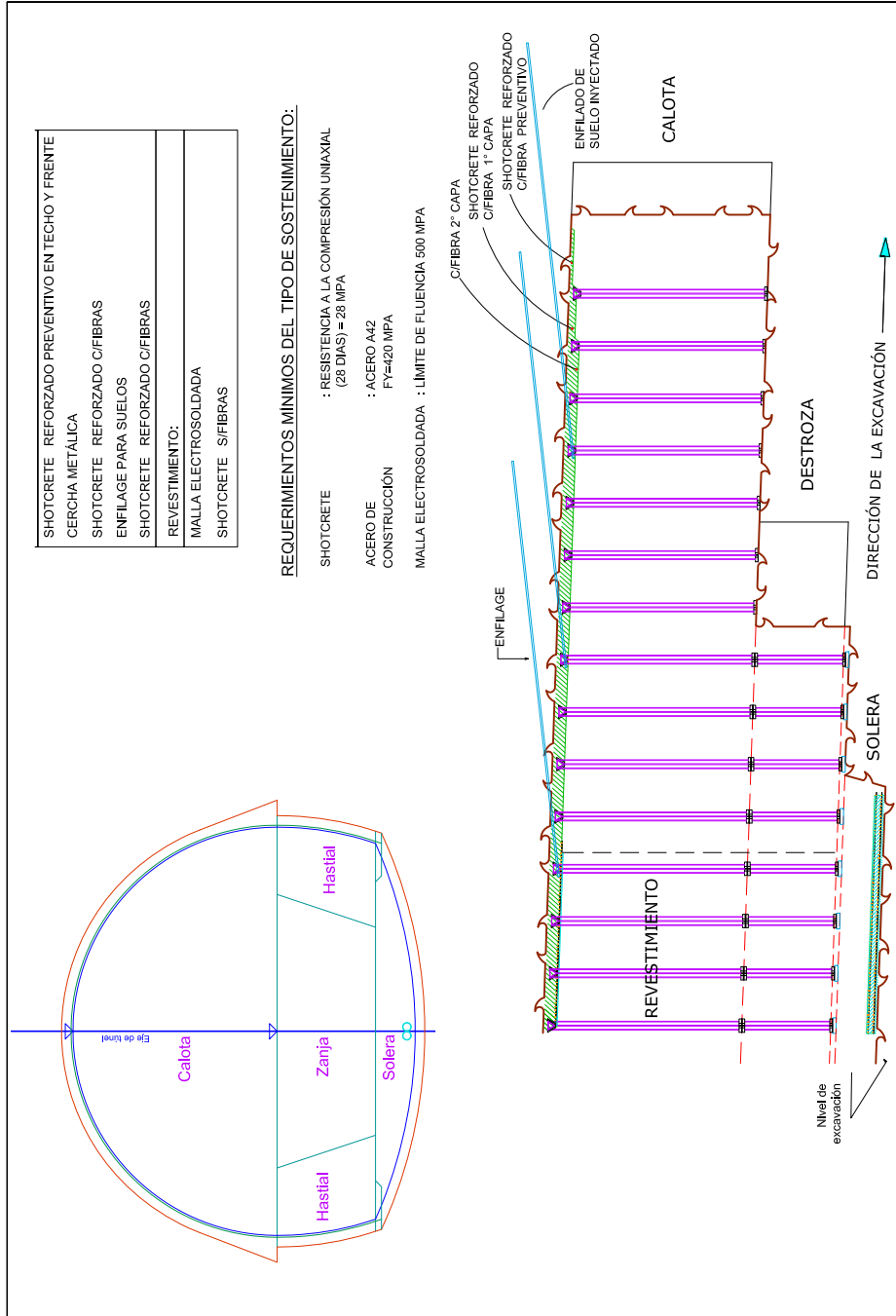


Figura 28. Túnel en suelo.
Fuente: Departamento de túneles, CCT4, 2012.

4.1.2 Pre - Dimensionamiento del sostenimiento

Para el pre - dimensionamiento se ha considerado los valores de carga recomendados por Terzaghi.

- **Paso 1.** Se considera carga básica para roca suelta (suelo):

$$H_p = 0,47 \times (b + h) \quad [5]$$

donde: b = ancho del túnel

h = altura del túnel

y en un caso extremo de un suelo que está fluyendo:

$$H_p = 1,1 \times (b + h) \quad [6]$$

Si para $b = 11,6$ m y $h = 9,7$ m; obtenemos:

➤ En el primer caso: $H_p = 10,0$ m

➤ En el segundo caso: $H_p = 23,4$ m

Debemos alertar que es muy importante drenar la excavación para evitar el caso extremo de flujo de masas.

- **Paso 2.** Se determina la carga vertical.

$$P_v = g_{\text{suelo}} \times H_p \quad [7]$$

$$P_v = 2,12 \frac{t}{m^3} \times 10,0 \text{ m} \quad [8]$$

$$P_v = 21,2 \frac{t}{m^2}$$

- **Paso 3.** Se determina la carga aplicada sobre un marco reticulado o sobre la longitud de un avance (en este caso el avance máximo es de 1,0 m):

$$p = P_v \times \text{avance} \quad [9]$$

$$p = 21,2 \frac{t}{m^2} \times 1,0 \text{ m} \quad [10]$$

$$p = 21,2 \frac{t}{m}$$

- **Paso 4.** El esfuerzo normal se obtiene en función del radio interno (5,3 m) del túnel:

$$N = p \times R \quad [11]$$

$$N = 21,2 \frac{t}{m} \times 5,3 \text{ m} \quad [12]$$

$$N = 112,4 \text{ t}$$

- **Paso 5.** La tensión que actúa sobre la cáscara de hormigón lanzado, se obtiene para un ancho de placa de 1 m, con un espesor t:

$$s = \frac{N}{A} < s_{adm} \quad [13]$$

Siendo, el s_{adm} la tensión de rotura que puede soportar el hormigón lanzado a edades tempranas, por ejemplo 5 MPa (500 t/m²) a las 16 horas que es aproximadamente el tiempo que dura un ciclo de trabajo para esta sección reforzada, entonces:

$$t > \frac{N}{(s_{adm} \times 1 \text{ m})} \quad [14]$$

$$t > \frac{112,4 \text{ t}}{\left(500 \frac{\text{t}}{\text{m}^2} \times 1 \text{ m}\right)} \quad [15]$$

| |
|----------------------|
| $t > 0,22 \text{ m}$ |
|----------------------|

El espesor de sostenimiento mínimo adoptado en esta sección es de 30 cm, que cumple con este requerimiento.

4.1.3 Dimensionamiento del enfilaje en suelo

El enfilaje de la bóveda tiene la función de estabilizar eventuales rupturas locales en la periferia de la excavación. Por lo tanto su dimensionamiento está en función de la masa de suelo que tiende a caer, en caso que este no se instale. La carga corresponde aproximadamente a una parábola con una altura de 0,25 veces la luz, de acuerdo con experimentos de Terzaghi.

- **Paso 1.** Se considera una luz de 2,0 m para avances de 1,0 m más una pérdida eventual de apoyo del enfilaje, en las proximidades del frente de excavación. Con esta carga se estima el momento flector del enfilaje, el cual se modela como una viga simplemente apoyada y de una longitud ampliada de 1,5 veces la luz correspondiente a la longitud de avance, para que de esta forma se considere el efecto del apoyo elástico del suelo.

$$p = \frac{2}{3} \times 0,25 \times L \times g_{\text{suelo}} \quad [16]$$

$$p = \frac{2}{3} \times 0,25 \times 2 \text{ m} \times 2,12 \frac{\text{t}}{\text{m}^3} \quad [17]$$

$$p = 0,71 \frac{\text{t}}{\text{m}^2}$$

- **Paso 2.** Se calcula la carga distribuida en un ancho de banda de 0,4m que es la separación entre barras.

$$w = p \times s$$

[17]

$$w = 0,71 \frac{t}{m^2} \times 0,4 \text{ m} \quad [18]$$

$$w = 0,28 \frac{t}{m}$$

- **Paso 3.** Para encontrar el momento máximo flexionante, se debe tomar en cuenta 1,5 veces más la luz descubierta por el avance.

$$Mm = w \times (1,5 \times \text{avance}) \frac{2}{8} \quad [19]$$

$$Mm = 0,28 \frac{t}{m} \times (1,5 \times 1,0) \frac{2}{8} \quad [20]$$

$$Mm = 0,08 \frac{t}{m}$$

- **Paso 4.** La sección que satisface estos requerimientos es:

Tabla 20
Parámetros de enfilajes.

| Diámetro (in) | Diámetro (mm) | A(cm ²) | Ix (cm ⁴) | Zx (cm ³) |
|---------------|---------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 1/2 | 40 | 4,6 | 11,7 | 4,86 |
| 2 | 50 | 6,7 | 26,1 | 10,9 |

Fuente: Departamento de geomecánica, CCT4, 2010.

- **Paso 5.** La deflexión en la barra sería calculada como viga simplemente apoyada.

$$d = \frac{5}{384} \times \frac{wL^4}{EI} \quad [21]$$

$$d = \frac{5}{384} \times \frac{\left(0,028 \frac{t}{cm}\right) \times (150 \text{ cm})^4}{\left[\left(2\,100 \frac{t}{cm^2}\right) \times (26,1 \text{ cm}^4)\right]} \quad [22]$$

$$d = 0,4 \text{ cm}$$

Esto no considera que la barra estará rellena con lechada de cemento y el arriostamiento del suelo, por lo que debe considerarse como un valor conservador.

- **Paso 6.** Hacemos una verificación de corte en la barra

$$R = \frac{wL}{2} = \frac{w(1,5 \text{ avance})}{2} \quad [23]$$

$$R = 0,28 \frac{t}{m} \times \frac{(1,5 \times 1,0 \text{ m})}{2} \quad [24]$$

$$R = 0,21 \text{ t}$$

- **Paso 7.** Encontramos el valor de corte requerido.

$$t_{req} = \frac{R}{A} \quad [25]$$

$$t_{req} = \frac{0,21 \text{ t}}{6,7 \text{ cm}^2} \quad [26]$$

$$t_{req} = 0,031 \frac{\text{t}}{\text{cm}^2} \quad [27]$$

$$t_{req} = 31 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Concluimos que es menor a la admisible.

Se ha verificado que la cohesión del material es mayor a la carga entre enfilajes, por lo que garantiza que el material no se desmoronará entre los enfilajes transversalmente.

$$p = 0,71 \frac{\text{t}}{\text{m}^2} = 7,1 \text{ KPa} < \text{Cohesion (20 Kpa)}$$

4.1.4 Verificación de las solicitaciones en el sostenimiento y revestimiento

Siguiendo los criterios del revestimiento tándem, se ha previsto 2 etapas de aplicación de soportes que son el sostenimiento y revestimiento.

El sostenimiento es aquel colocado casi inmediatamente después de la excavación en sus diferentes etapas. En cambio, el revestimiento es aquel colocado cuando ya se ha concluido la etapa de excavación y se ha comprobado mediante la instrumentación la estabilidad que proporciona el sostenimiento.

El principio del revestimiento tándem, consiste en que el sostenimiento colocado en el frente de excavación, tiene el objetivo de uniformizar las cargas en la periferia de la excavación, a una distancia de 1,5 m o 15 m (cuando el macizo ha relajado toda su carga en el revestimiento primario).

El revestimiento secundario, se asume que actuará cuando el sostenimiento primario pierde resistencia en el tiempo (transferencia de cargas 30 % de la carga inicial).

4.1.5 Sostenimiento adoptado para el túnel en suelo

Tabla 21

Tipo de excavación y sostenimiento para túnel en suelo.

| Clase de Suelo y Sostenimiento | | Túnel Wayrasencca |
|--|--------------------|--|
| SUELO Zona de portal hasta alcanzar cobertura de 2D | Tipo de excavación | TIPO 6a Calota-destroza-solera |
| | Avance (m) | 0,8 – 1,0m c/núcleo de apoyo |
| | Claro sin ademe | 1 m máximo |
| | Hº lanzado (cm) | 30 c/f + 20 s/f |
| | Anclajes | |
| | Cercha | Espaciamiento = 0,8 - 1,0m |
| | Malla | Q295 |
| SUELO | Tipo de excavación | TIPO 6 calota-destr-solera |
| | Avance (m) | 1,2 - 1,5 m |
| | Claro sin ademe | 1,5 m máximo |
| | Hº lanzado (cm) | 25 c/f + 5 s/f |
| | Anclajes | |
| | Cercha | Espaciamiento = 1,2 - 1,5 m |
| | Malla | Q295 y Q246 |

Fuente: Departamento de geomecánica, CCT4, 2010.

4.2 Diseño del túnel en roca

De acuerdo a la información procedente de otros túneles en la misma zona, los mecanismos de inestabilidad estimados son:

- Inestabilidad de cuñas formadas por discontinuidades, dos familias K1 y K2 sub paralelas al rumbo del túnel y que se abren respecto al orificio, además están cortados por una familia K3 que les da la forma de rodajas inestables;
- Solicitaciones y/o perturbaciones dinámicas por efecto de la voladura;
- Debilitamiento de la calota y de los hastiales si se produjera mala práctica de voladura.

4.2.1 Sección de excavación

Para el tramo en roca se ha seleccionado una sección tipo herradura, este límite de sección libre cumple con los requerimientos de gálibo mínimo del proyecto. Ver Figura 29.

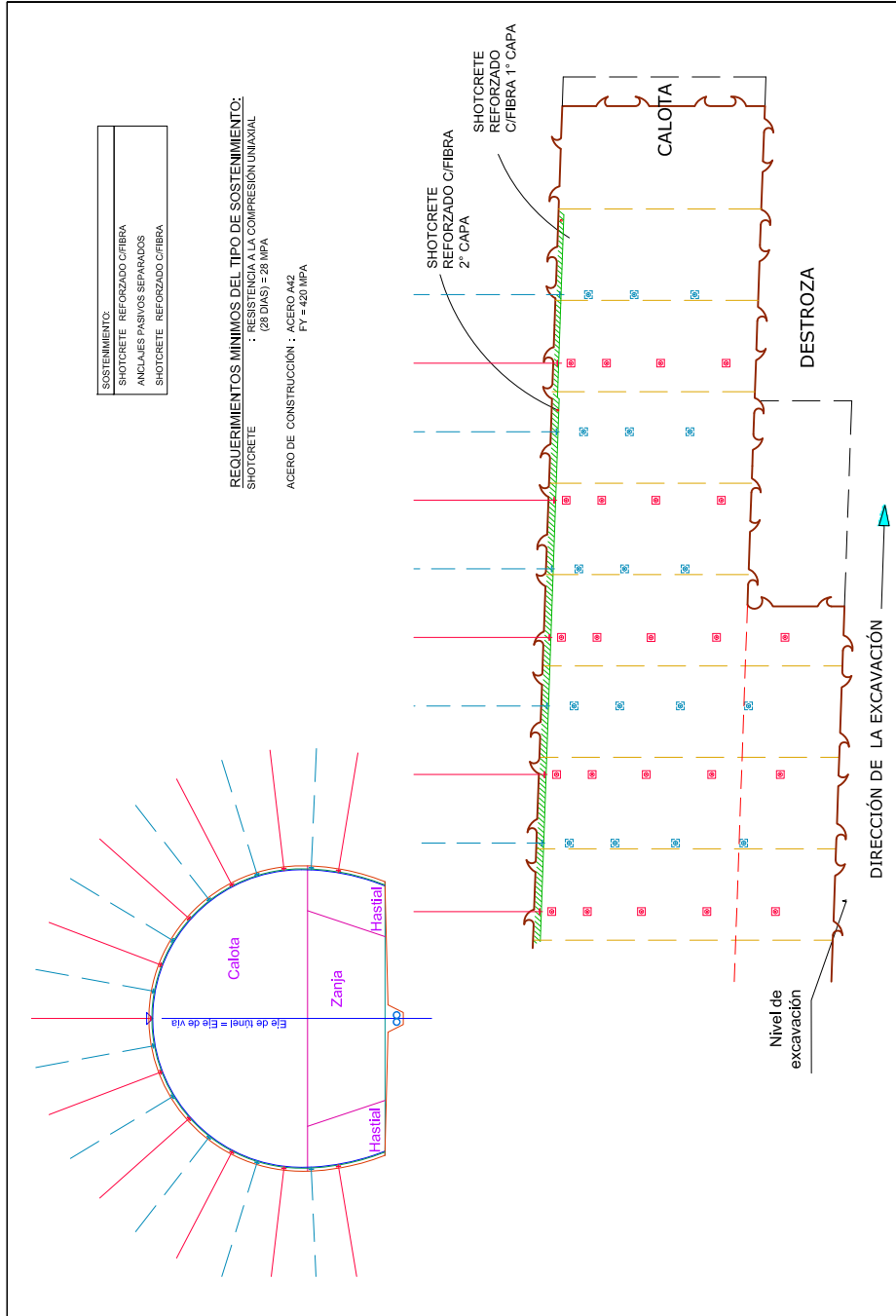


Figura 29. Túnel en roca.
 Fuente: Departamento de túneles, CCT4, 2012.

4.2.2 Dimensionamiento del túnel en roca

A continuación haremos una breve descripción de los principales métodos para implementar un sostenimiento apropiado para una excavación subterránea.

a. Sostenimiento según Barton

El método establece lo siguiente:

- **Paso 1.** Se debe encontrar el diámetro equivalente de la excavación D_e . Usar como guía los valores de la Tabla 15.

$D_e = \text{ancho o altura de la excavación en metros} / \text{ESR}$

ESR = coeficiente de soporte según tipo de excavación:

Para el caso particular del túnel que nos ocupa, se adopta la categoría D, es decir para una sección normal.

Con lo cual quedaría de la siguiente manera:

$$D_e = 10 / 1,0 = 10 \text{ m}$$

- **Paso 2.** Se establece la longitud máxima sin soporte S :

$$S = 2 \text{ ESR} \quad Q = 0.4$$

Conformando la siguiente secuencia para tipos de roca:

- ✓ **Clase I:** $Q \geq 40$; ESR = 1; S = 17 m sin soporte.
- ✓ **Clase II:** $Q = 10 - 40$; ESR = 1; S = 9 m sin soporte.
- ✓ **Clase III:** $Q = 4 - 10$; ESR = 1; S = 4 m sin soporte.
- ✓ **Clase IV:** $Q = 1 - 4$; ESR = 1; S = 1,4 m sin soporte
- ✓ **Clase V:** $Q = 0,4 - 1$; ESR = 1; S = 1 m sin soporte
- ✓ **Clase Va:** $Q = 0,1 - 0,4$; ESR = 1; S = 0,6 m sin soporte

Estos valores son los que normalmente se establecen como las longitudes de avance durante la excavación.

- **Paso 3.** Para establecer el sostenimiento, se considera la guía de la Figura 25.

b. Sostenimiento según Bieniawski

Como parte integrante del CSIR, propuso también una guía para la selección del ademe en las excavaciones subterráneas, la versión más reciente de ésta, se presenta en la Tabla 12.

Este soporte está idealizado para una sección en herradura de 10 m de diámetro y que soporta una presión de 25 MPa, equivalente a 1 000 m de cobertura. Se utiliza la guía para sostenimiento primario según RMR, ver Tabla 16.

Se ha estimado el tiempo de autoaporte:

- ✓ **Clase I:** 5 años; S = 10 metros sin soporte.
- ✓ **Clase II:** 4 meses; S = 6 metros sin soporte.
- ✓ **Clase III:** 7 días; S = 4 metros sin soporte.
- ✓ **Clase IV:** 7 horas; S = 1,5 metros sin soporte.
- ✓ **Clase V:** 20 minutos; S = 0,8 metros sin soporte.

4.2.3 Sostenimiento adoptado para el túnel en roca

Los elementos anteriores definen el tipo de excavación y los sostenimientos según clase de terreno a encontrar.

Tabla 22

Tipo de excavación y sostenimiento para roca – Túnel Wayrasencca.

| Clase de Roca y Sostenimiento | | Q' SISTEM (1992) | Túnel Wayrasencca |
|-------------------------------|--------------------|---|--|
| V Muy Mala | Tipo de excavación | De = 10/1 0,6 m máximo >15 cm c/fibra L = 3,00 m 1,0 x 1,0 – 1,3 x 1,3 Si | TIPO 5 Calota y destroza 1,2 – 1,5 c/galería 1,5 m máximo 25 c/f + 5s/f L = 4,00 m 1,5 x 1,5 calota y destroza Esp = 1,2 – 1,5 m Q246 |
| | Avance calota (m) | | |
| | Claro sin ademe | | |
| | Hº lanzado (cm) | | |
| | Anclajes | | |
| IV Mala | Tipo de excavación | De = 10/1 1,4 m máximo 9 - 15 cm c/fibra L = 3,00 m 1,3 x 1,3 – 1,7 x 1,7 | TIPO 4 Completa 1,8 3,6 m máximo 15 c/f L = 4,00 m 1,5 x 1,5 calota y destroza No No |
| | Avance calota (m) | | |
| | Claro sin ademe | | |
| | Hº lanzado (cm) | | |
| | Anclajes | | |
| III Regular | Tipo de excavación | De = 10/1 9,00 m máximo 0 - 4 cm s/fibra L = 3,00 m 2,3 x 2,3 – 2,5 x 2,5 | TIPO 3 Completa 3,0 18 m máximo 5 c/f L = 4,00 m 2,3 x 2,3 solo calota No No |
| | Avance calota (m) | | |
| | Claro sin ademe | | |
| | Hº lanzado (cm) | | |
| | Anclajes | | |
| II Buena | Tipo de excavación | De = 10/1 9,00 m máximo 0 - 4 cm s/fibra L = 3,00 m 2,3 x 2,3 – 2,5 x 2,5 | TIPO 3 Completa 3,0 18 m máximo 5 c/f L = 4,00 m 2,3 x 2,3 solo calota No No |
| | Avance calota (m) | | |
| | Claro sin ademe | | |
| | Hº lanzado (cm) | | |
| | Anclajes | | |
| | Cercha | | |
| | Malla | | |

Fuente: Ingeniería de la clasificación del macizo rocoso para el diseño del soporte de túneles, Nick Barton, 1974.

4.2.4 Verificación de los enfilajes en roca muy fracturada

Como las cuñas son casi rígidas, no hay esfuerzos de flexión, más bien hay que hacer una verificación de la resistencia al corte de las barras.

Adoptamos una barra de acero de 25 mm de diámetro, cuya área es $A = 4,91 \text{ cm}^2$.

- **Paso 1.** Calculamos la sollicitación al corte de la barra.

$$S_c = 0,9(0,6 f_y)A \quad [28]$$

$$S_c = 0,9 \left(0,6 \times 25\,000 \frac{\text{t}}{\text{m}^2} \right) \times 0,000\,491 \text{ m}^2 \quad [29]$$

$$S_c = 6,6 \text{ t}$$

- **Paso 2.** El volumen del bloque a soportar, con un factor de seguridad de $F_s = 1,5$.

$$V_{\text{bloque}} = \frac{F_s \times S_c}{g_{\text{roca}}} \quad [30]$$

$$V_{\text{bloque}} = \frac{1,5 \times 6,6 \text{ t}}{2,65 \frac{\text{t}}{\text{m}^3}} \quad [31]$$

$$V_{\text{bloque}} = 3,7 \text{ m}^3$$

- **Paso 3.** Entonces, el tamaño del bloque a soportar será para un avance de 1,5 m y una separación entre barras de 0,4 m:

$$H = \frac{V_{\text{bloque}}}{s} \times (1,5 \text{ avance}) \quad [32]$$

$$H = \frac{3,7\text{m}^3}{0,4 \text{ m}} \times (1,5 \times 1,5 \text{ m}) \quad [33]$$

| |
|-----------|
| H = 4,1 m |
|-----------|

Demás está suponer que con esa separación de barras se produzca un bloque con ese tamaño, por tanto, está seguro el techo rocoso cuando no se ha colocado ninguna capa de hormigón lanzado aún.

4.3 Resultado del análisis numérico

4.3.1 Túnel en la entrada

Los resultados del modelamiento numérico muestran que las deformaciones en la clave son del orden de 1,30 cm (0,24 %). Por tratarse de la sección más desfavorable y de verificarse la poca cobertura de material de ladera, es que se propone la incorporación del relleno con material natural, contenido por un

muro de concreto armado, previa colocación de pernos autoperforantes y pantalla de shotcrete. Los momentos flectores encontrados, son absorbidos por las armaduras dispuestas para el estado final del sostenimiento del túnel.

4.3.2 Túnel en roca

Los resultados del modelamiento numérico muestran que las máximas deformaciones en la clave son del orden de 0,2058 cm (0,04 %) correspondiente al sector R - 3 y con sostenimiento tipo 2. Dicha deformación es consecuente con las encontradas en cada parcialización. Los momentos flectores leídos en el sostenimiento primario son absorbidos por la estructura de concreto lanzado fibro - reforzado.

4.3.3 Túnel en la salida

Los resultados del modelamiento numérico muestran que las deformaciones en la clave son del orden de 0,60 cm (0,11 %). Para esta sección las tensiones de corte del material fluvioglacial que inducen a inestabilidades, no afectan a la sección del túnel por estar excavado en roca. Los momentos flectores leídos en el sostenimiento primario son absorbidos por la estructura de concreto lanzado de fibra - reforzada.

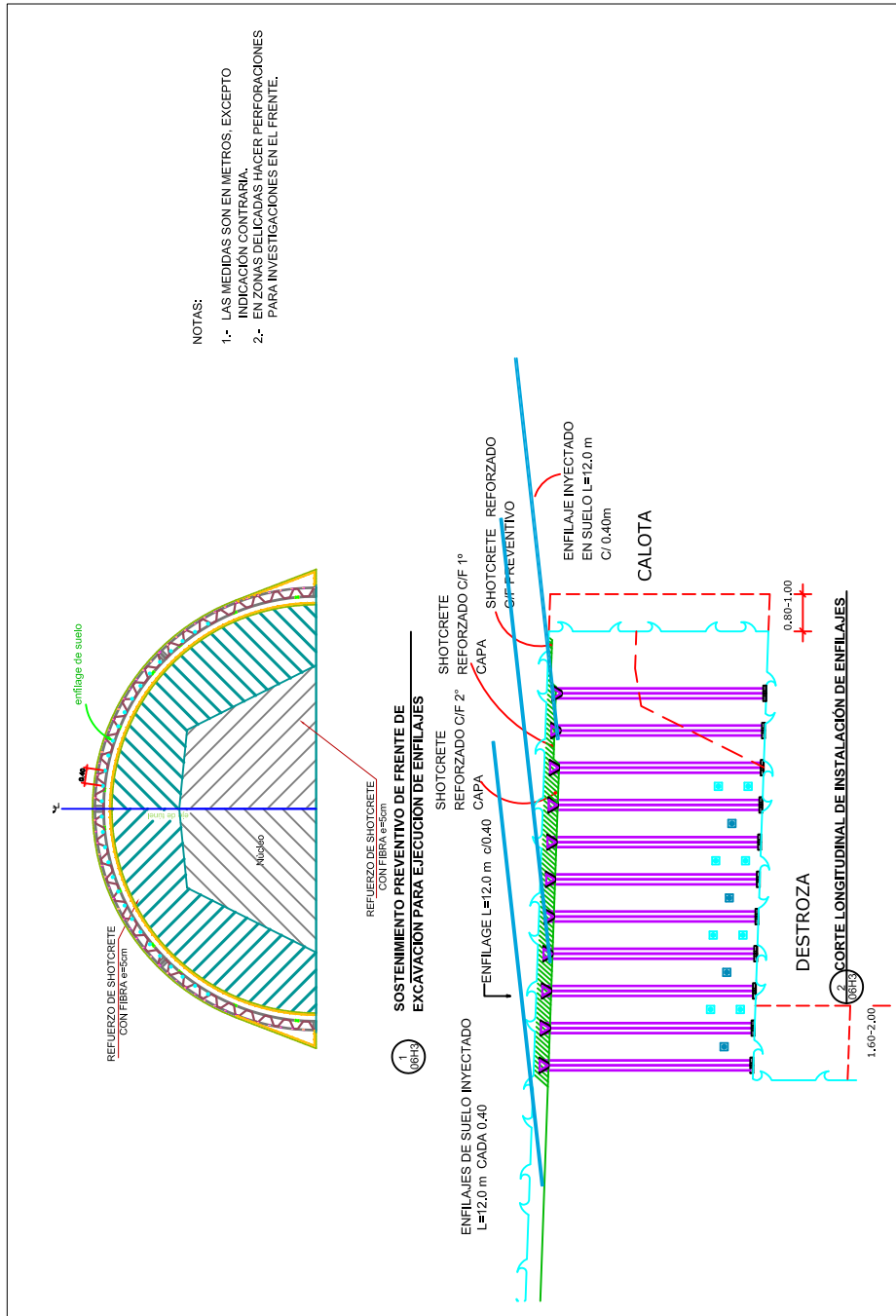
4.4 Características técnicas de las inyecciones requeridas

4.4.1 Enfilajes de suelo

La inyección consiste en una lechada de cemento que se puede realizar de dos maneras:

➤ **De fondo, y repartida.**

Adoptaremos la segunda opción que describiremos brevemente así: se realiza mediante obturador doble. El espacio entre colchones del obturador se posiciona en cada una de las válvulas unidireccionales y tras el inflado de los colchones se realiza la inyección. Posteriormente, se desinflan los colchones y se reubica el obturador en otra válvula unidireccional. Una vez realizada la inyección en cada una de las válvulas unidireccionales, se realiza una inyección en fondo con el fin de llenar el interior del tubo. La presión de inflado de los colchones del obturador debe ser 1,5 veces la presión de inyección. Ésta, a su vez será de 0,3 MPa aproximadamente. Ver Figura 30.



NOTAS:
 1.- LAS MEDIDAS SON EN METROS, EXCEPTO INDICACIÓN CONTRARIA.
 2.- EN ZONAS DELICADAS HACER PERFORACIONES PARA INVESTIGACIONES EN EL FRENTE.

Figura 30. Detalle de enfilaje en suelo.
 Fuente: Departamento de túneles, CCT4, 2012.

4.4.2 Marcha - Avanti

La inyección consiste en lechada de cemento que se realiza una vez terminada la perforación y antes de introducir la barra de acero. Este trabajo se debe realizar a una presión constante de 0,3 a 0,5 MPa para asegurar su llenado dentro del taladro. La mezcla tendrá una relación de agua/cemento 0,45; para asegurar el flujo del líquido en los vacíos del macizo fracturado.

4.4.3 Anclajes interiores

Después de terminada la perforación, se limpiarán los taladros con chorros de agua y aire comprimido para remover los fragmentos de roca suelta y polvo que hayan quedado. Se rellenan con resina o lechada de cemento introduciendo una manguera hasta el fondo de la perforación; y se retirará paulatinamente a medida que la lechada vaya fluyendo relleno la perforación. Según diseño (Ver Figura 31), la inyección de anclajes tendrá las siguientes características.

1° Etapa.- Cápsulas de resina rápida:

En el tramo inicial 0,7 – 1,0 m

2° Etapa.- Lechada de cemento con:

- ✓ Relación agua/cemento: 0,45
- ✓ Resistencia a compresión uniaxial: 21 MPa (a 28 días)
- ✓ La presión de inyección será de 0,3 a 0,5 MPa.
- ✓ 10 t de tensión en el manómetro del gato hidráulico.

a. Diseño para anclajes internos

En terrenos con alta plasticidad el anclaje ejerce una función de “armado”, oponiéndose al desplazamiento relativo de los bloques de roca por entre sus discontinuidades. En la capacidad de anclado, se puede analizar considerando tres alternativas de rotura:

- **En la adherencia entre la lechada – roca**

Tenemos la capacidad de anclaje específico (A_e):

$$S \times T = A_e \times p \times D \times (0,8 L) \quad [34]$$

Donde: S = Factor de seguridad

T = Fuerza de arranque o carga de trabajo (10 t)

Ae = Capacidad de anclaje específico (tensión de adherencia entre la lechada y el contorno del taladro)

D = Diámetro del taladro (51 mm)

L = Longitud del anclaje

Se tiene:

$$Ae = \frac{S \times T}{p \times D \times (0,8L)} \quad [35]$$

$$Ae = \frac{1,4 \times 10\,000 \text{ kg}}{p \times 5,1 \text{ cm} \times (0,8 \times 400 \text{ cm})} \quad [36]$$

$$Ae = 2,7 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Y 2,7 kg/cm² es menor a la capacidad de tensión admisible soportada por el sistema lechada – roca 5 - 30 kg/cm².

- **En la adherencia entre la lechada – barra**

Verificamos la capacidad de anclaje entre el sistema barra de acero – lechada con la siguiente fórmula:

$$S \times T = A_e \times p \times d \times (0,8 L) \quad [37]$$

Donde: d = diámetro de la barra

Se tiene:

$$A_e = \frac{S \times T}{p \times d \times (0,8 L)} \quad [38]$$

$$A_e = \frac{1,4 \times 10\,000 \text{ kg}}{p \times 2,5 \text{ cm} \times (0,8 \times 400 \text{ cm})} \quad [39]$$

| |
|---|
| $A_e = 5,6 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ |
|---|

Y $5,6 \text{ kg/cm}^2$ es menor < que la $s_{adm} = 0,69$
 $(f'c)^{2/3} = 23 \text{ kg/cm}^2$ (Hormigón Armado Jiménez Montoya)

- **En la rotura de la barra**

Verificamos resistencia a la rotura de la barra de acero:

$$S \times T = f_y \times \left(\frac{p \times d^2}{4} \right) \quad [40]$$

Donde:

d = diámetro de la barra

f_y = tensión a tracción en fluencia (acero grado 75)

Se tiene:

$$T = 5\,250 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \times p \times \frac{(2,5\text{cm})^2}{4} \times 1,4 \quad [41]$$

$$T = 18,4 \text{ t}$$

Y 18,4 t es mayor > que la carga de trabajo (10 t).

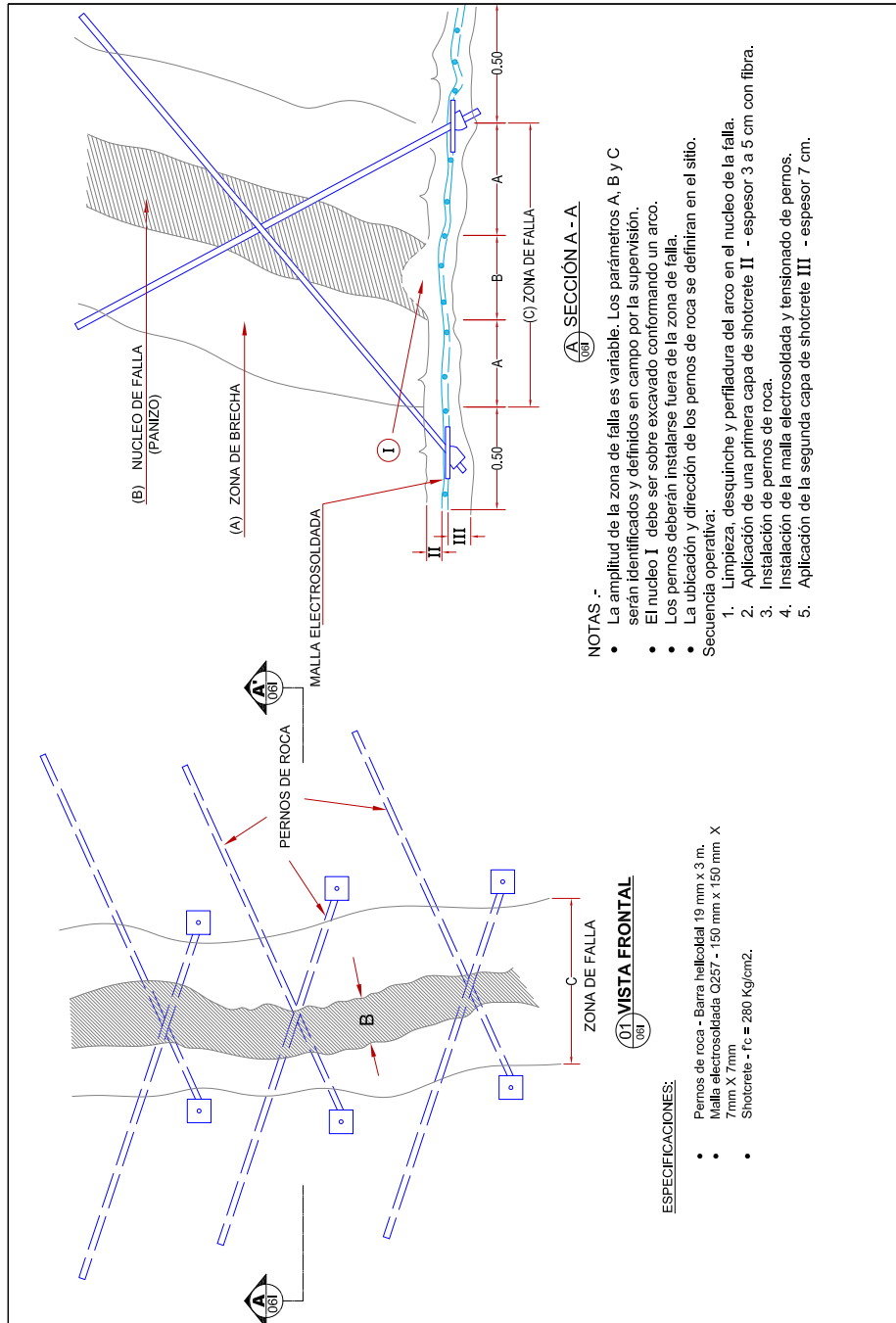


Figura 31. Sostenimiento con pernos.
Fuente: Departamento de túneles, CCT4, 2012.

4.4.4 Anclajes externos

La inyección del perno se deberá efectuar directamente de la barra hueca del perno, mediante suspensión de la lechada de cemento, la que ingresa al espacio anular entre el perno y el terreno a través de las perforaciones previstas en la broca. Se recomienda que la inyección sea realizada en lo posible inmediatamente después de terminada la perforación.

La inyección de lechada de cemento tendrá las siguientes características técnicas:

- Relación agua/cemento: 0,45
- Resistencia a compresión uniaxial: 21 MPa (a 28 días)
- Tensión mínima que deberá soportar el anclaje: 11,6 t.
- La presión de inyección será de 3 a 5 Bar.

a. Diseño para anclajes externos

Se trata de anclajes de acero con broca perdida, por lo tanto la perforación e introducción en el bulón se hace en una sola operación, con corruga - rosca que le permite el empalme de varias barras mediante manguitos, hasta alcanzar longitudes indicadas en el proyecto (L = 9,00 m), y

que poseen un orificio longitudinal en su interior por donde se canaliza la inyección de lechada de cemento.

Por lo tanto es un sistema ideal para terrenos de mala calidad donde las paredes de la perforación son inestables, que puede dificultar o impedir la introducción de la barra en el sistema convencional.

El relleno del anclaje consiste en inyectar lechada de cemento desde el fondo hacia la superficie, es decir que la totalidad del anclaje será cubierta por la inyección, se verificará la calidad de la lechada de cemento mediante pruebas de rotura uniaxial ($f'c$) cuyos valores deberán ser superiores o iguales a 21 MPa, a los 28 días de su vaciado.

La capacidad del anclaje se podrá obtener de la misma manera que en el anclaje de interior túnel, es decir se procederá a arrancar un anclaje que elija la supervisión al azar y la tensión mínima que deberá soportar el anclaje es la que está indicada en la memoria de cálculo de este elemento como sostén del talud. Para nuestro caso es de 11,6 t.

4.5 Diseño de voladuras según sectorización túnel Wayrasencca

Precisamos a continuación, el diseño de voladura para las tres etapas de excavación propuestas, vale decir, Calota, Destroza central y Hastiales. Este diseño está previsto para implementarlo en roca dura y debe ser adecuado, como es habitual en las obras de ingeniería subterránea de acuerdo con las condiciones reales encontradas durante la excavación. Ver figuras siguientes.

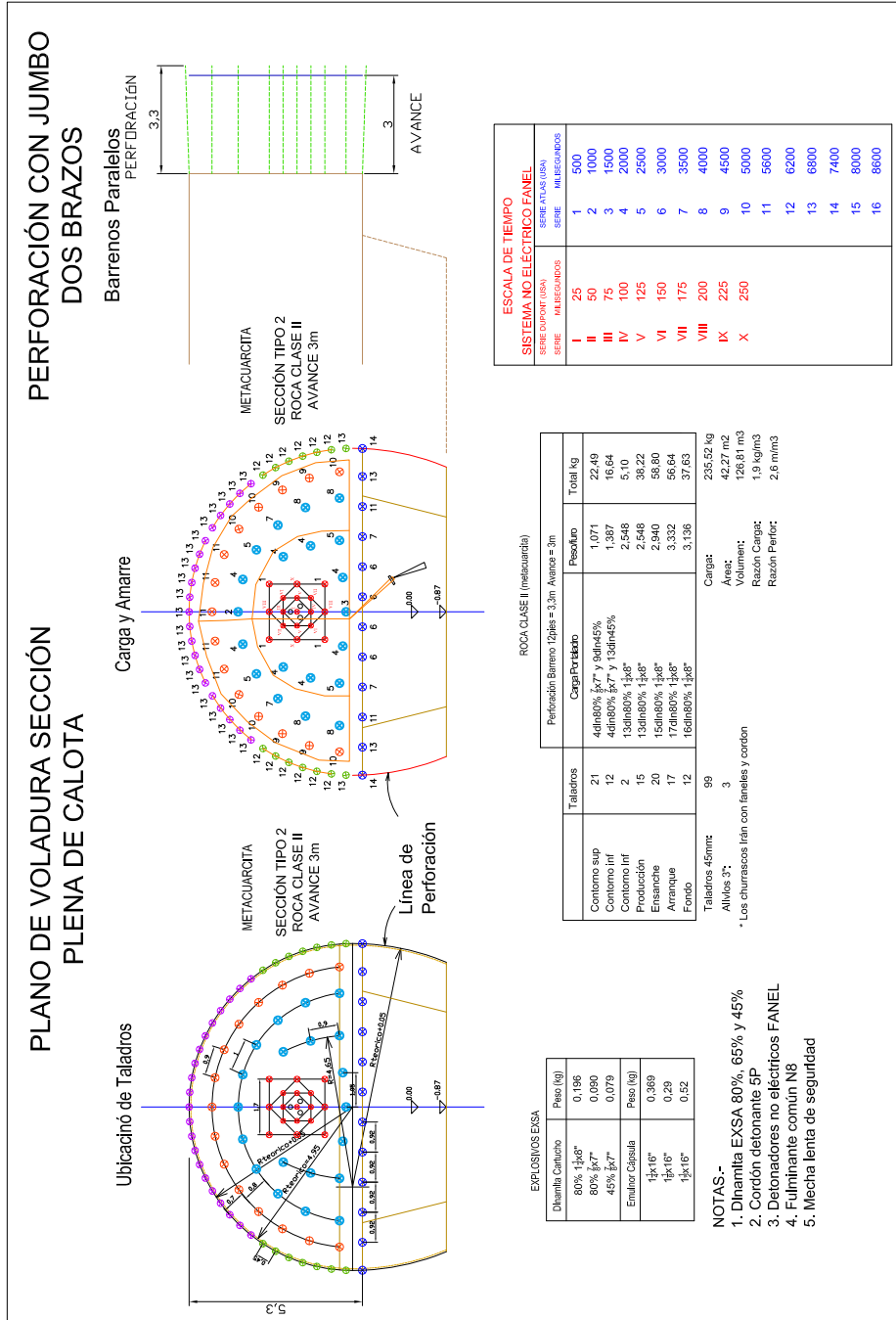


Figura 32. Voladura en sección tipo 2 - en calota.
Fuente: Departamento de túneles, CCT4, 2012.

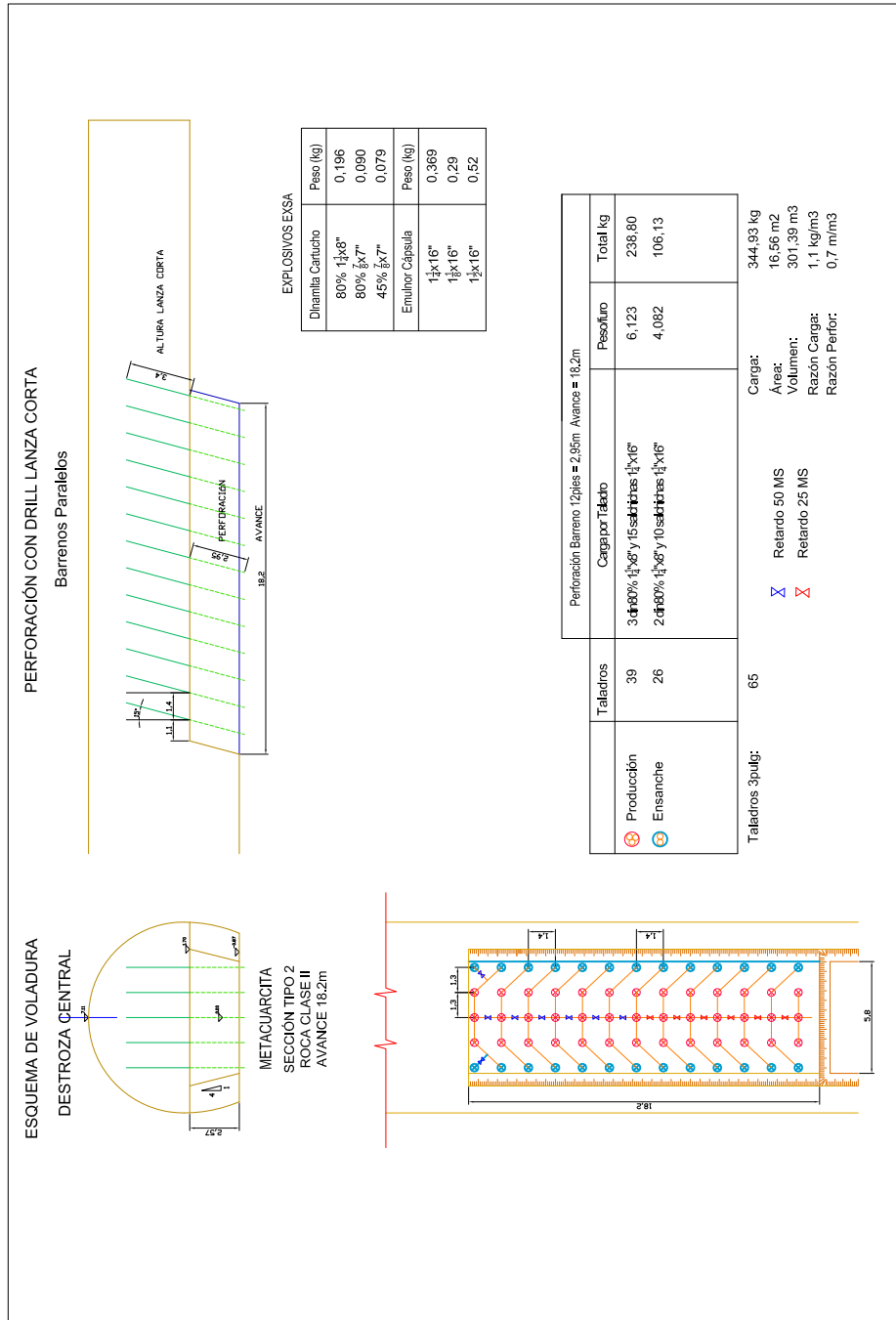


Figura 33. Voladura en sección tipo 2 - en destroza.
Fuente: Departamento de túneles, CCT4, 2012.

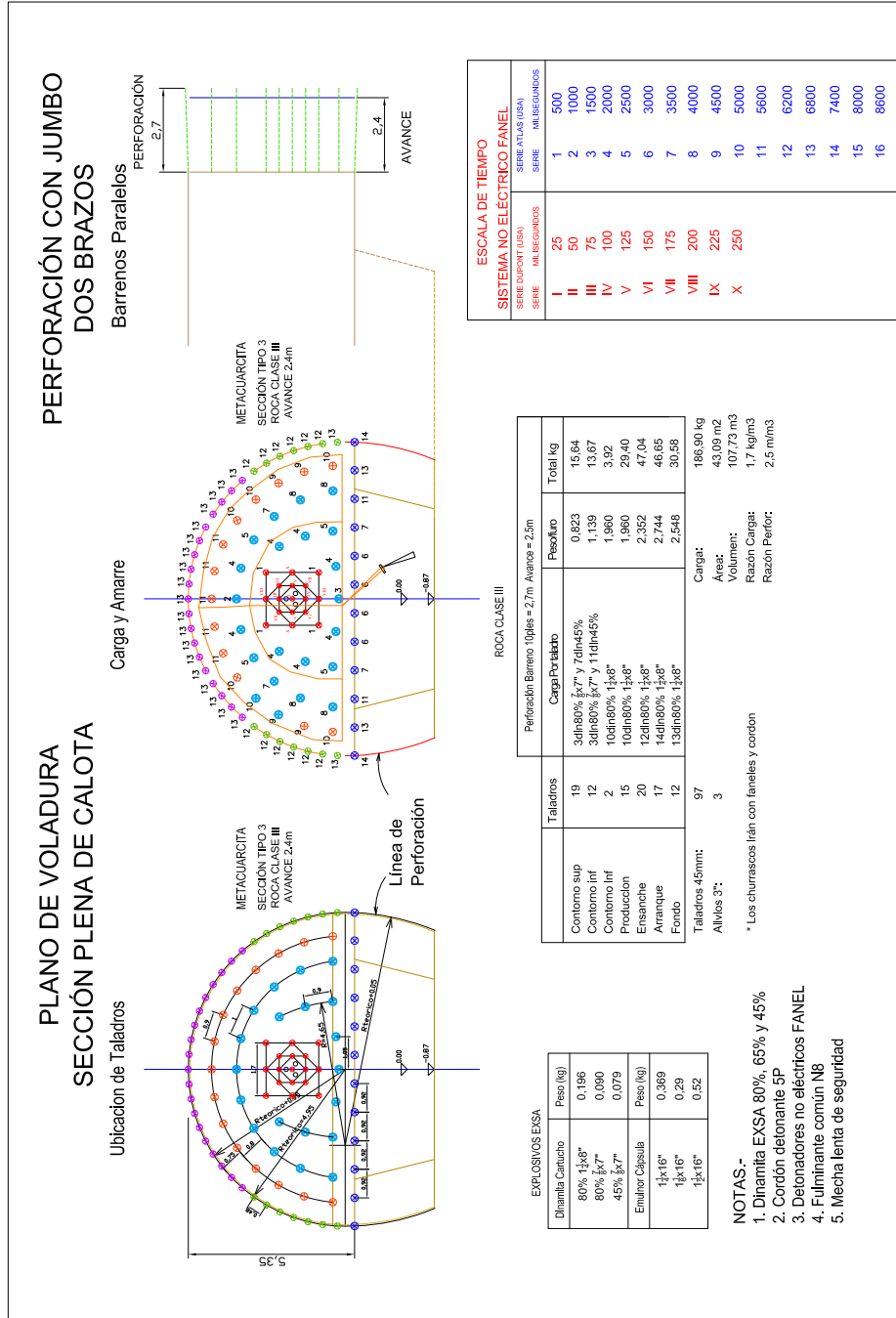


Figura 35. Voladura en sección tipo 3 - en calota.
Fuente: Departamento de túneles, CCT4, 2012.

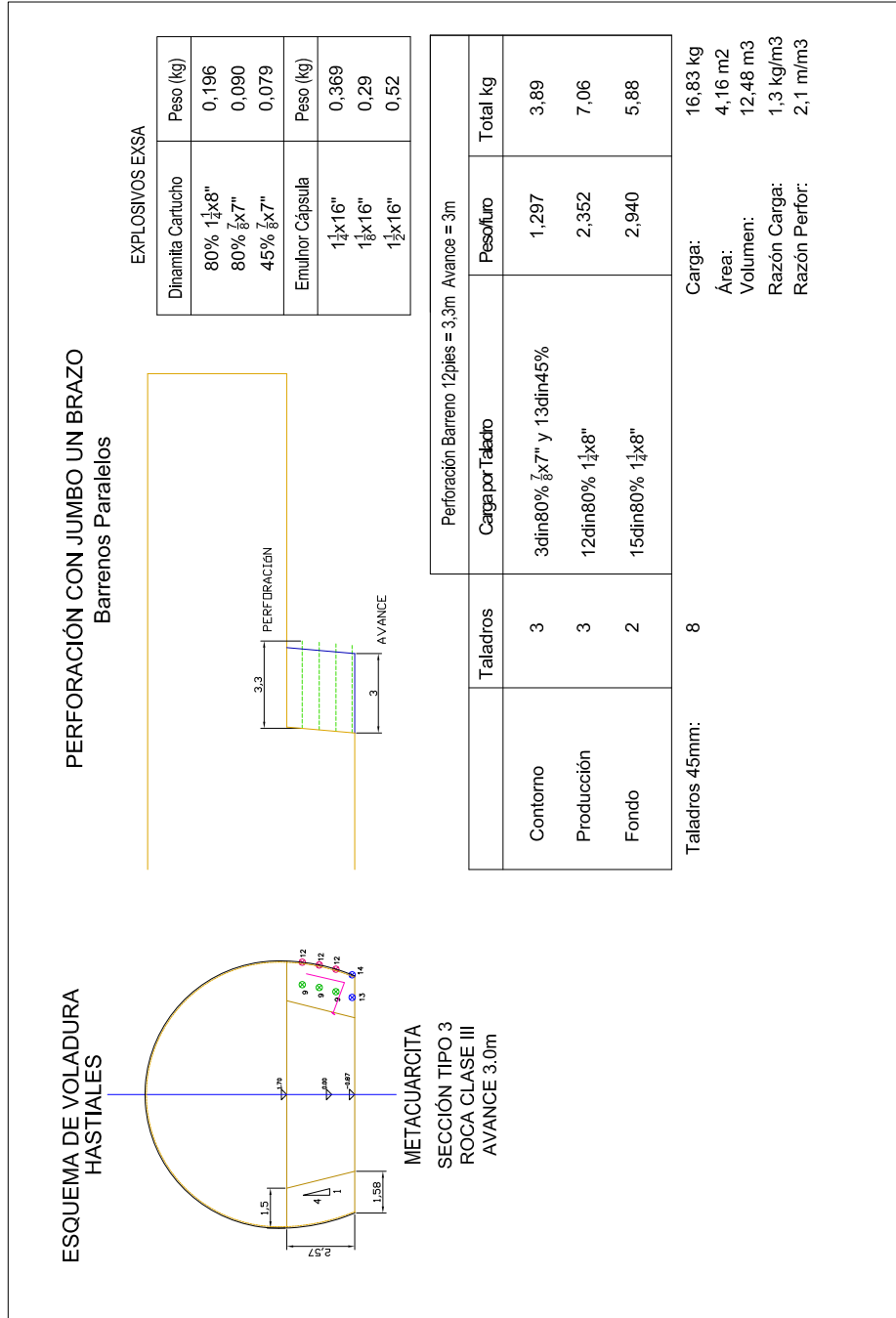


Figura 37. Voladura en sección tipo 3 - en hastiales.
Fuente: Departamento de túneles, CCT4, 2012.

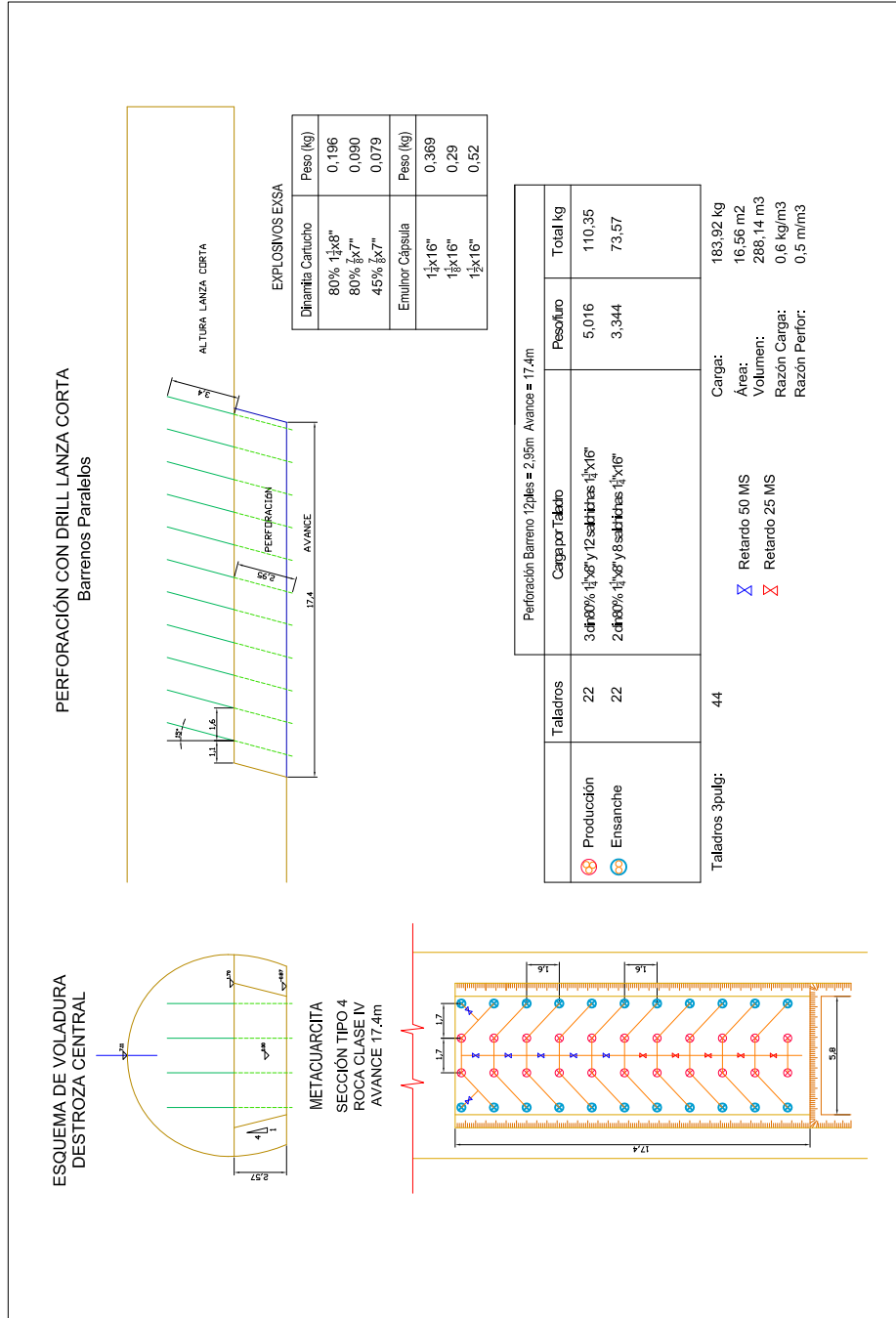


Figura 39. Voladura en sección tipo 4 - en destroza.
Fuente: Departamento de túneles, CCT4, 2012.

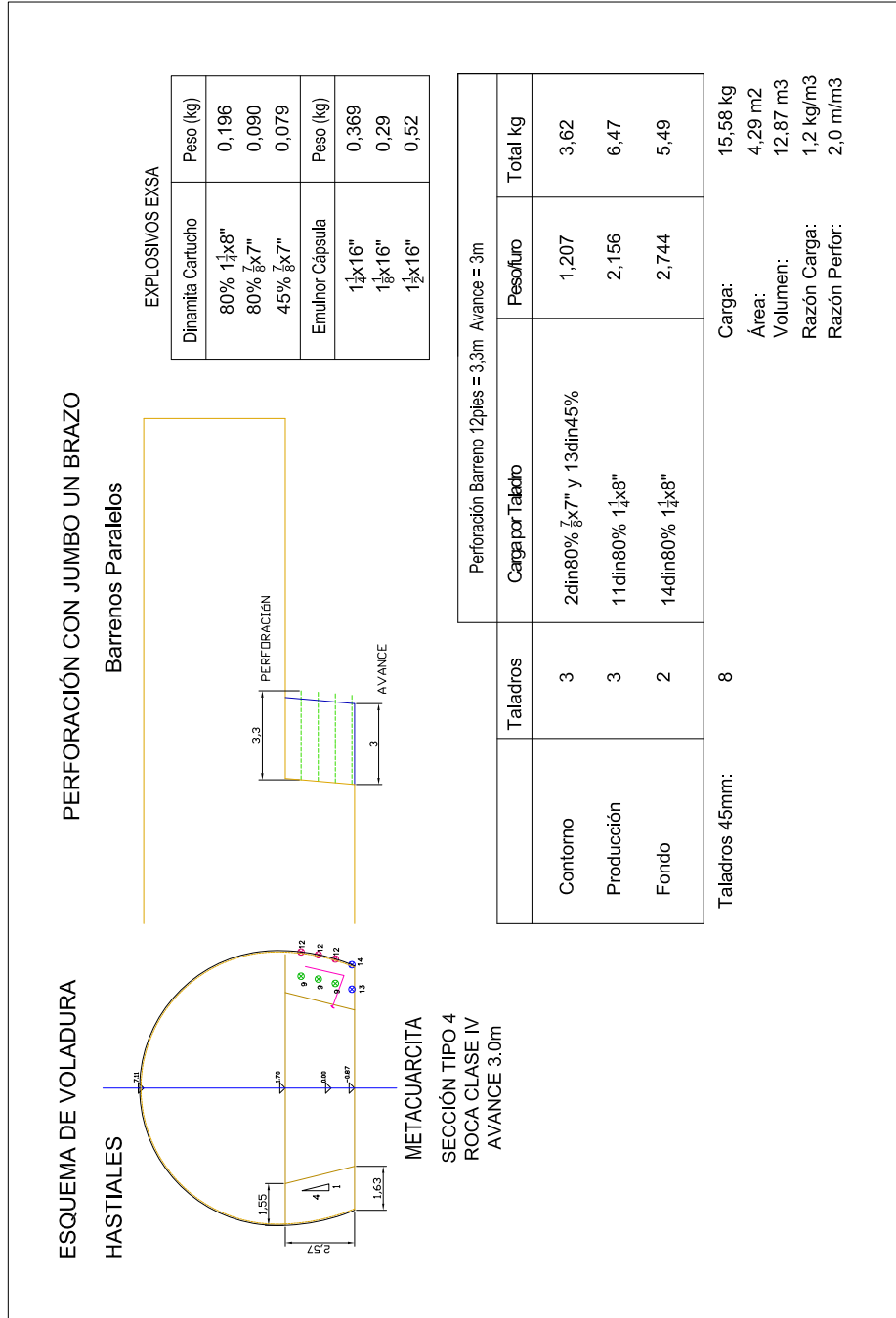


Figura 40. Voladura en sección tipo 4 - en hastiales.
Fuente: Departamento de túneles, CCT4, 2012.

4.6 Diseño de portal entrada

La zona de los portales por ser la de mayor cuidado debe ser estudiada de forma particularizada. El poco espesor de recubrimiento da lugar a mayores grados de alteración, mayor permeabilidad y flujo de agua, factores que en conjunto predeterminan una menor resistencia y deformabilidad del macizo. En nuestro caso el mayor factor de riesgo son los deslizamientos.

El diseño de los portales consiste en definir los elementos topográficos, las alturas, pendientes y elementos geológicos y geotécnicos en función a parámetros que permitan estabilidad a largo plazo. Con esta base se diseñan los elementos de estabilización y contención de ser necesarios.

4.6.1 Configuración del portal

Para la excavación del portal de entrada, se ha asumido el criterio de no afectar innecesariamente a la estabilidad global del macizo, por consiguiente, se ha diseñado el portal con la forma que se observa en la Figura 41 donde la excavación para el portal se inicia en la progresiva 237 + 530 y finaliza en la progresiva 237 + 550, se ha contemplado la incorporación de una banquetta (de 3 m) a los 14 m de altura desde la

subrasante, con la finalidad de aliviar la carga actuante de la masa fluvio glaciar en el talud elevado. Los taludes propuestos para la excavación tienen inclinación 1H : 3V, para el primer talud como para el segundo.

El agua será evacuada desde la esquina confinada hacia exteriores mediante cunetas de banquetta tipo 0,45 x 0,30 para luego conducir las hasta el nivel de plataforma por aliviaderos, para finalmente evacuarlas por medio de una alcantarilla tipo marco 1 x 1 ubicada en la progresiva km 237 + 505 hacia la ladera que desciende hasta el río Ollachea. Ver Figura 41.

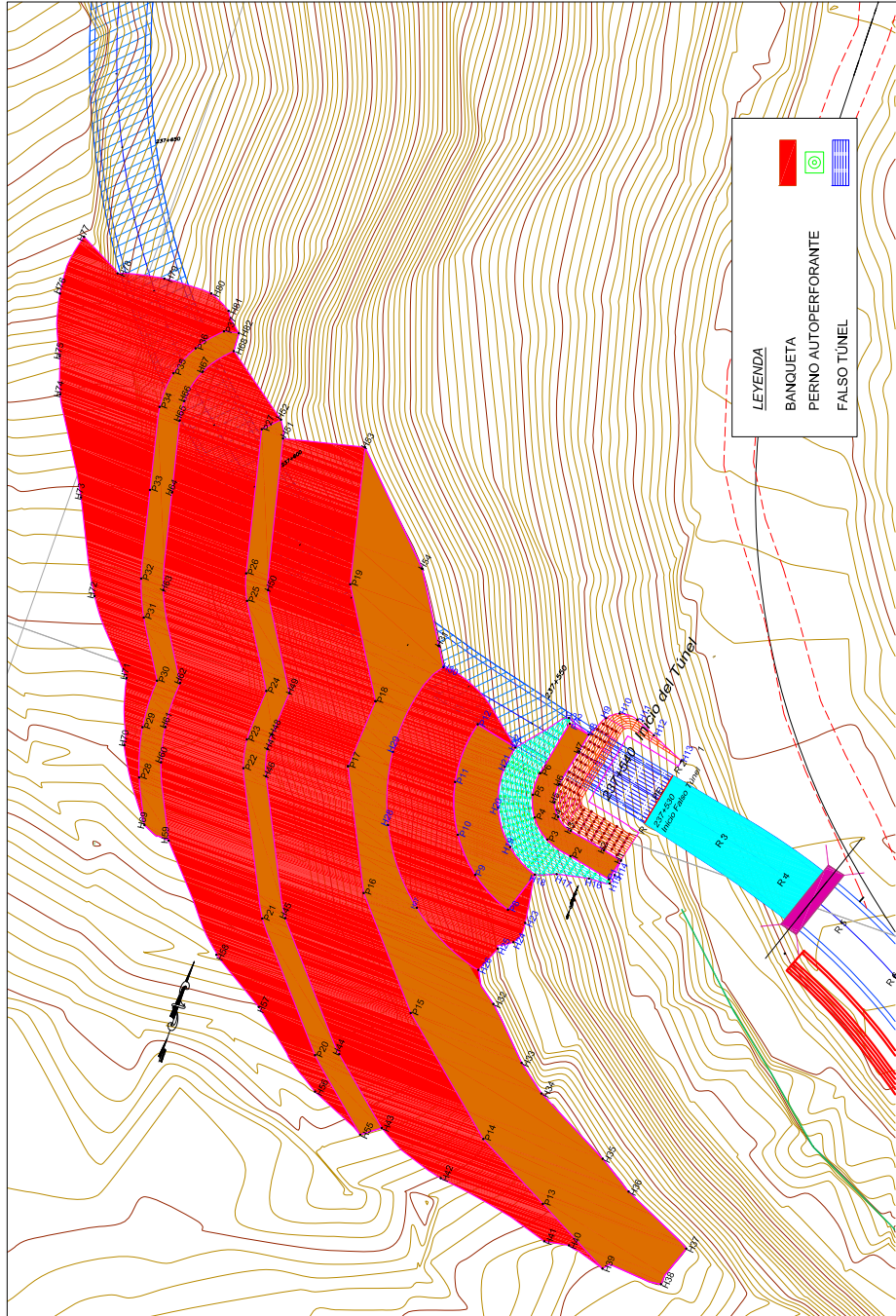


Figura 41. Sostenimiento de talud - portal entrada
Fuente: Departamento de túneles, CCT4, 2012.

4.6.2 Configuración de la zona de acceso

Los taludes planteados se excavan aproximadamente desde la cota 2 580 con una banquetta de 6 m de ancho y alturas de talud de 14 m, con inclinación de 1H : 1,5 V.

Además de esta descarga de talud, se incorpora un muro de gavión entre las progresivas km 237 + 450 al km 237 + 500, para evitar que algún bloque se roca desprendida de los taludes llegue a impactar directamente sobre la plataforma de circulación.

4.6.3 Análisis de estabilidad de taludes

Con fines de asegurar la estabilidad se procedió a realizar el análisis de estabilidad global de los taludes, donde se incluirán las medidas de sostenimiento, las cargas de tráfico y el valor de coeficiente sísmico horizontal.

El análisis que se presenta corresponde a la evaluación que considera que la estabilidad de la excavación estará controlada por la resistencia misma del suelo y que podrán existir modelos de falla circular. Estos análisis se efectuaron utilizando el programa Slide de Rocscience.

Para cada uno de los casos analizados se estudió la situación estática y dinámica. La situación dinámica se simuló mediante análisis pseudo - estático, donde las fuerzas de inercia debido a movimientos sísmicos fueron representadas por una fuerza horizontal equivalente al peso de una masa potencialmente deslizante multiplicada por el coeficiente sísmico. Es importante destacar, que el coeficiente sísmico es adimensional y no equivale a la aceleración máxima esperada, más bien, es una aceleración que actúa momentáneamente y en una sola dirección. El valor de coeficiente sísmico utilizado es igual a $k_h = 0,11$.

Los factores de seguridad mínimos obtenidos en la evaluación de la estabilidad en los análisis estáticos son 1,514 y para los pseudo - estáticos (sísmico) es 1,25.

4.6.4 Sostenimiento o fortificación

Los resultados que se obtienen de este análisis se puede sintetizar diciendo, que para el sector anterior al portal no es necesaria ninguna medida de fortificación de tipo estructural, sino más bien de tipo preventivo contra los agentes erosivos.

En cambio, para el sector del portal, resulta una fortificación de tipo estructural con pernos tipo Soil Nail y una pantalla de hormigón lanzado de 10 cm, el detalle se puede ver Figura 42.

Tabla 23
Resumen de la configuración del portal y acceso.

| Descripción | Tramo de acceso | Tramo de descarga | Portal de entrada |
|---------------------|--|--------------------------|---|
| Progresiva | km 237 + 480 a 237 + 530 | km 237 +480 a 237+640 | km 237 + 530 a 237 + 550 |
| Inclinación talud | 1H : 1,5V | 1H : 1,25V | 1H : 3V |
| Altura de talud | 12,00 | 14,00 | 14,00 |
| Ancho de banqueteta | | 6.00 | 3,00 |
| Fortificación | DHP's debajo de la línea de infiltración | | Shotcrete 10 cm, malla metálica Q 139, pernos 30 mm; L= 9 m talud Separación 2,0 x 2,0m |

Fuente: Departamento de geomecánica, CCT4, 2010.

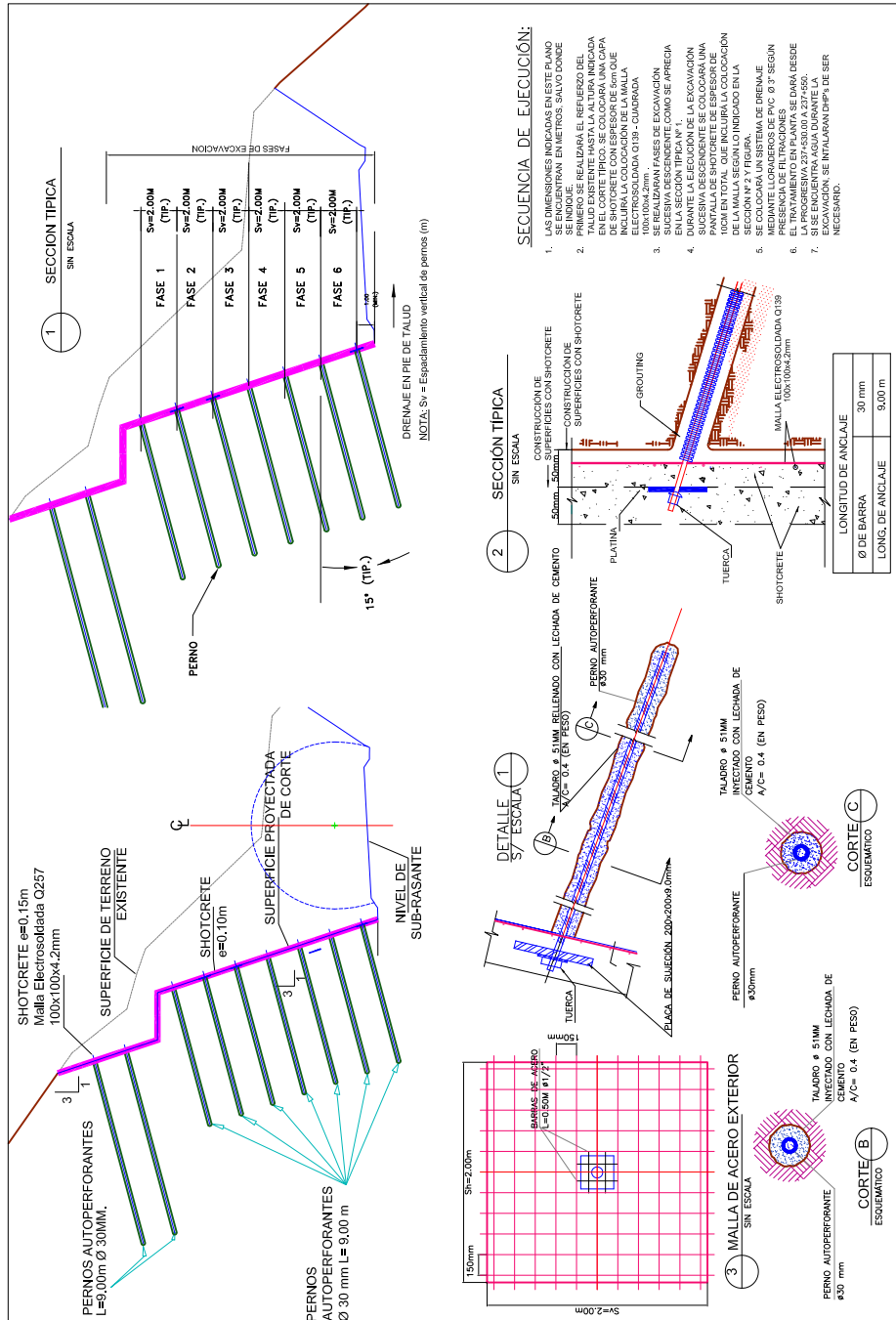


Figura 42. Portal entrada - sostenimiento inicial.
Fuente: Departamento de túneles, CCT4, 2012.

4.6.5 Secuencia constructiva

Se establece la siguiente secuencia constructiva para la construcción del portal de entrada:

- Excavación cuidadosa de los taludes superiores de descarga, comprendidos entre km 237 + 480 al km 237 + 640.
- Desquinche de todos los bloques de roca que hayan quedado sueltos o flojos después de la excavación.
- Construcción del sistema completo de drenaje superficial en taludes y banquetas.
- Excavación del portal de entrada entre las progresivas km 237 + 530 al km 237 + 550, iniciando el corte desde la cota superior y en etapas parciales con alturas acordes a la incorporación de las medidas de fortificación.
- Incorporación de los sostenimientos de talud previstos en los planos de diseño.

4.7 Diseño de portal salida

4.7.1 Configuración del portal

Para la excavación del portal de salida, se ha mantenido el mismo criterio anteriormente descrito, es decir el no afectar innecesariamente a la estabilidad global del macizo, por consiguiente se ha diseñado el portal como indica la Figura 43.

Donde la excavación para el portal se inicia en la progresiva km 238 + 270 y finaliza en la progresiva km 238 + 300, se ha contemplado la incorporación de una banqueteta (de 3 m) a los 14 m de altura desde la subrasante, con la finalidad de alivianar la carga actuante de la masa fluvio glacial en el talud elevado. El agua será evacuada de la misma manera que el portal de entrada.

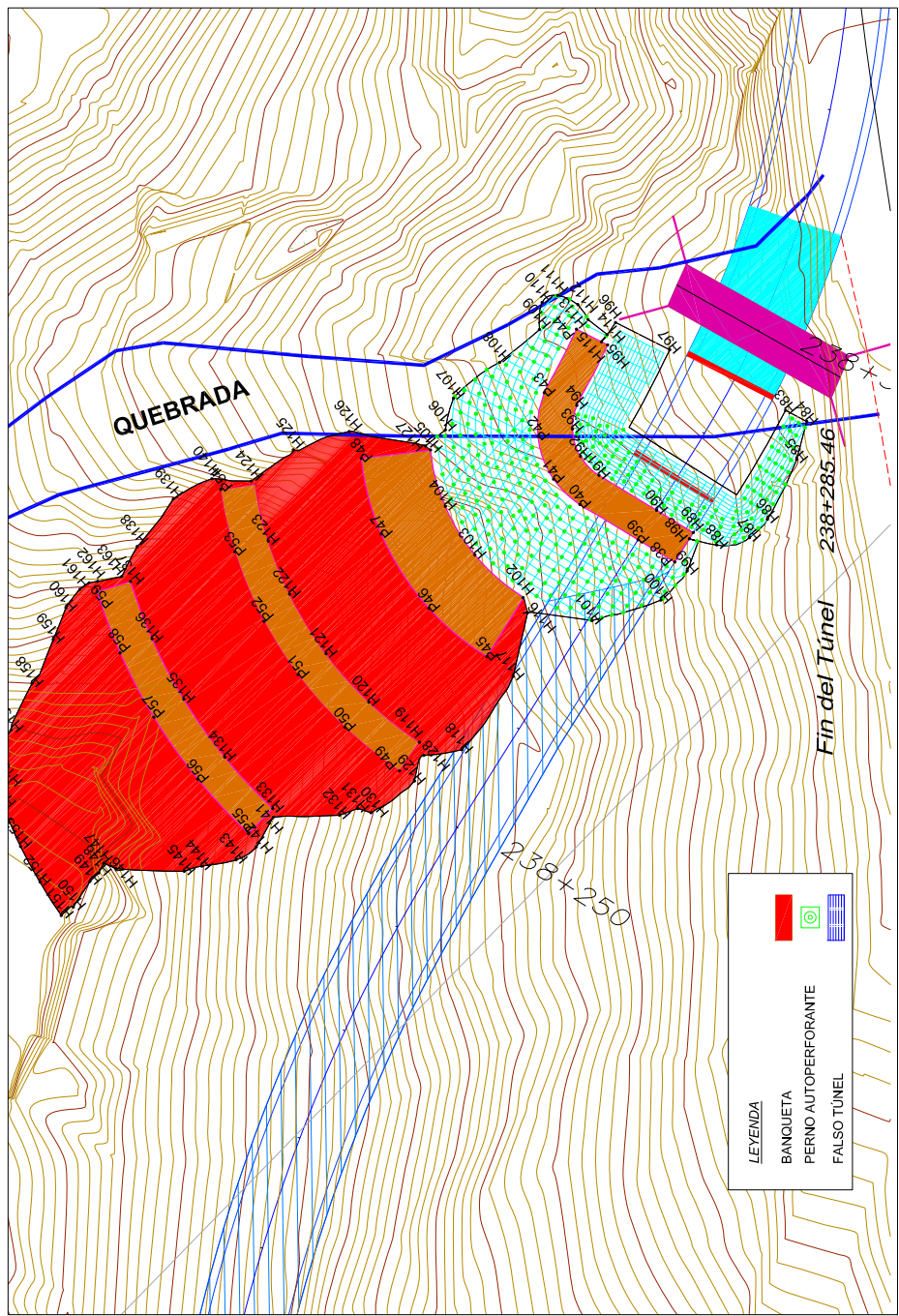


Figura 43. Sostenimiento de talud - portal salida
Fuente: Departamento de túneles, CCT4, 2012.

4.7.2 Configuración del sector superior al portal

Para la excavación del portal, se ha decidido evitar posibles derrumbes o deslizamientos locales, este tramo se encuentra justamente en la parte superior del portal y está comprendido entre las progresivas km 238 + 230 al km 238 + 270 (progresivas de túnel).

Los taludes planteados se excavan aproximadamente desde la cota 2 555 con una primera banqueteta de 6 m de ancho para continuar con banquetetas de 3 m de ancho y alturas de talud de 14 m, con inclinación de 1H : 3V, para el talud inferior y 1H : 1,5V, en el talud superior.

4.7.3 Análisis de estabilidad de taludes

Con fines de asegurar la estabilidad de los taludes se procedió a realizar el análisis de estabilidad global, donde se incluirán las medidas de fortificación, las cargas de tráfico y el valor de coeficiente sísmico horizontal. El análisis de estabilidad que se presenta, está de acuerdo con las mismas consideraciones que en el portal de entrada.

Los factores de seguridad mínimos obtenidos en la evaluación de la estabilidad en los análisis estáticos son 1,557 y para los pseudo - estáticos /sísmicos es 1,308.

4.7.4 Sostenimiento o fortificación

Los resultados que se obtienen de este análisis se puede sintetizar diciendo, que para el sector excavado en la parte superior no es necesaria ninguna medida de fortificación de tipo estructural.

Para la excavación del portal propiamente dicho, es necesario fortificar el talud con pernos tipo Soil Nail y pantalla de hormigón lanzado. Ver Figura 44.

Tabla 24
Configuración del portal y banquetta superior.

| Descripción | Tramo de banquetas | Portal de salida |
|--------------------|--------------------------|--|
| Progresiva | km 238 + 230 a 238 + 270 | km 238 + 270 a 238 + 300 |
| Inclinación talud | 1H : 1.5V | 1H : 3V banquetta inferior 1H : 3V banquetta superior |
| Altura de talud | 14,00 | 14,00 |
| Ancho de banquetta | 3,00 | 3,00 banquetta inferior 6,00 banquetta superior |
| Fortificación | DHP's si fuera necesario | Shotcrete 10 cm, Malla metálica Q139, Pernos 30 mm; L=9 m talud. Separación 2,0 x 2,0 m |

Fuente: Departamento de geomecánica, CCT4, 2010.

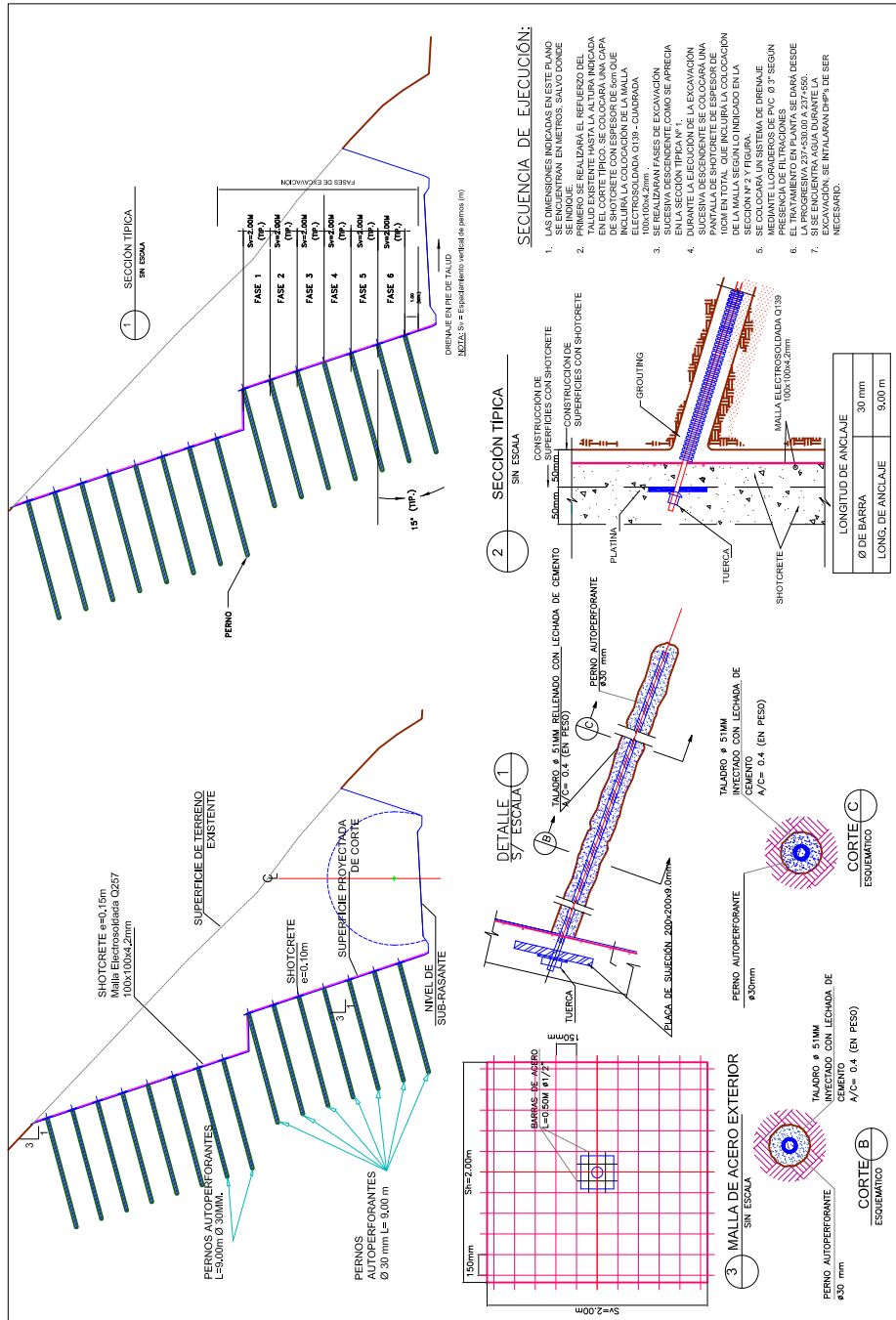


Figura 44. Portal salida - sostenimiento inicial.
Fuente: Departamento de túneles, CCT4, 2012.

4.7.5 Secuencia constructiva

Excavación cuidadosa de taludes superiores de descarga, comprendidos entre el km 238 + 230 al km 238 + 270.

- Desquinche de todos los bloques de roca que hayan quedado sueltos o flojos después de la excavación.
- Construcción del sistema completo de drenaje superficial en los taludes y banquetas.
- Excavación del portal de entrada entre las progresivas km 238 + 270 al km 238 + 300, iniciando el corte desde la cota superior y en etapas parciales con alturas acordes a la incorporación de las medidas de fortificación.
- Sostenimientos de talud previsto en los planos de diseño.

4.8 Discusión

El método NATM toma como base para su aplicación el estudio geológico – geotécnico realizado en el terreno donde se desea implantar el túnel. Dichos estudios proporcionaron información que demuestran la diversidad de material del terreno, donde el diseño geométrico proporciona las características del área donde ocurrían los derrumbes y desprendimientos de roca; el estudio geológico

proporciona toda la información del terreno, y el estudio geomecánico mediante los trabajos de prospección geofísica y sondeos geotécnicos proporcionan la caracterización geotécnica de todo el tramo del túnel.

Para el diseño del túnel, la sección de excavación es la que inicialmente determina la necesidad de tener que hacer un túnel piloto que permitirá conocer el estado característico y el comportamiento del suelo siempre y cuando la sección de excavación sea para un túnel de dos carriles. El diseño del túnel se basa fundamentalmente en el comportamiento de las variables independientes, dando origen a un diseño de túnel en roca y un diseño de túnel en suelo, donde ambos diseños cuentan con características propias. Dentro del diseño en ambos casos, las técnicas en las inyecciones requeridas para los pernos de anclaje o enfilajes tienen similitud debido a que se realizan en la misma sección según el avance que se tiene, la única diferencia es el diámetro ya que el de un perno de anclaje es mucho menor que el de un enfilaje.

Cuando se atraviesa una sección en roca, el diseño de voladura es el que determinará el éxito de esta, debido a que si se tiene una buena malla de perforación, realizando un carguío del explosivo correctamente y utilizando el explosivo adecuado para el tipo de roca, se consigue una voladura exitosa sin generar sobreexcavación, lo

cual evita que se haga o aplique otro tipo de sostenimiento que busque fortificar la sección. Cabe resaltar que si se harán sostenimientos adicionales a la sección en roca, estos dependerán de la calidad y dureza de esta, como también es obligatorio poner sostenimiento cada vez que haya un cambio de roca de mayor dureza a una menor, o a medida que se vaya acercando el cambio de roca a suelo.

Para todo túnel se tiene que tener un diseño tanto para la entrada y salida, los cuales son conocidos como portales. Cada portal es distinto al otro, sea por su ubicación y forma geométrica, como también por su caracterización geológica, entre otras. Los diseños de ambos portales cuentan con una estabilidad en sus taludes evitando que haya derrumbes y desprendimiento de rocas, proporcionando así la seguridad que se busca brindar al transitar tanto por la entrada y salida del túnel.

Con la aplicación del método NATM en el túnel se consigue diversas mejoras, tales como realizar una construcción segura y efectiva que va en beneficio de quienes trabajan directamente en la ejecución, proporciona un tránsito seguro en el interior del túnel, evita derrumbes y caída de roca en sus portales, evita accidentes vehiculares, cierre de vías por derrumbes, beneficia a pobladores

cercanos, la implantación del túnel en ese tramo de la carretera, trae consigo desarrollo y una comunicación continua entre poblados y distritos contiguos.

El método NATM es actualmente el más empleado en la construcción de túneles carreteros, debido a la flexibilidad que se tiene para poder emplearlo en terrenos con diversas características.

Así podemos hacer una comparación entre el túnel Wayrasencca con el túnel de Daza y el túnel de Hojarcada, mencionados anteriormente, cada uno de estos ubicados en distintos países, con una geología característica de su ubicación. En los 3 túneles se aplica el método NATM, todos con longitudes diferentes, en el túnel de Daza el diseño es para excavación y sostenimiento en roca, y en el túnel de Hojarcada es en suelo y roca, y el Wayrasencca es también para ambos materiales.

En el Wayrasencca y Daza se utiliza equipos de perforación para luego continuar con la voladura, mientras que en el Hojarcada se utiliza rozadoras pesadas, que de manera individual van cortando la roca sin luego tener que utilizar una voladura.

Para el sostenimiento en los tres casos se utiliza el arcos o cerchas con las cuales se brinda mayor estabilidad a la roca y suelo, a

su vez brindan seguridad al personal que ejecuta el trabajo; también se utiliza el concreto con aditivos químicos para acelerar el fraguado, se utilizan fibras sintéticas que mejoran las características mecánicas del concreto.

Después de haber visto los resultados y las comparaciones del método NATM con otros túneles, podemos reafirmar que el método es el más adecuado para terrenos con diferentes características, y el más flexible a diferentes diseños en tunelería a nivel mundial

CONCLUSIONES

1. El estudio geológico – geotécnico para la aplicación del método NATM en la excavación y sostenimiento del túnel Wayrasencca en el sector crítico km 237 + 380 al km 238 + 453 del corredor vial interoceánico sur, Perú – Brasil, permite realizar un diseño de construcción que brinda seguridad y estabilidad del macizo rocoso y suelo.
2. Los resultados de los estudios geológicos – geotécnicos para la aplicación del método NATM en la excavación y sostenimiento del túnel Wayrasencca determinaron la presencia de material suelo (fluvio glaciar) y roca (Metalimolitas y Metacuarcitas), a su vez definieron el comportamiento geomecánico que presentan ante los cambios que se les puede aplicar durante la ejecución del método.
3. La aplicación del método NATM en la excavación y sostenimiento del túnel, diferencia el diseño para cada tipo de material (suelo y roca), permitiendo conseguir una construcción segura y efectiva, cumpliendo las expectativas iniciales, a su vez, el diseño permite definir la

cantidad y tipo de materiales que se tiene que utilizar, y las condiciones con las que se tiene que trabajar durante su ejecución.

4. Realizados los estudios geológicos y geotécnicos en el terreno, y la longitud del túnel Wayrasencca, nos indican que el único método indicado para la excavación y sostenimiento es el método NATM, que a comparación de utilizar el método con una TBM el costo y toda la inversión es muy elevada, considerando que la longitud de una TMB es mayor a 100 m, y que para su uso el túnel a excavar tiene que tener radios de curvatura extensos ya que la máquina no acepta curvas de radios pequeños, como las que se tiene en el túnel Wayrasencca.

RECOMENDACIONES

1. La construcción de un túnel se realiza para dar solución a problemas que demuestren la necesidad de este, y para ello se debe contar con estudios que determinen el método tunelero ideal para su construcción.
2. Los únicos datos que pueden determinar la aplicación del método NATM para la excavación y sostenimiento de un túnel son los resultados de los estudios geológicos – geotécnicos del terreno donde se propone la construcción del túnel, los mismos que permiten conocer la litología del terreno, el comportamiento del suelo y macizo rocoso.
3. El diseño del túnel depende del tipo de material del cual está conformado el terreno, y este a su vez, permite conseguir la estabilidad del suelo y macizo rocoso, mediante la aplicación del método NATM.
4. Para un mejor diseño del túnel se recomienda tener mayor cantidad de resultados de muestreos diamantinos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Artículo impreso:

Santoyo, E. et al; (2012). Evolución de la construcción de túneles Urbanos, volumen (01), páginas 6 – 8.

Libros:

Bieniawski, Z.T. (1989). Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineering and Geologists in Mining, Civil and Petroleum Engineering. Ed. A. Wiley; New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore.

Coronel, H. (2010); Estudios Técnicos Geológicos y Geotécnicos, Consorcio Constructor Tramo 4 - Departamento de Geología y Geotecnia, Perú.

De Sá Alves, O. (2012); Estudios Técnicos y Aplicativos, Consorcio Constructor Tramo 4 - Departamento de Túneles, Perú.

Junca, J. A. (1997); “Manual de Túneles y Obras Subterráneas”; Gráficas Arias Montano S.A.; 2893 Móstoles Madrid, España.

López, C. et al; (2005). “Ingeo Túneles”; U.D Proyectos; E.T.S.I Minas; Universidad Politécnica de Madrid; Editorial Graficas Arias Montano S.A., 2893 Móstoles; Madrid, España.

López, C. et al; (2003). “Manual de Perforación y Voladura de Rocas”; Instituto Tecnológico Geominero de España; Editorial Graficas Arias Montano S.A., 2893 Móstoles; Madrid, España.

López, C. (2000). “Manual y Diseño de Perforación y Voladura de Rocas”; Editorial Graficas Arias Montano S.A. España.

Manual de Diseño Geométrico para Carreteras DG - 2001; Especificaciones Técnicas; “Túneles” (1106 – 1137); Ministerio de Transportes y Comunicaciones; Lima, Perú.

Martí, J.V. et al; (2004). “Procedimientos de Construcción, Métodos y equipos de Excavación en Túnel”; Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia; Referencia 2004.835; Valencia, España.

Navarro, S. et al.; (2010). “Geotecnia Aplicada a la Construcción de Túneles”; Universidad Politécnica de Cartagena; España.

Rey, A. et al; (2010). “Túneles y Obras Subterráneas”; Sika S.A.U.; Gráficas Couché S.L. España.

Támez, E. et al; (1997). "Diseño Geotécnico de Túneles"; TGC Geotécnia S.A., 03720 México D.F.

T.M. Megaw; et al; (1988). "Túneles - Planeación, Diseño y Construcción"; Noriega Editores; Editorial Limusa S.A. de C.V.; Balderas 95, Primer piso, 06040 México D.F.

Páginas web:

Bandis, S.C. et al; (1988). Instability and stress transformations around underground excavations in highly stressed anisotropic media. Recuperado de: http://www.nickbarton.com/publications_all.asp

Barton, N. (1973). Review of a new shear strength criterion for rock joints. Engineering Geology. Recuperado de: http://www.nickbarton.com/publications_all.asp

Barton, N. et al; (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mechanics. Recuperado de: http://www.nickbarton.com/publications_all.asp

Barton, N. et al; (1977). Estimation of support requirements for underground excavations. Recuperado de: http://www.nickbarton.com/publications_all.asp

Barton, N. et al; (1980). Application of the Q system in design decisions concerning dimensions and appropriate support for underground installations. Recuperado de: http://www.nickbarton.com/publications_all.asp

Barton, N. (1983). Application of Q system and index tests to estimate shear strength and deformability of rock masses. Recuperado de: http://www.nickbarton.com/publications_all.asp

Conbotassucias. (2013). Túneles de la M-30. Recuperado de: <https://conbotassucias.wordpress.com/tuneladoras/tuneles-de-espana/zona-centro/tuneles-de-la-m-30/>

Deere, D.U. (1989). Rock Quality Designation (RQD) after twenty years. Recuperado de: <https://es.scribd.com/doc38805110/Engineering-Rock-Mass-Classification>

Field, A. (2007). Nuevo Método Austriaco (NATM). Recuperado de: <http://alfonsofield.blogspot.pe/2007/10/nuevo-mtodo-austriaco-natm.html>

Montalar, E. (2010). El Nuevo Método Austríaco de Construcción de Túneles o NATM (1948 - 1964). Recuperado de: <http://enriquemontalar.com/el-nuevo-metodo-austriaco-de/>

Putzmeister. (2016). Nuevo Método Austriaco de Túneles (NATM) & shotcrete: creciendo de la mano. Recuperado de: <http://bestsupportunderground.com/natm-shotcrete/>

Videos en línea:

Cordero, G. (2013, junio, 01). Nuevo Método Austriaco. Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=XOzsjEW0OAg>

Pacual, A. (2015, enero, 06). Mega Construcciones - Túnel bajo los Alpes. Recuperado de: https://www.youtube.com/watch?v=AltX9EV_IFc

Solotrat. (2011, abril, 06). Solotrat - Túneles NATM. Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=NpdUnYs3Tp0>

Tesis:

Puertas, J. (2010). Estimación de coste y plazo en proyectos de túneles ejecutados mediante excavación convencional y voladura. Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona, España. Recuperado de: <http://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/12036>

ANEXOS

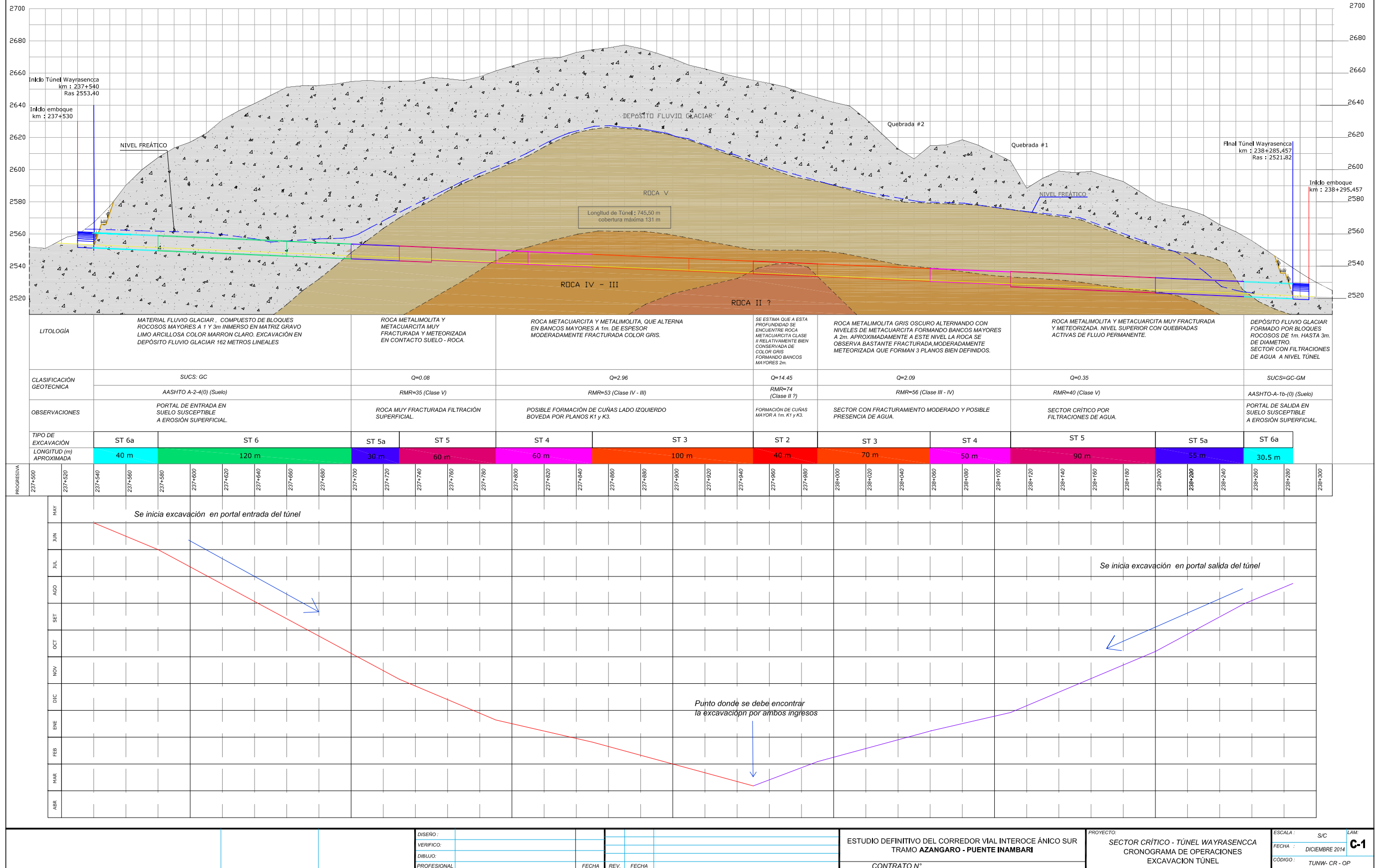
ANEXO A

Principales temas que influyen en una correcta construcción de túneles en forma de matriz simplificada.

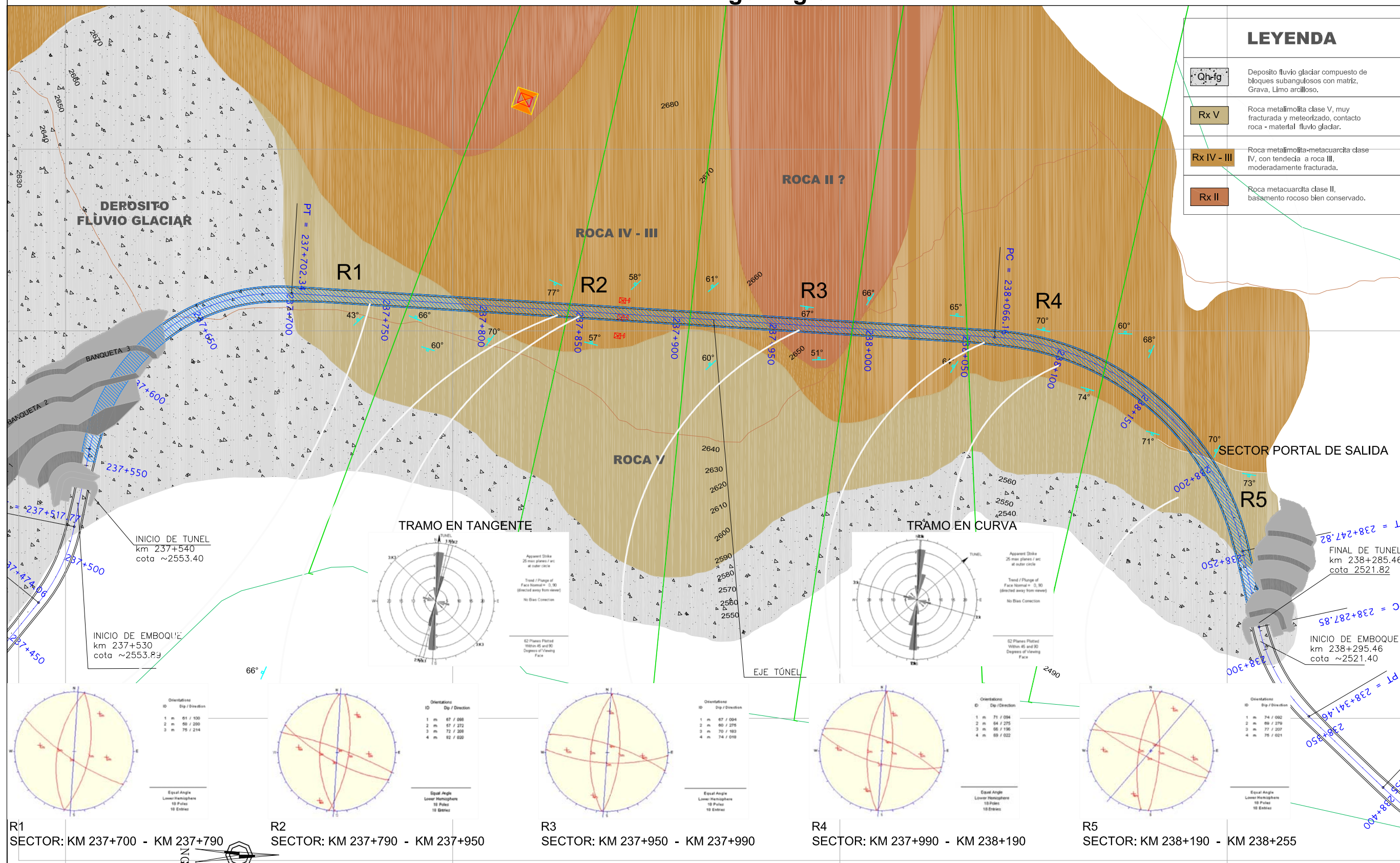
| Conceptos de Diseño y Construcción | Etapas de Trabajo | Elementos Básicos | Efectos Negativos | Acciones | Notas |
|--|---|--|--|--|--|
| Planificación de trabajos | Selección de la geometría del trabajo y las instalaciones | Tipo de trabajo, tamaño y forma, perfil. Uso de TBM. | Métodos o tipos de trabajos inadecuados. | Experiencia y lecciones aprendidas de casos similares. Adaptabilidad de los parámetros del proyecto. | Discusiones y acuerdos con las partes externas. |
| Diseño y caracterización | Selección de los parámetros y métodos de diseño | Recubrimiento, agua, fallas, asientos, accesibilidad. Evaluación de deslizamientos e inestabilidades. | Accidentes, daños, inestabilidad, retrasos y costes adicionales. | Revisión del diseño y conocimiento de los riesgos. | Etapas fundamentales del proceso completo |
| Fases de financiación, adquisición y contractual | Descripción en detalle de costes y presupuestos. | Conocimiento completo de las alternativas; selección del tipo de contrato apropiado. | Dificultades para las relaciones con las partes implicadas; resolución del contrato. | Preparar contratos detallados y establecer restricciones económicas severas | En esta etapa la parte económica, normativa e ingenieril deben estar en perfecta |
| Construcción y vigilancia | Selección del método constructivo (tradicional o mecánico) y mediciones; determinación de vertederos. | Selección del equipamiento, personal, instrumentación, organización del personal y fases. Condiciones particulares para microtúneles y obras subterráneas. Control de voladuras. | Ocupación del terreno, vibraciones, vertidos, asientos, estabilidad de vertederos | Control detallado y diario por ingenieros en obra. | Etapas fundamentales del proceso completo. Discusiones y reclamaciones diarias. |
| Operación y mantenimiento | Previsiones para trabajos futuros | Previsiones para trabajos futuros. Resultado de las instalaciones. | Dificultades para el mantenimiento e inspección. | Previsiones del estado del túnel después de largos períodos de utilización. | |

Fuente: Ingeo túneles, 2005.

ANEXO B Cronograma de operaciones



ANEXO C Modelo geológico



| LEYENDA | |
|---------|---|
| | Deposito fluvio glaciar compuesto de bloques subangulosos con matriz, Grava, Limo arcilloso. |
| | Roca metamolita clase V, muy fracturada y meteorizada, contacto roca - material fluvio glaciar. |
| | Roca metamolita-metacuarcita clase IV, con tendencia a roca III, moderadamente fracturada. |
| | Roca metacuarcita clase II, basamento rocoso bien conservado. |

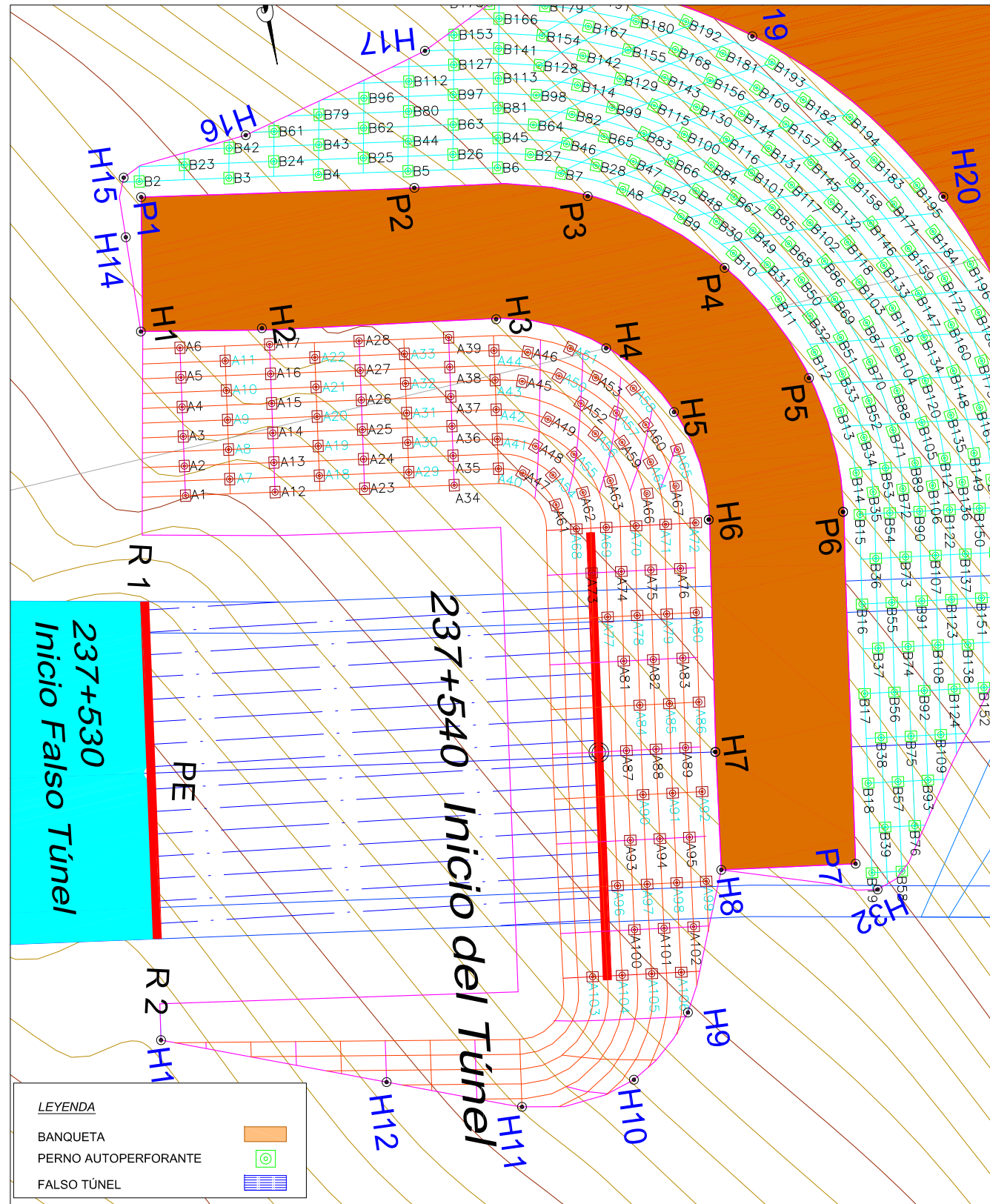
| | | | | | | | | | |
|---|--|------------------------------------|--|------------------------------------|--|------------------------------------|---------------------------|------------------------------------|-------|
| R1 SECTOR: KM 237+700 - KM 237+790 | | R2 SECTOR: KM 237+790 - KM 237+950 | | R3 SECTOR: KM 237+950 - KM 237+990 | | R4 SECTOR: KM 237+990 - KM 238+190 | | R5 SECTOR: KM 238+190 - KM 238+255 | |
| ESTUDIO DEFINITIVO DEL CORREDOR VIAL INTEROCEANICO SUR TRAMO AZANGARO - PUENTE INAMبارI | | | | | PROYECTO: SECTOR CRITICO - TUNEL WAYRAENCCA KM 237+380 AL 238+453.35 A.T. 238+340 A.D. | | ESCALA: INDICADAS | | LAME |
| CONTRATO N° | | | | | PLANTA A NIVEL DE TUNEL | | FECHA: SETIEMBRE 2012 | | PN-02 |
| | | | | | | | CODIGO: T4 - TUNW - PN-01 | | |

Fuente: Departamento de túneles, CCT4, 2012.

ANEXO D

Instalación de pernos - planta portal entrada

Planta reforzamiento del talud portal entrada



Coordenadas reforzamiento con pernos portal entrada

Coordenadas Banqueta 1 (A)

| PUNTO | ESTE | NORTE | PUNTO | ESTE | NORTE |
|-------|------------|-------------|-------|------------|-------------|
| A1 | 340286.908 | 8476801.023 | A56 | 340277.694 | 8476801.800 |
| A2 | 340286.780 | 8476800.375 | A57 | 340277.129 | 8476801.459 |
| A3 | 340286.652 | 8476799.728 | A58 | 340276.633 | 8476801.009 |
| A4 | 340286.522 | 8476799.081 | A59 | 340277.158 | 8476802.125 |
| A5 | 340286.395 | 8476798.433 | A60 | 340276.550 | 8476801.868 |
| A6 | 340286.265 | 8476797.786 | A61 | 340278.913 | 8476803.139 |
| A7 | 340285.863 | 8476800.893 | A62 | 340278.264 | 8476803.014 |
| A8 | 340285.734 | 8476800.246 | A63 | 340277.614 | 8476802.894 |
| A9 | 340285.606 | 8476799.599 | A64 | 340276.644 | 8476802.697 |
| A10 | 340285.477 | 8476798.951 | A65 | 340275.996 | 8476799.570 |
| A11 | 340285.348 | 8476798.303 | A66 | 340276.880 | 8476803.365 |
| A12 | 340284.946 | 8476801.411 | A67 | 340276.214 | 8476803.353 |
| A13 | 340284.818 | 8476800.763 | A68 | 340278.596 | 8476803.768 |
| A14 | 340284.689 | 8476800.116 | A69 | 340277.941 | 8476803.889 |
| A15 | 340284.560 | 8476799.469 | A70 | 340277.285 | 8476804.010 |
| A16 | 340284.431 | 8476798.821 | A71 | 340276.635 | 8476804.130 |
| A17 | 340284.300 | 8476798.175 | A72 | 340275.973 | 8476804.253 |
| A18 | 340283.901 | 8476801.281 | A73 | 340278.491 | 8476804.803 |
| A19 | 340283.772 | 8476800.634 | A74 | 340277.842 | 8476804.924 |
| A20 | 340283.644 | 8476799.987 | A75 | 340277.193 | 8476805.044 |
| A21 | 340283.515 | 8476799.339 | A76 | 340276.543 | 8476805.164 |
| A22 | 340283.386 | 8476798.692 | A77 | 340278.374 | 8476805.842 |
| A23 | 340282.984 | 8476801.799 | A78 | 340277.725 | 8476805.962 |
| A24 | 340282.856 | 8476801.152 | A79 | 340277.076 | 8476806.082 |
| A25 | 340282.727 | 8476800.505 | A80 | 340276.427 | 8476806.202 |
| A26 | 340282.598 | 8476799.857 | A81 | 340278.253 | 8476806.881 |
| A27 | 340282.469 | 8476799.210 | A82 | 340277.603 | 8476807.001 |
| A28 | 340282.341 | 8476798.563 | A83 | 340276.954 | 8476807.121 |
| A29 | 340281.939 | 8476801.670 | A84 | 340278.131 | 8476807.920 |
| A30 | 340281.810 | 8476801.023 | A85 | 340277.482 | 8476808.040 |
| A31 | 340281.682 | 8476800.375 | A86 | 340276.833 | 8476808.160 |
| A32 | 340281.553 | 8476799.728 | A87 | 340278.657 | 8476808.840 |
| A33 | 340281.424 | 8476799.081 | A88 | 340278.008 | 8476808.960 |
| A34 | 340281.023 | 8476802.188 | A89 | 340277.359 | 8476809.080 |
| A35 | 340280.894 | 8476801.541 | A90 | 340278.524 | 8476809.881 |
| A36 | 340280.765 | 8476800.893 | A91 | 340277.875 | 8476810.001 |
| A37 | 340280.636 | 8476800.246 | A92 | 340277.226 | 8476810.121 |
| A38 | 340280.508 | 8476799.599 | A93 | 340279.036 | 8476810.803 |
| A39 | 340280.379 | 8476798.951 | A94 | 340278.387 | 8476810.924 |
| A40 | 340279.977 | 8476802.059 | A95 | 340277.738 | 8476811.044 |
| A41 | 340279.849 | 8476801.411 | A96 | 340279.548 | 8476811.726 |
| A42 | 340279.720 | 8476800.764 | A97 | 340278.899 | 8476811.846 |
| A43 | 340279.591 | 8476800.117 | A98 | 340278.250 | 8476811.966 |
| A44 | 340279.462 | 8476799.469 | A99 | 340277.601 | 8476812.086 |
| A45 | 340279.009 | 8476800.285 | A100 | 340279.409 | 8476812.768 |
| A46 | 340278.741 | 8476799.682 | A101 | 340278.760 | 8476812.888 |
| A47 | 340279.469 | 8476802.276 | A102 | 340278.111 | 8476813.008 |
| A48 | 340279.053 | 8476801.761 | A103 | 340280.560 | 8476813.572 |
| A49 | 340278.646 | 8476801.242 | A104 | 340279.911 | 8476813.692 |
| A50 | 340278.182 | 8476800.357 | A105 | 340279.262 | 8476813.812 |
| A51 | 340277.795 | 8476799.820 | A106 | 340278.613 | 8476813.932 |
| A52 | 340277.848 | 8476801.068 | | | |
| A53 | 340277.398 | 8476800.586 | | | |
| A54 | 340278.828 | 8476802.477 | | | |
| A55 | 340278.263 | 8476802.136 | | | |

Coordenadas Banqueta 2 (B)

| PUNTO | ESTE | NORTE | PUNTO | ESTE | NORTE | PUNTO | ESTE | NORTE | PUNTO | ESTE | NORTE |
|-------|------------|-------------|-------|------------|-------------|-------|------------|-------------|-------|------|-------|
| B2 | 340286.286 | 8476793.966 | B68 | 340272.516 | 8476798.676 | B135 | 340269.883 | 8476803.233 | | | |
| B3 | 340284.325 | 8476794.355 | B69 | 340271.806 | 8476800.117 | B136 | 340269.980 | 8476804.751 | | | |
| B4 | 340282.363 | 8476794.744 | B70 | 340271.367 | 8476801.662 | B137 | 340270.283 | 8476806.322 | | | |
| B5 | 340280.401 | 8476795.132 | B71 | 340271.216 | 8476803.258 | B138 | 340270.700 | 8476808.307 | | | |
| B6 | 340278.439 | 8476795.522 | B72 | 340271.303 | 8476804.583 | B141 | 340277.799 | 8476792.938 | | | |
| B7 | 340277.090 | 8476795.969 | B73 | 340271.594 | 8476806.079 | B142 | 340276.007 | 8476793.531 | | | |
| B8 | 340275.834 | 8476796.642 | B74 | 340272.006 | 8476808.036 | B143 | 340274.344 | 8476794.429 | | | |
| B9 | 340274.713 | 8476797.528 | B75 | 340272.406 | 8476809.996 | B144 | 340272.862 | 8476795.607 | | | |
| B10 | 340273.762 | 8476798.598 | B76 | 340272.785 | 8476811.960 | B145 | 340271.611 | 8476797.025 | | | |
| B11 | 340273.026 | 8476799.822 | B79 | 340282.041 | 8476793.448 | B146 | 340270.628 | 8476798.653 | | | |
| B12 | 340272.517 | 8476801.163 | B80 | 340280.080 | 8476793.837 | B147 | 340269.954 | 8476800.426 | | | |
| B13 | 340272.248 | 8476802.568 | B81 | 340278.119 | 8476794.230 | B148 | 340269.595 | 8476802.287 | | | |
| B14 | 340272.236 | 8476803.997 | B82 | 340276.549 | 8476794.750 | B149 | 340269.575 | 8476804.181 | | | |
| B15 | 340272.368 | 8476804.820 | B83 | 340275.089 | 8476795.535 | B150 | 340270.628 | 8476798.653 | | | |
| B16 | 340272.786 | 8476806.875 | B84 | 340273.787 | 8476796.568 | B151 | 340270.163 | 8476807.360 | | | |
| B17 | 340273.193 | 8476808.834 | B85 | 340272.686 | 8476797.810 | B152 | 340270.570 | 8476809.319 | | | |
| B18 | 340273.579 | 8476810.796 | B86 | 340271.825 | 8476799.238 | B153 | 340278.697 | 8476792.412 | | | |
| B19 | 340273.928 | 8476812.759 | B87 | 340271.235 | 8476800.795 | B154 | 340276.791 | 8476792.883 | | | |
| B23 | 340285.225 | 8476793.837 | B88 | 340270.922 | 8476802.428 | B155 | 340274.998 | 8476793.644 | | | |
| B24 | 340283.263 | 8476794.226 | B89 | 340270.904 | 8476804.089 | B156 | 340273.375 | 8476794.723 | | | |
| B25 | 340281.301 | 8476794.614 | B90 | 340271.054 | 8476805.163 | B157 | 340271.955 | 8476796.064 | | | |
| B26 | 340279.340 | 8476795.003 | B91 | 340271.474 | 8476807.116 | B158 | 340270.802 | 8476797.643 | | | |
| B27 | 340277.656 | 8476795.408 | B92 | 340271.881 | 8476809.076 | B159 | 340269.940 | 8476799.397 | | | |
| B28 | 340276.288 | 8476795.978 | B93 | 340272.268 | 8476811.038 | B160 | 340269.405 | 8476801.277 | | | |
| B29 | 340275.050 | 8476796.796 | B96 | 340280.980 | 8476793.319 | B161 | 340269.216 | 8476803.220 | | | |
| B30 | 340273.965 | 8476797.817 | B97 | 340279.025 | 8476793.706 | B162 | 340269.319 | 8476804.834 | | | |
| B31 | 340273.087 | 8476799.020 | B98 | 340277.224 | 8476794.145 | B163 | 340269.627 | 8476806.443 | | | |
| B32 | 340272.428 | 8476800.357 | B99 | 340275.644 | 8476794.807 | B164 | 340270.039 | 8476808.400 | | | |
| B33 | 340272.022 | 8476801.782 | B100 | 340274.212 | 8476795.761 | B166 | 340277.638 | 8476792.292 | | | |
| B34 | 340271.883 | 8476803.271 | B101 | 340272.954 | 8476796.946 | B167 | 340272.399 | 8476792.922 | | | |
| B35 | 340271.965 | 8476804.500 | B102 | 340271.945 | 8476798.331 | B168 | 340273.971 | 8476793.876 | | | |
| B36 | 340272.250 | 8476805.958 | B103 | 340271.183 | 8476799.876 | B169 | 340272.399 | 8476795.127 | | | |
| B37 | 340272.662 | 8476807.915 | B104 | 340270.713 | 8476801.533 | B170 | 340271.071 | 8476796.635 | | | |
| B38 | 340273.062 | 8476809.875 | B105 | 340270.549 | 8476803.246 | B171 | 340270.029 | 8476798.361 | | | |
| B39 | 340273.441 | 8476811.838 | B106 | 340270.642 | 8476804.667 | B172 | 340269.313 | 8476800.242 | | | |
| B42 | 340284.164 | 8476793.707 | B107 | 340270.939 | 8476806.200 | B173 | 340268.932 | 8476802.217 | | | |
| B43 | 340282.202 | 8476794.096 | B108 | 340271.350 | 8476808.158 | B174 | 340268.910 | 8476804.227 | | | |
| B44 | 340280.240 | 8476794.485 | B109 | 340271.751 | 8476810.117 | B175 | 340269.089 | 8476805.530 | | | |
| B45 | 340278.279 | 8476794.876 | B112 | 340279.919 | 8476793.189 | B176 | 340269.508 | 8476807.482 | | | |
| B46 | 340276.819 | 8476795.360 | B113 | 340277.958 | 8476793.584 | B179 | 340276.575 | 8476792.252 | | | |
| B47 | 340275.461 | 8476796.089 | B114 | 340276.278 | 8476794.141 | B180 | 340274.677 | 8476793.061 | | | |
| B48 | 340274.250 | 8476797.048 | B115 | 340274.716 | 8476794.982 | B181 | 340272.956 | 8476794.204 | | | |
| B49 | 340273.223 | 8476798.205 | B116 | 340273.325 | 8476796.088 | B182 | 340271.454 | 8476795.627 | | | |
| B50 | 340272.424 | 8476799.529 | B117 | 340272.151 | 8476797.914 | B183 | 340270.231 | 8476797.298 | | | |
| B51 | 340271.876 | 8476800.979 | B118 | 340271.226 | 8476798.946 | B184 | 340269.319 | 8476799.158 | | | |
| B52 | 340271.585 | 8476802.498 | B119 | 340270.595 | 8476800.610 | B185 | 340268.752 | 8476801.149 | | | |
| B53 | 340271.570 | 8476804.043 | B120 | 340270.259 | 8476802.357 | B186 | 340268.550 | 8476803.208 | | | |
| B54 | 340271.710 | 8476805.041 | B121 | 340270.240 | 8476804.135 | B187 | 340268.657 | 8476804.918 | | | |
| B55 | 340272.130 | 8476806.997 | B122 | 340270.398 | 8476805.284 | B188 | 340268.971 | 8476806.564 | | | |
| B56 | 340272.537 | 8476808.955 | B123 | 340270.819 | 8476807.239 | B190 | 340277.478 | 8476791.646 | | | |
| B57 | 340272.924 | 8476810.917 | B124 | 340271.226 | 8476809.197 | B191 | 340275.466 | 8476792.312 | | | |
| B58 | 340273.303 | 8476812.881 | B127 | 340278.858 | 8476793.060 | B192 | 340273.599 | 8476793.322 | | | |
| B61 | 340283.103 | 8476793.514 | B128 | 340277.007 | 8476793.514 | B193 | 340271.937 | 8476794.648 | | | |
| B62 | 340281.141 | 8476793.966 | B129 | 340275.321 | 8476794.226 | B194 | 340270.531 | 8476796.246 | | | |
| B63 | 340279.179 | 8476794.355 | B130 | 340273.806 | 8476795.232 | B195 | 340269.431 | 8476798.069 | | | |
| B64 | 340277.440 | 8476794.776 | B131 | 340272.457 | 8476796.502 | B196 | 340268.672 | 8476800.057 | | | |
| B65 | 340275.965 | 8476795.393 | B132 | 340271.374 | 8476797.987 | B197 | 340268.270 | 8476802.147 | | | |
| B66 | 340274.631 | 8476796.279 | B133 | 340270.562 | 8476799.637 | B198 | 340268.245 | 8476804.273 | | | |
| B67 | 340273.461 | 8476797.377 | B134 | 340270.059 | 8476801.405 | B199 | 340268.433 | 8476805.647 | | | |

LEYENDA

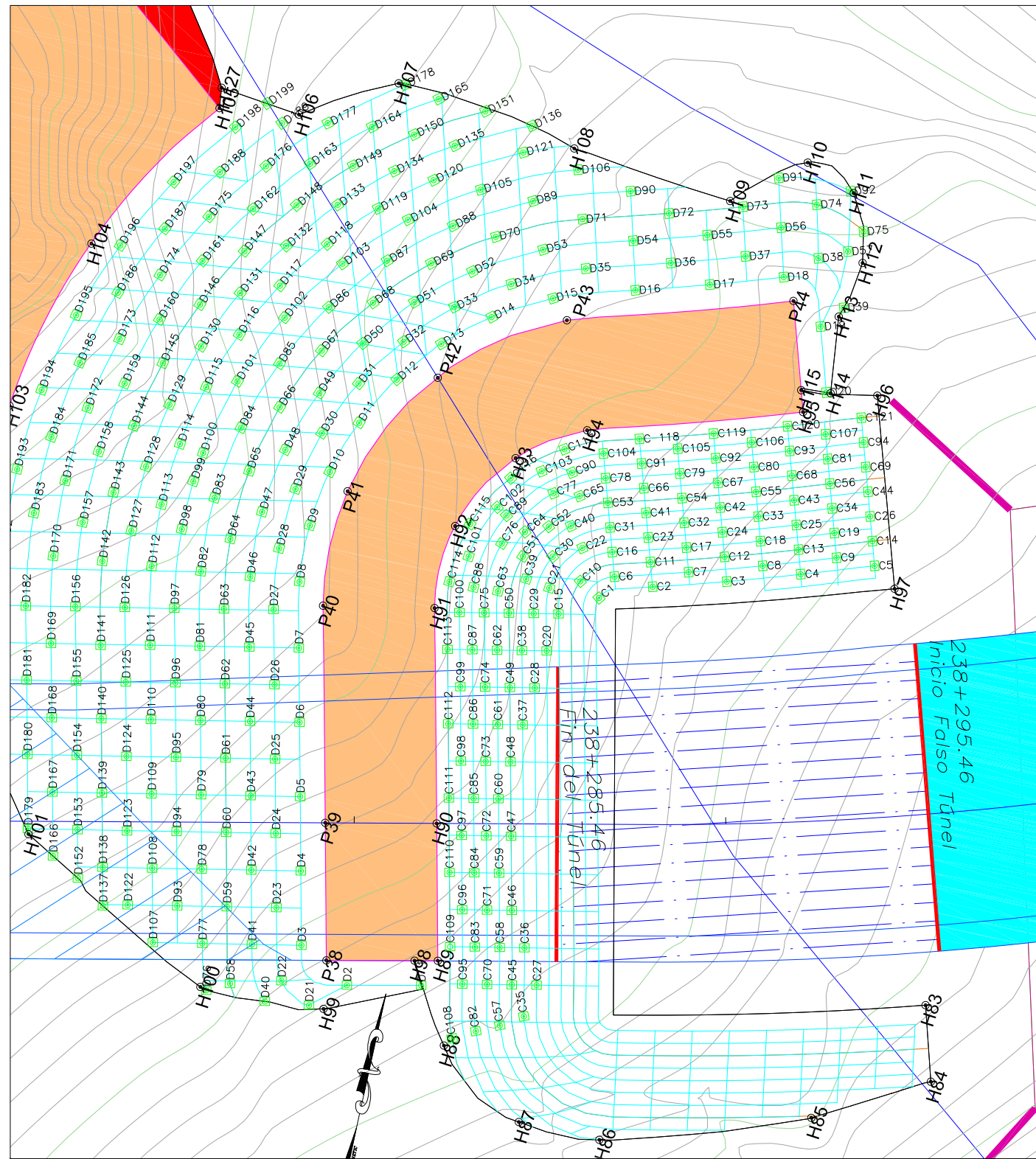
- BANQUETA
- PERNO AUTOPERFORANTE
- FALSO TÚNEL

| | | | |
|-----------|--|--------|--|
| DISEÑO: | | FECHA: | |
| VERIFICO: | | REV.: | |

ANEXO E

Instalación de pernos - planta portal salida

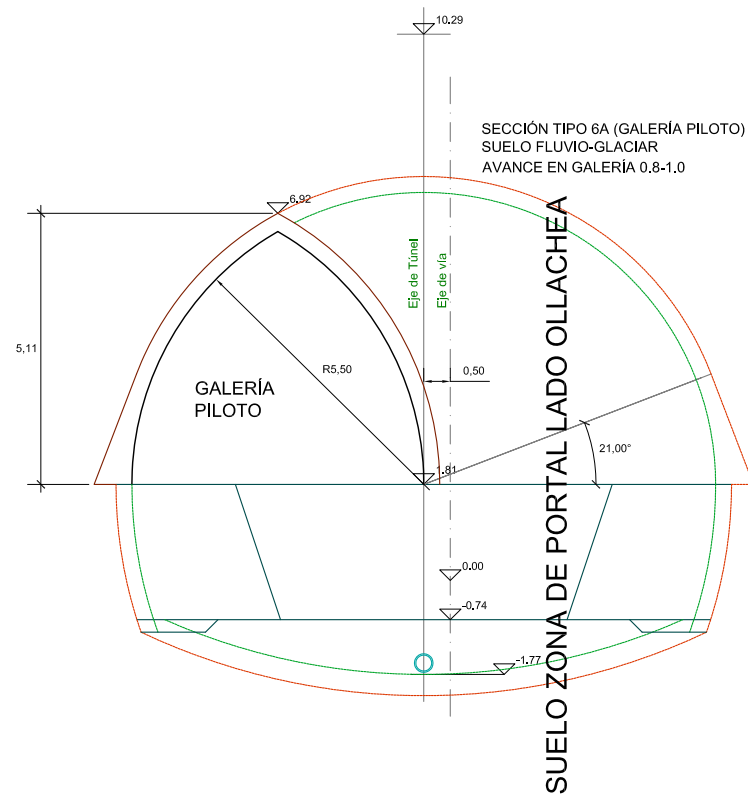
Planta reforzamiento del talud del portal salida



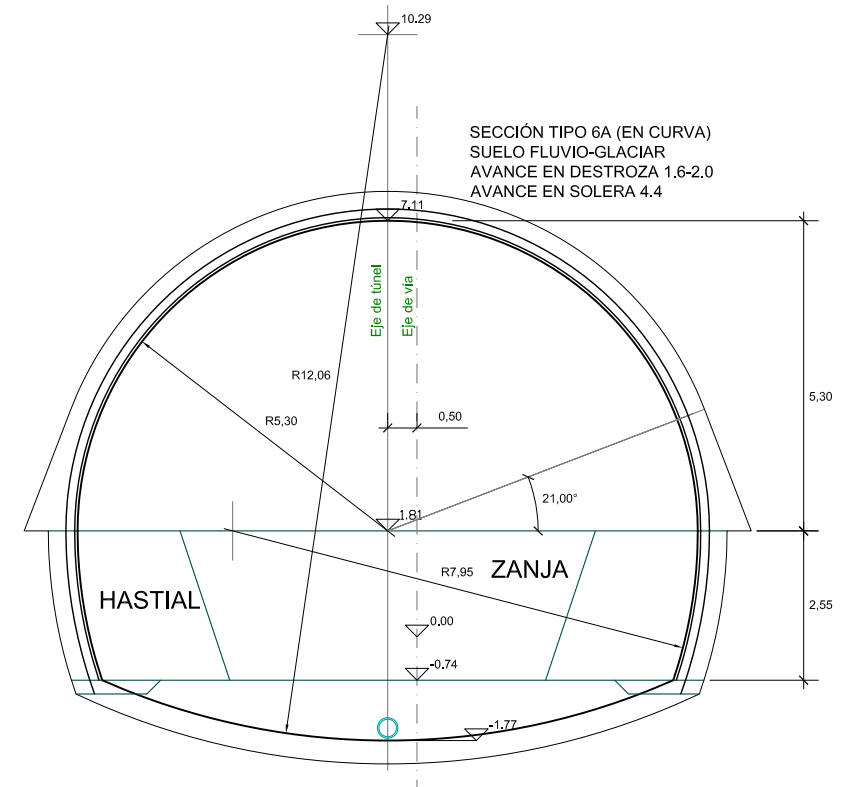
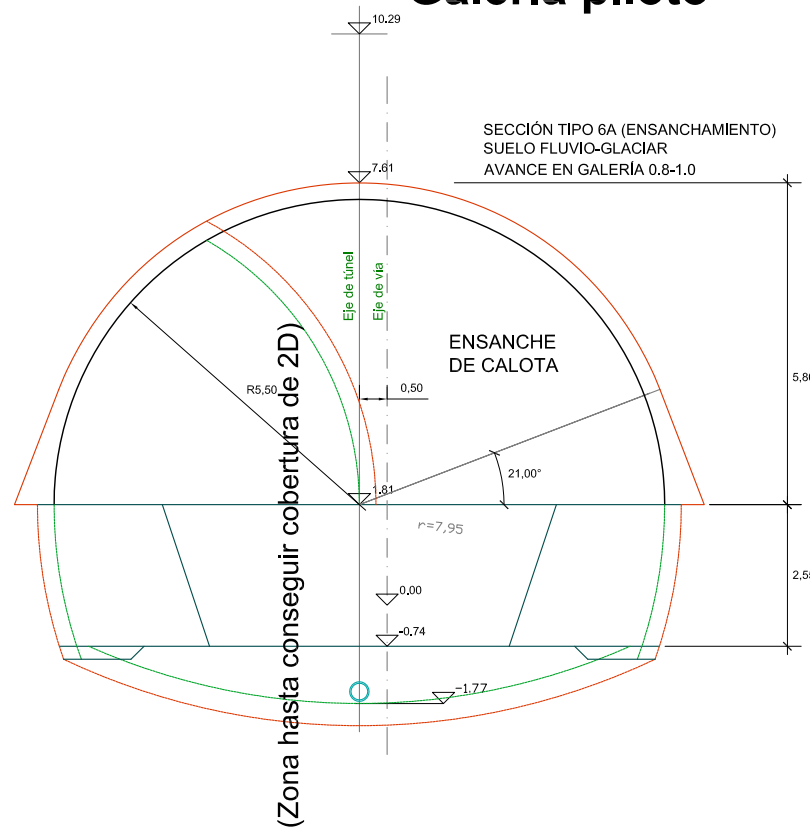
Coordenadas reforzamiento con pernos portal salida

| PUNTO | ESTE | NORTE | PUNTO | ESTE | NORTE | PUNTO | ESTE | NORTE | PUNTO | ESTE | NORTE | PUNTO | ESTE | NORTE |
|-------|------------|-------------|-------|------------|-------------|-------|------------|-------------|-------|------------|-------------|-------|------------|-------------|
| C1 | 340350.295 | 8477422.132 | C62 | 340347.921 | 8477420.177 | D1 | 340347.863 | 8477410.926 | D71 | 340347.675 | 8477431.997 | D41 | 340337.473 | 8477418.011 |
| C2 | 340351.644 | 8477422.735 | C63 | 340347.604 | 8477421.729 | D2 | 340345.909 | 8477410.503 | D72 | 340349.914 | 8477432.647 | D42 | 340337.035 | 8477420.234 |
| C3 | 340353.561 | 8477423.306 | C64 | 340347.972 | 8477423.446 | D3 | 340344.484 | 8477411.291 | D73 | 340351.822 | 8477433.249 | D43 | 340336.928 | 8477422.102 |
| C4 | 340355.463 | 8477423.923 | C65 | 340349.199 | 8477424.700 | D4 | 340344.038 | 8477413.241 | D74 | 340353.751 | 8477433.729 | D44 | 340337.082 | 8477423.971 |
| C5 | 340357.355 | 8477424.574 | C66 | 340350.841 | 8477425.282 | D5 | 340343.593 | 8477415.191 | D75 | 340355.133 | 8477433.296 | D45 | 340337.478 | 8477425.786 |
| C6 | 340350.581 | 8477422.784 | C67 | 340352.759 | 8477425.849 | D6 | 340343.147 | 8477417.140 | D76 | 340342.241 | 8477409.558 | D46 | 340338.116 | 8477427.541 |
| C7 | 340352.504 | 8477423.333 | C68 | 340354.661 | 8477426.466 | D7 | 340342.699 | 8477419.089 | D77 | 340341.868 | 8477410.767 | D47 | 340338.977 | 8477429.201 |
| C8 | 340354.414 | 8477423.927 | C69 | 340356.552 | 8477427.117 | D8 | 340342.334 | 8477420.834 | D78 | 340341.423 | 8477412.716 | D48 | 340340.080 | 8477430.710 |
| C9 | 340356.308 | 8477424.567 | C70 | 340349.588 | 8477411.334 | D9 | 340342.278 | 8477422.371 | D79 | 340340.977 | 8477414.666 | D49 | 340341.333 | 8477432.073 |
| C10 | 340349.712 | 8477422.466 | C71 | 340349.159 | 8477413.288 | D10 | 340342.993 | 8477423.895 | D80 | 340340.531 | 8477416.616 | D50 | 340342.764 | 8477433.247 |
| C11 | 340351.444 | 8477423.371 | C72 | 340348.711 | 8477415.237 | D11 | 340342.482 | 8477425.355 | D81 | 340340.083 | 8477418.565 | D51 | 340344.499 | 8477434.268 |
| C12 | 340353.360 | 8477423.942 | C73 | 340348.265 | 8477417.187 | D12 | 340343.720 | 8477426.707 | D82 | 340339.681 | 8477420.534 | D52 | 340338.221 | 8477411.764 |
| C13 | 340355.263 | 8477424.559 | C74 | 340347.820 | 8477419.136 | D13 | 340344.683 | 8477427.905 | D83 | 340339.616 | 8477422.546 | D53 | 340337.931 | 8477413.035 |
| C14 | 340357.154 | 8477425.209 | C75 | 340347.366 | 8477421.084 | D14 | 340345.853 | 8477428.897 | D84 | 340339.905 | 8477424.540 | D54 | 340337.485 | 8477414.985 |
| C15 | 340349.326 | 8477421.484 | C76 | 340347.428 | 8477423.005 | D15 | 340347.358 | 8477429.745 | D85 | 340340.548 | 8477426.449 | D55 | 340337.039 | 8477416.935 |
| C16 | 340350.381 | 8477423.419 | C77 | 340348.492 | 8477424.623 | D16 | 340349.476 | 8477430.434 | D86 | 340341.515 | 8477428.215 | D56 | 340336.586 | 8477418.883 |
| C17 | 340352.304 | 8477423.968 | C78 | 340349.780 | 8477425.323 | D17 | 340351.400 | 8477431.011 | D87 | 340342.781 | 8477429.775 | D57 | 340336.288 | 8477421.141 |
| C18 | 340354.213 | 8477424.563 | C79 | 340351.702 | 8477425.875 | D18 | 340353.300 | 8477431.636 | D88 | 340344.309 | 8477431.072 | D58 | 340336.306 | 8477423.093 |
| C19 | 340356.108 | 8477425.203 | C80 | 340353.612 | 8477426.469 | D19 | 340354.554 | 8477430.548 | D89 | 340346.272 | 8477432.186 | D59 | 340336.592 | 8477425.030 |
| C20 | 340349.228 | 8477420.444 | C81 | 340355.506 | 8477427.111 | D20 | 340355.085 | 8477428.849 | D90 | 340348.778 | 8477433.008 | D60 | 340337.139 | 8477426.916 |
| C21 | 340348.933 | 8477422.111 | C82 | 340349.562 | 8477410.042 | D21 | 340345.027 | 8477409.754 | D91 | 340352.592 | 8477434.212 | D61 | 340337.931 | 8477428.705 |
| C22 | 340349.571 | 8477423.355 | C83 | 340349.053 | 8477412.246 | D22 | 340344.161 | 8477410.242 | D92 | 340354.561 | 8477434.280 | D62 | 340338.960 | 8477430.360 |
| C23 | 340351.243 | 8477424.007 | C84 | 340348.607 | 8477414.195 | D23 | 340343.607 | 8477412.135 | D93 | 340340.992 | 8477411.610 | D63 | 340340.193 | 8477431.872 |
| C24 | 340353.160 | 8477424.577 | C85 | 340348.161 | 8477416.145 | D24 | 340343.162 | 8477414.085 | D94 | 340340.546 | 8477413.560 | D64 | 340341.612 | 8477433.205 |
| C25 | 340355.062 | 8477425.195 | C86 | 340347.716 | 8477418.095 | D25 | 340342.716 | 8477416.034 | D95 | 340340.100 | 8477415.510 | D65 | 340343.199 | 8477434.322 |
| C26 | 340356.953 | 8477425.845 | C87 | 340347.268 | 8477420.044 | D26 | 340342.270 | 8477417.984 | D96 | 340339.655 | 8477417.459 | D66 | 340337.437 | 8477412.203 |
| C27 | 340350.894 | 8477411.601 | C88 | 340346.940 | 8477421.689 | D27 | 340341.811 | 8477419.955 | D97 | 340339.198 | 8477419.417 | D67 | 340337.054 | 8477413.879 |
| C28 | 340349.126 | 8477419.403 | C89 | 340347.390 | 8477423.770 | D28 | 340341.604 | 8477421.592 | D98 | 340338.936 | 8477421.531 | D68 | 340336.608 | 8477415.829 |
| C29 | 340348.673 | 8477421.351 | C90 | 340348.864 | 8477425.273 | D29 | 340341.692 | 8477423.248 | D99 | 340338.962 | 8477422.858 | D69 | 340336.159 | 8477417.778 |
| C30 | 340348.841 | 8477422.955 | C91 | 340350.641 | 8477425.915 | D30 | 340342.062 | 8477424.865 | D100 | 340339.058 | 8477423.661 | D70 | 340335.712 | 8477420.084 |
| C31 | 340350.180 | 8477424.054 | C92 | 340352.559 | 8477426.484 | D31 | 340342.711 | 8477426.381 | D101 | 340339.545 | 8477425.740 | D71 | 340335.595 | 8477422.133 |
| C32 | 340352.103 | 8477424.604 | C93 | 340354.461 | 8477427.102 | D32 | 340343.683 | 8477427.742 | D102 | 340340.416 | 8477427.687 | D72 | 340335.764 | 8477424.178 |
| C33 | 340354.013 | 8477425.198 | C94 | 340356.352 | 8477427.753 | D33 | 340344.813 | 8477428.944 | D103 | 340341.624 | 8477429.438 | D73 | 340336.201 | 8477426.170 |
| C34 | 340355.907 | 8477425.839 | C95 | 340348.935 | 8477411.201 | D34 | 340346.177 | 8477429.879 | D104 | 340343.092 | 8477430.971 | D74 | 340336.898 | 8477428.088 |
| C35 | 340350.738 | 8477410.706 | C96 | 340348.503 | 8477413.154 | D35 | 340348.048 | 8477430.716 | D105 | 340344.827 | 8477432.182 | D75 | 340337.845 | 8477429.903 |
| C36 | 340350.359 | 8477412.512 | C97 | 340348.058 | 8477415.103 | D36 | 340352.249 | 8477431.356 | D106 | 340347.274 | 8477433.269 | D76 | 340339.050 | 8477431.558 |
| C37 | 340349.022 | 8477418.362 | C98 | 340347.612 | 8477417.053 | D37 | 340355.175 | 8477431.961 | D107 | 340340.561 | 8477410.504 | D77 | 340340.425 | 8477433.049 |
| C38 | 340348.575 | 8477420.311 | C99 | 340347.166 | 8477419.003 | D38 | 340354.100 | 8477432.333 | D108 | 340340.115 | 8477412.454 | D78 | 340342.235 | 8477434.507 |
| C39 | 340348.275 | 8477422.214 | C100 | 340346.713 | 8477420.950 | D39 | 340355.056 | 8477431.177 | D109 | 340339.669 | 8477414.404 | D79 | 340336.623 | 8477412.773 |
| C40 | 340349.142 | 8477423.863 | C101 | 340346.631 | 8477422.472 | D40 | 340343.845 | 8477409.605 | D110 | 340339.224 | 8477416.353 | D80 | 340336.177 | 8477414.723 |
| C41 | 340351.043 | 8477424.642 | C102 | 340347.100 | 8477423.933 | D41 | 340343.176 | 8477411.029 | D111 | 340338.775 | 8477418.302 | D81 | 340335.731 | 8477416.617 |
| C42 | 340352.960 | 8477425.213 | C103 | 340348.057 | 8477425.134 | D42 | 340342.731 | 8477412.979 | D112 | 340338.358 | 8477420.384 | D82 | 340335.281 | 8477418.617 |
| C43 | 340354.862 | 8477425.831 | C104 | 340349.580 | 8477425.958 | D43 | 340342.285 | 8477414.928 | D113 | 340338.260 | 8477422.066 | D83 | 340334.955 | 8477421.103 |
| C44 | 340356.753 | 8477426.481 | C105 | 340351.507 | 8477426.512 | D44 | 340341.839 | 8477416.878 | D114 | 340338.399 | 8477423.764 | D84 | 340334.977 | 8477423.205 |
| C45 | 340350.241 | 8477411.468 | C106 | 340353.411 | 8477427.105 | D45 | 340341.391 | 8477418.827 | D115 | 340338.758 | 8477425.410 | D85 | 340335.292 | 8477425.324 |
| C46 | 340349.812 | 8477413.421 | C107 | 340355.305 | 8477427.747 | D46 | 340341.008 | 8477420.684 | D116 | 340339.325 | 8477426.979 | D86 | 340335.890 | 8477427.380 |
| C47 | 340349.364 | 8477415.370 | C108 | 340348.981 | 8477409.713 | D47 | 340340.946 | 8477422.453 | D117 | 340340.108 | 8477428.499 | D87 | 340336.753 | 8477429.331 |
| C48 | 340348.919 | 8477417.320 | C109 | 340348.399 | 8477412.112 | D48 | 340341.199 | 8477424.217 | D118 | 340341.109 | 8477429.862 | D88 | 340337.874 | 8477431.136 |
| C49 | 340348.473 | 8477419.270 | C110 | 340347.954 | 8477414.062 | D49 | 340341.766 | 8477425.904 | D119 | 340342.241 | 8477431.097 | D89 | 340339.222 | 8477432.780 |
| C50 | 340348.019 | 8477421.218 | C111 | 340347.508 | 8477416.012 | D50 | 340342.617 | 8477427.461 | D120 | 340343.536 | 8477432.160 | D90 | 340335.300 | 8477415.567 |
| C51 | 340348.058 | 8477422.786 | C112 | 340347.062 | 8477417.961 | D51 | 340343.731 | 8477428.841 | D121 | 340345.731 | 8477433.403 | D91 | 340334.851 | 8477417.515 |
| C52 | 340348.564 | 8477423.720 | C113 | 340346.615 | 8477419.911 | D52 | 340345.081 | 8477429.984 | D122 | 340339.684 | 8477411.348 | D92 | 340334.388 | 8477419.934 |
| C53 | 340349.980 | 8477424.689 | C114 | 340346.272 | 8477421.699 | D53 | 340346.815 | 8477430.966 | D123 | 340339.240 | 8477413.289 | D93 | 340334.263 | 8477422.160 |
| C54 | 340351.903 | 8477425.239 | C115 | 340346.483 | 8477423.333 | D54 | 340349.132 | 8477431.723 | D124 | 340338.793 | 8477415.247 | D94 | 340334.447 | 8477424.385 |
| C55 | 340353.812 | 8477425.834 | C116 | 340347.284 | 8477424.775 | D55 | 340351.047 | 8477432.298 | D125 | 340338.347 | 8477417.197 | D95 | 340334.922 | 8477426.550 |
| C56 | 340355.707 | 8477426.475 | C117 | 340348.529 | 8477425.845 | D56 | 340352.946 | 8477432.924 | D126 | 340337.892 | 8477419.150 | D96 | 340335.681 | 8477428.635 |
| C57 | 340350.160 | 8477410.327 | C118 | 340350.441 | 8477426.551 | D57 | 340354.842 | 8477432.681 | D127 | 340337.620 | 8477421.202 | D97 | 340336.714 | 8477430.606 |
| C58 | 340349.706 | 8477412.379 | C119 | 340352.358 | 8477427.120 | D58 | 340342.828 | 8477409.871 | D128 | 340337.634 | 8477422.976 | D98 | 340338.021 | 8477432.407 |
| C59 | 340348.260 | 8477414.329 | C120 | 340354.260 | 8477427.738 | D59 | 340342.299 | 8477411.873 | D129 | 340337.892 | 8477424.737 | D99 | 340338.717 | 8477433.213 |
| C60 | 340348.815 | 8477416.278 | C121 | 340356.151 | 8477428.388 | D60 | 340341.854 | 8477413.822 | D130 | 340338.387 | 8477426.452 | | | |
| C61 | 340348.369 | 8477418.228 | | | | D61 | 340341.408 | 8477415.772 | D131 | 340339.108 | 8477428.078 | | | |
| | | | | | | D62 | 340340.963 | 8477 | | | | | | |

ANEXO F Galería piloto



SECCIÓN TIPO 6A CON GALERÍA PILOTO



DESTROZA CENTRAL (ZANJA):

- 1.-MARCACIÓN TOPOGRÁFICA EN EL PISO.
- 2.-EXCAVACIÓN EN FRÍO (ROMPEDOR HIDRÁULICO).
- 3.-LIMPIEZA DEL MATERIAL EXCAVADO (CARGADOR FRONTAL Y VOLQUETES).

DESTROZA LATERAL (HASTIALES):

- 1.-MARCACIÓN TOPOGRÁFICA DE LA PARED.
- 2.-EXCAVACIÓN EN FRÍO (ROMPEDOR HIDRÁULICO).
- 3.-LIMPIEZA DE ESCOMBROS (CARGADOR FRONTAL Y VOLQUETES).
- 4.-DESQUINCHE (RETROEXCAVADORA).
- 5.-APLICACIÓN DE SHOTCRETE PREVENTIVO.
- 6.-LIMPIEZA MANUAL DEL PISO Y DESQUINCHE (DOS ROMPEDORES NEUMÁTICOS) PARA CUADRAR LAS ESQUINAS.
- 7.-LIBERACIÓN TOPOGRÁFICA DE LA EXCAVACIÓN (DONDE QUEDARÁN LAS CERCHAS).
- 8.-INSTALACIÓN DE LAS CERCHAS METÁLICAS.
- 9.-AMARRE DE ALAMBRE EN LA BARRA INTERNA DE LA CERCHA PARA UNA POSTERIOR SUJECIÓN DE LA MALLA.
- 10.-VERIFICACIÓN TOPOGRÁFICA DEL POSICIONAMIENTO DE LAS CERCHAS.
- 11.-APLICACIÓN DE SHOTCRETE ENTRE LA CERCHA VIEJA Y LAS NUEVAS HASTA CUBRIR TODO EL ALMA.

SOLERA:

- 1.-MARCACIÓN TOPOGRÁFICA DE PROFUNDIDADES DE CORTE EN EL PISO.
- 2.-EXCAVACIÓN EN FRÍO (ROMPEDOR HIDRÁULICO).
- 3.-LIMPIEZA DEL MATERIAL EXCAVADO (RETROEXCAVADORA Y VOLQUETES).
- 4.-DESQUINCHE (RETROEXCAVADORA).
- 5.-LIMPIEZA MANUAL Y PREPARACIÓN DEL PISO DE FUNDACIÓN.
- 6.-COLOCACIÓN DE MALLA METÁLICA SOBRE TACOS.
- 7.-APLICACIÓN DE SHOTCRETE SIN FIBRA.
- 8.-COLOCACIÓN DE MALLA METÁLICA DEJANDO ESPERA.
- 9.-APLICACIÓN DE SHOTCRETE SIN FIBRA.

REVESTIMIENTO (BÓVEDA COMPLETA):

- 1.-SOLDADO DE CALIBRADORES EN LA BARRA INTERNA DE LAS CERCHAS SEPARADOS A 1.50 M EN SENTIDO TRANSVERSAL.
- 2.-APLICACIÓN DE SHOTCRETE SIN FIBRAS EN TRAMOS DE 20M.
- 3.-INSTALACIÓN DEL DRENAJE (BARBACANAS Y/O GEOMEMBRANAS).
- 4.-COLOCADO DE MALLA METÁLICA EN TODO EL CONTORNO CON TRASLAPES DE 2 CUADROS EN TRANSVERSAL Y 1 CUADRO EN LONGITUDINAL.
- 5.-APLICACIÓN DE SHOTCRETE SIN FIBRA EN TRAMOS DE 20M.

CALOTA (GALERÍA PILOTO):

- 1.-MARCACIÓN TOPOGRÁFICA DEL CONTORNO.
- 2.-EXCAVACIÓN EN FRÍO (ROMPEDOR HIDRÁULICO).
- 3.-LIMPIEZA DEL MATERIAL EXCAVADO (CARGADOR FRONTAL).
- 4.-DESQUINCHE (RETROEXCAVADORA).
- 5.-APLICACIÓN DE SHOTCRETE PREVENTIVO EN EL TECHO Y EN LA PARED FRONTAL.
- 6.-LIMPIEZA MANUAL DEL PISO Y DESQUINCHE (DOS ROMPEDORES NEUMÁTICOS) PARA CUADRAR LAS ESQUINAS.
- 7.-LIBERACIÓN TOPOGRÁFICA DE LA EXCAVACIÓN (DONDE QUEDARÁ LA CERCHA).
- 8.-INSTALACIÓN DE LA CERCHA METÁLICA.
- 9.-VERIFICACIÓN TOPOGRÁFICA DEL POSICIONAMIENTO DE LA CERCHA.
- 10.-APLICACIÓN DE SHOTCRETE ENTRE LA CERCHA VIEJA Y NUEVA POR LO MENOS HASTA LA MITAD DEL ALMA.
- 11.-MARCACIÓN TOPOGRÁFICA DE ENFILADOS DE SUELO SOBRE LA BARRA INTERNA DE LA CERCHA (C/SEIS CERCHAS).
- 12.-PERFORACIÓN (CON JUMBO), COLOCACIÓN E INYECCIÓN DE LOS ENFILADOS (SOBRE RETROEXCAVADORA).
- 13.-APLICACIÓN DE SHOTCRETE HASTA CUBRIR TODA EL ALMA DE LA CERCHA.

CALOTA (ENSANCHE):

- 1.-MARCACIÓN TOPOGRÁFICA DEL CONTORNO.
- 2.-EXCAVACIÓN EN FRÍO (ROMPEDOR HIDRÁULICO).
- 3.-DEMOLICIÓN DE LA PARED INTERNA DE LA GALERÍA PILOTO, INCLUYE EL SHOTCRETE, CERCHA METÁLICA Y ENFILADOS DE SUELO (ROMPEDOR HIDRÁULICO).
- 4.-LIMPIEZA DEL MATERIAL EXCAVADO (CARGADOR FRONTAL Y VOLQUETES).
- 5.-DESQUINCHE (RETROEXCAVADORA).
- 6.-APLICACIÓN DE SHOTCRETE PREVENTIVO EN EL TECHO Y EN LA PARED FRONTAL.
- 7.-LIMPIEZA MANUAL DEL PISO Y DESQUINCHE (DOS ROMPEDORES NEUMÁTICOS) PARA CUADRAR LAS ESQUINAS.
- 8.-LIBERACIÓN TOPOGRÁFICA DE LA EXCAVACIÓN (DONDE QUEDARÁ LA CERCHA).
- 9.-INSTALACIÓN DE LA CERCHA METÁLICA.
- 10.-AMARRE DE ALAMBRE EN LA BARRA INTERNA DE LA CERCHA PARA UNA POSTERIOR SUJECIÓN DE LA MALLA.
- 11.-VERIFICACIÓN TOPOGRÁFICA DEL POSICIONAMIENTO DE LA CERCHA.
- 12.-APLICACIÓN DE SHOTCRETE ENTRE LA CERCHA VIEJA Y NUEVA POR LO MENOS HASTA LA MITAD DEL ALMA.
- 13.-MARCACIÓN TOPOGRÁFICA DE ENFILADOS O MARCHAVANTI SOBRE LA BARRA INTERNA DE LA CERCHA (C/SEIS CERCHAS).
- 14.-PERFORACIÓN (CON JUMBO), COLOCACIÓN E INYECCIÓN DE LOS ENFILADOS (SOBRE CAMIÓN PLATAFORMA).
- 15.-APLICACIÓN DE SHOTCRETE HASTA CUBRIR TODA EL ALMA DE LA CERCHA.

SOSTENIMIENTO GALERÍA (PILOTO):

| |
|--|
| SHOTCRETE REFORZADO PREVENTIVO EN TECHO Y FRENTE |
| CERCHA METÁLICA CADA 0.80 - 1.00 m |
| SHOTCRETE REFORZADO C/FIBRAS (e=0.20 m) |
| ENFILAGE PARA SUELOS CADA SEIS CERCHAS |
| SHOTCRETE REFORZADO C/FIBRAS (e=0.10 m) |

SOSTENIMIENTO (ENSANCHE DE CALOTA):

| |
|---|
| SHOTCRETE REFORZADO PREVENTIVO |
| CERCHA METÁLICA CADA 0.80 - 1.00 m |
| SHOTCRETE REFORZADO C/FIBRAS (e=0.20 m) |
| ENFILAGE PARA SUELOS CADA SEIS CERCHAS |
| SHOTCRETE REFORZADO C/FIBRAS (e = 0.10 m) |

Nota:

1. D : DIAMETRO DEL TÚNEL
2. LAS MEDIDAS SON EN METROS, SALVO INDICACIÓN CONTRARIA

SOSTENIMIENTO (DESTROZA):

| |
|------------------------------------|
| SHOTCRETE PREVENTIVO EN PARED |
| CERCHA METÁLICA CADA 0.80 - 1.00 m |
| SHOTCRETE C/FIBRAS (e = 0.30 m) |

| DETALLE DE CANTIDADES (por metro de túnel) | | | |
|--|----------------|--|---------|
| DESCRIPCIÓN | UNIDAD | DETALLE | x METRO |
| Excavación teórica | m ³ | con línea A | 93.447 |
| Shotcrete c/fibra | m ³ | | 7.612 |
| Shotcrete c/fibra | m ³ | | 8.918 |
| Enfilage en suelo (paraguas) | m | 30 de 12m x 11era | 60.000 |
| Marchavanti hincados | m | | 0.000 |
| Anchajes Ø 25mm. | m | | 0.000 |
| Cercha metálica sellada | kg | 1 p/leza c/m | 452.230 |
| Malla electrosoldada Q295 | kg | 48.955m ² - 4.69kg/m ² | 229.599 |
| Carpeta drenante | m ³ | | 10.077 |
| Demolición de concreto | m ³ | | 1.748 |

ESTUDIO DEFINITIVO DEL CORREDOR VIAL INTEROCEÁNICO SUR
TRAMO AZANGARO - PUENTE INAMBARÍ

PROYECTO:
SECTOR CRÍTICO - TÚNEL WAYRASENCCA
TUNEL WAYRASENCCA - SUBTERRANEO
GALERÍA PILOTO

ESCALA: INDICADAS
FECHA: DICIEMBRE 2014
CÓDIGO: TUNW-PILOT

LAME: P-04

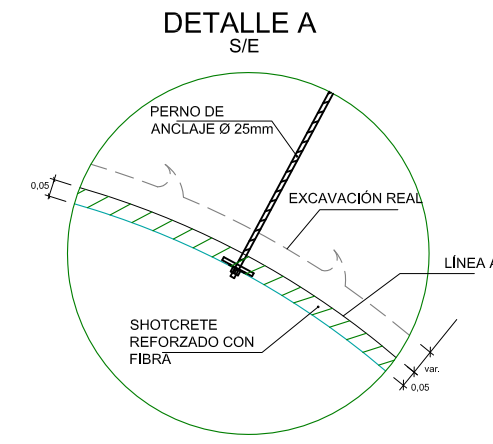
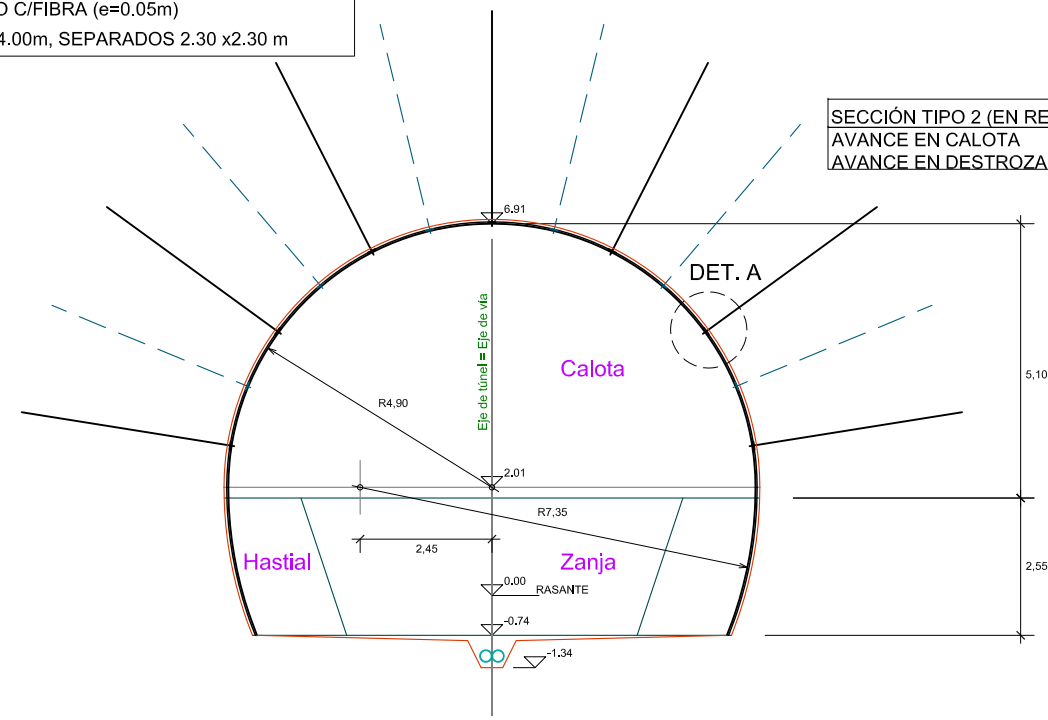
ANEXO G

Categoría de sostenimiento 2

Sección tipo 2 - Roca clase II

SOSTENIMIENTO:
 SHOTCRETE REFORZADO C/FIBRA (e=0.05m)
 ANCLAJES PASIVOS DE 4.00m, SEPARADOS 2.30 x2.30 m

SECCIÓN TIPO 2 (EN RECTA) ROCA CLASE II
 AVANCE EN CALOTA 3.00
 AVANCE EN DESTROZA 5.40



REQUERIMIENTOS MÍNIMOS DEL TIPO DE SOSTENIMIENTO:

SHOTCRETE : RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAxIAL (28 DÍAS) = 28 MPA
 ACERO DE CONSTRUCCIÓN : ACERO A42 FY = 420 MPA

PROCESO CONSTRUCTIVO

LA EXCAVACIÓN PREVISTA PARA EL TÚNEL EN ROCA ES A SECCIÓN COMPLETA Y SE REALIZARÁ CON VOLADURA EN FUNCIÓN A LA DUREZA DE LA MISMA.

EN CASO DE QUE LAS CONDICIONES DE LA ROCA SEAN DIFERENTES A LAS PREVISTAS, SE APLICARÁ EL MÉTODO CONSTRUCTIVO DE SECCIÓN PARCIALIZADA QUE SE DETALLA A CONTINUACIÓN:

CALOTA (SECCIÓN COMPLETA):

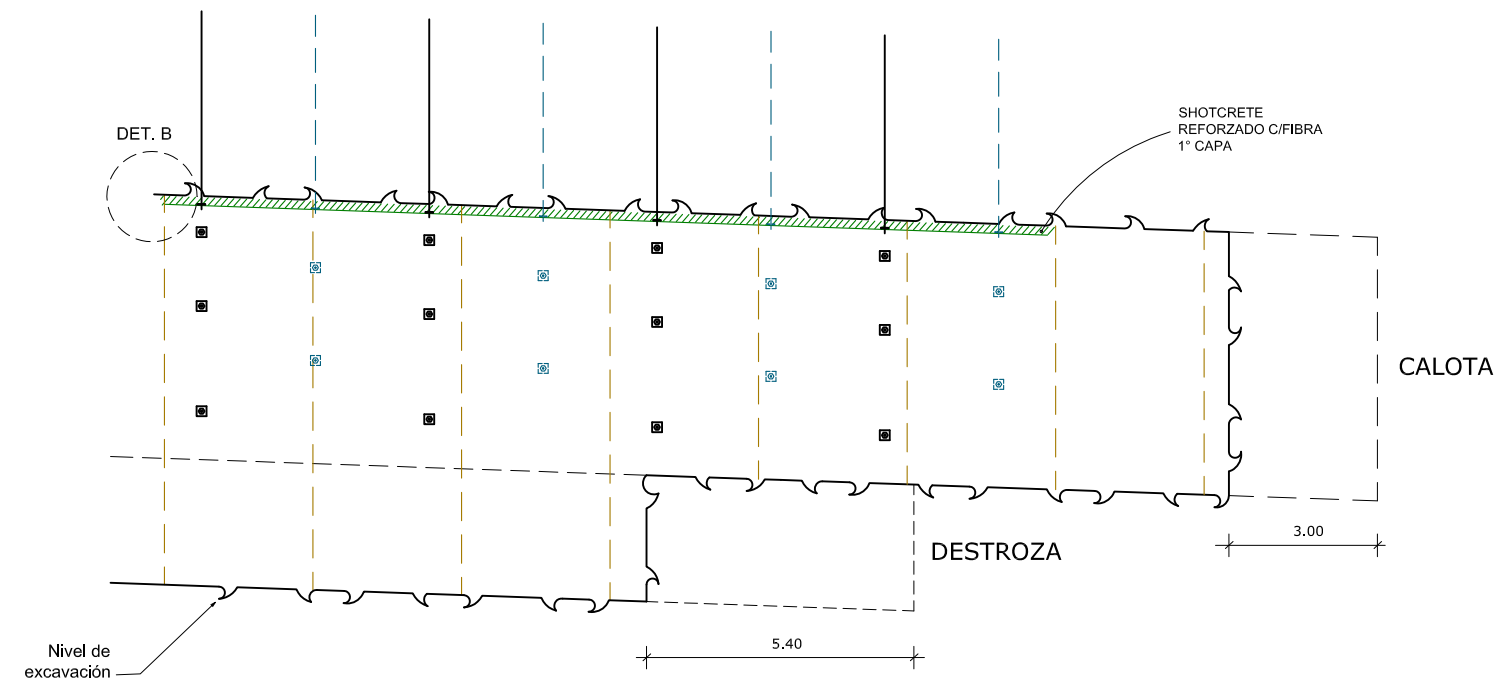
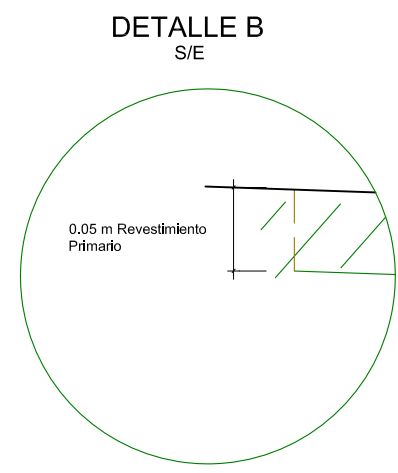
- 1.-MARCACIÓN TOPOGRÁFICA EN EL FRENTE PARA VOLADURA.
- 2.-PERFORACIÓN DEL FRENTE (JUMBO-DRILL BROCA 45 mm).
- 3.-LIMPIEZA DE LOS HOYOS PERFORADOS.
- 4.-CARGA DE EXPLOSIVOS Y CONEXIÓN.
- 5.-VOLADURA Y VENTILACIÓN.
- 6.-LIMPIEZA DE ESCOMBROS (CARGADOR FRONTAL Y VOLQUETES).
- 7.-DESQUINCHE (RETROEXCAVADORA).
- 8.-IDEM PASOS 1-7 "HASTA CUATRO" AVANCES.
- 9.-LIMPIEZA MANUAL DEL PISO Y DESQUINCHE (DOS ROMPEDORES NEUMÁTICOS) PARA CUADRAR LAS ESQUINAS.
- 10.-LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE LA EXCAVACIÓN (PERFILES CADA 1.50 m).
- 11.-APLICACIÓN DE SHOTCRETE REFORZADO EN TODO EL TRAMO (PRIMERO LAS PAREDES INFERIORES Y DESPUÉS EL TECHO SOBRE EL CAMIÓN PLATAFORMA).
- 12.-PERFORACIÓN PARA LOS ANCLAJES (JUMBO-DRILL BROCA 45-51mm).
- 13.-COLOCACIÓN DE ANCLAJES CON LECHADA DE CEMENTO (SOBRE CAMIÓN PLATAFORMA).

DESTROZA CENTRAL (ZANJA):

- 1.-MARCACIÓN TOPOGRÁFICA EN EL PISO PARA VOLADURA.
- 2.-PERFORACIÓN DEL PISO (JUMBO-DRILL BROCA 2 1/2" O 3").
- 3.-LIMPIEZA DE LOS HOYOS PERFORADOS.
- 4.-CARGA DE EXPLOSIVOS Y CONEXIÓN.
- 5.-VOLADURA Y VENTILACIÓN.
- 6.-LIMPIEZA DE ESCOMBROS (TRACTOR ORUGA, CARGADOR FRONTAL Y VOLQUETES).

DESTROZA LATERAL (HASTIALES):

- 1.-MARCACIÓN TOPOGRÁFICA EN EL FRENTE PARA VOLADURA.
- 2.-PERFORACIÓN DEL FRENTE (MARTILLO NEUMÁTICO 38 mm).
- 3.-LIMPIEZA DE LOS HOYOS PERFORADOS.
- 4.-CARGA DE EXPLOSIVOS Y CONEXIÓN.
- 5.-VOLADURA Y VENTILACIÓN.
- 6.-LIMPIEZA DE ESCOMBROS (CARGADOR FRONTAL Y VOLQUETES).
- 7.-DESQUINCHE (CON RETROEXCAVADORA).
- 8.-IDEM PASOS 1-7 "HASTA SEIS" AVANCES.
- 9.-LIMPIEZA MANUAL DEL PISO Y DEQUINCHE (DOS ROMPEDORES NEUMÁTICOS) PARA CUADRAR LAS ESQUINAS.
- 10.-LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE LA EXCAVACIÓN (PERFILES CADA 1.50 m).
- 11.-APLICACIÓN DE SHOTCRETE REFORZADO EN TODO EL TRAMO (PRIMERO LA PARED INFERIOR Y LUEGO LA SUPERIOR).



| | | | | |
|--------------|--|--------|-------|--------|
| DISEÑO: | | | | |
| VERIFICÓ: | | | | |
| DIBUJO: | | | | |
| PROFESIONAL: | | FECHA: | REV.: | FECHA: |

ESTUDIO DEFINITIVO DEL CORREDOR VIAL INTEROCÉANICO SUR
 TRAMO AZANGARO - PUENTE INAMBARÍ

PROYECTO:
 SECTOR CRÍTICO - TÚNEL WAYRASENCCA
 SUBTERRÁNEO
 CATEGORÍA DE SOSTENIMIENTO 2

| | | | |
|---------|----------------|------|-------------|
| ESCALA: | INDICADAS | LAM: | |
| FECHA: | DICIEMBRE 2014 | | P-05 |
| CODIGO: | TUNW-SOST2 | | |

Fuente: Departamento de túneles, CCT4, 2012.

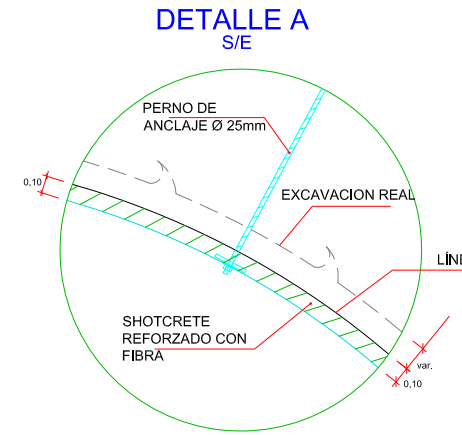
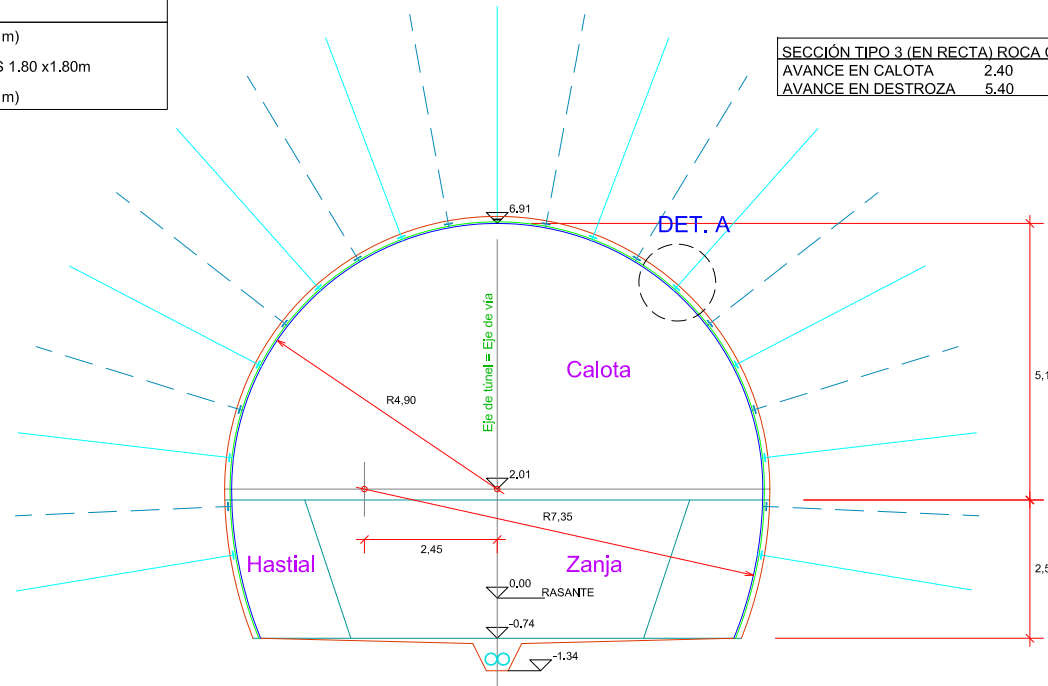
ANEXO H

Categoría de sostenimiento 3

Sección tipo 3 - Roca clase III

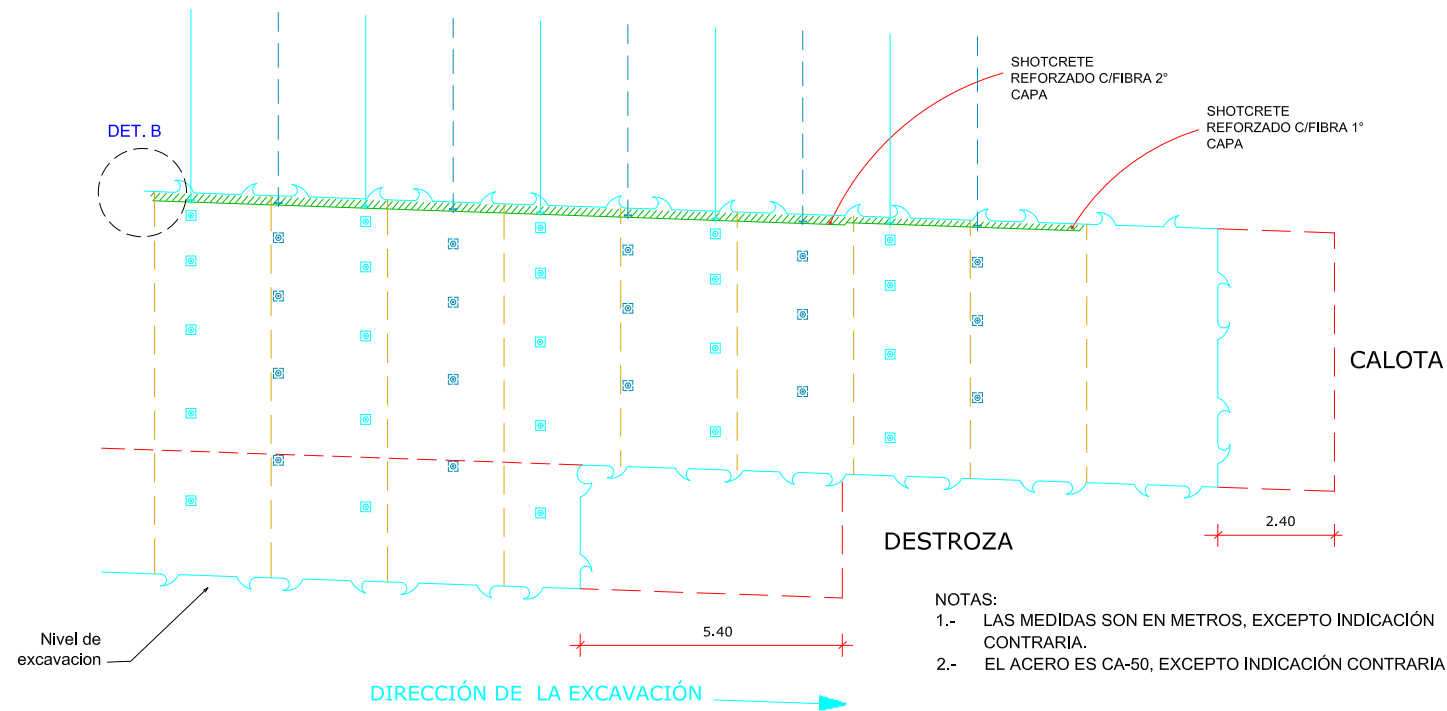
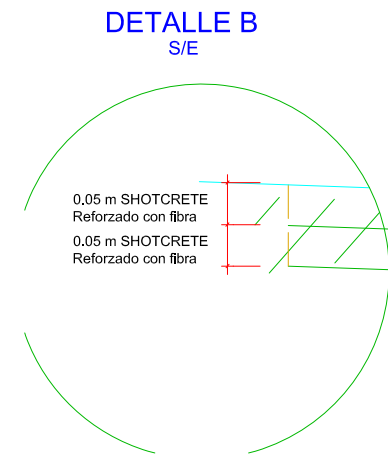
| | |
|------------------|-----------------------------------|
| SOSTENIMIENTO: | |
| SHOTCRETE | REFORZADO C/FIBRA (e=0,05 m) |
| ANCLAJES PASIVOS | DE 4.00 m, SEPARADOS 1.80 x 1.80m |
| SHOTCRETE | REFORZADO C/FIBRA (e=0,05 m) |

| | |
|--|------|
| SECCIÓN TIPO 3 (EN RECTA) ROCA CLASE III | |
| AVANCE EN CALOTA | 2.40 |
| AVANCE EN DESTROZA | 5.40 |



REQUERIMIENTOS MÍNIMOS DEL TIPO DE SOSTENIMIENTO:

| | | |
|-----------------------|---|---|
| SHOTCRETE | : | RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAxIAL (28 DIAS) = 28 MPA |
| ACERO DE CONSTRUCCIÓN | : | ACERO A42 FY = 420 MPA |



- NOTAS:**
- 1.- LAS MEDIDAS SON EN METROS, EXCEPTO INDICACIÓN CONTRARIA.
 - 2.- EL ACERO ES CA-50, EXCEPTO INDICACIÓN CONTRARIA

PROCESO CONSTRUCTIVO

LA EXCAVACIÓN PREVISTA PARA EL TÚNEL EN ROCA ES A SECCIÓN COMPLETA Y SE REALIZARÁ CON VOLADURA EN FUNCIÓN A LA DUREZA DE LA MISMA.

EN CASO DE QUE LAS CONDICIONES DE LA ROCA SEAN DIFERENTES A LAS PREVISTAS, SE APLICARÁ EL MÉTODO CONSTRUCTIVO DE SECCIÓN PARCIALIZADA QUE SE DETALLA A CONTINUACIÓN:

CALOTA (SECCIÓN COMPLETA):

- 1.-MARCACIÓN TOPOGRÁFICA EN EL FRENTE PARA VOLADURA.
- 2.-PERFORACIÓN DEL FRENTE (JUMBO-DRILL BROCA 45mm).
- 3.-LIMPIEZA DE LOS HOYOS PERFORADOS.
- 4.-CARGA DE EXPLOSIVOS Y CONEXIÓN.
- 5.-VOLADURA Y VENTILACIÓN.
- 6.-LIMPIEZA DE ESCOMBROS (CARGADOR FRONTAL Y VOLQUETES).
- 7.-DESQUINCHE (RETROEXCAVADORA).
- 8.-IDEM PASOS 1-7 "HASTA DOS" AVANCES.
- 9.-LIMPIEZA MANUAL DEL PISO Y DESQUINCHE (DOS ROMPEDORES NEUMÁTICOS) PARA CUADRAR LAS ESQUINAS.
- 10.-LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE LA EXCAVACIÓN (PERFILES CADA 1.50m).
- 11.-APLICACIÓN DE SHOTCRETE REFORZADO EN TODO EL TRAMO (PRIMERO LAS PAREDES INFERIORES Y DESPUÉS EL TECHO SOBRE EL CAMIÓN PLATAFORMA).
- 12.-MARCACIÓN TOPOGRÁFICA PARA LOS ANCLAJES CADA CUATRO AVANCES.
- 13.-PERFORACIÓN PARA LOS ANCLAJES (JUMBO-DRILL BROCA 45-51mm).
- 14.-COLOCACIÓN DE ANCLAJES CON LECHADA DE CEMENTO (SOBRE CAMIÓN PLATAFORMA).
- 15.-APLICACIÓN DE SHOTCRETE REFORZADO HASTA COMPLETAR EL ESPESOR REQUERIDO.

DESTROZA CENTRAL (ZANJA):

- 1.-MARCACIÓN TOPOGRÁFICA EN EL PISO PARA VOLADURA.
- 2.-PERFORACIÓN DEL PISO (JUMBO-DRILL BROCA 2 1/2" O 3").
- 3.-LIMPIEZA DE LOS HOYOS PERFORADOS.
- 4.-CARGA DE EXPLOSIVOS Y CONEXIÓN.
- 5.-VOLADURA Y VENTILACIÓN.
- 6.-LIMPIEZA DE ESCOMBROS (TRACTOR ORUGA, CARGADOR FRONTAL Y VOLQUETES).

DESTROZA LATERAL (HASTIALES):

- 1.-MARCACIÓN TOPOGRÁFICA EN EL FRENTE PARA VOLADURA.
- 2.-PERFORACIÓN DEL FRENTE (MARTILLO NEUMÁTICO 38 mm.).
- 3.-LIMPIEZA DE LOS HOYOS PERFORADOS.
- 4.-CARGA DE EXPLOSIVOS Y CONEXIÓN.
- 5.-VOLADURA Y VENTILACIÓN.
- 6.-LIMPIEZA DE ESCOMBROS (CARGADOR FRONTAL Y VOLQUETES).
- 7.-DESQUINCHE (CON RETROEXCAVADORA).
- 8.-IDEM PASOS 1-7 "HASTA CUATRO" AVANCES.
- 9.-LIMPIEZA MANUAL DEL PISO Y DEQUINCHE (DOS ROMPEDORES NEUMÁTICOS) PARA CUADRAR LAS ESQUINAS.
- 10.-LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE LA EXCAVACIÓN (PERFILES CADA 1.50 m).
- 11.-APLICACIÓN DE SHOTCRETE REFORZADO EN TODO EL TRAMO (PRIMERO LA PARED INFERIOR Y LUEGO LA SUPERIOR).
- 12.-PERFORACIÓN PARA LOS ANCLAJES (JUMBO-DRILL BROCA 45-51mm).
- 14.-COLOCACIÓN DE ANCLAJES CON LECHADA DE CEMENTO (SOBRE CAMIÓN PLATAFORMA).
- 13.-APLICACIÓN DE SHOTCRETE REFORZADO HASTA COMPLETAR EL ESPESOR REQUERIDO.

| | | | | |
|-------------|-------|------|-------|--|
| DISÑO: | | | | |
| VERIFICO: | | | | |
| DIBUJO: | | | | |
| PROFESIONAL | FECHA | REV. | FECHA | |

ESTUDIO DEFINITIVO DEL CORREDOR VIAL INTEROCEÁNICO SUR
TRAMO AZANGARO - PUENTE INAMBARI

PROYECTO:
SECTOR CRÍTICO - TÚNEL WAYRASENCCA SUBTERRÁNEO
CATEGORÍA DE SOSTENIMIENTO 3

ESCALA: INDICADAS LAM:
FECHA: DICIEMBRE 2014
CÓDIGO: TUNW-SOST3

ANEXO I

Categoría de sostenimiento 4

Sección tipo 4 - Roca clase IV

PROCESO CONSTRUCTIVO

LA EXCAVACIÓN PREVISTA PARA EL TÚNEL EN ROCA ES A SECCIÓN COMPLETA Y SE REALIZARÁ CON VOLADURA EN FUNCIÓN A LA DUREZA DE LA MISMA.

EN CASO DE QUE LAS CONDICIONES DE LA ROCA SEAN DIFERENTES A LAS PREVISTAS, SE APLICARÁ EL MÉTODO CONSTRUCTIVO DE SECCIÓN PARCIALIZADA QUE SE DETALLA A CONTINUACIÓN:

CALOTA (SECCIÓN COMPLETA):

- 1.-MARCACIÓN TOPOGRÁFICA EN EL FRENTE PARA VOLADURA.
- 2.-PERFORACIÓN DEL FRENTE (JUMBO-DRILL BROCA 45 mm).
- 3.-LIMPIEZA DE LOS HOYOS PERFORADOS.
- 4.-CARGA DE EXPLOSIVOS Y CONEXIÓN.
- 5.-VOLADURA Y VENTILACIÓN.
- 6.-LIMPIEZA DE ESCOMBROS (CARGADOR FRONTAL Y VOLQUETES).
- 7.-DESQUINCHE (RETROEXCAVADORA).
- 8.-LIMPIEZA MANUAL DEL PISO Y DESQUINCHE (DOS ROMPEDORES NEUMÁTICOS) PARA CUADRAR LAS ESQUINAS.
- 9.-LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE LA EXCAVACIÓN (PERFILES CADA 1.50 m).
- 10.-APLICACIÓN DE SHOTCRETE REFORZADO EN EL TRAMO (PRIMERO LAS PAREDES INFERIORES Y DESPUÉS EL TECHO SOBRE EL CAMIÓN PLATAFORMA).
- 11.-MARCACIÓN TOPOGRÁFICA PARA LOS ANCLAJES CADA DOS AVANCES.
- 12.-PERFORACIÓN PARA LOS ANCLAJES (JUMBO-DRILL BROCA 45 - 51mm)
- 13.-COLOCACIÓN DE ANCLAJES CON LECHADA DE CEMENTO (SOBRE CAMIÓN PLATAFORMA).
- 14.-APLICACIÓN DE SHOTCRETE REFORZADO HASTA COMPLETAR EL ESPESOR REQUERIDO.

DESTROZA CENTRAL (ZANJA):

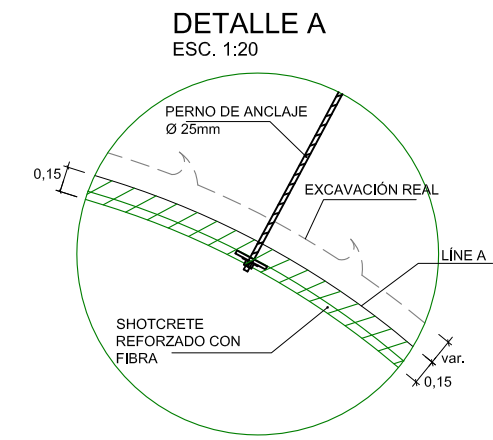
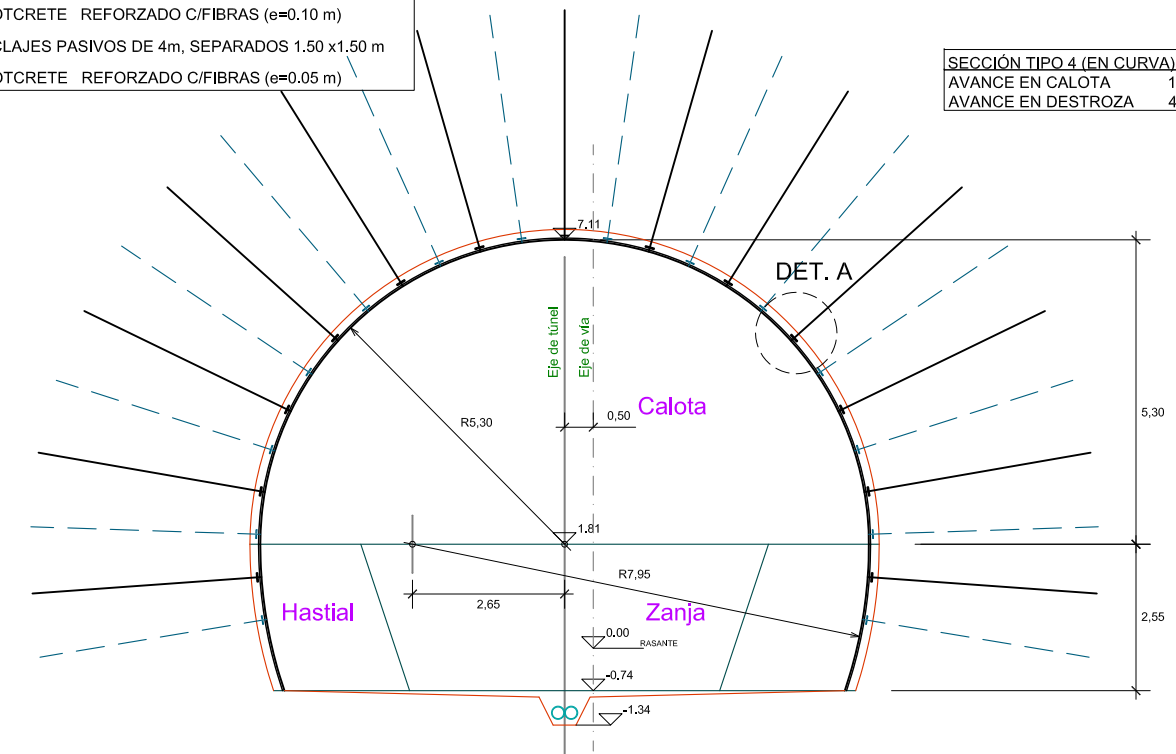
- 1.-MARCACIÓN TOPOGRÁFICA EN EL PISO PARA VOLADURA.
- 2.-PERFORACIÓN DEL PISO (JUMBO-DRILL BROCA 2 1/2" O 3").
- 3.-LIMPIEZA DE LOS HOYOS PERFORADOS.
- 4.-CARGA DE EXPLOSIVOS Y CONEXIÓN.
- 5.-VOLADURA Y VENTILACIÓN.
- 6.-LIMPIEZA DE ESCOMBROS (TRACTOR ORUGA, CARGADOR FRONTAL Y VOLQUETES).

DESTROZA LATERAL (HASTIALES):

- 1.-MARCACIÓN TOPOGRÁFICA EN EL FRENTE PARA VOLADURA.
- 2.-PERFORACIÓN DEL FRENTE (MARTILLO NEUMÁTICO 38 mm).
- 3.-LIMPIEZA DE LOS HOYOS PERFORADOS.
- 4.-CARGA DE EXPLOSIVOS Y CONEXIÓN.
- 5.-VOLADURA Y VENTILACIÓN.
- 6.-LIMPIEZA DE ESCOMBROS (CARGADOR FRONTAL Y VOLQUETES).
- 7.-DESQUINCHE (RETROEXCAVADORA).
- 8.-IDEM PASOS 1-7 "HASTA" 2 AVANCES.
- 9.-LIMPIEZA MANUAL DEL PISO Y DEQUINCHE (DOS ROMPEDORES NEUMÁTICOS) PARA CUADRAR LAS ESQUINAS.
- 10.-LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE LA EXCAVACIÓN (PERFILES CADA 1.50 m).
- 11.-APLICACIÓN DE SHOTCRETE REFORZADO EN TODO EL TRAMO (PRIMERO LA PARED INFERIOR Y LUEGO LA SUPERIOR).
- 12.-PERFORACIÓN PARA LOS ANCLAJES (JUMBO-DRILL BROCA 45-51mm).
- 13.-COLOCACIÓN DE ANCLAJES CON LECHADA DE CEMENTO (SOBRE CAMIÓN PLATAFORMA).
- 14.-APLICACIÓN DE SHOTCRETE REFORZADO HASTA COMPLETAR EL ESPESOR REQUERIDO.

SOSTENIMIENTO:
 SHOTCRETE REFORZADO C/FIBRAS (e=0.10 m)
 ANCLAJES PASIVOS DE 4m, SEPARADOS 1.50 x1.50 m
 SHOTCRETE REFORZADO C/FIBRAS (e=0.05 m)

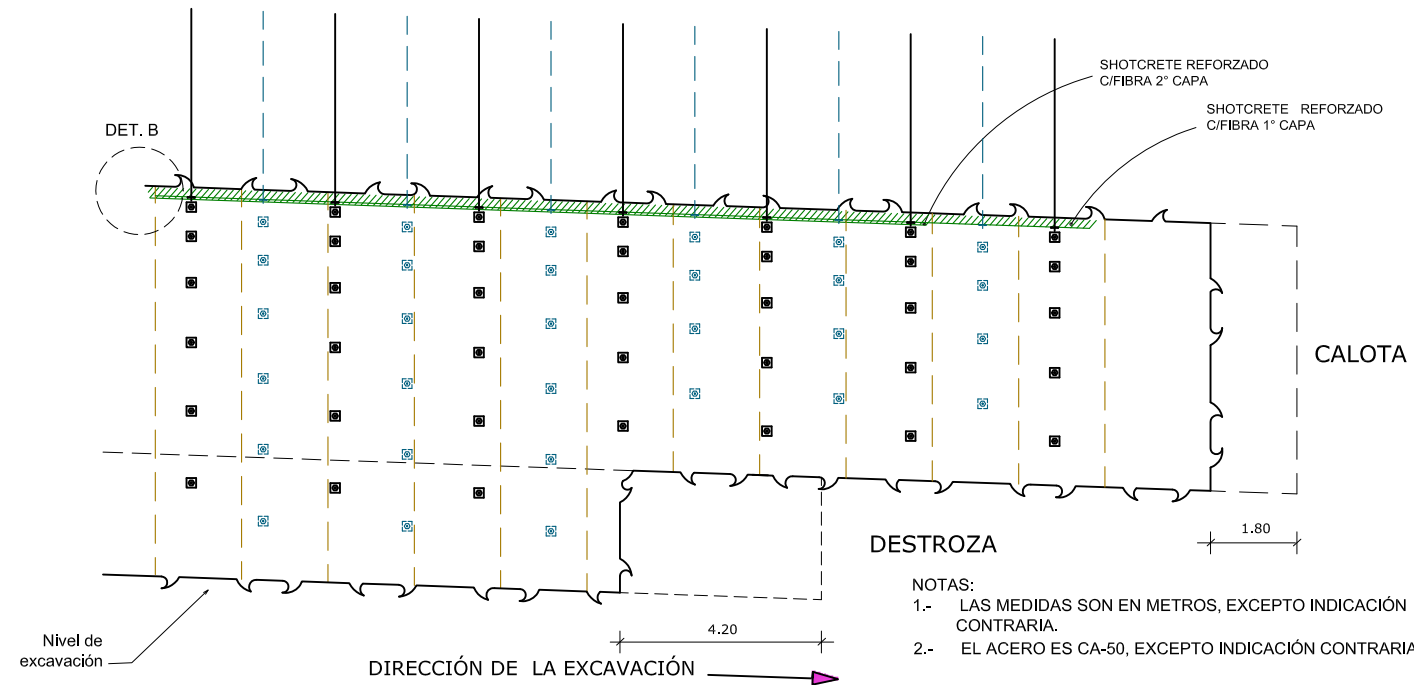
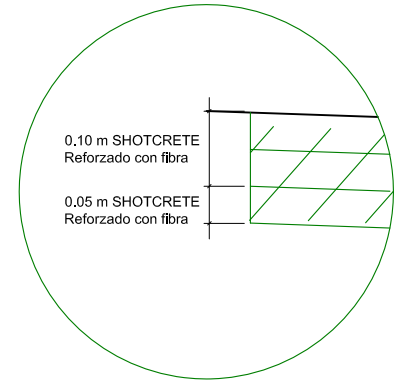
SECCIÓN TIPO 4 (EN CURVA) ROCA CLASE IV
 AVANCE EN CALOTA 1.80
 AVANCE EN DESTROZA 4.20



REQUERIMIENTOS MÍNIMOS DEL TIPO DE SOSTENIMIENTO:

SHOTCRETE : RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN I (28 DIAS) = 28 MPA
 ACERO DE CONSTRUCCIÓN : ACERO A42 FY = 420 MPA

DETALLE B
 ESC. 1:20



NOTAS:
 1.- LAS MEDIDAS SON EN METROS, EXCEPTO INDICACIÓN CONTRARIA.
 2.- EL ACERO ES CA-50, EXCEPTO INDICACIÓN CONTRARIA

| | | | |
|---|---|--|--|
| DISEÑO: _____ VERIFICO: _____ DIBUJO: _____ PROFESIONAL: _____ | ESTUDIO DEFINITIVO DEL CORREDOR VIAL INTEROCEÁNICO SUR TRAMO AZANGARO - PUENTE INAMBARI | PROYECTO: SECTOR CRÍTICO - TÚNEL WAYRAENCCA SUBTERRÁNEO CATEGORÍA DE SOSTENIMIENTO 4 | ESCALA: INDICADAS FECHA: DICIEMBRE 2014 CÓDIGO: TUNW-SOST4 |
|---|---|--|--|

Fuente: Departamento de túneles, CCT4, 2012.

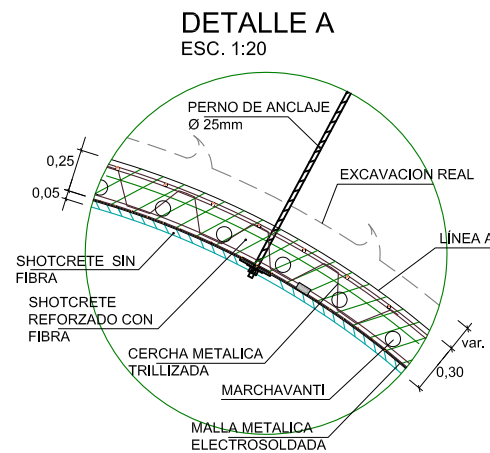
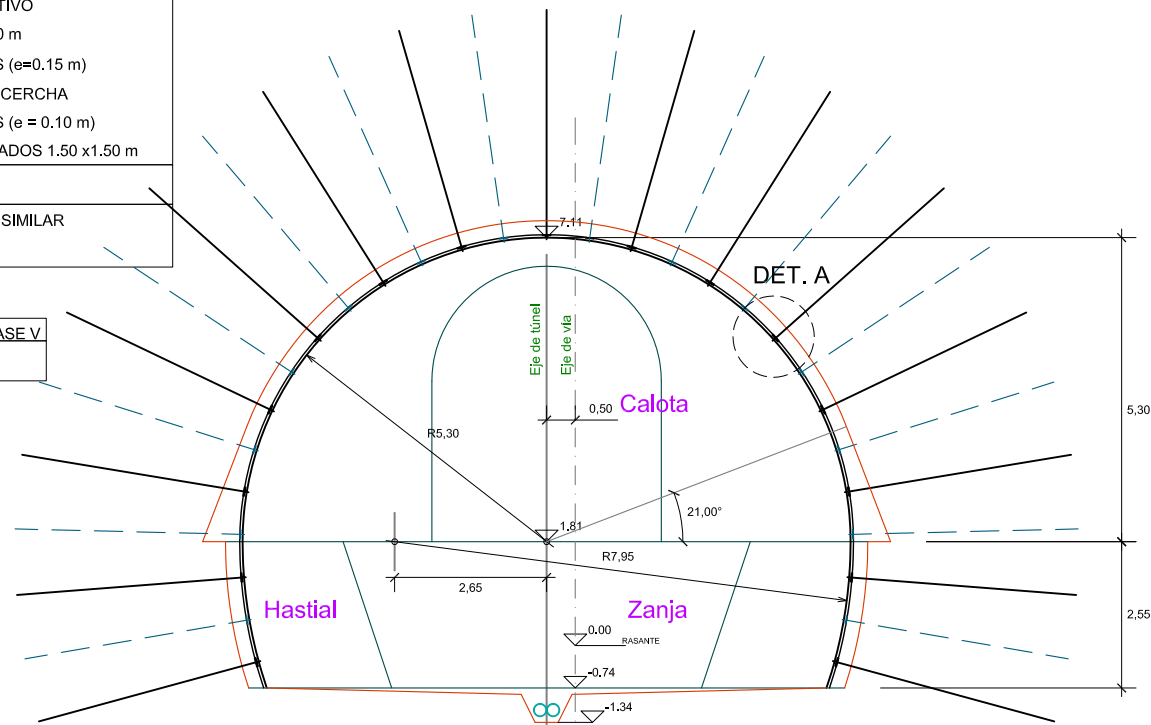
ANEXO J

Categoría de sostenimiento 5a

Sección tipo 5a - Roca clase V

| | |
|--|--|
| SOSTENIMIENTO: | |
| SHOTCRETE REFORZADO PREVENTIVO | |
| CERCHA METÁLICA CADA 1.20 - 1.50 m | |
| SHOTCRETE REFORZADO C/FIBRAS (e=0.15 m) | |
| MARCHAVANTI INYECTADOS CADA CERCHA | |
| SHOTCRETE REFORZADO C/FIBRAS (e = 0.10 m) | |
| ANCLAJES PASIVOS DE 4m, SEPARADOS 1.50 x1.50 m | |
| REVESTIMIENTO: | |
| MALLA ELECTROSOLDADA Q 246 O SIMILAR | |
| SHOTCRETE S/FIBRA (e=0.05 m) | |

| | |
|---|-----------|
| SECCIÓN TIPO 5 (EN CURVA) ROCA CLASE V | |
| AVANCE EN CALOTA | 1.20-1.50 |
| AVANCE EN DESTROZA | 2.40-3.00 |



REQUERIMIENTOS MÍNIMOS DEL TIPO DE SOSTENIMIENTO:

| | |
|-----------------------|---|
| SHOTCRETE | : RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAXIAL (28 DIAS) = 28 MPA |
| ACERO DE CONSTRUCCIÓN | : ACERO A42 FY = 420 MPA |

PROCESO CONSTRUCTIVO

CALOTA (GALERÍA PILOTO):

- 1.-MARCACIÓN TOPOGRÁFICA EN EL FRENTE PARA VOLADURA.
- 2.-PERFORACIÓN DEL FRENTE (JUMBO-DRILL BROCA 45 mm).
- 3.-LIMPIEZA DE LOS HOYOS PERFORADOS.
- 4.-CARGA DE EXPLOSIVOS Y CONEXIÓN.
- 5.-VOLADURA Y VENTILACIÓN.
- 6.-LIMPIEZA DE ESCOMBROS (CARGADOR FRONTAL Y VOLQUETES).
- 7.-DESQUINCHE (RETROEXCAVADORA).
- 8.-SI EL CASO AMERITA SE APLICARÁ SHOTCRETE REFORZADO EN EL TECHO

CALOTA (ENSANCHE):

- 1.-MARCACIÓN TOPOGRÁFICA EN EL FRENTE PARA VOLADURA.
- 2.-PERFORACIÓN DEL FRENTE (JUMBO-DRILL BROCA 45 mm).
- 3.-LIMPIEZA DE LOS HOYOS PERFORADOS.
- 4.-CARGA DE EXPLOSIVOS Y CONEXIÓN.
- 5.-VOLADURA Y VENTILACIÓN.
- 6.-LIMPIEZA DE ESCOMBROS (CARGADOR FRONTAL Y VOLQUETES).
- 7.-DESQUINCHE (RETROEXCAVADORA).
- 8.-APLICACIÓN DE SHOTCRETE REFORZADO PREVENTIVO.
- 9.-LIMPIEZA MANUAL DEL PISO Y DESQUINCHE (DOS ROMPEDORES NEUMÁTICOS) PARA CUADRAR LAS ESQUINAS.
- 10.-LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE LA EXCAVACIÓN DONDE QUEDARÁ COLOCADA LA CERCHA.
- 11.-INSTALACIÓN DE LA CERCHA METÁLICA.
- 12.-AMARRE DE ALAMBRE EN LA BARRA INTERNA DE LA CERCHA PARA UN POSTERIOR AMARRE DE LA MALLA.
- 13.-APLICACIÓN DE SHOTCRETE REFORZADO ENTRE LA CERCHA VIEJA Y NUEVA POR LO MENOS HASTA LA MITAD DEL ESPESOR.
- 14.-MARCACIÓN TOPOGRÁFICA DE MARCHAVANTIS SOBRE LA BARRA INTERNA DE LA CERCHA.
- 15.-PERFORACIÓN (CON JUMBO) Y COLOCACIÓN DE LOS MARCHAVANTI CADA CERCHA (SOBRE PLATAFORMA).
- 16.-APLICACIÓN DE SHOTCRETE REFORZADO HASTA CUBRIR TODO EL ESPESOR DE LA CERCHA.
- 17.-MARCACIÓN TOPOGRÁFICA DE ANCLAJES.
- 18.-PERFORACIÓN PARA ANCLAJES (JUMBO BROCA 45 - 51 mm)
- 19.-COLOCACIÓN DE ANCLAJES CON LECHADA DE CEMENTO (SOBRE CAMIÓN PLATAFORMA)

DESTROZA CENTRAL (ZANJA):

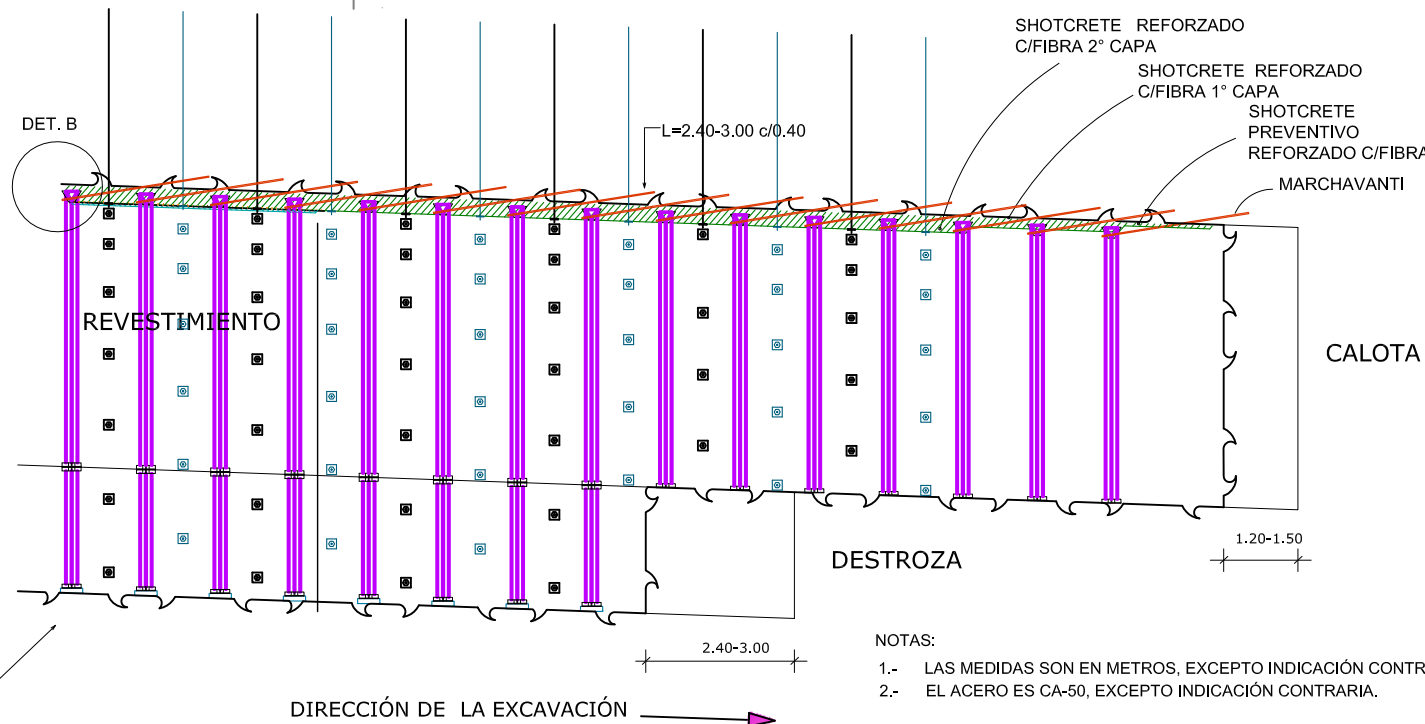
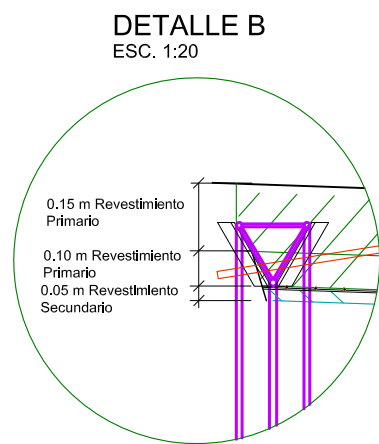
- 1.-MARCACIÓN TOPOGRÁFICA EN EL PISO PARA VOLADURA.
- 2.-PERFORACIÓN DEL PISO (JUMBO-DRILL BROCA 2 1/2" ó 3").
- 3.-LIMPIEZA DE LOS HOYOS PERFORADOS.
- 4.-CARGA DE EXPLOSIVOS Y CONEXIÓN.
- 5.-VOLADURA Y VENTILACIÓN.
- 6.-LIMPIEZA DE ESCOMBROS (TRACTOR ORUGA, CARGADOR FRONTAL Y VOLQUETES).

DESTROZA LATERAL (HASTIALES):

- 1.-MARCACIÓN TOPOGRÁFICA EN EL FRENTE PARA VOLADURA.
- 2.-PERFORACIÓN DEL FRENTE (MARTILLO NEUMÁTICO 38.00 mm).
- 3.-LIMPIEZA DE LOS HOYOS PERFORADOS.
- 4.-CARGA DE EXPLOSIVOS Y CONEXIÓN.
- 5.-VOLADURA Y VENTILACIÓN.
- 6.-LIMPIEZA DE ESCOMBROS (CARGADOR FRONTAL Y VOLQUETES).
- 7.-DESQUINCHE (RETROEXCAVADORA).
- 8.-LIMPIEZA MANUAL DEL PISO Y DEQUINCHE (DOS ROMPEDORES NEUMÁTICOS) PARA CUADRAR LAS ESQUINAS.
- 9.-LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE LA EXCAVACIÓN (DONDE QUEDARÁN COLOCADAS LAS CERCHAS).
- 10.-INSTALACIÓN DE DOS CERCHAS.
- 11.-VERIFICACIÓN TOPOGRÁFICA DEL POSICIONAMIENTO DE LAS CERCHAS.
- 12.-APLICACIÓN DE SHOTCRETE REFORZADO ENTRE LA CERCHA VIEJA Y LAS NUEVAS HASTA CUBRIR TODO EL ESPESOR.
- 13.-MARCACIÓN TOPOGRÁFICA PARA ANCLAJES.
- 14.-PERFORACIÓN PARA ANCLAJES (CON DRILL BROCA 51 mm).
- 15.-COLOCACIÓN DE ANCLAJES CON LECHADA DE CEMENTO (SOBRE CAMIÓN PLATAFORMA).

BÓVEDA COMPLETA:

- 1.-INSTALACIÓN DE DRENAJE (BARBACANAS O GEOMEMBRANAS).
- 2.-COLOCADO DE MALLA EN TODO EL CONTORNO CON TRASLAPES DE DOS CUADROS EN SENTIDO TRANSVERSAL Y UNO EN EL LONGITUDINAL.
- 3.-APLICACIÓN DE SHOTCRETE .



- NOTAS:**
- 1.- LAS MEDIDAS SON EN METROS, EXCEPTO INDICACIÓN CONTRARIA.
 - 2.- EL ACERO ES CA-50, EXCEPTO INDICACIÓN CONTRARIA.

| | | | | |
|-------------|-------|------|-------|--|
| DISEÑO: | | | | |
| VERIFICO: | | | | |
| DIBUJO: | | | | |
| PROFESIONAL | FECHA | REV. | FECHA | |

ESTUDIO DEFINITIVO DEL CORREDOR VIAL INTEROCEÁNICO SUR TRAMO AZANGARO - PUENTE INAMBARI

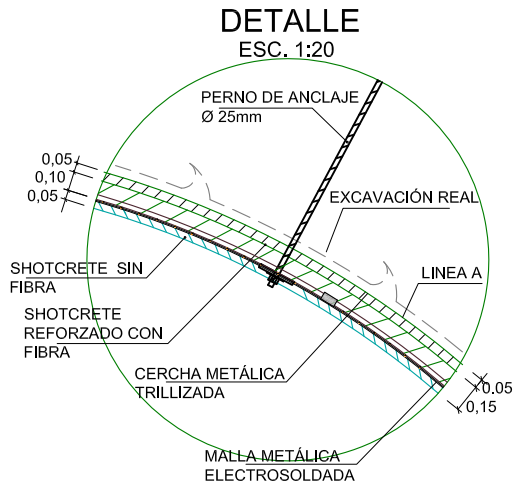
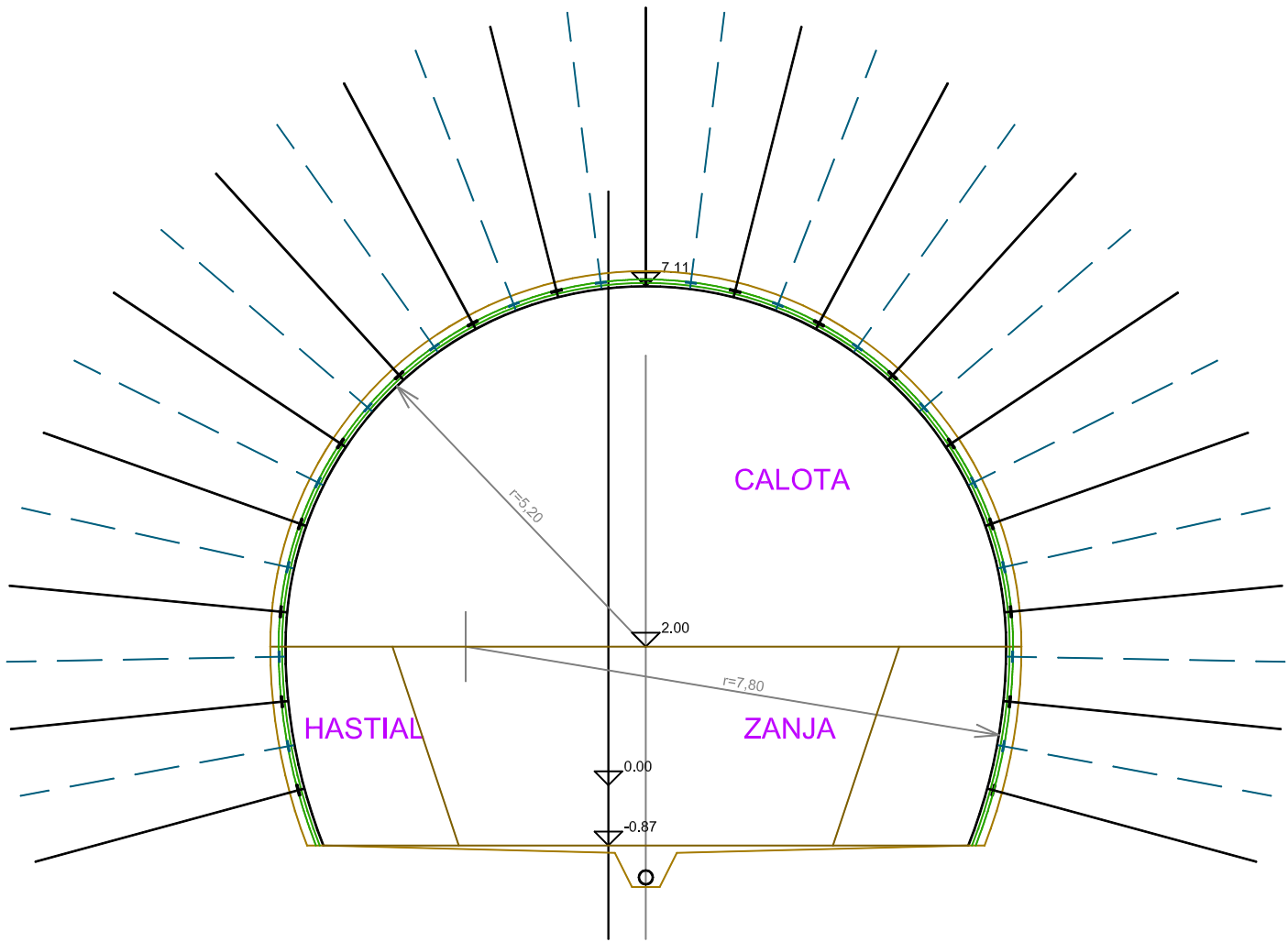
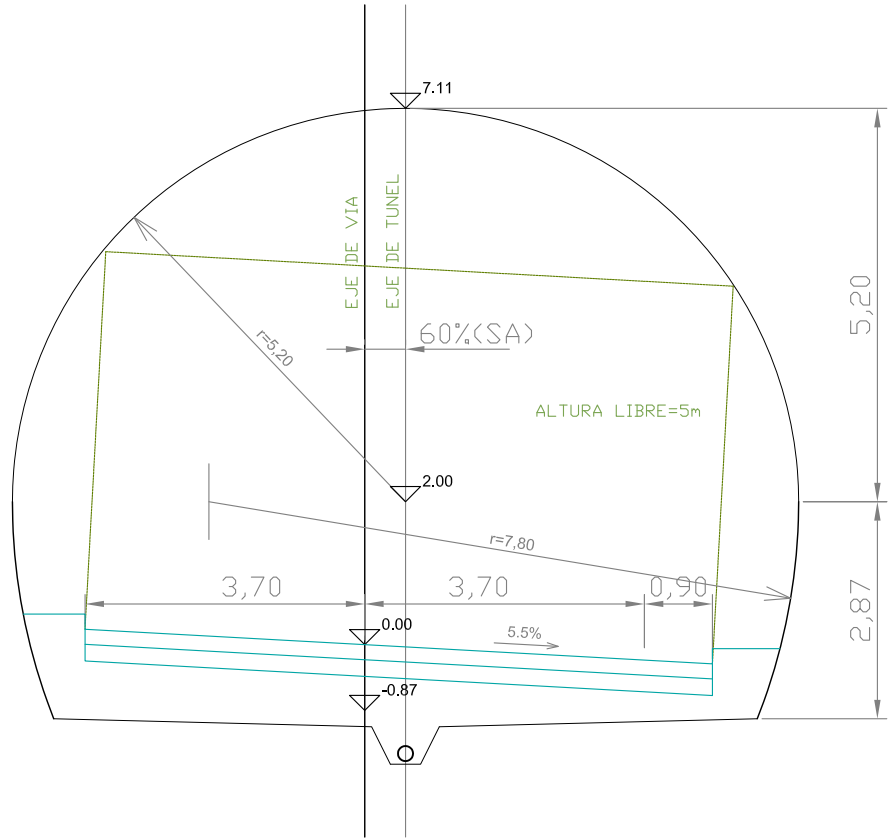
PROYECTO: SECTOR CRÍTICO - TÚNEL WAYRASENCCA SUBTERRÁNEO CATEGORÍA DE SOSTENIMIENTO 5a

ESCALA: INDICADAS LAM: P-08
FECHA: DICIEMBRE 2014
CÓDIGO: TUNW-SOST5a

ANEXO K

Categoría de sostenimiento 5

Sección tipo V



- SOSTENIMIENTO PRIMARIO:**
 Shotcrete c/fibras (e=10cm)
 Pernos de anclaje 25mm de 4m, separados 1.3x.13m
 Shotcrete c/fibras (e=5cm)
- SOSTENIMIENTO SECUNDARIO:**
 Malla electrosoldada Q246 o similar
 Shotcrete s/fibras (e=5cm)

- SECCIÓN TIPO 5**
 (en curva)
 Material ROCA V-IV
 Avance en calota 1.5
 Avance en destroza 3.0

| | | | | | |
|--------------|------------|----------|------|-------|--|
| DISEÑO: | H. CORONEL | 03-03-11 | | | |
| VERIFICADO: | | 03-03-11 | | | |
| DIBUJO: | E. CAYO | 03-03-11 | | | |
| PROFESIONAL: | | FECHA | REV. | FECHA | |

ESTUDIO DEFINITIVO DEL CORREDOR VIAL
 INTEROCEÁNICO SUR
 TRAMO AZANGARO - PUENTE INAMBARI

PROYECTO:
 SECTOR CRÍTICO - TÚNEL WAYRASENCCA
 SUBTERRÁNEO
 SECCION TIPO 5 - SOSTENIMIENTO

| | | | |
|---------|----------------|------|------|
| ESCALA: | INDICADAS | LAM: | |
| FECHA: | DICIEMBRE 2014 | | P-09 |
| CÓDIGO: | TUNW-SOST5 | | |

Fuente: Departamento de túneles, CCT4, 2012.

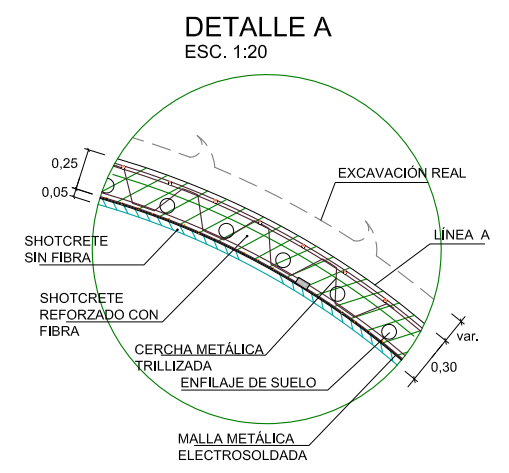
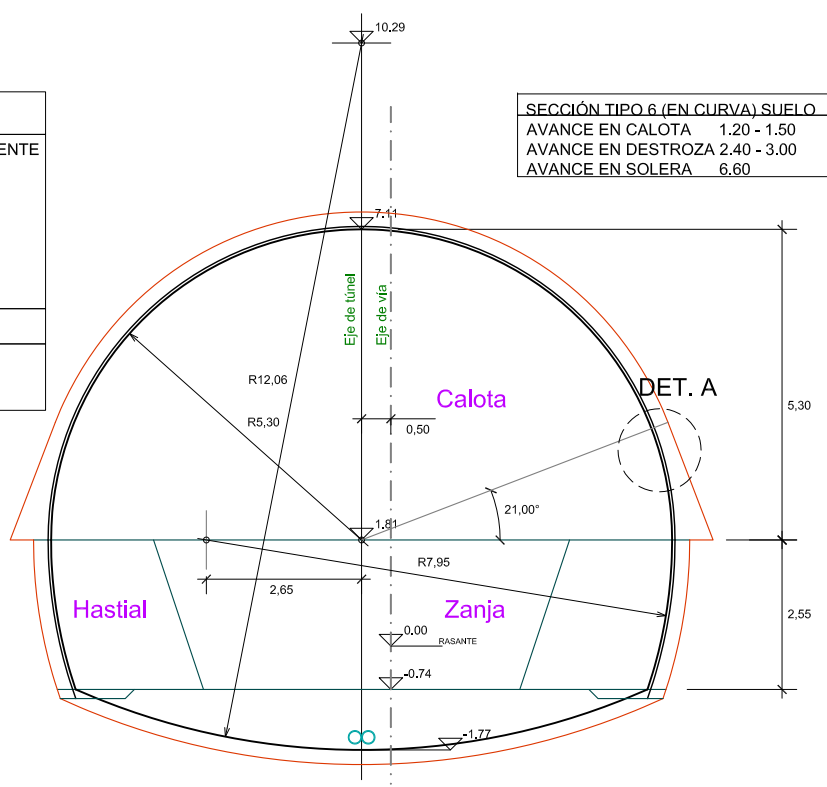
ANEXO L

Categoría de sostenimiento 6

Sección tipo 6 - Suelo

| | |
|--|--|
| SOSTENIMIENTO: | |
| SHOTCRETE REFORZADO PREVENTIVO EN TECHO Y FRENTE | |
| CERCHA METÁLICA CADA 1.00 - 1.50m | |
| SHOTCRETE REFORZADO C/FIBRAS (e=0.15 m) | |
| ENFILAGE PARA SUELOS CADA CUATRO CERCHAS | |
| SHOTCRETE REFORZADO C/FIBRAS (e=0.10 m) | |
| REVESTIMIENTO: | |
| MALLA ELECTROSOLDADA Q246 O SIMILAR | |
| SHOTCRETE S/FIBRAS (e=0.05 m) | |

| | |
|--|-------------|
| SECCIÓN TIPO 6 (EN CURVA) SUELO | |
| AVANCE EN CALOTA | 1.20 - 1.50 |
| AVANCE EN DESTROZA | 2.40 - 3.00 |
| AVANCE EN SOLERA | 6.60 |



REQUERIMIENTOS MÍNIMOS DEL TIPO DE SOSTENIMIENTO:

| | | |
|-----------------------|---|---|
| SHOTCRETE | : | RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAxIAL (28 DIAS) = 28 MPA |
| ACERO DE CONSTRUCCIÓN | : | ACERO A42 FY=420 MPA |
| MALLA ELECTROSOLDADA | : | LÍMITE DE FLUENCIA 500 MPA |

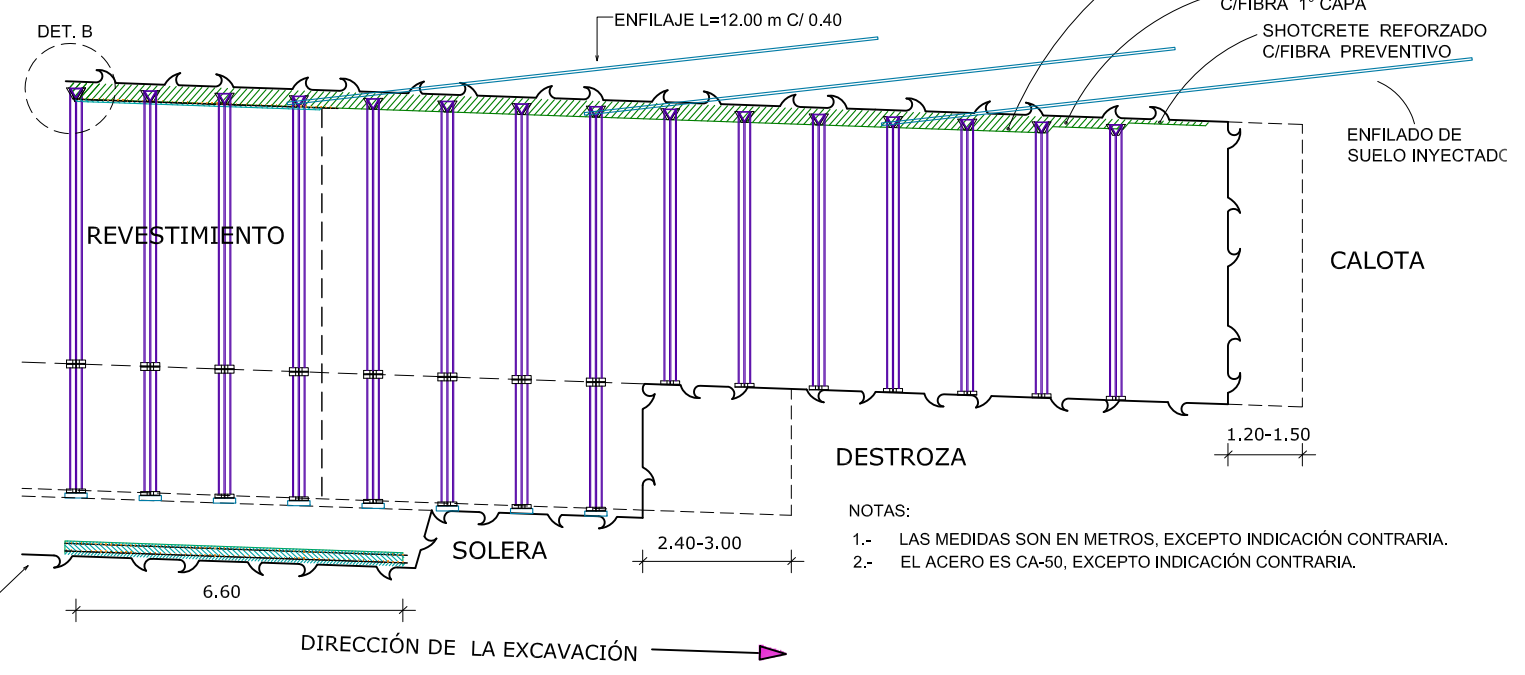
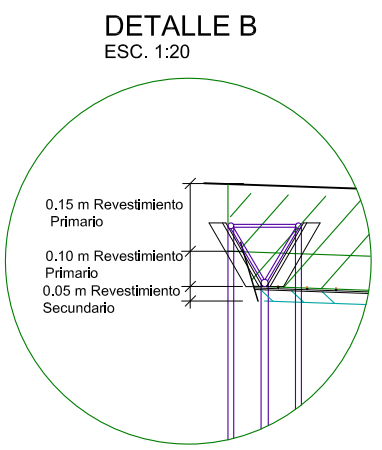
PROCESO CONSTRUCTIVO

- CALOTA (SECCIÓN COMPLETA):**
- 1.-MARCACIÓN TOPOGRÁFICA DEL CONTORNO.
 - 2.-EXCAVACIÓN EN FRÍO (ROMPEDOR HIDRÁULICO).
 - 3.-LIMPIEZA DEL MATERIAL EXCAVADO (CARGADOR FRONTAL Y VOLQUETES).
 - 4.-DESQUINCHE (RETROEXCAVADORA).
 - 5.-APLICACIÓN DE SHOTCRETE REFORZADO PREVENTIVO.
 - 6.-LIMPIEZA MANUAL DEL PISO Y DESQUINCHE (DOS ROMPEDORES NEUMÁTICOS) PARA CUADRAR LAS ESQUINAS.
 - 7.-LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE LA EXCAVACIÓN DONDE QUEDARÁ COLOCADA LA CERCHA.
 - 8.-INSTALACIÓN DE LAS CERCHA METÁLICA.
 - 9.-AMARRE DE ALAMBRE EN LA BARRA INTERNA DE LA CERCHA PARA UNA POSTERIOR SUJECIÓN DE LA MALLA.
 - 10.-VERIFICACIÓN TOPOGRÁFICA DEL POSICIONAMIENTO DE LA CERCHA.
 - 11.-APLICACIÓN DE SHOTCRETE REFORZADO ENTRE LA CERCHA VIEJA Y NUEVA POR LO MENOS HASTA LA MITAD DEL ESPESOR.
 - 12.-MARCACIÓN TOPOGRÁFICA DE ENFILADOS DE SUELO SOBRE LA BARRA INTERNA DE LA CERCHA.
 - 13.-PERFORACIÓN (CON JUMBO) Y COLOCACIÓN DE LOS ENFILADOS (SOBRE CAMIÓN PLATAFORMA).
 - 14.-APLICACIÓN DE SHOTCRETE REFORZADO HASTA CUBRIR TODA EL ESPESOR DE LA CERCHA (EN SECTOR DE ENFILAJE).

- DESTROZA CENTRAL (ZANJA):**
- 1.-MARCACIÓN TOPOGRÁFICA EN EL PISO.
 - 2.-EXCAVACIÓN EN FRÍO (ROMPEDOR HIDRÁULICO).
 - 3.-LIMPIEZA DEL MATERIAL EXCAVADO (CARGADOR FRONTAL Y VOLQUETES).
- DESTROZA LATERAL (HASTIALES):**
- 1.-MARCACIÓN TOPOGRÁFICA DEL CONTORNO EN LA PARED FRONTAL.
 - 2.-EXCAVACIÓN EN FRÍO (ROMPEDOR HIDRÁULICO).
 - 3.-LIMPIEZA DE ESCOMBROS (CARGADOR FRONTAL Y VOLQUETES).
 - 4.-DESQUINCHE (RETROEXCAVADORA).
 - 5.-APLICACIÓN DE SHOTCRETE REFORZADO PREVENTIVO.
 - 6.-LIMPIEZA MANUAL DEL PISO Y DEQUINCHE (DOS ROMPEDORES NEUMÁTICOS) PARA CUADRAR LAS ESQUINAS.
 - 7.-LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE LA EXCAVACIÓN DONDE QUEDARÁN COLOCADAS LAS CERCHAS.
 - 8.-INSTALACIÓN DE LAS CERCHAS METÁLICAS.
 - 9.-AMARRE DE ALAMBRE EN LA BARRA INTERNA DE LA CERCHA PARA UNA POSTERIOR SUJECIÓN DE LA MALLA.
 - 10.-VERIFICACIÓN TOPOGRÁFICA DEL POSICIONAMIENTO DE LAS CERCHAS.
 - 11.-APLICACIÓN DE SHOTCRETE REFORZADO ENTRE LA CERCHA VIEJA Y LAS NUEVAS HASTA CUBRIR TODO EL ESPESOR.

- SOLERA:**
- 1.-MARCACIÓN TOPOGRÁFICA DE PROFUNDIDADES DE CORTE EN EL PISO .
 - 2.-EXCAVACIÓN EN FRÍO (ROMPEDOR HIDRÁULICO).
 - 3.-LIMPIEZA DEL MATERIAL EXCAVADO (RETROEXCAVADORA Y VOLQUETES).
 - 4.-DESQUINCHE (RETROEXCAVADORA) .
 - 5.-LIMPIEZA MANUAL Y PREPARACIÓN DEL PISO DE FUNDACIÓN.
 - 6.-COLOCACIÓN DE MALLA METÁLICA SOBRE TACOS.
 - 7.-APLICACIÓN DE SHOTCRETE.
 - 8.-COLOCACIÓN DE MALLA METÁLICA DEJANDO ESPACIO PARA CONTINUAR CON LA FASE SIGUIENTE .
 - 9.-APLICACIÓN DE SHOTCRETE .

- BÓVEDA COMPLETA:**
- 1.-INSTALACIÓN DEL DRENAJE (BARBACANAS Y/O GEOMEMBRANAS).
 - 2.-COLOCADO DE MALLA METÁLICA EN TODO EL CONTORNO CON TRASLAPES DE DOS CUADROS EN SENTIDO TRANSVERSAL Y UNO EN EL LONGITUDINAL.
 - 3.-APLICACIÓN DE SHOTCRETE EN TRAMOS DE 20 m.



- NOTAS:**
- 1.- LAS MEDIDAS SON EN METROS, EXCEPTO INDICACIÓN CONTRARIA.
 - 2.- EL ACERO ES CA-50, EXCEPTO INDICACIÓN CONTRARIA.

| | | | | |
|--|-------------------------|---|--|---|
| DISEÑO: VERIFICADO: DIBUJO: PROFESIONAL | FECHA: REV. FECHA | ESTUDIO DEFINITIVO DEL CORREDOR VIAL INTEROCEÁNICO SUR TRAMO AZANGARO - PUENTE INAMBARI | PROYECTO: SECTOR CRÍTICO - TÚNEL WAYRASENCCA SUBTERRÁNEO CATEGORÍA DE SOSTENIMIENTO 6 | ESCALA: INDICADAS LAM: P-10 FECHA : DICIEMBRE 2014 CODIGO: TUNW-SOST6 |
|--|-------------------------|---|--|---|

Fuente: Departamento de túneles, CCT4, 2012.

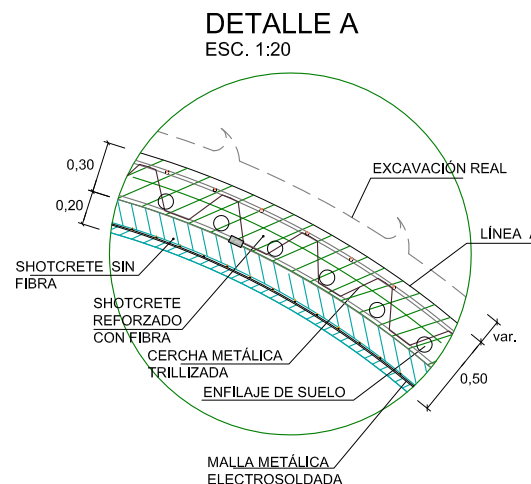
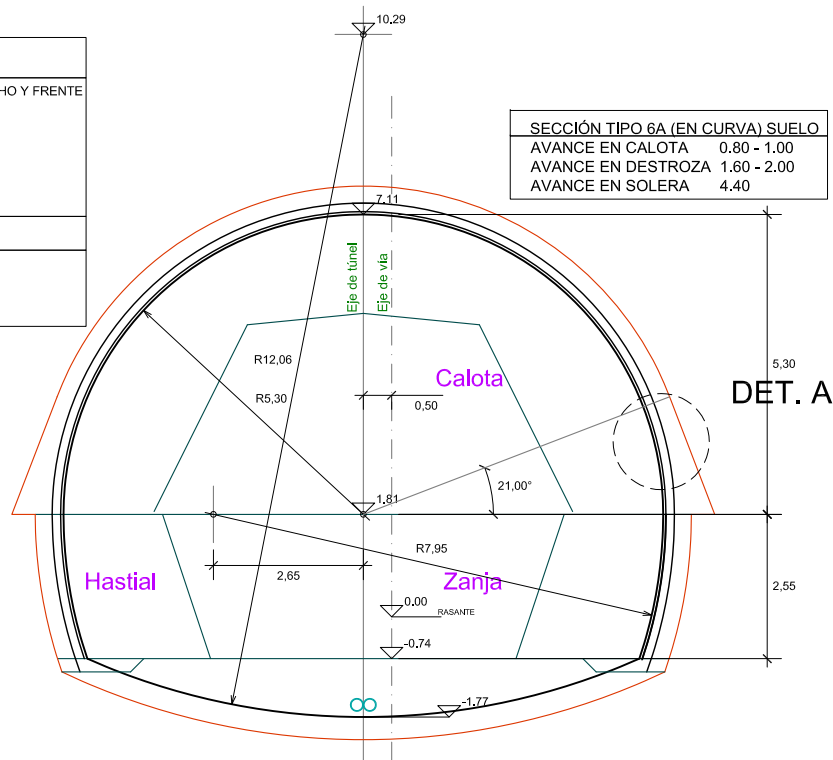
ANEXO M

Categoría de sostenimiento 6a

Sección tipo 6a - Suelo (zon deporta)

| | |
|--|--|
| SOSTENIMIENTO: | |
| SHOTCRETE REFORZADO PREVENTIVO EN TECHO Y FRENTE | |
| CERCHA METÁLICA CADA 0.80 - 1.00 m | |
| SHOTCRETE REFORZADO C/FIBRAS (e=0,20 m) | |
| ENFILAJE PARA SUELOS CADA SEIS CERCHAS | |
| SHOTCRETE REFORZADO C/FIBRAS (e=0,10 m) | |
| REVESTIMIENTO: | |
| SHOTCRETE S/FIBRA (e=0,15 m) | |
| MALLA ELECTROSOLDADA Q295 O SIMILAR | |
| SHOTCRETE S/FIBRAS (e=0,05 m) | |

| | |
|---|-------------|
| SECCIÓN TIPO 6A (EN CURVA) SUELO | |
| AVANCE EN CALOTA | 0.80 - 1.00 |
| AVANCE EN DESTROZA | 1.60 - 2.00 |
| AVANCE EN SOLERA | 4.40 |



REQUERIMIENTOS MÍNIMOS DEL TIPO DE SOSTENIMIENTO:

| | | |
|-----------------------|---|---|
| SHOTCRETE | : | RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAXIAL (28 DIAS) = 28 MPA |
| ACERO DE CONSTRUCCIÓN | : | ACERO A42 FY=420 MPA |
| MALLA ELECTROSOLDADA | : | LÍMITE DE FLUENCIA 500 MPA |

PROCESO CONSTRUCTIVO

CALOTA (SECCIÓN MANTENIENDO NÚCLEO DE APOYO):

- 1.-MARCACIÓN TOPOGRÁFICA DEL CONTORNO.
- 2.-EXCAVACIÓN EN FRÍO (ROMPEDOR HIDRÁULICO).
- 3.-LIMPIEZA DEL MATERIAL EXCAVADO (CARGADOR FRONTAL Y VOLQUETES).
- 4.-DESQUINCHE (RETROEXCAVADORA).
- 5.-APLICACIÓN DE SHOTCRETE REFORZADO PREVENTIVO EN EL TECHO Y EN LA PARED FRONTAL.
- 6.-LIMPIEZA MANUAL DEL PISO Y DESQUINCHE (DOS ROMPEDORES NEUMÁTICOS) PARA CUADRAR LAS ESQUINAS.
- 7.-LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE LA EXCAVACIÓN DONDE QUEDARÁ COLOCADA LA CERCHA.
- 8.-INSTALACIÓN DE LA CERCHA METÁLICA.
- 9.-AMARRE DE ALAMBRE EN LA BARRA INTERNA DE LA CERCHA PARA UNA POSTERIOR SUJECIÓN DE LA MALLA.
- 10.-VERIFICACIÓN TOPOGRÁFICA DEL POSICIONAMIENTO DE LA CERCHA.
- 11.-APLICACIÓN DE SHOTCRETE REFORZADO ENTRE LA CERCHA VIEJA Y NUEVA POR LO MENOS HASTA LA MITAD DEL ESPESOR.
- 12.-MARCACIÓN TOPOGRÁFICA DE ENFILADOS DE SUELO SOBRE LA BARRA INTERNA DE LA CERCHA.
- 13.-PERFORACIÓN (CON JUMBO), COLOCACIÓN E INYECCIÓN DE LOS ENFILADOS (SOBRE CAMIÓN PLATAFORMA).
- 14.-APLICACIÓN DE SHOTCRETE REFORZADO HASTA CUBRIR TODA EL ALMA DE LA CERCHA (EN SECTOR DE ENFILAJE).

DESTROZA CENTRAL(ZANJA):

- 1.-MARCACIÓN TOPOGRÁFICA EN EL PISO.
- 2.-EXCAVACIÓN EN FRÍO (ROMPEDOR HIDRÁULICO).
- 3.-LIMPIEZA DEL MATERIAL EXCAVADO (CARGADOR FRONTAL Y VOLQUETES).

DESTROZA LATERAL (HASTIALES):

- 1.-MARCACIÓN TOPOGRÁFICA DEL CONTORNO EN LA PARED FRONTAL.
- 2.-EXCAVACIÓN EN FRÍO (ROMPEDOR HIDRÁULICO).
- 3.-LIMPIEZA DE ESCOMBROS (CARGADOR FRONTAL Y VOLQUETES).
- 4.-DESQUINCHE (RETROEXCAVADORA).
- 5.-APLICACIÓN DE SHOTCRETE REFORZADO PREVENTIVO.
- 6.-LIMPIEZA MANUAL DEL PISO Y DEQUINCHE (DOS ROMPEDORES NEUMÁTICOS) PARA CUADRAR LAS ESQUINAS.
- 7.-LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE LA EXCAVACIÓN DONDE QUEDARÁN COLOCADAS LAS CERCHAS.
- 8.-INSTALACIÓN DE LAS CERCHAS METÁLICAS.
- 9.-AMARRE DE ALAMBRE EN LA BARRA INTERNA DE LA CERCHA PARA UNA POSTERIOR SUJECIÓN DE LA MALLA.
- 10.-VERIFICACIÓN TOPOGRÁFICA DEL POSICIONAMIENTO DE LAS CERCHAS.
- 11.-APLICACIÓN DE SHOTCRETE REFORZADO ENTRE LA CERCHA VIEJA Y LAS NUEVAS HASTA CUBRIR TODO EL ESPESOR.

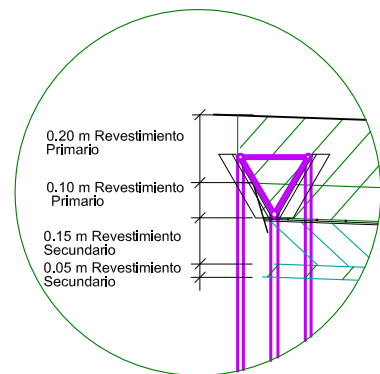
SOLERA:

- 1.-MARCACIÓN TOPOGRÁFICA DE PROFUNDIDADES DE CORTE EN EL PISO.
- 2.-EXCAVACIÓN EN FRÍO (ROMPEDOR HIDRÁULICO).
- 3.-LIMPIEZA DEL MATERIAL EXCAVADO (RETROEXCAVADORA Y VOLQUETES).
- 4.-DESQUINCHE (RETROEXCAVADORA).
- 5.-LIMPIEZA MANUAL Y PREPARACIÓN DEL PISO DE FUNDACIÓN.
- 6.-COLOCACIÓN DE MALLA METÁLICA SOBRE TACOS.
- 7.-APLICACIÓN DE SHOTCRETE.
- 8.-COLOCACIÓN DE MALLA METÁLICA DEJANDO ESPACIO PARA CONTINUAR CON LA FASE SIGUIENTE..
- 9.-APLICACIÓN DE SHOTCRETE.

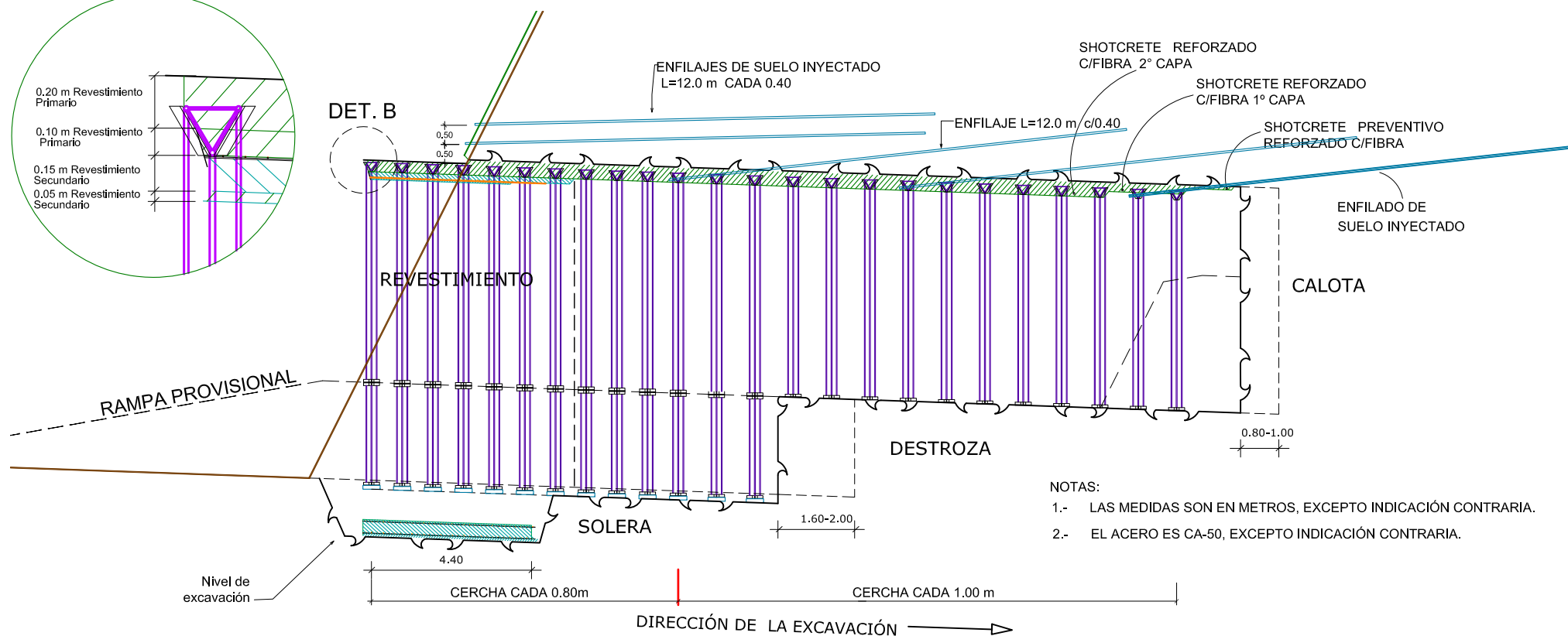
BÓVEDA COMPLETA:

- 1.-SOLDADO DE CALIBRADORES EN LA BARRA INTERNA DE LAS CERCHAS SEPARADOS A 1.500 m EN SENTIDO TRANSVERSAL.
- 2.-APLICACIÓN DE SHOTCRETE REFORZADO EN TRAMOS DE 20 m.
- 3.-INSTALACIÓN DEL DRENAJE (BARBACANAS Y/O GEOMEMBRANAS).
- 4.-COLOCADO DE MALLA METÁLICA EN TODO EL CONTORNO CON TRASLAPES DE DOS CUADROS EN SENTIDO TRANSVERSAL Y UNO EN EL LONGITUDINAL.
- 5.-APLICACIÓN DE SHOTCRETE EN TRAMOS DE 20 m.

DETALLE B ESC. 1:20



DET. B



NOTAS:

- 1.- LAS MEDIDAS SON EN METROS, EXCEPTO INDICACIÓN CONTRARIA.
- 2.- EL ACERO ES CA-50, EXCEPTO INDICACIÓN CONTRARIA.

| | | | |
|---|---|---|---|
| DISEÑO: _____ VERIFICADO: _____ DIBUJO: _____ PROFESIONAL: _____ | ESTUDIO DEFINITIVO DEL CORREDOR VIAL INTEROCEÁNICO SUR TRAMO AZANGARO - PUENTE INAMBARI | PROYECTO: SECTOR CRÍTICO - TÚNEL WAYRASENCCA SUBTERRANEO CATEGORÍA DE SOSTENIMIENTO 6A | ESCALA: INDICADAS FECHA: DICIEMBRE 2014 CÓDIGO: TUNW-SOST6a |
|---|---|---|---|