



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

CAMPUS GUANAJUATO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN MINAS, METALURGIA Y GEOLOGÍA

**“ESTABLECIMIENTO DE LOS
PARÁMETROS DE DISEÑO PARA LA
EXCAVACIÓN Y ESTABILIZACIÓN DEL
TÚNEL CHUVEJE”**

TRABAJO DE TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO DE MINAS

PRESENTA:

ZENDEJAS MARMOLEJO JUAN FERNANDO

GUANAJUATO, GTO. ABRIL 2015.

Donado 2016

CG00057499/16

G408

T
2015
MSR

Guanajuato, Gto., marzo de 2015

Asunto: **Aprobación de Trabajo de Titulación.**

DR. LUIS ENRIQUE MENDOZA PUGA
DIRECTOR DE DIVISION DE INGENIERIAS
CAMPUS GUANAJUATO
P R E S E N T E.

Los que suscriben, revisores del trabajo, que como requisito para obtención de Título Profesional, fue presentado a revisión por:

C. Juan Fernando Zendejas Marmolejo

Pasantes del Programa Educativo de Ingeniero de Minas de la División de Ingenierías del Departamento de Ingeniería en Minas, Metalurgia y Geología de la Universidad de Guanajuato, en la modalidad de **Trabajo de Tesis**, con el Título:

"Establecimiento de los Parámetros de Diseño para la Excavación Y Estabilización del Túnel Chuveje"

Una vez leído, analizado y revisado el trabajo, ha sido aprobado para que continúen con los trámites requeridos para solicitar fecha y sustenten examen.

Sin más por el momento reciba un cordial saludo.

Atentamente
"La Verdad Os Hará Libres"

M.C. B. Ricardo Marín Herrera
Director del Trabajo



Ing. Víctor Manuel Quezada Aguilera
Sinodal del Trabajo



Dra. Yanmei Li
Sinodal del Trabajo

C.c.p.- Archivo.

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CAMPUS GUANAJUATO
Ex-Hacienda San Matías s/n, 36000, Guanajuato, Gto., Tels. (473) 732 22 91, Fax (473) 732 38 64

AGRADECIMIENTOS

A mi amada hija, Arled.

Gracias por estar conmigo y cambiar mi vida, por ser el motor que me impulsa a levantarme cada mañana, por ser mi motivación en los momentos buenos y malos, por ser mi luz y mi alegría.

A mi adorada y hermosa esposa, Marisol.

Por ser mi amiga y amante. Por su apoyo incondicional en todo, ya que has sido el impulso para completar mis objetivos y metas, el soporte de mis esperanzas. Porque tu fe en mí y tu espíritu de lucha, de toda una guerrera, siguen siendo la fortaleza de mi alma para apuntar más allá de lo imposible. Porque cada vez que caemos, está ahí, conmigo, para alentarme a levantarme firme y decidido, siempre juntos. Por lo orgulloso que me siento por ti. Porque te amo.

A mis padres, Juan y Teresa.

Con todo mi cariño y mi amor para ellos que hicieron todo en la vida para que yo pudiera lograr mis sueños, por motivarme y darme la mano cuando sentía que el camino se terminaba, por enseñarme y formarme con los hábitos y valores para salir adelante. Los quiero mucho. Gracias.

A mi hermano, Néstor.

Por todo el apoyo incondicional que hacia mi persona y pequeña familia siempre ha brindado. Muchas Gracias.

A mis suegros, Juan y Maria.

Por el apoyo hacia mi persona, mi esposa e hija en las buenas y las malas, muchas Gracias.

A mi familia

Por su apoyo incondicional.

ÍNDICE

| | PÁGINA |
|--|---------------|
| CAPITULO 1 | |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| CAPITULO 2 | |
| OBJETIVO DE TESIS | 4 |
| CAPITULO 3 | |
| GENERALIDADES | 5 |
| 3.1 PROYECTO "LA GLORIA CHUVEJE" | 5 |
| 3.2 LOCALIZACIÓN Y VÍAS DE ACCESO | 7 |
| 3.2.1 LOCALIZACIÓN | 7 |
| 3.2.2 ACCESO | 8 |
| 3.3 FISIOGRAFÍA Y CLIMATOLOGÍA | 9 |
| 3.3.1 FISIOGRAFÍA | 9 |
| 3.3.2 CLIMA | 10 |
| 3.3.3 HIDROLOGÍA | 11 |
| CAPITULO 4 | |
| ENTORNO GEOLÓGICO | 13 |
| 4.1 GEOLOGÍA REGIONAL | 13 |
| 4.2 GEOLOGÍA LOCAL | 15 |
| 4.2.1 ESTRATIGRAFÍA | 16 |
| 4.2.1.1 FORMACIÓN "EL DOCTOR" | 17 |
| 4.2.1.2 FORMACIÓN "SOYATAL" | 20 |
| CAPITULO 5 | |
| MARCO TEÓRICO | 21 |
| 5.1 INTRODUCCIÓN | 21 |
| 5.2 PRESENTE Y FUTURO DEL TÚNEL Y EL ESPACIO SUBTERRÁNEO | 22 |
| 5.3 EVOLUCIÓN TECNOLÓGICA E INNOVACIÓN EN EL ARTE DE LOS TÚNELES | 22 |
| 5.3.1 LA FUERZA BRUTA Y LAS PRIMERAS HERRAMIENTAS RUIMENTARIAS | 22 |
| 5.3.2 LA TÉCNICA DEL FUEGO | 23 |
| 5.3.3 LA MODERNA INDUSTRIA DE LOS TÚNELES | 24 |
| 5.3.4 PERFORACIÓN CON EXPLOSIVOS | 25 |
| 5.3.5 TÚNELES EN ROCA; PERFORADORA ACCIONADA POR AIRE COMPRIMIDO | 25 |
| 5.4 PRINCIPALES FACTORES EN EL PROGRESO DE LA INGENIERÍA SUBTERRÁNEA | 26 |
| 5.4.1 EQUIPAMIENTO Y MAQUINARIA | 26 |
| 5.4.2 MÉTODOS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN | 28 |
| 5.5 GEOTECNIA | 30 |
| 5.5.1 RQD (ROCK QUALITY DESIGNATION) | 30 |
| 5.5.2 RMR (ROCK MASS RATING) | 31 |
| 5.5.3 Q (ROCK QUALITY FOR TUNNELING) | 32 |

| | |
|---|----|
| CAPITULO 6 | |
| METODOLOGÍA DE TRABAJO | 35 |
| CAPITULO 7 | |
| RESULTADOS | 36 |
| 7.1 RQD (ROCK QUALITY DESIGNATION) | 36 |
| 7.2 RMR (ROCK MASS RATING) | 37 |
| 7.3 Q (ROCK QUALITY FOR TUNNELING) | 39 |
| 7.4 TIPO DE ROCA | 40 |
| 7.5 SECCIÓN DE OBRA | 40 |
| 7.6 SOPORTE DE OBRA | 41 |
| 7.7 TÉCNICA DE TUNELERO | 43 |
| 7.8 CALCULO DE PLANTILLA DE BARRENACIÓN | 44 |
| 7.9 FACTOR DE CARGA | 46 |
| CAPITULO 8 | |
| CONCLUSIONES | 49 |

FIGURAS

| | <u>PÁGINA</u> |
|--|---------------|
| La Gloria | 6 |
| Chuveje | 6 |
| Tramo del Acueducto "La Gloria-Chuveje" | 7 |
| Ubicación Municipal de Jalpan en el Estado de Querétaro | 8 |
| Fisiografía del Estado de Querétaro | 9 |
| Clasificación Climática en Zona de Estudio | 10 |
| Mapa de Precipitación Media Anual | 11 |
| Presa de Jalpan, principal vaso de almacenamiento de la Zona Serrana | 12 |
| Vista de la Cuenca de Jalpan y Cabecera Municipal | 12 |
| Sistemas Montañosos de México | 13 |
| Lineamientos y Plegamientos en la Zona Serrana | 14 |
| Calizas de la Formación El Doctor (A y B) | 18 |
| Fotografías de Grutas Las Tinajas (A y B) | 19 |
| La Técnica del Fuego, según grabado de "De Re Metallica" | 23 |
| Maquina Tuneladora (TBM) | 27 |
| Maquina Rozadora | 27 |
| Fases del Nuevo Método Austriaco | 29 |
| Anclaje en la Obra (Sección Transversal) | 42 |
| Anclaje en la Obra (Vista en Planta) | 43 |
| Diagrama de la Plantilla de Barrenación | 44 |
| Plantilla de Barrenación | 48 |
| Varilla Corrugada Cementada o con Resina | 50 |

TABLAS

| | <u>PÁGINA</u> |
|--|---------------|
| Principales Litofacies de la Formación "El Doctor" | 16 |
| Clasificación de Macizos Rocosos (RQD) | 31 |
| División del Macizo de acuerdo al Índice Q | 33 |
| Dimensión Equivalente de acuerdo al Tipo de Excavación | 34 |
| Calidad de la Roca, Método RQD | 36 |
| Parámetros Geotécnicos para el Cálculo del RMR | 37 |
| Resultados de Pruebas de Resistencia | 38 |
| Calidad de la Roca, Método RMR | 39 |
| Calidad de la Roca, Método Q | 40 |
| Comparativo de Calidad de la Roca | 47 |
| Factor de Carga | 51 |
| Datos Técnicos del Anclaje | |

ANEXOS

- 1 Planta Geología y Secciones Longitudinales, Área Jalpan
- 2 Columna Litoestratigráfica, Área Chuveje
- 3 Clasificación RMR
- 4 Relación entre "De" de una Excavación Subterránea sin Soporte y el Índice Q
- 5 Categorías de Soporte Estimado basada en el Índice Q

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

Algunos asentamientos humanos en México han poblado áreas en donde el agua escasea, para lograr un equilibrio entre dicho déficit y los asentamientos es necesario efectuar un gran esfuerzo para desarrollar la infraestructura requerida que permita canalizar los escurrimientos de los cauces de los ríos hacia las poblaciones que tienen déficit en el abasto del líquido de mala calidad.

El abastecimiento de agua potable además de insuficiente implica riesgos, representa un problema constante sobre la salud de la población, se estima que 80% de todas las enfermedades en el mundo en desarrollo, son causadas por la falta de agua limpia y falta de saneamiento adecuado, siendo ésta una de las causas principales de enfermedades y muertes, sobre todo en los niños.

Las dimensiones de los impactos a la salud en nuestras poblaciones por no tener acceso a agua potable son innegables. A pesar de los aportes en materia de agua potable del progreso científico y tecnológico, el agua sigue siendo un problema; por esta razón, en el contexto de la creación de un mundo cada vez más globalizado, no podemos más que adoptar una política para organizar los esfuerzos que confluyen en la satisfacción de esta necesidad básica para todos.

El agua potable es un recurso vital para el ser humano y el derecho a contar con ella, forma parte de los derechos humanos oficialmente reconocidos por las organizaciones internacionales. Nunca se ha considerado el agua como lo que realmente es: un bien común universal y patrimonio vital de la humanidad. El acceso al agua debe ser considerado como un derecho básico, individual y colectivamente inalienable.

Frente a esto, se debe optar por una nueva cultura de desarrollo sostenible en materia de agua. Si pensamos que el bosque no es un simple almacén de madera, entonces nuestros ríos, acuíferos, humedales y lagos son mucho más que simples almacenes de agua. Debemos entenderlos como valores sociales, culturales y ambientales. El integrar este conjunto de valores es enfocar el tratamiento de nuestros ecosistemas para un nuevo Derecho Humano al Agua.

El diseño de excavaciones subterráneas es, en gran medida, el diseño de los sistemas subterráneos de ademado, los cuales pueden abarcar desde cero refuerzo para excavaciones provisionales mineras, o hasta el recubrimiento total con concreto lanzado, anclas, cables, malla para excavaciones permanentes.

El propósito principal de cualquier diseño de excavación subterránea debe utilizar la roca misma como material estructural principal, provocando la menor perturbación posible durante el proceso de excavación y añadiendo el mínimo posible de ademe.

En 1964 Deere propuso un índice cuantitativo de la calidad de la roca, basado en la recuperación de núcleos con perforación a

diamante, llamado Rock Quality Designation (RQD) (Índice de Calidad de la Roca).

Fue necesario hacer una combinación de los factores como el RQD, la influencia de los rellenos arcillosos y la meteorización por la South African Council for Scientific and Industrial Research (CSIR) (Consejo Sud-Africano para la Investigación Científica e Industrial), también conocido como RMR (Rock Mass Rating). Bieniawski modificó este sistema eliminando el grado de meteorización e incluyendo otro; el estado de las fisuras (separación y continuidad). El parámetro de orientación del rumbo y el echado ya no era básico, sino un ajuste a la evaluación después de evaluar los parámetros básicos.

Otro índice fue propuesto para determinar la calidad del macizo rocoso fue propuesto por Barton, Lien y Lunde del Norwegian Geotechnical Institute (NGI) (Instituto de Geotecnia de Noruega), llamado Índice Q, definido por tres factores; el tamaño de los bloques, la resistencia al esfuerzo cortante entre bloques y los esfuerzos activos.

Capítulo 2

OBJETIVOS DE TESIS

Generales:

- Establecer los parámetros de diseño para la excavación y estabilización a largo plazo del túnel Chuveje.

Particulares:

- Cálculo de RQD (Rock Quality Designation).
- Cálculo de RMR (Rock Mass Rating).
- Cálculo de Q (Rock Quality for Tunneling).
- Determinación de Tipo de Roca.
- Cálculo de Sección de Obra.
- Determinación de Tipo de Soporte de Obra.
- Cálculo de Plantilla de Barrenación y sus Factores de Carga.

Capítulo 3

GENERALIDADES

3.1 PROYECTO "LA GLORIA-CHUVEJE"

Bajo condiciones similares a las registradas por poblaciones Latinoamericanas, la cuarta parte de estas se encuentra asentada en regiones que presentan elevaciones por encima de los 2,000 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) donde sólo un 4% del escurrimiento de este vital líquido, en contraste, debajo de los 500 metros se da el 50% del escurrimiento del mismo. Jalpan de Serra tiene elevaciones de hasta 1,800 m. s. n. m. en la Zona Serrana.

Por la demanda existente y futura en la Zona Serrana de Jalpan, la Comisión Estatal de Aguas del Estado de Querétaro (CEA Querétaro) propone dentro de una de sus estrategias el desarrollo de infraestructura dividida en dos principales proyectos (Figura 3):

- Presa Derivadora "La Gloria"
- Túnel Chuveje.

Esto con el propósito de eliminar los problemas existentes y satisfacer la demanda creciente en la Zona Serrana de Jalpan.



Figura 1. La Gloria



Figura 2. Chuveje

El Proyecto Chuveje se localiza en el Municipio de Jalpan de Serra, cercano a la Laguna de Pitzquintla y constituye un túnel que presentará una longitud aproximada de 532 metros.

Mientras que el Proyecto La Gloria consistirá en una Presa Derivadora situada en el Municipio de Pinal de Amoles, sobre la corriente principal del río Escanela.

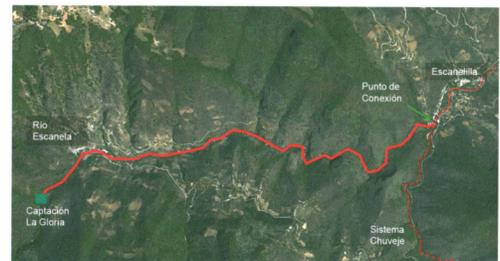


Figura 3. Tramo del Acueducto "La Gloria-Chuveje"

3.2 LOCALIZACIÓN Y VÍAS DE ACCESO

3.2.1 LOCALIZACIÓN

El Proyecto Chuveje, se localiza en el "Municipio de Jalpan de Serra" (Figura 4), el cual se encuentra a 190 kilómetros de la ciudad de Querétaro; presenta una superficie de 1,185 m² lo que constituye el 10% del territorio del Estado y cuenta con más de 22,000 habitantes.



Figura 4. Ubicación Municipal de Jalpan en el Estado de Querétaro

3.2.2 ACCESO.

El acceso al Proyecto Chuveje se efectúa por la carretera Estatal 120, que conduce de Querétaro-Jalpan, desviándose en el kilómetro 176 (Puerto de Ánimas) para tomar una carretera de terracería que conduce a Rincón de Pitzquintla.

De Rincón de Pitzquintla al proyecto, se llega por una vereda que está aproximadamente a 2 km, que a futuro debe ser reparada para transitar con equipo pesado, camiones y camionetas.

Cuenta con un segundo acceso por la parte sur del poblado de Huajales, que también se encuentra en condiciones, siendo este

acceso un poco más largo que el primero con la ventaja que posee pendientes menores.

3.3 FISIOGRAFÍA Y CLIMATOLOGÍA

3.3.1 FISIOGRAFÍA

El Municipio de Jalpan se encuentra ubicado en el extremo septentrional del estado de Querétaro (Figura 5), por lo que presenta una marcada influencia geomorfológica y geológica de la Sierra Madre Oriental, localmente a esta zona de Jalpan de Serra se le conoce como Sub-provincia del Carso Huasteco.



Figura 5. Fisiografía del Estado de Querétaro

Estas zonas, constituyen un conjunto de sierras elevadas que van desde los 500 m.s.n.m. en sus partes bajas hasta zonas de más de 2,000 m.s.n.m.

3.3.2 CLIMA

La predominancia de los tipos de clima en el área se puede apreciar en el esquema mostrado abajo (Figura 6), es una de las regiones con mayor combinación de climas.



Figura 6. Clasificación Climática en Zona de Estudio.

Podemos decir que el clima que predomina en Jalpan lo constituye el semicálido subhúmedo con lluvias en verano, que está caracterizado por precipitaciones en los meses de verano, con precipitaciones medias entre los 500-1,000 mm/año.

3.3.3 HIDROLOGÍA

La principal cuenca es la del río Tamuín o Tambaón de la región Hidrológica del Río Pánuco, que presenta los afluentes de los ríos Ayutla, Santamaría y Jalpan, este último con su principal vaso de almacenamiento, la Presa de Jalpan. (Figura 8).

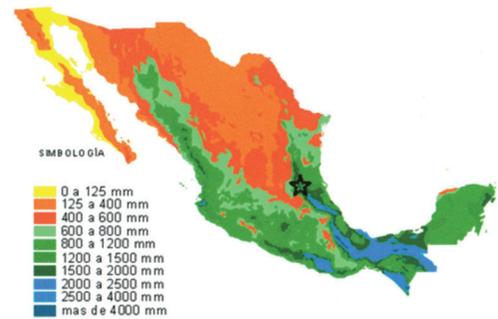


Figura 7. Mapa de Precipitación Media Anual.



Figura 8. Presa de Jalpan, principal vaso de almacenamiento de la Zona Serrana.



Figura 9. Vista de la Cuenca de Jalpan, Cabecera Municipal.

Capítulo

4

ENTORNO GEOLÓGICO

4.1 GEOLOGÍA REGIONAL

Como se mencionó anteriormente, el área la constituye una serie de sierras y cuencas (Figura 5) en las cuales la cuenca más cercana y de mayor relevancia a la zona, se localiza en el poblado de Jalpan, esta se encuentra rellena por sedimentos del cuaternario, mientras que en el flanco izquierdo de la zona serrana se presentan aflorando secuencias carbonatadas.

La orientación de los ejes en los sinclinales y anticlinales, presentan una dirección Norte-Noroeste con predominio al NW, alineados con la dirección de la Sierra Madre Oriental (SMO), (Figura 10)



Figuras 10. Sistemas Montañosos de México.

La Figura 10 muestra los rasgos macroestructurales bien definidos que presenta la SMO.

Al observar las imágenes de la Figura 10 y la situación estructural que muestran los lineamientos y plegamientos de la Zona Serrana (Figura 11) se observa la coincidencia en la dirección de la SMO y la dirección de los ejes de plegamiento.



Figura 11. Lineamientos y Plegamientos en la Zona Serrana.

En buena parte de la SMO y en la zona de estudio afloran extensamente unidades carbonatadas que se formaron en el Mesozoico (en el Cretácico existió un Miogeosinclinal que en su extremo suroriental propició la formación de grandes depósitos de carbonatos).

Los depósitos de carbonatos en estas cuencas (López Ramos, 1983; Echegoyen R., Vogel F., y Marín R., 2006) presentaron varios ambientes deposicionales, en dichos modelos deposicionales, se muestra la variación desde el ambiente marino profundo hasta los ambientes marinos someros.

4.2 GEOLOGÍA LOCAL

Localmente las unidades litológicas que se presentan (Figura 12), muestra una secuencia carbonatada constituida por estratos con espesores delgados a medianos con moderada/fuerte perturbación tectónica.

Esta secuencia carbonatada que aflora en la periferia de Jalpan, muestra dos grandes unidades que pueden ser separadas litológicamente y correlacionadas estratigráficamente con las siguientes formaciones:

- Calizas de la Formación El Doctor.
- Calizas y Lutitas intercaladas de la Formación Soyatal.

La unidad que presenta mayor extensión y mayor importancia debido a que el proyecto del túnel quedará emplazado en ella, lo conforman estratos de calizas de color blanco amarillento a blanco grisáceo claro que se pueden correlacionar con la formación El Doctor, muy extendida en el Municipio de Cadereyta y presenta más de 2,000 metros de espesor; sin embargo en el área de estudio el espesor de la zona más baja (arroyo de Jalpan) es del orden de los 300 metros.

Esta secuencia carbonatada formó parte de un extenso "Banco Carbonatado" que se constituyó en el Cretácico y ha sido dividido en varias facies, éstas se muestran en el siguiente apartado. (Tabla 1).

Tabla 1. Principales Litofacies de la Formación "El Doctor".

| Facies | Características Petroológicas |
|---------------------|--|
| La Negra | Caliza de color gris oscuro con espesores de 10 a 20 cm, y seudoestratos de pedernal negro de 1 a 10 cm. Presenta intercalaciones de lutitas rojas; su espesor aproximado es de los 300 metros. |
| Cerro Ladrón | Masa lenticular de caliza en forma de banco, presenta estratificación gruesa y su color varía del gris claro a gris oscuro. Presenta tres subfacies: rudista, lodos calcáreos y conglomerados de grano fino. |
| El Socavón | Constituida por calcarenitas de estratificación gruesa y un conglomerado calizo de grano fino y bloques gruesos. |
| San Joaquín. | Son calizas de color gris oscuro de estratificación gruesa, con abundancia de nódulos de pedernal; su espesor es del orden de los 120-300 metros. |

Tectónicamente, dicha secuencia se encuentra cabalgando unidades que muestran intercalación de material pelítico y carbonatado que corresponde a la Formación Soyatal.

4.2.1 ESTRATIGRAFÍA

En el Anexo 2 se muestra el tipo de carbonatos que afloran y de igual forma se presenta un resumen detallado de las características petroológicas más sobresalientes de estas unidades:

La unidad más antigua que aflora en la zona de estudio, corresponde a la secuencia carbonatada de plataforma-barrera de la formación El Doctor, la cual se encuentra cabalgando a la secuencia de flysch de la Formación Soyatal (Anexo 2).

4.2.1.1 FORMACIÓN EL DOCTOR

Su localidad tipo se encuentra localizada en el poblado El Doctor, del municipio de Cadereyta en Querétaro. En la Tabla 1 son definidas las principales facies de la Fm. El Doctor.

Las unidades carbonatadas de la zona de estudio pueden ser correlacionadas con una de las facies anteriormente mencionadas, éstas en el área no presentan fósiles ni horizontes marmolizados, presentan estratificación de media a gruesa, macroscópicamente la roca muestra un color de gris a gris oscuro (Anexo 1).

Litológicamente presentan similitud con la facies "Cerro Ladrón", constituyendo paquetes de caliza con estratificación paralela y estratos finos intercalados de lutitas. Su importancia estiba en que constituirá la roca encajonante del "Túnel La Gloria-Chuveje".



a. Estratos Gruesos de Carbonatos en el Cerro Pitzquintla



b. Detalle de las calizas, muestran un color de gris a gris oscuro con estratificación gruesa.

Figura 12. Calizas de la Formación El Doctor.

Debido al carácter litológico y composicional, en el extremo SE del área (Anexo 1) se muestran efectos fuertes de disolución

llegando a presentar un karst avanzado con la formación de varias grutas y sumideros (Figuras 13).

Algunas de éstas grutas (Figura 13) por lo regular muestran un efecto de mayor disolución a lo largo del flujo de corriente que en la vertical.



a. Interior de Gruta 9 con estalactitas



b. Entrada a gruta 4

Figura 13. Fotografías de Grutas Las Tinajas.

4.2.1.2 FORMACIÓN SOYATAL

Consiste de una secuencia de rocas pelíticas, arenosas y carbonatadas de relleno en la cuenca que precedió a los eventos tectónicos compresivos (cabalgaduras) en la zona.

La secuencia básicamente muestra intercalaciones de rocas clásticas y carbonatadas de estratificación delgada, la alternancia de sedimentos es muy variable, predominando en ocasiones calizas impuras y lutitas limosas, dando una gama de colores que van del gris al gris oscuro y amarillento. La zona de estudio se localiza en el extremo NW (Anexo 1), y aflora hacia la parte baja del poblado de Pitzquintla.

Esta unidad presenta las características de un depósito tipo "flysch" con sedimentos esencialmente terrígenos e intercalaciones de carbonatos, también muestra numerosos pliegues de carácter sedimentario y estructuras del tipo boudinage.

Estos efectos de microtectónica, son producto de la combinación entre flexión y aplanamiento en secuencias que presentan variedad de materiales pétreos, en los cuales existe una combinación de materiales competentes e incompetentes.

De la sección litoestratigráfica local de las unidades (Anexo 2) en la cabalgadura Puente de Dios (Carrillo Martínez, 1990) se pone en contacto tectónico a la Formación El Doctor con esta unidad y su frente se extiende en dirección NW.

Capítulo 5

MARCO TEÓRICO

5.1 INTRODUCCIÓN

El diccionario de la Real Academia Española de la Lengua define túnel como paso subterráneo abierto artificialmente para establecer una comunicación a través del monte, por debajo de un río u otro obstáculo. En términos estrictamente prácticos se trata de una obra de ingeniería extraordinariamente sofisticada, y nunca fue sencilla ni segura.

El túnel arranca de la necesidad de superar un obstáculo natural, generalmente un macizo rocoso montañoso. Pero además de la montaña existen otras barreras que se pueden salvar mediante túneles como los cursos de agua (fluviales o marinos) y zonas urbanas densamente edificadas.

Entre los usos más frecuentes puede enunciarse los túneles para vehículos, para redes de ferrocarril urbano o metros, para uso peatonal, para abastecimiento de agua, saneamiento y galerías de servicio.

5.2 PRESENTE Y FUTURO DEL TÚNEL Y EL ESPACIO SUBTERRÁNEO

En los últimos años se ha tenido un boom en la ingeniería subterránea siendo el rasgo característico su diversificación, podría decirse que estamos viviendo en la era de los túneles y construcciones subterráneas multipropósito

Pero hoy no solo se trata de concebir obras lineales, sino también de construir amplios espacios subterráneos e inmensas cavernas de propósito diverso o bien de carácter lúdico como urbanismo subterráneo, con función de depósito y almacenamiento, para combustibles, alimentos, residuos, plantas hidroeléctricas, potabilizadoras, refugios para situaciones de emergencia, etc.

5.3 EVOLUCIÓN TECNOLÓGICA E INNOVACIÓN EN EL ARTE DE LOS TÚNELES

5.3.1 LA FUERZA BRUTA Y LAS PRIMERAS HERRAMIENTAS RUDIMENTARIAS

Resulta impresionante la perseverancia y el desprecio por el riesgo que mostró el hombre desde sus orígenes en sus intentos de perforar la tierra, partiendo inicialmente solo de las propias manos y la fuerza bruta, y poco a poco, confeccionando herramientas, rudimentarios martillos, picos y cinceles.

Si a estas herramientas añadimos los elementales procedimientos de entibación y la ausencia de sistemas de ventilación, comprobamos que la perforación de túneles y galerías implicaba una sacrificada labor.

No debemos ignorar también la utilización masiva de esclavos sometidos a unas condiciones infrahumanas y cuya supervivencia no importaba, ya que fue una de las piezas claves.

5.3.2 LA TÉCNICA DEL FUEGO

Los primeros que aplicaron la ciencia con perspectiva de mejorar la eficiencia en la perforación de la roca, fueron los egipcios, aplicando la técnica del fuego, que consistía en la habilidad de romper la roca provocando incendios con leña en el tope del túnel y apagándolo bruscamente con agua fría, este gradiente térmico daba lugar a la facturación y resquebrajamiento de la roca, desprendiendo y proyectando con fuerza lascas y fragmentos con gran peligro para los trabajadores.



Figura 14. La Técnica del Fuego, según grabado de "De Re Metallica".

5.3.3 LA MODERNA INDUSTRIA DE LOS TÚNELES

La construcción de túneles como actividad de la ingeniería civil se dividen en:

- Túneles en roca dura
- Túneles en terreno blando

El principal objetivo de la perforación de túneles en roca dura es horadar el macizo rocoso mediante la fractura, excavación y extracción de la roca, con frecuencia la excavación es auto-soportante, pero en la actualidad es habitual proporcionar un revestimiento al túnel por seguridad.

Con anterioridad a 1850, los túneles construidos en roca dura fueron perforados con métodos prácticamente idénticos a los de la industria minera.

Tradicionalmente en la construcción de túneles en roca dura, el principal problema a resolver era el de la excavación del macizo, dado que a menudo la excavación no precisaba sostenimiento alguno, en caso del que el macizo estuviera libre de juntas. En las zonas que se consideraba la roca más débil o fracturada se instalaba un revestimiento de mampostería o ladrillo.

En el caso de construcción de túneles en terreno blando, la excavación es mas sencilla, la principal dificultad es la de evitar que el terreno se caiga en el interior del túnel. Resulta esencial la instalación de un revestimiento durable y resistente tan pronto como se haya realizado la excavación.

5.3.4 PERFORACIÓN CON EXPLOSIVOS

El desarrollo de túneles en roca ha dependido de tres aspectos principales:

- Máquinas perforadoras
- Brocas y taladros
- Explosivos

La perforación de los túneles mediante explosivos es una técnica desarrollada durante los últimos 300 años y que permitió la excavación de túneles en formaciones rocosas de mayor dureza, así como ritmos de avance mucho más rápidos. Ha de destacarse el uso de aceros al tungsteno-carburo.

5.3.5 TÚNELES EN ROCA: PERFORADORA ACCIONADA POR AIRE COMPRIMIDO

Fueron inventadas en Europa y Estados Unidos casi al mismo tiempo, para dar solución al problema de un sistema de perforación manual muy lento.

Estas primeras máquinas resultaban demasiado pesadas para que un hombre las pudiera sujetar y accionar, por lo que se diseñó un sistema de chasis con montaje de la máquina.

5.4 PRINCIPALES FACTORES EN EL PROGRESO DE LA INGENIERÍA SUBTERRÁNEA.

- EXCAVACIÓN: Las mejoras en las técnicas de voladuras, tanto en la fase de barrenación, en los tipos de explosivos y en el uso cada vez más eficiente de la energía, ya sea eléctrica o por aire comprimido.
- SOSTENIMIENTO: Los avances en materia de revestimientos, principalmente en cemento y acero moldeado en mejora del terreno mediante inyecciones a presión.
- ENTORNO DE TRABAJO: Mejoras en ventilación e iluminación y un mejor control del agua subterránea mediante equipos de bombeo

5.4.1 EQUIPAMIENTO Y MAQUINARIA

- Tuneladoras a sección completa: Conocidas también por sus siglas TBM o máquinas topo, tienen como finalidad la excavación de túneles circulares a sección completa, normalmente en roca dura, provistas de una cabeza giratoria con cortadores. (Figura 15).
- Rozadoras o Tuneladoras de ataque puntual: Fueron fruto del proceso de innovación desarrollado por la industria minera del carbón. Se trata de máquinas aptas para terrenos de dureza baja o media, equipadas con un cabezal cortador o rozador a un extremo de un brazo mecánico de

libre movimiento que excava barriendo el frente con movimientos aleatorios (Figura 16).



Figura 15. Maquina Tuneladora (TBM)



Figura 16. Maquina Rozadora

5.4.2 MÉTODOS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

Entre los diversos métodos de diseño y construcción de túneles, destacamos el nuevo método austriaco de construcción de túneles. Se trata de un método de gran versatilidad y abarca todos aquellos elementos relevantes, incluyendo la ejecución o apertura, la retirada de escombros, el sostenimiento, etc.

El nuevo método austriaco fue desarrollado en los años 1960. La excavación se realiza en dos fases, primero se realiza la excavación superior y después se retira el terreno que quede debajo hasta el piso del túnel. El método se basa en usar la tensión geológica del macizo rocoso circundante para que el túnel se estabilice a sí mismo mediante el efecto arco. Para conseguirlo nos basamos en medidas geotécnicas para trazar una sección óptima. La excavación es inmediatamente protegida con una delgada capa de hormigón proyectado. Esto crea un anillo de descarga natural que minimiza la deformación de la roca (Figura 17).

Debido al control exhaustivo el método es muy flexible, incluso en condiciones geomecánicas desconocidas de consistencia de la roca durante el trabajo de tunelación. Las mediciones de las propiedades de la roca nos informan de las técnicas apropiadas para el diseño y estabilización de la excavación.

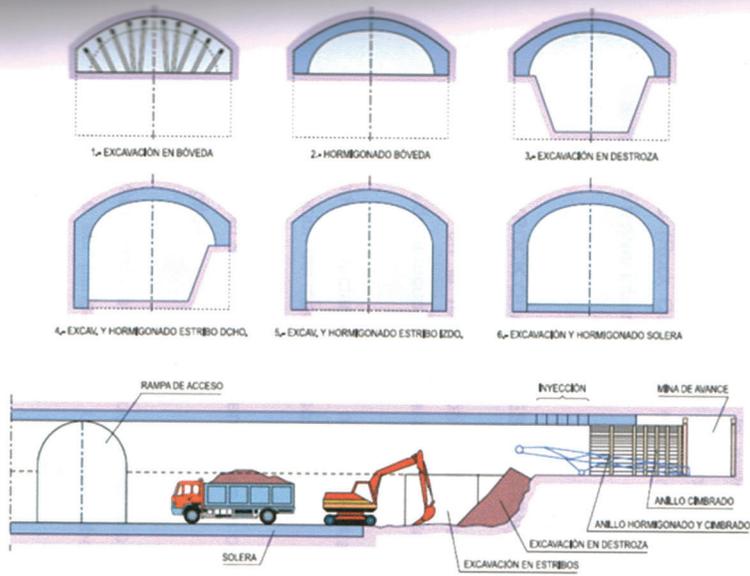


Figura 17. Fases del Nuevo Método Austriaco.

5.5 GEOTECNIA.

Para definir los parámetros de diseño de los sistemas para asegurar la estabilidad del túnel a largo plazo, se requiere antes caracterizar los macizos rocosos en los que se desarrollará. Tal caracterización se realizó bajo la metodología de los sistemas siguientes: RQD (Rock Quality Designation), RMR (Rock Mass Rating) y Q (Rock Quality for tunnelling) que son ampliamente aceptados a nivel internacional.

5.5.1 RQD (ROCK QUALITY DESIGNATION)

Se basa en la recuperación modificada de un testigo (El porcentaje de la recuperación del testigo de un sondeo).

Depende indirectamente del número de fracturas y del grado de la alteración del macizo rocoso.

Se cuentan solamente fragmentos iguales o superiores a 10.00 cm de longitud.

El diámetro del testigo tiene que ser igual o superior a 5.74 cm y tiene que ser perforado con un doble tubo de extracción de testigo.

$$RQD = \left(\frac{\sum (\text{Longitud del núcleo extraído} \geq 10\text{cm})}{\text{Longitud total del Barreno}} \right) (100)$$

Tabla 2. Clasificación de la Calidad del Macizo Rocos (RQD).

| Clase | Calidad | RQD (%) |
|-------|-----------|----------|
| I | Muy mala | < 25 |
| II | Mala | 25 - 50 |
| III | Aceptable | 50 - 75 |
| IV | Buena | 75 - 90 |
| V | Muy buena | 90 - 100 |

Si no puede medirse el RQD, puede estimarse de las medidas de discontinuidades en afloramientos como se muestra a continuación:

a) A partir del parámetro J_v :

$RQD = 115 - 3.3 J_v$; (para $J_v > 4,5$), o bien,

$RQD = 100$ (para $J_v \leq 4,5$)

J_v = número de juntas identificadas en el macizo rocoso por m².

b) A partir de la frecuencia de discontinuidades λ :

$RQD = 100 e^{-0,1\lambda} (0,1\lambda + 1)$

Aunque el RQD es un índice muy útil, no es suficiente para describir las características de facturación de los macizos rocosos al no considerar la orientación, separación, rellenos, etc.

5.5.2 RMR (ROCK MASS RATING)

Desarrollado por Bieniawski, constituye un sistema de clasificación de macizos rocosos que permite a su vez relacionar índices de calidad con parámetros de diseño y de sostenimiento de túneles.

El parámetro que define la clasificación es el denominado índice RMR (ROCK MASS RATING), que indica la calidad del

macizo rocoso en cada dominio estructural a partir de los siguientes parámetros (Anexo 3):

1. Resistencia uniaxial de la matriz rocosa: ensayo de compresión simple.
2. Grado de fracturación del macizo: ensayo del RQD.
3. Espaciado de las discontinuidades: separación entre diaclasas (m).
4. Condiciones de las discontinuidades: rugosidad, continuidad, relleno y bordes.
5. Condiciones hidrogeológicas: caudal, presión de agua y humedad.
6. Corrección por orientación de las discontinuidades respecto a la excavación:

$$\text{RMR} = (1) + (2) + (3) + (4) + (5) \pm (6)$$

5.5.3 Q (ROCK QUALITY FOR TUNNELING)

Constituye un sistema de clasificación de macizos rocosos que permite establecer sistemas de sostenimientos para túneles y cavernas. El sistema Q está basado en la evaluación numérica de seis parámetros que definen el índice Q. Este índice viene dado por la siguiente expresión.

$$Q = \frac{\text{RQD}}{J_n} \times \frac{J_r}{J_n} \times \frac{J_w}{\text{SRF}}$$

La clasificación de Barton, se basa en 6 parámetros:

1. R.Q.D: Índice de calidad de la roca.
2. Jn: Número de sistemas de fisuras.

3. Jr: Número de la rugosidad, relleno y continuidad de las fisuras.
4. Ja: Número de alteración de las discontinuidades.
5. Jw: Coeficiente reductor por la presencia de Agua en las fisuras.
6. SRF: (Stress Reduction Factor) Factor de reducción de esfuerzos.

Tabla 3. División del Macizo de acuerdo al Índice Q.

| Índice de calidad de la roca $Q = \frac{RQD}{J_a} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$ | Descripción del macizo rocoso |
|---|-------------------------------|
| 0.001-0.01 | Excepcionalmente mala |
| 0.01-0.1 | Extremadamente mala |
| 0.1-1 | Muy pobre |
| 1-4 | Pobre |
| 4-10 | Media o Regular |
| 10-40 | Buena |
| 40-100 | Muy buena |
| 100-400 | Extremadamente buena |
| 400-1000 | Excepcionalmente buena |

El primer coeficiente (R.Q.D. /Jn) representa el tamaño de los bloques.

El segundo coeficiente (Jr/Ja) representa la resistencia al corte entre los bloques.

Para poder relacionar su índice de calidad para túneles (Q) con el comportamiento de una excavación subterránea y con las necesidades de ademe de las mismas, Baton, Lien y Lunde inventaron un elemento cuantitativo adicional que llamaron "La Dimensión Equivalente "De" de la excavación. Esta dimensión se

obtiene al dividir el ancho, diámetro o altura de la excavación entre una cantidad llamada Relación de Soporte de la Excavación "ESR" (Excavation Support Ratio).

Tabla 4. Dimensión Equivalente de acuerdo al Tipo de Excavación.

| TIPO DE EXCAVACIÓN | ESR |
|--|-----|
| Excavaciones mineras provisionales | 3-5 |
| Excavaciones mineras permanentes, túneles de conducción de agua para obras hidroeléctricas (con la excepción de alta presión para compuertas), túneles pilotos (exploración), excavaciones | 1.6 |
| Cámaras de almacenamiento, plantas subterráneas para el tratamiento de aguas, túneles carreteros y ferrocarriles pequeños, | 1.3 |
| Casas de máquinas, túneles carreteros y ferrocarriles mayores, refugios de defensa civil, portales y cruces de túnel. | 1.0 |
| Estaciones nucleoelectricas subterráneas, estaciones de ferrocarril, instalaciones para deporte y reuniones, fabricas. | 0.8 |

Capítulo

6

METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para la realización de dicho estudio se han efectuado varios estudios de campo y laboratorio que consistieron en lo siguiente:

- Levantamientos geológicos de campo con técnicas convencionales de caminamientos y secciones.
- Perforación para muestreo geotécnico primario, este en la zona del Proyecto Chuveje que consistió en la extracción de núcleo de 4" de diámetro, muestreo secundario con extracción de núcleo de 1" y ensayos con Martillo Schmidt para determinación de compresión simple.
- Levantamiento geofísico con Georadar, en la zona del proyecto La Gloria.
- Estudios de laboratorio para determinación de densidades, GSI, humedad, ángulo de fricción, cohesión y otros análisis geomecánicos.
- Caracterización del Macizo Rocoso en las dos zonas de estudio, por el método del RMR, RQD y Q.
- Sistemas de sostenimiento para la estabilización del macizo rocoso en la zona del túnel por el método del Q.
- Propuesta de parámetros del diseño del Túnel Chuveje.

Capítulo 7

RESULTADOS

7.1 RQD (ROCK QUALITY DESIGNATION)

Tabla 5. Calidad de la Roca, Método RQD.

| AREA DE MUESTREO | RQD | | TIPO DE ROCA |
|------------------|-------|----|--------------|
| SE | MP-1 | 53 | REGULAR |
| | MP-4 | 56 | REGULAR |
| | MP-5 | 52 | REGULAR |
| | MP-6 | 52 | REGULAR |
| | MS-6 | 53 | REGULAR |
| | MS-7 | 47 | MALA |
| | MS-8 | 49 | MALA |
| | MP-1B | 67 | REGULAR |
| | MP-4A | 44 | MALA |
| | MP-5A | 45 | MALA |
| NW | MP-2 | 32 | MALA |
| | MP-3 | 37 | MALA |
| | MS-1 | 66 | REGULAR |
| | MS-2 | 70 | REGULAR |
| | MS-3 | 63 | REGULAR |
| | MS-4 | 52 | REGULAR |
| | MS-5 | 76 | BUENA |
| | MP-2A | 60 | REGULAR |
| | MP-3A | 52 | REGULAR |

7.2 RMR (ROCK MASS RATING)

Tabla 6. Calidad de la Roca. Método RMR

Tabla 6. Parámetros Geotécnicos para el Cálculo del RMR.

| PARÁMETROS GEOTÉCNICOS | | | | | | | |
|----------------------------|-------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|----------|----------------------------|-----------------------|
| Diámetro de muestras | Punto de Muestreo | Resistencia a la Compresión Simple | Resistencia a la Compresión Simple | Índice de Resistencia Geológica | Cohesión | Ángulo de Fricción Interna | Módulo de Deformación |
| | | Sc (Kg/cm2) | Sc (MPa) | GSI | MPa | f | MPa |
| 69 mm | MP-1 | 543.50 | 53.28 | 65.0 | 0.64 | 45.77 | 3,219.0 |
| | MP-2 | 326.20 | 31.98 | 55.0 | 0.41 | 39.93 | 2,081.0 |
| | MP-3 | 381.12 | 37.36 | 60.0 | 0.53 | 43.22 | 3,219.0 |
| | MP-4 | 577.39 | 56.61 | 65.0 | 0.85 | 47.97 | 4,930.8 |
| | MP-5 | 526.66 | 51.63 | 55.0 | 0.52 | 43.54 | 2,080.8 |
| | MP-6 | 528.45 | 51.81 | 65.0 | 0.80 | 47.39 | 4,930.0 |
| 25 mm (corregidas a 50 mm) | MS-1 | 673.81 | 66.06 | 65.0 | 0.94 | 48.95 | 4,931.0 |
| | MS-2 | 713.95 | 70.00 | 55.0 | 0.61 | 45.75 | 2,081.0 |
| | MS-3 | 645.13 | 63.25 | 55.0 | 0.58 | 45.03 | 2,081.0 |
| | MS-4 | 539.05 | 52.85 | 60.0 | 0.64 | 45.72 | 2,319.0 |
| | MS-5 | 782.76 | 76.74 | 70.0 | 1.42 | 51.19 | 7,443.0 |
| | MS-6 | 541.91 | 53.13 | 45.0 | 0.38 | 39.28 | 854.7 |
| | MS-7 | 481.70 | 47.23 | 45.0 | 0.36 | 38.37 | 855.0 |
| | MS-8 | 504.64 | 49.47 | 55.0 | 0.51 | 43.23 | 2,081.0 |
| 69 mm (corregidas a 50 mm) | MP-1B | 685.31 | 67.19 | 65.0 | 0.96 | 49.05 | 4,930.0 |
| | MP-2A | 611.61 | 59.96 | 60.0 | 0.69 | 46.60 | 3,218.9 |
| | MP-3A | 537.91 | 52.74 | 55.0 | 0.52 | 43.70 | 2,081.0 |
| | MP-4A | 451.13 | 44.23 | 55.0 | 0.48 | 42.39 | 2,081.0 |
| | MP-5A | 460.04 | 45.10 | 40.0 | 0.30 | 35.53 | 545.1 |
| | MP-6A | 777.44 | 76.22 | 65.0 | 1.05 | 49.83 | 4,931.0 |

Tabla 7. Resultados de Pruebas de Resistencia.

Resultados de Pruebas de Resistencia

| Muestra | Diámetro | Prueba de Resistencia Puntual (PLI) | | Correlación PLI - σ_c | | |
|---------|----------|-------------------------------------|------------------|------------------------------|---------------------|-------|
| | | Fuerza | Point Load Index | Factor de Corrección | PLI ₍₉₅₎ | |
| | | | | | F | MPa |
| | mm | KN | MPa | F | MPa | MPa |
| MS-1 | 25 | 2.35 | 3.76 | 0.73 | 2.75 | 68.08 |
| MS-2 | 25 | 2.49 | 3.98 | 0.73 | 2.92 | 70.00 |
| MS-3 | 25 | 2.25 | 3.60 | 0.73 | 2.64 | 63.25 |
| MS-4 | 25 | 1.88 | 3.01 | 0.73 | 2.20 | 52.85 |
| MS-5 | 25 | 2.73 | 4.37 | 0.73 | 3.20 | 76.74 |
| MS-6 | 25 | 1.89 | 3.02 | 0.73 | 2.21 | 53.13 |
| MS-7 | 25 | 1.88 | 2.69 | 0.73 | 1.97 | 47.23 |
| MS-8 | 25 | 1.76 | 2.82 | 0.73 | 2.06 | 49.47 |
| MP-1B | 69 | 11.53 | 2.42 | 1.16 | 2.80 | 67.19 |
| MP-2A | 69 | 10.29 | 2.16 | 1.16 | 2.50 | 59.96 |
| MP-3A | 69 | 9.05 | 1.90 | 1.16 | 2.20 | 52.74 |
| MP-4A | 69 | 7.59 | 1.59 | 1.16 | 1.84 | 44.23 |
| MP-5A | 69 | 7.74 | 1.63 | 1.16 | 1.88 | 45.10 |
| MP-6A | 69 | 13.08 | 2.75 | 1.16 | 3.18 | 76.22 |

Tabla 8. Calidad de la Roca, Método RMR.

| T R A M O | M U E S T R A | LOCALIZACIÓN UTM | | RESISTENCIA DE LA ROCA INALTERADA | | RQD | ESPACIAMIENTO DE LAS JUNTAS | ESTADO DE LAS FISURAS | AGUA SUBTERRÁNEA | AJUSTE POR ORIENTACIÓN DE JUNTAS | RESULTADO | TIPO DE CLASIFICACIÓN DE ROCA | DESCRIPCIÓN |
|-----------------------|---------------------------------|---------------------|---------|---|-------|-------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------|--|-----------|-------------------------------------|--------------|
| | | | | RESISTENCIA COMPRESIÓN UNIAXIAL | MPa | | | | | | | | |
| | | N | E | MPa | VALOR | VALOR | VALOR | VALOR | VALOR | VALOR | | | |
| SE | MP-1 | 2,343,523 | 446,369 | 53.28 | 7 | 13 | 10 | 25 | 15 | -5 | 65 | II | ROCA BUENA |
| | MP-4 | 2,233,441 | 446,395 | 56.61 | 7 | 13 | 10 | 25 | 15 | -5 | 65 | II | ROCA BUENA |
| | MP-5 | 2,343,405 | 446,389 | 51.63 | 7 | 13 | 10 | 20 | 15 | -5 | 60 | III | ROCA REGULAR |
| | MP-6 | 2,343,430 | 446,304 | 51.81 | 7 | 17 | 8 | 20 | 15 | -5 | 62 | II | ROCA BUENA |
| | MS-6 | 2,343,441 | 446,376 | 53.13 | 7 | 17 | 8 | 25 | 15 | -5 | 67 | II | ROCA BUENA |
| | MS-7 | 2,343,419 | 446,377 | 47.23 | 4 | 17 | 10 | 25 | 15 | -5 | 66 | II | ROCA BUENA |
| | MS-8 | 2,343,405 | 446,281 | 49.47 | 4 | 13 | 8 | 25 | 15 | -5 | 60 | III | ROCA REGULAR |
| | MP-1B | 2,343,523 | 446,369 | 67.19 | 7 | 17 | 8 | 20 | 15 | -5 | 62 | II | ROCA BUENA |
| | MP-4A | 2,343,441 | 446,395 | 44.23 | 4 | 13 | 10 | 25 | 15 | -5 | 62 | II | ROCA BUENA |
| | MP-5A | 2,343,405 | 446,389 | 45.10 | 4 | 13 | 10 | 25 | 15 | -5 | 62 | II | ROCA BUENA |
| NW | MP-2 | 2,343,602 | 446,310 | 31.98 | 4 | 17 | 10 | 10 | 15 | -2 | 54 | III | ROCA REGULAR |
| | MP-3 | 2,343,580 | 446,329 | 37.36 | 4 | 13 | 8 | 20 | 15 | -2 | 58 | III | ROCA REGULAR |
| | MS-1 | 2,343,540 | 446,379 | 66.06 | 7 | 13 | 8 | 25 | 15 | -5 | 63 | II | ROCA BUENA |
| | MS-2 | 2,343,529 | 446,356 | 70.00 | 7 | 13 | 8 | 20 | 15 | -5 | 58 | III | ROCA REGULAR |
| | MS-3 | 2,343,661 | 446,145 | 63.25 | 7 | 17 | 8 | 20 | 15 | -5 | 62 | II | ROCA BUENA |
| | MS-4 | 2,343,624 | 446,260 | 52.85 | 7 | 17 | 8 | 25 | 15 | -5 | 67 | II | ROCA BUENA |
| | MS-5 | 2,343,626 | 446,277 | 76.74 | 7 | 13 | 8 | 20 | 15 | -2 | 61 | II | ROCA BUENA |
| | MP-2A | 2,343,602 | 446,310 | 59.96 | 7 | 17 | 8 | 20 | 15 | -2 | 65 | II | ROCA BUENA |
| | MP-3A | 2,343,580 | 446,329 | 52.74 | 7 | 17 | 8 | 25 | 15 | -5 | 67 | II | ROCA BUENA |

7.3 Q (ROCK QUALITY FOR TUNNELING)

Tabla 9. Calidad de la Roca, Método Q.

| T R A M O | M U E S T R A | LOCALIZACIÓN UTM | | RQD | NUMERO DE JUNTAS | | RUGOSIDAD DE LAS JUNTAS | ALTERACION DE JUNTAS | DEDUCCION POR AGUA | SFR | Q | DESCRIPCIÓN |
|-----------------------|---------------------------------|---------------------|---------|-----|---------------------|----|-------------------------------|-------------------------|-----------------------|-----|------|-----------------|
| | | N | E | | Jn | Jr | | | | | | |
| | | | | | Ja | Jw | | | | | | |
| SE | MP-1 | 2,343,523 | 446,369 | 53 | 4 | 3 | 1 | 1 | 1 | 5 | 8.0 | MEDIA O REGULAR |
| | MP-4 | 2,233,441 | 446,395 | 56 | 4 | 3 | 1 | 1 | 1 | 5 | 8.4 | MEDIA O REGULAR |
| | MP-5 | 2,343,405 | 446,389 | 52 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 5 | 10.4 | BUENA |
| | MP-6 | 2,343,430 | 446,304 | 52 | 3 | 3 | 2 | 1 | 1 | 5 | 5.2 | MEDIA O REGULAR |
| | MS-6 | 2,343,441 | 446,376 | 53 | 3 | 3 | 2 | 1 | 1 | 5 | 5.3 | MEDIA O REGULAR |
| | MS-7 | 2,343,419 | 446,377 | 47 | 3 | 3 | 2 | 1 | 1 | 5 | 4.7 | MEDIA O REGULAR |
| | MS-8 | 2,343,405 | 446,281 | 49 | 4 | 3 | 2 | 1 | 1 | 5 | 3.7 | POBRE |
| | MP-1B | 2,343,523 | 446,369 | 67 | 4 | 3 | 1 | 1 | 1 | 5 | 10.1 | BUENA |
| | MP-4A | 2,343,441 | 446,395 | 44 | 4 | 3 | 1 | 1 | 1 | 5 | 6.6 | MEDIA O REGULAR |
| | MP-5A | 2,343,405 | 446,389 | 45 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 5 | 9.0 | MEDIA O REGULAR |
| NW | MP-2 | 2,343,602 | 446,310 | 32 | 3 | 3 | 2 | 1 | 1 | 5 | 3.2 | POBRE |
| | MP-3 | 2,343,580 | 446,329 | 37 | 4 | 3 | 2 | 1 | 1 | 5 | 2.8 | POBRE |
| | MS-1 | 2,343,540 | 446,379 | 66 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 5 | 13.2 | BUENA |
| | MS-2 | 2,343,529 | 446,356 | 70 | 3 | 3 | 2 | 1 | 1 | 5 | 7.0 | MEDIA O REGULAR |
| | MS-3 | 2,343,661 | 446,145 | 63 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 5 | 12.6 | BUENA |
| | MS-4 | 2,343,624 | 446,260 | 52 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 5 | 10.4 | BUENA |
| | MS-5 | 2,343,626 | 446,277 | 76 | 4 | 3 | 1 | 1 | 1 | 5 | 11.4 | BUENA |
| | MP-2A | 2,343,602 | 446,310 | 60 | 3 | 3 | 2 | 1 | 1 | 5 | 6.0 | MEDIA O REGULAR |
| | MP-3A | 2,343,580 | 446,329 | 52 | 4 | 3 | 2 | 1 | 1 | 5 | 3.9 | POBRE |

7.4 TIPO DE ROCA

Tabla 10. Comparativo de Calidad de la Roca.

| TRAMO | MUESTRA | RQD | Q | RMR | PROMEDIO |
|-------|---------|---------|-----------------|--------------|----------|
| SE | MP-1 | REGULAR | MEDIA O REGULAR | ROCA BUENA | REGULAR |
| | MP-4 | REGULAR | MEDIA O REGULAR | ROCA BUENA | REGULAR |
| | MP-5 | REGULAR | BUENA | ROCA REGULAR | REGULAR |
| | MP-6 | REGULAR | MEDIA O REGULAR | ROCA BUENA | REGULAR |
| | MS-6 | REGULAR | MEDIA O REGULAR | ROCA BUENA | REGULAR |
| | MS-7 | MALA | MEDIA O REGULAR | ROCA BUENA | REGULAR |
| | MS-8 | MALA | POBRE | ROCA REGULAR | MALA |
| | MP-1B | REGULAR | BUENA | ROCA BUENA | BUENA |
| | MP-4A | MALA | MEDIA O REGULAR | ROCA BUENA | REGULAR |
| | MP-5A | MALA | MEDIA O REGULAR | ROCA BUENA | REGULAR |
| NW | MP-2 | MALA | POBRE | ROCA REGULAR | MALA |
| | MP-3 | MALA | POBRE | ROCA REGULAR | MALA |
| | MS-1 | REGULAR | BUENA | ROCA BUENA | BUENA |
| | MS-2 | REGULAR | MEDIA O REGULAR | ROCA REGULAR | REGULAR |
| | MS-3 | REGULAR | BUENA | ROCA BUENA | BUENA |
| | MS-4 | REGULAR | BUENA | ROCA BUENA | BUENA |
| | MS-5 | BUENA | BUENA | ROCA BUENA | BUENA |
| | MP-2A | REGULAR | MEDIA O REGULAR | ROCA BUENA | REGULAR |
| | MP-3A | REGULAR | POBRE | ROCA BUENA | REGULAR |

7.5 SECCIÓN DE OBRA

Para el cálculo de la sección de obra en el túnel obtendremos un De equivalente:

Diámetro equivalente:

$$De = \frac{\text{Ancho de la excavación, diametro o altura (mts)}}{\text{Relacion de soporte de la excavación ESR}}$$

De acuerdo a la tabla de relación entre De (Anexo 4) de una excavación subterránea sin ademe, y el índice Q se tiene:

Para

- $Q_{\min} = 2.8$ es $D_e = 3.5$
- $Q_{\max} = 13.2$ es $D_e = 6.0$

Manejaremos una obra de 4mts X 4mts

7.6 SOPORTE DE OBRA

De acuerdo a tabla de categorías de soporte estimado basadas en el índice Q (Anexo 5) para tuneleo se tiene:

PROMEDIO Q:

- ZONA NW = 7.8
- ZONA SE = 7.1

SE ESCOGE $Q = 7.5$

- Longitud de anclaje de 2.10 = Barra de 7 ft
- Bordo y espaciamento de 1.80 mts, la cual se cambiara a 1.90 mts, ya que así se adapta mejor a la sección establecida.
- Se instalara una ancla extra en cualquier zona en la cual sea necesario.
- Sin zarpeo.

Para

- $Q_{\min} = 2.8$ es $D_e = 3.5$
- $Q_{\max} = 13.2$ es $D_e = 6.0$

Manejaremos una obra de 4mts X 4mts

7.6 SOPORTE DE OBRA

De acuerdo a tabla de categorías de soporte estimado basadas en el índice Q (Anexo 5) para tuneleo se tiene:

PROMEDIO Q:

- ZONA NW = 7.8
- ZONA SE = 7.1

SE ESCOGE **Q = 7.5**

- Longitud de anclaje de 2.10 = Barra de 7 ft
- Bordo y espaciamento de 1.80 mts, la cual se cambiara a 1.90 mts, ya que así se adapta mejor a la sección establecida.
- Se instalara una ancla extra en cualquier zona en la cual sea necesario.
- Sin zarpeo.

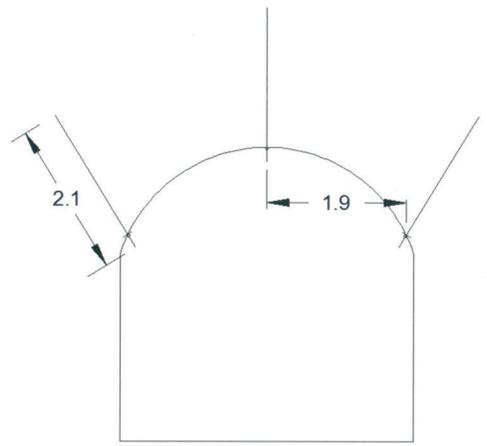


Figura 18. Anclaje en la Obra (Sección Transversal).

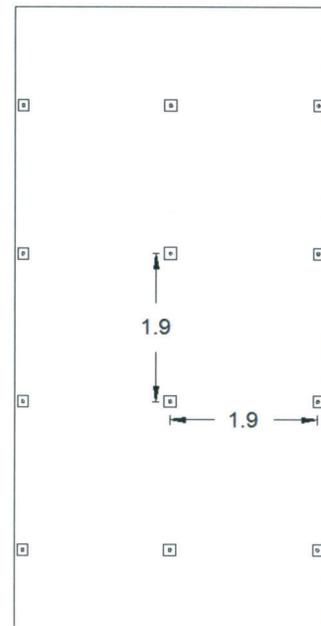


Figura 19. Anclaje en la Obra (Vista en Planta).

7.7 TÉCNICA DE TUNELEO

De acuerdo a la sección de la obra se decide por abrir el túnel por medio de perforación y voladura con explosivo.

7.8 CÁLCULO DE PLANTILLA DE BARRENACIÓN

Método Konya. Tomando del Libro Blast Desing, Calvin Konya

- 1.- Cálculo de diámetro equivalente de barrenos de alivio
(Los barrenos de alivio son los barrenos que no se cargan en la cuña)

$$D_H = d_H \sqrt{N}$$

Donde:

D_H : Diámetro equivalente (es decir como si fuese un solo barreno vacío)

d_H : Diámetro de barrenos vacíos.

N : Número ó cantidad de barrenos vacíos.

La selección del tipo de cuña no es por "formula", es en base al tipo de terreno, dureza de la roca y a la experiencia de operaciones e ingenieros.

| | |
|---|----------|
| Número de Barrenos de descarga (N): | 5 |
| Diámetro de Barrenos de descarga (d_H): | 76.20 mm |
| Número de Barrenos Cargados: | 4 |
| Diámetro de Barrenos cargados (d): | 47.63 mm |

| | |
|--------------------------------|-----------------------|
| Diámetro Equivalente (D_H) | 170.39 mm 17.04 cm |
|--------------------------------|-----------------------|

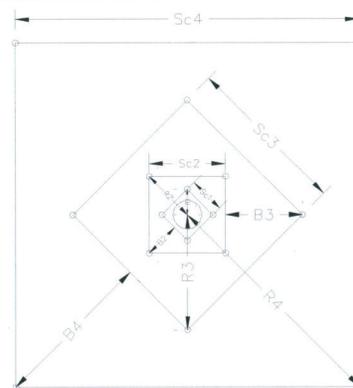


Figura 20. Diagrama de Plantilla de Barrenación.

UNIVERSIDAD DE CUANAVELTO
CALLE 1514000000

2.- Cálculo simplificado de patron de barrenación:

| Cuadro | No. | CUÑA | 1 | 2 | 3 |
|----------|-------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| Bordo | B = | 1.50 D _H | 2.12 D _H | 4.50 D _H | 9.54 D _H |
| Radio | R = | 1.50 D _H | 3.18 D _H | 6.75 D _H | 14.31 D _H |
| Cut Size | Sc = | 2.12 D _H | 4.50 D _H | 9.54 D _H | 20.23 D _H |
| Taco | T = | 1.50 D _H | 1.06 D _H | 2.25 D _H | 4.77 D _H |

3.- Cálculo:

| Cuadro | No. | CUÑA | 1 | 2 | 3 |
|----------|-------------|-------|-------|--------|--------|
| Bordo | B = | 25.56 | 36.12 | 76.67 | 162.55 |
| Radio | R = | 25.56 | 54.18 | 115.01 | 243.83 |
| Cut Size | Sc = | 36.12 | 76.67 | 162.55 | 344.70 |
| Taco | T = | 25.56 | 18.06 | 38.34 | 81.28 |

Todo en cm

4.- Barrenos de rebaje o ampliación (5°, 6° cuadros, Etc.)

$Bordo = B = (0.012 / (2SGe))$
 Espaciamento $S = B$
 $Taco = T = 0.5B$
 Densidad Explosivo = SGe
 Densidad Roca = SGr
 Diámetro Cartucho explosivo = De
 Diámetro del Barreno (in) = 1 7/8

| Datos: | | Resultados | |
|----------------------------|-------------------------|--------------|----------|
| Densidad Explosivo (ANFO) | 0.80 gr/cm ³ | Bordo | 0.65 mts |
| Densidad de Roca (Mineral) | 2.50 ton/m ³ | Espaciamento | 0.65 mts |
| Diámetro Explosivo | 25.40 mm | Taco | 0.33 mts |

5.- Barrenos de Piso:

$Bordo B = (0.012 / (2SGe))$
 Espaciamento $S = B$
 $Taco T = 0.2B$

| Resultados | |
|--------------|----------|
| Bordo | 0.65 mts |
| Espaciamento | 0.65 mts |
| Taco | 0.13 mts |

6.- Barrenos de Contorno:

$Bordo B = (0.012 / (2SGe))$
 Espaciamento $S = B$
 $Taco T = 0.5B$

| Resultados | |
|--------------|----------|
| Bordo | 0.65 mts |
| Espaciamento | 0.65 mts |
| Taco | 0.33 mts |

En caso de voladura suavizada:

$B = 0.8S$
 $S = 10d$

| Resultados | |
|--------------|----------|
| Bordo | 0.32 mts |
| Espaciamento | 0.25 mts |

Taco: En este caso se utiliza la técnica de desacoplamiento de carga para que la densidad de explosivo en los barrenos de postcorte sea baja, o se puede calcular la densidad de explosivo con la siguiente ecuación: $d_{exp} = 10 (S/177)^2$

| | |
|--------------------------|------------|
| Espaciamiento = | 317.50 mm |
| Densidad del explosivo = | 32.18 gr/m |

7.- Calculo del Bordo de la Cuña

| | |
|-------------------------|-----------|
| B=1.5dh | 114.30 mm |
| B=(d+d _h)/2 | 61.92 mm |
| Prom = | 88.11 mm |

7.9 FACTOR DE CARGA

Datos del Barreno:

| | |
|------------------------|-----------------------|
| Long del Barreno = | 14 ft = 4.27 mts |
| Diámetro del Barreno = | 1 7/8 In = 47.63 mm |
| Avance | 12.60 ft = 3.84 mts |
| Area del Barreno = | 0.0018 m ² |
| Nº de Barrenos | 36 |

Datos del Explosivo:

| | |
|-------------------------------------|-------------------------|
| Densidad del Explosivo (ANFO) = | 0.8 gr/cm ³ |
| Densidad del Explosivo (EMULSION) = | 1.19 gr/cm ³ |
| Largo = | 8 In = 20.32 cm |
| Diámetro = | 1 In = 2.54 cm |
| Densidad de la roca = | 2.50 gr/cm ³ |
| Volumen de Bombillo = | 411.85 cm ³ |

Tabla 11. Factor de Carga.

| Barrenos | N° de Bnos. | Taco (mts) | Long. Bno. (mts) | Vol. Bno. (m ³) | Peso expl/bno. (Kg) | Peso total (Kg) | Peso Bombillos (Kg) |
|---------------------|-------------|------------|------------------|-----------------------------|---------------------|-----------------|---------------------|
| Cuña | 4 | 0.26 | 4.01 | 0.0071 | 5.72 | 22.87 | 1.96 |
| Cuadro N° 1 | 4 | 0.18 | 4.09 | 0.0073 | 5.82 | 23.30 | 1.96 |
| Cuadro N° 2 | 4 | 0.38 | 3.88 | 0.0069 | 5.53 | 22.14 | 1.96 |
| Cielo | 7 | 0.33 | 3.94 | 0.0070 | 5.62 | 39.32 | 3.43 |
| Tablas | 6 | 0.33 | 3.94 | 0.0070 | 5.62 | 33.70 | 2.94 |
| Piso | 6 | 0.13 | 4.14 | 0.0074 | 5.90 | 35.37 | 2.94 |
| Rebaje ó Ampliación | 5 | 0.33 | 3.94 | 0.0070 | 5.62 | 28.08 | 2.45 |
| Total = | 36 | | | | | 204.77 | 17.64 |

| | | | | | | | | | |
|---|---|--------|----------|--|-----------|------------|----------|--------------------------|------------------|
| <p>Factor de carga por metro de avance =</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block; margin-bottom: 5px;">ANFO = 53.32 kg/m</div> <p style="text-align: center;">+</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block; margin-bottom: 5px;">Emulsion = 4.59 kg/m</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block; margin-top: 5px; background-color: yellow;">TOTAL = 57.91 kg/m</div> | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <td>ANFO =</td> <td>Sacos= 8</td> </tr> <tr> <td></td> <td>204.77 kg</td> </tr> <tr> <td>Emulsion =</td> <td>17.64 kg</td> </tr> </table> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <td>Total Explosivo =</td> <td>222.42 kg</td> </tr> </table> | ANFO = | Sacos= 8 | | 204.77 kg | Emulsion = | 17.64 kg | Total Explosivo = | 222.42 kg |
| ANFO = | Sacos= 8 | | | | | | | | |
| | 204.77 kg | | | | | | | | |
| Emulsion = | 17.64 kg | | | | | | | | |
| Total Explosivo = | 222.42 kg | | | | | | | | |

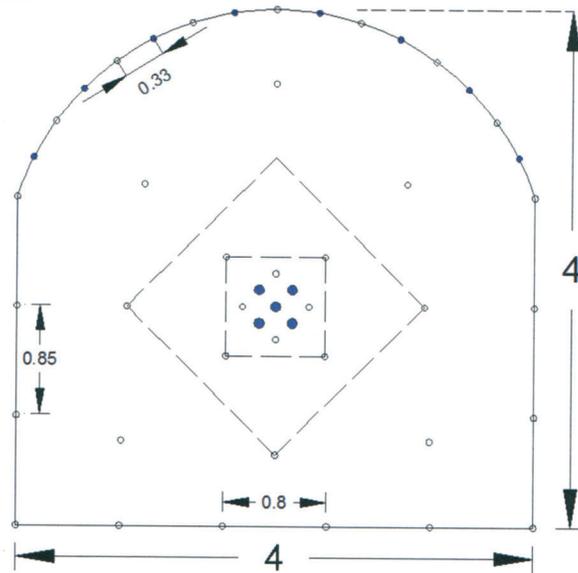


Figura 21. Plantilla de Barrenación.

CONCLUSIONES

Se calculó el tipo de macizo rocoso, por los métodos del Q (Rock Quality for Tunneling), RQD (Rock Quality Designation) Y RMR (Rock Mass Rating) (ver tabla 10), en el cual el lado SE tiene principalmente una calidad de roca REGULAR, mientras que en lado NW se tiene una calidad de roca entre BUENA y REGULAR.

Al calcular la sección de obra se decidió por una obra de:

- Sección de Obra= 4.0 mts X 4.0 mts

Y al calcular el tipo de sostenimiento de roca, se obtuvo que con una barra de acero, era suficiente.

- Longitud de anclaje de 2.10 = Barra de 7 ft
- Varilla corrugada, con cuerda.
- Llena de cemento.
- Bordo y espaciamiento de 1.80 mts, la cual se cambiara a 1.90 mts, ya que así se adapta mejor a la sección establecida.
- Se instalara un ancla extra en cualquier zona en la cual sea necesario.
- Sin zarpeo.

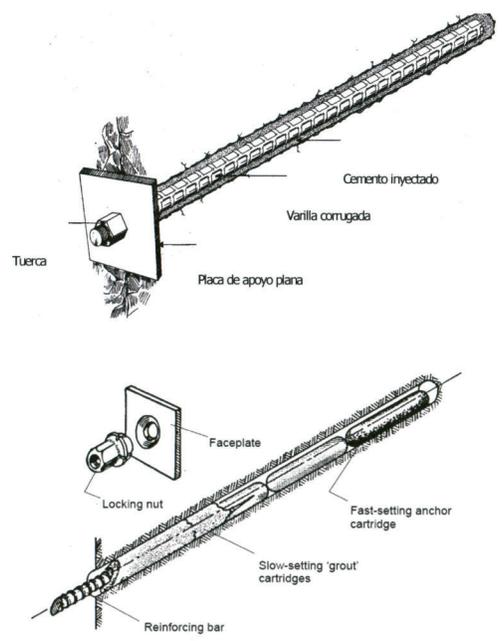


Figura 22. Varilla Corrugada Cementada o con Resina

Ventajas:

- Si se instalan correctamente constituyen un sistema de soporte competente y permanente.
- Alta capacidad de carga.

Desventajas:

- El uso de cemento, significa varios días de curado para alcanzar máxima capacidad (por lo cual se decide ponerle acelerante, para que a ½ hr frague).
- Afectadas por vibraciones.
- No se pueden aplicar en barrenos con agua.
- Dificultad en control de calidad de la lechada o cemento (se elimina si se utilizan cartuchos preparados)
- Dificultad para instalación.
- Relativamente cara.
- Diámetro del barreno es crucial para la instalación.

Tabla 12. Datos Técnicos del Anclaje.

| DATOS TÉCNICOS TÍPICOS | UNIDADES S.I. | MÉTRICAS | INGLESAS |
|--|-----------------------|-----------------------|------------|
| Tipo del acero | 570 N/mm ² | 58 kp/mm ² | 83 kpsi |
| Diámetro del acero | 20 mm | 20 mm | 7/8 in |
| Capacidad de carga al acero | 120 kN | 12 tons | 13 tons |
| Capacidad de carga a la ruptura | 180 kN | 18 tons | 20 tons |
| Deformación antes de la ruptura | 15% | 15% | 15% |
| Peso de las anclas | 2.6 kg/m | 2.6 kg/m | 1.75 lb/ft |
| Diámetro de la perforación recomendada | 35 ± 38 mm | 35 ± 38 mm | 1 3/8 in |

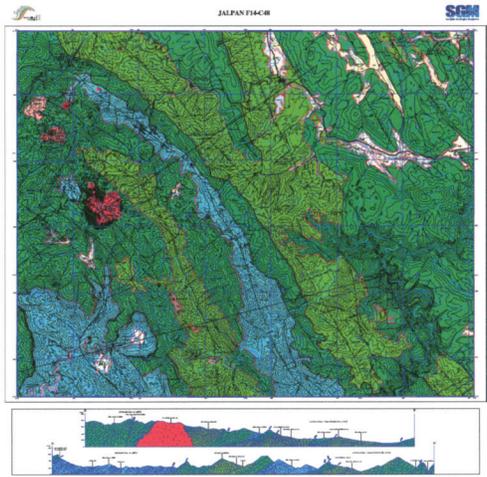
Usando el método de perforación y voladuras, se calculó la plantilla de barrenación, en la cual damos 36 bnos. pegados con 13 bnos. de aire (alivio).

Con una factor de Carga de 57.91 kg/m.

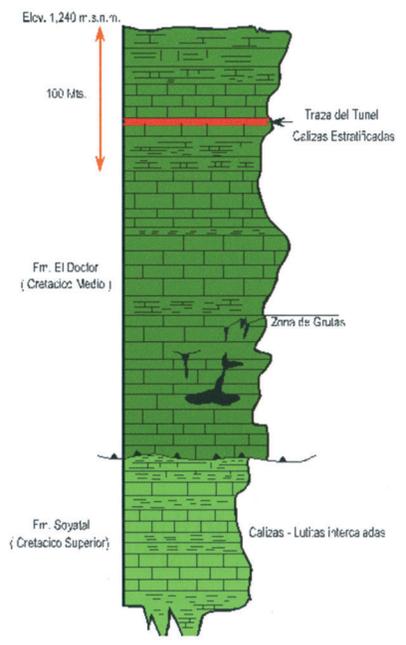
Con esto establecimos los parámetros de diseño para la excavación y estabilización a largo plazo del túnel Chujeje.

UNIVERSIDAD DE COAHUILA
CAMPUS GUANAJUATO

ANEXOS



ANEXO 1. Planta Geológica y Secciones Longitudinales, Área Jalpan.



ANEXO 2. Columna Litoestratigráfica, Área Chuveje.

| CLASIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS Y SU EVALUACIÓN | | | | | | | |
|--|-----------------------------------|--|--|---|--|---|---|
| PARÁMETROS | | ESCALAS DE VALORES | | | | | |
| 1 | RESISTENCIA DE LA ROCA INALTERADA | ÍNDICE DE CARGA PUNTUAL (MPa) | > 8 | 4 - 8 | 2 - 4 | 1 - 2 | PARA ESCALAS BAJAS SE PROPUSIERON PRUEBAS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAxIAL |
| | | RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAxIAL (MPa) | > 200 | 100 - 200 | 50 - 100 | 25 - 50 | |
| | | VALUACIÓN | 15 | 12 | 7 | 4 | 2 1 0 |
| 2 | | ROD (%) | 90-100 | 75-90 | 50-75 | 25-50 | <25 |
| | | VALUACIÓN | 20 | 17 | 13 | 8 | 3 |
| 3 | | ESPACIAMIENTO DE LAS JUNTAS | >2 m | 0.6-2 m | 200-600 mm | 60-200 mm | <60 mm |
| | | VALUACIÓN | 20 | 15 | 10 | 8 | 5 |
| 4 | ESTADO DE LAS FISURAS | SUPERFICIES MUY RUGOSAS, SIN CONTINUIDAD, SIN SEPARACIÓN, PAREDES DE ROCA DURA | SUPERFICIES ALGO RUGOSAS, SEPARACIÓN < 1mm, PAREDES DE ROCA DURA | SUPERFICIES ALGO RUGOSAS, SEPARACIÓN < 1mm, PAREDES DE ROCA SUAVE | SUPERFICIES PULIDAS O RELLENO < 5mm, ESPACIAMIENTO O FISURAS ABIERTAS < 5mm, FISURAS CONTINUAS | RELLENO BLANDO < 5mm, O FISURAS ABIERTAS < 5mm, FISURAS CONTINUAS | |
| | | VALUACIÓN | 30 | 25 | 20 | 10 | 0 |
| 5 | AGREGACIÓN | CANTIDAD DE INFILTRACIÓN POR 10 m DE LARGO EN EL TUNEL (L/10m) | NINGUNA | <10 | 10-25 | 25-125 | >125 |
| | | PRESIÓN DE AGUA EN LA FISURA | | | | | |
| | | ESFUERZO PRINCIPAL O MAYOR | 0 | <0.1 | 0.1-0.2 | 0.2-0.5 | >0.5 |
| | | CONDICIONES GENERALES | COMPLETAMENTE SECO | POCO HÚMEDO | HÚMEDO | LIGERO ESCURRIMIENTO | FLUJO ABUNDANTE |
| | | VALUACIÓN | 15 | 10 | 7 | 4 | 0 |
| AJUSTE EN LA EVALUACIÓN POR ORIENTACIÓN DE FISURAS | | | | | | | |
| 6 | VALUACIÓN | ORIENTACIÓN DEL RUMBO Y ECHADO DE LAS FISURAS | MUY FAVORABLE | FAVORABLE | REGULAR | DESFAVORABLE | MUY DESFAVORABLE |
| | | TÚNELES Y MINAS | 0 | -2 | -5 | -10 | -12 |
| | | CIMENTACIONES | 0 | -2 | -7 | -15 | -25 |
| | | TALUDES | 0 | -5 | -25 | -50 | -60 |

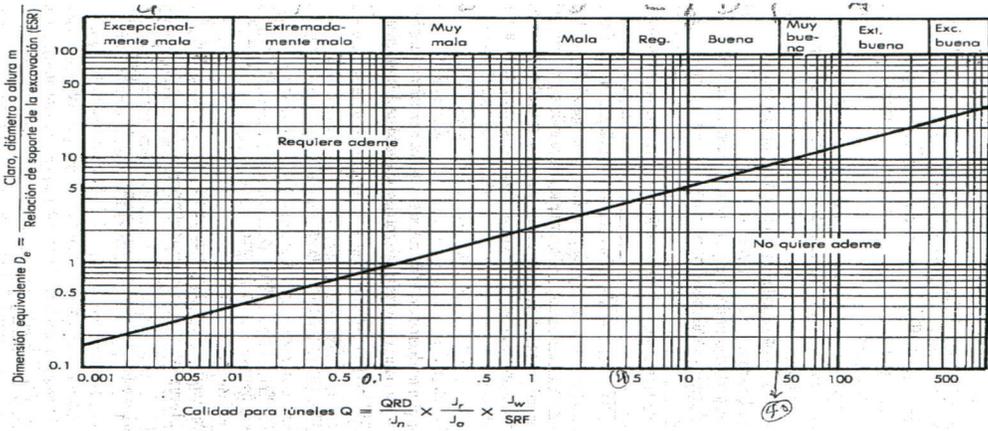
ANEXO 3. Clasificación RMR.

| RUMBO PERPENDICULAR AL EJE DEL TÚNEL | | | | RUMBO PARALELO AL EJE DEL TÚNEL | | ECHADO DE 0° - 20° INDEPENDIENTE DEL RUMBO |
|--------------------------------------|------------------|------------------------------|------------------|---------------------------------|------------------|--|
| PENETRACIÓN EN SENTIDO DEL ECHADO | | PENETRACIÓN CONTRA EL ECHADO | | ECHADO 45° A 90° | ECHADO 20° A 45° | |
| ECHADO 45° A 90° | ECHADO 20° A 45° | ECHADO 45° A 90° | ECHADO 20° A 45° | | | |
| MUY FAVORABLE | FAVORABLE | REGULAR | DESFAVORABLE | MUY DESFAVORABLE | REGULAR | DESFAVORABLE |

| RESULTADO DE LA CLASIFICACIÓN DE ROCAS | | | | | |
|--|----------------|------------|--------------|-----------|---------------|
| VALUACIÓN | 100 - 81 | 80 - 61 | 60 - 41 | 40 - 21 | < 20 |
| TIPO DE CLASIFICACIÓN | I | II | III | IV | V |
| DESCRIPCIÓN | ROCA MUY BUENA | ROCA BUENA | ROCA REGULAR | ROCA MALA | ROCA MUY MALA |

| SIGNIFICADO DE LA CLASIFICACIÓN DE MACIZOS ROCOSO | | | | | |
|---|----------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|
| TIPO DE CLASIFICACIÓN | I | II | III | IV | V |
| TIEMPO MEDIO DE SOSTENIMIENTO | 20 AÑOS PARA 15 m DE CLARO | 1 AÑO PARA 10 m DE CLARO | 1 SEMANA PARA 5 m DE CLARO | 10 Hr. PARA 2,5 m DE CLARO | 30 Min. PARA 1 m DE CLARO |
| COHESIÓN DE LA ROCA (MPa) | > 0.4 | 0.3 - 0.4 | 0.2 - 0.3 | 0.1 - 0.2 | < 0.1 |
| ÁNGULO DE FRICCIÓN DE LA ROCA (GRADOS) | < 45 | 35 - 45 | 25 - 35 | 15 - 25 | < 15 |

ANEXO 3. Continuación... Clasificación RMR.



ANEXO 4. Relación "De" de una Excavación Subterránea sin Soporte y el Índice Q.

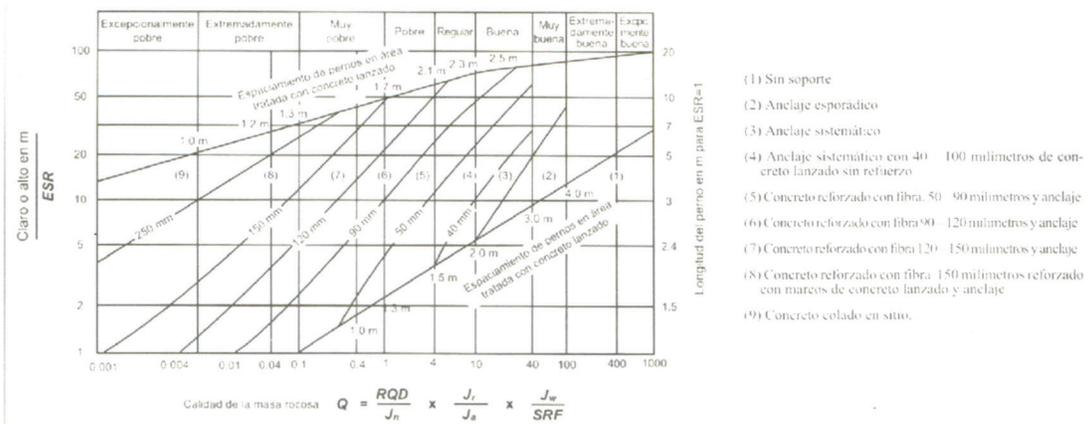


Fig. 3. Gráfica indicando los requerimientos de soporte de acuerdo al valor del índice Q.

ANEXO 5. Categorías de Soporte Estimado basada en el Índice Q.

- (1) Sin soporte
- (2) Anclaje esporádico
- (3) Anclaje sistemático
- (4) Anclaje sistemático con 40 - 100 milímetros de concreto lanzado sin refuerzo
- (5) Concreto reforzado con fibra 50 - 90 milímetros y anclaje
- (6) Concreto reforzado con fibra 90 - 120 milímetros y anclaje
- (7) Concreto reforzado con fibra 120 - 150 milímetros y anclaje
- (8) Concreto reforzado con fibra 150 milímetros reforzado con marcos de concreto lanzado y anclaje
- (9) Concreto colado in situ.

BIBLIOGRAFÍA

- Bhawani Singh, Rajnish K. Goel. **Tunelling in weak rocks..** Vol. 5. Ed. Elsevier.
- E. Hoek, P. K. Kaiser, W. F. Bawden. **Support of underground excavations in hard rocks.** Ed. Balkema.
- E. Hoek, E.T. Brown. **Underground excavations in rock.** Ed. Mc. Graw - Hill.
- Autores varios. **Manual de túneles y obras subterráneas.** Ed. López Jimeno Carlos
- Calvin J. Konya. **Blast Desing.** Ed. Intercontinental Development.
- Ing. B. Ricardo Marín H. **Apuntes de elementos de minería.** Escuela de Minas, Universidad de Guanajuato.
- Ing. B. Ricardo Marín H. **Apuntes de explotación de minas subterráneas.** Escuela de Minas, Universidad de Guanajuato.