

**CARACTERIZACIÓN DE LOS MÉTODOS CONSTRUCTIVOS DE TÚNELES U
OBRAS SUBTERRÁNEAS**

CLEYSNEL MOSQUERA CAICEDO



**ESPECIALISTA EN VÍAS Y TRANSPORTE
POSTGRADO EN VÍAS Y TRANSPORTE
UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN
MEDELLÍN
2013**

**CARACTERIZACIÓN DE LOS MÉTODOS CONSTRUCTIVOS DE TÚNELES U
OBRAS SUBTERRÁNEAS**

CLEYSNEL MOSQUERA CAICEDO

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título especialista
en vías y transporte**

Asesor Temático

ELIAS CORREA VILLA

Ingeniero Civil Especialista en Geotecnia.

Asesor Metodológico

CLARA INÉS BARRETO GARCÉS

Ingeniera Mecánica Magister en ingeniería



**UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN
ESPECIALIZACIÓN EN VÍAS Y TRANSPORTE
MEDELLÍN
2013**

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	16
1. PRESENTACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO	17
1.1 JUSTIFICACIÓN	17
1.2 OBJETIVOS	18
1.2.1 Objetivo general	18
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
1.4 MARCO REFERENCIAL	19
1.4.1 Origen e historia de los túneles u obras subterráneas	19
1.4.1.2 Primeros métodos o técnicas de excavación	21
1.4.1.3. Los túneles, el mundo y los avances en los métodos de construcción	22
1.4.1.4. Los túneles en Colombia	28
2. FUNCIONES, NECESIDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LOS TÚNELES	30
2.1 PRINCIPALES FUNCIONES DE LOS TÚNELES	30
2.1.1 Proyectos de obras o túneles para el transporte	31
2.1.2 Proyectos de obras o túneles de almacenamiento	31
2.1.3 Túneles para instalaciones especiales	31
2.1.4 Túneles con fines científicos	31
2.1.5 Túneles para seguridad y protección	32
2.2 PARAMETROS O DIRECTRICES RELACIONADAS CON LA FUNCIÓN DE CADA TÚNEL	32
2.2.1 El tipo de terreno	32
2.2.2 Dimensiones del túnel	32

2.2.3 Las formas estructurales	33
2.2.4 El sistema de construcción	33
2.2.5 El equipamiento del túnel ya terminado	33
2.3 SOBRE LA UBICACIÓN DE LOS TÚNELES	33
2.3.1 Túneles de montaña	34
2.3.2 Túneles subacuáticos	34
2.3.3 Túneles urbanos	34
2.4 CARACTERIZACION DE LOS DIVERSOS TIPOS DE TÚNELES	35
2.4.1 Para túneles de ferrocarril	35
2.4.2 Para túneles de carretera	38
2.4.3 Para el transporte urbano (Línea metro).	41
2.4.4 Para conducción de agua	43
2.4.5 Para centrales hidroeléctricas subterráneas.	44
2.4.6 Para sistemas de alcantarillados	46
2.4.7 Para túneles de servicios	47
2.4.8 Para túneles de almacenamiento	48
2.5 CLASIFICACIÓN DE TÚNELES SEGÚN MANUAL DE CARRETERAS	49
2.5.1 Según su ubicación	49
2.5.2 Según Características Constructivas	49
2.5.3 Según clima y altitud.	50
2.5.4 Según equipamiento y el flujo vehicular y longitud	51
3. PROCESOS Y MÉTODOS DE CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES Y OBRAS SUBTERRANEAS	54
3.1 ESTUDIOS PRELIMINARES: DESCRIPCIÓN DE LAS CONDICIONES DEL SUELO	54
3.1.1 Descripción de las condiciones geológicas	54
3.1.2 Descripción de las condiciones hidrogeológicas	55
3.1.3 Descripción de las condiciones geotécnicas	56
3.1.4 Descripción de ocurrencia de gases	56

3.2	MÉTODOS UTILIZADOS PARA CLASIFICAR MACIZOS ROCOSOS	56
3.2.1	RQD (Rock Quality Designation)	56
3.2.3	Sistema RMR (Rock Mass Rating)	57
3.3	MÉTODOS CONSTRUCTIVOS UTILIZADOS EN LA EXCAVACIÓN	58
3.3.1	Método convencional	58
3.3.2	Método mecanizado o TBM	60
3.3.3	Método de ataque a plena sección o método inglés	62
3.3.4	Método de la galería en clave o método belga.	64
3.3.5	Método de las dos galerías o método austriaco.	64
3.3.6	Método de las tres galerías o método alemán.	65
3.4	OPERACIONES BÁSICAS EN LA CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES	66
3.4.1	El arranque	66
3.4.2	La carga	76
3.4.3	El transporte.	78
3.4.4	Revestimiento	80
3.5	EL NUEVO MÉTODO AUSTRIACO (NMA)	86
3.6	AUSCULTACIÓN	87
3.6.1	Finalidad	87
3.6.2	Tipos de medidas	87
4	ASPECTOS TECNICOS DE CONSTRUCCION DE TÚNELES YA DESARROLLADOS A NIVEL NACIONAL E INTERNACIONAL	91
4.1	ANÁLISIS Y COMPARACIONES DE LAS GRÁFICAS	95
4.2	COMPARACION DE LOS METODOS	99
4.3	COMPARACIÓN DE RENDIMIENTOS DE ACUERDO AL MÉTODO CONSTRUCTIVO	101
4.4	PARALELO ENTRE LOS METODOS CONSTRUCTIVOS	102
4.5	ANALISIS DE RENDIMIENTOS DE ACUERDO AL PROPOSITO DE LA EXCAVACIÓN	102
4.6	CRITERIOS PARA SELECCIÓN DE UN MÉTODO CONSTRUCTIVO	104
4.6.1	Metodología de selección	108
4.6.1.1	Método convencional ventajas y desventajas	109

4.6.2.1 Método mecanizado “TBM” ventajas y desventajas	110
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	116
GLOSARIO	118
BIBLIOGRAFIA	119
CIBERGRAFIA	120

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Análisis tipo de túnel vs longitud.	95
Gráfica 2. Análisis tipo de túnel vs diámetro	95
Gráfica 3. Análisis vs Avance de construcción	96
Gráfica 4. Análisis Método utilizado por metros de avance y por tipo de túnel	97
Gráfica 5. Análisis diámetro por metro de avance.	98
Gráfica 6. Análisis longitud y metro mes de avance	99

LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1. Primeros túneles, cuevas - cavernas	20
Imagen 2. Mina Bomvu, en Swazilandia	21
Imagen 3. Túnel de Brunel bajo el Támesis	23
Imagen 4. Túnel del canal de la Mancha	24
Imagen 5. Túnel del río Hudson.	28
Imagen 6. Túnel helicoidal.	36
Imagen 7. Ataques en pendiente	36
Imagen 8. Túnel de cumbre	37
Imagen 9. Secciones transversales de túneles para vías férreas	38
Imagen 10. Sección transversal de un túnel de carretera	39
Imagen 11. Túnel de carretera de Saint-Cloud	39
Imagen 12. Ventilación del Holland-Tunnel y del Mont Blanc	40
Imagen 13. Fases de construcción de un túnel por pantallas	42
Imagen 14. Distintas secciones para dos vías	42
Imagen 15. Distribución del agua potable en la ciudad	44
Imagen 16. Túneles hidráulicos en una central hidroeléctrica	45
Imagen 17. Características del salto de Moralets	46
Imagen 18. Secciones tipo	47
Imagen 19. Galería de servicios	48
Imagen 20. Clasificación de los túneles en función del Tránsito Medio Diario Anual (TMDA)	51
Imagen 21. Método Inglés.	62
Imagen 22. El Método Belga.	63
Imagen 23. Variantes para el método Belga	64
Imagen 24. Método Austriaco	65
Imagen 25. El Método Alemán	65
Imagen 26. Perforadora Ingersoll.	67

Imagen 27. Esquema del plan de voladura	68
Imagen 28. Detalle del plan de voladura	68
Imagen 29. Tipos de barrenado.	69
Imagen 30. Miniexcavadora.	70
Imagen 31. Bulldozer con ripper	70
Imagen 32. Esquema de un topo	71
Imagen 33. Tipos de cortadores	71
Imagen 34. Máquina topo	72
Imagen 35. TBM usada en el Canal de la Mancha	73
Imagen 36. Escudos con rozadora y con excavadora	73
Imagen 37. Escudo con las piezas de un anillo de revestimiento	74
Imagen 38. Esquema de un escudo con fresadora	75
Imagen 39. Esquema pala - cinta	77
Imagen 40. Racleta o trailla.	77
Imagen 41. Palas Eimco	78
Imagen 42. Soluciones para el cambio de vagones	79
Imagen 43. Dumper autocargante	80
Imagen 44. Dumper pala excavadora (al fondo)	80
Imagen 45. Cerchas con tablonos en el sostenimiento provisional de una galería de avance	81
Imagen 46. Sostenimiento mixto (cerchas, mallas y hormigón proyectado)	82
Imagen 47. Método Bernold antes del hormigonado definitivo.	83
Imagen 48. Preserrado en rocas blandas.	84
Imagen 49. Preserrado en rocas duras (explosivo).	84
Imagen 50. Máquina para colocar dovelas	85
Imagen 51. Medidas de convergencia	88
Imagen 52. Extensómetro	88
Imagen 53. Estudio de la convergencia.	89
Imagen 54. Ejemplos de utilización de extensómetros en un taladro	90

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Muestra de aspectos técnicos de túneles construidos nacionales e internacionales	93
Tabla 2. Codificación de los túneles	94
Tabla 3. Características de los métodos constructivos	101
Tabla 4. Valor estimado para R.Q.D	104
Tabla 5. Puntaje según resistencia a la compresión simple	105
Tabla 6. Separación entre juntas	105
Tabla 7. Estado de las discontinuidades	106
Tabla 8. Flujo de agua en las juntas.	106
Tabla 9. Corrección por la orientación de las discontinuidades	107
Tabla 10. Clasificación Geomecánica por Bieniawski	107
Tabla 11. Clasificación Geomecánica por Bieniawski (1979) parámetros de clasificación	108
Tabla 12. Escala de valores y ponderación	109
Tabla 13. Parámetros técnicos y operacionales	112
Tabla 14. Parámetro económico	113
Tabla 15. Misceláneos.	114

INTRODUCCIÓN

Uno de los primeros medios de comunicación artificial adaptado por el hombre, obedece a la construcción de túneles entre dos o más puntos separados por suelo o roca, mediante los cuales podrían desplazarse y comunicarse rápidamente de un lugar a otro; su diversidad de usos y servicios establece una gran importancia a medida que la sociedad avanza y son inevitables en las grandes ciudades para establecer líneas de metro como en la comunicación de poblaciones separadas por una orografía pronunciada o incluso por mar.

Esto permite, entonces, plantear varias propuestas de diferentes sistemas o métodos de construcción para el desarrollo de los mismos, que, de acuerdo a su finalidad pueden ser de uso civil y minero; los del orden civil, son aquellos construidos para el uso de carreteras, metro, centrales hidroeléctricas, ferroviarios y los utilizados para operaciones de minería, tales como transporte, servicio y producción. Estos se difieren básicamente por sus métodos de excavación y posterior mantenimiento y/o fortalecimiento.

En primer lugar, para utilizar cualquier método de excavación de túneles, se debe tener en cuenta que estos dependen fundamentalmente del tipo de terreno a atravesar; de tal manera que hay que analizar por separado la elección del método de excavación de túneles, tanto en roca, como en suelos o terrenos blandos.

Para la ingeniería, al momento de llevar a cabo un proyecto y construcción de un túnel, debe considerarse diferentes aspectos, todos ellos de gran importancia, ya que si se tiene en cuenta cada uno por sí sólo, puede llevar a fracasar al proyecto. De tal manera que este documento puede ser de vital importancia para el lector en algún momento de su campo práctico.

RESUMEN

El hombre desde su origen, y en busca de solucionar dificultades en el transporte conservación y uso de diversidad de recursos y bienes, se ha visto en la necesidad de acortar distancias como de buscar una mayor efectividad en sus labores; lo que ha llevado a la construcción de ciertos canales o vías de desplazamiento (túneles) u obras subterráneas.

Así, el objetivo inicial de este trabajo es el de construir un informe sobre la comparación técnica de los métodos constructivos de túneles tanto convencionales como TBM, una vez realizado el avance dentro del proceso de investigación, puede evidenciarse que se pueden incorporar otros tipos de análisis, los cuales dan lugar a un enfoque diferente sobre la propuesta inicialmente planteada. Se construye entonces una caracterización y/o comparación de los métodos en general que se utilizan para desarrollar este tipo de proyectos, de igual manera, en este documento se enfoca en recopilar e investigar fuentes de información (referencias), sobre temas de la construcción de túneles y obras subterráneas, estableciendo la manera de como el profesional de la ingeniería civil se enfrenta a las normas, métodos y procedimientos para el desarrollo de los mismos; es de anotar que, cualquier proyecto difiere uno de otro al estar dependiendo de factores tales como el terreno, la ubicación geotécnica, entre otros.

Además, en este informe se dan a conocer conceptos e ilustraciones de algunos de los métodos de mayor relevancia en el desarrollo de estas obras o proyectos, realizando una caracterización y descripción detallada de la manera como se aplican en función de las obras que a lo largo de la historia, hasta la época actual, se han llevado a cabo.

Del mismo modo, puede encontrarse también la manera cómo ha evolucionado la capacidad del hombre en la innovación y uso de equipos y herramientas para ser más eficientes en el logro de sus objetivos, esto es, ver que se pasa del uso de herramientas manuales al uso de equipos de gran desarrollo tecnológico en procesos de excavación y de seguridad.

Finalmente, este trabajo resalta la importancia de cada uno de estos métodos de construcción, en la medida que sugieren un procedimiento particular donde, debido a la necesidad, se aplican cualquiera de estos métodos de construcción históricos.

ABSTRACT

The man from the beginning and looking to solve difficulties in transportation, conservation and use of diversity of resources and assets, the man has had been of necessity to bridge the gap and find a more effective in their work, which has led to the construction of certain channels or scroll (tunnels) or underground.

Then , the initial goal in this work is to build a report on the technical comparison of the construction methods of both convencionales as TBM tunnels, once the progress in the research process in the research process we realize that you can add other types of analysis, which give rise a different approach on the proposal initially filed. It constructs a Characterization that is then constructed and / or comparison of the methods generally used to develop such projects, just as, in this paper we aim to collect and investigate both bibliographic information sources like Internet, on issues construction of tunnels and underground, establishing how the civil engineering professional finds the standards, methods and procedures for the development thereof, it should be noted that any project differs from one another to be dependent on factors such as the soil, location, geotechnical, among others.

To other the report disclosed concepts and illustrations of some of the methods most used or important in the development of these works or projects, performing a detailed characterization and description of the way it applied based on the works from the history until our days are done.

We find also the way it has evolved in man's capacity for innovation and use of equipment and tools to be more effective in achieving its objectives, that is, seeing that is past the use of hand tools to using large development teams excavation technological processes and security.

Finally, it should be noted that each of these construction methods and it suggests a particular procedure and due to the need to apply any of these methods of historical construction.

1. PRESENTACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO

Este es un proyecto dirigido a investigar todo lo relacionado con la construcción de túneles, mostrando un marco referencial que identifique los más variados procesos y métodos de construcción de los mismos; por ello, la importancia de este tema lleva a establecer una investigación sobre el mismo, donde se incorporen las principales características de métodos y técnicas utilizadas en la actualidad en dichos proyectos.

1.1 JUSTIFICACIÓN

Los especialistas en el tema de la construcción de túneles crean diferentes conceptos y metodologías en referencia a dicho tema. Con la propuesta planteada se pretende dimensionar como de unificar esta variedad de conceptos, que permita al profesional de la ingeniería tomar decisiones oportunas y rentables.

De igual manera, se pretende dar a conocer las diferentes opiniones, estudios y conocimientos generados a lo largo de la historia en el campo de la ingeniería, mostrando los avances y logros obtenidos en función de estos proyectos.

En la evolución de este trabajo escrito se persigue entregar una información sólida con las técnicas de análisis, diseños y métodos utilizados en la construcción de túneles y obras subterráneas en Colombia y a nivel mundial.

De la misma forma, la información recolectada servirá entonces para establecer las principales características y prioridades a la hora de elegir o combinar metodologías en los sistemas y/o proyectos de excavación de túneles. La comparación de estas características o variables permitirán establecer tendencias en la construcción de túneles con diferentes métodos constructivos.

Lo anterior sirve como base en cualquier construcción de este tipo, dando una mirada rápida a las tendencias, permitiendo a los interesados mirar cómo podría ser el progreso de un túnel dependiendo de su geología, condición de agua y método de excavación.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general.

Establecer las características fundamentales de los métodos y/o sistemas de construcción en proyectos subterráneos o de túneles. Esto con el fin de unificar los conceptos bajo los cuales se adelantan este tipo de obras.

1.2.2 Objetivos específicos.

- Recopilar información necesaria sobre la historia y origen de los túneles u obras subterráneas, elaborando una reseña histórica y contemporánea de los mismos.
- Conocer el funcionamiento y solicitaciones a las cuales lleva éste.
- Elaborar un canal de información sobre los procesos y métodos de excavación y construcción de túneles.
- Establecer las características para cada uno de los sistemas constructivos, permitiendo así una complementación y/o unificación de conceptos.
- Determinar las diferentes herramientas utilizadas para la excavación de túneles y sus medidas de seguridad tanto industrial, operativa como financiera.
- Realizar una comparación de las principales características de los diferentes métodos de construcción de túneles.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La necesidad de recopilar y disponer conceptos y características especializadas sobre métodos de excavación, hace que el profesional de la ingeniería refuerce permanentemente sus conocimientos; considerando que una gran diversidad de terrenos y un alto crecimiento y desarrollo de las grandes urbes, exigen cada vez

más un análisis preciso y certero al momento de decidir por cual método o por cual combinación de estos podrían utilizarse en obras de ingeniería subterránea.

En esta medida, las necesidades que surgen para la elaboración de los proyectos conllevan a realizar diversos estudios de gran profundización y especialización, ya que, para el desarrollo de una obra subterránea, se requieren de conocimientos matemáticos y herramientas especializadas en esta sociedad moderna.

Lo anterior, permite entonces hacer un compendio de razones y elementos claves que caracterizan estos sistemas de tal manera que el desarrollo de aquellos proyectos sea realizado con mayor productividad y eficacia a la hora de ser puestos en marcha.

Para esta propuesta se investigan, recopilan y se suman diversos conceptos y herramientas bibliográficas como fuentes de conocimiento con un enfoque general y particular para los profesionales de la ingeniería civil, siendo ésta, a su vez, una fuente de consulta de mayor relevancia frente al tema propuesto.

1.4 MARCO REFERENCIAL

1.4.1 Origen e historia de los túneles u obras subterráneas.

Con el origen del hombre, de acuerdo con Ardila (2012, p.8) se puede considerar el tema o la historia de los túneles y obras subterráneas, teniendo en cuenta que estos fueron una de las alternativas de mayor relevancia en la historia de la humanidad en la medida que aquellos proyectos eran creados para satisfacer la necesidad de acortar distancias y aprovechar con mayor eficiencia el tiempo; las mencionadas obras arrancan entonces con la construcción de pozos, tumbas, cuevas, túneles, entre otros; posteriormente, estas actividades se convierten en un arte, donde el hombre empieza por mejorar sus técnicas de excavación. Ver Imagen 1.



Imagen 1. Primeros túneles, cuevas - cavernas

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004.

Se comienza entonces, por describir las principales actividades que dan origen a excavaciones, como son la minería y los túneles.

1.4.1.1 La minería y los túneles.

La primer actividad o proyecto surge con la minería, esta fue quizás una de las actividades de mayor fuerza, en la cual se enmarca el desarrollo de túneles desde el punto de vista de la ingeniería civil. En las diferentes eras de la historia de la evolución del hombre, especialmente en el periodo neolítico, la extracción de minerales fue una de las actividades de mayor preponderancia en busca del desarrollo. Fueron muchos y variados los minerales y materiales de extracción de la época, tales como: pedernal o sílex y la extracción de sal como actividad relacionada con la minería y la cual, a su vez, sería necesaria para desarrollar el carácter agrícola propio del periodo.

La mina de mayor antigüedad que se conoce en el mundo, está localizada en el cerro Bomvu, en Swazilandia en el sur de África y fue construida en el año 40.000 a.c., llamada Neandertal minaba hematites, piedra de sangre, elaborada a punta de piedras afiladas y a mano limpia (Ardila, 2012, p.9). Ver Imagen 2.



Imagen 2. Mina Bomvu, en Swazilandia

Fuente: Documento historia de los túneles y su Evolución

Con el desarrollo de estas actividades de construcción de minas y túneles surgen los primeros métodos o técnicas de construcción.

1.4.1.2 Primeros métodos o técnicas de excavación.

El primer método de excavación o perforación minera y posteriormente de obras subterráneas obedece a la técnica del fuego, el cual consiste en provocar un incendio en el frente de la excavación, para luego sofocarlo con agua fría o vinagre, produciendo un brusco gradiente térmico, el cual da lugar a la partición o resquebrajamiento de la piedra o roca; esta técnica provoca una atmósfera viciada, irrespirable, generando gases a menudo venenosos, convirtiendo el trabajo del minero en una trampa mortal a la que sólo unos pocos afortunados sobreviven. Este método fue utilizado durante mucho tiempo por civilizaciones tales como la griega y la romana (Ardila, 2012, p.9).

En esta medida, la perforación de túneles fue el primer ejercicio de ingeniería llevado a cabo por el ser humano. El hombre primitivo empezó por ampliar la cueva para brindar mayor seguridad incluso a su hogar. Por consiguiente, al ejecutar estas obras, se dio cuenta de que existían depósitos de agua y otros minerales que podía utilizar en su vida; de este modo, allí, inició un proceso de cambio entre el instinto de supervivencia y el arte de construir túneles.

1.4.1.3. Los túneles, el mundo y los avances en los métodos de construcción.

Este capítulo parte de los planteamientos y recorrido histórico dado por Ardila (2012, p. 10-14), quien sostiene que las primeras experiencias, conocidas y de mayor relevancia a nivel mundial, fueron dadas en Francia hacia el año 1826 con la construcción del primer túnel ferroviario llevado a cabo, denominado el túnel de Terrenoir en la línea de tracción equina entre Roanne y Andrezieux. Durante este mismo periodo, se iniciaría la construcción del primer túnel sobre una línea de tracción por vapor, el cual llevaría el nombre de Wapping Tunnel, éste, sería excavado bajo el subsuelo de Liverpool entre las estaciones de Liverpool Edge Hill y Park Lane; quizás el túnel más famoso en la historia de los ferrocarriles es aquel construido bajo las aguas del río Támesis (ver imagen 3) por Sir Marc Isambard Brunel y su hijo Isambard Kingdom entre 1825 y 1843. Este túnel subacuático, inicialmente funcionó para peatones y carros tirados por caballos, posteriormente, hacia el año 1865 funcionaría como túnel ferroviario utilizado por la compañía London Railway Company, hasta nuestros días, donde actualmente, luego de múltiples modificaciones y recesos, hace parte de la quinta línea del metro ligero de Londres.

Uno de los métodos tecnológicos de construcción de túneles de gran avance empleado en este proyecto, consistió en la instalación exitosa de módulos tipo escudo que lo protegían contra los deslizamientos de tierra, cuya tecnología fue inventada por Sir Marc Isambard Brunel y su colega Thomas Cochrane, conocida en los canales de la ingeniería como el Escudo de Brunel; sucesivamente, sería la predecesora de la metodología empleada hoy por hoy en la construcción de obras subterráneas por medio de máquinas tuneleadoras con escudo en sus distintas presentaciones.

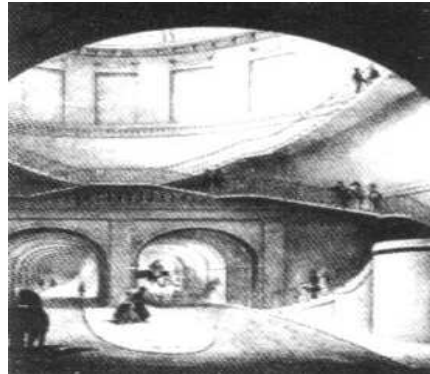


Imagen 3. Túnel de Brunel bajo el Támesis.

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004.

El proyecto férreo subterráneo más importante de todos los tiempos fue el Túnel de La Mancha, mejor conocido como The Chunnel, o The Eurotunnel, el cual, contemplando a su vez, dos túneles principales unidireccionales de 7.6 metros de diámetro y un tercero de servicio con 4.8 metros de diámetro, une a Francia (Calais) con Inglaterra (Dover) a partir de 1990 con sus 50.5 kilómetros. Ver Imagen 4.

Los orígenes de este proyecto se remontan a 1751, cuando Nicolás Desmaret propondría el primer túnel a través del canal de la Mancha con fines militares, incluyendo adicionalmente una isla artificial en la mitad del recorrido para que los caballos descansaran; sin embargo, dicha idea no sería materializada sino hasta 1802, cuando Albert Mathieu ofreciera a Napoleón Bonaparte un plano detallado para la construcción del túnel, plano que le brindaría la posibilidad de invadir a Gran Bretaña sin necesidad de usar su potencial naval. Posteriormente, varios intentos para la construcción de este proyecto serían puestos en marcha, destacándose entre éstos, aquel emprendido en la década de 1970, que tampoco pudo ser llevado a cabo debido a inconvenientes de tipo ambiental, y el emprendido en 1987, por la empresa anglo-francesa Eurotunnel, quien sería la encargada de financiar, construir y operar el proyecto con servicio de trenes que finalmente sería puesto en servicio en mayo de 1994.

En la Europa Central, es importante mencionar, entre otros, aquellos cuatro grandes túneles alpinos construidos durante el siglo XIX y principios del XX: El túnel de Mont Cenis (1857-1871), también conocido con el nombre de Fréjus Rail Tunnel, el cual con una longitud original de 12.233 metros une a Francia (Modane) con Italia (Bardonecchia), destacándose a su vez como el primer túnel en el cual se hizo uso práctico del aire comprimido (1861), para el funcionamiento de martillos perforadores; el túnel de St Gotthard (1872-1882), construido entre Airolo y Andermatt en Suiza, con una longitud total de 14.984 metros, remplazando el antiguo y tortuoso paso por los Alpes Lepontinos, no sin antes cobrar la vida de 177

trabajadores, e incluyendo dentro de sus obras anexas varios túneles cortos en espiral; otro de estos, es el túnel de Simplon (1899-1906) con 19.823 metros uniendo la población suiza de Brig con Iselle en la región de Piamonte en el norte de Italia, constituyendo a su vez el túnel ferroviario más largo del mundo construido bajo condiciones difíciles, tales como la presencia de rocas presionantes (squeezing rocks) y temperaturas extremas.



Imagen 4. Túnel del canal de la mancha.

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004

El proyecto de Simplon, incluyó un túnel principal y una galería piloto de menor diámetro paralela al túnel, la cual tenía como fin permitir la evacuación del material excavado, galería ésta que posteriormente (1912-1921), sería ampliado conformando a su vez, el segundo túnel principal con una longitud total de 19.823 metros y en sí, el desarrollo ferroviario más importante de su época a nivel mundial; finalmente, el túnel de Loetschberg (1906-1913), también en Suiza, une a Kandersteg con Goppenstein a lo largo de sus 14.605 metros, y su importancia radicó en la apertura de una ruta comercial entre Europa del norte y la del sur, a través de la adhesión de este túnel a la red ferroviaria que existe de Simplon.

Como legado de aquellos grandes túneles alpinos, entre los más importantes, se debe mencionar el túnel para vehículos de carretera de St Gotthard, el cual, con su 16.918 metros, fue inaugurado en septiembre de 1980, luego de 10 años de construcción, y aquellos túneles asociados al proyecto NEAT (acrónimo en alemán de Nueva Transversal de Los Alpes), proyecto éste que en una extensión de 57 km² incluye un sistema de 153.4 kilómetros de túneles, galerías y pozos, incluyendo entre sus obras más importantes el túnel férreo base de St Gotthard, el cual, con sus 57 kilómetros, es actualmente el túnel férreo más largo del mundo en construcción, esperando a su vez ser abierto al público en 2017, constituyéndose a su vez en el proyecto modelo en el mundo en cuanto a promoción del transporte público e integración regional de redes ferroviarias de alta velocidad.

Sin lugar a dudas, los túneles alpinos han sido y seguramente serán el ícono mundial de este tipo de obras; sin embargo, en la Europa Continental, también se encuentran notables ejemplos de túneles férreos construidos en los albores de esta industria, entre los más importantes se destacan: El túnel de Mont d'or, construido principalmente en Francia, conectándola con Suiza a través de los Montes Jurasicos en una longitud de 6.097 metros entre 1910 y 1915; el túnel bidireccional de Kaiser Wilhelm en Alemania, túnel éste con 4.205 metros inaugurado en 1877, el cual, debido al incremento del tráfico en los años sucesivos, sería objeto de numerosas innovaciones y adaptaciones a su sistema de ventilación; los túneles de Alberg en Austria, construidos entre 1880 y 1884 con una longitud total de 10.589 metros y el túnel de Tauern, uniendo a partir de 1909 a Austria (Innsbruck) con Italia (Bolzano) a través de sus 8.551 metros a lo largo del trazado, bajo el paso de Brenner, ruta empleada tanto por las Legiones Romanas para invadir los territorios del norte como por los soldados Teutónicos para invadir el Imperio. Posteriormente, durante la Segunda Guerra Mundial, esta ruta sería empleada por los ejércitos de Hitler y Mussolini para el transporte de tropas y suministros.

Europa Mediterránea sería, quizás, la región del continente en la cual se construirían la mayor cantidad de túneles férreos en el mundo, principalmente en Italia, país en donde se han construido cerca de 2.000 túneles férreos con una longitud acumulada superior a 1.000 kilómetros desde 1864, cuando se construyera el gran túnel de Biassa I, en una longitud aproximada de 3.600 metros entre La Spezia y Génova, empleando para ello el denominado método italiano; sin embargo, es importante mencionar que con anterioridad ya se habían construido varios túneles de menor longitud. Entre los túneles más importantes y representativos se encuentra el túnel a través de los Montes Apeninos con 18.507 metros inaugurado en 1934 sobre la línea Bologna – Firenze.

Por su parte, España, al ser un país montañoso, es quizás el país que tiene el mayor número de túneles férreos en Europa (cerca de 1.300) si se toma en cuenta la longitud total de sus líneas ferroviarias, queriendo decir esto que cerca del 5% de sus líneas férreas están a lo largo de túneles. Los túneles férreos construidos en siglo pasado más largos de la Península Ibérica son el de Padornelo al norte de España con una longitud de 5.949 metros sobre la línea ferrea denominada Sierra de la Culebra, inaugurado en 1958 y el de Argentera, el cual con sus 4.044 metros de longitud se encuentra localizado sobre la línea Madrid – Barcelona.

Así mismo, en Europa Septentrional o Europa del Norte es importante mencionar a Noruega, el cual es uno de los países con mayor longitud de túneles en relación con el total de la longitud de sus líneas férreas, cerca de 800 túneles en 5.000 kilómetros, lo cual quiere decir que en promedio existe un túnel cada seis (6) kilómetros. Quizás los túneles férreos noruegos más relevantes construidos en el siglo pasado e inaugurados en 1944, son el túnel de Kvineshei, y el túnel de Haegebostad, sobre la línea Oslo – Stavanger, túneles estos que serían los predecesores de grandes túneles férreos y carreteros, como en el caso del túnel de

Laerdal, inaugurado en 2002, el cual con sus 24.510 metros es actualmente el túnel carretero más largo del mundo.

Como complemento a lo anterior, es necesario resaltar aquellos túneles construidos sobre la línea férrea Baikal-Amur (BAM), la cual, bajo condiciones extremas, une al lago Baikal con el río Amur. Esta línea fue construida en Rusia con una extensión de 4.234 kilómetros como una línea alterna al ferrocarril transiberiano. En la BAM existen 21 túneles con una longitud total de 47 kilómetros, destacándose entre estos el túnel de Amur, inaugurado en 1942, y el cual con sus 6.500 metros de longitud constituyó el túnel férreo más largo de Rusia construido durante el siglo pasado, el cual se convertiría en el predecesor del túnel Severomuyskiy, el cual, con 15.300 metros, completó su excavación en diciembre de 2001, siendo este el túnel férreo más largo de Europa Septentrional.

El Imperio del Sol, nombre con el cual suele conocerse a las islas de la nación Japonesa, ha dependido para su desarrollo, en la historia reciente, esencialmente de los ferrocarriles; sin embargo, este desarrollo no ha sido fácil, principalmente debido a su naturaleza geológica, ello ha hecho que esta nación construya cerca de 3.000 túneles férreos en una longitud aproximada de 1.000 kilómetros. El primer gran túnel construido por el imperio fue el túnel de Shimizu, el cual con sus 9.702 metros de longitud y complementado con varios túneles menores en espiral fue inaugurado en 1931, sobre la línea férrea de Jōetsu (North bound Shin-shimizu), noveno en el mundo para su época, y de gran importancia para la industria en todo el continente asiático, dado que sería este túnel el que marcaría la pauta para la construcción de numerosos túneles de gran longitud, entendiéndose como gran longitud aquellos superiores a 10 kilómetros.

Japón, por su parte, también sería la precursora de la construcción de túneles férreos subacuáticos, es decir, aquellos túneles construidos bajo el lecho marino para conectar dos islas, en su caso. La primera muestra relevante de este tipo de estructuras fueron los grandes túneles de Kammon, estos túneles unen las islas de Honshu y Kyushu. La excavación de estos túneles comenzó en 1936, y luego de avanzar 3.605 metros longitudinales bajo grandes complicaciones de tipo técnico asociadas a los retos geomecánicos inherentes a este tipo de construcciones, sería inaugurado el primer tubo en 1942. Estos túneles son los predecesores de múltiples túneles subacuáticos que fueron construidos a lo largo de todo el imperio para conectar sus islas, destacándose, entre estos, los túneles de Seikan (Un tubo bidireccional y túneles de servicio), los cuales, actualmente uniendo a las islas de Honshu y Hokkaido, con sus 53.850 metros de longitud constituyen la obra subterránea de tipo férrea más larga del mundo, superando incluso al conocido Eurotunnel bajo el canal de la Mancha.

En la América del Norte, el primer túnel férreo excavado en el continente americano fue construido sobre una ruta de carácter mixto, es decir parte en ferrocarril, y parte en canal. Esta línea férrea (Main Line of Public Works of Pennsylvania) unía a

Philadelphia con Pittsburgh, e incluyó un primer túnel corto de 274 metros, denominado Staple Bend Tunnel. La excavación de este túnel se inició en 1831 y finalizó en 1833, su costo fue de U\$37.500 de la época; sin embargo, este túnel no sería dado al servicio sino hasta 1852, año en el cual fue puesta en servicio la línea férrea como tal.

Se puede decir, además, que los ferrocarriles remplazaron paulatinamente a los canales fluviales como vías de comunicación a lo largo de todo el mundo durante el siglo XIX, siendo quizás el túnel más emblemático, construido durante aquel periodo de transición, el túnel de Hoosac que pasa a través de la cordillera de Berkshire en la línea férrea comprendida entre Boston y Troy, en Massachusetts. Este túnel tiene una longitud total de 7.465 metros y para 1876, año en el cual se dio al servicio, constituyó el túnel férreo más largo de los Estados Unidos de Norteamérica; sin embargo, su mayor logro no fue el de su gran longitud, sino el de ser el primer túnel en el continente en emplear nitroglicerina¹³ como fuente de poder para la realización de las actividades de excavación en complemento con el uso de máquinas de perforación asistidas por aire comprimido¹⁴, tecnología esta recientemente aplicada durante la construcción del túnel de Mont Cenis en Francia, y la cual en lo sucesivo marcaría los estándares de calidad para la industria de la tunelería y la minería subterránea el mundo. Durante muchos años, la compañía Pennsylvania Railroad, buscó comunicar a New York con la ciudad de New Jersey, localizada al sur de dicha ciudad, proponiendo para esto la construcción de un puente sobre el río Hudson.

En 1903, luego de muchos debates de tipo técnico y político, se decide no construir el puente y por el contrario hacer dos túneles paralelos de 1.730 metros de longitud bajo el lecho del río, el primero de los cuales sería inaugurado en el año de 1885, luego de 11 años, constituyendo así la primera muestra relevante construida en el continente americano de este tipo de obras subterráneas subacuáticas. La mayor contribución de los túneles bajo el río Hudson (ver imagen 5) la industria consintió el uso de aire comprimido durante la excavación de los pozos de ventilación en el interior del túnel, como método de estabilización de las paredes de la obra subterránea, este método lo patentó su creador, el Sr. Dewitt C. Haskyn, diseñador y constructor de los túneles.

Igualmente, los túneles bajo el río Hudson (ver Imagen 5) permitirían que en lo sucesivo se construyeran varios túneles férreos de este tipo (subacuáticos) en los Estados Unidos de Norteamérica, destacándose entre estos los túneles de St. Clair entre Canadá y Estados Unidos bajo el río Detroit, Cuyos 2.557 metros constituyeron para la época (1891), el primer proyecto (túnel) en el mundo construido mediante tubos de acero sumergidos, y los túneles de la bahía de San Francisco (1974), construidos a lo largo de 5.600 metros, empleando para esto la misma técnica de tubos sumergidos, entre los más importantes.

Finalmente, y también en Norteamérica, es importante mencionar aquellos grandes túneles asociados a las líneas ferroviarias del lejano oeste y, en particular aquellos que fueron excavados a través de las Montañas Rocallosas (Rocky Mountains). Entre estos se encuentra el famoso túnel de Moffat, en honor a su constructor, esta obra, con sus cerca de 10 kilómetros (6.21 millas), fue inaugurada en 1928, luego de 12 años de arduos trabajos. La importancia de este túnel radicó en la construcción anticipada de un túnel piloto paralelo, construido para investigar las condiciones geomecánicas del macizo rocoso donde habría de excavarse el futuro túnel férreo y el cual a su vez, localizado cerca de 25 m al sur del túnel principal serviría en el futuro inmediato para la conducción de agua potable hacia la ciudad de Denver en el Estado de Colorado, conformando así un proyecto multipropósito (Caicedo, 2009, p. 12-14).

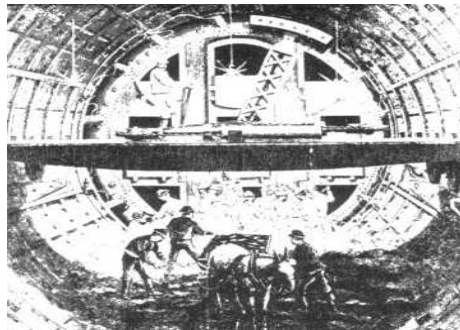


Imagen 5. Túnel del río Hudson.

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004

De igual manera, Colombia no es ajena a las variadas propuestas sobre los desarrollos de túneles, surgen entonces necesidades de acortar largos trayectos que serían indispensables para el desarrollo integral del país.

1.4.1.4. Los túneles en Colombia

El inicio del ferrocarril estuvo asociado a la construcción del ferrocarril de Panamá, el cual sería inaugurado en enero de 1855, este ferrocarril marcaría las pautas para el desarrollo férreo nacional a finales del siglo XIX y la primera mitad del siglo XX; sin embargo, la construcción de túneles para ferrocarril no lograría materializarse sino hasta la construcción del ferrocarril de Antioquia, el cual, desde sus inicios en 1874, dada la complejidad topográfica de su trazado, incluyó dentro de sus estudios varios túneles, la mayoría de ellos de corta longitud, como en el caso de los tres túneles localizados en el sector de Camilo C y el túnel de La Quebra, el cual con sus 3742 metros de longitud e inaugurado el 12 de julio de 1929, luego de

cerca de cuatro años, constituyó el túnel de ferrocarril más largo de Sur América en su momento.

Como complemento a lo mencionado, es importante resaltar que prácticamente todos los ferrocarriles del país, salvo contadas excepciones, incluyeron dentro de sus trazados algún túnel, los cuales en esencia, serían los precursores tanto de los túneles para abastecimiento de agua y desarrollos hidroeléctricos que el país afrontara durante la segunda mitad del siglo XX, como de los túneles carreteros que actualmente se están construyendo en las principales carreteras del país, siendo el túnel de La Línea sobre la carretera Ibagué - Armenia con sus cerca de nueve kilómetros, el más ambicioso de estos.

En la actualidad, de acuerdo con Caicedo (2009, p. 12-14), el tramo Cajamarca – Calarcá, donde a la fecha se construye el túnel de La Línea, tiene uno de los mayores índices de accidentalidad del país, dadas las características del terreno y la climatología.

Según INVIAS, el número de novedades por kilómetro es cuatro veces mayor al promedio nacional, y con el túnel mencionado, ese índice se reducirá en un 75%.

De los túneles en operación más destacados de la red vial, está el túnel Fernando Gómez Martínez de 4.6 kilómetros (el más largo a la fecha), en donde fue necesario remover 10 millones de metros cúbicos de tierra. La obra fue inaugurada en 2005 y conecta los valles de Aburra y del río Cauca, en el occidente de Antioquia. Además, en 2007 recibió el premio Nacional de Ingeniería.

No obstante, el primer túnel que se construyó en Colombia con especificaciones internacionales fue el Boquerón (2.325 metros) en la vía Bogotá – Villavicencio. Esta obra que estaba proyectada desde hace 240 años, permitió mejorar la comunicación vial entre el principal centro de consumo y producción y las más prolíficas zonas agrícolas del país. Hay que recordar que en la década del 40 el trayecto entre las dos regiones podía tardar hasta tres días.

Durante las últimas décadas, el país realizó obras subterráneas de gran magnitud, especialmente en la construcción de centrales hidroeléctricas y sistemas de acueductos. Colombia, en los últimos 15 años, se ha convertido en una potencia latinoamericana de túneles carreteros.

En estos momentos, hemos construido los ductos más largos de América Latina, como son el túnel de Buenavista, de 4.500 metros, y el de San Jerónimo en Antioquia, de 4600 metros, afirma el gerente de estructuración de negocios del Grupo Odinsa, Héctor Salazar. Hay varios proyectos que están en proceso, como la ruta del sol, que incluye seis túneles, la segunda calzada Bogotá – Villavicencio, prevé la construcción de 13 ductos y el tramo Cisneros Loboguerrero (entre Buga y Buenaventura), con 12 túneles, entre otros.

Hasta los años 90, el sector hidroeléctrico estaba desarrollando grandes proyectos que requirieron como parte integral de los diseños la construcción de túneles viales y su posterior uso, para desplazamientos de las poblaciones vecinas.

Antes de terminar el siglo XX, un grupo de profesionales dedicados a la celebración de los diferentes túneles deciden fundar la Asociación Colombiana de Túneles y Obras Subterráneas- ACTOS, con el fin de asociar a profesionales que desempeñen labores o deseen participar en la planeación, diseño, asesoría, operación, mantenimiento o cualquier otro trabajo relacionado con túneles y obras subterráneas con la intención de promover esta actividad en beneficio de la Ingeniería Nacional.

Al recopilar la información, se puede afirmar que la evolución de los túneles desde sus comienzos con el fuego nos muestra una transformación de las técnicas en excavación hasta desarrollar máquinas tuneladoras, y como Colombia ha implementado en muchos de sus proyectos este tipo de tecnologías, para disminuir la accidentalidad, mejorar el nivel de servicio, aumentar la velocidad de diseño y minimizar los costos de estabilización de grandes cortes a cielo abierto en zonas inestables durante la construcción y operación del proyecto.

Es así como se establecen las principales funciones y necesidades de los túneles.

2. FUNCIONES, NECESIDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LOS TÚNELES

En el presente capítulo, se desarrollará un compendio, donde el objetivo principal será resaltar el desarrollo de proyectos en túneles, sus principales características y demás conceptos que puedan ser de utilidad en el tema propuesto.

2.1 PRINCIPALES FUNCIONES DE LOS TÚNELES

Para el desarrollo de este capítulo se tiene en cuenta lo planteado por Soto (2004, p.17-20), al señalar que las diversas funciones que se obtienen con la construcción o proyectos de túneles, tales como: el transporte, el almacenamiento, albergues de instalaciones, para necesidades científicas, para protección de las personas, entre otras. Es así como se formulan conceptos y características para cada una de ellas con la finalidad de describirlas.

2.1.1 Proyectos de obras o túneles para el transporte.

Esta es una de las funciones más antiguas realizada por el hombre. Con la construcción de túneles se salvan obstáculos naturales. Es una práctica que se da desde la antigüedad y concluyendo podría decirse que es desde la aparición del hombre y el transporte de agua, donde se crea la necesidad de un túnel. Más adelante, con el desarrollo de los ferrocarriles y posteriormente con el desarrollo de los vehículos motorizados, se hace aún más necesaria la construcción de túneles buscando evitar fuertes pendientes, acortar distancias, y ganar seguridad.

2.1.2 Proyectos de obras o túneles de almacenamiento.

La gran dificultad al almacenar variadas sustancias y materiales se soluciona en ocasiones con túneles, los cuales garantizan necesarias condiciones de seguridad en algunos casos, con lo que se evitan, en otros, el fuerte impacto ambiental que ocasionarían grandes depósitos en la superficie, por ejemplo el almacenamiento de

petróleo, residuos radioactivos, materiales para usos militares y embalses subterráneos .

2.1.3 Túneles para instalaciones especiales.

Son propuestas que incluyen las grandes instalaciones subterráneas que se construyen por diferentes motivos tanto prácticos como estratégicos. Se nombran entonces diferentes aplicaciones que se derivan de esta función, tales como: centrales energéticas, estacionamiento de vehículos y depuradoras de aguas residuales.

2.1.4 Túneles con fines científicos.

En la actualidad los países más desarrollados construyen túneles para investigaciones científicas de difícil realización en la superficie, acelerador de partículas subatómicas, entre otros.

2.1.5 Túneles para seguridad y protección.

Se construyen de igual manera túneles cuya función es la protección de las personas, tanto para militares como para civiles; en los últimos tiempos, se han construido para la defensa frente ataques nucleares. Para este tipo de desarrollos de túneles, el mayor reto es la resistencia de la estructura a los explosivos, así como la preservación de la vida durante un largo período de tiempo, como son los refugios y puestos de control.

Vistas las principales funciones de estos proyectos se dan a conocer las directrices o parámetros asociados a estas funciones.

2.2 PARÁMETROS O DIRECTRICES RELACIONADAS CON LA FUNCIÓN DE CADA TÚNEL

A continuación, se parte de lo señalado por Soto (2004, p.20-24), quien habla de las directrices, las cuales se enumeran por separado, suelen ser dependientes

entre sí, de manera que la acción de una condicionará la de otras, en una tarea de combinarse para poder dar una clara objetividad al desarrollo de los mismos.

Es de anotar que la ubicación y desarrollo de un túnel que podrá ir a través de una montaña, o por debajo del agua o urbano, requiere de un estudio previo de parámetros o directrices tales como:

2.2.1 El tipo de terreno.

Puede ser desde un limo blando hasta una roca dura; la selección que se haga del terreno implicará cambios en la geometría, en la forma de la estructura y fundamentalmente en el método de construcción.

2.2.2 Dimensiones del túnel.

Las dimensiones tanto el ancho, la altura y la longitud, así como los parámetros que definan la planta cuya característica son las curvas circulares, de transición y el alzado (pendientes máximas); estos son muy variados y podrán ser muy reducidos en unos casos y en otros se podrá disponer de un número de posibilidades.

2.2.3 Las formas estructurales.

Éstas podrían ser en círculo, rectangular, en forma de herradura, etc. Así como el material utilizado, como el hormigón con mayor o menor espesor y el acero y la forma estructural que deberá soportar las presiones de los terrenos y que tanto el tipo del terreno como el método de construcción influirán decisivamente sobre la forma estructural del túnel.

2.2.4 El sistema de construcción.

El cual presenta numerosas posibilidades, desde la excavación por explosivos hasta las máquinas tuneladoras a sección completa, pasando por los procedimientos de corte del terreno y posterior relleno para los túneles más superficiales. La elección del método apropiado o la combinación de varios, vendrá determinada por las condiciones del terreno pero también por los medios económicos de que se disponga.

2.2.5 El equipamiento del túnel ya terminado.

Las calzadas o las vías de ferrocarril, la iluminación, los sistemas de control, los acabados decorativos en su caso, serán otro factor fundamental a tenerse en cuenta. Todas estas directrices deben considerarse integralmente y ser siempre incluidas en la planificación y diseño de una obra subterránea o túnel.

2.3 SOBRE LA UBICACIÓN DE LOS TÚNELES

Otra clasificación de los túneles, hablando ahora de los destinados al transporte, podría ser por su ubicación. Los obstáculos naturales que hay que salvar los cuales son muy variados (cadenas montañosas, ríos, estuarios o mares, en una ciudad, las calles, edificios u otras estructuras). Por ello los clasificaremos en túneles de montaña, túneles subacuáticos y túneles urbanos.

2.3.1 Túneles de montaña.

Si el obstáculo es una cadena montañosa, la construcción de un túnel puede suponer un ahorro considerable de tiempo y energía.

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 acortarán distancias y se ahorrará en combustible y tiempo, aunque la inversión de capital será mucho mayor, también su utilización será mucho mayor ya que no se verá afectado por las nieves invernales de los túneles construidos a un nivel más elevado.

2.3.2 Túneles subacuáticos.

La construcción de este tipo de proyectos para atravesar un río, estuario etc. dependerá de la situación. La elección del proyecto puede solucionar un problema de acceso a un lugar cuando los puentes no sean la mejor alternativa, la

escogencia por un túnel en lugar de un puente para salvar un río o un estuario, dependerá en sí de cada caso.

2.3.3 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, peatonales, debido a los elevados problemas de ventilación y accesos que supondrían largos túneles.

2.4 CARACTERIZACION DE LOS DIVERSOS TIPOS DE TÚNELES

2.4.1 Para túneles de ferrocarril.

Con la aparición del túnel en las líneas de ferrocarriles, fue necesaria la construcción de túneles 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 diseño suele ser recto o curvo.

En la actualidad, las muchas variedades del sistema tienen en común la construcción de túneles por lo menos en alguna sección de sus rutas. Debido a las limitaciones en la pendiente y curvas, los ferrocarriles necesitaron de los túneles.

En los túneles más largos, se adopta preferentemente el trazado en línea recta ya que es el más económico y también, al excavarse al menos desde los dos extremos, el más exacto en el replanteo y por lo tanto en la coincidencia entre ambos ataques, aunque, en la actualidad, la gran precisión en la medida de la distancia que consiguen los distanció metros, resta importancia a este hecho.

Una excepción a esta regla, se da en los túneles que atraviesan grandes cadenas montañosas. Si el trazado general 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 exigida; entonces hay que conseguir aumentar la longitud entre los dos puntos fijos mediante un trazado en curva, que en ocasiones llega a formar un bucle completo (trazado helicoidal) (Soto, 2004, p.23). Ver imagen 6.

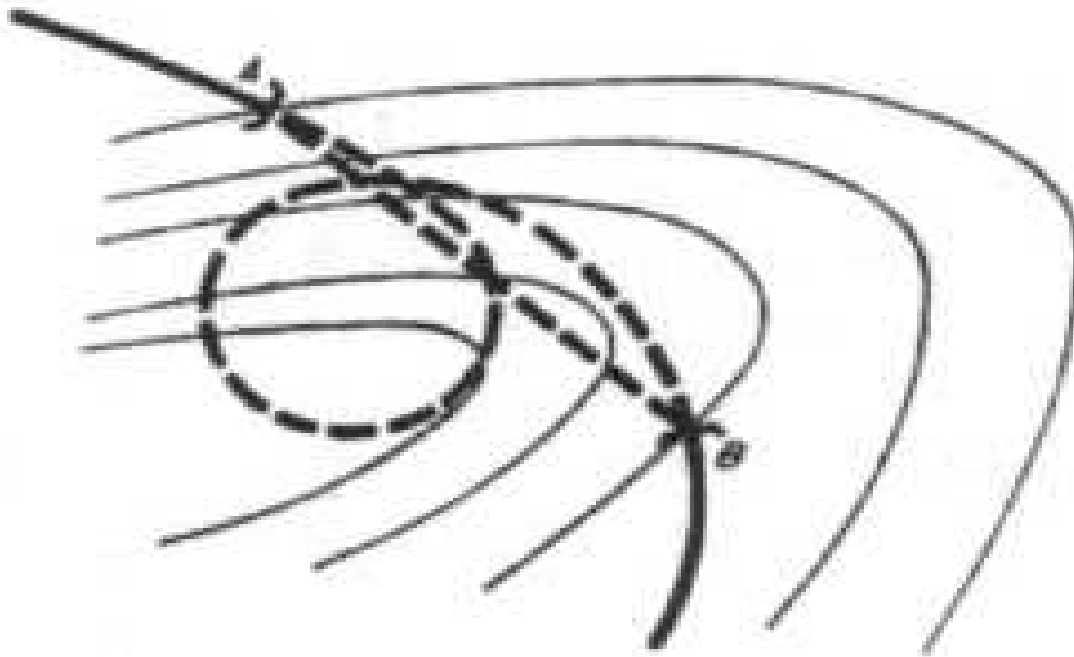


Imagen 1. Túnel helicoidal.

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004

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 intentará dar siempre un mínimo de pendiente para permitir la circulación de las aguas hacia la boca del túnel. Ver imagen 7.

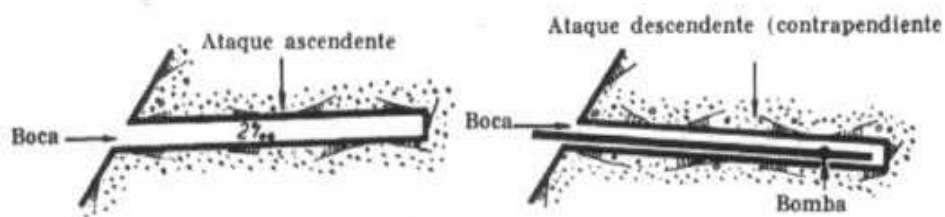


Imagen 2. Ataques en pendiente.

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004

Por ello, se intentará que sea ascendente en el sentido de la excavación, ya que la evacuación de las aguas subterráneas estará asegurada durante la construcción; en caso contrario las aguas se concentran en el avance y es necesario evacuarlas por bombeo. En los túneles largos, se suele dar pendiente hacia ambos lados, con un acuerdo parabólico en el centro, para así poder excavar desde las dos bocas y evacuar las aguas por gravedad. Ver imagen 8.

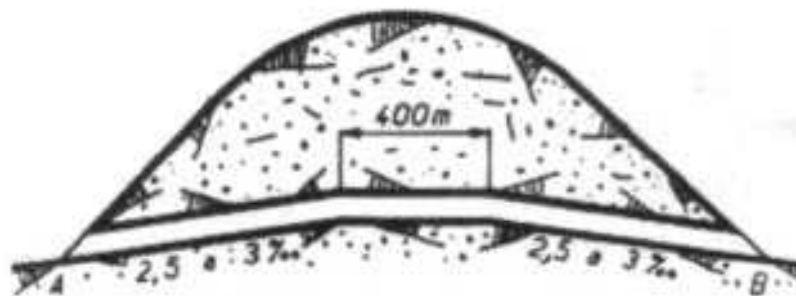


Imagen 3. Túnel de cumbre.

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004

Los factores que controlan la pendiente máxima en una línea de ferrocarril son la potencia de la locomotora y la adhesión del riel, es decir, la capacidad de volver a arrancar el tren; por lo tanto, no se puede decidir una pendiente sin conocer éstos factores, ni tampoco a la inversa. Sin embargo, podríamos decir que son pendientes usuales las comprendidas entre el 1% y el 2,5%.

En las líneas de ferrocarril de alta velocidad, donde además de los factores anteriores existe el condicionante de la velocidad a la que debe circular el tren, sí que existen pendientes máximas admitidas, que son del 3,5% en tráfico de viajeros y el 1,25% en tráfico mixto (viajeros y mercancías).

Así, todas estas pendientes suelen rebajarse de un 10 a un 20% al entrar al túnel, compensando así la reducción de la adherencia al riel que provoca la humedad en la atmósfera y el aumento de la resistencia aerodinámica.

También, el radio de las curvas será el que determine la velocidad máxima de circulación de los trenes. En España, con un accidentado relieve sólo comparable en Europa al de Suiza, existen tramos con radio de curvas de 300m, donde la velocidad máxima de circulación es inferior a 110 km/h; alrededor del 5% tiene radios superiores a 1.500m; y sólo el 64% de la red es en recta, de lo que se deduce la construcción de nuevos trazados, en los que sin duda habrá túneles, para conseguir radios de 4.000m, que son los utilizados en alta velocidad (Soto, 2004, p.23-25).

Como ejemplo significativo, vale la pena hablar de Japón, el cual es, también, un país de accidentado relieve y que posee el récord mundial de líneas de ferrocarril de alta velocidad con mayor porcentaje de obras de fábrica. En la línea de Tohoku (496Km) el 23% de su longitud es en túnel y el 72% en viaducto; la de Joetsu (270Km), con un 39% en túnel y un 60% en viaducto, sólo tiene un 1% situado en terreno natural.

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 ésta se aproxima más a una forma ovoidal añadiendo una solera, y en mal terreno se tiende al círculo, con contrabóveda inferior. Su gálibo interior suele ser de 5m de ancho y 7 de altura para una sola vía, y las vías gemelas suelen tener una anchura de 8,5m. Ver imagen 9.



Imagen 4. Secciones transversales de túneles para vías férreas.

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004

2.4.2 Para túneles de carretera.

La construcción de túneles para carreteras llegó después de la construcción de túneles para ferrocarril. De éstas, las curvas pueden ser más cerradas (son normales, radios de 400m). Ver imagen 10.

El perfil longitudinal sigue las mismas pautas que los anteriores en cuanto a las condiciones necesarias para la evacuación de las aguas por gravedad, tanto durante su construcción como posteriormente, y siempre que sea posible.

La diferencia más importante, comparándolos con los de ferrocarril, es en la pendiente permitida: son pendientes normales aquellas de 35 y 45 milésimas, e incluso se pueden utilizar en un tramo corto rampas de 65 milésimas, con la existencia en la actualidad una situación que obliga a construir túneles para carreteras es la congestión urbana facilitada por pasos a desnivel, cortos y largos.



Imagen 5. Sección transversal de un túnel de carretera.

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004

La sección tipo de los túneles de carreteras es un poco mayor que la del ferrocarril de vía doble. El ancho para dos carriles ronda los 9m, y la altura libre es alrededor de los 5m. Lo normal es que se construyan 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 sólo que excavar un 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). Un túnel excepcional en lo que se refiere a la anchura es el de Saint-Cloud (ver imagen 11) en la autopista del oeste a la salida de París que dispone de cinco vías de circulación.

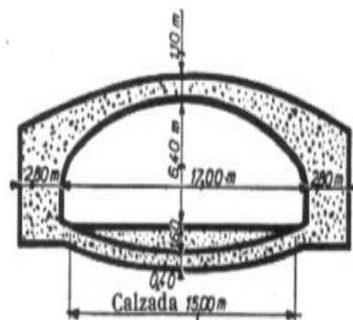


Imagen 6. Túnel de carretera de Saint-Cloud.

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004.

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 al cambio de luminosidad exterior-interior. Igualmente, la ventilación debe prever hasta las situaciones de emergencia, como colapsos de tránsito e incendios, además, el proyecto de ventilación tiene gran influencia en el proyecto y la construcción del túnel, pues el paso de los conductos de aire ocasiona problemas de espacio, y los futuros pozos de ventilación del túnel se pueden utilizar durante la construcción para multiplicar los frentes de excavación del túnel y también como ventilación. Ver imagen 12.

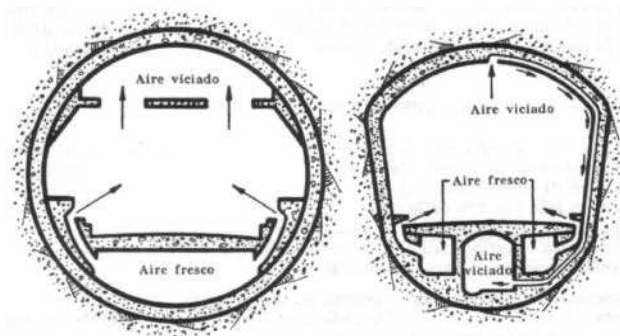


Imagen 7. Ventilación del Holland-Tunnel y del Mont Blanc.

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004

En algunos túneles de carreteras se permite el paso de peatones y ciclistas, con el inconveniente de que además del aumento de las dimensiones del túnel y su repercusión en el costo, los ciclistas retrasan el flujo total del tráfico y tanto ellos

como los peatones requieren unas normas más altas de ventilación, ya que permanecen durante más tiempo en el interior del túnel y, además, realizan ejercicio.

Es por todo ello que se construyen túneles aparte, para peatones y ciclistas, en aquellos países en los que es importante el transporte en bicicleta, o incluso por debajo de la plataforma de la carretera en cortos túneles subacuático de algunas ciudades. Estos túneles tienen unas restricciones mínimas, tanto de espacio como de pendientes.

2.4.3 Para el transporte urbano (Línea metro).

Estos túneles difieren en algunos aspectos de los de las líneas de ferrocarril. En primer lugar suelen tener frecuentes secciones subacuáticas, ya que son pocas las grandes ciudades que no tengan ríos o estuarios que cruzar, en este caso no existe el inconveniente de los túneles subacuáticos que precisan descender muy por debajo del nivel del terreno, ya que es por donde suelen discurrir los ferrocarriles urbanos.

Las pendientes pueden ser más pronunciadas, ya que no tienen que transportar mercancías pesadas: son normales pendientes del 3,5%, e incluso en ciudades con terreno más abrupto, como en Montreal, se ha llegado a pendientes de hasta un 6,3% adoptando llantas neumáticas para mejorar la adhesión.

En general, son túneles tan poco 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 calles (ni en la corrección o 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, a cielo abierto, construir el túnel, rellenar y reconstruir la superficie.

Otro método que afecta en menor grado a la superficie, es la técnica denominada pantallas (ver imagen13), muy útil en terrenos inestables o de relleno, propios de zonas urbanas. Se construyen dos pantallas de hormigón armado en el sentido longitudinal del túnel (en esta fase sólo se han excavado dos estrechas y profundas zanjas verticales), a continuación se excava la zona entre pantallas hasta llegar a la línea curva de la bóveda, sirviendo el mismo terreno de encofrado, además se

arma y hormigona dicha bóveda, para, por último, hacer un vaciado en el hueco (con maquinaria convencional) y construir la contrabóveda.



Imagen 8. Fases de construcción de un túnel por pantallas.

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004

Si el sistema de excavación ha sido de corte y relleno, la sección suele tener una característica 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 equipo rodante y la estructura. (Ver imagen 14). En ocasiones, debido a la falta de altura, se rebaja la bóveda y se aumenta su espesor.

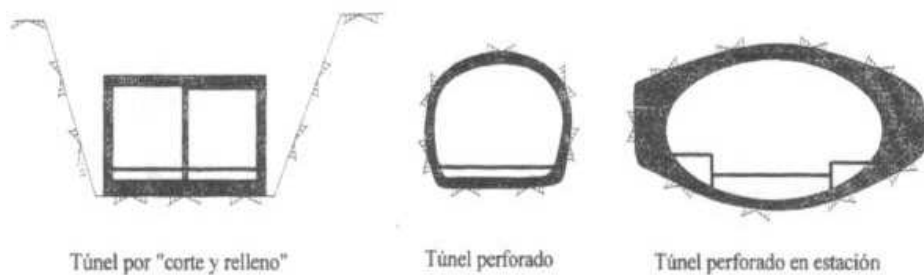


Imagen 9. Distintas secciones para dos vías.

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004.

Se puede decir que los túneles en las estaciones son mucho mayores que los túneles de recorrido, cuyas características presentan, respecto a su anchura, una sección aún más rebajada. En éstos se exigen normas estrictas de impermeabilización, así como una buena iluminación y unos buenos acabados (Soto, 2004, p.25-26).

2.4.4 Para conducción de agua.

El abastecimiento de agua potable a las ciudades es una necesidad que se remonta a tiempos muy antiguos. El acueducto desde una presa hasta la ciudad tendrá tramos aéreos, tramos en los que las tuberías se apoyen en la superficie, otros excavados en zanjas y también tramos en túnel.

El túnel se hará necesario para atravesar una colina y también, ya en zona urbana, cuando los excesivos obstáculos aconsejen la perforación de un túnel a mayor profundidad. 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. Por ello, el perfil longitudinal tendrá todo tipo de inclinaciones incluso la vertical, siempre que tenga un gradiente hidráulico descendente de extremo a extremo (sus características deben ser lisa e impermeable). La impermeabilización es importante en dos aspectos contrarios, por un lado para evitar erosiones importantes por pérdida 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. Ver imagen 15.

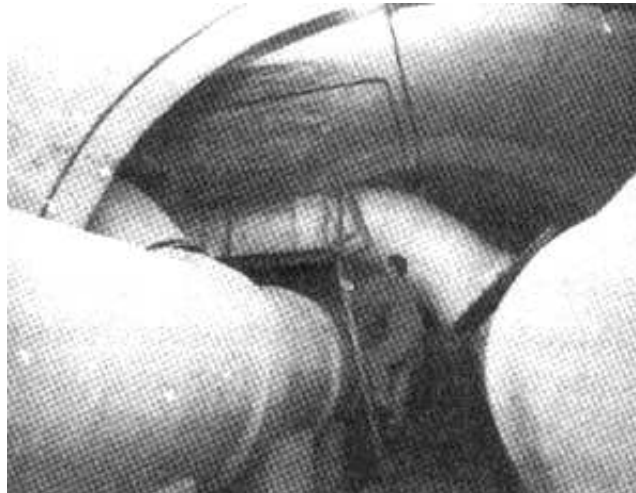


Imagen 10. Distribución del agua potable en la ciudad.

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004.

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

2.4.5 Para centrales hidroeléctricas subterráneas.

Los proyectos se encuentra generalmente en áreas montañosas que dependen del almacenamiento del agua a un nivel elevado, utilizando modernas estaciones generadoras de energía hidráulica; en ellas, se construye una compleja red de túneles con distintas funciones: túneles de acceso desde el exterior hasta la sala de máquinas y de transformadores, túneles que conducen los cables, y los propios para la generación de la energía que podemos clasificar, por sus distintas características, en tres tipos: de descarga libre, de alta presión y salas de máquinas y transformadores. Ver imagen 16.

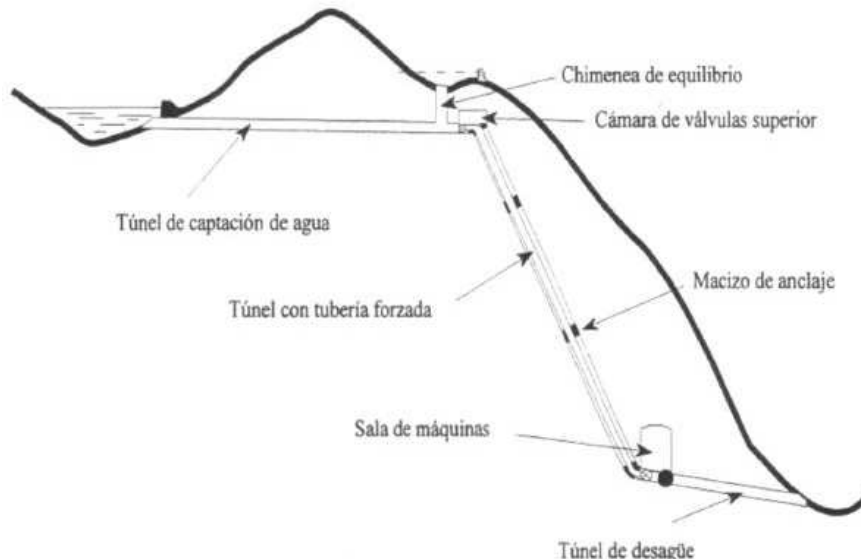


Imagen 11. Túneles hidráulicos en una central hidroeléctrica.

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004.

Consideramos túneles de descarga libre al túnel para la captación del agua y al de desagüe; el primero suele estar siempre lleno pero a una presión relativamente baja, y debe tener una pendiente suave para que una vez vacío se pueda realizar su inspección y mantenimiento. Éste, para el desagüe, tendrá la mínima pendiente ya que la sala de turbinas conviene situarla al nivel más bajo posible para aprovechar la máxima carga hidrostática del agua. La sección tipo, normalmente circular, y el revestimiento, son similares a los de los túneles para abastecimientos urbanos aunque en los de desagüe se debe prever un revestimiento capaz de soportar la erosión bajo cualquier condición de descarga.

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 la fabricación de pozos; es muy importante hacer mínima la pérdida de carga hidrostática por lo que un revestimiento liso es imprescindible, por lo que, se producen muy altas presiones en los tramos próximos a las turbinas; además, en todo el túnel, cuando se cierran o abren los tubos de alimentación de las turbinas, según las necesidades de producción, se producen presiones por ondas de choque y oleaje que se controlan construyendo chimeneas o tiros de alivio. El revestimiento debe ser capaz de soportar estas

altas presiones y además ser impermeable, por lo que a menudo será de acero o de hormigón con un revestimiento interior de acero. También se puede excavar un túnel en el que se instala una tubería de acero de menor diámetro y al que se puede acceder para su mantenimiento. Ver imagen 17.

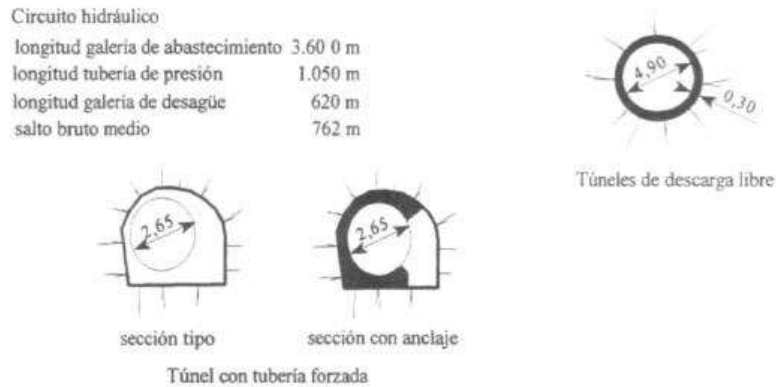


Imagen 12. Características del salto de Moralets.

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004.

Las salas de máquinas y de transformadores son grandes cavernas que albergan todo tipo de equipos (turbogeneradores, transformadores, tuberías de alimentación a las turbinas, etc.). Suelen tener paredes verticales y techo en bóveda (sección de herradura), y la anchura oscila entre 15 y 30m. La construcción de estas grandes salas requiere una roca resistente.

2.4.6 Para sistemas de alcantarillados.

Se hace necesaria la excavación de túneles en los sistemas de alcantarillado cuando la profundidad es excesiva para la excavación de zanjas o cuando no se puede afectar a la superficie. Las ciudades tienden a ampliar y modificar sus redes de saneamiento que ya no vierten directamente a un río o al mar sino que deben pasar por plantas depuradoras. La sustitución o ampliación de tramos ya antiguos y sin capacidad suficiente a menudo se realiza con túneles más profundos.

De este modo, las dimensiones de los túneles son muy variables, secciones inferiores a tres metros cuadrados no son prácticas, por lo que suele ser el mínimo aceptable si se construye con las técnicas clásicas. En su interior se sitúa la tubería que se adecúa a nuestras necesidades.

En la actualidad, las técnicas del micro túnel consiguen la ejecución de túneles de diámetros inferiores a 3m y longitudes menores de 200m, 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 deberá 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 (ver imagen 18), 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 ovoideal; se puede mencionar, además, que otro requisito será la impermeabilidad para evitar contaminaciones por pérdida de agua.



Imagen 13. Secciones tipo.

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004

En cuanto a su definición en planta, podrá ser recta o en curva y muy a menudo su recorrido será quebrado. En los quiebros será obligada la situación de pozos de registro, necesarios para la ventilación (gases tóxicos), para el mantenimiento, e incluso como tiros de carga en casos de grandes tormentas.

2.4.7 Para túneles de servicios.

Estos túneles en la actualidad son utilizados para transportar cables y otros servicios mediante tuberías, sobre todo en las grandes ciudades y en pasos subacuáticos. Las redes telefónicas en túnel permiten el acceso de personal para

tender nuevas líneas y para el mantenimiento, sin que se afecte a la superficie. Las redes de gas precisan túneles para su uso exclusivo, con instalaciones para el control de fugas que podrían crear una atmósfera tóxica o explosiva; algunos túneles son construidos para los ductos de minería, para dar cabida a equipos costosos y a personal permanente. Ver imagen 19

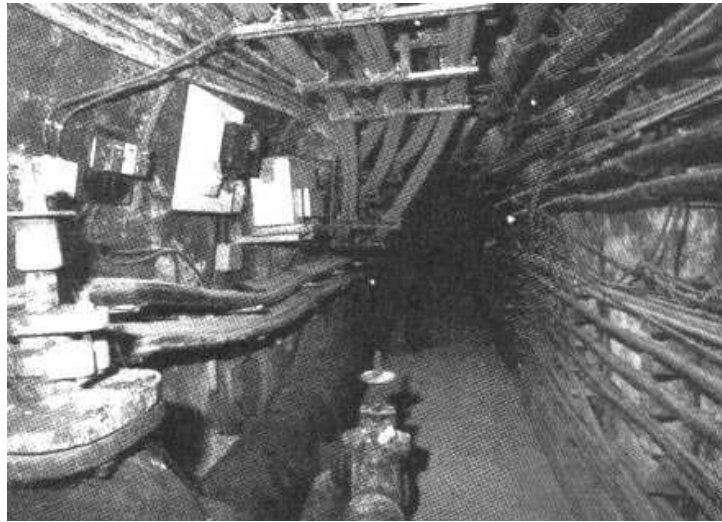


Imagen 14. Galería de servicios.

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004

2.4.8 Para túneles de almacenamiento.

La función del túnel como almacenamiento es antigua, pues era común el almacenamiento del agua de la lluvia en depósitos subterráneos. En la actualidad, es el almacenamiento de petróleo crudo el uso más común, siendo su gran ventaja la seguridad contra incendios o daños; son grandes depósitos subterráneos sin revestimiento, de los que se va extrayendo el petróleo que se sustituye provisionalmente por agua para mantener el equilibrio de presiones hasta que se abastece de nuevo el petróleo crudo.

También se utiliza para almacenar explosivos como otros suministros militares, y últimamente, para eliminar residuos radioactivos. Otra utilidad es, en las grandes ciudades, para el almacenamiento provisional de las aguas lluvia en épocas de invierno, imposibles de tratar en cortos espacios de tiempo en las plantas depuradoras antes de ser vertidas; con este fin se proyecta construir varios

embalses subterráneos en Barcelona para evitar de esta manera los vertidos incontrolados al mar.

2.5 CLASIFICACIÓN DE TÚNELES SEGÚN MANUAL DE CARRETERAS

2.5.1 Según su ubicación.

Los túneles, según su ubicación en relación a las ciudades, pueden ser definidos como:

➤ *Rurales*: son túneles ubicados fuera del entorno urbano y que, en general, están destinados a atravesar obstáculos físicos tales como montañas o cuerpos de agua que resultan difíciles o inconvenientes de cruzar mediante puentes.

Los túneles rurales habitualmente tienen pocas restricciones espaciales. Por otra parte, en ellos suele ser más costoso el abastecimiento de agua y electricidad para la operación de los sistemas de incendio, iluminación, ventilación, controles y comunicaciones que puedan requerirse. En general, estos túneles son excavados en roca y suelos residuales (cruce de montañas) o suelos sedimentarios (cruce de ríos y otros).

➤ *Urbanos*: son túneles emplazados dentro de los límites de la ciudad y están fuertemente constreñidos espacialmente por las redes de servicios propios de las urbes modernas, como: redes de alcantarillado, redes de trenes subterráneos, redes de agua potable, redes de gas, redes de alimentación, eléctrica, teléfonos, fibra óptica, etc.

Igualmente, los túneles urbanos son frecuentemente del tipo trinchera cubierta y excavados en suelos sedimentarios. En los túneles urbanos los problemas de ventilación resultan, a veces, dificultados por el hecho de que no siempre se puede expulsar libremente el aire viciado proveniente del interior del túnel, debido a restricciones de carácter ambiental.

2.5.2 Según Características Constructivas.

Los túneles, según sus características estructurales y de construcción pueden ser definidos como:

- Túneles en roca (Normalmente a través de una montaña).
- Túneles en suelo (Normalmente urbanos).
- Túneles falsos (Construidos en hormigón armado y luego tapados con suelo. Generalmente se construyen antes de la entrada a los túneles en roca, para proteger a los vehículos de la caída de rocas).
- Trincheras cubiertas (Estructuras de hormigón armado de sección rectangular, construidas en suelo y luego tapadas. Generalmente son urbanas).
- Cobertizos (Estructuras de hormigón armado de sección rectangular construidos en zonas montañosas para proteger a los vehículos de las avalanchas de nieve. Estas estructuras generalmente son abiertas en uno de sus costados).

2.5.3 Según clima y altitud.

Resulta de especial importancia la ubicación geográfica (fundamentalmente altitud) en donde se ubique la obra y el clima del sector.

Toda obra localizada en altura considerable y en un clima lluvioso o sectores con filtraciones mayores, requerirá el diseño especial de canaletas conductoras – evacuadoras de aguas, las cuales deberán ser calculadas, dimensionadas y localizadas de manera que cumplan con el objetivo de mantener las pistas secas.

De este modo, la ubicación geográfica determinará la posibilidad de congelamiento de aguas escurrientes o infiltradas a la obra para lo cual deberá procederse a neutralizar el fenómeno que provoque esta situación. Hay dos fenómenos, particularmente peligrosos para los conductores, que se producen frecuentemente en túneles cordilleranos con exceso de agua, que deben evitarse a toda costa: pavimentos con una película superficial de agua congelada, que se tornan muy resbalosos, y, además, el empañamiento repentino del parabrisas al ingresar un vehículo a baja temperatura a un túnel lleno de aire saturado y a mayor temperatura que el vehículo.

Para evitar estos fenómenos, se deberá considerar en el proyecto la colocación de láminas térmicas, por ejemplo CARFOAM, las cuales evitan la generación de goteos y su posterior congelación de arriba hacia abajo (estalactitas) o de abajo hacia arriba (estalacmitas).

2.5.4 Según equipamiento y el flujo vehicular y longitud.

La Imagen 20, ilustra una clasificación de los túneles en función del Tránsito Medio Diario Anual (TMDA – ver imagen 20) y del Tránsito en Hora Punta asociado a dicho TMDA, versus la longitud del ducto; según ello se clasifican las obras en cuatro categorías, para las que en la Tabla B se indica el tipo de equipamiento de seguridad y control con que debería contar el túnel.

Se puede apreciar como las líneas punteadas de la Imagen, corresponden a la frontera para la cual a un mismo TMDA, túneles de mayor longitud pasan a la categoría superior en cuanto a equipamiento deseable.

Se establece además que, según sea la longitud del Túnel, cuando el tránsito de la hora punta es del orden de 1500 a 1900 Veh/h, se deben diseñar ductos unidireccionales de 2 pistas cada uno; pudiendo, inicialmente construirse un ducto bidireccional, para luego construir el segundo ducto quedando ambos unidireccionales.

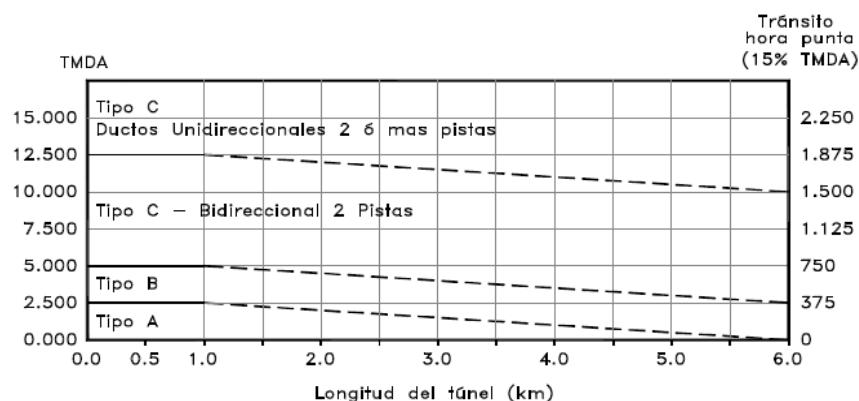


Imagen 15. Clasificación de los túneles en función del Tránsito Medio Diario Anual (TMDA).

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004.

Debe tenerse presente que, para los TMDA indicados entre un 20 y 40% son camiones y buses, según el camino de que se trate. En hora punta, estos porcentajes suelen bajar a valores comprendidos en el rango de 7 a 18%.

El volumen de 12.500Veh/día, para un túnel corto, que requeriría ductos unidireccionales corresponde al porcentaje menor de camiones y buses. Consecuentemente, para el límite superior de vehículos comerciales la línea divisoria entre túnel bidireccional y de ductos unidireccionales se desplazará hacia abajo, dependiendo entre otros factores de la pendiente longitudinal y del tipo de carretera de que se trate, es decir de la calidad del servicio que le corresponda.

Es necesario insistir que la longitud de un túnel es fundamental en la determinación de las especificaciones de requerimientos de equipamiento, ya sea para implementación inmediata o a futura. Debe tenerse presente que siempre es posible realizar el equipamiento de un túnel, en forma progresiva. Sin embargo, es necesario tomar las precauciones respectivas en el diseño de la sección básica y obras civiles, particularmente si se pretende habilitar sistemas de ventilación en etapas posteriores.

Por ello, la clasificación apunta principalmente al tipo de equipamiento con que deberían contar los túneles y la decisión de construir uno o dos ductos deberá ser tomada tras un estudio técnico económico que pondere adecuadamente todos los factores involucrados. Un túnel de gran longitud pero de escaso tráfico puede considerar la postergación de cierta implementación, pero debe considerar en su diseño los espacios y/o condiciones específicas para estas implementaciones a futuro.

Según el tipo de túnel que corresponda de acuerdo a lo indicado, quedarán determinados los equipos de seguridad requeridos y/o recomendados en cada caso, así:

Equipamiento de seguridad y control en túneles mayores de 200m

- Luces de evacuación de emergencia, luces cada 50m.
- Extintores de incendio, cada 100m.
- Cada 200m.
- Teléfono de emergencia, cada 200m.
- Señales de servicios, en cada servicio.
- Marcas en pavimentos.
- Ojos de gato, continuas.
- Red de control de incendio.
- Vigilancia de TV.
- Iluminación interior.
- Equipos eléctricos de emergencia.
- Control de altura, 200m antes de portales.
- Con pista auxiliar para detención fuera de la carretera.
- Las principales características de estos sistemas de seguridad son las que se indican: luces de evacuación de emergencia, son luces usadas para indicar o mostrar el camino hacia las bocas de los túneles en caso de presencia de humo.

- Son equipos activados manual o automáticamente en caso de incendio, de igual manera, la iluminación debe tratarse de luz blanca que pueda verse a través del humo, instaladas en las paredes a 1m sobre el pavimento y a lo menos cada 50m una de otras, deben tener capacidad para permanecer a lo menos 1 hora encendidas.
- Extintores de incendio, debe tratarse de equipos puestos en nichos en las paredes del túnel dentro de cubículos iluminados con puerta de vidrio delgado fácil de romper en caso de requerimiento. Deben estar indicados con señalización adecuada, reflectante e iluminación interior.
- A lo menos se considera un punto de ubicación cada 200m.
- Teléfonos de emergencia, estos teléfonos deben estar destacados, y deben funcionar de manera tal que emitan una señal al controlador con solo levantar el auricular no requiriendo discar ningún número. Se deben instalar en nichos cubiertos con un semitecho. Su número debe ser uno cada 200m de longitud de túnel.
- Señales de servicio, debe considerarse dentro del túnel la instalación destacada de señales y camineras que indiquen la presencia de extintores de incendio, teléfono de emergencia, velocidad y otras condiciones especiales de la obra.
- Marcas de pavimento y ojos de gato; debe considerarse la instalación de este tipo de marcas reflectantes en el pavimento igual que su instalación en el camino exterior (Soto, 2004, p.27-34).

Las pendientes utilizadas para centrales subterráneas como en los túneles de conducción son fuertes e incluso verticales con una sección menor, comparado con túneles para carreteras y ferrocarriles.

Es así como las funciones de estos proyectos, a lo largo de la historia, muestran que han sido uno de los principales logros del hombre, ya que con estos y su finalidad pudo y podrá seguir desarrollando y mejorar la eficiencia en función del desarrollo de cualquier tipo de avance social y/o económico para el mundo y sus países.

Para proseguir se continua con los procesos y métodos de construcción de túneles y obras subterráneas.

3. PROCESOS Y MÉTODOS DE CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES Y OBRAS SUBTERRANEAS

Se elabora un informe relacionado con métodos de construcción para obras subterráneas y/o de túneles, una vez definida su función y utilidad, donde se enfoca en estructurar los diversos estudios y análisis previos a la respectiva profundización de las técnicas y métodos de construcción.

3.1 ESTUDIOS PRELIMINARES: DESCRIPCIÓN DE LAS CONDICIONES DEL SUELO

Para todo proyecto de construcción de obras subterráneas se requiere una detallada y extensa investigación antes de realizarlo, para así poder hacer la mejor elección de su trazado y diseño. Esto es, quizá una de las necesidades principales por encima de cualquier otro tipo de construcción, lo cual implica que se desarrollen una serie de estudios previos, tanto de la geología del terreno, como en la condición hidrológica, geotécnica, y ocurrencia de gases.

3.1.1 Descripción de las condiciones geológicas,

Como señala Salazar (2011, p.10-11), en los suelos se describen normalmente como formaciones geológicas del mismo origen (Ej.: morenas, gravas de río, margas intemperizadas, depósitos de arcillas). Así, la descripción del suelo se basa en clasificaciones estandarizadas, combinada con información referente a la petrografía de los componentes y sus propiedades (forma, grado de redondez, grado de meteorización, resistencia, capacidad de hinchamiento, etc.). Debe ser descrita la estructura del suelo (estratificación, anisotropía), así como cualquier otra característica especial (Ej.: la presencia de bloques o componentes orgánicos). Esta descripción debe complementarse con información adicional, por ejemplo: distribución granulométrica, densidad, grado de saturación, comportamiento cuando se expone al agua libre, etc.

En el caso de las rocas debe distinguirse entre la descripción de la roca basada en el análisis de un espécimen intacto o la descripción del macizo rocoso como un todo; es decir, la descripción del macizo rocoso como un todo. La descripción incluye el contenido de minerales, estructura y textura, así como la identificación petrográfica. La descripción del macizo rocoso debe incluir los siguientes elementos:

- Estructura geológica general (zonas homogéneas, secuencia de los diferentes tipos de rocas, estratificación, foliación, densidad, zonas de falla, etc.).
- Descripción de las discontinuidades.
 - Grado de meteorización, formaciones cárticas, transformaciones hidrotérmicas.
 - Esfuerzos in situ y esfuerzos tectónicos residuales supuestos.
- Debe reportarse zonas de falla, tales como zonas rocosas transformadas mecánicamente por procesos tectónicos, así como las formaciones cárticas. Estas zonas deben ser descritas como zonas geológicas homogéneas, dependiendo de extensión y su frecuencia. Los datos geométricos sobre la posición en el espacio de las discontinuidades, y de las zonas de falla deben reportarse como absolutos en el espacio, también relativos a la estructura.

3.1.2 Descripción de las condiciones hidrogeológicas.

Debe describirse las condiciones hidrogeológicas locales y regionales, en particular, acuíferos, de su posible interacción, agua subterránea que aflora y tabiques aisladores; de igual manera, deben mencionarse las condiciones de flujo regionales y su relación con aguas de escorrentía. En particular deben describirse los siguientes elementos:

- Los posibles efectos sobre la estructura durante su construcción y durante la vida de servicio sobre la base de las condiciones hidrogeológicas existentes (efectos cualitativos y cuantitativos).
- Los posibles efectos del agua subterránea sobre las instalaciones durante la construcción (inundaciones) y en la operación, debido a los efectos de la presión, agresividad química, concreciones, etc.
- Para acuífero el tipo de circulación (poros, discontinuidades, formaciones kársticas), los parámetros de permeabilidad, el nivel del agua subterránea, la dirección de flujo del agua, etc.

3.1.3 Descripción de las condiciones geotécnicas.

Los túneles de reconocimiento indudablemente son el método de exploración que da más información para la construcción del túnel, puesto que se pueden excavar partiendo de las bocas del túnel o del fondo de los pozos de sondeo, pueden llevar la dirección del eje como túnel piloto que posteriormente será ampliado, o pueden ir en una dirección paralela y a la distancia conveniente para su posterior utilización como galería de servicios o como túnel de drenaje o de ventilación.

3.1.4 Descripción de ocurrencia de gases.

Dentro del marco de la investigación debe indicarse la presencia de rocas con una fuente potencial de gases o con depósitos de gases, junto con las trayectorias correspondientes de migración, así como las señales conocidas de presencia de gases en formaciones geológicas similares. Para esto, debe dejarse en claro si existe la posibilidad de encontrar depósitos de gases, de su infiltración y de cuáles podrían ser los efectos que se podrían.

3.2 MÉTODOS UTILIZADOS PARA CLASIFICAR MACIZOS ROCOSOS

Los métodos para clasificar los macizos rocosos se utilizan para evaluar el comportamiento durante la excavación, y la vida útil del proyecto que se orienta para zonificar las zonas afectadas por el proyecto.

3.2.1 RQD (Rock Quality Designation).

De acuerdo a Hoek (2012, p.3), la Calidad de la Roca (RQD) fue desarrollada por Deere (Deere et al., 1967) para proveer un estimado cuantitativo de la calidad de la masa rocosa, a partir de los testigos de la perforación diamantina. El RQD es definido como el porcentaje de piezas de testigos intactos mayores de 100 mm (4 pulgadas) en la longitud total del testigo. El testigo deberá tener por lo menos un tamaño NX (54.7 mm o 2.15 pulgadas de diámetro) y deberá ser perforado con un cilindro de doble tubo de perforación.

3.2.2 Índice Q (índice de calidad de túneles).

Sobre la base de una evaluación de un gran número de casos históricos de excavaciones subterráneas, Barton et.al. (1974), del Instituto Geotécnico de Noruega, propusieron un Índice de Calidad Tunelera (Q) para la determinación de las características de la masa rocosa y de los requerimientos de sostenimiento de los túneles. El valor numérico de este índice Q varía sobre una escala logarítmica desde 0.0001 hasta un máximo de 1,000, y está definido por:

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

Fuente: Practical Rock Engineering

RQD: Es la designación de la calidad de la roca

J_n: Es el número de sistemas de juntas

J_r: Es el número de rugosidad de las juntas

J_a: Es el número de alteración de las juntas

J_w: Es el factor de reducción de aguas en las juntas

SRF: Es el factor de reducción de los esfuerzos

3.2.3 Sistema RMR (Rock Mass Rating).

Bieniawski (1976) publica los detalles de una clasificación de la masa denominada sistema de clasificación geomecánica o valoración de la Masa Rocosa RMR (Rock Mass Rating). A través de los años, este sistema ha sido refinado sucesivamente conforme se han ido examinando más casos registrados. Los siguientes parámetros son usados para clasificar una masa rocosa con el sistema RMR:

- Resistencia compresiva uniaxial del material rocoso.
- Designación de la calidad de la roca (RQD).
 - Espaciamiento de las discontinuidades.
 - Condición de las discontinuidades.
 - Condiciones del agua subterránea.
 - Orientación de las discontinuidades.

En los terrenos permeables, al igual que los pozos, se presenta el inconveniente de servir de drenaje, y si la excavación del túnel definitivo no se lleva a cabo en un

tiempo prudencial, cuando se llega a estas zonas pueden haber cambiado sus características por saturación de los terrenos. Sin embargo, en terrenos rocosos son muy útiles para determinar el método de clasificación del macizo según la dureza de la roca, para prever la velocidad de avance y el comportamiento de la roca.

Por consiguiente, se continúa con los métodos constructivos utilizados en la excavación.

3.3 MÉTODOS CONSTRUCTIVOS UTILIZADOS EN LA EXCAVACIÓN

Según la naturaleza del terreno se puede atacar la excavación del túnel con una sección más o menos grande, es así como la roca dura permitirá el ataque a sección completa; sin embargo, los terrenos sueltos (arenas, gravas) sólo permitirán avanzar mediante pequeñas secciones y provistos de blindaje. Entre estos extremos existen otros tipos de terrenos en los cuales la perforación se puede realizar por varios métodos que a continuación se describen.

3.3.1 Método convencional.

Este método es implementado actualmente en los diferentes proyectos hidroeléctricos en construcción de Colombia, el cual presenta la característica de excavar los terrenos rocosos con explosivos. Este proceso comprende ciertos lineamientos a la hora de su ejecución o puesta en marcha, como son:

- Una voladura cualquiera, comprende el volumen de una sección y longitud dada, volada y proyectada por explosivos de los barrenos. La longitud de la voladura varía entre 3 a 5ml y la sección de la voladura depende de los requerimientos de diseño.
- El rendimiento de las explosiones depende de la estructura de la roca, por ejemplo el de los planos de estratificación, donde los estratos pueden presentar dos características: ser paralelos al eje del túnel, lo que permite que los gases de la explosión se separen y escapen por las fisuras, con el que el rendimiento es tenue, y ser perpendiculares al eje, que permite el rendimiento normal de la voladura.
- Este método convencional es un ciclo de excavación por medio de voladuras controladas en el frente de excavación y comprende la demarcación y barrenación,

carga y quema de explosivos, ventilación, remoción y transporte de escombros, y otras actividades adicionales.

➤ La duración del ciclo de excavación es la sumatoria de las actividades principales, como demarcación topografía, barrenación, carga, conexión y voladura, rezaga y ventilación.

➤ El ciclo de excavación de un túnel en roca es de tipo secuencial y repetitivo por las actividades que lo conforman, y es un centro productivo eficiente, por su facilidad en el número de operaciones y su alto número de frecuencias, el conocimiento del ciclo permite la programación de metas y la realización de informes o reportes, los cuales podrán solucionar las dificultades que se presenten.

Las actividades que comprenden este ciclo de excavación convencional, son:

➤ La demarcación topográfica del túnel es proporcionar alineamientos y nivel a la siguiente voladura con ayuda del topógrafo.

➤ La barrenación, la cual consiste en perforaciones o agujeros en el frente del túnel para luego cargarlas con explosivos. La perforación puede realizarse manual o mecánicamente según la sección o el tipo de roca a excavar. El diámetro del barreno depende seguidamente de la calidad de la roca y de la sección del túnel. El número de barrenos esquematizados forman el llamado diagrama de barrenación.

➤ La limpieza de los barrenos consiste en un barrido de detritos intermedios que le restan eficiencia a la voladura.

➤ La carga es la colocación del explosivo en los barrenos y la colocación entre barreno y barreno del elemento de encendido, por medio electrónico o no electrónico.

➤ La ventilación de la atmósfera del frente de gases y polvo producido por la voladura, garantiza un ambiente de trabajo cómodo. Los sistemas de ventilación más usados son la introducción de aire fresco por medio de ventiladores de tipo axial o por medio de la extracción de aire usando el mismo tipo de ventilador.

➤ La rezaga consiste en extraer del túnel el material producido por la voladura, los equipos para realizar esta actividad se dividen en equipos de cargue y equipos de acarreo.

➤ El amacize o desabombe es la actividad que se realiza para retirar las partes flojas o sueltas que no hayan caído en la voladura.

➤ Para la colocación del soporte primario se utilizan marcos de acero retacados con madera o únicamente acuñados y embebidos en concreto lanzado (con o sin

malla), anclas aisladas o como un soporte sistemático, dependiendo del tipo de formación del macizo rocoso.

- Las instalaciones de apoyo son para el transporte y conducción de fluidos, la cual permite realizar actividades principales del ciclo.
- Las tuberías se emplean para aire comprimido, para agua de barrenación y lanzado.
- La instalación eléctrica se compone de canalizaciones, alumbrado, elementos de unión conductores, transformadores, subestaciones o plantas de energía necesarias para el suministro de energía. Para complementar el túnel, éste debe poseer un medio de comunicación, para agilizar actividades y reducir tiempo.
- En túneles con longitudes mayores de 3.0km y dependiendo del tamaño de la sección se usan sistemas férreos para rezagado o equipos de barrenación. Las actividades de perforación, voladura, rezaga y transporte deben realizarse en tiempos mínimos para garantizar continuidad en el ciclo (Muñoz et al, 1998, p. 41-42).

3.3.2 Método mecanizado o TBM.

Este método mecánico permite realizar la excavación eliminando el empleo de explosivos, lo que indudablemente se trata de mejoras muy considerables en la excavación, dado por la tendencia a evitar ruidos y vibraciones en los trabajos realizados en zonas habitadas y la exigencia de mayores rendimientos durante la construcción.

La adopción de sistemas de excavación mecánica, conducen indirectamente a una economía en los espesores del revestimiento a igual que el grado de seguridad de la estructura final, y como ventaja general de esta excavación mecanizada consiste en que la construcción del túnel se hace como en una producción en serie.

Estas máquinas fresadoras de galerías y túneles, se distinguen por:

- Máquinas con cinceles rodantes montados en la cabeza.
- Máquinas con cabezales porta-cuchillas.

Para el sistema rodante, se aprieta con gran fuerza mediante la parte frontal de la máquina una serie de cinceles contra la superficie de la roca, de modo que la zona de contacto estén sometidas a una presión que sobrepase la resistencia de la roca, produciendo la rotación de los cinceles por encima de la superficie (proceso de

sincelaje continuo), que exige de presión en el avance; este sistema es el adecuado para rocas intermedias y duras pero según la roca, se utiliza una de las tres clases de cinceles: de botones, dentado o de platillo.

El otro sistema con cabezales porta-cuchillas, trabaja con cinceles montados alrededor de los discos rotatorios y las principales fuerzas a realizar son en sentido del momento de rotación, y como sistema es el más apropiado para tipos de roca menos dura.

Como principio de construcción, para las máquinas fresadoras de túneles, se abren galerías piloto de cerca de 1/3 el diámetro final y a continuación un seguimiento de una o dos máquinas ensanchadoras. Este procedimiento del perforado preliminar con galería piloto, logra que en túneles de gran sección los resultados de sondeo sean exactos desde un principio, de modo que se pueda aspirar hacia adelante el polvo producido por las ensanchadoras y la reutilización posterior por variedad de diámetros.

Con las máquinas fresadoras no solo se obtienen perfiles circulares, sino que con el uso de las fresadoras porta-cuchillas, haciendo oscilar los cabezales fresadores, se pueden perforar perfiles rectangulares en pequeñas galerías transitables.

Para terminar, se señala que las fresadoras o TBM (tunnel Boring Machines), para la perforación son conocidas comúnmente como topes, las cuales en el extremo delantero poseen dos cabezas cortadoras rotativas inversas y concéntricas que recogen los escombros vertiéndolos en la parte superior sobre una banda transportadora soportada por la estructura de la máquina. Las cabezas cortadoras poseen unas cuchillas de dientes y de discos. Estas cuchillas de las cabezas cortadoras deben adaptarse al terreno a trabajar, en cuanto a su forma y repartición.

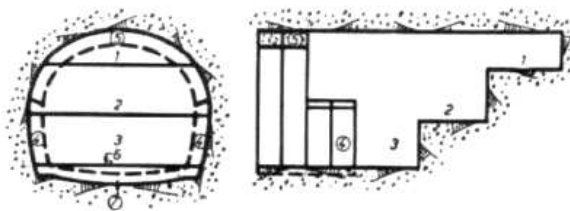
➤ En algunas máquinas la cabeza cortadora está situada en el compartimiento delantero, separado del resto de la máquina por un tabique estanco que admite la entrada del aire comprimido cuando se estén excavando estratos con altos contenidos de agua; mientras que, otros equipos poseen un sistema de grúa en su gran parte trasera, que comprende dos elevadores sucesivos para la colocación de las dovelas de revestimiento, contienen un puesto de mando delantero y unidas por medio de una rotula esférica, lo cual garantiza que el equipo pueda disponer de diferentes presiones dadas por el aire comprimido (Muñoz et al, 1998, p. 41-42).

3.3.3 Método de ataque a plena sección o método inglés.

Así se llama por haber sido aplicado en túneles a través del tipo de terreno que usualmente se localizan en Inglaterra, como son las arenas y areniscas. Este método suele utilizarse para túneles de pequeña sección (menos de 15 m²).

La voladura en túneles de pequeña sección se realiza sobre la sección completa, con apuntalamiento eventual de cerchas metálicas o pernos de roca. Este ataque a plena sección tiene la ventaja de disponer más espacio para trabajo. Este método a sección completa es útil en rocas que posteriormente no necesitan de revestimiento; primero el de la bóveda (sección superior), y el segundo la destroza (sección inferior). En algunos casos se puede utilizar la excavación a sección completa en todo lo ancho del túnel por escalones de ataque, la cual puede realizarse por franjas horizontales comenzando por la parte superior e inferior.

En las excavaciones de las centrales hidroeléctricas subterráneas, ellas generalmente se inician de secciones intermedias con ensanchamientos laterales o por elevación de la bóveda, tratándose el resto como destroza. Ver imagen 21.



Ataque a plena sección con varios pisos.

1, escalón superior; 2, escalón intermedio; 3, escalón inferior; 4, pilares; 5, bóveda;
7, solera (eventualmente).

Imagen 1. Método Inglés.

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004.

3.3.4 Método de la galería en clave o método belga.

Esta metodología es conocida también con el nombre de galería de clave con variaciones en terrenos buenos y malos. Ver imagen 22.

➤ En terrenos buenos: se debe ejecutar rápidamente la bóveda, terminando luego el revestimiento por los muros. El túnel se avanza con una galería de pequeña sección en el eje del túnel por la parte superior a nivel de los arranques de la

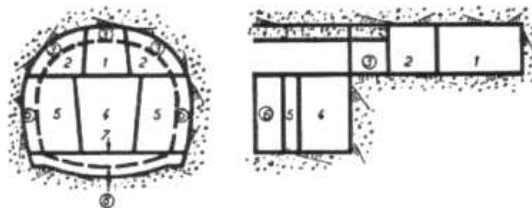
bóveda y se ensanchan los muros laterales, para dejar descubierta la bóveda. Estos ensanches se realizan con mayor rendimiento que el de la galería central, puesto que se trabajan por los costados y no de frente.

A medida que avanzan, se apuntalan radialmente la bóveda con apoyos sobre la destroza, con lo que finalmente se forman un semicírculo superior. Luego se construye la bóveda con apoyos directos sobre el terreno o sobre tablonas longitudinales, que reparten las presiones en el terreno menos bueno.

Después de endurecida la bóveda se retiran los encofrados y puntales para luego comenzar con las excavaciones de la destroza por medio de una cuneta central. Las excavaciones parten de la cuneta hacia los costados alternativamente con longitudes pequeñas, por último, se ejecutan los muros subiendo bajo la bóveda ya construidas. Posteriormente, si se requiere se construye una solera.

➤ En terreno malo: si es poco resistente y exige revestimiento el método varia, porque de lo contrario la bóveda sufriría asentamiento durante la ejecución de la cuneta y destroza.

La variación se encuentra después de haber excavado bajo la bóveda y revestido, luego se excava en zanja revestida el desplazamiento de los muros por elementos cortos a derecha e izquierda, y después de quitar los puntales se excava la destroza a plena sección. Este método se emplea preferiblemente en túneles de gran luz y tiene el inconveniente que necesita vías de evacuación de escombros a diferentes niveles, con el cual transvase de un nivel al inferior. Ver imagen 23.



Método de la galería de coronación en buen terreno.
1, galería de coronación; 2, excavación de la bóveda; 3, bóveda; 4, destroza;
5, zona de los muros; 6, muros; 7 y 8, solera (eventualmente).

Imagen 2. El Método Belga.

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004.

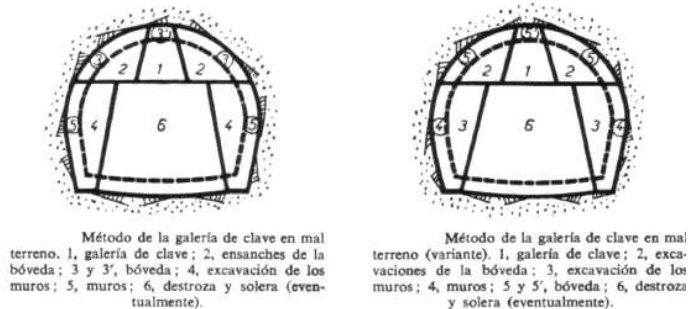


Imagen 3. Variantes para el método Belga.

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004.

3.3.5 Método de las dos galerías o método austriaco.

Se caracteriza por el empleo de una galería de avance en el eje y base del túnel, en el cual se instala una vía de evacuación de uso permanente durante la obra. El procedimiento de las galerías se resume en la denominación que recibe es de Método de las dos galerías.

Luego de avanzar determinada longitud, se realiza verticalmente un pozo hacia la clave del túnel con avances hacia adelante y hacia atrás. La evacuación de escombros se efectúa a través del pozo hacia la galería inferior. Luego de realizada la galería de la clave, se procede a utilizar el método belga: excavación de la bóveda, construcción de esta, destroza, excavación y construcción del revestimiento de los muros. Puede efectuarse un corte de clave elevando en dos fases la galería de base, evitando perforaciones secundarias.

El método de la galería de base se presta para la evacuación y eliminación de escombros y aguas de infiltración respectivamente.

Por otro lado, se posibilita la multiplicación de pozos y ataques en la galería de la clave, resumiéndose en avances de la ejecución del túnel. Ver imagen 24.



Método de las dos galerías.
1, galería de base; 2, galería de coronación; 3, excavación de la bóveda; 4 y 4', bóveda; 5, destroza; 6, excavación de los muros; 7, muros; 8, solera (eventualmente).

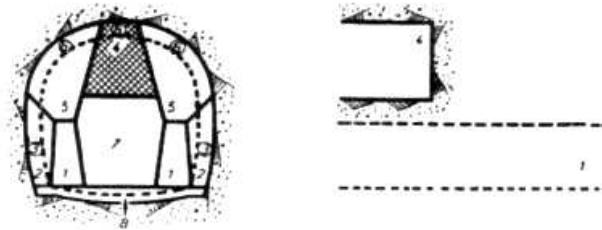
Imagen 4. Método Austriaco.

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004

3.3.6 Método de las tres galerías o método alemán.

Conocido también con el nombre de las tres galerías, se utiliza en secciones superiores a los 50m², en donde se atacan dos galerías de base a derecha e izquierda del túnel, con ensanchamientos y posterior construcción de muros en el terreno malo apuntalados contra la destroza. Después, se ataca una galería de coronación que se ensancha ejecutando la bóveda y dejándola descansar sobre los muros ya construidos y sobre puntales apoyados en la destroza. Luego de endurecida la bóveda se procede a la excavación de la destroza y construcción de la solera para complementar con revestimiento por franjas para excavar por tramos la destroza antes del revestimiento.

Para aplicar este método es preferible una gran sección de túnel, que se mostrara que durante la construcción, donde la destroza asegurara los empujes laterales del terreno. Ver imagen 25.



Método de las tres galerías.

1, galerías de base; 2, ensanches de los muros; 3, muros; 4, galería de clave; 5, excavación de la bóveda; 6 y 6', bóveda; 7, destroza; 8, solera (eventualmente).

Imagen 5. El Método Alemán.

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004

El método belga es el más utilizado en túneles cortos, cuando la evacuación de escombros no es un problema importante; donde sí constituye un problema importante es en el caso de los largos túneles de montaña, por lo cual se prefiere utilizar el método austriaco. En túneles con menores secciones el más utilizado es el inglés, y en terrenos de baja calidad el austriaco.

3.4 OPERACIONES BÁSICAS EN LA CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES

En cualquier sistema de construcción de un túnel se puede hablar de cuatro operaciones básicas: el arranque, la carga, el transporte y el sostenimiento o (revestimiento). En las secciones pequeñas, de 3 a 15m², el espacio disponible es escaso y el trabajo debe obligatoriamente ser repetitivo. Este ciclo se convierte en crítico, ya que una vez seleccionado el sistema de construcción es muy difícil modificarlo si surgen imprevistos. En las secciones medianas, de 15 a 50m², es factible modificar parcialmente el ciclo en caso de una mala elección del sistema. En las secciones grandes, mayores de 50m², la dependencia crítica es menor, aunque dado el gran tamaño de los equipos que se emplean o por cautela ante los problemas de sostenimiento, se decide la construcción en varias fases, lo cual lleva a la problemática de las secciones medias.

3.4.1 El arranque.

La excavación se puede realizar por tres métodos que son: manual, con explosivos y mecanizado.

- Método manual: se realiza mediante herramientas neumáticas, de potencia ligera o media según las necesidades, que van provistas de picas o paletas según sea la dureza del terreno. Con ellas se rompe el frente o se perfila, como complemento a otros sistemas. En la actualidad sólo se utiliza como único método en secciones de túneles muy pequeñas (3 o 4m²).
- Método con explosivos: en la actualidad el arranque con explosivos es el método que se utiliza más frecuentemente cuando el terreno es roca, ya que se adapta a cualquier tipo de dureza (roca blanda, media o dura).

La excavación utilizando la perforación y los explosivos produce inevitablemente una operación cíclica y no continua, que consta de los siguientes pasos:

- Perforación del frente, siguiendo un patrón y con la profundidad adecuada para el avance previsto en la voladura (plan de voladura o tiro).
- Retirada del equipo perforador.
- Carga del explosivo y retirada del personal.
- Detonación de las cargas.

- Ventilación para eliminar humo, polvo y vapores.
- Desprender la roca suelta.
- Realización de la entibación provisional si es necesario.

En secciones grandes, como ya se ha comentado, el avance del túnel se establece al menos en dos fases: en primer lugar, la semisección superior, también llamada avance en bóveda o calota, y en segundo lugar, la semisección inferior o destroza. Si las dos fases se excavan con explosivos el ciclo se complica aún más, pero normalmente esta segunda fase se excava con maquinaria convencional, si la dureza de la roca lo permite. Este tipo de maquinaria se describirá más adelante en los métodos de excavación mecánica.

Para la perforación del frente se utilizan perforadoras neumáticas (ver imagen 26), que operan con aire a presión y que pueden ser de percusión, de rotación o combinación de ambas; las hay manuales, y otras que son máquinas pesadas montadas sobre jumbos (grúas móviles de caballete).

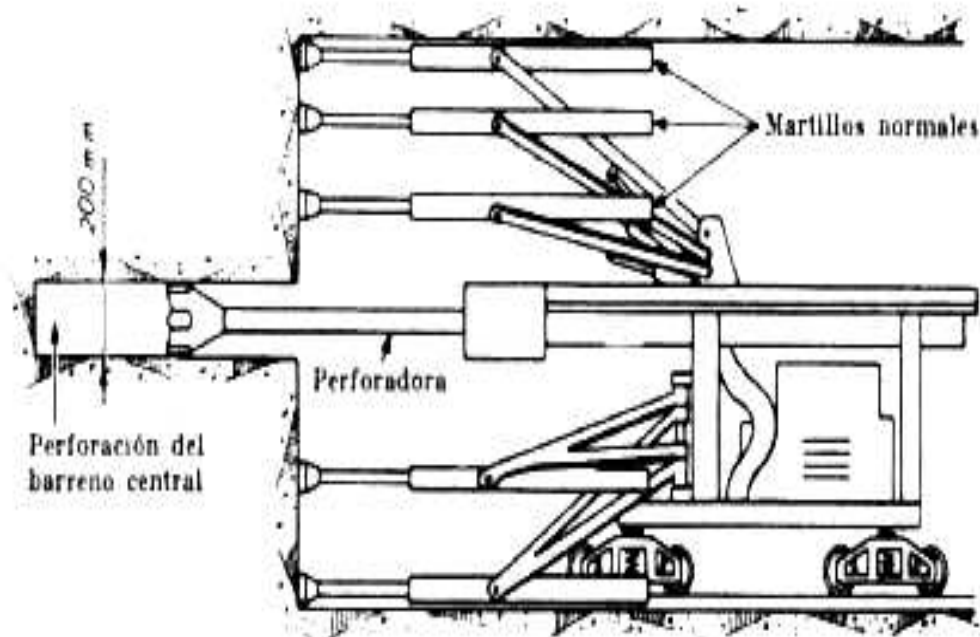


Imagen 6. Perforadora Ingessoll.

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004

En el método con explosivos es importante el llamado plan de voladura. En la imagen 27, el punto negro representa el taladro cargado de explosivo, y la numeración indica el orden que se hace explotar a cada uno de ellos, lo que consigue con detonadores retardados que se activan eléctricamente (microretardos).

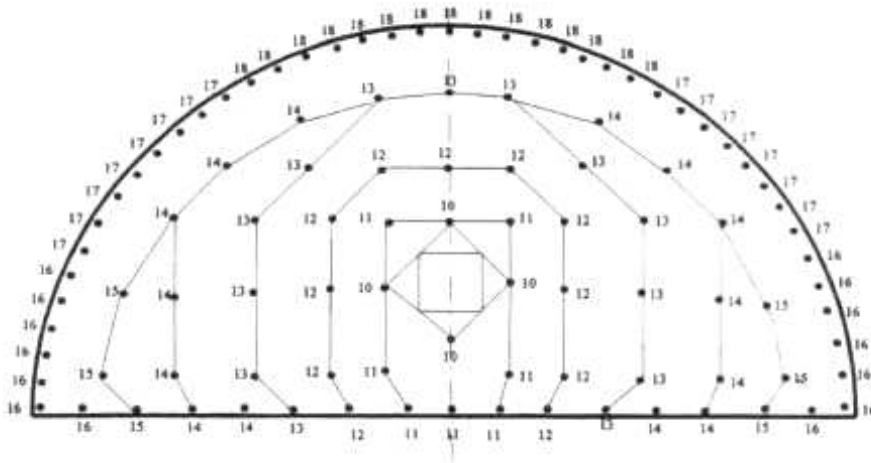


Imagen 7. Esquema del plan de voladura.

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004

Según el esquema, en el plan de voladura (ver imagen 28) se distinguen las siguientes partes esenciales:

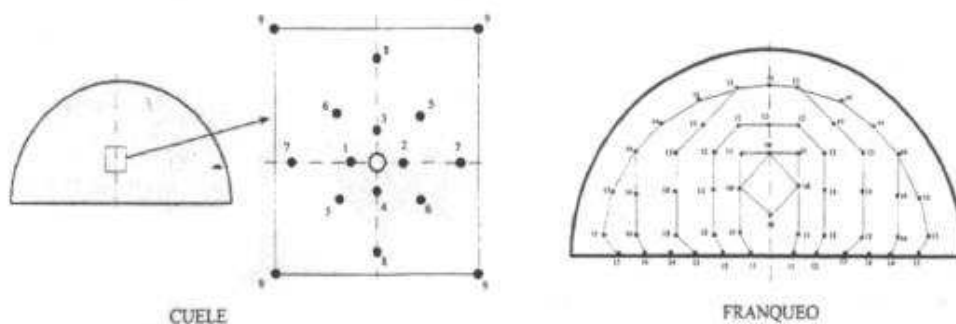


Imagen 8. Detalle del plan de voladura

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004

- El cuele está situado en la parte central del esquema de tiro (ver ampliación), es la parte que primero sale en la voladura, con objeto de facilitar la salida al resto de la pega (volumen total que se pretende derribar con una voladura). En el cuele cabe destacar el taladro central de mayor diámetro, que no se carga con explosivo y cuyo objeto es dar escape al cuele.
- El franqueo sale inmediatamente después del cuele y es el que rompe el mayor volumen de roca.
- Las zapateras, son los barrenos (ver imagen 29), situados en la parte central y en los extremos de la línea más baja de la sección (puntos 11 y 16).
- El recorte, es la última fase de la pega y tiene por objeto, como la propia palabra indica, recortar el terreno circundante. Esta última fase adquiere hoy en día una mayor importancia debido a la utilización del Nuevo Método Austriaco (NMA), el cual hay que cuidar mucho del no dañar la roca durante la voladura, pues dicho método se basa en la propia autoresistencia del terreno.

La situación y profundidad de los taladros que se quieran efectuar está claramente acotada en el plan de tiro, de manera que, una vez marcado en el frente al menos un punto de referencia tanto altimétrica como planimétrica por el técnico topógrafo, el encargado del tajo marque mediante una plantilla dichos puntos para que sean taladrados y posteriormente cargados. Una vez efectuada la voladura, el técnico responsable de la topografía deberá comprobar la situación real del nuevo frente de excavación resultante de la voladura.

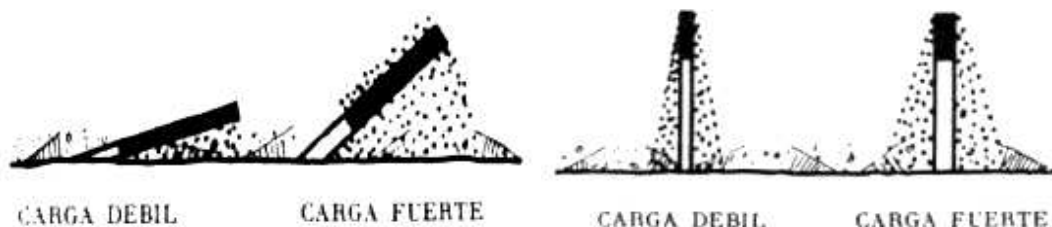


Imagen 9. Tipos de barrenado.

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004

- Métodos mecanizados, distinguiremos los métodos en los que se utiliza la maquinaria convencional, las tuneladoras y las rozadoras.

a) Con máquinas convencionales, se debe ver la imagen 30.



Imagen 10. Miniexcavadora.

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004.

En terrenos de roca media o blanda, y en secciones medias y grandes, un método mecanizado es el convencional con tractores (bulldozer – imagen 31) dotados de ripper, y para terrenos de mayor dureza, palas cargadoras. Existen también versiones de estas máquinas, de gálibo mínimo o brazos cortos, que solucionan los problemas de espacio.



Imagen 11. Bulldozer con ripper

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004.

b) Con tuneladoras, podemos definir las como máquinas que realizan la excavación a plena sección mediante la acción directa y continuada de útiles o herramientas de

corte. Este tipo de máquinas llevan integrado desde el primer momento el revestimiento al proceso constructivo, mediante la colocación sistemática del mismo detrás de la máquina. Se dividen en dos tipos:

➤ Máquinas topo (TBM, Tunnel Boring Machine – ver imagen 32): 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.

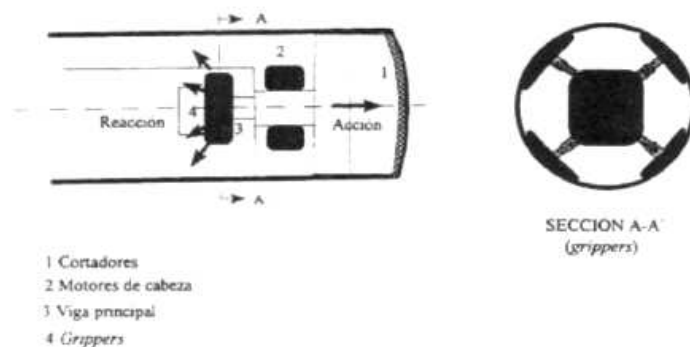


Imagen 12. Esquema de un topo.

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004

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. Ver imagen 33.

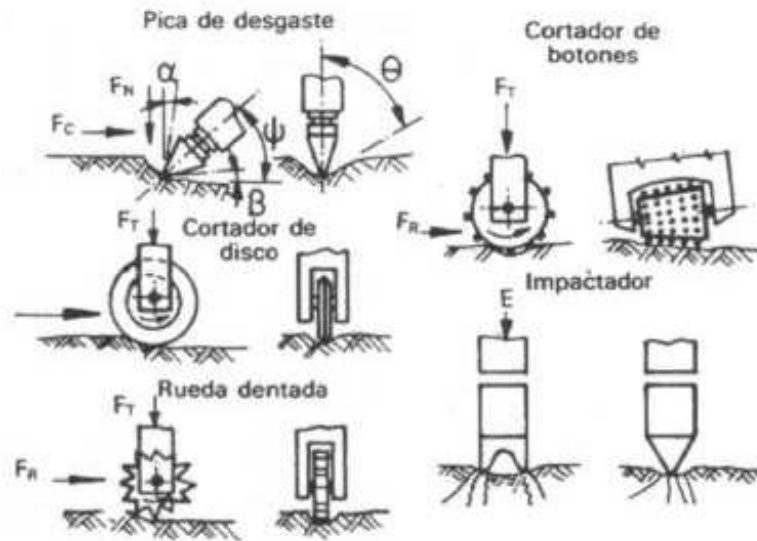


Imagen 13. Tipos de cortadores.

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004

La tecnología actual permite fabricar topes desde 2,5m de diámetro, hasta de 12m, también se fabrican topes dúplex formados por uno piloto de 3 a 4m de diámetro combinado con una cabeza ensanchadora de hasta 12m. Estos son muy útiles en galerías de pendiente muy inclinada, donde la excavación se realiza de abajo hacia arriba con el topo piloto, para posteriormente ser ensanchada en la dirección contraria.

Un topo puede llevar bulonadoras o empernadoras que trabajan según se avanza, o mecanismos para colocar cerchas metálicas; también se puede preparar para el revestimiento con dovelas prefabricadas de hormigón en el caso que se esperen grandes deformaciones de la roca. Ver imagen 34 y 35.

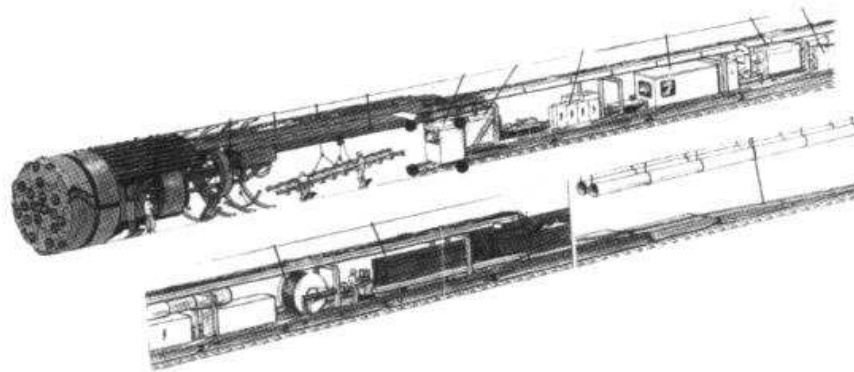


Imagen 14. Máquina topo.

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004.

El rendimiento del avance con topo suele estar entre 1,5 y 2,5m/h; sin embargo, una de las desventajas mayores que presenta respecto a otros métodos es la falta de flexibilidad cuando se producen incidencias por accidentes geológicos o por fuertes aportaciones de agua, debido a la longitud importante de toda la estructura que le acompaña (hasta 300m). Esta longitud es la que limita el radio de las curvas, que no conviene que sean menores de 100 m.



Imagen 15. TBM usada en el Canal de la Mancha.

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004.

En cuanto a pendientes, un topo puede trabajar en condiciones óptimas, no sólo con las pendientes usuales para el transporte sobre vía (el más usual, con

pendiente media del 3% y hasta del 7% en rampas cortas), sino en bastantes superiores, llegando hasta el 15 y el 20%. Se ha desarrollado y modernizado en el transcurso del tiempo y su empleo de avance es ventajoso en tipos de roca (molasa, marga, arenisca), así como en material suelto (aluviones y arenas inestables) y suelos sin cohesión. (Ver imagen 36).

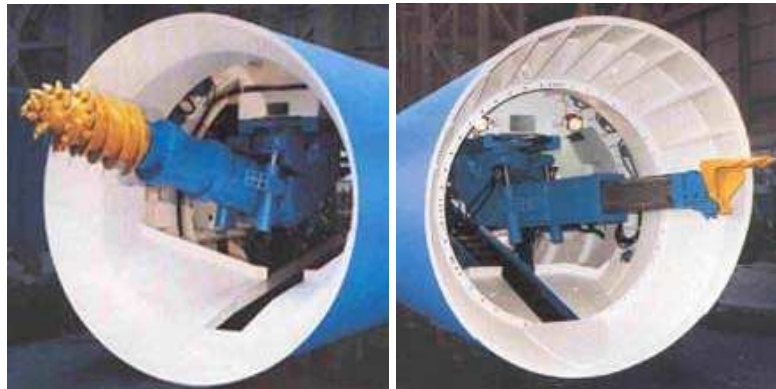


Imagen 16. Escudos con rozadora y con excavadora.

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004.

a) Avance por Escudo, para Muñoz et al (1998, p.49-52), aunque este tipo de excavación no utiliza ninguna parte rotatoria, este procedimiento debe ser considerado de tipo mecanizado. El principio avance de este sistema, se hace con filo anular de acero que formado el escudo acoplado a un tubo de acero cilíndrico, que se aplica frontalmente contra el terreno mediante prensas dirigidas perimetralmente y al mismo tiempo se retira el material aflojando. (Ver imagen 37).

Las prensas se apoyan atrás sobre un anillo de apoyo sobre los segmentos de hormigón armado prefabricados y montados, que después de una carrera completa del embolo se encogen y se coloca un nuevo anillo de segmentos de hormigón armado, contra los cuales las prensas se pueden apoyar de nuevo y así se continua al mismo ritmo. El espacio entre los segmentos de hormigón armado y la roca atravesada se llena con inyecciones, lo cual permite como cualquier otro tipo de excavación mecanizada, que las restantes fases de construcción se hagan prácticamente en forma continua.

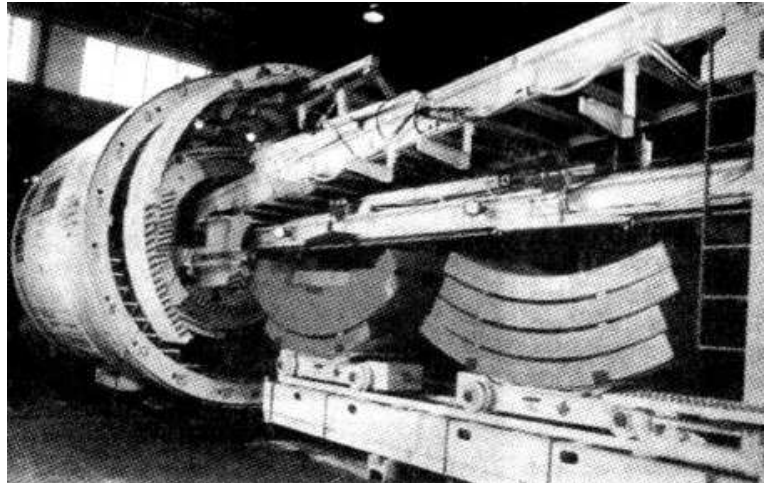


Imagen 17. Escudo con las piezas de un anillo de revestimiento.

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004.

b) Con Fresadora, para el sistema rodante se aprieta con gran fuerza mediante la parte frontal de la máquina una serie de cinceles contra la superficie de la roca, de modo que la zona de contacto estén sometidas a una presión que sobrepasen la resistencia de la roca. Produciendo la rotación de los cinceles por encima de la superficie (proceso de sinclaje continuo) que exige de presión en el avance, este sistema es el adecuado para rocas intermedias y duras pero según la roca, se utiliza una de las tres clases de cinceles: de botones, dentado o de platillo. (Ver imagen 38).

El otro sistema, el de cabezales porta-cuchillas trabaja con cinceles montados alrededor de los discos rotatorios y las principales fuerzas a realizar son en sentido del momento de rotación. Y como sistema es el más apropiado para tipos de roca menos dura.

Como principio de construcción, para las máquinas fresadoras de túneles; en primer plano se abren galerías piloto de cerca de $1/3$ el diámetro final y a continuación un seguimiento de una o dos máquinas ensanchadoras. Este procedimiento del perforado preliminar con galería piloto, logra que en túneles de gran sección los resultados de sondeo se han exactos desde un principio, que se pueda aspirar hacia adelante el polvo producido por las ensanchadoras y reutilización posterior por variedad de diámetros.

Con las máquinas fresadoras no solo se obtienen perfiles circulares, sino que con el uso de las fresadoras porta-cuchillas, haciendo oscilar los cabezales

fresadores, se pueden perforar perfiles rectangulares en pequeñas galerías transitables.

En algunas máquinas la cabeza cortadora está situada en el compartimiento delantero, separado del resto de la máquina por un tabique estanco que admite la entrada del aire comprimido cuando se estén excavando estratos con altos contenidos de agua. Otros equipos poseen un sistema de grúa en su gran parte trasera que comprende dos elevadores sucesivos para la colocación de las dovelas de revestimiento, contienen un puesto de mando delantero y unidas por medio de una rotula esférica, lo que garantiza que el equipo pueda disponer de diferentes presiones dadas por el aire comprimido.

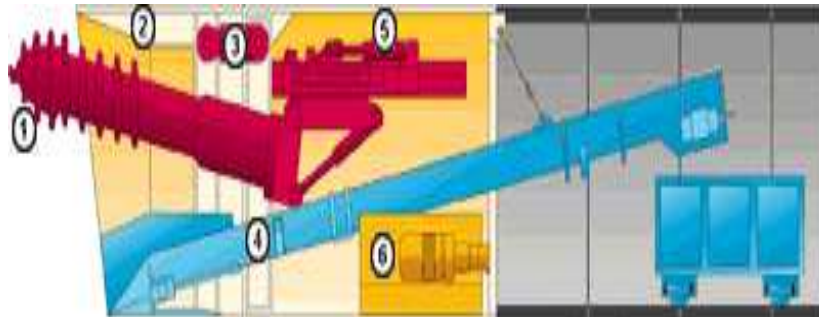


Imagen 18. Esquema de un escudo con fresadora.

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004.

Ahora se enumeran sus partes:

1. Rozadora
2. Escudo
3. Cilindros de mando
4. Cinta transportadora
5. Tubo de la máquina
6. Grupo hidráulico

3.4.2 La carga.

En secciones pequeñas, las palas de volteo de accionamiento neumático, sobre vía o sobre rueda (ver imagen 39 - 40), fueron los equipos aplicados inicialmente a los túneles de pequeña sección, y por supuesto, siguen empleándose. Hay versiones eléctricas que siguen el mismo principio, combinadas con grupos hidráulicos para

el volteo de cuchara. La carga se hace por descarga del cucharón sobre el vehículo, en general vagones metálicos sobre vía.



Imagen 19. Esquema pala - cinta

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004

Las palas de volteo se fabrican en gamas desde los 150 litros de capacidad de cuchara adecuadas para secciones pequeñas, hasta los 700 litros para secciones medias. Otro equipo de carga lo forman los cargadores de raquetas, que penetran en la parte inferior del montón de escombro y lo van recogiendo por medio de dos o más paletas conduciéndolo hacia una cinta transportadora que lo eleva a la altura conveniente para el llenado del vehículo.

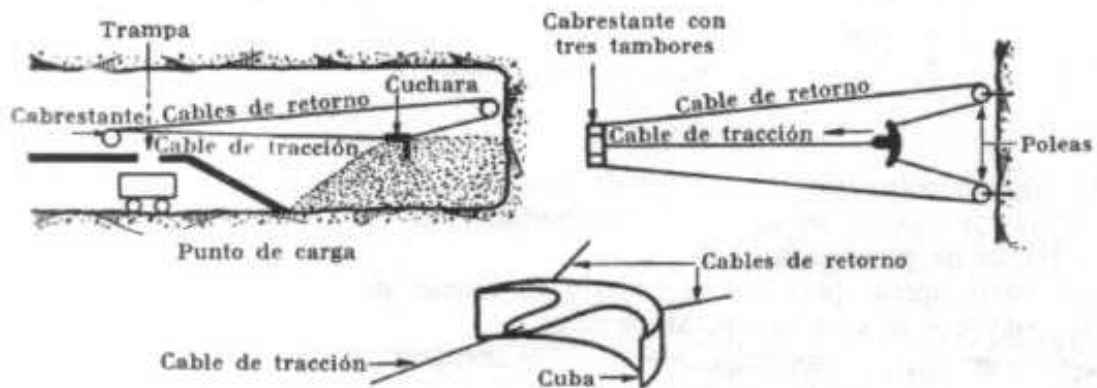


Imagen 20. Raqueta o trailla.

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004.

Sin embargo, en casos extremos de sección mínima o en fases de sección mínima, no hay más remedio que cargar manualmente el escombro, que si bien suele hacerse sobre cimbras que lo elevan al nivel conveniente.

En secciones grandes, la carga de escombros se suele hacer con equipos totalmente convencionales, como ya se ha indicado al hablar del arranque.

3.4.3 El transporte.

Las palas rápidas, desde hace alrededor de 25 años vienen utilizándose con éxito palas cargadoras de estricto gálibo y alta velocidad de desplazamiento que efectúan la carga y el transporte conjuntamente, con capacidades de cuchara de 6 hasta 11m³ y velocidades de hasta 50km/h. Ver imagen 41.

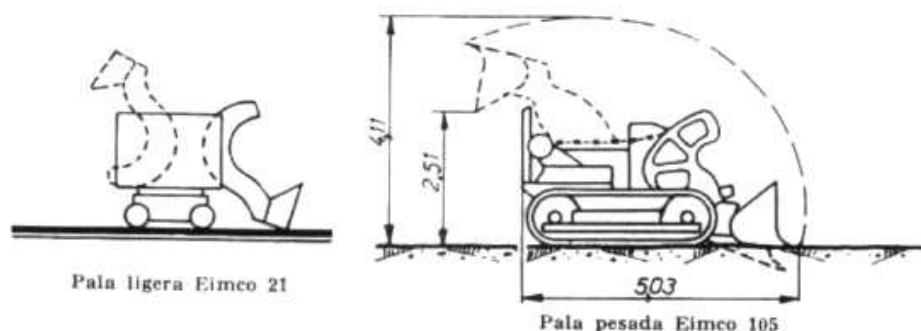


Imagen 21. Palas Eimco

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004.

Respecto a la rentabilidad, las palas rápidas pueden ser la solución ideal para túneles de hasta 600 o 700m de longitud. Si la sección es grande y pueden cruzarse dos palas en pleno recorrido, son rentables para longitudes de 1.200 a 1500m.

El transporte sobre vía, es una alternativa que se puede considerar en secciones pequeñas y medias. La tracción puede ser de gasóleo o eléctrica, en función de los requerimientos de ventilación. Las pendientes no deben rebasar el 3% ascendente pero están permitidas las rampas de hasta el 7% si son cortas.

Las operaciones de carga y transporte tienen una gran influencia en el ciclo total de la excavación del túnel (en el caso de adoptar la excavación con explosivos estas operaciones representan como mínimo el 50% del ciclo). Es por ello que adquiere

gran importancia una buena conservación de la vía y una adecuada elección del sistema de cambio de vagones (vacíos-cargados) en el frente. Ver imagen 42.

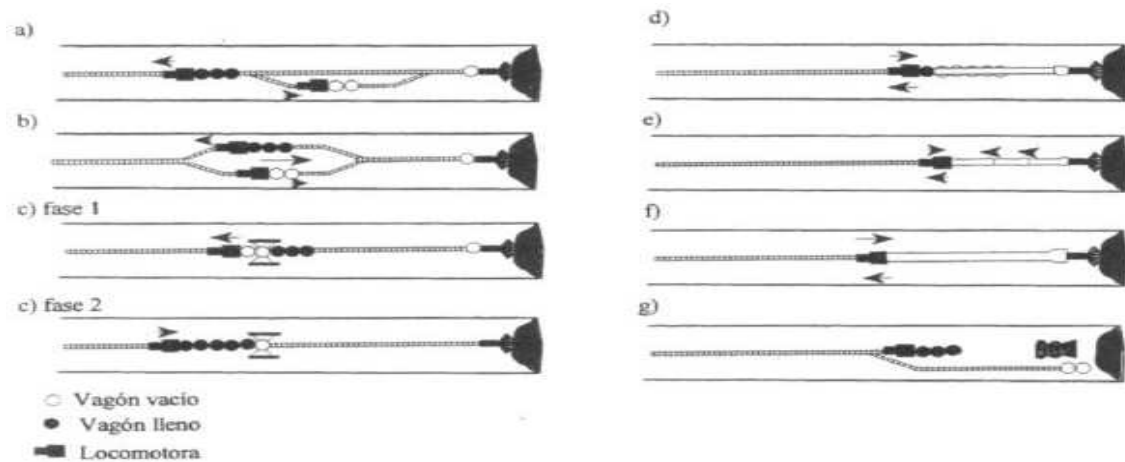


Imagen 22. Soluciones para el cambio de vagones.

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004.

Aquí se dispone de un apartadero fijo lo más próximo al frente, es el llamado cambio californiano que dispone de dispositivos hidráulicos para adelantarlo según progresa el frente. Además, proviene de la minería y se trata de un elevador de vagones vacíos, que permite el acceso de éstos a la zona de carga. Su limitación es la falta de gálibo en secciones pequeñas.

De modo que, una cinta elevada bajo la cual se sitúa el tren de vagones vacíos, es la solución más frecuentemente adoptada cuando el arranque se hace con tuneladoras.

Los vagones auto cargables que transvasan el escombro de uno a otro, o bien, monovagones de gran longitud y fondo móvil; son soluciones útiles para secciones pequeñas. El transporte se realiza en vagones pero la carga se hace con palas cargadoras de vuelco lateral.

En el transporte sobre caminos, se utilizan vehículos pesados tipo dumper (ver imagen 43 – 44), que unen a la rapidez de descarga por basculado una gran maniobrabilidad. Existe una gran gama que se adaptan a las limitaciones de sección y a las características de la cargadora adoptada.



Imagen 23. Dumper autocargante.

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004.



Imagen 24. Dumpery pala excavadora (al fondo).

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004.

3.4.4 Revestimiento.

El bulonado o empernado hoy en día está universalmente aceptado como método de sostenimiento provisional o definitivo. Los bulones utilizados normalmente son barras de acero de 25 a 32mm. De diámetro y de 3 a 4m de longitud y tienen como misión unir los estratos alrededor de la sección excavada para formar una bóveda natural. Los bulones quedan anclados por adherencia del mortero o resina que se introduce en el fondo y a lo largo del taladro. El extremo que queda en el exterior del taladro dispone de rosca para tuerca y arandela plana que se ajusta contra la superficie de la roca.

También existen en el mercado variantes para el bulonado provisional, como por ejemplo los bulones de agua, tubos metálicos cuyas paredes se deforman contra las del taladro al inyectar agua a presión. Este sistema permite una actuación muy

rápida en terrenos inestables, o bien en un bulonado previo si hay agua que dificulta el fraguado de morteros o resinas. También como bulonado provisional en frentes inestables, existen los bulones de fibra, que en general se fabrican con materiales plásticos fibrosos que logran un simple armado o cosido compatible con la posterior excavación del macizo.

Las cerchas, entibación con madera, pasó de la minería a la construcción civil y, de la misma forma, los arcos o cerchas metálicas empleadas hoy en día en ingeniería civil fueron aplicados antes en la minería. Ver imagen 45.

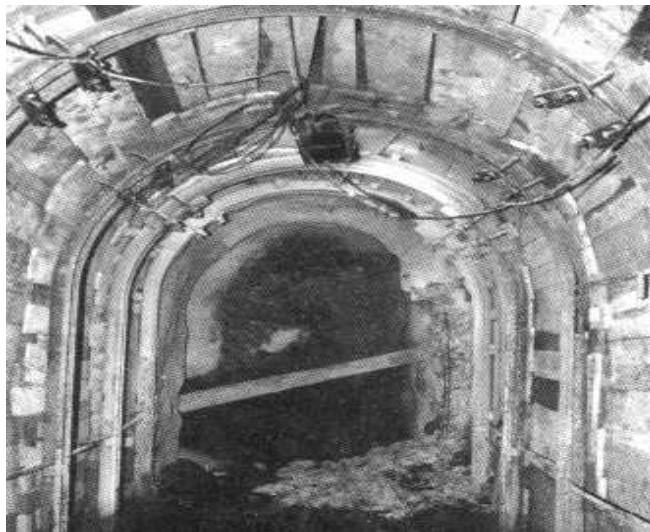


Imagen 25. Cerchas con tablonos en el sostenimiento provisional de una galería de avance.

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004.

Estas son viguetas de acero con sección en H y curvadas a la sección transversal del proyecto del túnel, de manera que normalmente con tres cerchas, dos en los hastiales (pies de marco) y una en la bóveda (corona), se puede cubrir la sección completa. Si hay roca poco compacta o suelta entre dos secciones con cerchas se pueden añadir tablonos (si es temporal) o planchas de acero entre éstas.

El Hormigón proyectado, se ha convertido en una técnica que cada vez se utiliza más para el sostenimiento del terreno, solo o en combinación con bulones, cerchas o con refuerzo de malla de acero. Antes que el hormigón proyectado se empezó a emplear el mortero (arena + cemento + agua) proyectado, para crear un anillo protector de la roca en las formaciones susceptibles de meteorización rápida. Fue a finales de los 50 cuando se empezó a utilizar hormigón proyectado, es decir, mezcla con áridos de hasta 16 o 18mm, con la consiguiente problemática de los aditivos para la aceleración del fraguado.

El árido, el cemento y el agua se mezclan por distintos procedimientos. Esta mezcla llega por una gruesa manguera hasta la pistola que, manejada por el operador, dispara fuertemente contra la roca limpia. La mezcla se introduce en las grietas y fisuras y forma sobre la superficie de la roca una capa fuertemente adherida. Con el hormigón proyectado se pueden obtener con rapidez espesores de 10 a 15cm, resolviendo no sólo los problemas de meteorización sino evitando los desprendimientos en zonas muy fracturadas. Ver imagen 46.



Imagen 26. Sostenimiento mixto (cerchas, mallas y hormigón proyectado).

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004.

a) Pre anillos sobre chapa desplegada (método Bernold), se conoce también como método Bernold (ver imagen 47), puesto la marca suiza fue quien desarrolló las chapas desplegadas o acuchilladas. La idea es hormigonar sobre un encofrado formado por cerchas metálicas y placas acuchilladas que quedan incorporadas al hormigón y que cumplen una triple función, de protección contra la caída de piedras sueltas, como encofrado y como armadura del hormigón de relleno.

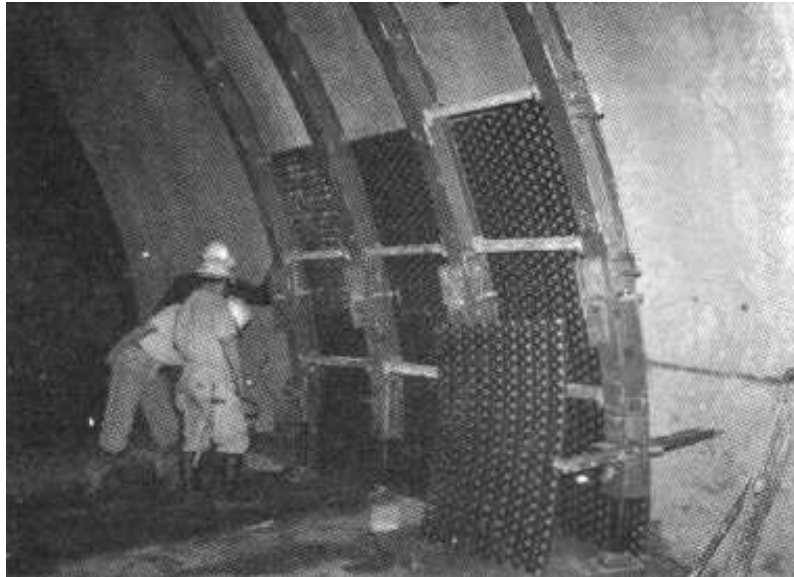


Imagen 27. Método Bernold antes del hormigonado definitivo.

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004.

b) El preserrado de la roca (ver imagen 48- 49), se construye un preanillo como sostenimiento provisional, encofrado por el propio terreno y hormigonado por proyecciones. Consiste en cortar con sierras mecánicas de cadena, similares a las empleadas en trabajos forestales, un anillo de un espesor entre 15 y 20cm. y una anchura alrededor de los 50 cm. Si en vez del anillo completo se actúa con dovelas sucesivas, en terrenos inestables el tiempo en que el hueco estará abierto es mínimo.

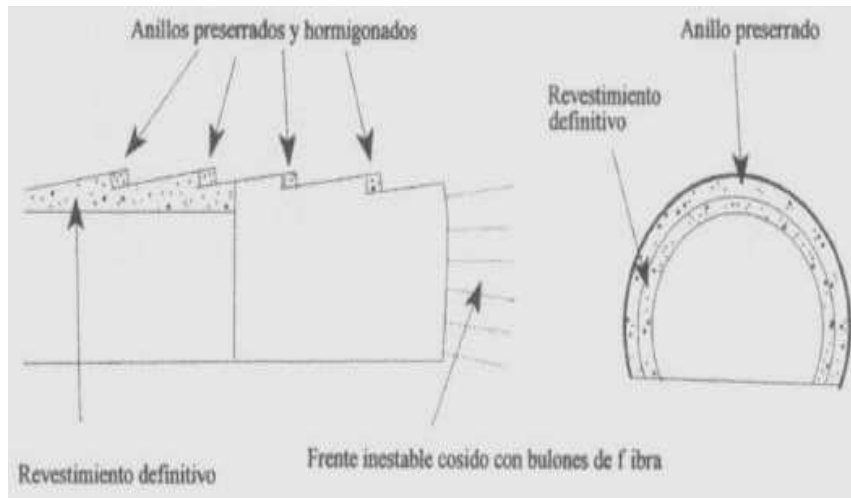


Imagen 28. Preserrado en rocas blandas.

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004.

Este método se usa también para rocas duras que han de tratarse con explosivos, como una técnica más para resolver los casos en que las limitaciones por vibraciones son muy estrictas.



Imagen 29. Preserrado en rocas duras (explosivo).

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004.

Las dovelas son anillos circulares segmentados, normalmente de hormigón más o menos armado. Como revestimiento permanente tienen la ventaja de que inmediatamente después que se han colocado proporcionan una fuerte estructura de soporte, siempre que la inyección de hormigón en el trasdós (entre el terreno y el anillo) se realice lo antes posible. Se fabrican distintos tipos de dovelas: Las dovelas ordinarias inyectadas, que son de hormigón medianamente armado que usan llaves sencillas para su unión. El trasdós debe inyectarse inmediatamente a su colocación.

Las dovelas expandidas, son dovelas de hormigón en masa o ligeramente armadas. Un erector las coloca sobre el anillo metálico de soporte, y con una dovela en forma de cuña se provoca la expansión o aumento del diámetro hasta el contacto total con el terreno. No precisa, por lo tanto, inyección en el trasdós.

Las dovelas atornilladas, son de hormigón fuertemente armado o de acero fundido; se atornillan entre sí y al anillo anteriormente colocado. La geometría que se logra es perfecta y la inyección en el trasdós se realiza en condiciones óptimas. En la imagen 50 observamos un tipo de máquina para colocar diferentes dovelas.

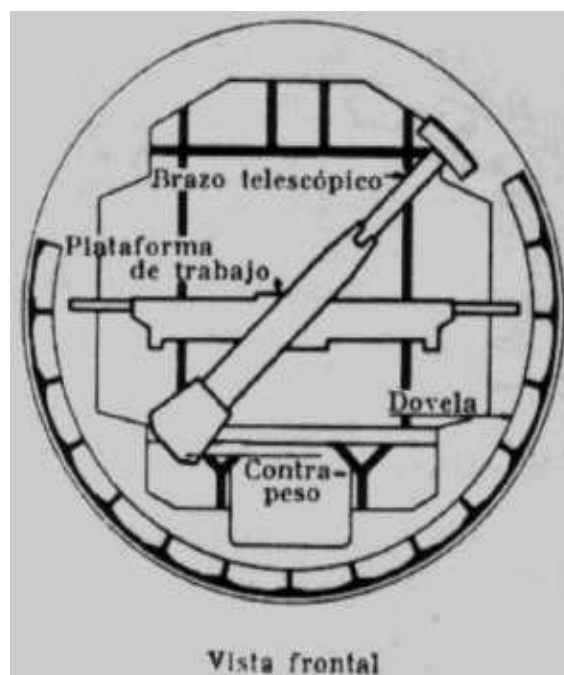


Imagen 30. Máquina para colocar dovelas.

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004.

Regularmente la construcción de túneles se realiza mediante un número restringido de bocas de ataque para reducir los costos en el tiempo de su ejecución. La maquinaria a utilizarse son debido a las particularidades de cada proyecto, tales

como la geología, diámetro, longitud del túnel, etc., cada uno necesitará una maquinaria distinta pero que realicen la misma función, aunque con algunas excepciones en la construcción de este tipo de proyectos.

3.5 EL NUEVO MÉTODO AUSTRIACO (NMA)

De acuerdo con Estroch y Gómez (2003, p. 94-97), cuando se empezó a aplicar el método austriaco, se vio pronto que no sólo es un sistema, sino una metodología de construcción que persigue un objetivo básico: la roca debe ser el propio elemento resistente, para lo cual hay que alterarla lo menos posible, y su capacidad debe ser mejorada mediante la utilización de elementos de sostenimiento con aplicaciones sucesivas en función de las deformaciones que se vayan observando durante la construcción.

El bulón trabaja unido al mortero, a la cercha o a ambos, como elementos de una estructura resistente añadida al anillo rocoso, para crearle o aumentarle una capacidad de auto sostenimiento en función de una deformabilidad controlada.

Ideas fundamentales del NMA:

- Obligar al terreno a colaborar en su propia estabilidad, reduciendo al máximo la pérdida de sus características iniciales.
- Permitir una cierta deformación (convergencia) controlada, con objeto de disminuir las necesidades de sostenimiento.
- En terrenos con fuertes convergencias, la puesta en obra del sostenimiento debe ir orientada hacia la consecución de una rigidez progresiva.
- En túneles urbanos con poca cobertura en los que no se pueden tolerar convergencias que ocasionarían asentamientos en la superficie, la tecnología del NMA sigue siendo aplicable, pero buscando la máxima rigidez en el menor plazo posible.
- El NMA tiene la ventaja de su fácil adaptación a condiciones de terreno cambiantes o inciertas pues permite, si el terreno así lo aconseja, variar el sostenimiento sin mayores dificultades.
- Lo que respecta a las fases de excavación suele atacarse en sección dividida (media sección superior y destroza), aunque en terrenos de baja calidad, con convergencias importantes, la distancia entre ambos frentes

debe reducirse al máximo, buscando en el menor plazo posible una sección lo más cercana a la circular.

3.6 AUSCULTACIÓN

3.6.1 Finalidad.

Es necesaria una auscultación para poder seguir la evolución en el tiempo de los fenómenos mecánicos que acompañan la construcción de un túnel. El papel de la auscultación será necesario desde la fase de proyecto, por ejemplo efectuándola en la galería de reconocimiento, con lo que se podrá observar in situ el comportamiento del terreno y aplicar las conclusiones obtenidas a la definición del proyecto.

También, durante los trabajos de construcción del túnel se requiere una auscultación continua con el fin de verificar la eficacia del sostenimiento utilizado, así como supervisar la influencia de los trabajos en el entorno, como son los asentamientos en superficie o la afectación a túneles o galerías vecinas.

Por último la auscultación debe permitir garantizar la seguridad de la obra en explotación realizando medidas periódicas durante toda la vida del túnel.

3.6.2 Tipos de medidas.

Las medidas de convergencia (ver imagen 51), es la medida más simple y más representativa es la de la convergencia de una sección. Con ella se obtiene el desplazamiento relativo de dos puntos situados en las paredes del túnel. Para esto, se colocan inmediatamente después de la excavación, una serie de clavos en la sección transversal al eje longitudinal del túnel. Según la importancia del túnel los puntos de control de una sección transversal pueden ser tres o más; habitualmente son uno en la clave, dos en los riñones y dos en los hastiales, se mide la variación de longitud entre puntos opuestos y se nivela el punto en clave para tener constancia del movimiento (vertical) absoluto de éste.

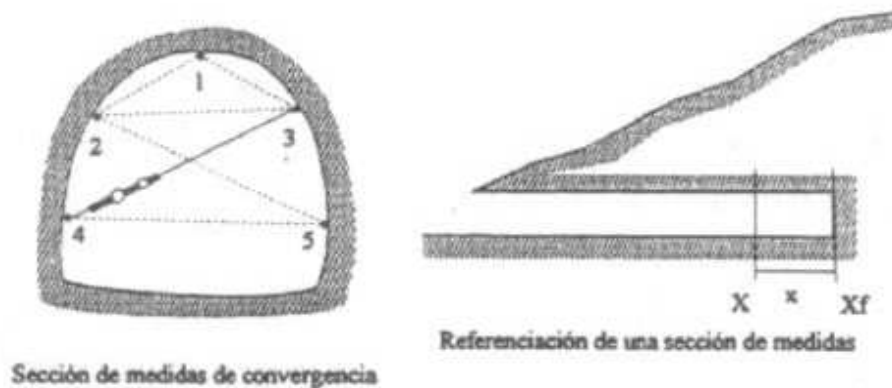


Imagen 31. Medidas de convergencia.

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004.

Para la medida de longitudes se pueden utilizar aparatos llamados extensómetros (ver imagen 52), que con ayuda de hilos invar mantenidos a presión constante por un dinamómetro consiguen precisiones de la décima de milímetro, precisiones utilizadas en la fase de construcción, y hasta de la milésima de milímetro para túneles en explotación. La cinta metálica milimetrada puede ser utilizada cuando la precisión exigida es menor. La nivelación del punto en clave será geométrica y de precisión.



Imagen 32. Extensómetro.

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004

La distancia entre secciones de convergencia depende de la naturaleza y heterogeneidad del terreno, habitualmente se suelen disponer cada 20 o 30 m, aunque en tramos delicados esta distancia puede reducirse considerablemente. Será necesario conocer también la distancia al frente de excavación (x) en cada toma de medidas de convergencia.

El estudio detallado de la convergencia de la sección de un túnel se hace con la ayuda de tres gráficos:

En el primero se representa la distancia al frente de excavación (x) en función del tiempo (t). La convergencia de una sección crece más rápidamente cuando el frente de excavación se aleja; por lo tanto es necesario hacer la medida de referencia lo más cerca posible del frente. El segundo y el tercero dan respectivamente las variaciones de la convergencia (c) en función del tiempo (t) y en función de la distancia x .

En la fase inicial suelen efectuarse lecturas diarias que se van espaciando progresivamente en función de la evolución de la curva convergencia-tiempo. Ver análisis según imagen 53.

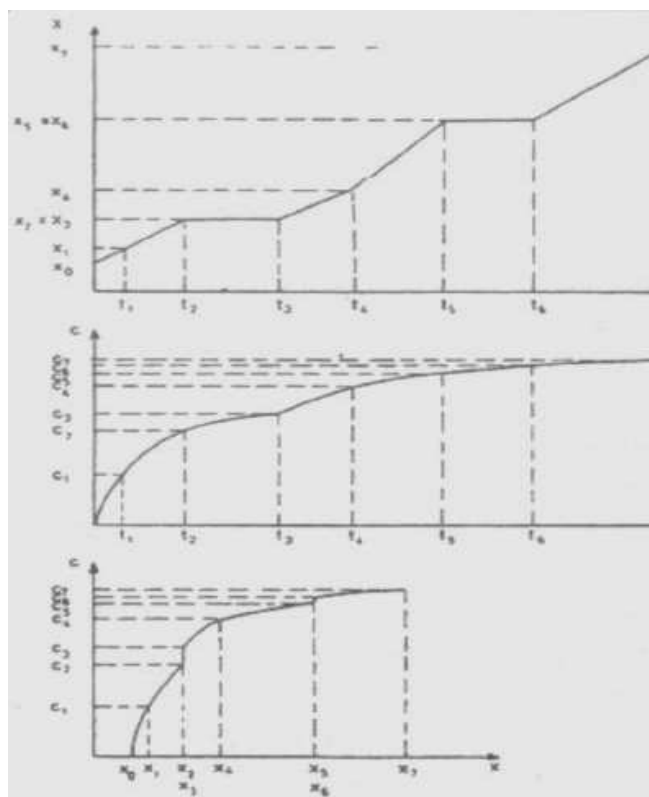


Imagen 33. Estudio de la convergencia.

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004.

La medida de desplazamientos absolutos y la medida de convergencia de una sección pueden ser útilmente completadas por la medida de desplazamientos absolutos de puntos situados en el interior del macizo gracias a los extensómetros colocados en sondeos perpendiculares al eje de la obra.

De esta manera, se realizan medidas de variación de distancias entre un punto situado en la pared de la excavación y otro "supuesto fijo" situado en el fondo de un taladro y suficientemente lejos del túnel para salir de su zona de influencia. Es posible implantar en estos aparatos varios puntos anclados a distintas profundidades. Así, se puede obtener la ley de desplazamiento del macizo en función de la profundidad. Los extensómetros utilizados pueden ser hilos tensos o barras ancladas al fondo del taladro. Ver imagen 54.

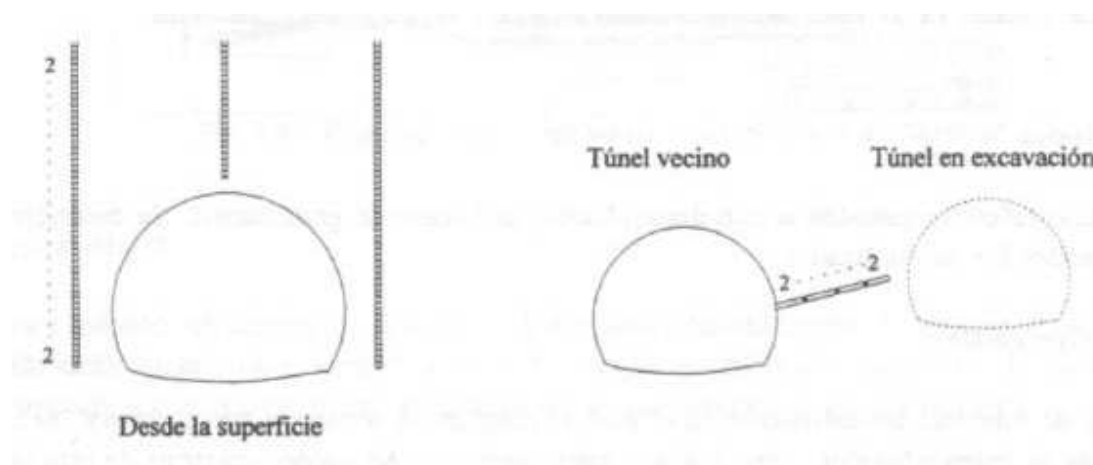


Imagen 34. Ejemplos de utilización de extensómetros en un taladro.

Fuente: Tesis para optar el título de Constructor Civil, Construcción de Túneles, autor: Soto Saavedra Pedro Roberto; Universidad Austral de Chile; 2004.

En túneles urbanos o en zonas de poca cobertura, pueden ser muy útiles los extensómetros colocados desde la superficie, antes del paso del frente, con puntos de anclaje a distintas profundidades, combinados con una nivelación de precisión de secciones transversales en superficie. También, desde túneles vecinos se sitúan extensómetros y así se consigue, al igual que en el caso anterior, el desplazamiento absoluto a partir del estado virgen del terreno.

Por su parte, las medidas de la presión en el revestimiento, se consiguen mediante la colocación de células de presión total situadas entre el revestimiento y el terreno. La presión se transmite a un manómetro y se controla de esta manera la evolución de cada medida en función del tiempo.

Las medidas de la deformación del revestimiento, la deformación se puede controlar con las medidas de convergencia ya explicadas y también con algunos tipos de extensómetros colocados en el interior del revestimiento, teniendo de esta manera bases más cortas.

La medida con inclinómetros, se mide el desplazamiento longitudinal y transversal al taladro donde se ha situado el inclinómetro. Estas medidas son utilizadas sobre todo en túneles de poca cobertura para determinar los efectos en la superficie.

La distribución adecuadamente de esfuerzos de compresión generados en el contorno de la excavación se logra con una estructura competente que garantice un comportamiento estable tanto en el techo o clave como en las paredes de la obra en ejecución.

Lo anterior identifica las principales características que deben ser consideradas a la hora de tomar este tipo de decisiones, considerando que dependiendo de ciertas variables se logra definir el uso de cualquiera de los métodos de construcción de túneles; pasando a un plano de consideraciones y conocimientos de técnicas y experiencias ya desarrolladas, tanto a nivel mundial como nacional.

Se cita a continuación los aspectos técnicos de túneles ya desarrollados a nivel nacional e internacional.

4 ASPECTOS TÉCNICOS DE CONSTRUCCION Y COMPARACION DE TÚNELES YA DESARROLLADOS A NIVEL NACIONAL E INTERNACIONAL

Para efectos de realizar una comparación en los aspectos técnicos de mayor relevancia sobre túneles existentes a nivel mundial, en la siguiente tabla, se toma una muestra de cinco obras existentes a nivel internacional y nacional.

Tabla 1. Muestra de aspectos técnicos de túneles construidos nacionales e internacionales.

Fuente, diseño exclusivo del autor “Elaborado por Cleysnel Mosquera C”.

TÚNELES	ASPECTOS TÉCNICOS					
	UBICACIÓN	LONGITUD (M)	DIÁMETRO (M)	GEOLOGÍA	MÉTODO DE CONSTRUCCION UTILIZADO	AVANCE MENSUAL EN METRO
PARACUELLOS	MADRID ESPAÑA	4.740	4.7	Macizo montañoso del Sistema Ibérico	TBM	275
CANAL DE LA MANCHA	EUROPA – entre Francia e Inglaterra	5000	* 2 GALERIAS DE 7.6m * 1 GALERIA DE 4.8m	Material rocoso	CONVENCIONAL – 3 GALERIAS	400

SEYKAN	Honshu-Hokkaido JAPON	5385	3.5	Rocas volcánica, Rocas sedimentarias	CONVENCIONAL	187
DEL ELBA	HAMBURGO ALEMANIA	24.510	14,14	Macizo la albera	TBM	90
TUNNEL AND RESERVOIR PLAN (TARP)	CHICAGO ESTADOS UNIDOS	14.000	9.85	Macizo de Roca dura(dolomita)	TBM	1500
FERNANDO GOMEZ MARTNEZ	MEDELLIN COLOMBIA	4600	5.27	Metamórficos del paleozoico y cretáceo	CONVENCIONAL	42
CENTRAL SUBTERRANEA PORCE II CONDUCCION	Nordeste ANTIOQUIA COLOMBIA	4343	8.20	Roca metamórfica	CONVENCIONAL	120

TÚNELES	ASPECTOS TÉCNICOS					
	UBICACIÓN	LONGITUD (M)	DIAMETRO (M)	GEOLOGIA	MÉTODO DE CONSTRUCCION UTILIZADO	AVANCE MENSUAL EN METRO
BOQUERON	Vía BOGOTA - VILLAVICENCIO COLOMBIA	2045	9.5	Rocas sedimentarias	CONVENCIONAL	40
CENTRAL HIDROELÉCTRICA CHIVOR TÚNEL DESVIACIÓN	BOYACA COLOMBIA	895	10.69	Rocas sedimentarias	CONVENCIONAL	74

PROYECTO HIDROELECTRICO PORCE III TUNEL VENTANA 2	Nordeste ANTIOQUIA COLOMBIA	648.9	6.39	Roca metamórfica	CONVENCIONAL	54
--	-----------------------------------	-------	------	------------------	--------------	----

Las muestras tomadas en la tabla 1, corresponden a datos tomados en publicaciones técnicas, empresas que han intervenido en dichos proyectos, revistas y en los túneles antiguos a la bibliografía. La falta de medidas de seguridad en la construcción de túneles con el método convencional hace que sus avances no sean muy representativos, ya que en la actualidad ha de pensarse que los métodos avancen lentos y más cuidadosos.

Los métodos con TBM en la actualidad se proyectan para la construcción de grandes proyectos subterráneos, porque son mucho más seguros y los rendimientos son mayores a comparación del método convencional. Cabe resaltar el túnel de la Mancha como una de las mejores obras subterráneas construidas por el método convencional y su alta ingeniería, ya que sus rendimientos en teoría fueron altos en comparación con los otros métodos.

Los túneles para carreteras, como los de centrales subterráneas, aunque son construidos por el mismo método las terminaciones finales son distintas y las secciones suelen ser más pequeñas para las centrales, lo cual se evidencia en la tabla 1.

Con la obtención de datos como el costo total, tipos maquinaria utilizada, avances diarios, avances mensuales etc., de diferentes proyectos, podemos realizar comparaciones inmediatas que nos ayudan a entender el comportamiento desde diversas comparaciones; mediante el empleo de tablas, cuadros comparativos y gráficas.

Para efectos de hacer un mejor análisis de la información técnica, se realiza la (tabla 2) de codificación con los proyectos propuestos anteriormente, tanto por código como por sigla o abreviatura.

A continuación, se presentaran comparaciones gráficas de las muestras escogidas de acuerdo a la tabla 1.

Tabla 2. Codificación de los túneles.

Fuente, diseño exclusivo del autor “Elaborado por Cleysnel Mosquera C.”

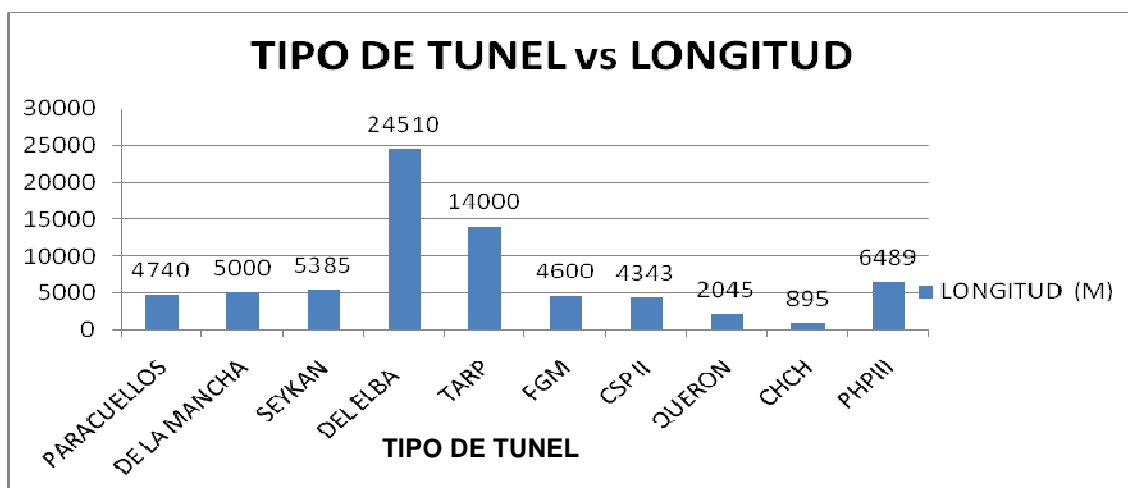
CÓDIGO TÚNEL	NOMBRE TÚNEL	SIGLA
1	PARACUELLOS	PARACUELLOS
2	DE LA MANCHA	DE LA MANCHA
3	SEYKAN	SEYKAN
4	DEL ELBA	DEL ELBA
5	TUNNEL AND RESERVOIR PLAN (TARP)	TARP
6	FERNANDO GOMEZ MARTNEZ	FGM
7	CENTRAL SUBTERRANEA PORCE II CONDUCCION	CSP II
8	BOQUERON	BOQUERON
9	CENTRAL HIDROELÉCTRICA CHIVOR TÚNEL DE DESVIACIÓN	CHCH
10	PROYECTO HIDROELECTRICO PORCE III TUNEL VENTANA 2	PHPIII

4.1 ANÁLISIS Y COMPARACIONES DE LAS GRÁFICAS

Se realiza la gráfica 1 para entender el comportamiento entre la función de cada túnel y la longitud.

Gráfica 1. Análisis tipo de túnel vs longitud.

Fuente, diseño exclusivo del autor “elaborado por Cleysnel Mosquera C”.

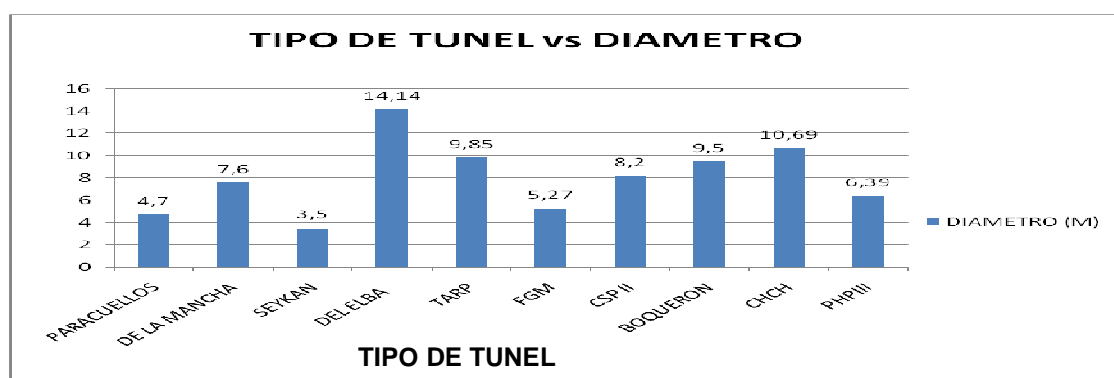


Con esta gráfica se muestra el tamaño que se logra en cada una de las ubicaciones de los túneles y que dependen sin duda de alguna de las necesidades de cada región. Los túneles carreteros no sobrepasan los 5500m de longitud con el método convencional.

Además, se realiza la gráfica 2 para analizar comportamiento en función de la necesidad y el diámetro.

Gráfica 2. Análisis tipo de túnel vs diámetro.

Fuente, diseño exclusivo del autor “elaborado por Cleysnel Mosquera C”.

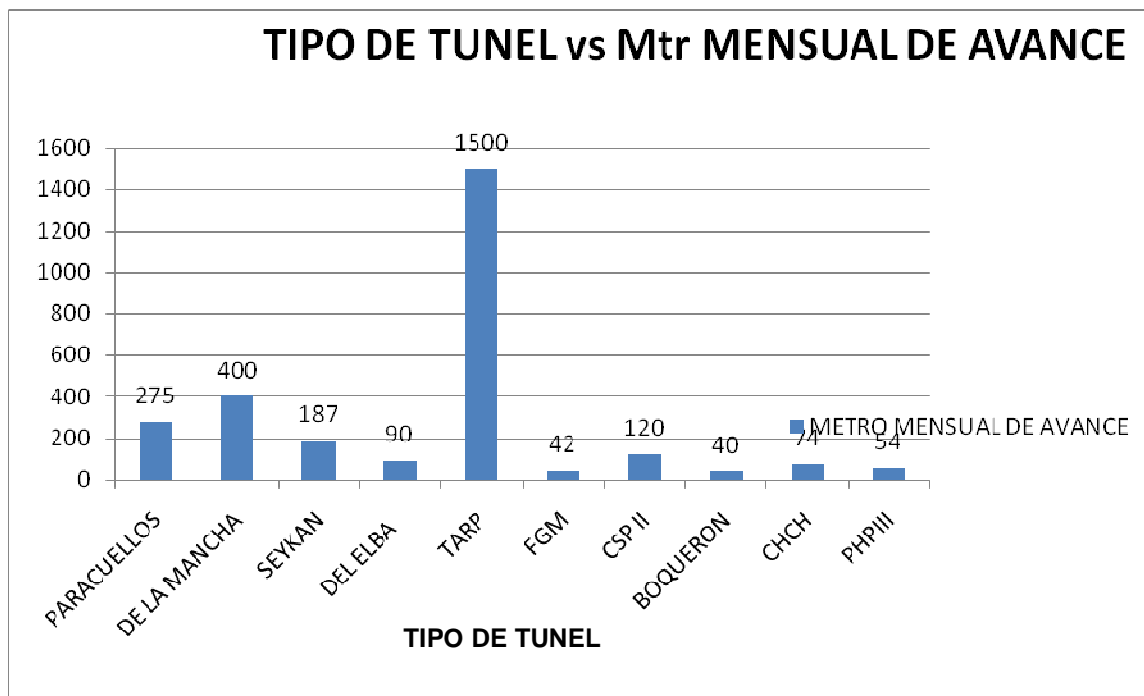


De la grafica anterior, se establece que un túnel dependiendo de su ubicación y geología se desarrolla con base en las necesidades, ya que cada uno tiene finalidad distinta, como es el transporte de vehículos y el transporte de agua, por esto el diámetro es muy importante al desarrollo de los mismos.

Ahora, se realiza la gráfica 3 para analizar el avance comparándolo con el tipo de túnel.

Gráfica 3. Análisis vs Avance de construcción.

Fuente, diseño exclusivo del autor “elaborado por Cleysnel Mosquera C.”

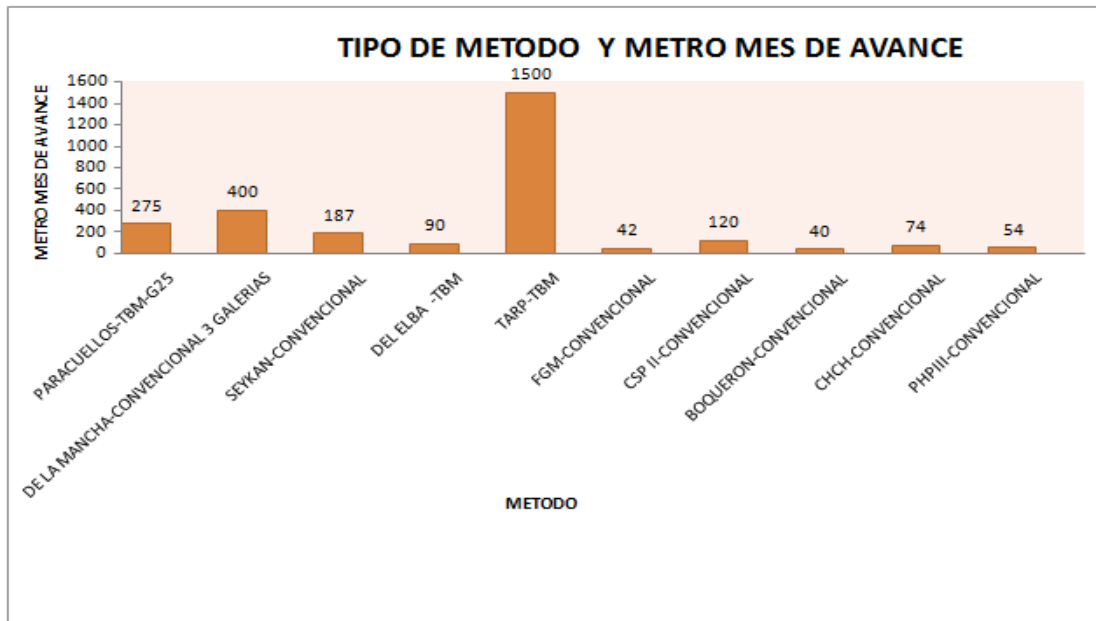


Con esta gráfica se analiza la capacidad de avance con la que se desarrolla el proyecto, dependiendo de sus otras variables, tales como su longitud, diámetro, terreno, entre otros. De igual manera, se evidencia que el túnel de mayor avance es el TARP y el de menor avance es el BOQUERON.

Seguidamente, se obtiene siguiente la gráfica 4, para analizar el método utilizado y los avances.

Gráfica 4. Análisis Método utilizado por metros de avance y por tipo de túnel.

Fuente, diseño exclusivo del autor “elaborado por Cleysnel Mosquera C”.



Analizando la gráfica, se reconoce que en el avance con TBM del proyecto TARP, hay un rendimiento superior frente a los métodos convencionales; la experiencia nos dice que la composición del macizo rocoso es un factor determinante en los rendimientos con métodos mecanizados.

Los avances metro mes para el método convencional promedio está por debajo de 150 siendo el proyecto canal de la MANCHA y SEYKAN los que superaron esta cifra.

En cuanto a las técnicas utilizadas en los métodos de construcción, se pueden mejorar a medida que se está ejecutando el proyecto, pero antes de seleccionar un método es necesario realizar estudios que determinen la composición del macizo y su estructura.

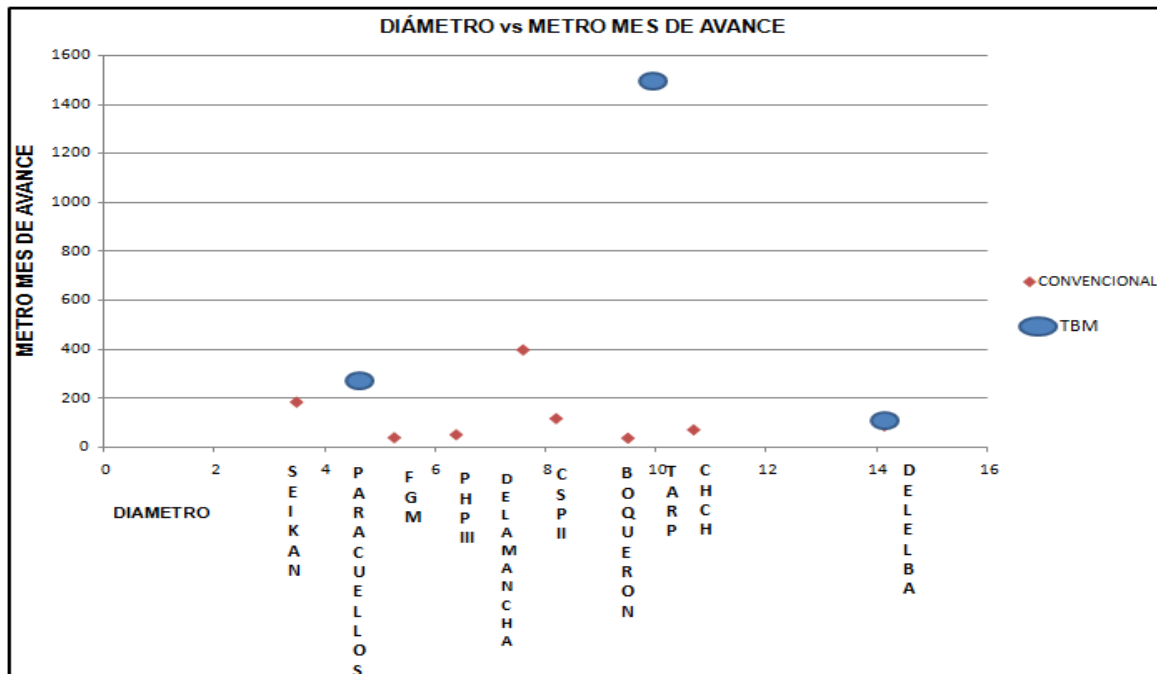
En el método convencional para realizar las excavaciones, los explosivos tienen mucha importancia, porque la elección depende al tipo de roca, el diseño de la obra, de los tamaños del material proyectado, de la topografía, etc.

El método mecanizado logra un avance significativo, sin alterar la resistencia de la roca, y los avances en la excavación están en el mantenimiento de las maquina, los equipos de construcción y la composición del macizo.

Se realiza la gráfica 5 para analizar cómo fueron los avances de acuerdo al diámetro.

Gráfica 5. Análisis diámetro por metro de avance.

Fuente, diseño exclusivo del autor “elaborado por Cleysnel Mosquera C”.



En la gráfica no se observa una tendencia clara de acuerdo al diámetro, puesto que en los proyectos donde fue utilizado el método convencional SEIKAN con un diámetro menor tuvo un avance alto superado solamente por de la MANCHA.

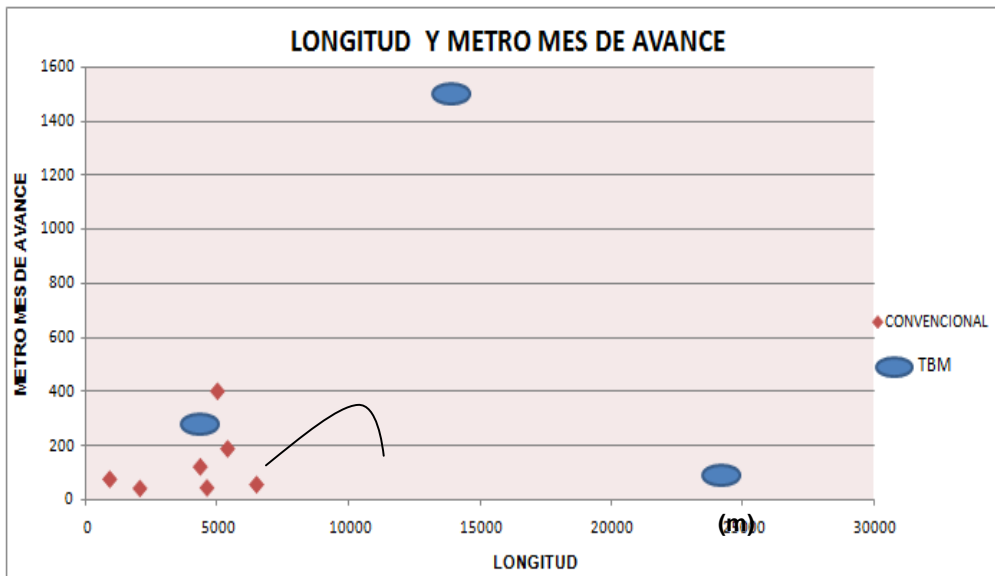
Los rendimientos están muy afectados en su mayoría por la composición de la geología en la roca; es así como la escogencia del diámetro depende de la necesidad y el uso del túnel.

En los casos donde la sección de soporte es más pequeña que la sección del túnel, ésta se ve afectada por empujes y deformaciones las cuales pueden llegar a desprendimientos de la roca, requiriendo un soporte temporal extra que retrasa el ciclo de excavación disminuyendo los rendimientos.

Se obtiene la gráfica 6 para analizar el avance de acuerdo a su longitud.

Gráfica 6. Análisis longitud y metro mes de avance

Fuente, diseño exclusivo del autor “elaborado por Cleysnel Mosquera C”.



Analizando la gráfica, se tiene una tendencia arrojando rendimientos altos para longitudes extensas. Para los proyectos con longitudes superiores a 5500m, los ciclos de excavación con el método convencional se pueden ver afectados por la retirada de escombros y/o rezaga, instalación eléctrica, instalación de tuberías (agua y aire), etc., disminuyendo los rendimientos. Para el tipo de túnel con longitudes muy largas lo más adecuado es realizar ventanas de ataque para aumentar estos rendimientos.

Se verá a continuación comparaciones entre los diversos métodos constructivos en túneles.

4.2 COMPARACION DE LOS METODOS

Se realiza la tabla 3 para comparar las características de los métodos constructivos.

Tabla 3. Características de los métodos constructivos

Fuente, diseño exclusivo del autor “elaborado por Cleysnel Mosquera C”.

MÉTODO	PLANTEAMIENTO DE CARACTERÍSTICAS					
	SEGÚN SU USO	SEGÚN EL TIPO DE TERRENO	SECCIÓN	SEGÚN SU LONGITUD	RATA DE AVANCE	AÑO DE COMIENZO CONSTRUCCIÓN
TBM	Férreo Carretera Alcantarillado Acueducto Conducción de aguas Plantas de tratamiento	Macizos rocosos con una dureza baja, media o alta	226m ² Completa	Más de 2500 metros	1.5-2.5m/h	1956
Ataque a plena sección o método inglés	Hidroeléctricas subterráneas Férreo Carretera	Duros	<15m ² Completa	>3m	0.5m/h	1825
Galería en clave o método belga	Hidroeléctricas subterráneas Férreo Carretera	Blandos o duros	15m ² Corona y bóveda	1 -20m	0.1m/h	1928
Las dos galerías o método austriaco,	Hidroeléctricas subterráneas Férreo Carretera	Blandos	15m ² Eje y base	>10m	1.5m/h	1837
Las tres galerías o método alemán	Hidroeléctricas subterráneas Férreo Carretera	Malo	>50m ² Base izquierda y derecha	>10m	2.0m/h	1803

Al referirnos al método con TBM, su utilización es para túneles de longitud considerable y su utilización depende de las características del macizo rocoso. Por su parte, el método Inglés se emplea a sección completa, es compatible en terrenos buenos y roca; alcanzando su mayor rendimiento en estos. El método Belga se utiliza en terrenos blandos o duros y cambia el rendimiento como la ejecución en los distintos terrenos, se utiliza en túneles cortos donde no habrá problemas con el transporte de escombros. Respecto al método austriaco, este permite alcanzar mayores rendimientos pero con altos costos. Sus rendimientos se basan en atacar en varias partes la galería. Este método permite la conversión al método Alemán. Con el método Alemán, las tres galerías de avance son muy seguras en terrenos malos porque los empujes laterales en terrenos quedan asegurados y los avances se realizan muy rápidamente.

4.3 COMPARACIÓN DE RENDIMIENTOS DE ACUERDO AL MÉTODO CONSTRUCTIVO

Cabe resaltar el estado de la roca, porque los rendimientos en la construcción serán mínimos junto con los costos, si esta es de buena o mala calidad. En los métodos convencionales la correcta utilización de explosivos es llevada a cabo dependiendo del estado de la roca o naturaleza del terreno, del tamaño del material proyectado etc.

En un ciclo de voladura aplicado en el método convencional tiene varias actividades, donde los rendimientos altos se ven muy reflejados siempre que estas se realicen sin retrasos.

Con el método mecanizado:

- Logra unos avances significativos sin alterar la resistencia de la roca.
- Estos se pueden combinar con los métodos convencionales.
- Las excavaciones pueden seguir durante todo un día realizando cambios de turnos con trabajadores sin parar.
- Los avances se pueden realizar durante la noche bajo una ciudad generando poco ruido.
- Los rendimientos se verán muy afectados de acuerdo al mantenimiento que se le realice a todas las máquinas de construcción en cualquier proyecto.
- Por ser la sección del método mecanizado circular la rapidez del avance, disminuye los efectos de la descompresión del terreno.

4.4 PARALELO ENTRE LOS METODOS CONSTRUCTIVOS

Con el método convencional, éste puede ser utilizado tanto para longitudes grandes como longitudes pequeñas. Los costos de operación y de inversión son bajos para su ejecución contra el otro método. Las formas y tamaños de la sección de la excavación suelen ser muy variadas en medio de la construcción del proyecto.

El método mecanizado durante la construcción del túnel es más seguro, las velocidades de avance son mayores y los costos son menores. Pero, este método está condicionado a varios aspectos:

- El túnel a ser construido debe tener una longitud de 4km para macizos rocosos.
- El diámetro de excavación está limitado a 14 m.

4.5 ANALISIS DE RENDIMIENTOS DE ACUERDO AL PROPOSITO DE LA EXCAVACIÓN

En la realización de un proyecto el saber su finalidad o el servicio a prestar requieren de unas normas, por lo tanto éstas afectarán un ciclo de excavación.

Si fuesen dos proyectos de construcción de túneles, uno para vías y otro para centrales hidroeléctricas, el primero es mucho más grande, los soportes deben ser muy estables porque transitarán personas constantemente y el recubrimiento debe estar preparado al estar expuesto al CO_2 dióxido de carbono; el segundo es pequeño, y estará recubierto por agua, lo cual hace que cuando entre en funcionamiento sea estable por el agua internamente, pero cuando el agua es evacuada por alguna razón los soportes sufrirán al cambio esfuerzos.

En los túneles de carreteras y ferrocarriles estos tendrán muchas limitaciones en el trazado de las curvas y pendientes en comparación de los hidráulicos. Los túneles hidráulicos tienen una forma circular que da un máximo caudal y debido a la forma ofrece una mayor resistencia a los empujes del terreno.

Para cualquier tipo de obra subterránea los aspectos a analizar para los rendimientos son “dimensionamiento, forma, ventilaciones adicionales y economía general”.

4.6 CRITERIOS PARA SELECCIÓN DE UN MÉTODO CONSTRUCTIVO

Una selección práctica en la escogencia del método constructivo, es la del túnel Fernando Gómez Martínez, y desde luego algunos valores se asignarán para realizar la selección y otros serán datos reales como es el costo total, longitud, etc.

Para llegar a la selección del método se comienza por definir la clasificación del macizo rocoso según Bieniawski para el túnel Fernando Gómez Martínez.

A continuación se presentan las tablas:

- Se estima el valor RQD. Ver tabla 4.

Tabla 4. Valor estimado para R.Q.D.

Fuente: GEOTECNIA I; Macizos rocosos.

R.Q.D (%)	PUNTAJE
90-100	20
75-90	17
50-75	13
25-50	8
<25	3

- Se le da un puntaje según la resistencia a la compresión. Ver tabla 5.

Tabla 5. Puntaje según resistencia a la compresión simple

Fuente: GEOTECNIA I; Macizos rocosos.

INDICE DEL ENSAYO DE CARGA PUNTUAL (Mpa)	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE (Mpa)	PUNTAJE
>10	>250	15
4-10	100-250	12
2-4	50-100	7
1-2	25-50	4
--	10-25	2
--	3-10	1
--	<3	0

➤ Puntaje según separación de las juntas. Ver tabla 6.

Tabla 6. Separación entre juntas.

Fuente: GEOTECNIA I; Macizos rocosos.

ESPACIAMIENTO (m)	PUNTAJE
>2	20
0,6-2,0	15
0,2-0,6	10
0,06-0,2	8
<0,06	5

➤ Puntaje según las condiciones de las discontinuidades. Ver tabla 7.

Tabla 7. Estado de las discontinuidades.

Fuente, GEOTECNIA I; Macizos rocosos

DESCRIPCIÓN	PUNTAJE
Superficies muy rugosas, de poca extensión, paredes de roca resistente	15
Superficies poco rugosas, apertura menor a 1mm, paredes de roca resistente	12
Superficies poco rugosas, apertura menor a 1mm, paredes de roca blanda	7
Superficies suaves ó relleno de falla de 1 a 5mm de espesor ó apertura de 1 a 5mm, las discontinuidades se extienden por varios metros	4
Discontinuidades abiertas, con relleno de falla de más de 5mm de espesor ó aperturas de más de 5mm, las discontinuidades se extienden por varios metro	0

➤ Puntaje según las condiciones del agua subterránea. Ver tabla 8.

Tabla 8. Flujo de agua en las juntas.

Fuente, GEOTECNIA I; Macizos rocosos.

FILTRACIÓN POR CADA 10M DE LONGITUD DE TÚNEL (L/min)	PRESIÓN DEL AGUA EN LA DISCONTINUIDAD DIVIDIDO LA TENSIÓN PRINCIPAL MAYOR	CONDICIONES GENERALES	PUNTAJE
Nada	0	Completamente seco	15
<10	0,0 – 0,1	Apenas húmedo	12
10-25	0,1-0,2		7
25-125	0,2-0,5	Goteo Húmedo	4
>125	>0,5	Flujo continuo	0

➤ Puntaje según la orientación de las discontinuidades. Ver tabla 9.

Tabla 9. Corrección por la orientación de las discontinuidades.

Fuente, GEOTECNIA I; Macizos rocosos.

EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA ORIENTACIÓN PARA LA OBRA	PUNTAJE PARA TÚNELES
Muy favorable	0
Favorable	-2
Medio	-5
Desfavorable	-10
Muy desfavorable	-12

➤ Categoría de la clasificación geomecánica. Ver tabla 10.

Tabla 10. Clasificación Geomecánica por Bieniawski.

Fuente: GEOTECNIA I; Macizos rocosos.

R.M.R suma de los puntajes de las tablas	Clasificación del macizo rocoso	Clase
81-100	Muy bueno	I
61-80	Bueno	II
41-60	Medio	III
21-40	Malo	IV
0-20	Muy malo	V

De acuerdo con las tablas anteriores cada una aportó un valor para realizar una clasificación final. Los resultados para nuestro ejercicio se verán en la tabla 11.

Tabla 11. Clasificación Geomecánica por Bieniawski (1979) parámetros de clasificación.

Fuente: diseño exclusivo del autor “elaborado por Cleysnel Mosquera C”.

PROPIEDAD	INTERVALOS	VALORACIÓN
RESISTENCIA A ACOMPRESIÓN SIMPLE	25-50 Mpa	8
RQD	75-90%	20
SEPARACIÓN ENTRE JUNTAS	0,2-0.6 mm	10
ESTADO DE LAS JUNTAS :		
CONTINUIDAD	3-10	2
APERTURA	0,1<	5
RUGOSIDAD	Algo rugosa	2
RELLENO	ninguno	6
METEORIZACIÓN	moderada - Ligera	5
FLUJO DE AGUA EN LAS JUNTAS	SECAS	17
RMR		75
CLASE		IIA (BUENA)

4.6.1 Metodología de selección

- Para realizar una selección del método más conveniente y demostrar numéricamente se ha establecido una escala de ponderación según Giraldo, (ver tabla 12) esa calificación será de acuerdo a su importancia.
- Se realiza luego una sumatoria total de cada uno de los parámetros establecidos para obtener un puntaje total de las tablas (13, 14 y 15), donde el puntaje mayor será el método acertado de excavación.

Tabla 12. Escala de valores y ponderación.

Fuente: Las máquinas tuneladoras tipo TBM como alternativa al sistema de perforación y voladura para la excavación de túneles caso: desarrollo de túneles Yuncan.

ESCALA DE VALORES	PONDERACIÓN
Muy importante	10
Importante	8
Medianamente importante	6
Poco importante	2

Para asignar los valores de puntuación en cada uno de los parámetros de las tablas 13,14 y 15, se tienen en cuenta las ventajas y desventaja para cada método.

4.6.1.1 Método convencional ventajas y desventajas

Ventajas:

- Menor longitud por curvas cerradas.
- Adaptabilidad a casi cualquier tipo de terreno.
- Mínima inversión inicial en las instalaciones del sistema a utilizar.
- Posibilidad de comenzar excavaciones en varios frentes.
- Menor radio de curvatura en la excavación para acceder a un punto.
- Formas y tamaños de la sección de excavación muy variada.
- Menor longitud de túnel para su aplicación.

Desventajas:

- Desestabilización del terreno por las voladuras.
- El revestimiento del túnel requiere de mayor espesor.
- Sobre excavación producto de las voladuras.
- Mayor número entre mano de obra y materiales.
- Menor velocidad de avance.

- Menor seguridad para el personal en el frente de la excavación.
- Mayor requerimiento de ventilación.

4.6.2.1 Método mecanizado “TBM” ventajas y desventajas

Ventajas:

- Los trabajos realizados se realizan sin contaminación gases producidos por las voladuras. No hay ruidos molestos en la excavación. Mejor eficiencia en la ventilación porque las paredes que dan lisas facilitando la circulación del aire.
- El frente de excavación no queda expuesto a desprendimientos del techo.
- El número de personas para operar el sistema es bajo comparado con el convencional.
- La sobre excavación es casi nula, sobre todo en terrenos duros, lo que significa menor volumen de material para su remoción.
- Menor tiempo en la excavación, lo cual implica menor tiempo para la recuperación en la inversión.
- Como la sección es circular permite equilibra esfuerzos del macizo rocoso, lo cual implica menor costo en sostenimiento y revestimiento.

Desventajas:

- Para disponer del equipo en obra se requiere de mucho tiempo, 1.5 años aproximadamente.
- La sección de la excavación únicamente circular.
- La productividad total está únicamente en un equipo de excavación.
- Alto costo de inversión en función del diámetro del cabezal.
- Demora en el rescate de la TBM, al producirse un colapso del terreno por lo que es imposible acceder al frente de trabajo.

La construcción de túneles tiene diferentes formas de ser ejecutada, puede ser de acuerdo a la necesidad dependiendo, como ya se mencionó con anterioridad, de las características del terreno y los métodos adoptados para la ejecución de las obras.

Conocer las características y aspectos técnicos de los proyectos ya construidos nos ayuda a correlacionar y comparar desde las experiencias con proyectos que se estén desarrollando para visualizar la escogencia del método a utilizar de acuerdo con los tiempos o plazos de la obra.

Para darle paso a las tablas denominamos "C" al método convencional y "TBM," para el método mecanizado con el fin de abreviar el nombre.

Tabla 13. Parámetros técnicos y operacionales.

Fuente, Las máquinas tuneladoras tipo TBM como alternativa al sistema de perforación y voladura para la excavación de túneles caso: desarrollo de túneles Yuncan.

PARAMETROS DE EVALUACIÓN		Valores/Apreciación		Puntuación		Pond.	Calificación	
Nº	DESCRIPCIÓN	C	TBM	C	TBM		C	TBM
1	Sección de la excavación del túnel de adecuación (m2)	22.35	21.25	0.92	1.00	10.00	9.20	10.00
2	Forma de la sección de la excavación	Variable	Circular	1.00	0.15	2.00	2.00	0.30
3	Rango de curvatura de la excavación	>16 m de ancho	>16 m de \varnothing	1.00	0.50	8.00	7.00	3.50
4	Radio de curvatura de la excavación(m)	reducida <30	amplia >80	1.00	0.20	6.00	6.00	1.20
5	Longitud económica de excavación(m)	1000	1500	1.00	0.40	10.00	10.00	4.00
6	Metros de avance promedio por día en roca tipo A y clase II de roca (ma/día)	1.4	3	0.80	0.70	10.00	8.00	7.00
7	Tiempo de excavación longitud del túnel 4.6 km en roca tipo A y clase II (años)	3	1.5	0.80	1.00	10.00	8.00	10.00
8	Rugosidad de los contornos de la excavación en roca tipo A y clase II (m)	0.4	0.02	1.90	2.00	2.00	3.80	4.00
9	Excavación sobre la sección nominal (%)	15	5	0.70	1.00	6.00	4.20	6.00
10	Daño de la roca remanente durante el proceso de excavación	Elevado	Nulo	0.00	1.00	10.00	0.00	10.00
11	Equilibrio de esfuerzos en el entorno de la excavación	Buena	Excelente	0.80	1.00	8.00	6.40	8.00
12	Vibración del terreno durante el proceso de fragmentación	Elevado	Mínimo	0.10	1.00	6.00	0.60	6.00
13	afluencia de aguas subterráneas como producto de la excavación	Elevado	Mínimo	0.10	1.00	6.00	0.60	6.00
14	Granulometría promedio del material arrancado (cm)	40	15	0.50	0.90	8.00	4.00	7.20
15	Esponjamiento del material (%)	40	50	1.00	0.50	8.00	8.00	4.00
16	Demora para la disponibilidad del equipo en obra (meses)	5	25	1.00	0.30	2.00	2.00	0.60
17	Número de equipos para la excavación y remoción (longitud de 4.6 km túnel)	10	13	0.95	1.00	2.00	1.90	2.00
18	Número de operadores por guardia(longitud 4.6 km túnel) (oper/Gdía)	12	2	0.20	1.00	8.00	1.60	8.00
19	Disponibilidad del (los) equipo(s) (%)	90	20	1.00	0.10	10.00	10.00	1.00
20	Riesgo de accidentes durante el proceso de excavación y remoción del escombro	Alto	Bajo	0.50	1.00	9.00	4.50	9.00
21	Requerimiento de tendido de rieles para servicios u otros	No	Sí	1.00	0.11	10.00	10.00	1.10
22	Sistema de mitigación del polvo durante la excavación	Deficiente	Eficiente	0.70	1.00	10.00	7.00	10.00
SUBTOTAL							115.80	119.40

Tabla 14. Parámetro económico.

Fuente, Las máquinas tuneladoras tipo TBM como alternativa al sistema de perforación y voladura para la excavación de túneles caso: desarrollo de túneles Yuncan.

PARAMETROS DE EVALUACIÓN		Valores/Apreciación		Puntuación		Pond.	Calificación	
N°	DESCRIPCIÓN	C	TBM	C	TBM		C	TBM
1	Inversión (para la longitud del túnel) (USD)	173,889,780.63	5000000	1.00	0.18	10.00	10.00	1.80
2	Valor de salvataje o valor residual (después km de 4.6 km excavación)(USD)	300000	3800000	0.97	1.00	10.00	9.70	10.00
3	Costo de propiedad por metro de excavación (\$/ma)	300	200	0.98	1.00	10.00	9.80	10.00
4	Costo de operación y voladura por metro de avance (para la longitud del túnel) (\$/ma)	350	400	1.00	0.98	2.00	2.00	1.96
5	Costo de los elementos de corte por m ³ de roca triturada (brocas) o cortadores (discos) (\$/m ³)	1000	1500	1.00	0.40	10.00	10.00	4.00
6	Costo de cortadores/ aceros de perforación por metro de avance (\$/ma)	100	200	1.00	0.50	10.00	10.00	5.00
7	Costos de voladura por metro de avance (\$/ma)	150	0	0.00	1.00	10.00	0.00	10.00
8	Costos por metro de excavación longitud del túnel 4.6km (\$/ma)	3780,12	50000	1.00	0.40	10.00	10.00	4.00
9	Valor actual neto (VAN) para los primeros 8 año funcionamiento del proyecto (USD)	1500000	30000000	1.00	0.10	10.00	10.00	1.00
10	Retorno de la inversión para el túnel de 4.6km (longitud a partir del año...)	3	4	0.95	1.00	10.00	9.50	10.00
11	Ingreso adicional en los primeros 8 años de puesta en marcha el proyecto (USD)	300000	500000	0.80	1.00	10.00	8.00	10.00
12	Costo de revestimiento para la excavación en roca tipo según tipo roca clase II	300	250	0.10	1.00	8.00	0.80	8.00
SUBTOTAL							89.80	75.76

Tabla 15. Misceláneos.

Fuente, Las máquinas tuneladoras tipo TBM como alternativa al sistema de perforación y voladura para la excavación de túneles caso: desarrollo de túneles Yuncan.

PARAMETROS DE EVALUACIÓN		Valores/Apreciación		Puntuación		Pond.	Calificación	
Nº	DESCRIPCIÓN	C	TBM	C	TBM		C	TBM
1	Tensión de corriente en el transformador primario dentro de la labor (V)	1000	10000	1.00	0.10	10.00	10.00	1.00
2	Contaminación por gases generados por el proceso de excavación	No	Sí	0.00	1.00	8.00	0.00	8.00
3	Contaminación de las labores por polución	Alto	Mínimo	0.30	1.00	8.00	2.40	8.00
4	Facilidad de apilamiento del escombro en los botaderos	Fácil	Difícil	1.00	0.20	6.00	6.00	1.20
5	Contaminación del medio ambiente (ríos, suelo, etc.) por la operación del sistema	Alto	Bajo	0.50	1.00	8.00	4.00	8.00
6	Facilidad de reforestación sobre el escombro apilado en los botaderos (acorde con la granulometría del material)	Difícil	Fácil	1.00	0.50	10.00	10.00	5.00
SUBTOTAL							32.40	31.20

CALIFICACIÓN TOTAL**238**

226.36

DIFERENCIA DE CALIFICACIÓN A FAVOR**11.64 00,00**

En este ejercicio, como se dijo anteriormente, en la tabla 13, 14 y 15 hay valores que han sido subjetivos, porque para dar un puntaje se analiza la influencia de cada ítem en cada método constructivo, es decir que tan favorable es o no el desarrollo del mismo.

Se puede concluir, que entre más largo sea el túnel va ser muy favorable para su construcción, porque se pueden diseñar secciones diferentes a lo largo de él, la locación de toda una infraestructura operativa en la construcción, hace muy costosos los movimientos que se realicen de un punto a otro, por lo que se evalúa dicho movimiento con el fin de equilibrar los costos de construcción; la longitud también afecta las finanzas, por otro lado, porque entre más longitud mayor inversión y por ende una tasa de retorno mucho mayor.

Para el túnel de 4.6km se analiza que el método convencional tiene una ventaja de 11.64 puntos con un 5.14% frente al método con TBM, siendo un porcentaje bajo es suficiente para ser elegido para desarrollar el proyecto, dado al análisis efectuado anteriormente por cada parámetro.

Cuando se selecciona, por el contrario, el método TBM para la realización de un proyecto de antemano podemos intuir que las longitudes son mayores a 4km, que el macizo es bueno y que el retorno de la inversión se verá reflejado en corto tiempo.

En un criterio de selección de métodos de construcción intervienen muchos parámetros como son los geológicos y geo-mecánicos de acuerdo con Bieniawski, donde todos realizan

una cadena para dar un resultado como es el RMR, éste a su vez esencial para clasificar el macizo, así que estos van a cambiar de acuerdo al terreno.

Se concluye que para la selección de un método constructivo como el mecanizado o "TBM", ésta se basa en minimizar los tiempos de excavación teniendo en cuenta la excavabilidad del terreno porque varía a lo largo del túnel, donde atravesará algunos de muy mala calidad comprometiendo el avance de una tuneladora si esta es mal elegida. Cuando ocurre una mal elección con una tuneladora los rendimientos son bajos, y en casos extremos puede no llegar a terminar el proyecto.

GLOSARIO

Barreno, agujero relleno de materia explosiva hecho en una roca para hacerla volar.

Cobertura, conjunto de elementos en contacto directo con el ambiente exterior, que sirven como protección a todos los elementos integrantes de una cubierta.

Convergencia, unión de dos o más cosas que confluyen en un mismo punto

Encofrado, formar un molde en el que se vacía el hormigón hasta que fragua y que se desmonta después.

Entibar, apuntalar, fortalecer con maderas y tablas las excavaciones que ofrecen riesgo de hundimiento.

Erosión, desgaste de la superficie terrestre por agentes externos, como el agua o el viento.

Galibo, arco de hierro con la altura de túneles y puentes para comprobar si los vehículos pueden pasar por ellos.

Hormigón, material de construcción formado por una mezcla de grava, arena y cal o cemento, muy resistente cuando se endurece.

Limo, en rocas detríticas, conjunto de partículas cuyo tamaño está entre dos y veinte micrómetros, que son transportadas y sedimentadas.

Macizo, grupo de montañas o elevación del terreno generalmente rocosa.

Solera, las Soleras son los revestimientos de suelos naturales en los interiores de edificios, constituidos por una capa resistente de hormigón en masa, quedando la superficie a la vista o puede colocarse algún revestimiento para su acabado.

Rasante, línea que define la inclinación o pendiente de una calle, camino, terreno u obra en general, respecto al plano horizontal.

Revestimiento, capa de algún tipo de material con la que se protege o adorna una superficie.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al recopilar la información, se puede afirmar que la evolución de los túneles desde sus comienzos con el fuego, muestra una transformación de las técnicas en excavación hasta desarrollar máquinas tuneladoras. En Colombia se ha implementado en muchos de sus proyectos este tipo de tecnologías, para disminuir la accidentalidad, mejorar el nivel de servicio, aumentar la velocidad de diseño y minimizar los costos de estabilización de grandes cortes a cielo abierto en zonas inestables durante la construcción y operación del proyecto.

Las pendientes utilizadas para centrales subterráneas como en los túneles de conducción son fuertes e incluso verticales con una sección menor, comparado con túneles para carreteras y ferrocarriles.

El método belga es el más utilizado en túneles cortos cuando la evacuación de escombros no es un problema importante; donde sí constituye un problema importante es en los largos túneles de montaña, por lo que se prefiere utilizar el método austriaco. En túneles con menores secciones el más utilizado es el inglés y en terrenos de baja calidad el austriaco.

Regularmente la construcción de túneles se realiza mediante un número restringido de bocas de ataque para reducir los costos en el tiempo de su ejecución.

La maquinaria a utilizarse debido a las particularidades de cada proyecto, tales como la geología, diámetro, longitud del túnel, etc., cada uno necesitara una maquinaria distinta pero que realicen la misma función, aunque con algunas excepciones en la construcción de este tipo de proyectos.

Para el túnel de 4.6km se tiene que el método convencional tiene una ventaja de 11.64 puntos con un 5.14% frente al método con TBM; siendo el porcentaje bajo el suficiente para ser elegido para desarrollar el proyecto.

La construcción de túneles tiene diferentes formas de ser ejecutada de acuerdo a la necesidad dependiendo, como ya se mencionó con anterioridad, de las características del terreno y los métodos adoptados para la ejecución de las obras.

Conocer las características y aspectos técnicos de los proyectos ya construidos nos ayuda a correlacionar y comparar desde las experiencias con proyectos que se estén desarrollando, para visualizar la escogencia del método a utilizar de acuerdo con los tiempos o plazos de la obra.

De acuerdo con el planteamiento del problema inicialmente propuesto, es un tema que necesariamente requiere ser complementado con más investigación, lo cual demanda más inversión de tiempo, por parte de quien pudiese hacer uso de este trabajo, considerándose que se trata de un tema demasiado extenso y de conceptos sumamente técnicos y especializados.

La implementación de imágenes con proyección en tercera dimensión, programas o software especializados para la ingeniería civil son ejemplos prácticos que ayudan a modelar virtualmente una realidad cuando se esté diseñando una obra subterránea.

Serán desde luego realizar diversas comparaciones con proyectos a nivel mundial y nacional para los interesados en el tema, porque los aportes ayudaran a mejorar la escogencia y la forma de construir los proyectos de túneles u obras subterráneas.

BIBLIOGRAFIA

Cornejo L. (1988). Excavación mecánica de túneles. Madrid: Rueda.

Galabru P. (1973). Tratado de procedimientos generales de construcción. Volumen III. Cimentaciones y Túneles. Barcelona: Reverte.

Juncá J.A. (1991). El túnel I. Historia y mito. Madrid, Colegio I.C.C.P. y CEDEX.

Megaw T. M. & Bartlett, J.V. (1988). Túneles. Planeación diseño y construcción. Volumen I. México: Limusa.

Megaw T. M. & Bartlett, J.V. (1990). Túneles. Planeación diseño y construcción. Volumen II. México: Limusa.

M.O.P.T.T., DIRECCIÓN DE VIALIDAD. (2001). Manual de carreteras. Volumen III. Chile.

Muñoz A., Gómez, W. & Cadavid P., G. (1998). Recopilación de experiencias y criterios técnicos en la construcción de túneles y obras subterráneas. Trabajo de grado. Medellín: Universidad de Medellín.

Salazar B., H. (2011). Informe general sobre el método convencional de túneles. ACTOS. Bogotá.

Santos, A. (1992). Curso básico de replanteo de túneles. Madrid, Colegio de I.T. en topografía.

Tapia, A. (1999). Topografía subterránea. México: Alfaomega.

CIBERGRAFIA

Ardila Rueda, J. (2012). *Túneles en el antiguo ferrocarril de Caldas*. (Trabajo de grado). Bogotá. Recuperado de: <http://repository.javeriana.edu.co/bitstream/10554/2405/1/ArdilaRuedaJorgeE2012.pdf>

BASF. Túnel de Paraguayos. Recuperado de: <http://www.ingenieria-arquitectura-basf-cc.es/profesionales/obra/tunel-del-paracuellos?basf.id=489a2579-6d88-476c-9c6c-2461c9f7ee38>

Caicedo Ferrer, J. (2009). *Infraestructura y desarrollo*, 31. Recuperado de: <http://www.infraestructura.org.co/revistacci/31/RevistaID31.pdf>

Cámara Colombiana de Infraestructura. (2009). *Colombia avanza en la construcción del los túneles*. Infraestructura & Desarrollo (31). Recuperado de: <http://www.infraestructura.org.co/revistacci/31/RevistaID31.pdf>

Estroch S. & Gómez Tapia A (2003). *Topografía subterránea para minería y obras*. (Trabajo de grado). Recuperado de: <http://books.google.com.co/books?id=YUsbzGmMEogC&printsec=frontcover&dq=i+isbn:8483016729&hl=es&sa=X&ei=sDm9UYYPYNYXs8QTMqoGgDQ&ved=0CC4Q6AEwAA#v=onepage&q&f=false>

Historia de los túneles y su evolución histórica. Recuperado de: <http://www.etcg.upc.edu/asg/TiMR/descargas/01Historia.pdf>

Hoek, Evert. *Practical Rock Engineering*. 2007. Recuperado de: http://www.rocscience.com/hoek/corner/Practical_Rock_Engineering.pdf

INGETEC S.A. (2004) Chivor. Recuperado de: <http://www.ingetec.com.co/experiencia/textos-proyectos/proyecto-hidroelectricos/chivor.htm>

Microtúnel. Maquinaria para la construcción de túneles. Recuperado de: www.microtunel.com

Soto Saavedra, Pedro R. (2004). *Construcción de Túneles*, (Tesis de grado). Recuperado de: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2004/bmficis718c/doc/bmficis718c.pdf>

Túnel en Chicago. Recuperado de: <http://www.fundacion-ica.org.mx/pdf/15.%20T%C3%BAneles.pdf>

Túneles. Historia de los túneles y su evolución. Recuperado de: <http://share.pdfonline.com/7496c1d8740f45c7b2cb467427e9f616/T%C3%BAneles.pdf>

Túnel. ¿Cuáles fueron los hechos que llevaron al país a tomar la decisión de emprender uno de los megaproyectos viales más ambiciosos de su historia reciente? Recuperado de: http://www.tuneldeoccidente.com/index.php?option=com_content&view=article&id=189&Itemid=116

Túnel. Ficha Técnica Conexión Vial Guillermo Gaviria Correa - Túnel Fernando Gómez Martínez Recuperado de: http://www.tuneldeoccidente.com/index.php?option=com_content&view=article&id=201:fichatecnicareal

Universidad Nacional de Córdoba. GEOTECNIA I. (2010). Recuperado de: <http://www.fotomap-geo.com/files/003-2010-1GEO1-CUAD1-MACIZOS.pdf>

Verdadera potencia de excavación. Recuperado de: <http://old.robbinstbm.com/about/history/?lang=es>

INGETEC S.A. (2004) Porce III. Recuperado de: <http://www.ingetec.com.co/experiencia/textos-proyectos/proyecto-hidroelectricos/porce-3.htm>