

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE**  
**NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**



**"MÉTODOS DE EXCAVACIÓN MECÁNICA PARA LA  
CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES VIALES"**

Realizado por:

**Br. Fernández O., Suleman**

**Br. González M., José M.**

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO ANTE LA UNIVERSIDAD DE  
ORIENTE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL TITULO DE  
**INGENIERO CIVIL**

BARCELONA, DICIEMBRE DEL 2009

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE**  
**NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**



**"MÉTODOS DE EXCAVACIÓN MECÁNICA PARA LA  
CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES VIALES"**

Realizado por:

---

**Br. José Manuel González M**

---

**Br. Suleman Fernández**

ASESOR ACADÉMICO:

---

**Prof. Esteban Hidalgo.**

BARCELONA, DICIEMBRE DEL 2009

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**



**"MÉTODOS DE EXCAVACIÓN MECÁNICA PARA LA  
CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES VIALES"**

**JURADO:**

---

**Prof. Luisa Torres**

Jurado Principal

---

**Prof. Enrique Montejo**

Jurado Principal

BARCELONA, DICIEMBRE DEL 2009

## RESOLUCIÓN.

De acuerdo con el Artículo 57 del reglamento de trabajos de grado **“Para la aprobación definitiva de los Cursos Especiales de Grado, como modalidad de Trabajo de Grado, será requisito parcial la entrega a un jurado calificador de una monografía, en la cual se profundiza en uno o más temas relacionados con el área de concentración”**.

## DEDICATORIA.

A **Dios**, por todas las oportunidades y victorias que me ha obsequiado.

A mi madre **Mumtaz Suleman** por ser inmensamente bella, darme siempre todo lo que podías dar, y siempre aceptarme y apoyarme.

A mi padre **Marcelino Fernádes** por demostrarme el valor de esforzarse siempre, eres un orgullo para mí.

A mi hermano **Juan Fernádes** tu madurez y tu afecto me guían por un camino mejor.

A mi **familia**, que el hecho de su lejanía me motiva y me inspira a mejorar.

A mis padrinos, **Miro** y **Chuito** por siempre poder contar con ustedes.

A mis amigas, **Betzelis (coma coma)** y **Francis** por apoyarme en todos los momentos en que las necesite.

A todos los amigos que coseché dentro de la universidad, porque todos me apoyaron y me ayudaron siempre. Especialmente aquellos con los que forme grupo de trabajo: José (el flaco), Richard, Carmen, Enderson, Eliannys, Gianna, Juancho, Reinaldo, Cruz, Lourdes, Francis, Gabriela, Daniel, Katy, Mariangel, Delimar, Ana, Luis (el gordo), Víctor, Álvaro, Victoria, Matimar, Claudia, Carpintero, José Miguel, Luis Arreaza, Giohanna, Andrés,

Alejandro, Jesús (el chino), Diuban, Javier, Cesar, José Hernández, Mayerling, Mariannys, Leudys, Jessica y otros...

A mi ahijado, **Luis Miguel** Dios te bendiga.

A mi patria bella **Venezuela** espero serte útil.

*Suleman Fernández Omar.*

## DEDICATORIA.

En primer lugar a **Dios**, por ayudarme en las buenas y en las malas. Por siempre darme fuerzas y mucha salud para no abandonar la carrera.

A mis padres, **Laura Mantovani** y **José González**, por siempre confiar en mí y darme ánimos y mucho apoyo en los momentos difíciles, para así terminar esta maravillosa carrera.

A mi nona y hermana mayor, **Cira Ostorga** e **Iliana Rodríguez**, por darme su apoyo incondicional en todo lo que necesitara en el transcurso de mi carrera.

A mis hermanos **Simón**, **Jacqueline**, **Ricardo**, por confiar en mí.

A mis lindos sobrinos, **Valeria** y **Sebastián**, por venir a este mundo que lleno mi vida con mucha felicidad.

A todos mis tíos y primos, por siempre estar conmigo.

A mi amiga Francis Roja, por siempre ayudarme al comienzo de mi carrera.

A todos mis amigos con lo que comencé la carrera sobre todo a Suleman, Richard, Carmen, Enderson, Gianna, Juan Marcano y Elianny, porque fuimos y seremos siempre un buen equipo de trabajo.

A mis buenos amigos de toda la vida Jesús, Andrés y Guerrero, por siempre darme ánimos y aliento en el transcurso de la carrera.

A todos los profesores que no me hicieron la vida imposible dentro de la universidad, en especial al Prof. Blas Pinto por darme su confianza.

*José Manuel González Mantovani.*



## **AGRADECIMIENTO.**

Primeramente a **Dios** por reorientar mi vida y darme la oportunidad de avanzar.

A mis padres, **Mumtaz y Marcelino** por todo su apoyo de siempre, y nunca dejar de luchar por hacerme mejor persona, han sido un ejemplo para mí. Siempre estaré orgulloso de ustedes. .

A mi hermano **Juan** por apoyarme y ayudarme todos los días, y siempre estar disponible para tenderme la mano.

A mi gran amigo y hermano **José (el flaco)**, por siempre ayudarme a centrar tantas cosas en mi vida, contar contigo en todo momento ha sido vital para alcanzar esta meta. Y a todos en su hogar donde me han recibido como uno más de su familia.

A todos los profesores que a lo largo de la carrera me han aportado su tiempo y conocimiento.

A nuestro tutor el Prof. **Esteban Hidalgo**, por estar siempre dispuesto a ayudarnos en este trabajo.

A los profesores de las áreas de grado **Luisa Torres y Enrique Montejo**, por disponer su tiempo y ayudarnos en esta etapa.

A todos los amigos y compañeros en quienes siempre me apoye fuese para una clase que no fui o llegue tarde o para explicarme lo que no entendía

aceptando mi forma exhaustiva de complicar las cosas. En especial los de todos los días: Kmu, Richard, Gianna, Eliannys, Enderson, y tantos mas.

Al Prof. **Domingo Nery**, quien sin saberlo Dios lo uso para darme esta oportunidad de estudiar esta bella carrera.

A la **Mina de Oro** y todas las personas con las que ahí trabaje en especial a Betzelis, Francis, Antonio, Benjamín, Andrés y Andreina. No fue solo un trabajo fue un hogar para mí.

A la UDO, la escuela, el CEDIC y todos los que luchan por CIVIL.

*Suleman Fernández Omar.*

## AGRADECIMIENTO.

Agradezco a **Dios** por haberme dado la oportunidad de estudiar esta carrera.

Al Prof. **Esteban Hidalgo**, por su disposición y entrega en todo momento para ayudarnos en la monografía.

A los profesores de las áreas de grado **Luisa Torres** y **Enrique Montejo**, por dedicarse a nosotros, brindarnos todos sus conocimientos y apoyos brindados.

A toda mi familia en si por siempre apoyarme en lo que necesitara.

A mi amigo y hermano, **Suleman** por siempre apoyarme y guiarme cuando me perdiera en el transcurso de la carrera, sobre todo en las áreas de grado.

A todos mis compañeros de las áreas de grado.

A mis compañeros del centro de estudiante, por siempre darme lo que necesitara de la sala de lectura y sala de computación.

*José Manuel González Mantovani.*

## RESUMEN.

La selección del método constructivo a usar en la construcción de un túnel está ligado a muchos factores, entre los más importantes están: las características geomecánicas del terreno, los parámetros técnicos del tipo de túnel que se desea construir, la longitud del túnel, el aspecto económico, el impacto ambiental. Lo que exige tener un conocimiento de todas las herramientas disponibles así como los aspectos positivos y negativos que pueda presentar cada método. Son dos los métodos de construcción de túneles, el de perforación y voladura y el de excavación mecánica. El primero es mediante el uso de explosivo y su uso está limitado básicamente a macizos rocosos de gran dureza y abrasividad; en cuanto que la excavación mecánica refiere al uso de maquinaria de diversas características que permiten dar soluciones a las diferentes propiedades que pueda presentar el terreno a atravesar. Se clasifican en tres grupos de maquinas, según su principio de excavación: la tuneladora que realiza un corte a sección completa; la rozadora que realiza un ataque puntual mediante la aplicación del peso de la maquina y el rozado de picas; y el martillo hidráulico que también es una maquina de ataque puntual pero aplica la fuerza para realizar un impacto de la pica y quebrantar la roca. Cada una de esta presenta diferentes variaciones que influyen en el avance del túnel, en la construcción de la fortificación del túnel, en la seguridad y otros aspectos. Además existen cada día nuevos aportes y avances tecnológicos, los cuales mejoran significativamente los porcentajes de rendimiento de los equipos así como diferentes modificaciones de los útiles de corte que son usados por estas maquinarias.

# INDICE.

pp.

## CONTENIDO.

RESOLUCIÓN.....	iv
DEDICATORIA.....	v
DEDICATORIA.....	vii
AGRADECIMIENTO.....	ix
AGRADECIMIENTO.....	xi
RESUMEN.....	xii
INDICE.....	xiii
LISTADO DE TABLAS Y FIGURAS.....	xvii
LISTA DE TABLAS.....	xvii
LISTA DE FIGURAS.....	xix
INTRODUCCIÓN.....	xxi
CAPITULO I.....	22
1.1 Planteamiento del Problema.....	23
1.2 Objetivos.....	25
1.2.1 Objetivo General.....	25
1.2.2 Objetivos Específicos.....	25
CAPITULO II.....	26
2.1 Túnel.....	27
2.2 Principales funciones.....	27
2.2.1 Para transporte.....	27
2.2.2 Almacenamiento.....	28
2.2.3 Instalaciones.....	28
2.2.4 Científica.....	29

2.2.5 Protección.....	29
2.3 Factores relacionados con la función de cada túnel.....	29
2.4 Clasificación según su ubicación.....	31
2.4.1 Túneles de montañas. ....	31
2.4.2 Túneles subacuáticos. ....	31
2.4.3 Túneles urbanos. ....	32
2.5 Características de los diversos tipos de túneles.....	32
2.5.1 Túneles para ferrocarril.....	32
2.5.2 Túneles en carreteras. ....	34
2.5.3 Transporte urbano (Metro).....	35
2.5.4 Conducción de agua.....	35
2.5.5 Centrales hidroeléctricas subterráneas.....	36
2.5.6 Sistema de alcantarillado.....	37
2.6 Clasificación Geomecánica de Roca.....	38
2.7 Clasificaciones existentes: .....	40
2.7.1 Índice de calidad de las rocas, RQD “rock quality designation” Deree et al. (1967).....	40
2.7.2 Clasificación de Bieniawski (R.M.R.) “Rock Mass Rating” Z. T. Bieniawski (1989). ....	41
2.7.3 División de la clasificación de Bieniawski en subclases.....	43
2.8 La práctica de La Ingeniería de Rocas.....	46
2.9 Método de excavación.....	47
2.9.1 TBM abierto (60 < RMR).....	47
2.9.2 Voladuras (RMR > 40). ....	47
2.9.3 Rozadora (30 < RMR < 90).....	47
2.9.4 Fresado (RMR < 30).....	48
2.9.5 Escarificación / Pala (RMR < 20).....	48
2.9.6 Escudo (RMR < 20). ....	48
CAPITULO III .....	49

3.1 Generalidades.....	50
3.2 Útiles de corte.....	50
3.2.1 Picas de corte.....	52
3.2.2 Cortadores para roca.....	54
3.2.2.1 De los cortadores de disco.....	55
3.2.2.2 De los cortadores de rodillo dentado.....	57
3.2.2.3 Cortadores de botones.....	58
3.2.3 Rotura por impacto.....	59
3.2.3.1 Impactadores.....	60
3.2.3.2 Cortadores vibrantes.....	60
3.2.4 El mecanismo de corte asistido con "jets" de agua.....	60
3.3 Tipos de Excavación Mecánica.....	61
3.3.1 Tuneladoras, Topo o TBM.....	61
3.3.1.1 Tipos de Tuneladoras:.....	64
3.3.1.2 Principales Fabricantes de Tuneladoras, Topo o TBM.....	74
3.3.1.3 Estimación de Rendimientos.....	80
3.3.1.4 Factores que Influyen en el Rendimientos de las Máquinas... ..	87
3.3.1.5 Los factores adversos para la utilización de los topos.....	90
3.3.2 Rozadora.....	93
3.3.2.1 Sistema de Corte.....	94
3.3.2.2 Principales Fabricantes de Rozadoras.....	96
3.3.2.3 Estimación del rendimiento de una rozadora:.....	99
3.3.2.4 Clasificación de la Máquina.....	102
3.3.2.5 Criterios para la elección de una Rozadora.....	103
3.3.2.6 Costo de Utilización de una Rozadora.....	106
3.3.3 Martillo Hidráulico.....	107
3.3.3.1 Componentes de un Martillo Hidráulico.....	109
3.3.3.2 Tipo de martillos hidráulicos, según su principio de funcionamiento.....	111

3.3.3.3 Características del Martillo Hidráulico. ....	112
3.3.3.4 Como se debe Trabajar con un Martillo Hidráulico. ....	113
3.3.3.5 Mantenimiento del Martillo Hidráulico. ....	115
3.3.3.6 Principales Fabricantes. ....	117
3.3.3.7 Localización de Averías. ....	119
3.4 Ventajas y Desventaja de la Tuneladora. ....	120
3.4.1 Ventajas. ....	120
3.4.2 Desventajas. ....	121
3.5 Ventajas y Desventaja de la Rozadora. ....	122
3.5.1 Ventajas. ....	122
3.5.2 Desventajas. ....	123
3.6 Ventajas y Desventaja del Martillo Hidráulico. ....	123
3.6.1 Ventajas. ....	123
3.6.2 Desventajas. ....	123
CAPITULO IV. ....	125
4.1 Comentarios finales. ....	126
GLOSARIO. ....	128
BIBLIOGRAFÍA. ....	131
METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO: .....	133



## LISTADO DE TABLAS Y FIGURAS.

### LISTA DE TABLAS.

pp.

#### TABLAS.

Tabla 1. Clasificación de la roca según su RQD.....	41
Tabla 2. Valores máximos según cada parámetro de clasificación, según Bieniawski.....	41
Tabla 3. Tabla de valores de los parámetros en la clasificación R.M.R. Bieniawski (1989). .....	42
Tabla 4. Tabla de valores en la clasificación R.M.R. de Bieniawski (1989); y la calidad que indica. ....	43
Tabla 5. Clasificación modificada de Bieniawski en subclases y Comparación con la original.....	44
Tabla 6. Máquinas TBM Robbins.....	75
Tabla 7. Máquinas TBM Robbins.....	75
Tabla 8. Máquina TBM Wirth. ....	78
Tabla 9. Máquina TBM Wirth. ....	78
Tabla 10. Valores de Coeficiente “B” en función del estado de la máquina y de los cortadores. ....	81
Tabla 11. Valores de CU, según las condiciones de trabajo.....	82
Tabla 12. Coeficiente de A para una jornada de veinticuatro horas.....	83
Tabla 13. Datos de consumo de energía. ....	86
Tabla 14. Equipos de Antraquip Corporation. ....	96
Tabla 15. Coeficiente de eficiencia. $C_E$ .....	100
Tabla 16. Rendimiento instantáneo RI ( $m^3/hora$ ). ....	100

Tabla 17. Coeficiente de tiempo disponible para el rozado. ....	101
Tabla 18. Relación entre la Resistencia de la Roca y Potencia de la Máquina. .....	104
Tabla 19. Equipos Maverick.....	117

## LISTA DE FIGURAS.

pp.

### FIGURAS.

Figura 1. Útiles de corte. ....	51
Figura 2. Tipos de picas según su uso en roca dura o blanda.....	54
Figura 3. Esquema básico de la tuneladora.....	63
Figura 4. Esquema básico de un topo. ....	65
Figura 5. Escudo Mixshield.....	69
Figura 6. Esquema básico de un Mixshield. ....	70
Figura 7. Escudos de balance de presión de tierras o EPB.....	71
Figura 8. Esquema básico de un escudo EPB.....	71
Figura 9. Escudos de balance de presión de tierras o EPB.....	72
Figura 10. Esquema básico de un Escudo para roca dura. ....	73
Figura 11. Doble Escudo. ....	74
Figura 12. Máquina Robbins.....	76
Figura 13. Máquina Robbins MM120 373 Kw. ....	76
Figura 14. TBM Lovat. ....	77
Figura 15. Máquina TBM Wirth.....	79
Figura 16. Máquina TBM Bouygues Modelo STEC Diámetro 15.43m.....	80
Figura 17. Esquema Básico de una Rozadora.....	94
Figura 18. Milling. (Ataque Lateral). Ripping. (Ataque Frontal).....	95
Figura 19. Escudo Abierto con Rozadora. ....	95
Figura 20. Máquina rozadora Antraquip Corporation. AQM100 198/200 kW.....	97
Figura 21. Máquina rozadora Dosco Mk4 96ton.....	98
Figura 22. Máquina rozadora Dosco LH1300H 58ton.....	98
Figura 23. Máquina rozadora IBS SM 100 65 MPa.....	99
Figura 24. Martillo Schmidt. ....	103

Figura 25. Esquema de una Máquina con un Martillo Hidráulico.....	108
Figura 26. Componentes de una Martillo Hidráulico. ....	109
Figura 27. Manera correcta al colocar un martillo hidráulico.....	115
Figura 28. Martillo Hidráulico Modelo Maverick 12000HSP.....	118
Figura 29. Martillos XP - Serie pesada. 2350 kilogramos - 4380 kilogramos. .....	119

## **INTRODUCCIÓN.**

El túnel es un elemento de vital importancia en la infraestructura vial de cualquier país o región, ya sea su uso para paso de vehículos, sistemas férreos u otros. La construcción de estos representan en la mayoría de los casos una inversión de alto costo sin remuneración económica, pero si aportan muchas ventajas en ahorro de tiempo y energía (combustible), e integración ya que su función primordial es la de acortar distancias atravesando una limitación natural.

Llevar a cabo la construcción de un túnel, requiere sin duda la aplicación de diferentes áreas de la ingeniería, como la geomécanica, diseño estructural, vialidad y ciertos aspectos ambientales de gran importancia. Conocer las posibles soluciones permitirá la selección del método constructivo más idóneo.

La excavación mecánica de túneles, se refiere al uso de maquinarias de diferentes tipos que permiten dar solución ante la problemáticas que pueda presentar el terreno. Dar a conocer los aspectos y características de funcionamiento y optimización del rendimiento de la tuneladora; de la rozadora; y del martillo hidráulico será el norte del presente trabajo determinando además los aspectos positivos y negativos que presente el uso de cada una de estas maquinas.

## **CAPITULO I**

### **ASPECTOS GENERALES**

## 1.1 Planteamiento del Problema.

En 1980 Krynine y Judd expresaron que los túneles son esencialmente un elemento de infraestructura, ya sea su uso para un sistema de vialidad, complemento en represas o en la minería. En el campo, en lugar de ejecutar cortes profundos, se utilizan frecuentemente los túneles para hacer pasar la línea de avance bajo un obstáculo natural, como una colina o sierra, en los centros urbanos hay túneles para los ferrocarriles, metros, carreteras subterráneas, etc., dado que por la complejidad de los problemas de tráfico, estos no pueden construirse en la superficie, hay túneles para abastecimiento de agua y alcantarillado, y túneles utilizados en la producción de energía eléctrica.

Los trabajos de construcción de túneles plantean una problemática específica como consecuencia de las limitadas dimensiones y accesibilidad del frente de trabajo, por una parte, y de las desfavorables consecuencias que puede acarrear en el medio circundante (roturas, deformaciones, filtraciones) la apertura de un vacío continuo en su interior.

En la construcción de túneles se debe tener en cuenta los diferentes tipos de métodos y una sistemática de trabajo que permita una obtención ideal de los rendimientos adecuados, el mantenimiento y además de la estabilidad general del entorno afectado. (Cornejo, 1988).

Los métodos de excavación mecánica que normalmente existen y se aplican en túneles de rocas son: excavación con tuneladoras o topes; con rozadoras; y con martillos hidráulicos. Aunque cabe destacar que existen otros métodos de excavación como perforación y voladura mediante la utilización de explosivos.

Es observado por los autores que en la actualidad, en Venezuela como en todo país en desarrollo, existe la necesidad de renovar y/o mejorar sus sistemas viales, de la mano con los sistemas de transporte, dotar a las hasta hoy mal planificadas ciudades y las futuras de una mejor reorganización y planificación, así como también se requiere el mejor aprovechamiento de los recursos naturales disponibles. Visto así las construcciones de túneles, gana importancia por lo que se ha considerado recopilar la información necesaria en la construcción de túneles, con la finalidad de explicar los diferentes métodos de excavación mecánica de túneles en roca de manera concreta; ya que existe la necesidad de dotar al territorio de soluciones de ingeniería viables ante los problemas que puedan surgir para cumplir las necesidades del entorno.

Se debe resaltar, que el actual pensum de estudio de la carrera de Ingeniería Civil en la Universidad de Oriente, así como en la mayoría de las universidades del país, no contempla una materia referente al diseño y métodos de construcción de túneles, razón por la cual, esta recopilación de información dará a cualquier estudiante o profesional la oportunidad de iniciarse en el tema y conocer en profundidad los aspectos más importantes de la construcción de túneles viales por medio de la excavación mecánica.



## **1.2 Objetivos.**

### **1.2.1 Objetivo General.**

Estudiar los métodos de excavación mecánica para la construcción de túneles viales.

### **1.2.2 Objetivos Específicos.**

1. Describir el método de construcción de túneles mediante tuneladoras o TBM.
2. Explicar el método de construcción de túneles mediante rozadoras.
3. Informar sobre el método de construcción de túneles mediante martillo hidráulico.
4. Analizar las ventajas y desventajas en la utilización de los diferentes métodos.

## **CAPITULO II**

### **MARCO TEORICO**

## **2.1 Túnel.**

Es el camino subterráneo o subacuático, abierto artificialmente para establecer un enlace entre dos puntos, a través de una limitación natural.

## **2.2 Principales funciones.**

Entre las funciones por la que se hace necesaria la construcción de un túnel se pueden indicar: túneles para transporte, para almacenamiento, para albergar instalaciones diversas, por necesidades científicas y túneles para protección de personas.

### **2.2.1 Para transporte.**

Es de hecho la función más antigua. Se construyen túneles para atravesar cualquier obstáculo natural; originalmente fueron las conducciones de agua las que necesitaron de la solución de túnel, debido a las requerimientos de pendiente mínima o nula; más adelante con el desarrollo del ferrocarril, y posteriormente el desarrollo de los vehículos automóviles, la construcción de túneles se hace necesaria por razones parecidas a las anteriores (evitar fuertes pendientes) pero también por razones nuevas: acortar distancia y ganar seguridad.

Túneles para el transporte de personas y mercancías:

- En carreteras.
- En líneas del ferrocarril.
- En líneas de transporte urbano (Metro).
- Pasos para peatones.

- Pasos para ciclistas.

Túneles para el transporte de agua.

- En canales.
- En abastecimiento urbanos.
- Para el riego.
- En centrales hidroeléctricas.
- Para el agua de enfriamiento en centrales térmicas y nucleares.

Túneles en sistemas de alcantarillado.

Túneles para diversos servicios (cables y tuberías).

### **2.2.2 Almacenamiento.**

En ocasiones se usan túneles de almacenamiento de determinadas sustancias y materiales, de manera de garantizar las condiciones necesarias de seguridad en unos casos, y evitar el fuerte impacto ambiental que ocasionarían unos grandes depósitos en la superficie:

- Almacenamiento de petróleo.
- Almacenamiento de residuos radioactivos.
- Almacenamiento de materiales para usos militares.
- Embalses subterráneos.

### **2.2.3 Instalaciones.**

Las grandes instalaciones subterráneas que se construyen bajo la superficie, por distintos motivos (prácticos, estratégicos, etc.); tales como:

- Centrales energéticas.
- Estacionamiento de vehículos.
- Depuradoras de aguas residuales.

#### **2.2.4 Científica.**

En la actualidad los países más desarrollados construyen túneles para investigaciones científicas de difícil realización en la superficie:

- Acelerador de partículas subatómicas.

#### **2.2.5 Protección.**

Cuando su función es la protección de las personas, tanto militares como civiles; en los últimos tiempos se han construido para la defensa frente ataques nucleares. En estos túneles el mayor reto es la resistencia de la estructura a los explosivos, así como la preservación de la vida durante un largo periodo de tiempo, entre estos:

- Refugios.
- Puestos de control.

### **2.3 Factores relacionados con la función de cada túnel.**

En 1999 Tapia, se refiere a los siguientes factores que aunque son individuales están relacionados entre sí, de manera que la elección de unos condicionara la de otros. De esta manera:

- La ubicación de túnel, que podrá ir a través de una montaña, ser subacuático o urbano.

- El terreno puede ser desde un limo blando hasta una roca dura; la ubicación y el tipo de terreno que se atraviesa indicara: los cambios en la geometría, en la forma de las estructura y por supuesto en el método de construcción.

- Las dimensiones del túnel acabado (ancho, altura y longitud), así como los parámetros que definan la planta (curvas circulares, de transición) y el alzado (pendientes máximas); estarán limitados según el uso y la función que este tendrá, siendo diferentes los parámetros cuando es un paso vehicular o férreo.

- La forma de la estructura, que puede ser circular, rectangular o de herradura; el material utilizado que será el hormigón con mayor o menor espesor y el acero. Tanto el tipo de terreno debido a las carga que este ejerce, el aspecto hidrológico y geológico, y el método de construcción a usar; influirán decisivamente sobre la forma estructural.

- El sistema constructivo, ya sea excavación por explosivos, maquinas tuneladoras a sección completa, procedimientos de corte del terreno y posterior relleno para los túneles más superficiales u otro. La elección del método vendrá determinada por las condiciones del terreno pero también por aspecto económico de la obra en ejecución.

- El equipamiento del túnel ya terminado, las calzadas o las vías del ferrocarril, la iluminación, los sistemas de control, los acabados decorativos en su caso.

## **2.4 Clasificación según su ubicación.**

Otra clasificación de los túneles, cuando su función es el transporte, podría ser por su ubicación. Los obstáculos naturales a atravesar son variados: cadenas montañosas, ríos estuarios o mares, y en una ciudad las calles, edificios u otras estructuras.

### **2.4.1 Túneles de montañas.**

Existen dos soluciones para atravesar con un túnel una cadena montañosa: la de un túnel corto a un nivel elevado, solución más económica pero que exige largas pendientes y curvas cerradas hasta llegar a la altura elegida, o la de un largo túnel a un nivel más bajo, con el que se acortaran distancias y se ahorrara en combustible y tiempo, aunque la inversión de capital será mucho mayor.

### **2.4.2 Túneles subacuáticos.**

Optar por un túnel en lugar de por un puente para atravesar un río o un estuario dependerá de cada caso. Si se precisan numerosas vías para el tráfico y el tipo de navegación permite una luz entre pilares moderada, el puente puede ser la mejor solución; pero si se precisan claros muy largos para la navegación, el costo del puente se encarece de manera desproporcionada, y si además las condiciones de cimentación no son muy buenas, el túnel será la mejor elección.

Por otro lado, con la solución del túnel en el futuro se podrán ir ampliando las vías, según la densidad del tráfico lo requiera, construyendo otros túneles paralelos, mientras que toda la inversión para el puente tiene

que ser inicial aunque en el momento de la construcción no se requiera todas las vías para la que se ha construido.

### **2.4.3 Túneles urbanos.**

La construcción de túneles bajo las calles de una ciudad es utilizada para casi todas sus aplicaciones al transporte, pero los túneles urbanos más largos son los de ferrocarriles subterráneos, abastecimiento de agua y sistemas de alcantarillado. Túneles más cortos son los de carreteras, debido a los elevados problemas de ventilación y accesos que supondrían largos túneles; otros túneles urbanos cortos son los pasos para peatones.

## **2.5 Características de los diversos tipos de túneles.**

### **2.5.1 Túneles para ferrocarril.**

La utilización del túnel en las líneas de ferrocarril es para salvar colinas, en zonas costeras, en grandes cadenas montañosas y en cruces subacuáticos.

En los dos primeros casos suelen ser túneles cortos y su definición en planta puede ser recta o curva.

En los túneles más largos se adopta preferentemente el trazado en línea recta ya que es el más económico y también, permite excavarse desde los dos extremos, el más exacto en el replanteo y por lo tanto en la coincidencia entre ambos ataques.



Una excepción a esta regla se da en los túneles que atraviesan grandes cadenas montañosas. Cuando el trazado de la línea férrea exige la construcción de un túnel entre los puntos A y B, puede ocurrir que la pendiente del túnel en recta sea superior a la permitida por el sistema férreo; entonces hay que conseguir aumentar la longitud entre los dos puntos fijos mediante un trazado en curva, que en ocasiones llega a formar un "caracol" completo (trazado helicoidal).

En cuanto a la rasante del túnel dependerá de la disposición del terreno más conveniente para la excavación y de las pendientes máximas admitidas, aunque se le intentara dar siempre un mínimo de pendiente para permitir la circulación de las aguas hacia la boca del túnel.

Los factores que controlan la pendiente máxima en una línea de ferrocarril son la potencia de la máquina y la adhesión del riel. Son pendientes usuales entre 1.00 % y 2.50 %. (Tapia, 1999).

También el radio de las curvas será el que determine la velocidad máxima de circulación de los trenes.

La sección tipo difiere según el tipo de terreno: en roca se utilizan generalmente muros verticales y la bóveda de medio punto (sección de herradura), en terrenos menos resistentes esta se aproxima más a una forma ovoidal añadiendo una solera, y en terrenos malos se tiende al círculo, con contra bóveda inferior.

### **2.5.2 Túneles en carreteras.**

Los túneles en carreteras pueden ser cortos y largos, su definición en planta también tiende a ser en recta por ser el camino más corto y por lo tanto el más económico, aunque al igual que para el ferrocarril se construyen en curva si las condiciones del terreno a utilizar lo recomiendan por otras causas. Las curvas pueden ser más cerradas.

Tapia (1999) indica que, el perfil longitudinal sigue las mismas pautas en cuanto a las condiciones necesarias para la evacuación de las aguas por gravedad. Las pendientes pueden ser mayores que en el caso de los ferrocarriles, son pendientes normales 3.50 % y 4.50 %. Lo normal es que se construya túneles de dos carriles únicamente ya que en todos los túneles el aumento del ancho repercute de manera desproporcionada en el costo, al tenerse no solo que excavar mayor volumen sino también aumentar el espesor del revestimiento. Por ello es preferible excavar dos túneles paralelos con dos carriles cada uno cuando las necesidades sean de cuatro vías (dos para cada sentido).

En cuanto al equipamiento del túnel es necesaria una iluminación que debe ser potente en la entrada, sobre todo de día, y disminuir progresivamente hacia el interior cuando ya el ojo humano se ha adaptado el cambio de luminosidad exterior-interior. La ventilación debe prever hasta las situaciones de emergencia, como colapsos de tránsito e incendios. El proyecto de ventilación tiene gran influencia en el proyecto y construcción del túnel.

### **2.5.3 Transporte urbano (Metro).**

Las pendientes pueden ser más pronunciadas que los túneles de ferrocarril, son normales pendientes del 3.5 %, (Tapia, 1999).

En general son túneles tan pocos profundos como sea posible, por la importancia de un rápido y fácil acceso desde la superficie: es por ello que en los tramos donde no se ocasionan excesivos problemas por el corte de calle ni el corte de servicios más superficiales (líneas eléctricas, de gas, de alcantarillado, etc.) se construyen por el método de corte y relleno que. Como su nombre sugiere, consiste en excavar desde la superficie para posteriormente y a cielo abierto construir el túnel, y por último rellenar y reconstruir la superficie.

Otro método que afecta en menor grado a la superficie es el denominado por pantallas, muy útil en terrenos inestables o de relleno propios de las zonas urbanas.

Si el sistema de excavación ha sido el de corte y relleno la sección suele ser rectangular y actualmente a base de piezas prefabricadas de fácil y rápido montaje. En túneles perforados se tiende a la sección circular con el mínimo diámetro, por lo que la exactitud en el replanteo de la alineación es muy importante debido al escaso espacio libre entre el material rodante y la estructura.

### **2.5.4 Conducción de agua.**

En este tipo de túneles no existen limitaciones de curvas y pendientes, las alineaciones podrán ser rectas, lo más largas posibles, o curvas. Incluso

puede convenir que sean líneas quebradas si con ello se pasa bajo una depresión o garganta que nos permita abrir nuevos frentes de ataque en la excavación. El perfil longitudinal tendrá todo tipo de inclinaciones incluso la vertical, siempre que tenga un gradiente hidráulico descendente de extremo a extremo. Otras características es que sean lisos e impermeables. La impermeabilización es importante en dos aspectos contrarios. Por un lado para evitar erosiones importantes por pérdidas de agua en tramos en los que circule a muy alta presión, y por otro lado para evitar infiltraciones que podrían contaminar el agua cuando el túnel fuera parcialmente lleno.

La sección que se adopta normalmente es la circular, que es la que le da el máximo caudal de agua y que además mejor resiste los empujes del terreno. (Tapia, 1999).

### **2.5.5 Centrales hidroeléctricas subterráneas.**

En ellas se construyen una compleja red de túneles con distintas funciones y características, que se pueden clasificar en tres tipos: de descarga libre, de alta presión y sala de máquinas y transformadores.

Los considerados de descarga libre que sirven para la captación y desagüe, deben tener una pendiente suave, la sección tipo normalmente circular y el revestimiento son similares a lo de los túneles para abastecimientos urbanos.

Los túneles de alta presión o conducciones forzadas suelen tener una fuerte pendiente, e incluso pueden ser verticales por lo que en su construcción se emplean técnicas propias de construcción de pozos; es importante hacer mínima la pérdida de carga hidrostática por lo que un

revestimiento liso es imprescindible. El revestimiento debe ser capaz de soportar altas presiones y además ser impermeable, por lo tanto a menudo será de acero o de hormigón con un revestimiento de acero.

Las salas de maquinas y de transformadores, son grandes cavernas que albergan todo tipo de equipos (turbogeneradores, transformadores, tuberías de alimentación a las turbinas, otros), y la anchura oscila entre 15 y 30 metros. La construcción de estas grandes salas requiere una roca resistente. (Tapia, 1999).

#### **2.5.6 Sistema de alcantarillado.**

Las dimensiones de los túneles son muy variables, secciones inferiores a tres metros cuadrados no son prácticas, por lo que se suele ser el mínimo aceptable si se construye con las técnicas clásicas. En su interior se sitúa una tubería que se adecue a nuestras necesidades. En la actualidad las técnicas de microtúnel consiguen la ejecución de túneles de diámetros menores a tres metros cuadrados y longitudes menores a 200 metros, que afectan mínimamente a la superficie (pozos de pequeñas dimensiones).

La pendiente será pequeña pero uniforme el flujo que conducen es muy variable por lo que debe asegurarse la circulación del agua bruta en tiempo seco, evitando el sedimento de arenas, y en época de lluvias, en la que el colector tendrá que tener capacidad suficiente. La sección podrá ser circular o de herradura. En ambos casos se suele practicar un pequeño canal en la solera para asegurar la circulación del flujo en época seca, aunque la sección que mejor se adapta a estos requisitos es la ovoidal. Otro requisito es la impermeabilidad para evitar contaminaciones por pérdida de aguas. (Tapia, 1999).

En cuanto a su definición en planta, podrá ser recta o en curva y muy a menudo su recorrido será quebrado.

## **2.6 Clasificación Geomecánica de Roca.**

Mediante el estudio de las condiciones geológicas subterráneas del área, se pueden establecer los planes a seguir para garantizar la instalación adecuada de las fortificaciones. Existen diferentes tipos de roca, cada una de las cuales tienen sus propias características y propiedades físicas. Existen también, diferentes situaciones que requieren el uso de fortificación adicional para consolidar los estratos de la roca, afirmar los bloques y prevenir la caída de roca.

Si bien es cierto, previo a la construcción de una labor subterránea, se realiza un estudio preliminar de la geología del terreno mediante sondajes (muestras de perforación diamantina), mapeos geológicos y otros, es físicamente imposible detectar completamente las condiciones en que se encuentran los diversos elementos de un cuerpo tan complicado como es el macizo rocoso. (CASTEM E.I.R.L., 2006)

En la mayoría de los casos, el macizo rocoso aparece como un conjunto ensamblado de bloques irregulares, separados por discontinuidades geológicas como fracturas o fallas y, por ello la Caracterización Geomecánica de los macizos rocosos es compleja; pues debe incluir tanto las propiedades de la matriz rocosa así como de las discontinuidades.

Es así que el diseño de una excavación subterránea, que es una estructura de gran complejidad, es en gran medida el diseño de los sistemas de fortificación. Por lo tanto, el objetivo principal del diseño de los sistemas

de refuerzo para las excavaciones subterráneas, es de ayudar al macizo rocoso a soportarse, es decir, básicamente están orientados a controlar la “caída de rocas” que es el tipo de inestabilidad que se manifiesta de varias maneras. Controlar los riesgos de accidentes a personas, equipos y pérdidas de materiales (producto de la inestabilidad que presenta una labor durante su abertura), constituye una preocupación primordial que debe ser considerada en la planificación de las labores.

El diseño de sostenimiento de terrenos es un campo especializado, y es fundamentalmente diferente del diseño de otras estructuras civiles. El procedimiento de diseño para el sostenimiento de terrenos por lo tanto tiene que ser adaptado a cada situación. Las razones son los hechos siguientes:

- Los materiales utilizados es altamente variable.
- Hay limitaciones severas en lo que se puede proporcionar la información por medio de investigaciones geológicas.
- Existen limitaciones en exactitud y la importancia de parámetros probados del material de la roca.
- Existen limitaciones severas en el cálculo y los métodos para modelar el sistema de sostenimiento.
- El comportamiento de aberturas es dependiente del tiempo, y también influenciado por los cambios en filtraciones de agua.
- Incompatibilidad entre el tiempo necesario para las pruebas de los parámetros, para los cálculos y modelos, comparados al tiempo disponible.

## 2.7 Clasificaciones existentes:

- R. Q. D.
- R. M. R. (Bieniawski)
- S. M. R. (Romana)
- Q (Barton et al.)
- Terzaghi.
- R. S. R. (Wickham et al.)
- Protodyakonov.
- Lauffer.
- Louis.

### 2.7.1 Índice de calidad de las rocas, RQD “rock quality designation” Deree et al. (1967).

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 cuenta solamente fragmentos iguales o superiores a 100 mm de longitud. El diámetro del testigo tiene que ser igual o superior a 57.4 mm y tiene que ser perforado con un doble tubo de extracción de testigo. Se calcula con la ecuación 1 y se clasifica con los valores de la tabla 1.

$$RQD = \frac{\sum (\text{longitud\_fragmentos\_} > 10\text{cm})}{\text{longitud\_total\_perforada}} \times 100$$

(Ec.1)



**Tabla1. Clasificación de la roca según su RQD.**

RQD (%)	Calidad de roca
< 25	Muy mala
25 - 50	Mala
50 - 75	Regular
75 - 90	Buena
90 - 100	Excelente

Fuente: <http://www.ingesur.com/descargas/geomecnicas.pdf>; clasificación geomécanica de las rocas, p. 2, documento publicado por la empresa: Ingesur ingeniería, geotecnia y servicios, S.L.; [Consulta al: 2009, Agosto 01].

Existe además la ecuación 2, de manera alternativa (cuando no hay sondeos):

$$RQD = 115 - 3.3J_v \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde,  $J_v$ : Número de juntas identificadas en el macizo rocoso por  $m^3$ .

### 2.7.2 Clasificación de Bieniawski (R.M.R.) “Rock Mass Rating” Z. T. Bieniawski (1989).

Se valora una serie de parámetros, como se ven en las tablas 2 y 3. El valor se obtiene de la ecuación 3 y se clasifican según la tabla 4.

**Tabla 2. Valores máximos según cada parámetro de clasificación, según Bieniawski.**

(1) Resistencia del material intacto (ensayo carga puntual o compresión simple)	Valor máximo = 15
(2) R.Q.D.	Valor máximo = 20
(3) Distancia entre las discontinuidades	Valor máximo = 30

**Tabla 2. (Cont.).**

(4) Condición de las discontinuidades	Valor máximo = 25
(5) Agua subterránea	Valor máximo = 10

Fuente: <http://www.ingesur.com/descargas/geomecanicas.pdf>; Clasificación geomécanica de las rocas, p. 4, documento publicado por la empresa: Ingesur ingeniería, geotecnia y servicios, S.L.; [Consulta al: 2009, Agosto 01].

**Tabla 3. Tabla de valores de los parámetros en la clasificación R.M.R. Beniaowski (1989).**

Parámetro		Rango de valores							
1	Resistencia de la roca intacta	Índice de carga puntual	> 8 MPa	4-8 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	< 1 no se utiliza		
		Resistencia a la compresión simple	> 200 MPa	100-200 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	10-25 MPa	3-10 MPa	<3 MPa
<b>valor</b>			<b>15</b>	<b>12</b>	<b>7</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
2	Calidad del testigo RQD	90-100 %	75-90 %	50-75 %	25-50 %	< 25 %			
	<b>valor</b>	<b>20</b>	<b>17</b>	<b>13</b>	<b>8</b>	<b>3</b>			
3	Espacios de las discontinuidades.	> 3 m	1-3 m	0.3- 1 m	5 -30 cm	< 5 cm			
	<b>valor</b>	<b>30</b>	<b>25</b>	<b>20</b>	<b>10</b>	<b>5</b>			
4	Estado de las discontinuidades.	Superficies muy rugosas, roca adyacente sana.	Superficies algo rugosas, separación <1mm con la roca adyacente, ligeramente meteorizada.	Roca muy meteorizada (se desprende rápido)	Superficies pulidas, fisuras entre 1-5mm.	Relleno blando con espesor mayor que 5mm, las fisuras son continuas.			
	<b>valor</b>	<b>25</b>	<b>20</b>	<b>12</b>	<b>6</b>	<b>0</b>			
5	Flujo en 10 mt del túnel (lts/min).	Nada.	< 10	10-25	25-125	> 125			
	Descripción.	Totalmente seca.	Húmeda.	Mojada.	Goteos.	Flujo.			
	<b>valor</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>7</b>	<b>4</b>	<b>0</b>			

Fuente: <http://www.ingesur.com/descargas/geomecanicas.pdf>; Clasificación geomécanica de las rocas, p. 5, documento publicado por la empresa: Ingesur ingeniería, geotecnia y servicios, S.L.; [Consulta al: 2009, Agosto 01].

$$\text{RMR} = (1) + (2) + (3) + (4) + (5) \quad (\text{Ec. 3})$$

La clasificación de RMR, oscila entre 0 y 100.

**Tabla 4. Tabla de valores en la clasificación R.M.R. de Bieniawski (1989); y la calidad que indica.**

Clase	Calidad de roca	RMR
I	Muy buena	81 – 100
II	Buena	61 – 80
III	Regular	41 – 60
IV	Mala	21 – 40
V	Muy mala	0 - 20

Fuente: <http://www.ingesur.com/descargas/geomecanicas.pdf>; Clasificación geomécanica de las rocas, p. 4, documento publicado por la empresa: Ingesur ingeniería, geotecnia y servicios, S.L.; [Consulta al: 2009, Agosto 01].

### **2.7.3 División de la clasificación de Bieniawski en subclases.**

La clasificación de Bieniawski ha dividido siempre el índice RMR dentro de 5 clases (I, II, III, IV y V) con las denominaciones desde Muy buena a Muy mala. Cada clase cubre un intervalo de 20 puntos.

En la práctica las clases no son equiparables entre sí. La clase I (Muy buena) es muy poco frecuente porque no abundan los macizos muy poco diaclasados y de gran calidad.

La clase III (Media o Regular) es normalmente la más frecuente pero cubre un rango demasiado amplio. Las necesidades de sostenimiento de un túnel de RMR = 40 son muy diferentes de las de un túnel de RMR = 60. El

primero probablemente incluirá cerchas mientras que el segundo casi nunca se construirá con cerchas. Y los espesores de hormigón proyectado o la longitud de pase serán también diferentes.

La clase IV (Mala) es demasiado amplia. Un túnel de RMR = 20 se excavará mecánicamente y en condiciones precarias de estabilidad mientras que en un túnel con RMR = 40 podrán utilizarse las voladuras y las necesidades de sostenimiento, aunque importantes, permitirán unos ciclos de trabajo con rendimientos sistemáticos y tolerables.

Por ello Romana (2000) propone la sustitución del sistema de 5 Clases por el de 10 Subclases. Véase tabla 5.

Cada subclase tiene un rango de 10 puntos y para mantener un cierto grado de correlación con la división anterior se denomina con el numeral romano de Bieniawski (I, II, III, IV, V) seguido de una letra: "a" para la mitad superior y "b" para la mitad inferior de cada clase. (p. 11).

**Tabla 5. Clasificación modificada de Bieniawski en subclases y Comparación con la original.**

RMR	MODIFICADO		BENIAWSKI ORIGINAL	
	CLASE	DENOMINACION	DENOMINACION	CLASE
100				
90	Ia	EXCELENTE	MUY BUENA	I
80	Ib	MUY BUENA		
70	IIa	BUENA A MUY BUENA	BUENA	II
60	IIb	BUENA A MEDIA		
	IIIa	MEDIA A BUENA	MEDIA	III

**Tabla 5 (cont.).**

50			MEDIA	
	IIIb	MEDIA A MALA		
40			MALA	IV
	IVa	MALA A MEDIA		
30				
	IVb	MALA A MUY MALA		
20			MUY MALA	V
	Va	MUY MALA		
10				
	Vb	PESIMA		

Fuente: <http://www.katodos.com/doctos/6be2296575f46bf7b6d8a87d536eefd5.pdf>; Recomendaciones de sostenimiento para túneles; M. Romana Ruiz; artículo publicado en la revista de obras públicas julio-octubre 2000 de circulación española; [Consulta al: 2009, Agosto 01].

Debe hacerse notar que la Subclase Ia ( $90 < \text{RMR} < 100$ ) es casi imposible de alcanzar, dado que son muy escasas las rocas con resistencias a compresión simple superiores a 100 MPa y en las de resistencia inferior el RMR básico máximo teórico es 92. En el caso de orientación favorable el factor de ajuste para túneles es  $-2$  con lo que  $\text{RMR} < 90$ .

La subclase IV ( $0 < \text{RMR} < 10$ ) es también muy poco frecuente. De la lectura de la tabla de BIENIAWSKI (1989) parece deducirse que el valor mínimo del RMR básico es 8. Sin embargo en condiciones desfavorables o muy desfavorables el factor de ajuste vale  $-10$  y  $-12$  respectivamente, lo que puede conducir a valores negativos del RMR.

En cualquier caso no se puede afirmar que un  $\text{RMR} < 10$  corresponda a un terreno que pueda asimilarse a una masa rocosa. Se trataría siempre de terrenos muy tectonizados con juntas muy abiertas y/o rellenos gruesos blandos con los bordes muy lisos, con estrías de foliación (“slickensides”), y

su comportamiento sería equivalente al de suelos plásticos con resistencia al corte muy reducida, por lo que se salen fuera del ámbito normal de la clasificación.

## **2.8 La práctica de La Ingeniería de Rocas.**

Si se consideran los tres caminos de conocimientos para la práctica de la Ingeniería de Rocas: empírico, observación y analítico; hay que señalar que hoy por hoy la aproximación empírica es todavía preponderante en la Ingeniería de Minas y Túneles. A pesar de los avances importantes en los métodos de cálculo analíticos / numéricos y en las medidas de campo durante la construcción, es un problema importante conseguir la integración de todas éstas actividades para llegar a un diseño eficaz de una excavación en roca.

Por ejemplo, las clasificaciones geomecánicas forman parte de una aproximación empírica a un problema, para el que nadie realmente tiene la última solución; pero permiten acercarnos a una solución razonable.

Según Bieniawski, (citado por CASTEM E.I.R.L., 2006)

Las clasificaciones geomecánicas no pueden reemplazar a los procedimientos analíticos, las medidas en obra o la experiencia en ingeniería; son simplemente una ayuda adicional al diseño y pueden considerarse como una herramienta más que está a disposición del Ingeniero de Rocas. (p. 29)

## **2.9 Método de excavación.**

### **2.9.1 TBM abierto (60 < RMR).**

El uso de tuneladoras abiertas es ventajoso cuando las necesidades de sostenimiento son reducidas y ese sostenimiento puede instalarse detrás de la cabeza de perforación. En general puede esperarse un funcionamiento satisfactorio si el macizo rocoso es de calidad buena ( $RMR < 60$ ) y tolerable si es de calidad media a buena ( $50 < RMR < 60$ ). Si el RMR es inferior a 50 la excavación se convierte en muy trabajosa. (Romana, 2000).

### **2.9.2 Voladuras (RMR > 40).**

Es el método más versátil, y por lo tanto el más frecuente. Aunque es posible excavar por voladuras terrenos de calidad mala o muy mala, no suele resultar práctico hacerlo. Obviamente la calidad de ejecución resulta capital cuando se utiliza este método de excavación. (Romana, 2000).

### **2.9.3 Rozadora (30 < RMR < 90).**

Teóricamente la rozadora (máquina de ataque puntual y cuerpo bajo y compacto) puede utilizarse con gran variedad de terrenos. Su limitación no es la calidad global del macizo rocoso, sino la resistencia mecánica (a tracción y a compresión) de la roca matriz. La excavación y el sostenimiento (realizados simultáneamente) son mucho más compatibles cuando se trabaja con rozadoras que cuando la excavación se realiza con tuneladora TBM abierta o por voladuras. Por eso pueden utilizarse rozadoras con roca de mala calidad ( $20 < RMR < 30$ ) aunque puede resultar más económico el uso de métodos más simples de excavación. (Romana, 2000)

#### **2.9.4 Fresado (RMR < 30).**

Cada vez es más frecuente la excavación por fresado con máquinas que montan una fresa de potencia media sobre un brazo de retroexcavadora, tanto para el perfilado final del gálibo, como para la excavación de toda la sección. Su campo son las masas rocosas de calidad media baja a baja ( $30 < \text{RMR} < 50$ ). (Romana, 2000).

#### **2.9.5 Escarificación / Pala (RMR < 20).**

Los macizos de calidad muy mala pueden excavarse prácticamente como suelos, con palas convencionales y/o escarificarse (método especialmente práctico para la destroza). El método puede utilizarse, con algunas dificultades, hasta la subclase  $20 < \text{RMR} < 30$ . (Romana, 2000).

#### **2.9.6 Escudo (RMR < 20).**

El escudo fue desarrollado para excavar suelos y para masas rocosas de calidad muy mala el escudo (simple o doble) resulta muy adecuado. Para  $\text{RMR} > 30$  el escudo no es necesario, desde el punto de vista de la excavación misma, pero puede ser conveniente con estrategias combinadas de excavación y sostenimiento-revestimiento (por ejemplo con dovelas). (Romana, 2000).



## **CAPITULO III**

### **DESARROLLO**

### **3.1 Generalidades.**

Entre los métodos de excavación de túneles se encuentran, el de perforación y voladura y el de excavación mecánica. El primero se usa básicamente cuando el macizo rocoso presenta altos parámetros de resistencia y abrasividad. Se llama excavación mecánica cuando para esta se usan maquinarias dispuestas con útiles de corte, las cuales se clasifican en tres grupos: la tuneladora, la rozadora y el martillo hidráulico.

La selección del método a utilizar esta determinado por varios factores, como el tipo y características geomecánicas del terreno, la sección del túnel, los factores económicos, la longitud del túnel, así como consideraciones ambientales y otros.

La excavación mecánica aporta diferentes soluciones de avance del túnel, donde la energía que se produce en motores y circuitos eléctricos se transmite al terreno por medio de unos útiles de corte que variando el ángulo de aplicación alcanzan la desfragmentación del mismo.

Esta monografía pretende explicar los diferentes métodos de avance de estas maquinas y los parámetros de importancia en la selección entre sí, así como los factores para determinar los rendimientos y las diferentes ventajas y desventajas de cada una.

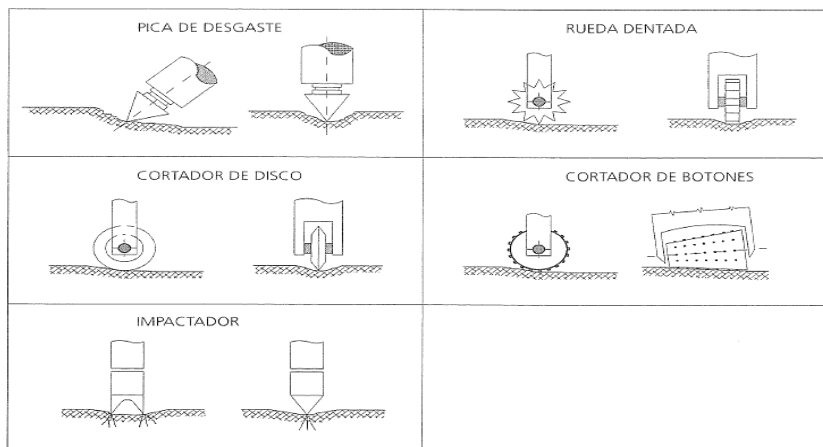
### **3.2 Útiles de corte.**

El contacto entre el útil y la roca se realiza mediante una pastilla o punta de metal duro (carburo de tungsteno o widia) que va inserto dentro de una matriz de acero que ha sido sometido a tratamientos de endurecimiento.

El carburo de tungsteno o widia es una aleación que se obtiene por reducción a  $900^{\circ}$  del metal en polvo con hidrógeno. Seguidamente, mediante la mezcla del metal con carbón, se producen granos de tungsteno de dimensiones entre  $0.5$  y  $0.8 \mu$ . La sintetización de los granos se realiza mediante metal cobalto que es disuelto por el carburo, efectuándose un primer calentamiento a  $900^{\circ}$  y un segundo posterior a  $1.400^{\circ}$

En la excavación mecánica se emplean distintas herramientas o útiles de corte, y que podemos resumir en:

- Picas de fricción (drag picks).
- Cortadoras de disco.
- Cortadoras de rodillo dentado.
- Cortadoras de botones.
- Impactadores.
- Cortadoras vibrantes.



**Figura 1. Útiles de corte.**

Fuente: Excavación Mecánica, p. 3, Cornejo, 1988 Editorial Rueda, S.L., Madrid, España.

### 3.2.1 Picas de corte.

En la excavación de rocas efectuada con máquinas de ataque puntual (rozadoras) y/o máquinas tuneladoras para terreno blando, se utilizan en gran medida como herramientas de corte, las picas de fricción (drag picks) que básicamente consisten en un inserto de metal duro (widia) dentro de una matriz de acero de alta dureza y tenacidad. El campo óptimo la utilización de las picas de fricción esta dentro de las rocas cuya resistencia a la compresión no supera los  $800 \text{ kg/cm}^2$ , o valores aún menores si la roca es muy abrasiva o masiva.

El uso de picas en rocas blandas (Carbón), se define por los ensayos realizados en minas de carbón que han puesto de manifiesto algunas relaciones básicas.

Los principios fundamentales según Evans y Pomeroy, 1966 (citado por Cornejo, 1988) son los siguientes:

- Las picas en forma de simple cincel son más eficientes que las de formas complejas; la pica en forma de punta de lápiz es la menos efectiva ya que concentra menores fuerzas, siendo, por tanto, la producción menor con una generación de polvo mayor.

- Las picas grandes son más eficaces que las picas pequeñas; el ángulo  $\alpha$  (ángulo de inclinación del filo del cortador) debe ser el mayor posible, pero probablemente no mayor de  $20^\circ$ . El ángulo  $\beta$  (Angulo de limpieza.) debe estar comprendido entre  $5^\circ$  y  $10^\circ$ .

- La energía específica se reduce para cualquier forma de pica, a medida que se incrementa la profundidad de corte. Los cortes superficiales son muy ineficaces.

- La velocidad de corte dentro de un intervalo no tiene efecto ni sobre las fuerzas aplicadas a las picas ni sobre las energías de corte.

- Para una máxima eficiencia de rozado la separación entre picas debe estar entre dos y tres veces el valor de la profundidad de corte deseado.

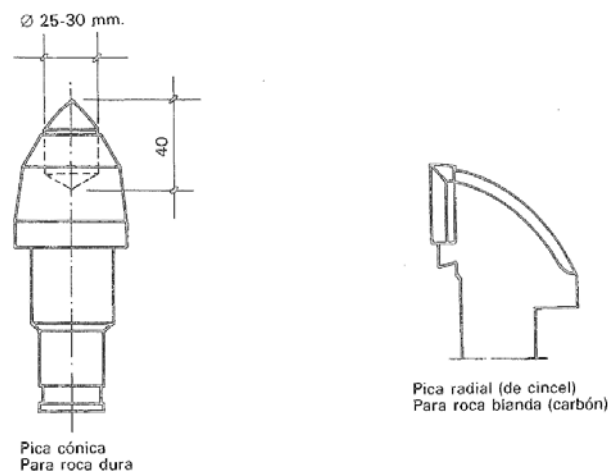
- Profundizar una hendidura mediante una sucesión de cortes es muy ineficaz y debe evitarse. Mientras la hendidura se profundiza, la rotura, definida por el ángulo de aplicación, queda inhibida y las picas adyacentes no interaccionan.

- El rozado en una esquina produce fuerzas elevadas sobre las picas y un consumo elevado de energía. Siempre que sea posible, por tanto, la disposición de picas deberá proporcionar una secuencia de corte que comience con la primera pica atacando sobre una superficie libre existente, extendiendo progresivamente con las picas sucesivas las superficies libres hasta los límites de la excavación.

Del uso de picas en rocas duras, las relaciones básicas obtenidas en carbón, son válidas para rocas duras aunque las fuerzas que han de soportar las picas son mayores y las relaciones críticas son frecuentemente diferentes. Las mayores fuerzas que son necesarias para conseguir el rozado en rocas duras destruyen rápidamente las picas utilizadas en carbón y las rocas abrasivas las desgastan con mucha rapidez reduciéndose

drásticamente los rendimientos. Las picas utilizadas en rocas duras son las llamadas «conical bit» que son un útil robusto compuesto de un vástago y una cabeza de acero duro en la cual va un inserto de punta de widia. Las picas mas robustas tienen las siguientes características:

- Diámetro del vástago.....38,20 mm
- Diámetro de la punta..... 30 mm
- Longitud de la cabeza..... 68 mm



### Figura 2. Tipos de picas según su uso en roca dura o blanda.

Fuente: Excavación Mecánica, p. 7, Cornejo, 1988 Editorial Rueda, S.L., Madrid, España.

#### 3.2.2 Cortadores para roca.

Cuando las rocas sobrepasan ampliamente los  $1.000 \text{ kg/cm}^2$  de resistencia a la compresión y los coeficientes de desgaste superan el valor de  $F=0,5 \text{ kg/cm}$ , la excavación se hace económicamente inviable.

Este límite se rebasa utilizando la técnica de excavación de las maquinas de corte a plena sección (tuneladora, topo, TBM). Estas maquinas

aplican contra la roca mayores energías (empuje y par) transmitidas a las herramientas de corte (cortadores).

De este modo se puede abordar la excavación de rocas de resistencias superiores a los  $2.500 \text{ kg/cm}^2$  con coeficientes de desgaste de hasta  $F=2,7 \text{ kg/cm}$ .

Según la dureza de la roca se emplean diferentes tipos de cortadores. Estos tipos son:

- Para rocas blandas ( $R_c < 900 \text{ kg/cm}^2$ ): Cortadores de ruedas dentadas (Toothed Rollers).
- Para rocas de dureza media ( $R_c < 1.700 \text{ kg/cm}^2$ ): Cortadores de disco (Disc cutter).
- Para rocas duras ( $R_c < 2.200 \text{ kg/cm}^2$ ): Cortadores de varios discos con insertos de widia en el filo.
- Para rocas muy duras ( $R_c < 3.500 \text{ kg/cm}^2$ ): Cortadores de rodillo de botones (Roller cutter).

### **3.2.2.1 De los cortadores de disco.**

El cortador de disco consiste en una base de metal duro en forma de disco con un filo (o varios) recambiable de acero endurecido y montado sobre un soporte de rodamientos.

Un análisis geométrico de las fuerzas que actúan sobre un disco muestra que la relación  $F_t/F_r$ , fuerza de tracción y fuerza de rozadura, es una propiedad fundamental del mismo. Roxborough y Phillips (1975) y

Roxborough (1978), (citados por Cornejo 1988), han propuesto la siguiente expresión:

$$F_t/F_r = \sqrt{(D - P) / P} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

D=Diámetro del disco

P=Penetración.

Los ensayos efectuados con discos han puesto de manifiesto que:

- La velocidad de corte no afecta a los rendimientos; aunque si aumenta el desgaste.

- El sistema de trabajo de un cortador de disco es un proceso eficaz.

- La relación  $F_t/F_r$  aumenta cuando la profundidad del surco disminuye y puede determinarse como una extensión de la ecuación (3.1), mediante la expresión:

$$\frac{F_T}{F_R} = \frac{d}{p} \sqrt{\frac{D - P}{d}} \quad (\text{Ec. 5})$$

En la que:

d = Profundidad total del surco.

p= Penetración por pasada.

- El espaciamiento óptimo entre cortadores de discos esta, entre 5 y 15 veces la profundidad del surco; el espaciamiento no es crítico siempre que



los cortadores puedan profundizar el surco suficientemente para no promover rotura entre ellos.

- La fracturación de la roca tiene un efecto beneficioso en el rendimiento de los discos cuando las juntas están abierta y espaciadas entre "D" y "2D".

- El desgaste de cortadores causa un menor incremento de la fuerza del que cabría esperar y los efectos se reducen con el incremento de la penetración. La fragmentación de la roca aumenta con el desgaste pero la relación  $F_t/F_r$  y el espaciamiento óptimo de los cofiadores no se ven afectados. (Cornejo, 1988)

### **3.2.2.2 De los cortadores de rodillo dentado**

Son útiles de corte más complicados que los discos y se componen de una serie de elementos individuales de corte (dientes) interactivos. Es un diseño compuesto, con características comunes a las picas y a los discos. Su diseño implica limitaciones impuestas por las relaciones geométricas entre el ángulo y el diámetro del cortador y entre el ángulo y la penetración del diente.

Las principales conclusiones obtenidas a partir de ensayos con discos dentados realizados por Tele (1964), Tekaoka y otros (1973) Smits (1980) (citados por Cornejo, 1988) son:

- Las fuerzas de empuje y rodadura aumentan con la penetración con valores más altos pero similares a las de los discos.

- La eficacia de corte aumenta con la penetración, y para conseguir una interacción entre los dientes la relación entre el paso de avance y la penetración deberá exceder la relación entre la resistencia al corte ( $R_{cort}$ ) y la resistencia a compresión de la roca ( $R_c$ ). Según la expresión:

$$\frac{R}{l} > \frac{R_{cort}}{R_c}$$

(Ec. 6)

Con una relación menor los dientes no interaccionan y el cortador tendera a seguir la huella.

- El ángulo del diente deberá minimizarse de acuerdo a su durabilidad mecánica.

- La rotura lateral de la roca es pequeña. Para conseguir una Interacción efectiva, los cortadores adyacentes necesitan estar muy juntos.

- El cortador dentado, como un diseño compuesto, con características de discos y picas, muestra alguna de las características favorables de ambos útiles.

### 3.2.2.3 Cortadores de botones.

Los cortadores de botones se usan en rocas duras; la investigación se realiza mediante estudios teóricos y empíricos de penetración de los insertos de varias formas y tamaños dentro de las superficies de la roca.

La penetración del inserto ha sido estudiada por muchos investigadores y todos ponen de manifiesto que la fuerza de penetración se incrementa con la profundidad de un modo altamente desproporcionado caracterizado por una sucesión de fuerzas de pico que aumentan progresivamente en magnitud y en su coeficiente de incremento.

Cada pico se identifica con una mayor producción de "lajas" de roca y con el aumento de tamaño de los mismos. Se ha encontrado que la resistencia a la penetración es mucho mayor que la resistencia a la compresión de la roca, estando su relación entre 5 y 15, dependiendo del tipo de roca y de la forma del inserto.

El diámetro del botón tiene importancia ya que este y el espaciamiento se influye mutuamente.

La separación requerida entre los cortadores de botones se relaciona con la separación entre los botones individuales.

### **3.2.3 Rotura por impacto**

Hay dos caminos de investigación y desarrollo:

Utilizar baja energía de golpe y vibraciones superpuestas de alta frecuencia sobre unas herramientas de cortes móviles (cortadores vibrantes).

Utilizar Alta energía de golpe y baja frecuencia de impactos donde, unos pocos impactos repetidos, crean una gran fractura en la roca (rompedores de impacto).

### **3.2.3.1 Impactadores.**

Según Cook y Joghin (1970), (citado por: Cornejo, 1988) se distinguen entre rotura primaria y rotura secundaria.

Rotura primaria se produce cuando la roca solamente puede atacarse desde una única cara libre.

Rotura secundaria se produce cuando la roca puede atacarse desde caras opuestas.

### **3.2.3.2 Cortadores vibrantes.**

Se ha comprobado experimentalmente que mediante un movimiento vibratorio se pueden conseguir reducciones significativas de las fuerzas de corte para una pica.

### **3.2.4 El mecanismo de corte asistido con "jets" de agua.**

La importancia tecnológica de la energía hidráulica a alta presión (wáter Jet) mediante la aplicación de «Jets» coherentes de agua a alta presión, ha abierto unas expectativas nuevas muy favorables a las técnicas de perfección y excavación mecánicas.

Las ventajas que esta técnica introduce pueden resumirse en:

- Reducción de la energía específica.
- Aumento de los rendimientos.
- Reducción de vibraciones perjudiciales para las máquinas.

- Menores desgastes de Útiles de corte.
- Reducción de la producción de polvo.
- Eliminación de chispas.

### **3.3 Tipos de Excavación Mecánica.**

Los tipos de excavación mecánica que se usan generalmente son:

- Tuneladora, Topo o TBM.
- Rozadora.
- Martillo Hidráulico.

#### **3.3.1 Tuneladoras, Topo o TBM.**

Una tuneladora o T.B.M. (del inglés Tunnel Boring Machine) es una máquina capaz de excavar túneles a sección completa, a la vez que colabora en la colocación de un sostenimiento si este es necesario, ya sea en forma provisional o definitiva. (Cornejo, 1988).

De un modo general podemos decir que, las maquinas TBM (tuneladoras o topos) excavan el frente de roca a plena sección mediante la acción combinada de la rotación y el empuje continuados de una cabeza provista de herramientas de corte convenientemente distribuidas en su superficie frontal.

Todas las maquinas TBM y en particular, los topos, disponen de herramientas para romper el material en fragmentos cuyo tamaño permita la fácil retirada de los mismos.

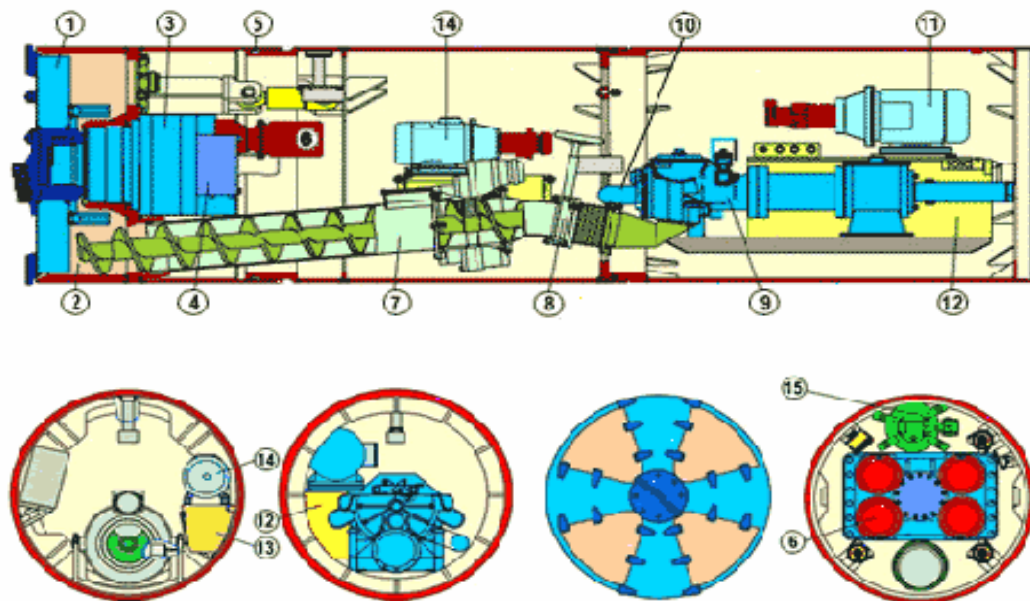
Las herramientas van montadas en la cabeza de corte en una disposición conveniente para que la excavación sea eficaz. Detrás de la cabeza va el cuerpo de máquina que permanece fijo, mientras la cabeza gira y empuja contra la roca mediante mecanismos dispuestos al efecto. Sus características específicas y su disposición general dependen de si la máquina ha de ser diseñada para excavar en roca dura o en suelos. Los detalles de diseño son característicos de cada fabricante.

La energía mecánica es generada mediante motores eléctricos y transmitida a la cabeza giratoria de la máquina en forma de un par de rotación, a través de circuitos hidráulicos. Este par de rotación, junto con el empuje proporcionado por unos cilindros hidráulicos a la cabeza de la máquina contra el frente de excavación, aportan la energía mecánica a las herramientas de corte "discos", que la transmiten a la roca a través de la superficie de contacto de los mismos.

El nivel de la energía liberada es capaz de producir, en primer lugar la penetración o indentación de los cortadores de disco y, en segundo lugar, el quebrantamiento por tracción y cizallamiento de la roca entre las series de cortadores concéntricos dispuestos en la cabeza de la máquina. La excavación de la roca se produce en forma de lascas o chips de roca de un tamaño superior al producido con rozadoras.

En La mayoría de los casos, el escombros es cargado en el frente mediante unos cangilones situados sobre la cabeza y llevado sobre una cinta transportadora. Por medio de otros sistemas de cintas, es trasladado a la parte de atrás de la máquina donde es transferido a otros sistemas de transporte que lo extraen al exterior. (Cornejo, 1988).

Los rendimientos conseguidos con tuneladoras de cabeza giratoria son elevadísimos si se comparan con otros métodos de excavación de túneles, pero su uso no es rentable hasta una longitud mínima de túnel a excavar: hace falta amortizar el precio de la máquina y eclipsar el tiempo que se tarda en diseñarla, fabricarla, transportarla y montarla (que puede llegar a los dos años). Además, los túneles a excavar con tuneladora tienen que tener radios de curvatura elevados porque las máquinas no aceptan curvas cerradas, y la sección tiene que ser circular en túneles excavados con cabeza giratoria.



- |                                 |   |
|---------------------------------|---|
| 1. Rueda de Corte.              | 9. Bomba de extracción del material.              |
| 2. Cámara de excavación.        | 10. Circuito de extracción.                       |
| 3. Accionamiento principal.     | 11. Motor de la bomba de extracción del material. |
| 4. Accionamiento.               | 12. Depósito hidráulico de bomba de extracción.   |
| 5. Junta articulada.            | 13. Depósito hidráulico de bomba de máquina.      |
| 6. Motor principal.             | 14. Bomba hidráulica para máquina.                |
| 7. Tornillo sinfín.             | 15. Pared de presión.                             |
| 8. Desagüe del tornillo sinfín. |   |

**Figura 3. Esquema básico de la tuneladora.**

Fuente: [http://www.microtunnel.com/21\\_tuneladora.htm](http://www.microtunnel.com/21_tuneladora.htm); Cardona M. "Microtunnel"; [Consulta al: 2009, Agosto 01].

### 3.3.1.1 Tipos de Tuneladoras:

Se dividen en dos grupos: Topos y Escudos.

#### - Topos.

Se utilizan para excavaciones en roca de dureza baja, media o alta. Podemos decir que excavan el frente de roca a plena sección mediante la acción combinada de la rotación y el empuje continuados de una cabeza provista de herramientas de corte convenientemente distribuidas en su superficie frontal. El dispositivo de empuje acciona contra el frente y reacciona contra unos codales extensibles o grippers.

Cuando se ha terminado un ciclo de avance, se necesita reposicionar las zapatas de agarre (grippers), para la cual se apoya la viga principal en el apoyo trasero. Una vez anclados los grippers en su nuevo emplazamiento, se libera el apoyo trasero y se inicia un nuevo ciclo de avance.

Los útiles de corte van montados en la cabeza que gira y empuja contra la roca y que desmenuza el material en fragmentos. Estos son cargados en el frente mediante unos cangilones y depositados en la parte trasera de la cabeza sobre una cinta transportadora que lo transfiere a otro sistema de transporte que lo extrae al exterior.

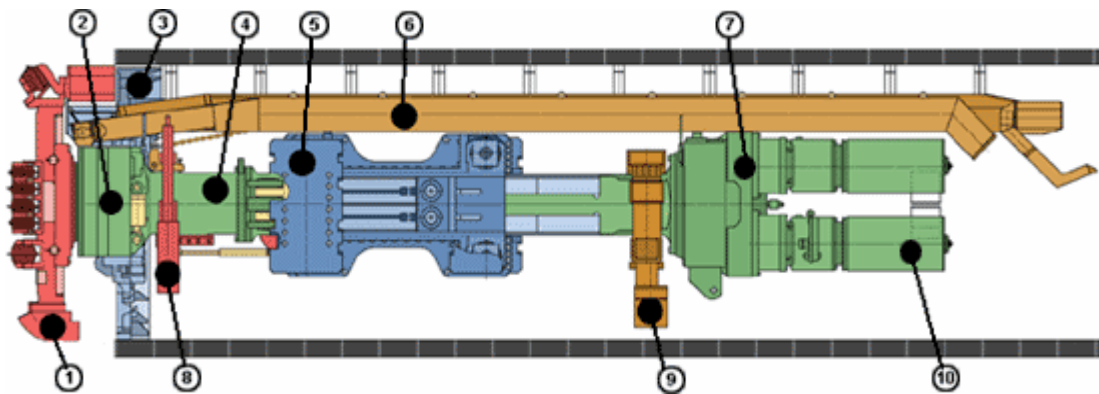
La tecnología actual permite fabricar topos desde 2.5 m de diámetros hasta 16 m, también se fabrican topos dúplex formados por uno piloto de 3 m a 4 m de diámetros combinado con una cabeza ensanchadora de hasta 12 m. Son muy útiles en galerías de pendiente muy inclinada en las que la



excavación se realiza de abajo hacia arriba con el topo piloto, para posteriormente ser ensanchada en la dirección contraria.

Un topo puede llevar bulnadoras que trabajan según se avanza, o mecanismo para colocar cerchas metálicas. También se puede preparar para el revestimiento con dovelas prefabricadas de hormigón en el caso de que esperen deformaciones de la roca.

El rendimiento del avance con topo suele estar en 1.5 m/h a 2.5 m/h. En cuanto a pendientes, un topo puede trabajar en condiciones óptimas no sólo con las pendientes usuales para el transporte sobre la vía (el más usual, con pendiente media de 3% y hasta del 7% en rampas cortas) sino bastante superiores, llegando hasta el 15% y el 20%. (Tapia, 1999).



**Figura 4. Esquema básico de un topo.**

Fuente: [http://www.microtunnel.com/28\\_topos.htm](http://www.microtunnel.com/28_topos.htm); Cardona M. "Microtunnel"; [Consulta al: 2009, Agosto 01].

- |                                    |                           |
|------------------------------------|---------------------------|
| 1-. Rueda de corte para roca.      | 2-.Rodamiento principal.  |
| 3-. Escudo para la rueda de corte. | 4-. Kelly interior.       |
| 5-. Kelly exterior.                | 6-. Cinta transportadora. |
| 7-. Accionamiento rueda de corte.  | 8-. Soporte delantero.    |

9-. Soporte trasero.

10-. Motor eléctrico.

Tipos de Topos:

- Topo Ensanchador.

Como su propio nombre indica, aquel topo que se utiliza para agrandar túneles y así evitar las consecuencias de las fuerzas de agarre en la excavación finalizada, ya que los topos ensanchadores tienen los grippers delante de la rueda de corte.

- Topos para planos inclinados.

Están especialmente diseñados para la realización de túneles con pendientes mayores de 10% y que han llegado al 50%. Estos topos han sido utilizados en la construcción de funiculares subterráneos, estaciones de esquí, túneles de centrales eléctricas, minas, etc.

- **Escudos.**

Se utilizan para la excavación de roca con dureza muy blanda y suelos. Como su propio nombre sugiere, un escudo es una estructura rígida y resistente que, introducida dentro del túnel, proporciona un área estable y segura en la zona del frente de trabajo, protegiendo a éste contra el colapso en la bóveda y los hastiales e incluso contra el colapso del propio frente de excavación. (Tapia, 1999).

Este concepto se ha ido transformado a lo largo de los años en un nuevo concepto y diseño de escudo-máquina que realiza también la excavación mecánica del terreno.

Al ser el terreno en el que se mueven inestable, el sostenimiento se va colocando en el propio frente y son, sin excepción, prefabricados y formados generalmente por dovelas de hormigón.

Los escudos consiguen el empuje longitudinal mediante reacciones contra el último anillo del revestimiento, por medio de gatos hidráulicos situados alrededor de la periferia de la parte trasera.

Cada gato hidráulico puede funcionar independientemente o en grupo, lo que permite hacer correcciones a la alineación del avance si es necesario. Están contruidos de modo que sean capaces de hacer avanzar el escudo una distancia igual al ancho de los anillos del revestimiento. (Tapia, 1999).

Una vez completada esta parte del ciclo se coloca el revestimiento en la zona que ha quedado libre detrás de la cola del escudo. A los escudos se les puede acoplar distintos sistemas o útiles de excavación según el tipo de terreno (brazo excavador con cuchara, con martillo, cabeza giratoria circular, rozadoras, cuchillas), e incluso permiten la excavación manual en secciones de pequeño diámetro.

Las limitaciones de pendiente vienen impuestas por el sistema de transporte del escombros elegido, siendo válido lo dicho anteriormente para los topes.

En cuanto a las curvas, los escudos con longitudes similares a las de la estructura que la acompaña, son más problemáticos que los topos, pues los radios muy cortos obligan a un diseño sofisticado de dovelas. Como criterio general puede decirse que un escudo de determinado radio puede admitir radios del trazado iguales o menores a 80 veces el suyo propio. (Tapia, 1999).

Los escombros son arrastrados por una cinta transportadora a la parte trasera del escudo, donde son cargados en el sistema de evacuación que los extrae al exterior y que suele ser un tren de vagones sobre carriles, ya que al ser el revestimiento de dovelas es fácil fijar a ellas una vía pesada para el uso de vagones de gran capacidad.

Se distinguen dos grandes grupos de escudos, de entre los que se distinguen las tipologías que se explican a continuación:

- Escudos de frente abierto: se usan cuando el frente del túnel es estable. El sistema de excavación puede ser manual, mediante brazo fresador, con un brazo excavador o con una cabeza giratoria. En algunos casos, se puede colaborar con la estabilidad del frente una vez acabado cada ciclo con unos paneles a modo de reja. Con este tipo de máquina, si la cabeza no es giratoria, es posible trabajar con secciones no circulares.

- Escudos de frente cerrado: se usan cuando el frente del túnel es marcadamente inestable, por ejemplo en terrenos no cohesivos, saturados de agua, etc. La sección excavada ha de ser circular. Tiene varios tipos:

Escudos con cierre mecánico: la entrada y salida de material en el cuarto de tierras se regula mediante dos puertas de apertura controlada hidráulicamente. La máquina tiene limitaciones con presencia de agua.

Escudos presurizados con aire comprimido: constan de un sistema de presurización con aire, prácticamente no se usan.

Escudos de bentonita o hidroescudos: con la inyección de bentonita se consigue estabilizar el terreno por sus propiedades tixotrópicas y facilitar el transporte de material mediante bombeo.

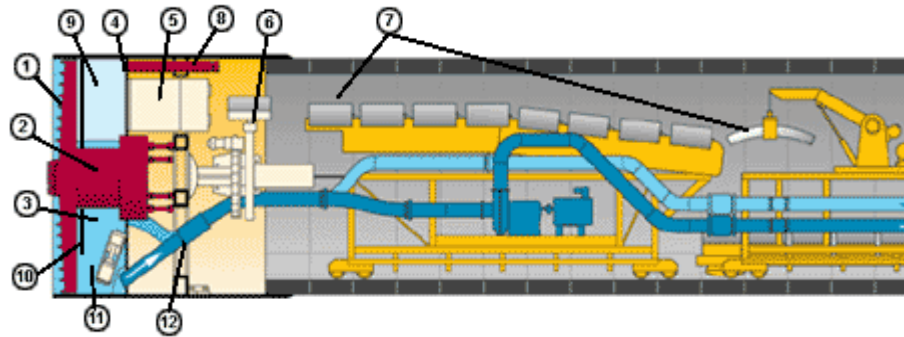
Escudo Mixshield: es un escudo muy polivalente. La idea básica consiste en perforar en diferentes tipos de geología con una misma máquina, pero con diferentes modos operativos. Funciona como hidroescudo, escudo con control de presión de tierra EPB, aire comprimido o escudo abierto. Hoy por hoy, es el tipo de escudo más utilizado en la construcción de túneles en ciudades para líneas de metro, ferrocarril, carreteras.



**Figura 5. Escudo Mixshield.**

Fuente: [http://www.microtunnel.com/23\\_escudos.htm](http://www.microtunnel.com/23_escudos.htm);  
"Microtunnel"; [Consulta al: 2009, Agosto 01].

Cardona M.

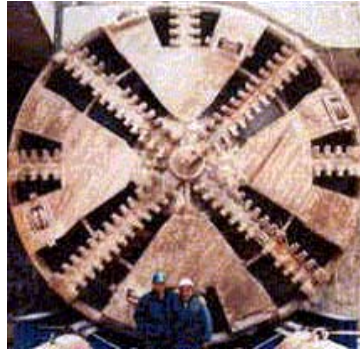


**Figura 6. Esquema básico de un Mixshield.**

Fuente: [http://www.microtunnel.com/25\\_escudomix.htm](http://www.microtunnel.com/25_escudomix.htm); Cardona M. "Microtunnel"; [Consulta al: 2009, Agosto 01].

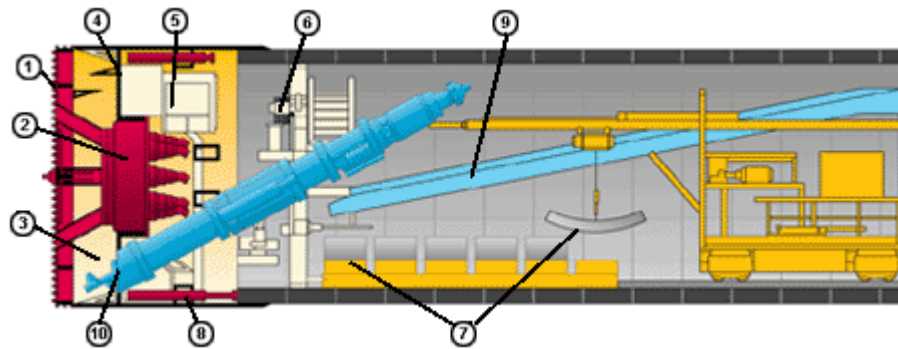
- |                                 |                             |
|---------------------------------|-----------------------------|
| 1.- Rueda de Corte.             | 2.- Accionamiento.          |
| 3.- Suspensión de Bentonita.    | 4.- Sensor de Presión.      |
| 5.- Esclusa de aire comprimido. | 6.- Erector de Dovelas.     |
| 7.- Dovelas.                    | 8.- Cilindro de Propulsión. |
| 9.- Burbuja de Aire Comprimido. | 10.- Mamparo sumergible.    |
| 11.- Machacadora.               | 12.- Tubería de Extracción. |

Escudos de balance de presión de tierras o EPB: el material es extraído del cuarto de tierra mediante un tornillo de Arquímedes. Variando la fuerza de empuje de avance y la velocidad de extracción del tornillo, se consigue controlar la presión de balance de las tierras, para que ésta garantice la estabilidad del frente y se minimicen los asentamientos en superficie. Para facilitar la evacuación de productos poco plásticos con tornillos, a menudo se han de inyectar productos químicos para aumentar la plasticidad de los terrenos. Hoy en día, las EPB son la tecnología predominante en cuanto a excavación de túneles bajo nivel freático.



**Figura 7. Escudos de balance de presión de tierras o EPB.**

Fuente: [http://www.microtunnel.com/23\\_escudos.htm](http://www.microtunnel.com/23_escudos.htm); Cardona M. "Microtunnel"; [Consulta al: 2009, Agosto 01].



**Figura 8. Esquema básico de un escudo EPB.**

Fuente: [http://www.microtunnel.com/24\\_escudoepb.htm](http://www.microtunnel.com/24_escudoepb.htm); Cardona M. "Microtunnel"; visita al: 01-08-2009.

- |                                 |                             |
|---------------------------------|-----------------------------|
| 1.- Rueda de Corte.             | 2.- Accionamiento.          |
| 3.- Cámara de Excavación.       | 4.- Sensor de Presión.      |
| 5.- Esclusa de Aire Comprimido. | 6.- Erector de Dovelas.     |
| 7.- Dovelas.                    | 8.- Cilindro de Propulsión. |
| 9.- Cinta Transportadora.       | 10.- Sinfín de Extracción.  |



**Figura 9. Escudos de balance de presión de tierras o EPB.**

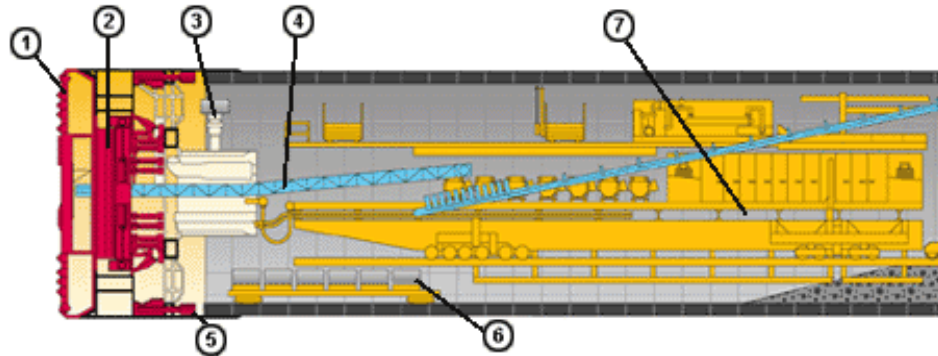
Fuente: [www.microtunnel.com/mapa.htm](http://www.microtunnel.com/mapa.htm); Cardona M. "Microtunnel"; [Consulta al: 2009, Agosto 01].

Escudo para roca dura: también denominados topes escudados ya que son utilizados en las mismas condiciones geológicas que los topes. Estos escudos se diferencian muy poco en la rueda de corte y en el sistema de extracción del escombros de los topes estándar. Sin embargo, son totalmente diferentes en el sistema de propulsión y en el escudo de protección.

La seguridad es la ventaja fundamental que ofrece el topo escudado con relación al topo estándar y es que la excavación y el sostenimiento del túnel tienen lugar dentro del escudo protector, eliminándose el riesgo continuo que se corre en las instalaciones libres de sostenimiento.

Otra ventaja importante que ofrece el escudo para rocas duras en contraste con el topo es, que el escudo permite colocar el revestimiento definitivo del túnel. De este modo con la colocación de las dovelas prefabricadas de hormigón armado el túnel queda totalmente finalizado con el paso de la tuneladora.





**Figura 10. Esquema básico de un Escudo para roca dura.**

Fuente: [http://www.microtunnel.com/26\\_escudoroca.htm](http://www.microtunnel.com/26_escudoroca.htm); Cardona M. "Microtunnel"; [Consulta al: 2009, Agosto 01].

- |                              |                           |
|------------------------------|---------------------------|
| 1.- Rueda de Corte.          | 2.- Accionamiento.        |
| 3.- Erector de Dovelas       | 4.- Cinta Transportadora. |
| 5.- Cilindro de Empuje       | 6.- Dovelas.              |
| 7.- Cuadros de Distribución. |                           |

**Doble Escudo:** Los dobles escudos son tuneladoras con características mixtas entre el topo y el escudo. La característica principal es que está dotado de dos sistemas de propulsión independientes donde el primero de éstos corresponde al sistema de propulsión del escudo y el segundo con el del topo.

El doble escudo es un escudo telescópico articulado en dos piezas que proporciona un sostenimiento continuo del terreno durante el avance del túnel.

Las distintas posibilidades de trabajo que ofrecen los dobles escudos permiten conseguir unos rendimientos próximos a los de los topes, que los escudos para roca dura no podrían conseguir. Al igual que los escudos para

roca dura los dobles escudos permiten realizar túneles a través de terrenos con geología cambiante e inestable que los topes no podrían realizar.



**Figura 11. Doble Escudo.**

Fuente: [http://www.microtunnel.com/27\\_descudos.htm](http://www.microtunnel.com/27_descudos.htm); Cardona M. "Microtunnel"; [Consulta al: 2009, Agosto 01].

El escudo delantero: Sirve como estructura soporte de la cabeza de corte, contiene el rodamiento principal, la corona de accionamiento y los sellos interno y externo.

El escudo trasero: o escudo de anclaje, incorpora las zapatas de los grippers operables a través de ventanas. En su parte posterior incorpora el erector de dovelas y los cilindros de empuje para la propulsión en modo escudo normal.

### **3.3.1.2 Principales Fabricantes de Tuneladoras, Topo o TBM.**

#### **- Robbins Seattle (USA).**

Este fabricante inició sus actividades en 1951 y ha contribuido muy considerablemente al gran desarrollo actual de este tipo de máquinas,

gracias al éxito alcanzado por una de sus máquinas en la excavación de un túnel en Toronto (1956).

Actualmente ha desarrollado máquinas que incorporan en su diseño un doble escudo y que permite excavar rocas muy fracturadas y formaciones heterogéneas (mixed grounds). Ver tablas 6 y 7.

**Tabla 6. Máquinas TBM Robbins.**

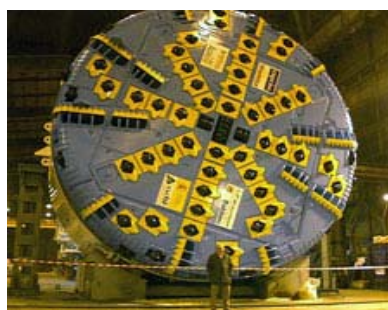
<b>Diámetro (m)</b>	2,59	3,35	3,93	5,49
<b>Tipo</b>	95-225	1110-230	1212-228	189-229
<b>Potencia (Kw.)</b>	298	671,1	800	1305
<b>Empuje (Kg.)</b>	287.768	551.610	633.000	907.000
<b>Peso (Ton)</b>	66,2	123	203	295
<b>Nº de Cortadores</b>		23 de 17"		40 de 17"

Fuente: Excavación Mecánica, p. 37, Cornejo, 1988 Editorial Rueda, S.L., Madrid, España.

**Tabla 7. Máquinas TBM Robbins.**

<b>Diámetro (m)</b>	5,53	5,80	7,80	10,80
<b>Tipo</b>	188-227	193-124	252-226	353-196
<b>Potencia (Kw.)</b>	895	671	1640	1790
<b>Empuje (Kg.)</b>	796.000	578.040	1.164.500	1.252.000
<b>Peso (Ton)</b>	320	240	475	772
<b>Nº de Cortadores</b>	39 de 17"	35 de 14"	53 de 17"	65 de 15½"

Fuente: Excavación Mecánica, p. 37, Cornejo, 1988 Editorial Rueda, S.L., Madrid, España.



**Figura 12. Máquina Robbins.**

Fuente: [www.robbinstbm.com/.../single\\_shield.shtm.](http://www.robbinstbm.com/.../single_shield.shtm.); Robbins pagina comercial, [Consulta al: 2009, Septiembre 15].

El Mobile Miner es una máquina Robbins de gran movilidad; consiste en una rueda giratoria muy fina con múltiples cortadores de disco montado en su periferia. Es una máquina diseñada para excavar en roca dura o muy dura en competencia con los explosivos.

La forma de la sección que excava es rectangular. En cuarcita dura y abrasiva ha conseguido una penetración de 1.5 m/h, en una sección de 22 metros cuadrados.



**Figura 13. Máquina Robbins MM120 373 Kw.**

Fuente: [www.mining.unsw.edu.au/courses/courses\\_ugrad/...](http://www.mining.unsw.edu.au/courses/courses_ugrad/...); publicada por la UNSW, [Consulta al: 2009, Septiembre 15].

**- Lovat Canadiense (Canadá).**

Desde 1972, Lovat ha especializado en el diseño personalizado y fabricación de máquinas Tunnel Boring (TBM) utilizados en la construcción de metro, ferrocarril, carreteras, alcantarillado, agua corriente, la tubería de carga, el acceso a los túneles de las minas y las telecomunicaciones.

La aportación tecnológica principal de estas máquinas consiste en su versatilidad, pudiéndose adaptar a situaciones muy diversas, desde formaciones poco cohesivas, hasta rocas semiduras ( $1.500 \text{ Kg/cm}^2$ ). La cabeza de corte permite la utilización de diferentes herramientas de corte (dientes de acero, picas, discos de acero), pudiendo efectuarse este cambio desde el interior de la máquina. Se pueden adoptar distintos sistemas de sostenimiento y revestimiento, desde arcos metálicos a dovelas prefabricadas, que son colocados mediante un dispositivo erector solidario con la máquina

Lovat posee un enfoque de diseño que asegura una tuneladora flexible y fiable para cualquier proyecto de construcción de túneles a través de la personalización del equipo para adaptarse a las necesidades del cliente y los requisitos del proyecto.



**Figura 14. TBM Lovat.**

Fuente: <http://www.machinedesign.com/article/the-art-of-digging-...>; empresa LOVAT, [Consulta al: 2009, Septiembre 15].

- **Wirth (Alemania).**

Fabrica diversos tipos de máquinas TBM, adaptándose a las necesidades planteadas por la excavación de la obra subterránea. Ha desarrollado, con un diseño original, una máquina tuneladora que obtiene el diámetro final de excavación del túnel, mediante el ensanche de un túnel piloto previo.

**Tabla 8. Máquina TBM Wirth.**

<b>Diámetro (m)</b>	2,2-2,6	2,60-3,00	3,00-3,50	3,50-4,00
<b>Tipo</b>	TB 0/1	TB 0/2	TB I	TB II
<b>Potencia (Kw)</b>	2x132 Kw (c.c)	3x110 Kw (c.c)	4x110 Kw (c.c)	4x132 Kw (c.c)
<b>Empuje (Kn)</b>	3.000 Kn	4.400 Kn	5.500 Kn	6.400 Kn
<b>Par</b>	200 KNm	270 KNm	420 KNm	540 KNm
<b>Carrera</b>	800 mm.	1000 mm.	1200 mm.	1200 mm.

Fuente: Excavación Mecánica, p. 45, Cornejo, 1988 Editorial Rueda, S.L., Madrid, España.

**Tabla 9. Máquina TBM Wirth.**

<b>Diámetro (m)</b>	4,00-4,80	4,80-6,00	6,00-7,20	7,20-8,60
<b>Tipo</b>	TB III	TB IV	TB V	TB VI
<b>Potencia (Kw)</b>	4x200 Kw (c.c)	4X240 Kw (c.c)	6X200 Kw (c.c)	8X180 Kw (c.c)
<b>Empuje (Kn)</b>	8.300 Kn	10.000 Kn	12.750 Kn	16.700 Kn
<b>Par</b>	1.000 KNm	1.600 KNm	2.400KNm	3.400 KNm
<b>Carrera</b>	1.500 mm.	1.600 mm.	1.600 mm.	1.600 mm.

Fuente: Excavación Mecánica, p. 45, Cornejo, 1988 Editorial Rueda, S.L., Madrid, España.



**Figura 15. Máquina TBM Wirth.**

Fuente: [www.directindustry.it/prod/wirth/tunnel-borin...](http://www.directindustry.it/prod/wirth/tunnel-borin...); publicada por la empresa Direct Industry, [Consulta al: 2009, Septiembre 15].

**- Bouygues Francesa (Francia).**

Esta firma ha desarrollado una máquina de concepción diferente al resto de las existentes en el mercado. Consiste en una cabeza giratoria sobre la que van montados tres deflectores y tres brazos oscilantes, cada uno de los cuales lleva un cortador de disco de 12".

Las principales ventajas de estas máquinas son: menor costo y peso en relación con otras máquinas, el espacio libre que permite en el frente y que permite la posibilidad de instalar un equipo de perforación para efectuar inyecciones sistemáticas por delante del frente. Estas máquinas perforan desde rocas blandas hasta rocas duras de más de 2.000 Kg/cm<sup>2</sup>.





**Figura 16. Maquina TBM Bouygues Modelo STEC Diámetro 15.43m.**

Fuente: <http://enr.construction.com/images2/2007/03/070305-16a.jpg>.; publicada por la empresa Bouygues, [Consulta al: 2009, Septiembre 15].

### 3.3.1.3 Estimación de Rendimientos.

Para hacer una evaluación de los costos de ejecución con máquinas topo, es necesario partir de una estimación de los rendimientos que podrán obtenerse en cada uno de los tipos de terreno presentes en el proyecto.

El avance medio estimado vendrá dado por la expresión:

$$AMD = (A \times HTD) \times CU \times (B \times PN) \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde:

AMD: Avance medio estimado-día.

A x HTD: Horas útiles trabajadas-día

A: Coeficiente.

CU: Coeficiente de utilización de la máquina.

B x PN: Penetración efectiva.

PN: Penetración Neta.

B: Coeficiente.



Es la velocidad con la que penetra una máquina topo en la roca cuando está trabajando. Se expresa generalmente en m/revolución o en m/hora. Existen muchos criterios de determinación de esta penetración neta. Todos ellos se basan en la caracterización de las propiedades mecánicas de las rocas; para ello es necesario realizar ensayos diversos en el laboratorio.

**Tabla 10. Valores de Coeficiente “B” en función del estado de la máquina y de los cortadores.**

<b>Condiciones de trabajo.</b>	<b>Definición.</b>	<b>Valor de “B”</b>
OPTIMAS.	- Máquinas en muy buen estado. - Cortadores nuevos.	1
BUENAS	- Máquinas en un buen estado. - Cortadores ligeramente gastados.	0.40 - 0.45
NORMALES	- Máquinas en un buen estado. - Cortadores con desgaste normales.	0.75 - 0.80

Fuente: Excavación Mecánica, p. 68, Cornejo, 1988 Editorial Rueda, S.L., Madrid, España.

**- Coeficiente de Utilización.**

Se define como el cociente:

$$CU = \frac{\text{Horas reales de trabajo de la máquina}}{\text{Horas efectivas de trabajo}} \quad (\text{Ec. 8})$$

El tiempo real de trabajo de la máquina varía en función de las incidencias del resto de actividades que intervienen, como son:

- Tiempo neto de perforación.
- Cambio de cortadores.
- Mantenimiento y reparaciones del TBM.
- Mantenimiento y separaciones del back-up.
- Tiempo de transporte de escombros no solapables.
- Tiempo de sostenimiento.
- Otras causas.

Podemos definir unos valores para el CU en función de las condiciones de trabajo tomando como base datos estadísticos sacados de casos reales, los valores para el CU serán:

**Tabla 11. Valores de CU, según las condiciones de trabajo.**

<b>Condiciones de trabajo</b>	<b>Definición</b>	<b>Valor de cu</b>
Optimas	Roca, dureza media. Equipos de apoyo óptimos. No sostenimientos.	0,46
Buenas.	Roca, dureza media. No sostenimientos.	0,42
Normales	Roca dura no muy abrasiva Sostenimiento muy ligero Poca filtración de agua 6 l/seg.	0,34
Duras	Rocas muy duras y abrasivas Sostenimiento ligero. Mediana filtración de agua < 32 l/seg.	0,34
Muy duras	Rocas extremadamente duras y abrasivas. Rocas con fluencia Sostenimiento considerable Alta filtración de agua > 32 l/seg.	0,20

Fuente: Excavación Mecánica, p. 69, Cornejo, 1988 Editorial Rueda, S.L., Madrid, España.

**- Horas Útiles Trabajadas/día.**

Representan la duración de la actividad laboral diaria; normalmente se trabaja de un modo continuo durante las veinticuatro horas del día. Estas veinticuatro horas no son enteramente aprovechables para el trabajo, ya que se producen tiempos muertos; un ejemplo de estos tiempos muertos sería el tiempo perdido entre cambios de relevos.

Por este motivo afectamos dicho parámetro de un coeficiente (A) de minoración de la jornada laboral.

El valor de este coeficiente, para una jornada de veinticuatro horas sería:

**Tabla 12. Coeficiente de A para una jornada de veinticuatro horas.**

ESTIMACION	VALOR DE A
Optimista	1,00
Pesimista	0,8

Fuente: Excavación Mecánica, p. 70, Cornejo, 1988 Editorial Rueda, S.L., Madrid, España.

**- Costo de Mano de Obra (CMO).**

Para determinar el número de operarios deberán evaluarse las necesidades de cada proyecto; no obstante, como fórmula aproximada para un tanteo rápido puede utilizarse la siguiente:

$$\text{Número de operarios/turno} = 8 + (d - 2,80) \times 1.5 \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde:

d: diámetro de la tuneladora o TBM.

El costo de la mano de obra puede determinarse de un modo aproximado, mediante la expresión:

$$\text{CMO} = [8 + (d - 2,80) \times 1.5] \times \frac{\text{COH} \times \text{NHR}}{M} = (\text{Bs. / m}) \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde:

COH: costo total horario del operario tipo representativo. (Bs.)

NHR: duración del relevo en horas.

M: metros avanzados por relevo.

#### - Costo de Maquinaria (CMQ).

Viene dado por la expresión:

$$\text{CMQ} = \frac{\text{CEC} \times d}{\text{LT}} \left[ \frac{i \times N \times (d/2,8)^{0.7}}{2} + 1 \right] = (\text{Bs. / m}) \quad (\text{Ec. 11})$$

Donde:

CEC: costo del equipo completo (incluido fletes y transportes) para un diámetro de 2,8 m. (Bs.)

D: diámetro del túnel.

LT: longitud del túnel.

N: amortización del equipo en años.

i: interés del dinero (i=0,1- 0,2).

- **Costo de Cortadores (CC).**

Viene dado por la expresión:

$$CC = \frac{NC \times CUC \times DT \times HTD \times FD \times CU}{VC} = (\text{Bs.}) \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde:

NC: Número de cortadores.

CUC: Costo de un cortador. (Bs.)

DT: Duración del túnel en días.

HTD: Horas trabajadas por día.

FD: Factor de disponibilidad de la máquina (0,8).

CU: Coeficiente de utilización de la máquina.

VC: Vida del cortador en horas (500 horas en caliza de 1.000 kg/cm<sup>2</sup>).

A continuación se incluyen algunos datos estadísticos de desgastes de cortadores extraídos de proyectos realizados:

Gneis: 0,0123 cortadores/m<sup>3</sup>.

Calizas: (800-2.108 Kg/cm<sup>2</sup>) = 0,015 cortadores/m<sup>3</sup>.

- **Costo de Mantenimiento, Reparación y Energía (CMRE).**

Viene dado por la expresión:

$$CMRE = CEC \times 1,7 \times 10^{-4} \times (d/2.8) = (\text{Bs./ml}) \quad (\text{Ec. 13})$$

Se incluyen algunos datos estadísticos de consumos de energía extraídos de proyectos realizados

**Tabla 13. Datos de consumo de energía.**

Tipo de terreno	Consumo de energía KWh / m <sup>3</sup>	Resistencia de la roca Compresión simple Kg / cm <sup>2</sup>
Rocas sedimentarias	2,5	500 - 800
Gneises	3.5	1270 - 2100
Rocas ígneas	3,8	1.500 - 2.500

Fuente: Excavación Mecánica, p. 73, Cornejo, 1988 Editorial Rueda, S.L., Madrid, España.

**- Costo de Gastos Generales (CGG).**

Viene dado por la expresión:

$$CGG = 1,8378 \times 10^{-4} (d/2,8) = (\text{Bs./ml}) \quad (\text{Ec. 14})$$

**- Costo total de ejecución material (CTEM).**

Viene dado por la expresión:

$$CTEM = CMO + CMQ + CMRE + CC + CGG. \quad (\text{Ec. 15})$$

#### **3.3.1.4 Factores que Influyen en el Rendimientos de las Máquinas.**

La mayor economía en el proceso de excavación mecánica con máquina topo se obtiene cuando se desarrolla adecuadamente el principio de corte llamado “Kerf cutting” mediante el cual la roca se fractura en lascas (chips); cuanto mayor sea el tamaño medio y el volumen de estas lascas, mas económico resultara el proceso de excavación. (Cornejo, 1988).

En este mecanismo se producen dos tipos de fracturación en la roca:

Una fracturación primaria, en la que las presiones concentradas en el filo de los cortadores producen la indentación de la roca con la trituración de la roca próxima al filo.

Una fracturación secundada inducida por las roturas de tracción cizallamiento entre dos cortadores contiguos. Esta fracturación es la económicamente deseable y la que hace económicamente rentable el proceso de excavación. Para que esta se produzca en la medida necesaria, hay que tener en cuenta la influencia de las cuatro variables independientes que intervienen en el proceso: empuje sobre el filo del cortador, separación entre surcos, grado de desafilado de los cortadores y revoluciones de la cabeza.

Cuando el efecto “kerf cutting” no se desarrolla en la medida adecuada se producen desgastes muy importantes de los cortadores y una disminución importante de la penetración y, por tanto, del rendimiento de la excavación. (Cornejo, 1988).

### **- Efectos de la Fuerza del Cortador.**

Para que se produzca la fracturación secundaria es necesario que la fuerza aplicada a cada cortador alcance un valor umbral, específico para cada roca, manteniendo el resto de las variables en valores constantes y adecuados.

Esta fuerza umbral se alcanzará cuando comiencen a producirse lascas de rocas.

La relación entre el empuje por cortador y la penetración conseguida en cada vuelta es una curva que, a partir de un determinado valor del empuje se convierte en una recta, en cuyo tramo se cumple la proporcionalidad entre el empuje por cortador y la penetración.

Cuando esta proporcionalidad se hace lineal decimos que la perforabilidad es eficiente.

En rocas muy duras es necesario emplear cortadores de mayor diámetro, 15,5 pulgadas (394 mm.) para los centrales y 17 pulgadas (432 mm.) para el resto de los cortadores. De este modo aumentará la vida del cortador y disminuirá el tiempo de cambio de los mismos.

En las modernas máquinas, para rocas muy duras, se trabaja con empujes por cortador de 25 toneladas. (Cornejo, 1988).



### **- Efecto de la Separación entre Surcos.**

Se han puesto de manifiesto que, reduciendo la separación entre surcos, se reducen las fuerzas normales que es necesario aplicar a cada cortador, para una profundidad de penetración fijada. (Cornejo, 1988).

Reduciendo, por tanto, la separación entre surcos, se reducen los empujes necesarios en los cortadores para conseguir una perforabilidad eficiente.

En rocas muy duras ( $3.300 \text{ Kg/cm}^2$ ) es necesario proyectar una separación entre surcos del orden de los 37.5 mm.

El espaciamiento crítico es función de la resistencia de la roca y del máximo empuje admisible por cortador,

Desde un punto de vista teórico deberían proyectarse todas las máquinas de roca dura, de modo que la separación entre surcos fuera lo suficientemente pequeña para que se produjera el efecto "Kerf Cutting" en cualquier roca, sin sobrepasar ni el empuje ni el par de la máquina.

La reducción excesiva de la distancia incrementa los costos de perforación, aumentando la energía necesaria y el número de cortadores. (Cornejo, 1988).

### **- Efecto del Desafilado de los Cortadores.**

El efecto del desafilado de los cortadores es menos conocido que los anteriores. De siempre es sabido que los cortadores desgastados necesitan mayores empujes que los cortadores afilados para conseguir una misma profundidad de penetración. Esto es debido a que, con el aumento de la anchura del filo, aumenta la superficie de contacto del mismo.

### **- Efectos del Número de Revoluciones de la Cabeza.**

Las maquinas topo para roca dura tienen generalmente un número fijo de revoluciones / minuto.

Para un empuje constante, la penetración (m/min.) es directamente proporcional al número de vueltas.

No obstante, el número de revoluciones viene condicionado por el desgaste de los cortadores, ya que este aumenta a la par que lo hace el número de revoluciones.

### **3.3.1.5 Los factores adversos para la utilización de los topos.**

#### **- El agua.**

El agua puede ser un factor condicionante cuando son de esperar caudales en el frente. Caudales superiores a 32 l/seg dificultan grandemente el avance con topo.

Las modernas técnicas permiten efectuar inyecciones en el frente sin necesidad de retirar la máquina, como se hizo en los túneles perforados debajo de un lago en la ciudad de Oslo, donde se hicieron perforaciones en abanico llegándose a perforar unos 200 kilómetros de taladros para inyección. (Cornejo, 1988).

**- Tensiones de campo elevadas.**

Cuando las tensiones tangenciales en las paredes de la roca se aproximan al valor de la resistencia a compresión de la roca, se produce la rotura en lascas de los hastiales. (Cornejo, 1988).

En cualquier caso, la resistencia de la roca debe ser suficiente para soportar la presión de apoyo de los grippers.

**- Heterogeneidad en el frente.**

La presencia en el frente de estratos duros junto con estratos más blandos produce vibraciones de la cabeza y rotura de cortadores.

**- Fractura de la roca en bloques o lascas.**

Algunas masas rocosas se fracturan en bloques o lascas, como consecuencia de la intersección de juntas y planos de estratificación y foliación.

Rocas sedimentarias con estratificación horizontal de espesores de estratos muy delgados, dan frecuentemente rotura en lajas en el techo, principalmente cuando existen tensiones altas o cuando hay planos de debilidad entre los estratos. (Cornejo, 1988).

Estas roturas en hastiales y techo pueden prevenirse con la colocación de un sostenimiento (cerchas, pernos de anclaje); sin embargo, cuando la rotura se produce en el propio frente de excavación, el problema puede ser mayor, ya que dichos bloques taponan el punto de carga y el transportador, produciéndose frecuentes paradas para demoler los bloques y retirarlos. Para evitar estos inconvenientes se han diseñado máquinas con blindado de la cabeza da corte.

**- Fluencia de la roca.**

La rotura en lajas y el fenómeno de fluencia de la roca ocurren cuando las tensiones tangenciales de pico son mayores que la resistencia a compresión de la roca; este fenómeno puede ocurrir tanto en rocas de alto RQD, sometida a altas tensiones, como en zonas de roca de mala calidad muy fracturada o en rocas arcillosas. Algunas rocas, por otra parte, pueden ser muy sensibles al agua libre, pudiendo presentar fenómenos de hinchamiento (rocas con contenido de arcilla, formaciones de arcilla- lutita, filitas esquistosas, tobas volcánicas, etc.).

**- Cavernas y conductos kársticos.**

**- Presencia de gases.**

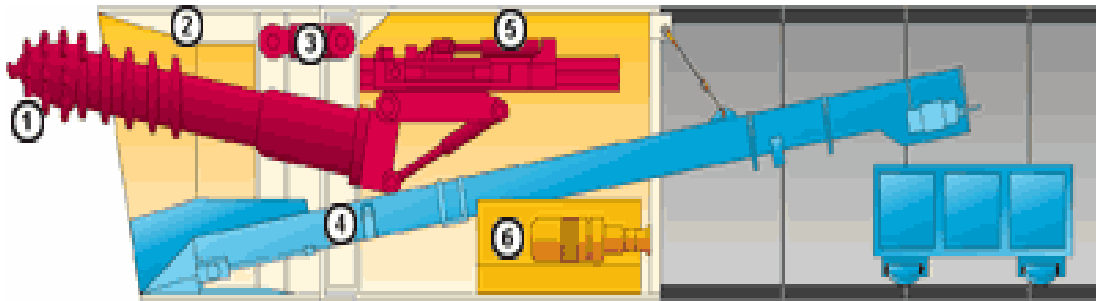
### **3.3.2 Rozadora.**

Dentro de la amplia gama de maquinaria que se utiliza en Minería y Obras Públicas para la excavación mecánica de rocas, se explicara ahora las llamadas máquinas rozadoras.

Una rozadora es una máquina excavadora provista de un brazo articulado en cuyo extremo va montado un cabezal rotatorio que dispone de herramientas de corte de metal duro llamado picas. (Tapia, 1999).

Estas máquinas, denominadas de ataque puntual, producen desegregación de la roca con las picas que van situadas en la cabeza rotativa, que se mantiene presionada contra el frente con la toda la potencia del motor de corte, actuando como fuerza de reacción el propio peso de la máquina, como también un sistema de recogida y transporte de escombros desde el frente hacia la parte trasera de la máquina completa, mediante el ensamblado de los mecanismos descritos a un chasis móvil sobre orugas.

La utilización de estas maquinas en la ingeniería civil es cada vez más importante y se extiende a la construcción de túneles en terrenos principalmente poco abrasivos y de resistencias inferiores a 100 MPa, en los que la longitud de los mismos hace prohibitivo el empleo de máquinas TBM de excavación a plena sección.



**Figura 17. Esquema Básico de una Rozadora.**

Fuente: [http://www.microtunnel.com/17\\_rozadoras.htm](http://www.microtunnel.com/17_rozadoras.htm); Cardona M. "Microtunnel"; [Consulta al: 2009, Agosto 01].

- |                         |                           |
|-------------------------|---------------------------|
| 1-. Rozadora.           | 2-. Escudo.               |
| 3-. Cilindro de Mandos. | 4-. Cinta Transportadora. |
| 5-. Tubo de la Máquina. | 6-. Grupo Hidráulico.     |

### 3.3.2.1 Sistema de Corte.

Existen dos sistemas de cortes:

- Ataque Frontal (Ripping).
- Ataque Lateral (Milling).

#### **Ataque Frontal.**

En este sistema el cabezal de corte gira perpendicularmente al brazo soporte, por lo que la fuerza de corte se aplica principalmente de un modo frontal permitiendo atacar rocas de dureza alta.

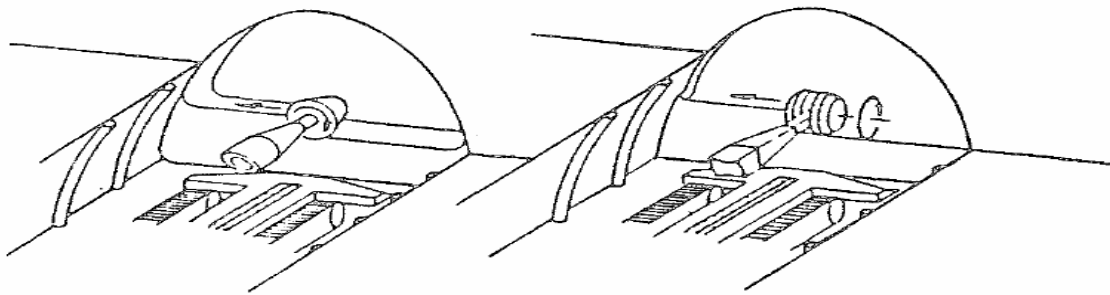
#### **Ataque Lateral.**

En este sistema el cabezal de corte cilíndrico o tronco cónico gira en línea con el eje del brazo soporte y la fuerza de corte se aplica lateralmente,

por lo que no se aprovecha todo el peso de la máquina como fuerza de reacción.

### **Escudo Abierto con Rozadora.**

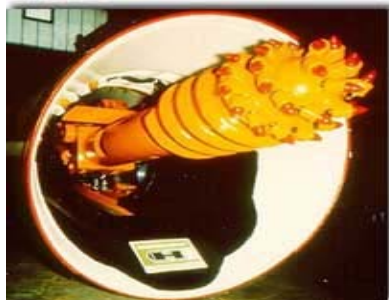
El campo de utilización de los escudos rozadores va desde suelos no cohesivos hasta rocas con resistencia a la compresión inferior a  $700 \text{ kgcm}^2$ . Por lo general la mayoría de los escudos abiertos dotados con brazo rozador permiten el intercambio con el brazo excavador. Gracias a esto, la mayoría de los elementos que componen los equipos son idénticos en ambos casos.



**Figura 18. Milling. (Ataque Lateral).**

**Ripping. (Ataque Frontal).**

Fuente: Excavación Mecánica, p. 79, Cornejo, 1988 Editorial Rueda, S.L., Madrid, España.



**Figura 19. Escudo Abierto con Rozadora.**

Fuente: [http://www.microtunnel.com/17\\_rozadoras.htm](http://www.microtunnel.com/17_rozadoras.htm); Cardona M. "Microtunnel"; [Consulta al: 2009, Agosto 01].

### 3.3.2.2 Principales Fabricantes de Rozadoras.

#### - Antraquip.

Antraquip Corporation es un proveedor global líder de rozadoras, de sistema de corte, accesorios hidráulicos para excavadoras, sistemas de soporte fiable y de los productos del túnel auxiliar que las industrias de construcción de túneles, minería y construcción.

**Tabla 14. Equipos de Antraquip Corporation.**

<b>Modelo</b>	<b>Peso</b>	<b>Altura</b>	<b>Longitud</b>	<b>Delantal de la carga de la anchura</b>	<b>Motor del cortador</b>
AQM5060 132 KW	Aproximadamente 13 Tonelada.	1550 mm	6890 mm	1600/2000/2500 mm	30 kilovatios A 41 kilovatios
AQM200 350 KW	Aproximadamente 55-58 Tonelada.	2500 mm	11700 mm	5500 mm	200 kilovatios
AQM150 239/264 KW	Aproximadamente 35 Tonelada.	1800 mm	8113 mm	2000/2500/3000 mm	150/175 kilovatios
AQM100 198/200 KW	Aproximadamente 27 Tonelada.	1830 mm	8950 mm	2000/2500/3000 mm	110/132 kilovatios

Fuente: <http://www.directindustry.es/prod/antraquip-corporation/maquina-rozadora-58942-385252.html>; publicada por la empresa Direct Industry [Consulta al: 2009, Septiembre 15].





**Figura 20. Máquina rozadora Antraquip Corporation. AQM100 198/200 kW.**  
 Fuente: [http://img.directindustry.es/images\\_di/photo-g/maquina-rozadora-385252.jpg](http://img.directindustry.es/images_di/photo-g/maquina-rozadora-385252.jpg); publicada por la empresa Direct Industry, [Consulta al: 2009, Septiembre 15].

- **Dosco.**

Tiene la experiencia en el diseño, fabricación y renovación de máquinas y sistemas, con una sólida reputación de todo el mundo por la fiabilidad y la capacidad de nuestro equipo, respaldado por una fama mundial después de la venta de servicios.

Algunos Modelos.

- Máquina rozadora Dosco Overseas Engineering Ltd Mk2BP 54ton.
- Máquina rozadora Dosco Overseas Engineering Ltd MD1100 35ton.
- Máquina rozadora Dosco Overseas Engineering Ltd Mk4 96ton.
- Máquina rozadora Dosco Overseas Engineering Ltd LH1400H 60ton.
- Máquina rozadora Dosco Overseas Engineering Ltd LH1300H 58ton.

Disponibles en: <http://www.directindustry.es/prod/dosco-overseas-engineering-ltd/maquina-rozadora-58720-381086.html>, publicada por la empresa Direct Industry, [Consulta al: 2009, Septiembre 15].



**Figura 21. Máquina rozadora Dosco Mk4 96ton.**

Fuente: [http://img.directindustry.es/images\\_di/photo-g/maquina-rozadora-381087.jpg](http://img.directindustry.es/images_di/photo-g/maquina-rozadora-381087.jpg); publicada por la empresa Direct Industry, [Consulta al: 2009, Septiembre 15].



**Figura 22. Máquina rozadora Dosco LH1300H 58ton.**

Fuente: [http://img.directindustry.es/images\\_di/photo-g/maquina-rozadora-381085.jpg](http://img.directindustry.es/images_di/photo-g/maquina-rozadora-381085.jpg); publicada por la empresa Direct Industry, [Consulta al: 2009, Septiembre 15].

#### **- IBS-Industriemaschinen-Bergbau-Service.**

Diseña y fabrica máquinas de minería y las placas de desgaste de acero revestido. Los productos de la compañía incluyen rozadoras para la construcción de túneles, cintas transportadoras de transferencia, estaciones de transferencia, y conductos de transferencia. IBS fue fundada en 1971 en Alemania.

Algunos Modelos.

- Máquina rozadora IBS SM 100 65 MPa.
- Máquina rozadora IBS SM 110 75 MPa.
- Máquina rozadora IBS SM 130 80 MPa.

Disponibles en: <http://www.directindustry.es/prod/ibs-industriemaschinen-bergbau-service/maquina-rozadora-59095-384055.html>; publicada por la empresa Direct Industry, [Consulta al: 2009, Septiembre 15].



**Figura 23. Máquina rozadora IBS SM 100 65 MPa.**

Fuente: <http://www.directindustry.es/prod/ibs-industriemaschinen-bergbau-service/maquina-rozadora-59095-384058.html>; publicada por la empresa Direct Industry, [Consulta al: 2009, Septiembre 15].

### 3.3.2.3 Estimación del rendimiento de una rozadora:

De la expresión:

$$R_{exc} = C_E \times RI \times n \times C_1 \times C_D \quad (\text{Ec. 16})$$

Donde:

$R_{exc}$ : Rendimiento  $m^3/\text{día}$ .

$C_E$ : Coeficiente de eficiencia (tabla 15).

$RI$ : Rendimiento instantáneo  $m^3/\text{hora}$  (tabla 16).

$n$ : Número de horas trabajadas al día.

$C_1$ : Coeficientes de tiempos muertos, no disponibles en cada relevo.

$C_D$ : Coeficiente de tiempo disponible para el rozado (tabla 17).

**Tabla 15. Coeficiente de eficiencia.  $C_E$**

<b>Grado.</b>	<b>Condiciones de trabajo.</b>	<b>Coeficiente de eficiencia <math>C_E</math></b>
1	Buenas condiciones de solera. Se produce poco polvo.	1
2	Solera en malas condiciones. Poco polvo.	0.86
3	Mucho polvo a veces hay que interrumpir el trabajo.	0.69
4	Solera en malas condiciones. Mucho polvo.	0.52

Fuente: Excavación Mecánica, p. 104, Cornejo, 1988 Editorial Rueda, S.L., Madrid, España.

**Tabla 16. Rendimiento instantáneo  $RI$  ( $m^3/hora$ ).**

<b>Potencia de la cabeza de corte (Kw)</b>	<b>Resistencia a compresión simple del terreno (<math>\sigma_c</math> Kg/cm<sup>2</sup>)</b>					
	1200	1000	500	300	200	80
	<b>Rendimiento <math>RI</math> m<sup>3</sup>/hora (<math>C_E=1</math>)</b>					
300	23	29	50	72	94	116
200		12	29	48	67	81
110			27	27	34	46
50				12	17	41
40				6	12	35
20					3	12

Fuente: Excavación Mecánica, p. 101, Cornejo, 1988 Editorial Rueda, S.L., Madrid, España.

**Tabla 17. Coeficiente de tiempo disponible para el rozado.**

CD%	Condiciones de trabajo.
10	Condiciones pésimas.
20	Terrenos malos con varias fases de ejecución realizadas con la misma rozadora en la que se coloca un sostenimiento sistemático importante.
50	Cuando se trabaja con un frente de una sola fase y con un sostenimiento de cuantía ligera.
85	En condiciones optimas, sin ningún impedimento para el trabajo de la maquina (situación no real)

Fuente: Excavación Mecánica, p. 103, Cornejo, 1988 Editorial Rueda, S.L., Madrid, España.

**- Ejemplo de estimación de rendimiento.**

Supongamos un túnel carretero cuyo terreno presenta unas características geomecánicas poco abrasivas con una resistencia a la compresión igual a: 300 Kg/cm<sup>2</sup>, siendo necesarias la excavación en fases, se usara una cabeza de corte con potencia igual a: 50 KW . Considérese que se trabaja en tres turnos y que los coeficientes que intervienen son:

CE= 1 (tabla 15).

RI= 12 m<sup>3</sup>/h (tabla 16).

n= 24 horas.

C1= 0.875 valor de campo.

CD=0.20 (tabla 17).

$$R_{exc} = 1 \times 12 \times 24 \times 0.875 \times 0.20 = 50.4 \text{ m}^3/\text{día}$$

Si la superficie del túnel tiene un área de  $60 \text{ m}^2$ , el avance día será:  
 $50.4/60 = 0.84 \text{ m/día}$ . (S. Rojas, 2008).

#### **3.3.2.4 Clasificación de la Máquina.**

La variedad de máquinas existentes en el mercado es muy abundante; para facilitar el estudio y la elección de la máquina más adecuada a un proyecto determinado, Cornejo en 1988, propone la siguiente clasificación, basada en el peso y la potencia de las mismas:

##### **- Máquinas Ligeras.**

Características:

Peso: 20 Ton.

Potencia de la cabeza de corte:  $\leq 50\text{KW}$

Dureza máxima de roca:  $\sigma_c = 30 \text{ MPa}$ .

##### **- Máquinas de Peso Medio.**

Características:

Peso: entre 20 - 40 Ton.

Potencia de la cabeza de corte:  $\leq 110\text{KW}$

Dureza máxima de roca:  $\sigma_c = 80 \text{ MPa}$ .

##### **- Máquinas Pesadas.**

Características:

Peso: entre 40 - 60 Ton.

Potencia de la cabeza de corte:  $\leq 220\text{KW}$

Dureza máxima de roca:  $\sigma_c \leq 100\text{ MPa}$ .

**- Máquinas muy Pesadas.**

Características:

Peso: 60 - 80 Ton.

Potencia de la cabeza de corte: 200 - 300KW

Dureza máxima de roca:  $\sigma_c = 120\text{ MPa}$ .

**3.3.2.5 Criterios para la elección de una Rozadora.**

**- Resistencia a Compresión de la Roca.**

La elección de la potencia de la rozadora esta en estrecha relación con la resistencia a compresión simple de la roca. La resistencia a compresión de la roca no es de fácil determinación, ya que el dato obtenido en laboratorio sobre probeta puede no reflejar la realidad de la matriz rocosa. Un método sencillo de determinación de la resistencia de la roca, es utilizar el martillo Schmidt haciendo una serie de medidas y tomando su valor medio.



**Figura 24. Martillo Schmidt.**

Fuente: [http://www.pce-group-europe.com/espanol/product\\_info.php/info/p4086\\_Impactometro-PCE-HT-225A.html](http://www.pce-group-europe.com/espanol/product_info.php/info/p4086_Impactometro-PCE-HT-225A.html); publicada por Empresa PCE GROUP, [Consulta al: 2009, Septiembre 15].

**Tabla 18. Relación entre la Resistencia de la Roca y Potencia de la Máquina.**

Resistencia de la Roca		Potencia de la Cabeza de Corte
R <sub>c</sub> (kg / cm <sup>2</sup> )	R <sub>c</sub> (MPa)	(KW)
200	20	30
300	30	50
400	40	70
500	50	90
600	60	103
700	70	116
800	80	130
900	90	165
1000	100	200
1200	120	300

Fuente: Excavación Mecánica, p. 97, Cornejo, 1988 Editorial Rueda, S.L., Madrid, España.

**- Condiciones Geométricas.**

El gálibo del túnel a excavar determina las máquinas que por dimensiones, pueden utilizarse.

Dentro de las máquinas que por gálibo pueden emplearse, cabe una segunda elección en función de las fases en las que se piensa excavar el túnel.



Si la excavación se hace en una única fase deberán seleccionarse las máquinas de modo que la altura máxima de corte sea igual o mayor que la altura de la sección a excavar. (Cornejo, 1988).

#### **- Condiciones Geomécánicas.**

En la elección de la máquina más idónea hay que tener en cuenta la variabilidad de las características geomecánicas del terreno. La elección será distinta según se trate de terrenos con fuerte, mediana o leve incidencia de los tramos de terreno malo dentro del conjunto. Unas máquinas se adoptan mejor que otras a la problemática que plantean los terrenos de mala calidad; siempre hay que buscar en la elección una mejor versatilidad y adaptación cuando se trata de formaciones de características muy variables.

Cuando los terrenos presentan características más o menos homogéneas y suficientemente conocidas, la elección de la máquina seguirá otras pautas de decisión. (Cornejo, 1988).

#### **- Pendientes de Trabajo.**

En muchos casos las pendientes de trabajo superables por las máquinas pueden ser decisivas en la elección. Hay que tener en cuenta que cada fabricante tiene sus máquinas para diferentes tipos de pendientes.

#### **- Presión Transmitida al Terreno.**

En algunos casos, en terrenos de mala calidad en presencia de agua es muy importante que la presión transmitida por la máquina sea la menor

posible, ya que una presión inadecuada puede imposibilitar la utilización de la maquina.

### 3.3.2.6 Costo de Utilización de una Rozadora.

Los sumandos que componen el costo de utilización de una rozadora son:

$$C_u = C_{ex} + CP + (CI / V) = (\text{Bs./m}^3) \quad (\text{Ec. 17})$$

Donde:

$C_{ex}$  = Costo de excavación que comprende:

- Costo de máquina (depreciación e intereses), Repuestos y reparaciones, Lubricantes, aceite hidráulico, etc.

- Energía.

- Mano de obra.

CP = Costo de picas. (Bs.)

CI = Costo de instalación. (Bs.)

V = m<sup>3</sup> totales rozados.

- **Costo de Excavación.**

El costo de excavación se obtiene de la expresión:

$$C_{ex} = P/R_{EXD} \quad (\text{Ec. 18})$$

Donde:

P = Bs/Día.

R<sub>EXD</sub> = Rendimiento Excavación Diario.

### **3.3.3 Martillo Hidráulico.**

Es una máquina de ataque puntual. La energía se genera mediante motores eléctricos o diesel y se transmite a través de un circuito hidráulico a la herramienta puntera, situada en el extremo del brazo articulado de la máquina. La roca se quebrantada por impacto del martillo y se desprende en forma de pequeños bloques o esquirlas.

Los primeros martillos hidráulicos se fabricaron hace 25 años, los modelos que existen en la actualidad siguen pareciéndose mucho a aquellos primeros modelos. Los principios básicos de la actuación de un martillo hidráulico y la correspondiente herramienta (pica), consisten en transformar la potencia hidráulica de la maquina en impactos mecánicos, el método practico varía según el fabricante, (FortuneCity, 2009).

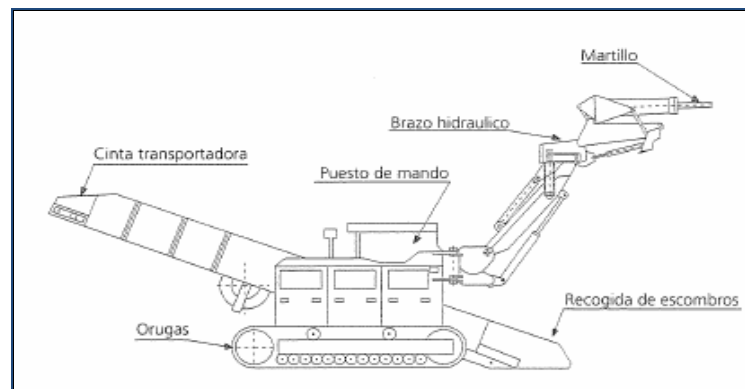
Tiene una importante utilidad cuando se trata de excavar rocas blandas o fisuradas en las fases de destroza, donde compite ventajosamente con los otros métodos más potentes. En la fase de avance, dependiendo de cómo sea la roca, puede perder algo de eficacia, pues este sistema necesita al menos dos caras libres de salida de la roca para lograr un rendimiento adecuado.

Los rendimientos de perforación que se consiguen en los martillos hidráulicos modernos, pueden superar los 3,5 m/min. de velocidad instantánea de perforación, (FortuneCity, 2009).

Los martillos actuales tienen sistemas electrónicos para controlar la dirección de los taladros, el impacto y la velocidad de rotación de los martillos

e incluso pueden memorizar el esquema de tiro y perforar todos los taladros automáticamente.

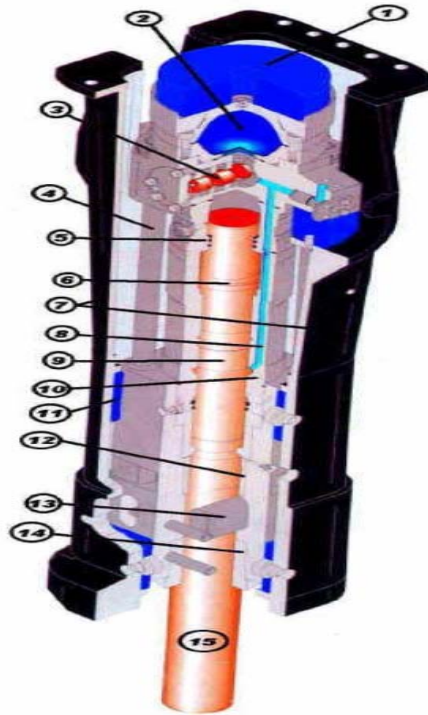
Los martillos hidráulicos o martillos perforadores se deben tomar en cuenta que tiene que estar montado sobre una retroexcavadora ordinaria de cadenas; necesita dos caras libres de salida de la roca para lograr rendimientos adecuado; su uso es de bajo costo, pocos operarios, buen rendimiento, movilidad y flexibilidad.



**Figura 25. Esquema de una Máquina con un Martillo Hidráulico.**

Fuente: Curso de postgrado, S. Rojas, clase 3 métodos de excavacion2,p.26;  
[http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/silviorojas/tuneles/Clase3\\_MetodosExcavacion\\_2.pdf](http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/silviorojas/tuneles/Clase3_MetodosExcavacion_2.pdf); [Consulta al: 2009, Agosto 01].

### 3.3.3.1 Componentes de un Martillo Hidráulico.



**Figura 26. Componentes de una Martillo Hidráulico.**

Fuente: <http://www.slideshare.net/adolfogalarza/conceptos-del-martillo-hidraulico-presentation>; Publicado por © 2009 SlideShare Inc., [Consulta al: 2009, Septiembre 15].

- Amortiguador: Evita el retroceso y absorben los impactos de choque sobre la maquina y el martillo. (Fig. 26-1).

- Acumulador: generalmente lleva una membrana tipo diafragma. (Fig. 26-2).

- Válvulas hidráulicas: controlan la presión hidráulica. (Fig. 26-3).

- Tirantes: sujetan los componentes principales unidos y alineados. (Fig. 26-4).

- Portajuntas: sirven para situar los retenes que evitan las fugas. (Fig. 26-5).

- Freno hidráulico: amortigua los golpes en vacío y evita el contacto metal contra metal entre la camisa y el pistón. (Fig. 26-6).

- Carcasa: protege los componentes de los impactos externos a la vez que sirve de soporte a todo el conjunto. (Fig. 26-7).

- Conducciones de aceite: permiten el paso de aceite interiormente. (Fig. 26-8).

- Pistón: produce el movimiento y la potencia que se trasmite a la pica. (Fig. 26-9).

- Camisa: controla los movimientos del pistón. (Fig. 26-10).

- Placas de desgaste: están situadas en las cuatro esquinas de la célula de potencia y su misión es amortiguar los impactos y reducir el ruido. (Fig. 26-11).

- Casquillo superior: sirve para guiar la parte superior de la pica y alinearla con el pistón. (Fig. 26-12).

- Pasador de retención: sujeta la pica en su sitio durante el funcionamiento de la herramienta. (Fig. 26-13).

- Casquillo inferior: guía la pica en su parte inferior, está sujeto a importante desgaste. Es conveniente que sea fácil de cambiar. (Fig. 26-14).

- Pica: es el elemento que efectúa el impacto contra el material. Generalmente es el componente que hay que cambiar más a menudo. (Fig. 26-15).

### **Componentes en común que tienen la mayoría de los martillos hidráulicos.**

- Válvula distribuidora: controla los movimientos del pistón.
- Acumulador de gas o membrana: restaura la energía.
- Cilindro o cuerpo: permite el deslizamiento del pistón.
- Pistón: produce el movimiento de percusión.

### **3.3.3.2 Tipo de martillos hidráulicos, según su principio de funcionamiento.**

- Alta presión: el martillo acelera el pistón con la ayuda de un acumulador de alta presión tipo membrana.

- Alta presión + Gas: además de un acumulador de alta presión, lleva un acumulador de nitrógeno alrededor de la cabeza del pistón; este recibe parte de su energía del gas y parte del acumulador.

- Presión de gas: el martillo solo restaura la energía con un acumulador de gas.

- Baja presión: el martillo lleva un circuito de presión independiente, que se regula con una válvula de control.

### **3.3.3.3 Características del Martillo Hidráulico.**

#### **- Peso.**

El peso de trabajo del martillo es el peso total en orden de trabajo. Incluye soporte de anclaje y herramienta estándar.

Del peso de la máquina.

- Peso de trabajo de la excavadora.
- Si la máquina es muy pequeña, la producción se verá afectada negativamente y se podría dañar la propia máquina.
- Si la máquina es muy pesada podría dañarse el martillo.
- La relación ideal de peso de excavadora a peso de martillo es: 14:1
- Pero es admisible dentro de los siguientes límites: 10:1 a 20:1

#### **- Frecuencia de Impacto.**

La frecuencia del impacto depende de:

- Caudal del aceite.
- Dureza del material que se va a romper.
- Temperatura.
- Viscosidad del aceite.



**Presión del Trabajo:**

La presión de trabajo depende de:

- Ajuste de la válvula de control de presión.
- Presión del acumulador.
- Caudal del aceite.

**- Contrapresión:**

La contrapresión afecta directamente a la presión de trabajo. Si la contrapresión sube, la presión de trabajo también sube; si la contrapresión es muy alta, el martillo puede pararse, (FortuneCity, 2009).

La contrapresión también depende de:

- La resistencia de la línea de retorno.
- La presión en el tanque hidráulico.

**3.3.3.4 Como se debe Trabajar con un Martillo Hidráulico.****Formas de efectuar el rompimiento con los martillos.**

- Por penetración: trabajos en zanjas, hormigón, excavación masiva. Se debe usar como herramienta picas de tipo cincel o tipo lápiz. El material será blando, estratificado o plástico.

- Por impacto: para romper piezas de tamaño grande en canteras, se debe usar picas romas en materiales duros, quebradizos y abrasivos.

**Posición de la máquina.**

No se debe trabajar hacia los lados de las cadenas de la máquina. La operación hacia los lados da lugar a cargas torsionales en la cadena opuesta al lado de trabajo pudiendo provocar daños importantes en el bastidor de la máquina. (Editorial FortuneCity).

Trabaje siempre con los cilindros en posición intermedia, es decir el cilindro del balancín y el del cucharón deben de estar con aproximadamente la mitad del vástago fuera.

**Métodos correctos.**

Pare siempre el martillo antes de que el material colapse. No permita que la pica atraviese el material y trabaje en vacío. Los golpes en vacío provocan mucho desgaste y averías prematuras.

Nunca golpee más de 15 segundos seguidos con el martillo. Si el material no se rompe coloque la pica en otra posición una vez transcurrido este tiempo. Al trabajar mucho tiempo en un solo punto se produce una bolsa de polvo que provoca amortiguación del impacto, calor y desgaste prematuro de la pica y el martillo.

Mantenga el martillo siempre en un ángulo de 90° con respecto al material que se quiere romper. Efectúe presión sobre el material a romper pero no excesiva.

Nunca haga palanca con la pica enterrada en el material ni empuje la misma en un ángulo distinto del recto con respecto al material. Recuerde que

la pica es de una gran dureza pero es también muy frágil. Cualquier pequeño esfuerzo de la misma en otro sentido que no sea el de trabajo dará lugar a su rotura.

Si la temperatura es inferior a 20°C bajo cero se debe calentar el martillo y la pica antes de trabajar.

La temperatura del aceite hidráulico nunca debe sobrepasar los 80°C.

Si tiene que trabajar bajo el agua con su martillo consulte a su distribuidor si está preparado para este tipo de trabajo.



**Figura 27. Manera correcta al colocar un martillo hidráulico.**

Fuente: <http://members.fortunecity.es/100pies/martillos/martillos4.htm>, [Consulta al: 2009, Septiembre 15].

### **3.3.3.5 Mantenimiento del Martillo Hidráulico.**

**Cada 2 horas.**

Engrase el martillo. (Si las condiciones de trabajo son extremas, engrase cada hora).

**Cada 10 horas o una vez al día.**

- Inspeccionar visualmente lo siguiente: Tornillos sueltos, fugas de aceite, piezas rotas, perdidas y desgastadas.
- Comprobar el estado general del martillo.
- Asegurarse de que los tirantes de apriete no están rotos o fisurados.
- Inspeccionar el soporte de anclaje.
- Comprobar el desgaste de la pica y el casquillo.

**Cada 50 horas o semanalmente.**

- Sacar la pica y comprobar el desgaste interior del casquillo.
- Compruebe el desgaste de los pasadores.
- Apretar conexiones hidráulicas y tornillos exteriores del martillo.
- Si la pica tiene rebabas quítenlas con la radial.

**Cada 1000 horas o una vez al año.**

- Desmonte completamente el martillo.
- Cambie membrana del acumulador.
- Cambie todos los retenes del martillo.
- Compruebe que no existen fisuras en carcasas, placas laterales, tirantes y tuercas, cabezal y bulones de sujeción.

### 3.3.3.6 Principales Fabricantes.

#### - Equipos Maverick.

El equipo de Maverick es un surtidor principal de los martillos hidráulicos de la alta calidad a las industrias de la construcción, de la explotación minera, de la demolición y de las utilidades. Todos los martillos de Maverick se diseñan para proporcionar confiabilidad máxima y vida útil larga mientras que agregan al fondo.

**Tabla 19. Equipos Maverick.**

<b>Martillo Hidráulico Modelo Maverick</b>	<b>Clase del impacto de la energía</b>	<b>Peso de funcionamiento</b>	<b>Diámetro de la herramienta</b>	<b>Suministro de petróleo requerido</b>	<b>Presión ajustada</b>	<b>Peso del portador</b>
400HSP	250 pies/libras	230 libras	1.77"	5.25-10 galones/min	1305 a 1740 PSI	3.000 a 7.000 libras.
2250HSP	1.500 pies/libras.	1.275 libras	3.35"	12-21 galones/min	1.885 a 2.175 PSI	16.000 a 24.000 libras
6250HSP	5.500 pies/libras.	3.924 libras	5.51"	38-48 galones/min	2.320 a 2.610 PSI	42.000 a 65.000 libras
6250HSP	5.500 pies/libras.	3.924 libras	5.51"	38-48 galones/min	2.320 a 2.610 PSI	42.000 a 65.000 libras

Fuente: <http://www.directindustry.es/prod/maverick-hammers/martillo-picador-hidraulico-para-excavadora-60846-391841.html>; publicada por la empresa Direct Industry, [Consulta al: 2009, Septiembre 15].



**Figura 28. Martillo Hidráulico Modelo Maverick 12000HSP.**

Fuente: <http://www.directindustry.es/prod/maverick-hammers/martillo-picador-hidraulico-para-excavadora-60846-391850.html>; publicada por la empresa Direct Industry, [Consulta al: 2009, Septiembre 15].

#### **- Equipos Promove.**

Amplia gama de los martillos hidráulicos para los excavadores a partir de la 1 a 70 toneladas. La serie SH se caracteriza en los modelos clásicos distribuidos por más de veinte años y por lo tanto estupendo-probados. La serie SH es ideal para quién intenta un producto de la calidad con precio conveniente.

#### Principales Modelos.

- Martillos SH - serie estándar media. 590 kilogramos - 1390 kilogramos.
- Martillos SH - serie estándar ligera. 90 kilogramos - 390 kilogramos.
- Martillos XP - Serie media. 750 kilogramos - 1700 kilogramos.
- Martillos XP - Serie ligera. 70 kilogramos - 565 kilogramos.
- Martillos XP - Serie pesada. 2350 kilogramos - 4380 kilogramos.

Disponibles en: <http://www.directindustry.es/prod/pmv-promove-srl/martillo-picador-hidraulico-para-excavadora-56769-391267.html>; publicada por la empresa Direct Industry, [Consulta al: 2009, Septiembre 15].



**Figura 29. Martillos XP - Serie pesada. 2350 kilogramos - 4380 kilogramos.**

Fuente: <http://www.directindustry.es/prod/pmv-promove-srl/martillo-picador-hidraulico-para-excavadora-56769-391265.html>, [Consulta al: 2009, Septiembre 15].

### 3.3.3.7 Localización de Averías.

#### **El martillo no funciona.**

- Comprobar llaves de paso si las lleva.
- Comprobar enchufes rápidos.
- Comprobar que las mangueras de presión y retorno no estén instaladas al revés.
- Válvula de control del martillo en la maquina no se abre. Comprobar esta.
- Comprobar ajuste de la limitadora.
- Comprueben restricción en línea de retorno.
- Tirantes rotos.
- Si no se localizo la avería llevar el martillo al taller.

**Vibración excesiva.**

- Tornillos del sombrerete flojos.
- Acoplamiento rápido desgastado.
- Si no se localizo la avería llevar el martillo al taller.

**Desgaste excesivo en casquillo inferior.**

- El martillo no es el adecuado a la máquina.
- Uso incorrecto del martillo.
- Mantenimiento incorrecto.
- Engrasadores dañados.
- Retenes de polvo dañados.
- Comprobar el caudal de aceite de la máquina.
- Si no se localizo la avería llevar el martillo al taller.

**3.4 Ventajas y Desventaja de la Tuneladora.****3.4.1 Ventajas.**

La gran ventaja de las tuneladoras es que permiten construir largos túneles sin que su paso se note en la superficie, con lo que pueden horadar hasta 30 metros por debajo de edificaciones sin provocar la más mínima afección. Los rendimientos conseguidos con tuneladoras de cabeza giratoria son elevadísimos. Suele estar entre: 1.5 m/h a 2.5 m/h.



Las tuneladoras ofrecen las ventajas en términos de seguridad y tiempo. Además, es extremadamente precisa, lo que a su vez, reduce el costo de revestir el túnel.

El topo escudado mejora con relación al topo estándar, dado que la excavación y el sostenimiento del túnel tienen lugar dentro del escudo protector, eliminándose el riesgo continuo que se corre en las instalaciones libres de sostenimiento.

### **3.4.2 Desventajas.**

Son muy costosas a comparación a los otros métodos de excavación.

El uso de tuneladora está limitado en suelos o rocas blancas.

Cuando la roca contiene un porcentaje alto de minerales con respuesta elástica (como yeso o la mica) los cortadores pueden tener muchas dificultades para fracturar la roca.

Si se encuentran arcillas expansivas la tuneladora puede quedar atascada dentro de la perforación.

Las tuneladoras deben ser fabricadas o reacondicionadas para cada túnel; operación que supone de 12 a 16 meses, lo cual exige que el túnel deba tener una longitud mínima (unos 4 km) para que el método sea rentable.

Su uso está limitado en curvas cerradas.

### **3.5 Ventajas y Desventaja de la Rozadora.**

#### **3.5.1 Ventajas.**

Son máquinas de ataque puntual, lo que permite atacar rocas bastante duras.

No altera prácticamente las características iniciales de la roca.

Se adapta mejor a los contornos irregulares, produciéndose menos sobre excavación.

Se adapta mejor que otros sistemas a la ejecución por fases.

En rocas blandas la producción es mayor a causa de la doble cabeza, en el caso del tipo ripping.

Su instalación es mucho más fácil y económica.

Mayor flexibilidad para adaptarse a cualquier cambio de terreno.

El porcentaje de mano de obra especializada es menor.

La versatilidad de la máquina es grande, ya que se adapta a una amplia gama de tamaños y formas de excavación.

La excavación mecánica con rozadora de rocas no demasiado duras ni abrasivas, representa un método muy adecuado, ya que permite una excavación cuidadosa de las mismas.

### **3.5.2 Desventajas.**

El campo óptimo de utilización es para rocas de hasta 100 MPa., limite a partir del cual el comportamiento de las picas empieza a no ser óptimo e implicaría mayores costos por el cambio continuo de las picas.

A la hora de hacer un estudio minucioso hay que valorar también la incidencia que tiene el uso de la rozadora frente a la utilización de explosivos en el sentido de disminuir los costos, tanto de sostenimiento como de revestimiento.

### **3.6 Ventajas y Desventaja del Martillo Hidráulico.**

#### **3.6.1 Ventajas.**

Son de bajo costo.

Utiliza pocos operarios.

Tiene un buen rendimiento, movilidad y flexibilidad.

Tiene una importante utilidad cuando se trata de excavar rocas blandas o fisuradas en las fases de destroza, donde compite ventajosamente con los otros métodos más potentes.

#### **3.6.2 Desventajas.**

Tiene menor avance en comparación que los otros métodos de excavación, así sea la máquina de ataque puntual.

Menor seguridad.

Solo se pueden usar en túneles muy pequeños.

No se debe trabajar hacia los lados de las cadenas de la máquina.

Si la temperatura es inferior a 20°C bajo cero se debe calentar el martillo y la pica antes de trabajar.

Al trabajar mucho tiempo en un solo punto se produce una bolsa de polvo que provoca amortiguación del impacto, calor y desgaste prematuro de la pica y el martillo.

## **CAPITULO IV**

### **COMENTARIOS FINALES**

#### **4.1 Comentarios finales.**

- La capacidad de seleccionar el método más apropiado presenta grandes dificultades tanto al cliente como al ingeniero pero resulta un aspecto crítico del que dependerá el éxito o fracaso del proyecto. Dicha elección implica elegir entre los métodos convencionales o los mecanizados.

- El éxito en la construcción de un túnel se deberá a procedimientos de trabajo que permitan la obtención de unos rendimientos adecuados, manteniendo la estabilidad general del entorno afectado.

- Son las características del terreno las que determinan el tipo de tecnología que debemos aplicar o las modificaciones que debemos solicitar al fabricante del equipo a utilizar. Por ejemplo si se selecciona una tuneladora, se puede dar el caso de que el terreno que tenemos que atravesar sea roca en la que se detecte presencia de fallas o terreno fracturado, con el consiguiente riesgo de atrapamiento de la tuneladora, se puede pedir al fabricante un incremento de la fuerza de empuje en la rueda de corte, y que la T.B.M. (Tunnel Boring Machine) venga provista de equipos de perforación en cabeza.

- En el caso de tuneladoras, entre más retirados estén los cortadores del centro de la máquina, mayor es el desgaste, ya que su recorrido es mayor. El desgaste de los cortadores obliga a su sustitución con una incidencia importante en el corte de la perforación y en el rendimiento. En las máquinas actuales los cambios se hacen desde el interior.

- La utilización de máquina rozadora es muy importante ya que se extiende a la construcción de túneles en terrenos principalmente poco abrasivos y de resistencias inferiores a 100 MPa, en los que la longitud de los mismos hace prohibitivo el empleo de máquinas TBM de excavación a plena sección.

- El martillo hidráulico tiene una importante utilidad cuando se trata de excavar rocas blandas o fisuradas, donde compite ventajosamente con los otros métodos más potentes y su uso es de bajo costo, pocos operarios, buen rendimiento, movilidad y flexibilidad.

- La mecanización y automatización de la excavación (transporte de escombros mecanizado, operación de corte, etc.) han reducido considerablemente el esfuerzo físico de los operarios.

## **GLOSARIO.**

**Bentonita:** es una arcilla utilizada en cerámica de grano muy fino (coloidal) del tipo de la montmorilinita que contiene bases y hierro.

**Bulón:** tornillos de tamaño relativamente grande, con rosca solo en la parte extrema de su cuerpo, utilizados en obras de ingeniería, maquinaria pesada, vías férreas, etc.

**Bulonadora:** maquina o implemento mecánico que permite la colocación del bulón en la construcción de un túnel.

**Cercha:** Los elementos de una cercha se unen sólo en los extremos por medio de pasadores sin fricción para formar armazón rígida; por lo tanto ningún elemento continúa más allá de un nodo.

**Cangilón:** Un cangilón es un recipiente encargado del transporte de material y fabricados en acero inoxidable, al carbono o plásticos como nylon, polietileno o uretano. Son utilizados, por medio de cintas o cadenas dentro de los elevadores de cangilones o norias

**Discontinuidad Geológica:** término general para cualquier discontinuidad mecánica en un macizo rocoso que tiene una resistencia a la tracción nula o muy baja. Es el término colectivo para la mayoría de las diaclasas, planos de estratificación débiles, planos de esquistosidad débiles, zonas débiles y fallas.



Dovela: suelen tener forma de sector circular y son partes de varios elementos que forman un anillo prefabricado y se utiliza en la construcción de túneles.

Estrías de foliación: una de los indicadores más confiables de detectar una falla tectónica en terreno son las estrías, que se forman a causa del movimiento relativo en las rocas. Líneas finas arriba de un plano de falla. Estas líneas indican además la orientación del desplazamiento y posiblemente el sentido.

Funicular: se denomina funicular a un medio de transporte usado en grandes pendientes que cuenta con dos cabinas enlazadas por un cable sobre una vía de ferrocarril, a modo de ascensor, de tal forma que mientras uno sube el otro baja, lo que permite aprovechar la energía potencial del que queda en la parte superior para subir el inferior a la vez que se frena el que está bajando.

Gálibo: designa a las dimensiones máximas, es decir, el área que tiene el túnel. También se utiliza para hacer referencia a la zona geométrica que debe estar libre de obstáculos alrededor de un sitio.

Hastial: cara lateral en una excavación.

Identación o "kerf cutting": proceso de perforación de roca que resulta del uso de discos de corte.

Perforación Diamantina: se puede señalar que la perforación diamantina es perforación rotativa. Además de la rotación, es necesario ejercer presión (presión de empuje) para lograr la erosión del material, y lograr nuestro objetivo de perforarlo. Se debe añadir que la perforación diamantina no

consiste simplemente en hacer el hoyo si no en recuperar las rocas ó formaciones al máximo posible. Esto se logra gracias a que las brocas tienen una forma cilíndrica con un área en el interior que no es perforada y la cual es recuperada a través de los tubos interiores especialmente diseñados para este propósito, junto a las demás herramientas que soportan el sistema.

Solera: superficie del fondo en canales o acequias. Se refiere a la parte inferior del túnel, el piso que por lo general se construye en concreto.

Vástago: barra o varilla metálica que sirve para unir o sostener otras piezas o transmitir un movimiento a un mecanismo.

## BIBLIOGRAFÍA.

Dimitri P. Krynine y Judd R. William, año de publicación 1980, **Principios de Geología y Geotecnia para Ingenieros**, New York, Estados Unidos, Ediciones Omega, S.A.

Cornejo A. Laureano, Copyright © 1988, **Excavación Mecánica**, Madrid, España, Editorial Rueda, S.L.

Tapia Ana, año de publicación 1999, **Topografía Subterránea** Barcelona, España, Editorial Alfaomega, Ediciones UPC.

Preparado por CASTEM E.I.R.L., **Sostenimiento de Terrenos**, documento técnico publicado por la empresa: Castem Ground Control. Disponible en: <http://www.castem.com.pe/geomec.pdf>; [Consulta al: 2009, Agosto 01].

Preparado por Ingesur, **Clasificación geomécanica de las rocas**, documento técnico publicado por la empresa: Ingesur ingeniería, geotecnia y servicios, S.L. Disponible en: <http://www.ingesur.com/descargas/geomecanicas.pdf>; [Consulta al: 2009, Agosto 01].

M. Romana Ruiz, **Recomendaciones de sostenimiento para túneles**, artículo publicado en la revista de obras públicas julio-octubre 2000 de circulación española. Disponible en: <http://www.katodos.com/doctos/6be2296575f46bf7b6d8a87d536eefd5.pdf>; [Consulta al: 2009, Agosto 01].

Cardona Marc, página personal, **Microtunnel**, Disponible en: <http://www.microtunnel.com> [Consulta al: 2009, Agosto 01].

Empresa Robbins, página comercial. Disponible en: <http://www.robbinstbm.com> ; [Consulta al: 2009, Septiembre 15].

Artículo Publicado por la casa de estudios UNSW, P. Hagan, 2005; disponible en: [http://www.mining.unsw.edu.au/courses/courses\\_ugrad/ug\\_excur/studexcursion\\_yr2\\_0508.htm](http://www.mining.unsw.edu.au/courses/courses_ugrad/ug_excur/studexcursion_yr2_0508.htm); [Consulta al: 2009, Septiembre 15].

Empresa Lovat, página comercial. Disponible en: <http://www.machinedesign.com>; [Consulta al: 2009, Septiembre 15].

Empresa Direct Industry, pagina comercial. Disponible en:  
[www.directindustry.it](http://www.directindustry.it); [Consulta al: 2009, Septiembre 15].

Empresa Bouygues, Pagina comercial. Disponible en:  
<http://enr.construction.com> ; [Consulta al: 2009, Septiembre 15].

Rojas S., **Curso de Postgrado, clase 3 métodos de excavación 2**, 2008;  
Disponible en:  
<http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/silviorojas/tuneles/index.php>; visita  
al: [Consulta al: 2009, Septiembre 15].

Empresa PCE GROUP, pagina comercial. Disponible en: <http://www.pce-group-europe.com>; visita al: 15-09-2009.

SlideShare Inc. All Rights Reserved, paginas de descargas. Disponible en:  
<http://www.slideshare.net/adolfogalarza/conceptos-del-martillo-hidraulico-presentation>, [Consulta al: 2009, Septiembre 15].

Fortune City, **Martillos**, pagina comercial. Disponible en:  
<http://www.slideshare.net/adolfogalarza/conceptos-del-martillo-hidraulico-presentation.>; [Consulta al: 2009, Septiembre 15].

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

<b>TÍTULO</b>	<b>"MÉTODOS DE EXCAVACIÓN MECÁNICA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES VIALES"</b>
<b>SUBTÍTULO</b>	

**AUTOR (ES):**

<b>APELLIDOS Y NOMBRES</b>	<b>CÓDIGO CULAC / E MAIL</b>
<b>Fernandez O., Suleman</b>	<b>CVLAC: 16.852.488 E MAIL: sulemanfer@gmail.com</b>
<b>Gonzalez M., Jose M.</b>	<b>CVLAC: 16.055.788 E MAIL: justerjose@hotmail.com</b>
	<b>CVLAC: E MAIL:</b>
	<b>CVLAC: E MAIL:</b>

**PALÁBRAS O FRASES CLAVES:**

MÉTODOS DE EXCAVACIÓN MECÁNICA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES VIALES

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

ÁREA	SUBÁREA
Ingeniería y ciencias aplicadas	Ingeniería Civil

**RESUMEN (ABSTRACT):**

La selección del método constructivo a usar en la construcción de un túnel está ligado a muchos factores, entre los más importantes están: las características geomécanicas del terreno, los parámetros técnicos del tipo de túnel que se desea construir, la longitud del túnel, el aspecto económico, el impacto ambiental. Son dos los métodos de construcción de túneles, el de perforación y voladura y el de excavación mecánica. El primero es mediante el uso de explosivo y su uso está limitado básicamente a macizos rocosos de gran dureza y abrasividad; en cuanto que la excavación mecánica refiere al uso de maquinaria de diversas características que permiten dar soluciones a las diferentes propiedades que pueda presentar el terreno a atravesar. Se clasifican en tres grupos de maquinas, según su principio de excavación: la tuneladora que realiza un corte a sección completa; la rozadora que realiza un ataque puntual mediante la aplicación del peso de la maquina y el rozado de picas; y el martillo hidráulico que también es una maquina de ataque puntual pero aplica la fuerza para realizar un impacto de la pica y quebrantar la roca.

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:****CONTRIBUIDORES:**

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
Hidalgo. Esteban	ROL	CA	AS	TU X	JU
	CVLAC:	12.575.113			
	E_MAIL	ehidalgo21@hotmail.com			
	E_MAIL				
Montejo A, Enrique.	ROL	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:	8.279.503			
	E_MAIL	emontejo@cantv.net			
	E_MAIL				
Torres M. Luisa C.	ROL	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:	8.217.436			
	E_MAIL	torresl62@gmail.com			
	E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				

**FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:**

2009	diciembre	08
AÑO	MES	DÍA

**LENGUAJE. SPA**

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:****ARCHIVO (S):**

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
Métodos de Excavación Mecánica de tuneles.doc	Application/msword

**CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS:** A B C D E F G H I J K L  
M N O P Q R S T U V W X Y Z . a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z . 0 1 2  
3 4 5 6 7 8 9 .

**ALCANCE**

**ESPACIAL:** \_\_\_\_\_ (OPCIONAL)

**TEMPORAL:** \_\_\_\_\_ (OPCIONAL)

**TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:**

Ingeniero Civil

**NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:**

Pregrado

**ÁREA DE ESTUDIO:**

Departamento de Ingeniería Civil

**INSTITUCIÓN:**

Universidad De Oriente. Núcleo Anzoátegui



**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:****DERECHOS**

De acuerdo al artículo 41 del reglamento de Trabajos de Grado:

“Los Trabajos de Grado son de exclusiva propiedad de la Universidad y sólo podrán ser utilizados para otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participará al Consejo Universitario”.

**AUTOR**

Fernández O., Suleman

**AUTOR**

González M., José M.

**TUTOR**

Hidalgo, Esteban

**JURADO**

Montejo A, Enrique

**JURADO**

Torres M. Luisa C.

**POR LA SUBCOMISION DE TESIS**

Saab, Yasser