

875215



UNIVERSIDAD VILLA RICA

ESTUDIOS INCORPORADOS
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**“CRITERIOS BASICOS DE PROYECCION,
CONSTRUCCION Y EXPLOTACION DE
TUNELES CARRETEROS”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

LICENCIADO EN INGENIERIA CIVIL

PRESENTA :

RUTH JULIETA HERNANDEZ ALVAREZ

Director de Tesis: Revisor de Tesis:
Ing. José Vladimiro Salazar Siqueiros Ing. Eduardo Flores Sánchez

BOCA DEL RIO, VER.

2004



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

INDICE

Introducción	1
Lista de Tablas	v
Lista de Figuras	vi
• <u>CAPITULO 1: CONSIDERACIONES GENERALES</u>	
○ 1.1 Objeto.	3
○ 1.2 Requisitos esenciales.	4
○ 1.3 Clasificación de obras viales subterráneas.	4
• <u>CAPITULO 2: CRITERIOS BASICOS EN LA FASE DE PROYECTO</u>	
○ 2.1 Condiciones generales de seguridad y estabilidad.	5
▪ 2.1.1 Generalidades.	5
▪ 2.1.2 Acciones a considerar.	6
○ 2.2 Trazado.	7
○ 2.3 Estudios geológicos y geotécnicos.	8
▪ 2.3.1 Generalidades.	8
▪ 2.3.2 Metodología de los estudios geológicos – geotécnicos	12
▪ 2.3.3 Investigaciones <i>in situ</i> .	14
▪ 2.3.4 Influencia de las condiciones geológicas.	23
• 2.3.4.1 Estructuras geológicas.	25
• 2.3.4.2 Discontinuidades.	26
• 2.3.4.3 Resistencia de la matriz.	31
▪ 2.3.5 Estudios hidrogeológicos.	32
• 2.3.5.1 Condiciones Hidrogeológicas.	33
▪ 2.3.6 Estado tensional.	35

• 2.3.6.1 Métodos de análisis.	35
• 2.3.6.2 Efectos de las tensiones elevadas.	38
▪ 2.3.7 Parámetros geomecánicos de diseño.	40
• 2.3.7.1 Datos geológicos y geomecánicos.	40
• 2.3.7.2 Resistencia y deformabilidad.	43
• 2.3.7.3 Magnitud y dirección de las tensiones naturales	44
○ 2.4 Sección transversal.	48
○ 2.5 Método Constructivos.	50
○ 2.6 Diseño del túnel.	51
▪ 2.6.1 Generalidades.	51
▪ II.6.2 Sostenimiento.	53
• 2.6.2.1 Elementos necesarios para la selección y diseño del soporte.	56
• 2.6.2.2 Estimación de los sostenimientos por métodos empíricos.	59
• 2.6.2.3 Sostenimiento a partir del índice RMR.	61
• 2.6.2.4 Sostenimiento a partir del índice Q.	62
▪ 2.6.3 Revestimiento.	66
• 2.6.3.1 Calculo para el proyecto de revestimiento.	66
▪ 2.6.4 Emboquilles.	73
▪ 2.6.5 Métodos de construcción de túneles en suelo.	76
• 2.6.5.1 Métodos no mecanizados.	76
• 2.6.5.2 Métodos semi-mecanizados.	78
○ 2.7 Auscultación y reconocimientos durante la construcción.	80
○ 2.8 Instalaciones definitivas.	82
○ 2.9 Escombreras.	82
○ 2.10 Impacto medioambiental.	84
○ 2.11 Documentos del proyecto.	85

• **CAPITULO 3 CRITERIOS BASICOS EN LA FASE DE CONSTRUCCION**

○ 3.1 Del terreno y los materiales de construcción.	86
○ 3.2 Memoria de construcción.	86
○ 3.3 Instalaciones para la construcción.	87
○ 3.4 Instrumentación geotécnica.	87
○ 3.5 Maquinaria.	90
○ 3.6 Explosivos.	91
○ 3.7 Proceso constructivo.	92
▪ 3.7.1 Saneamiento.	92
▪ 3.7.2 Perforación.	92
• 3.7.2.1 Métodos de perforación.	92
▪ 3.7.3 Excavación.	97
• 3.7.3.1 Métodos de excavación.	98
• 3.7.3.2 Fases de excavación.	117
▪ 3.7.4 Carga, transporte, vertido y acopio.	119
• 3.7.4.1 Carga.	119
• 3.7.4.2 Transporte.	120
• 3.7.4.3 Recomendaciones de seguridad.	121
▪ 3.7.5 Sostenimiento.	122
• 3.7.5.1 Elementos de sostenimiento.	122
• 3.7.5.2 Método Austriaco.	132
• 3.7.5.3 Tratamientos especiales.	134
• 3.7.5.4 Recomendaciones de seguridad.	136
▪ 3.7.6 Revestimiento.	138
○ 3.8 Prevención de riesgos laborales.	139
▪ 3.8.1 Accesos y transporte (exterior e interior de la obra subterránea).	140
▪ 3.8.2 Transporte de personal.	140

• CAPITULO 4: CRITERIOS BASICOS PARA LAS INSTALACIONES DEFINITIVAS Y LA EXPLOTACION.

○ 4.1 Consideraciones generales.	141
○ 4.2 Sistemas de explotación. Criterios de clasificación.	142
○ 4.3 Instalaciones fijas.	144
▪ 4.3.1 Suministro de energía.	145
▪ 4.3.2 Sistema de control.	145
▪ 4.3.3 Ventilación.	145
• 4.3.3.1 Escenarios.	148
• 4.3.3.2 El papel de la ventilación.	149
• 4.3.3.3 Sistemas de ventilación.	149
• 4.3.3.4 Ventilación Secundaria.	158
• 4.3.3.5 Sistemas de detección.	159
▪ 4.3.4 Alumbrado.	163
• 4.3.4.1 Iluminación interior.	164
• 4.3.4.2 Iluminación exterior.	165
• 4.3.4.3 Requisitos de iluminación diurna.	165
• 4.3.4.4 Requerimientos de alumbrados por zonas.	167
• 4.3.4.5 Requisitos de iluminación nocturna, crepusculares y/o días nublados.	172
• 4.3.4.6 Equipos de alumbrado.	173
• 4.3.4.7 Mantenimiento.	174
▪ 4.3.5 Salidas de emergencia. Refugios.	175
▪ 4.3.6 Incendio. Detección y extinción.	176
• 4.3.6.1 Sistema de detección de incendio.	176
▪ 4.3.7 Sistema de monitoreo y control.	177
▪ 4.3.8 Control del tráfico y circulación.	179
▪ 4.3.9 Señalización y balizamiento.	181
▪ 4.3.10 Obra civil y auscultación.	182
○ 4.4 Manual de Explotación.	183
Conclusiones Finales	184
Bibliografía	185

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.3.3.1 Fases, objetivos y contenidos de la investigación in situ para túneles.

Tabla 2.3.3.2 Guía para la planificación de investigaciones en túneles.

Tabla 2.3.7.1 Criterios de aplicación del índice SFR.

Tabla 2.6.2.1 Sostenimiento a partir del índice RMR.

Tabla 2.6.2.2 Valores del índice ESR de la clasificación Q.

Tabla 2.6.3.1 Recomendaciones de K. Terzaghi para obtener la carga sobre la parte superior del túnel.

Tabla 2.6.3.2 Valores del factor f para calcular la carga sobre la parte superior de un túnel, de acuerdo con la teoría de Protodyakonov.

Tabla 3.4.1 Instrumentación geotécnica.

Tabla 4.3.3.1 Ventilación de un túnel de acuerdo a las condiciones del tráfico.

Tabla 4.3.4.1 Alumbrado de un túnel de acuerdo a las condiciones del tráfico.

Tabla 4.3.4.2 Luminancia máxima por región.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.3.2.1 Metodología de los estudios geológicos – geotécnicos para túneles.
- Figura 2.3.4.1 Condiciones naturales de inestabilidad en excavación de túneles en roca.
- Figura 2.3.4.2 Influencia de estructura geológica en la estabilidad de un túnel.
- Figura 2.3.4.3 Influencia de las discontinuidades en la estabilidad de un túnel. Ejemplos de sobreexcavación producidas en un túnel de trasvase.
- Figura 2.3.4.4 Representación y análisis de discontinuidades.
- Figura 2.3.4.5 Estabilidad de las rocas de falla en un túnel.
- Figura 2.3.6.1 Grandes deformaciones en lutita y sales: a) inicio de roturas en el techo; b) roturas generalizadas con grandes empujes en hastiales; c) cierre casi completo de la excavación con rotura de bulones.
- Figura 2.3.7.1 Ejemplo de perfil de sectorización geomecánica.
- Figura 2.4.1 Sección transversal de un túnel.
- Figura 2.4.2 Sección de un túnel.
- Figura 2.6.2.1 Proceso de selección y diseño del soporte.
- Figura 2.6.2.2 Longitud de pase y tiempos de estabilidad sin soporte.
- Figura 2.6.2.3 Sostenimiento según el índice Q.
- Figura 2.6.3.1 Mecanismo de arqueo en túneles, según Terzaghi.
- Figura 2.6.3.2 Mecanismo de arqueo en túneles, según Protodyakonov.
- Figura 2.6.3.3 Mecanismo de arqueo en túneles, según Bieräumer.
- Figura 2.6.4.1 Refuerzo del talud frontal de emboquille de un túnel. Paraguas de micropolines, bulones y mallazo; en fase posterior el talud sería cubierto con gunita.

Figura 2.6.4.2 Emboquille de un túnel en rocas de mala calidad mediante pantalla anclada de micropolines.

Figura 2.6.5.1 Método tradicional.

Figura 2.6.5.2 Método Bernold.

Figura 2.6.5.3 Excavación mediante precorte mecánico.

Figura 3.7.2.1 Ataque a plena sección con varios pisos.

Figura 3.7.2.2 Método de la galería en clave o método belga.

Figura 3.7.2.3 Método de las dos galerías o método austriaco.

Figura 3.7.2.4 Método de las tres galerías o método alemán.

Figura 3.7.3.1 Secuencia de excavación y sostenimiento en avance por perforación y voladura.

Figura 3.7.3.2 Esquema de plan de voladura.

Figura 3.7.3.3 Cuele.

Figura 3.7.3.4 Franqueo.

Figura 3.7.3.5 Zapateras.

Figura 3.7.3.6 Recorte.

Figura 3.7.3.7 Bulldozer con ripper.

Figura 3.7.3.8 Pala cargadora y excavadora.

Figura 3.7.3.9 Esquema topo.

Figura 3.7.3.10 Tipos de cortadores.

Figura 3.7.3.11 Máquina topo.

Figura 3.7.3.12 Tuneladoras TBM< Robbins> para rocas.

Figura 3.7.3.13 Topo.

Figura 3.7.3.14 Escudo con las piezas de un anillo de revestimiento

Figura 3.7.3.15 Escudo con excavadora rotary.

Figura 3.7.3.16 Escudo con cuchara y cuchillas móviles.

Figura 3.7.3.17 Escudo de excavación hidráulica.

Figura 3.7.3.18 Rozadoras. Sistemas de corte.

Figura 3.7.3.19 Rozadoras de gran potencia.

Figura 3.7.3.20 rozadoras (Ripping). Sistemas de carga mediante mesa de recogida con brazos recolectores.

Figura 3.7.3.21 Rozadoras (Milling). Carga de escombros con carrusel de paleta.

Figura 3.7.3.22 Rozadoras (Ripping). Brazo rozador y recolector.

Figura 3.7.3.23 pala de volteo para secciones mínimas o como completamente a otros métodos.

Figura 3.7.3.24 Excavación mediante martillos hidráulico y sostenimiento con cerchas y chapa Bernold.

Figura 3.7.3.25 Excavación en la destroza.

Figura 3.7.3.26 Fases de excavación en un túnel.

Figura 3.7.5.1 Gutinado en el frente, la bóveda y los hastiales.

Figura 3.7.5.2 Sostenimiento mixto (cerchas, malla y hormigón proyectado).

Figura 3.7.5.3 Método Bernold antes del hormigón definitivo.

Figura 3.7.5.4 Método de preserrado en rocas blandas.

Figura 3.7.5.5 Preserrado en rocas duras (explosivos)

Figura 3.7.5.6 Instalación de bulones friccionantes tipo “Swellex”, con cerchas, mallazo y gunita.

Figura 3.7.5.7 Excavación mediante martillo hidráulico y sostenimiento con cerchas y chapa Bernold.

Figura 3.7.5.8 Cerchas con tablonés en el sostenimiento de una galería de avance.

Figura 3.5.7.9 Tratamientos especiales de estabilización.

Figura 3.5.7.10 Ejecución de un paraguas de micropolines.

Figura 4.3.3.1 Ventilación longitudinal natural.

Figura 4.3.3.2 Ventilación longitudinal natural con pozo.

Figura 4.3.3.3 Ventilación longitudinal con ventiladores en pozo.

Figura 4.3.3.4 Ventilación longitudinal por ventiladores de chorro.

Figura 4.3.3.5 Ventilación longitudinal por ventiladores en pozo y aceleradores.

Figura 4.3.3.6 Ventilación semi-transversal con inyección con aire fresco.

Figura 4.3.3.7 Ventilación transversal total.

Figura 4.3.3.8 Ventilación pseudo – transversal.

Figura 4.3.4.1 Efecto del agujero negro.

Figura 4.3.4.2 Zonas de acceso.

Figura 4.3.4.3 Curva de reducción de luminancia.

Figura 4.3.4.4 Niveles de luminancia requeridos en un túnel de tráfico unidireccional.

INTRODUCCION

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

La mayoría de los túneles se construyen para salvar un obstáculo natural y permite el acceso a vías de comunicación para transporte humano (metros), transvases y conducciones; o para unir islas o estrechos y para pasos fluviales, en cuyo trazo se efectúa bajo una lámina de agua.

Las obras subterráneas que constituyen o forman parte de proyectos de infraestructuras del transporte terrestre (carreteras y ferrocarriles), son construcciones que precisan atención específica por parte de los poderes públicos, debido a su especial incidencia en la seguridad de las personas y los bienes, tanto en su fase de ejecución como en la de explotación. Pero existen también otros factores de diversa índole funcional que afectan a estas obras subterráneas y que condicionan los criterios que inspiran su realización.

Por ello dichas obras han de proyectarse, construirse y explotarse de manera que, sin olvidarse de los criterios económicos, se cumplan los requisitos esenciales que les afectan directamente: Resistencia mecánica y estabilidad; seguridad en caso de incendio o vertido de materiales tóxicos o inflamables, y seguridad de utilización.

La ingeniería de túneles, requiere prácticamente de todas las ramas de la ingeniería civil y de muchas especialidades que deben actuar conjuntamente para la resolución de sus problemas de diseño y construcción, por lo que en el desarrollo de el tema está contemplada la participación de las especialidades vinculadas en la construcción de obras subterráneas.

Esta tesis, trata de presentar ordenadamente los conocimientos disponibles en forma generalizada para el proyecto, construcción y explotación de túneles; está dirigido a los ingenieros civiles y profesionales que en el ámbito de su profesión se dedican a esta actividad.

CAPITULO 1: CONSIDERACIONES GENERALES.

1.1 Objetivo

El presente trabajo tiene por objeto establecer criterios básicos para el proyecto, construcción y explotación que deben observarse en obras subterráneas que constituyan proyectos de infraestructuras del transporte de carreteras.

Definición

Los Túneles son excavaciones subterráneas con o sin soporte, que se construyen para salvar un obstáculo natural y permitir el acceso a vías de comunicación para transporte urbano (metros), transvases y conducciones; o para unir islas o estrechos y para pasos fluviales, en cuyo trazo se efectúa bajo una lámina de agua.

La finalidad principal de los túneles dedicados al tránsito es reducir distancias y tener mejores proyectos geométricos, basando su diseño en la seguridad y la economía; pues son una alternativa para estudiarse en conjunto con las estructuras de superficie y las elevadas (puentes y viaductos).

1.2 Requisitos esenciales.

Los túneles carreteros deberán cumplir, al menos, los siguientes requisitos esenciales:

- a) Resistencia mecánica y estabilidad.
- b) Seguridad en caso de incendio o de vertido de materiales tóxicos o inflamables.
- c) Seguridad de utilización.

1.3 Clasificación de obras viales subterráneas

Según su Geometría:

- Lineales
- Cavernas

Según tipo de terreno:

- Roca sana
- Roca intemperizada
- Suelos duros
- Suelos blandos

Según el método de construcción:

- Con excavación manual
- Con excavación convencional (voladuras y máquinas excavadoras)
- Con máquinas integrales (rozadoras y máquinas con cabeza en sección completa)
- Falsos túneles

CAPITULO 2: CRITERIOS BASICOS EN LA FASE DE PROYECTO

2.1 Condiciones generales de seguridad y estabilidad.

2.1.1 Generalidades.

El proyecto incluirá la justificación de la estabilidad y suficiente seguridad de todas y cada una de las zonas de la obra: Accesos, instalaciones de obra, emboquilles y tramos subterráneos.

Se proyectarán también las instalaciones definitivas (a las que se refiere el apartado 2.8), y las escombreras que fueren precisas para recibir los materiales sobrantes de la excavación (conforme indica el apartado 2.9).

Asimismo, se establecerán los requisitos de seguridad y salud, relativos a las fases de proyecto, construcción y explotación, y se atenderán los aspectos medioambientales sobre los que pueda influir la obra subterránea (de acuerdo con los apartados 2.10).

2.1.2 Acciones a considerar.

Para conseguir la seguridad y estabilidad de todas y cada una de las zonas de la obra se efectuará un estudio específico, amplio y detallado, y se tendrán en cuenta, al menos, las siguientes acciones:

- a) La gravedad.
- b) Las tensiones naturales existentes en el terreno.
- c) El agua en alguno de los siguientes aspectos:
 - Niveles freáticos estáticos.
 - Corrientes de aguas naturales o inducidas por la existencia, construcción o explotación de la obra.
 - Lluvias.
- d) El efecto sísmico en los tramos subterráneos de aquellas obras cuya destrucción puede interrumpir un servicio imprescindible, o aumentar los daños del terremoto, y situadas en zonas en las que, pueda preverse la incidencia de una aceleración sísmica básica probable mayor de 150 cm/s^2 . En los tramos de acceso a los túneles se tendrá en cuenta la acción del terremoto, de acuerdo con la peligrosidad sísmica.

Asimismo, en el caso de túneles paralelos, se deberá analizar la incidencia de las vibraciones (causadas por voladuras, etcétera), inducidas sobre cada uno durante la construcción del otro.

2.2 Trazado.

Independientemente de los condicionantes procedentes del trazado general de la carretera, de las características geológico-geotécnicas del terreno, o de otras causas como las recomendaciones medioambientales, el trazado de los túneles deberá respetar la normativa vigente de trazado de carreteras y, salvo expresa justificación en contrario, los máximos valores de rampas y pendientes serán el 3% y el 5% , respectivamente.

Se estudiarán las medidas conducentes a eliminar o paliar el posible efecto del deslumbramiento del conductor del vehículo, a la salida del túnel, en especial cuando la alineación de la obra en esta zona es poco diferente de la orientación de los rayos solares en algunas horas del día.

Cuando se trate de autovías o autopistas y se proyecte la construcción de túneles separados para cada dirección, se estudiará la separación entre ambos, en función de las características del terreno, métodos y secuencias constructivas de ambas perforaciones de manera que se eviten interferencias que pudieran producir inestabilidades o disminución significativa de la seguridad en el sostenimiento o revestimiento. Esta circunstancia será especialmente atendida en las zonas próximas a los emboquilles, o en zonas de eventuales subsidencias que eventualmente pudieran afectar a edificios o instalaciones próximas.

Salvo justificación en contrario, en túneles paralelos de longitud mayor de 1 kilómetro se construirán conexiones entre ambos, a distancias y dimensiones adaptadas a las necesidades del tráfico o a otros objetivos de ventilación y seguridad.

2. 3 Estudios geológicos y geotécnicos.

2. 3. 1 Generalidades.

Se realizarán los reconocimientos y estudios geológicos y geotécnicos adecuados para obtener un conocimiento suficiente de los terrenos que serán afectados directa o indirectamente por la construcción y explotación de la obra subterránea y de sus zonas de acceso y emboquille.

La planificación de los reconocimientos será lo suficientemente flexible para acomodarlos en cada momento, en su secuencia, tipo y alcance, a una mejor determinación de la morfología y características generales del terreno, y de sus singularidades, en especial a la cota del túnel.

Los reconocimientos en la superficie que sea accesible, complementados, si fuera preciso, con zanjas, calicatas, sondeos cortos, o estaciones geomecánicas, se extenderán a uno y otro lado de la traza en planta del túnel, hasta una distancia tal que los datos obtenidos puedan servir, en su extrapolación hacia el interior del terreno, a un posible mejor conocimiento del mismo a la cota del túnel, o correspondan a zonas posiblemente afectadas por la existencia de la obra, o por su construcción, siquiera sea temporalmente.

Si el terreno involucrado es un medio rocoso, se prestará especial atención a la eventual presencia de fallas o discontinuidades importantes, de ámbito regional o local, que pudieran ser cortadas por la perforación del túnel.

Se destacará, asimismo, la presencia de otras anomalías o singularidades estructurales del terreno o medio rocoso, como zonas cársticas, y corrimientos o paleo-deslizamientos que alcanzasen la alineación del túnel.

Los estudios se concentrarán también en las posibles áreas de emboquille, con objeto de examinar y conocer con mayor precisión el terreno en tales zonas, plausiblemente más débiles bajo el punto de vista geotécnico, y poder fijar mejor el punto de arranque de la obra subterránea.

El acusado influjo del agua en los diferentes aspectos del diseño, construcción y explotación de la obra subterránea, exige un adecuado estudio de las condiciones hidrogeológicas del entorno del túnel. Más adelante se especifican las diferentes circunstancias que deben ser examinadas a este respecto.

La gran variedad de métodos de prospección y ensayo para determinar la también amplia gama de morfologías, disposiciones estratigráficas y propiedades geotécnicas del terreno, exige una adecuación y una profundización de las actuaciones, acorde con las características, profundidad e importancia de la obra. Galerías y pozos de reconocimiento, sondeos mecánicos o penetrométricos, zanjas, calicatas, métodos geofísicos, diagrfias, toma de muestras y ensayos de campo o laboratorio, deben ser seleccionados para obtener una suficiente base para el diseño del túnel.

Los objetivos a conseguir con los reconocimientos y ensayos pueden concretarse en los siguientes puntos:

a) Determinación del perfil geológico del túnel, con definición litológica y tectónica de todos los terrenos y accidentes atravesados por aquél, en especial:

- Fallas y contactos mecánicos.
- Zonas tectónicas.
- Zonas alteradas.
- Corrimientos.
- Zonas carstificadas o milonitizadas.
- Rocas alterables, solubles o expansivas.

Se debe prestar especial atención a las fallas activas en zonas con riesgo sísmico, analizando las posibles soluciones (cambio de trazado, dispositivos de absorción de desplazamientos, etc.).

b) Caracterización geotécnica cuantitativa de los terrenos, que sirva de base para la utilización de las clasificaciones geomecánicas adecuadas y posterior sectorización del túnel. Debe comprender, al menos, la determinación de los parámetros correspondientes a:

- Resistencia y deformabilidad.
- Permeabilidad.
- Alterabilidad.
- Expansividad.
- Erosionabilidad.
- Comportamiento geológico.
- Susceptibilidad a la licuefacción por efecto sísmico.

c) Recomendaciones sobre tipos de sostenimiento a adoptar para los distintos sectores establecidos.

d) Recomendaciones orientadas a definir los sistemas de ejecución, las cuales deben comprender:

- Análisis de la perforabilidad mecánica.
- Métodos de sostenimiento recomendados.
- Métodos de revestimiento recomendados.
- Problemática previsible de la excavación (estabilidad, avenidas de agua, presencia de líquidos o gases, etc.).

e) Determinación de otros parámetros que, indirectamente, pueden servir de base también para el proyecto de la sección tipo.

f) Cálculo de subsidencias o movimientos del terreno, inducidos por el túnel, en el caso de entornos susceptibles a las deformaciones de aquél.

g) Análisis específico de las áreas de emboquille y posibles estructuras especiales, que comprenda los siguientes aspectos:

- Estudio de estabilidad de taludes en zonas de acceso al túnel.
- Recomendaciones sobre la zona de emboquille.
- Revestimientos en zonas de emboquille.
- Estudios complementarios para estructuras especiales.

2. 3. 2 Metodología de los estudios geológicos-geotécnicos para túneles.

Los estudios geológicos-geotécnicos son absolutamente necesarios para poder proyectar y construir una obra subterránea.

En este capítulo se describe la metodología básica para la realización de estos estudios, figura 2.3.2.1 , cuyos objetivos son los siguientes:

- Condiciones geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas del trazado.
- Identificación de puntos singulares o zonas de mayor complejidad geológica, hidrogeológica o geotécnica.
- Clasificación y sectorización geomecánica, propiedades y parámetros de diseño del macizo rocoso.
- Criterios geomecánicos para el cálculo de sostenimientos y métodos de excavación.
- Emplazamiento, excavación y estabilización de boquillas y accesos intermedios.
- Recomendaciones para la excavación, sostenimientos y proceso constructivo del túnel.
- Tratamiento del terreno para la estabilización, refuerzo, drenaje o impermeabilización del terreno.

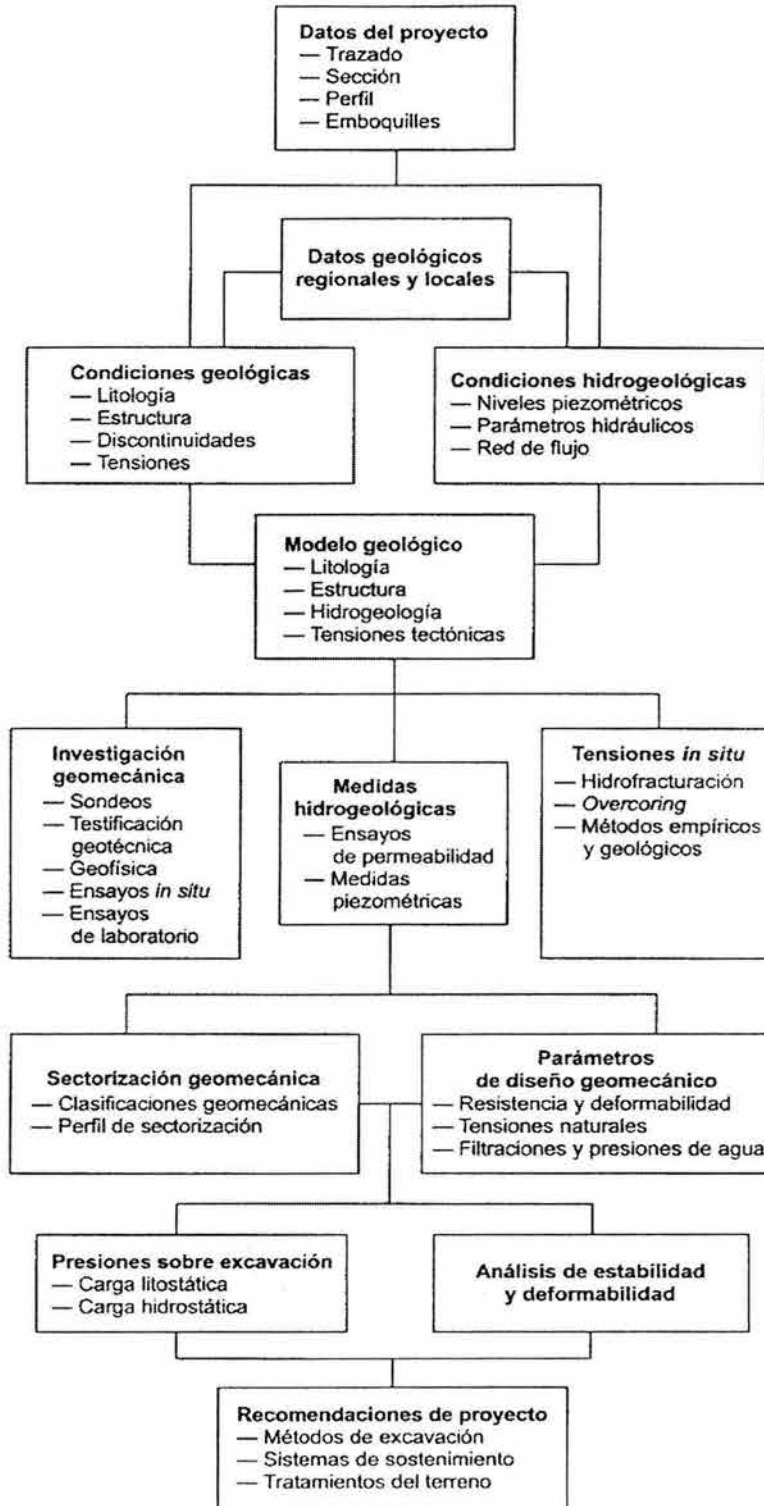


Figura 2.3.2.1 Metodología de los estudios geológico-geotéctonicos para túneles

2. 3. 3 Investigaciones in situ.

La importancia del conocimiento geológico en los túneles ya fue puesta de manifiesto por Terzaghi: “*la geología más que ningún otro factor determina el grado de dificultad y el costo de una excavación subterránea*”. Este conocimiento no solo es necesario para proyectar adecuadamente el túnel, sino fundamentalmente para evitar sobrecostos, accidentes y retrasos imprevistos.

Las investigaciones geológicas de los túneles son, en general más costosas que en otras obras ingeniería civil. Sin embargo, el no dedicar suficientes medios a estos estudios puede conducir a situaciones imprevistas: “*Cuando el terreno no se investiga, el terreno es un riesgo*”. La inversión *adecuada* en los estudios geológico-geotécnicos depende de la complejidad geológica, longitud del túnel, espesor de recubrimientos, etc. y puede llegar al 3% del presupuesto de la obra; por debajo de este porcentaje aumenta los casos de túneles con problemas y, por encima los imprevistos son mínimos (Waggoner y Daugharty, 1985).

Ante la importancia, tanto técnica como económica, las investigaciones *in situ* resulta esencial llevar a cabo una correcta planificación de las mismas.

Los criterios básicos para planificar las investigaciones *in situ* son las siguientes:

- Condiciones previas

- Características geológicas generales.
- Información disponible.
- Accesos.
- Presupuesto disponible.

- Estrategias a seguir:

- Planificar las investigaciones en varias fases sucesivas de intensidad creciente.
- Desarrollar al máximo las técnicas de geología de superficie.
- Situar los reconocimientos en zonas de importancia para:
 - La interpretación geológica
 - La identificación de puntos singulares.
 - El estudio de zonas de emboquille y accesos.
- Elegir adecuadamente las distancias técnicas de investigación según criterios de representatividad, rentabilidad económica y logística (accesos, distancias, aprovisionamientos, etc.).
- Los métodos de investigación deben estar acordes con los objetivos, alcance y fases del proyecto (tabla 2.3.3.1 y 2.3.3.2) siendo importante identificar desde las etapas más iniciales aquellos problemas geológicos que pudieran ser condicionantes e incluso incluyentes, por su carácter de riesgo o de seria dificultad constructiva.

Una de las tareas más importantes en la planificación de investigación es decidir la **localización de los sondeos**. No existen reglas generales pero sí ciertos criterios:

- Los sondeos deben cortar el mayor número de formaciones geológicas representativas del trazado del túnel, situándolos estratégicamente para que su longitud sea la mínima posible.
- Deben situarse de tal forma que aporten la mayor información para resolver la estructura geológica donde las incertidumbres geológicas sean mayores, incluyendo los problemas hidrológicos, cortando lo más perpendicular posible a las estructuras.
- Siempre que sea posible debe sobrepasar la cota de solera prevista para el túnel, al menos el equivalente a un diámetro del mismo.

- Los sondeos se planifican de forma que permitan realizar en su interior distintas pruebas, como ensayos de permeabilidad, de tensión-deformación y geofísica.
- En las boquillas y accesos intermedios es fundamental situar suficiente número de sondeos para estudiar los problemas de estabilidad: identificación de deslizamiento, filtraciones, espesor de zonas meteorizadas, etc. Su número dependerá de la complejidad de la zona, pero como pauta es conveniente situar un mínimo de 3 sondeos en cada zona de emboquille.

Los métodos de **investigación geofísica** más empleados son: la sísmica de refracción en zonas de pocos recubrimientos, ensayos *down-hole*, *cross hole* y diagraffias en el interior de sondeos, y la sísmica de reflexión para el estudio de estructuras geológicas profundas. Los **ensayos hidrogeológicos** más habituales son los de permeabilidad tipo Lugeon y Lefranc y las medidas piezométricas. Los **ensayos geotécnicos** *in situ* dependen del tipo de material y de la problemática del túnel; algunos de los más utilizados con los presiométricos y los dilatométricos y en ocasiones los de hidrofracturación.

Fases y objetivos	Tareas	Contenidos
<p>Estudios previos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Reconocimiento geológico general de trazado o corredores. • Identificación de riesgos geológicos para la excavación del túnel. • Clasificación geológico-geotécnica básica de materiales. • Planificación de investigaciones para la siguiente fase. • Análisis de alternativas de trazados. 	<p>Revisión de información</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Topografía. - Hidrología e hidrogeología. - Mapas geológicos. - Túneles y minas próximas. - Sísmicidad.
	<p>Fotointerpretación</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Fotogramas en color blanco y negro. - Técnicas especiales en zonas cubiertas de vegetación. - Teledetección.
	<p>Reconocimiento geológicos</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Geomorfología y estabilidad de laderas - Litología. - Fallas y estructuras tectónicas. - Datos hidrológicos.
	<p>Investigaciones in situ</p>	<ul style="list-style-type: none"> - - Sondeos espaciados. - Geofísica en superficie.
	<p>Interpretación geológica-geotécnica.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Mapas y cortes geológico (1:10.000 – 1:2.000).
<p>Anteproyecto y proyecto</p> <ul style="list-style-type: none"> • Selección del trazado y emboquilles. • Estudio geológico-geotécnico detallado. • Evaluación de los problemas geológico-geotécnicos y su incidencia en la excavación. • Características geomecánicas de los materiales. • Criterios geomecánicos para el diseño. • Recomendaciones para el sostenimiento, excavación y tratamientos del terreno 	<p>Cartografía geológica-geotécnica</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Litoestratigrafía. - Estructuras. - Estaciones geomecánicas. - Geomorfología. - Mapas a escala 1:2.000-1:500.
	<p>Datos hidrológicos e hidrogeológicos</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Regionales y locales. - Estimación de caudales y presiones.
	<p>Investigaciones geotécnicas</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Ensayos de laboratorio. - Sondeos. - Calicatas. - Geofísica. - Ensayes in situ.

Tabla 2.3.3.1 Fases, objetivos y contenidos de las investigaciones *in situ* para túneles

Continuación

Construcción <ul style="list-style-type: none"> • Control geológico-geotécnico y auscultación. • Adecuación del proyecto a las condiciones del terreno. • Medidas de control de inestabilidades, filtraciones y tratamientos del terreno. 	Control geológico-geotécnico	<ul style="list-style-type: none"> - Cartografía geología-geotécnica en el interior del túnel. - Sondeos en avance, galería exploratoria, geofísica, ensayos.
	Auscultación	<ul style="list-style-type: none"> - Instrumentación geotécnica.
	Control de calidad	<ul style="list-style-type: none"> - Ensayos.
	Asistencia técnica	<ul style="list-style-type: none"> - Seguimiento y control de ejecución. - Soluciones constructivas y tratamientos del terreno.

FOTOINTERPRETACIÓN	INVENTARIOS DE TÚNELES
<ul style="list-style-type: none"> - Escalas 1:25.000 a 1:10.000 - Recomendables las fotos a color. - Radar: en zonas de densa vegetación. - Térmicas: zonas de facturación con agua. - Infrarrojo: delimitación de características geológicas mal definidas con otras fotos. <p>Observaciones</p> <ul style="list-style-type: none"> - Técnicas rápidas y desarrolladas. - Bajo coste. - Precisan verificación en campo. - Limitaciones en zonas cubiertas de vegetación. 	<ul style="list-style-type: none"> - Tiene por objeto conocer el comportamiento de túneles de la región excavados en materiales y condiciones similares a la del túnel del proyecto. - Datos a incluir: corte geológico, estructura, clasificación geomecánica. - Datos geométricos, sostenimientos y problemas de construcción y mantenimiento. <p>Observaciones</p> <ul style="list-style-type: none"> - Permite efectuar análisis a posteriori del comportamiento geomecánico, estabilidad y sostenimiento. - Puede advertir sobre problemas existentes y transmitir experiencias. - La información está supeditada a la accesibilidad y disponibilidad de datos.
MAPAS GEOLÓGICOS-GEOTÉCNICOS	GALERÍA Y TÚNELES PILOTO
<ul style="list-style-type: none"> - Escalas de estudios previos 1:10.000-1:2.000. - Escalas de proyecto 1:2.000-1:500. - El corte geológico por el eje del túnel es el principal documento geológico. <p>Observaciones</p> <ul style="list-style-type: none"> - Técnicas muy desarrolladas e imprescindibles. - Relativamente económicas. - Sujetas a incertidumbres en función de la complejidad geológica y datos disponibles. 	<ul style="list-style-type: none"> - Utilizadas en túneles de gran longitud y/o complejidad. <p>Observaciones</p> <ul style="list-style-type: none"> - Permiten la observación directa y la realización de ensayos <i>in situ</i>, y el drenaje previo del terreno. - Permiten la instrumentación y realización de tratamientos del terreno previos y durante la excavación. - Muy costosas y lentas.

Tabla 2.3.3.2 Guía para la planificación de investigaciones en túneles.

Continuación

ESTACIONES GEOMECÁNICAS	GEOFÍSICA
<ul style="list-style-type: none"> - Análisis estructural de discontinuidades. - Grado de meteorización del macizo rocoso. - Datos Hidrogeológicos. - Estado de fracturación. - Ensayos de clasificación. <p>Observaciones</p> <ul style="list-style-type: none"> - Precisan de datos estadísticamente representativos. - Limitación de zonas cubiertas por vegetación, o por suelos o roca muy alteradas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Eléctrica: detección de fracturas, acuíferos y contactos litológicos. - Sísmicidad de refracción, <i>downhole</i> y <i>crosshole</i>: contactos roca sana-meteorizada, ripabilidad, módulos de deformación, grado de fracturación. - Diagrafías en el interior del sondeo: obtención de propiedades in situ, como densidad, porosidad, velocidad de ondas, grado de fracturación, etc. - Sísmicidad de reflexión: permite estudiar la estructura geológica en profundidad, fallas, pliegues, contactos, etc. <p>Observaciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Necesita contrastar resultados con otros datos de campo (sondeo, ensayos) y requieren una adecuada interpretación geológica. - Costes altas en sísmica por reflexión.

Continuación

SONDEOS
<p>Objetivos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Investigar problemas geológico-estructurales, zonas complejas o mal conocidas. - Obtener datos de fracturación del macizo y examinar los testigos. - Obtener muestras y testigos para ensayos. - Efectuar medidas hidrogeológicas y ensayos en su interior. <p>Equipos adecuados:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Rotación (a veces tricono). Diámetro mínimo NX - Tomamuestras de doble o triple tubo, <i>wire-line</i> en sondeos profundos. - Medidas de desviación en sondeos profundos. <p>Testificación geotécnica:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Descripción estandarizada del testigo del sondeo. <p>Situación de los sondeos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - En boquillas, accesos y zonas geológicamente complejas, y sistemáticamente a lo largo del eje del túnel. <p>Número: función de la complejidad, espesor de recubrimientos, accesos, costes, etc. Como orientación:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 1 sondeo cada 50 a 100 m de trazado en zonas geológicamente complejas, o de litología muy variable. - 1 sondeo cada 100 a 200 m en zonas más uniformes. - En zonas de emboquille un mínimo de 3 sondeos. - Para túneles de más de 1.000 m de longitud es recomendable una longitud total del sondeo al menos del 50% de la longitud del túnel. - Para túneles de menos de 1.000 m, el 75% de su longitud. - Para túneles de menos de 500 m, el 100% de su longitud. <p>Inclinación: en general es mejor realizar sondeos inclinados que verticales; importante medir desviaciones en sondeos profundos.</p> <p>Observaciones</p> <ul style="list-style-type: none"> - Medios directo de obtener testigos. - Permiten efectuar ensayos geotéctónicos y pruebas hidrogeológicas. - Alto coste, procedimiento lento. - Los accesos pueden ser un condicionante importante.

Continuación

ENSAYOS EN EL INTERIOR DE SONDEOS
<ul style="list-style-type: none">- Estudio de discontinuidades y cavidades: cámaras de TV, orientación de testigos, buzómetros, etc.- Ensayos de deformabilidad: dilatómetros y presiómetros.- Ensayos de hidrofracturación.- Ensayos de permeabilidad: Lugeon, Lefranc.- Piezometría, muestreo de agua, etc.- Ensayos geofísicos.
Observaciones
<ul style="list-style-type: none">- Muy útiles en rocas blandas, materiales fracturados o con escasa recuperación.- Algunas de estas técnicas son sofisticadas y costosas.

2.3.4 Influencia de las condiciones geológicas.

Al excavar un túnel se pueden encontrar tres tipos de **condiciones naturales** que dan lugar a la pérdida de resistencia del macizo y, por tanto, a **problemas de estabilidad** (figura 2.3.4.1)

- Orientación desfavorable de discontinuidades.
- Orientación desfavorable de las tensiones con respecto al eje del túnel.
- Flujo de agua hacia el interior de la excavación a favor de fracturas, acuíferos o rocas carstificadas.

Estas condiciones están directamente relacionadas con los siguientes factores geológicos: estructuras, discontinuidades, resistencia de la roca matriz, condiciones hidrológicas y estado tensional.

Por otro lado, la excavación del túnel también genera una serie de **acciones inducidas** que se suman a las citadas condiciones naturales, como son:

- Pérdida de resistencia del macizo que rodea a la excavación como consecuencia de la compresión creada: apertura de discontinuidades, fisuración por voladura, alteraciones, flujo de agua hacia el interior del túnel, etc.
- Reorientación de los campos tensionales, dando lugar a **cambios de tensiones**.
- Otros efectos como subsidencia en superficie, movimiento heladeras, cambios en los acuíferos, etc.

La respuesta del macizo rocoso ante las acciones naturales e inducidas determinan las **condiciones de estabilidad** del túnel y, como consecuencia, las **medidas de sostenimiento** a aplicar. Por otro lado, el proceso constructivo también depende de la **excavabilidad** de la roca, que asimismo es función de la resistencia, dureza y abrasividad, entre otros factores.

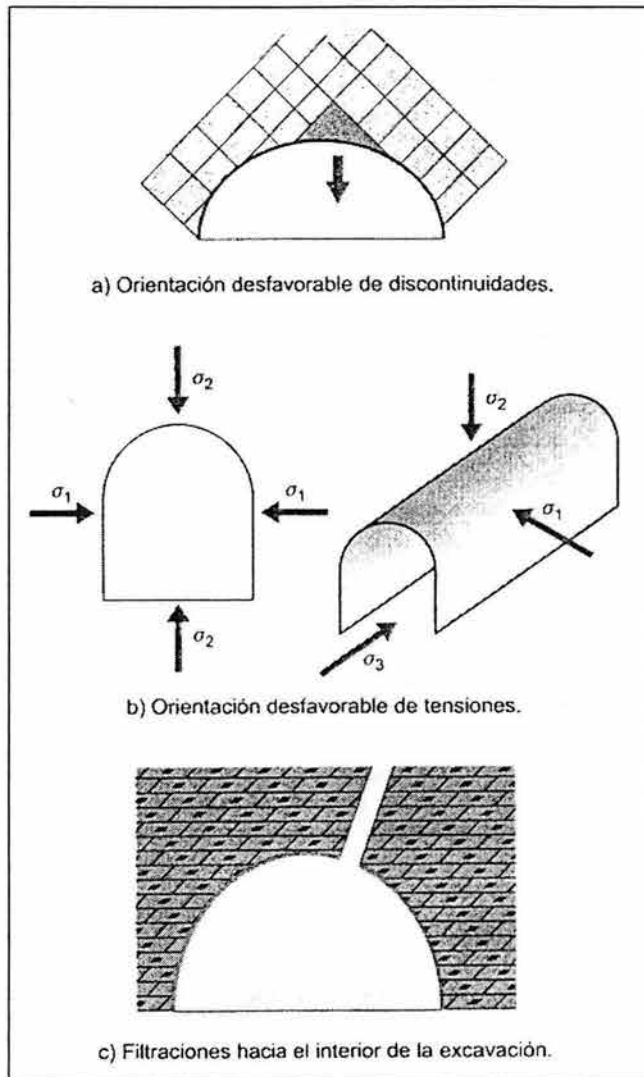


Figura 2.3.4.1 Condiciones naturales de inestabilidad en excavación de túneles en roca.

2.3.4.1 Estructuras geológicas.

La estructura geológica es uno de los factores que mas influye en la estabilidad de una excavación subterránea. En rocas plegadas y estratificadas la orientación de los estratos condiciona diferentes modos de comportamiento frente a la estabilidad en un túnel, influyendo los siguientes factores:

- Buzamiento de la estructura con respecto a la sección del túnel.
- Dirección de la estratificación con respecto al eje del túnel.
- Tipo de pliegues.

En la figura 2.3.4.2 se muestra la influencia de la estructura en la estabilidad de un túnel. En general, las orientaciones paralelas a la dirección del eje de un túnel son situaciones desfavorables.

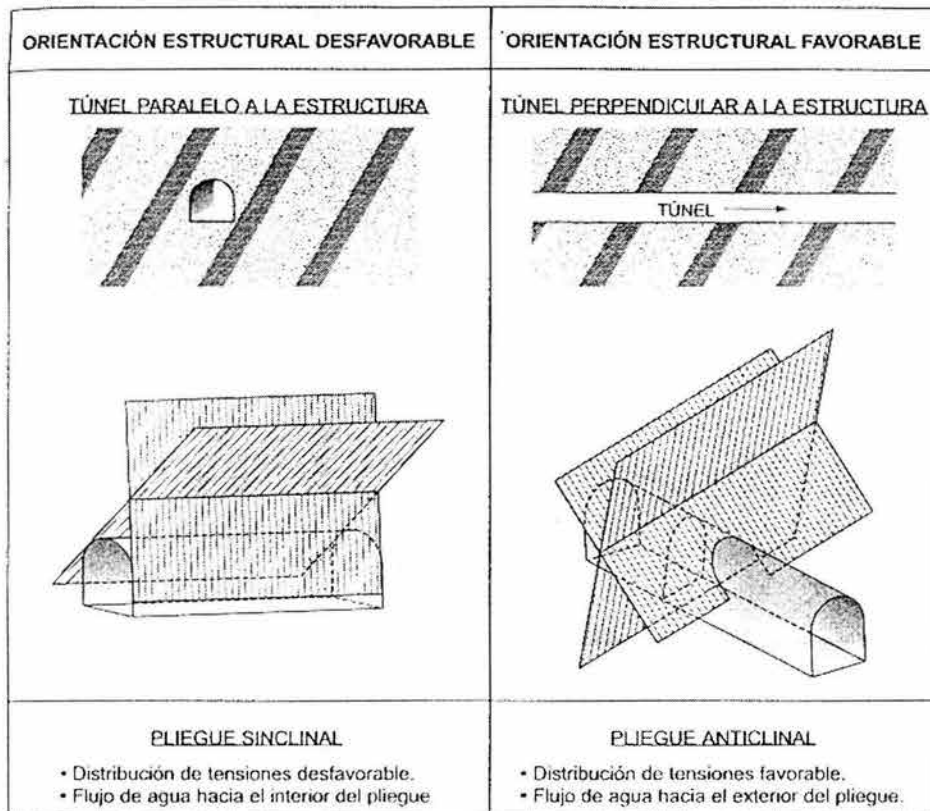


Figura 2.3.4.2 Influencia de la estructura geológica en la estabilidad de un túnel.

2.3.4.2 Discontinuidades.

La mayoría de los problemas de estabilidad se deben a la intersección de la sección del túnel con planos de discontinuidades (figura 2.3.4.3). Se distinguen las discontinuidades de tipo sistemático y las de tipo singular. Las diaclasas, planos de estratificación y de esquistocidad pertenecen al primer grupo, y están presentes prácticamente en todas las rocas, con mayor incidencia en zonas poco profundas, donde los procesos de meteorización y circulación de agua y los rellenos arcillosos son más frecuentes. A grandes profundidades la presión confinante hace que la apertura de las discontinuidades sea menor, pudiendo llegar a estar muy cerradas. Sin embargo, las discontinuidades más importantes bajo el punto de vista de la estabilidad son las de tipo singular, como las **fallas**; al estar sometidas estas estructuras a roturas y deformaciones a lo largo de su historia geológica su resistencia es muy baja, prestando rellenos miloníticos y rocas de falla que, además de tener baja resistencia, pueden construir vías preferentes para la circulación de agua. Por otro lado, las fallas pueden acumular tensiones tectónicas importantes.

El estudio de las fallas y demás discontinuidades singulares es uno de los aspectos geológicos más importantes en un túnel. Para dicho estudio se requiere:

- Conocer la estructura tectónica regional y local.
- Cartográfica geológica y análisis estructural.
- Identificación de fallas y su clasificación en función del origen, edad, tipo y geometría.
- Identificación de rellenos de falla, su resistencia y expansividad.
- Conocer la transmisibilidad hidráulica.
- Estudios sobre las implicaciones tensionales y sobre sismicidad.

El estudio de las discontinuidades de tipo sistemático debe comprender todos los aspectos detallados; para ellos es necesario obtener datos estructurales representativos en número suficiente para efectuar tratamientos estadísticos de los mismos. El método de representación y análisis más utilizado es la proyección estereográfica, que puede ser complementado con bloques diafragmas o secciones transversales (figura 2.3.4.4).

La **incidencia de las fallas** en la estabilidad de una excavación depende de las características de las mismas; de forma simplificada, éstas pueden ser:

- Fallas caracterizadas por una o varias superficies de discontinuidades, planos de despegue o contactos mecánicos entre distintos materiales.
- Fallas caracterizadas por una zona de espesor variable y de baja resistencia formada por materiales blandos, inestables, plásticos o expansivos.
- Fallas caracterizadas por una zona de alta transmisibilidad hidráulica.

Las fallas inciden en la estabilidad de la excavación según su orientación e intersección con el túnel. Al ser planos de gran continuidad pueden atravesar toda la sección, y cortar las discontinuidades de tipo sistemático generando cuñas o inestabilidades de gran tamaño. Su resistencia es muy inferior al resto de las discontinuidades, y pueden estar sometidas a presiones intersticiales y/o tensiones tectónicas, constituyendo planos principales de ruptura.

Además de las anteriores consideraciones, cuando la falla contiene zonas de trituración, materiales de relleno de baja resistencia, etc., el propio relleno constituye un plano o zona de ruptura. En función del tipo de relleno se ha establecido varios tipos de comportamiento frente a la estabilidad, según se muestra en la figura 2.3.4.5.

Los **cabalgamientos** constituyen un caso particular de las fallas, y se caracterizan por presentar superficies de cizallas de muy bajo ángulo, baja resistencia y gran continuidad.

Cuando la falla constituye una vía preferente para la circulación de agua se generan distintos comportamientos frente a la estabilidad. En función de la diferencia de permeabilidad entre los materiales a cada lado de falla y de la naturaleza del material de relleno, ésta puede ser una barrera frente a las filtraciones o un conducto preferente. En presencia de materiales blandos, carstificados o sueltos, se pueden producir desprendimientos e inestabilidades importantes, además de las filtraciones correspondientes.

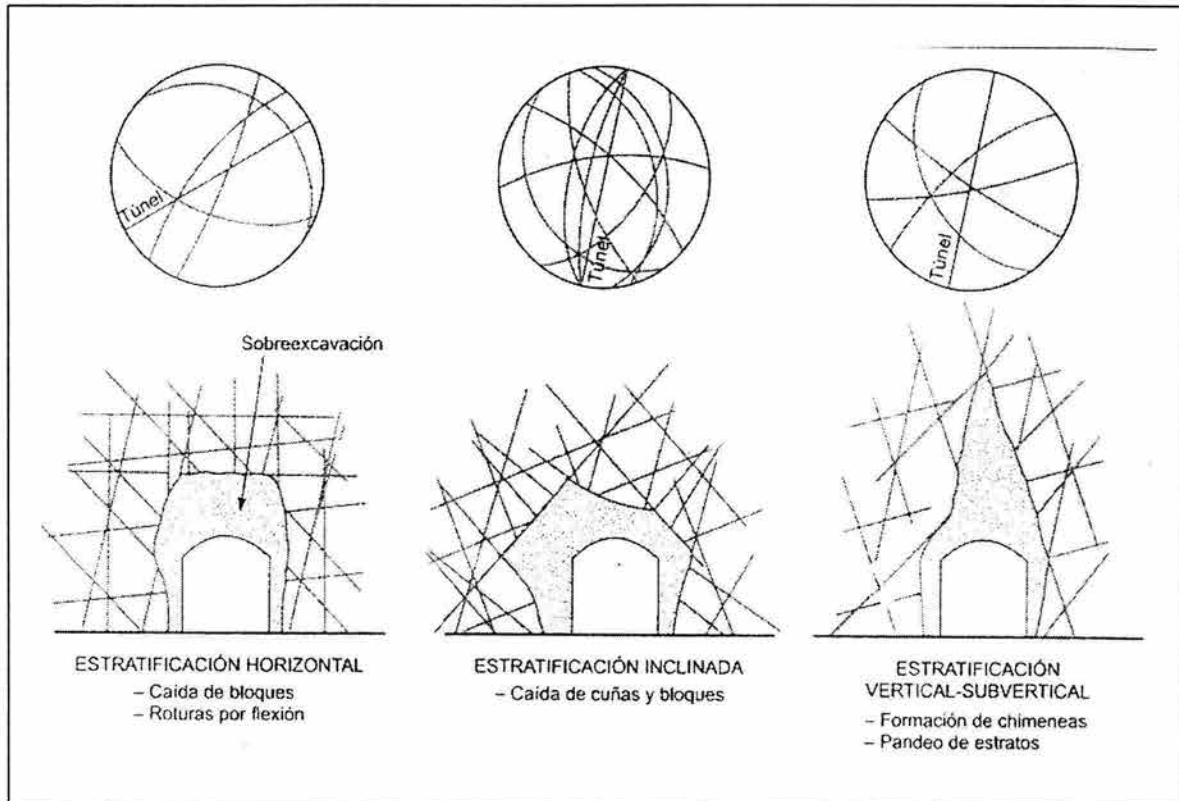


Figura 2.3.4.3 Influencia de las discontinuidades en la estabilidad de un túnel. Ejemplos de sobreexcavación producidas en un túnel de trasvase.

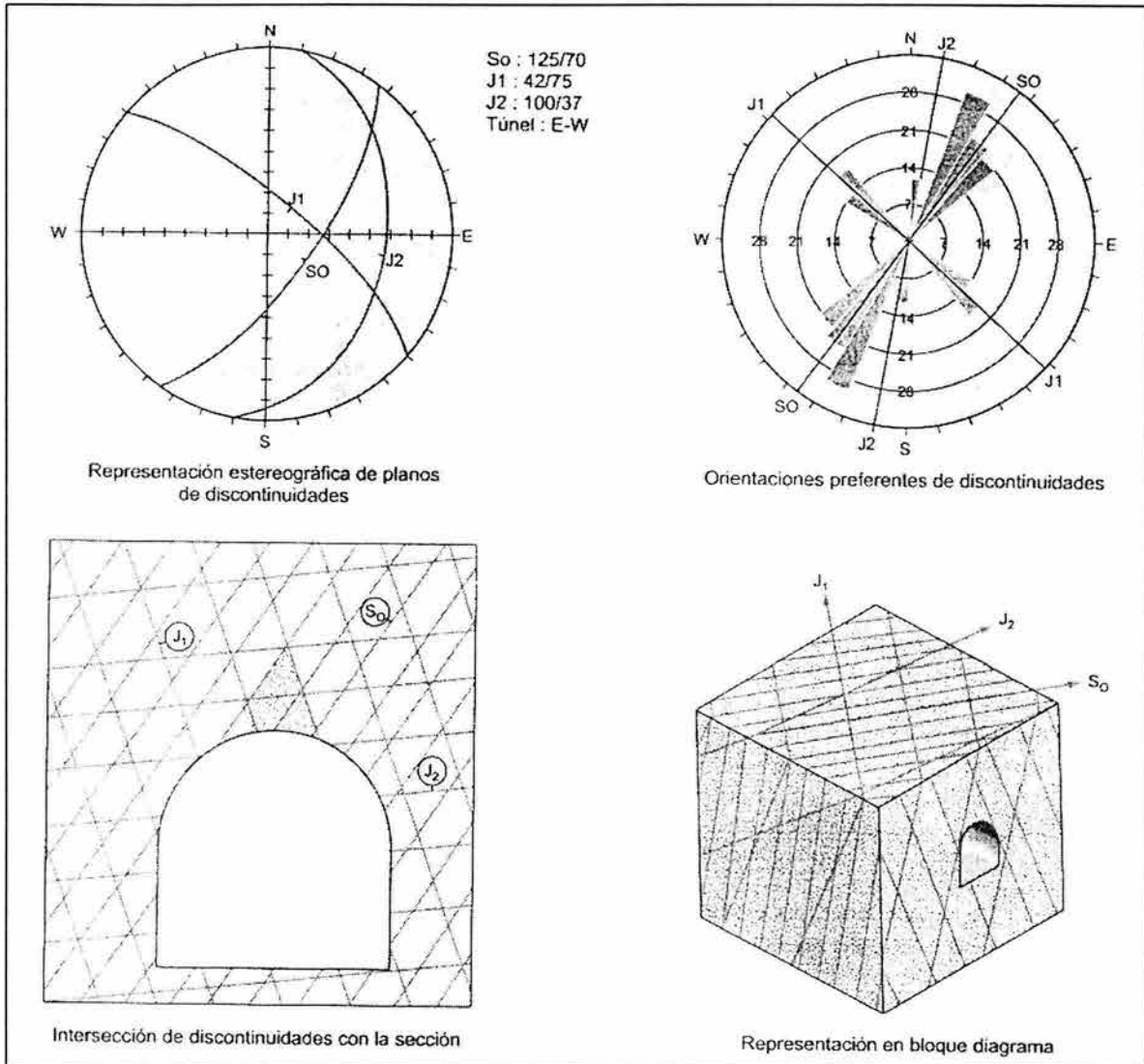


Figura 2.3.4.4 Representación y análisis de discontinuidades.

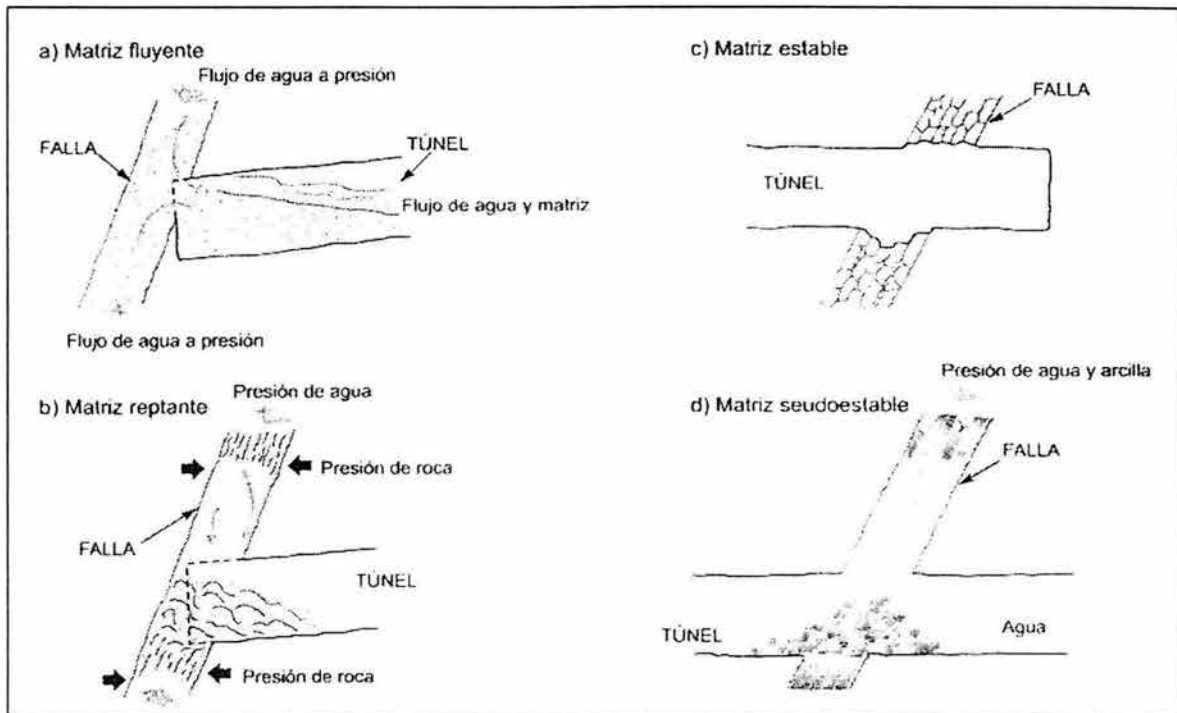


Figura 2.3.4.5 Estabilidad de las rocas de falla en un túnel

2.3.4.3 Resistencia de la matriz.

La resistencia de la matriz rocosa influye en forma decisiva en el método de excavación, y es un factor importante en la estabilidad de la misma.

A partir del **factor de competencia** $F_c = \sigma_{ci} / \sigma_v$ (donde σ_{ci} es la resistencia de la matriz rocosa y σ_v es la tensión o esfuerzo máximo vertical), se diferencia tres condiciones de estabilidad:

- $F_c > 10$: la matriz rocosa tiene una resistencia muy superior a las tensiones del macizo y la excavación es estable.
- $10 > F_c > 2$: la estabilidad está condicionada por el tiempo y las propiedades de la roca, pudiéndose establecer tres tipos de deformaciones: elástica, plástica y rotura frágil con riesgo de explosión de roca.
- $F_c < 2$: la excavación puede ser inestable al sobrepasar las tensiones la resistencia de la matriz rocosa.

La estabilidad estimada a partir de F_c no tiene en cuenta la presencia de discontinuidades. Esta situación es poco común, pero puede darse en macizos muy homogéneos, rocas masivas cristalinas, sales, etc., o bien en rocas situadas a grandes profundidades, en donde las discontinuidades están muy cerradas.

2. 3. 5 Estudios hidrogeológicos.

Se efectuarán los estudios hidrogeológicos necesarios para conocer de una manera suficiente, para las etapas de construcción o explotación, las siguientes facetas:

- a) Establecimiento del o de los niveles freáticos, y su eventual variación estacional.
- b) Existencia de fuentes, manantiales, captaciones de agua, etc., que puedan influir en el túnel, o ser influidos por éste.
- c) Permeabilidad o transmisividad de los diferentes terrenos que pudieran ejercer su influjo en los aportes de agua al túnel durante la vida de la obra.
- d) Factores que influyen en la elección del drenaje o impermeabilización del túnel.
- e) Inlujo del eventual drenaje del túnel en la posible variación de las condiciones hidráulicas de los niveles freáticos, afloramientos o aprovechamientos indicados en a) y b).
- f) Posibilidad de que el túnel suponga una barrera total o parcial a las corrientes subterráneas naturales, y la correspondiente variación de las circunstancias indicadas en a) y b).

Los estudios hidrogeológicos deberán llenar los objetivos señalados para establecer las bases del restablecimiento de las condiciones iniciales, o aceptación de las modificaciones que fueran admisibles.

2. 3. 5. 1 Condiciones hidrológicas.

La excavación de un túnel produce el efecto de un gran dren hacia el cual fluye el agua de los acuíferos interceptados, dando lugar a las siguientes consecuencias:

- Disminución de la resistencia del macizo.
- Aumento de las presiones intersticiales sobre el sostenimiento y el revestimiento.
- Hinchamientos y reblandecimientos en materiales arcillosos.
- En materiales salinos se pueden formar cavidades muy rápidamente.
- Graves problemas de avance en la excavación.

La transmisividad en los macizos rocosos tiene lugar preferentemente a través de fracturas, o por conductos de mayor tamaño en rocas carstificadas. En los suelos, la transmisibilidad está directamente relacionada con la granulometría, y la presencia de determinadas estructuras sedimentarias, por ejemplo paleocanales. Las filtraciones en los macizos rocosos provienen principalmente de:

- Fallas y fracturas.
- Rocas de brecha, rellenos de falla, zonas alteradas.
- Contactos litológicos entre rocas de permeabilidad muy diferente.
- Conductos cársticos, tubos en rocas volcánicas, etc. Las cavidades cársticas pueden suponer un gran riesgo de filtraciones, además de ser difíciles de localizar.

Los **estudios hidrogeológicos** para túneles deben incluir los siguientes aspectos:

- Balance hídrico de la zona de influencia del túnel incluyendo un inventario de fuentes, manantiales y pozos.
- Niveles piezométricos en el área túnel y su variación estacional.
- Delimitación de acuíferos, zonas de recarga y descarga.
- Identificación de zonas cársticas, fracturas y fallas y rocas muy permeables.

- Determinación de los parámetros hidráulicos de los acuíferos.
- Modelos de flujo.
- Estimación de los caudales previsibles y su presión.
- Identificación de las zonas de mayor riesgo de filtraciones.
- Composición química y calidad del agua, temperatura y agresividad.
- Influencia de las filtraciones en el túnel sobre un entorno próximo (rebajamiento del nivel freático) y riesgo de inducir asientos en los edificios.
- Factores que influyen en la elección del drenaje o impermeabilización del túnel.
- Posibilidad de que el túnel suponga una barrera total o parcial en la red de flujo y en las variaciones de nivel freático, fuentes, manantiales, etc.

Los resultados de las investigaciones hidrogeológicas proporcionan la información necesaria para adoptar medidas de control del agua durante la excavación, prevenir otros efectos indirectos e implicaciones ambientales. En particular es necesario definir:

- Caudales y presiones a lo largo del túnel.
- Medidas de drenaje o de impermeabilización.
- Posibles riesgos de subsidencia, daños en edificios próximos. Cambios en los acuíferos, agresividad y contaminación de las aguas.

2. 3. 6 Estado Tensional.

Las tensiones actuantes sobre una excavación subterránea son de dos tipos: naturales e inducidas. Las primeras corresponden al estado de esfuerzos naturales como consecuencia de los procesos tectónicos, gravitacionales, etc., y el segundo tipo responde a la redistribución de tensiones como consecuencia de la excavación.

Para diseñar una excavación subterránea se necesita conocer la magnitud y la dirección de las tensiones naturales, tanto para el cálculo de los sostenimientos como para analizar la sección y el proceso contractivo. Si las tensiones alcanzan valores muy altos, este factor constituye un riesgo que puede ocasionar fenómenos de explosión de roca o deformaciones importantes de costosa solución

2. 3. 6 .1 Métodos de análisis.

Para los fines de diseño de un túnel el análisis de las tensiones puede efectuarse según el siguiente procedimiento:

1. **Análisis del contexto tectónico regional.** Se evalúa el estado tensional en relación al régimen actual a partir de datos publicados o por métodos geológicos. Se analiza si el macizo está sometido a esfuerzos tectónicos actuales o residuales (recuérdese que la tensión residual es la que conserva la roca después de que haya cesado la causa que la produjo, por ejemplo causas tectónicas o gravitacionales).
2. **Análisis de estructuras tectónicas.** Se identifican las estructuras que puedan producir estados tensionales elevados, anisotropía o anomalías locales, incluyendo los cambios en la dirección de los esfuerzos. El campo tensional en una región determinada sigue a grandes rasgos las direcciones de los esfuerzos principales y de las estructuras tectónicas regionales. Sin embargo, otras estructuras de menor alcance pueden modificar localmente la dirección de los esfuerzos regionales (diques, cuerpos intrusivos, fallas locales, diapiros, volcanes, etc.).

3. **Evaluación de estados tensionales de origen gravitacional.** Los efectos de la erosión, el peso de sedimentos, etc., influye en el campo tensional, pudiendo generar tensiones horizontales superiores a las verticales y cambios en su dirección. También los cambios bruscos de pendiente o de relieve pueden producir tensiones horizontales importantes, si bien su efecto se dispara rápidamente al alejarse de su zona de influencia.
4. **Estimación del estado tensional por métodos geológicos.** Los métodos geológicos proporcionan la dirección de los esfuerzos, no la magnitud. Los mecanismos focales pueden indicar la dirección de las tensiones actuales.
5. **Estimación del estado tensional por métodos empíricos.** A partir de datos empíricos se puede estimar un valor para la tensión máxima vertical $\sigma_V = 0.027 \text{ MPa/m}$ (en zonas de topografía poco accidentada y de donde las direcciones de las tensiones principales sean la vertical y la horizontal); La tensión máxima horizontal σ_H puede considerarse aproximadamente igual a σ_V a partir de 1.000 m de profundidad, mientras que a menores profundidades el valor de σ_H puede superar al de σ_V debido a las tensiones tectónicas y gravitacionales.

Puede considerarse que $\sigma_H / \sigma_V = \nu(1 - \nu)$, (siendo ν el coeficiente Poisson) en las siguientes condiciones:

- Rocas sedimentarias poco deformadas, en ausencia de fallas y pliegues, o estructuras tectónicas importantes.
- Rocas de origen evaporítico, bioclástico y volcánico (exceptuando zonas con estructuras y procesos diapíricos, de influencia, inyección, etc.).
- Rocas blandas, margas, arcillas, etc. (exceptuando zonas con tensiones producidas por hinchamientos, fluencias, etc.).

Si la zona de estudio ha estado sometida a esfuerzos tectónicos importantes, a partir de índice SRF se pueden efectuar una estimación del estado tensional. El método de Sheorey considera otros efectos (elasticidad, profundidad, etc.). La descripción de ambos métodos se incluyen en el apartado 2.3.7.3.

6. **Medidas de las tensiones mediante ensayos *in situ*.** Son el único método directo para medir la magnitud y la dirección de las tensiones. Se efectúan en sondeos o galerías, su costo es alto y precisan de medios muy especializados.

2. 3. 6. 2 Efectos de las tensiones elevadas.

Los túneles o las explotaciones mineras bajo el efecto de tensiones muy altas pueden presentar riesgo de colapso, explosiones de roca y grandes deformaciones (figura 2.3.6.1). En función de la relación entre la magnitud de las tensiones y la resistencia uniaxial σ_{ci} de la roca, la respuesta del macizo a los esfuerzos pueden ser:

- Deformación elástica con rotura de tipo frágil, característica de rocas duras en túneles, en general, profundos: **riesgo de explosión de roca y de lajamiento.**
- Deformación plástica típica de rocas blandas: **riesgo de plastificación y otras deformaciones.**

En el caso de roturas frágiles con riesgo de **explosión de roca** se puede producir accidentes, precisando la excavación de medidas especiales de sostenimiento, por lo que es importante prever esta situación. Uno de los criterios empíricos para evaluar la estabilidad en túneles profundos en rocas de resistencia muy alta es el de Hoek y Brown (1980):

$\sigma_v / \sigma_{ci} = 0.1$: excavación estable.

$\sigma_v / \sigma_{ci} = 0.2 - 0.3$: riesgo de lajamiento.

$\sigma_v / \sigma_{ci} > 0.5$: riesgo de explosión de rocas.

El riesgo de **fluencia** (*squeezing*) puede estimarse según la condición empírica de Sing (1992):

$$H > 350Q^{1/3}$$

Siendo H la profundidad del túnel (m) y Q el índice de calidad de Barton (1974),

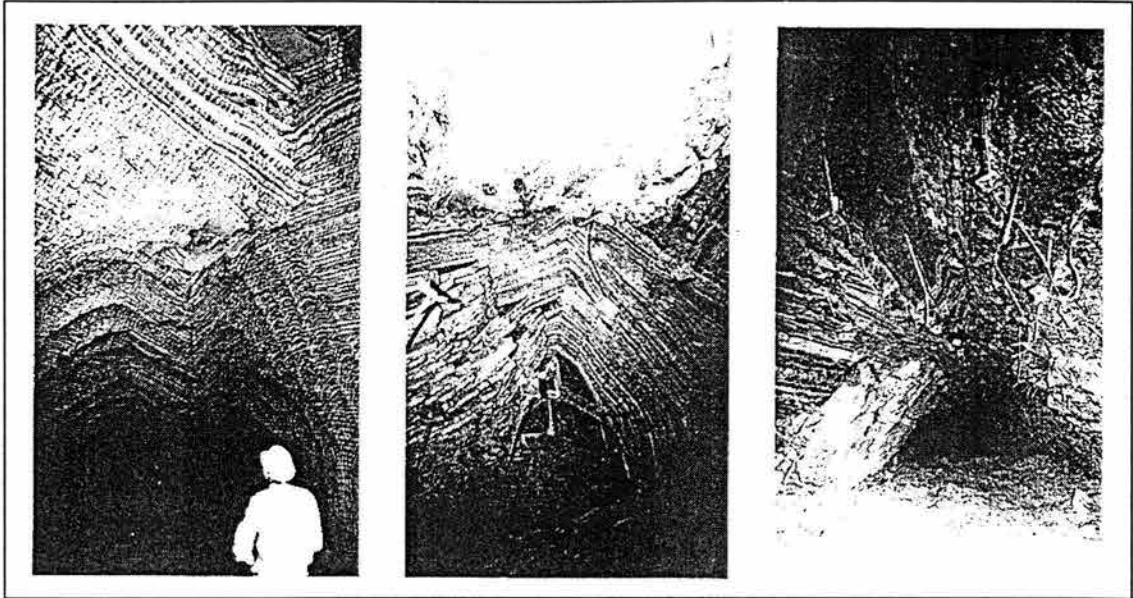


Figura 2.3.6.1 Grandes deformaciones en lutitas y sales: a) inicio de roturas en el techo; b) roturas generalizadas con grandes empujes en hastiales; c) cierre casi completo de la excavación con rotura de bulones.

2. 3.7 Parámetros geomecánico de diseño.

2. 3. 7. 1 Datos geológicos y geomecánicos.

El proyecto y construcción de una excavación subterránea requiere datos geológicos y geomecánicos para el diseño de los sostenimientos, selección del método de excavación y los tratamientos del terreno. En general se precisa la siguiente información:

- Datos Básicos del proyecto.
 - Perfil topográfico y planta del trazado a lo largo del eje del túnel.
 - Sección tipo de la excavación, situación de emboquille, distancias entre túneles gemelos, accesos intermedio, etc.

- Datos de carácter sistemático.
 - Estructura geológica, litología, fallas y demás discontinuidades, mapas y cortes geológicos.
 - Condiciones hidrogeológicas, permeabilidad y flujo subterráneo.
 - Propiedades geomecánicas de la matriz rocosa, discontinuidades y macizos rocosos.
 - Dirección y magnitud de las tensiones.
 - Clasificación geomecánica del trazado y perfil de sectorización geomecánica.

- Datos de carácter singular.
 - Fallas y zonas tectonizadas de importancia.
 - Estructuras tectónicas que puedan suponer anisotropías tensionales elevadas.
 - Terrenos blandos y expansivos; riesgo de fluencias e hinchamientos.
 - Materiales agresivos o muy abrasivos.
 - Zonas con riesgo de filtraciones importantes, golpes de agua, etc.
 - Posibilidad de encontrar gases o gradientes térmicos elevados.

- Zonas de emboquille y accesos.

Las zonas de emboquille deben ser estudiadas de forma particularizada. El bajo espesor de recubrimientos da lugar a mayores grados de alteración, y mayor permeabilidad y flujo de agua, factores que en conjunto predeterminan una mayor deformabilidad y menor resistencia que el resto del trazado. Sin embargo, el principal riesgo *a priori* lo constituyen los deslizamientos, aspecto que siempre debe de investigarse en zonas de emboquille.

- Presentación de datos geomecánicos.

La información obtenida debe reflejarse en la siguiente documentación de tipo gráfico, además de los correspondientes informes y estudios:

- Planos geológicos de superficie y a cota de túnel.
- Cortes geológicos longitudinal y transversal al túnel.
- Perfil de sectorización geomecánica (PSG) a lo largo del eje del túnel y a la cota de excavación; el PSG debe incluir de forma resumida la información más relevante sobre los siguientes aspectos (figura 2.3.7.1):
 - Litología y grado de fracturación.
 - Puntos singulares de tipo litológico, tectónico, hidrogeológico, etc.
 - Zonas de filtraciones importantes.
 - Clasificación geomecánica.
 - Parámetros geomecánicos de diseño.
 - Recomendaciones sobre los sostenimientos, método de excavación y tratamiento del terreno.

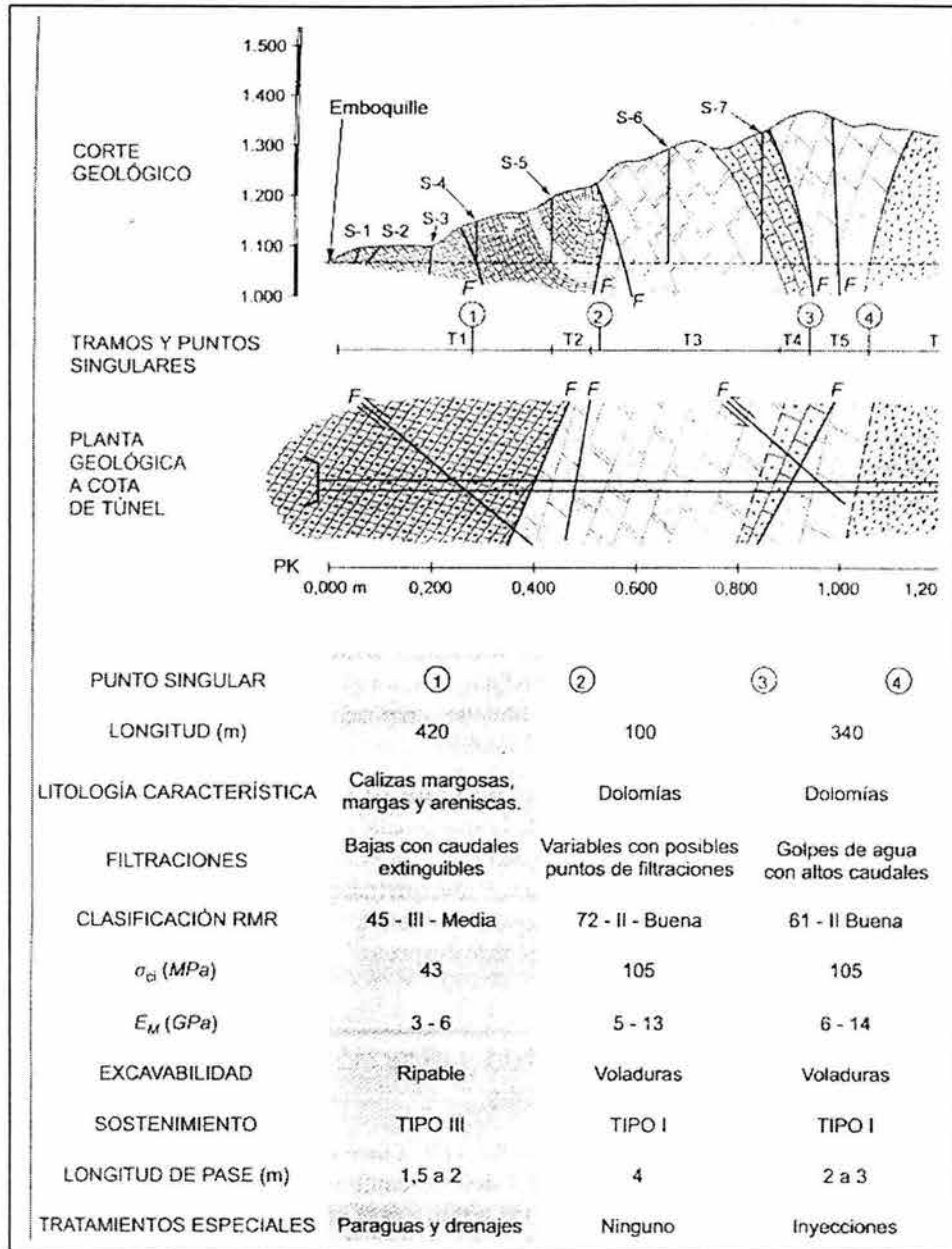


Figura 2.3.7.1 Ejemplo de perfil de sectorización geomecánica.

2. 3.7.2. Resistencia y deformabilidad.

Los diferentes métodos directos y empíricos para el cálculo de la resistencia y deformabilidad de los macizos rocoso son:

- Resistencia de la matriz rocosa.
 - Ensayos de compresión simple, tracción y triaxiales.
 - Criterio de Hoek y Brown.

- Resistencia al corte de discontinuidades.
 - Ensayos de corte directo y de rozamiento.
 - Criterio de Mohr- Coulomb.
 - Métodos de Barton y Choubey.

- Resistencia del macizo rocoso.
 - Criterios de Hoek y Brown
 - Criterio de Mohr – Coulomb

- Deformabilidad del macizo

Las deformabilidad del macizo rocoso es uno de los parámetros más complejos de evaluar dada la heterogeneidad y anisotropía que caracterizan a los macizos. Los distintos métodos para su evolución son:

- Ensayos in situ y métodos geofísicos.
- Correlaciones con el módulo de deformabilidad de la matriz rocosa, el módulo dinámico y el RQD.
- Métodos empíricos a partir de los índices RMR, Q y GSI.

2.3.7.3 Magnitudes y direcciones de las tensiones naturales.

De acuerdo con la metodología expuesta en el apartado 2.3.6 de este capítulo, es posible estimar si en la zona de estudio son previsibles estados tensionales elevados de tipo tectónico o gravitacional. En estos casos las alternativas son las siguientes.

1. Estimar el valor de K empíricamente mediante el índice SRF o el método de Sheorey; $K = \sigma_H / \sigma_V$.
2. Determinar la dirección de las tensiones por métodos geológicos.
3. Efectuar medidas directas mediante ensayos *in situ*.

El procedimiento número uno será presentado a continuación y los métodos correspondientes a los puntos 2 y 3 serán dejados a investigación.

Índice SFR

El índice SFR, *stress relief factor*, permite estimar el parámetro K , a partir de datos geológicos y de la deformabilidad del macizo rocoso, cuando el macizo se encuentra sometido a campos tensionales tectónicos importantes. El índice SFR se expresa a partir de:

$$\text{SFR} = \log [T / (E \times H)] \times \text{NC} \times \text{SC}$$

Donde:

T = edad del último plegamiento principal que afectó al macizo (años).

E = módulo de elasticidad de la roca matriz (GPa)

H = máxima carga litostática a lo largo de la historia geológica, dada en metros.

NC = coeficiente de actividad sismotectónica.

SC = coeficiente de influencia topográfica.

El parámetro T se calcula estimando la edad del último plegamiento que afectó al macizo, que se simplifica al plegamiento que afectó al macizo, Hercínico (en cuyo caso la edad varía entre 250 y 300 millones de años), o a los valores que corresponda según las regiones consideradas. Cuando un macizo ha sido afectado por ambos plegamientos se considerará el más importante. El parámetro H se estima en función de la carga de litostática a la que ha estado sometida la roca a lo largo de su historia geológica. En rocas sedimentarias H equivale al espesor de la columna estratigráfica existente en la actualidad por encima de la cota del túnel, más el espesor de la columna que, no estando presente en la zona por razones erosivas o de otra índole, regionalmente le corresponda. Estos datos se deducen consultando mapas geológicos o estudios estratigráficos regionales.

En rocas ígneas o metamórficas H equivale a la máxima profundidad a la que se emplazaron o adquirieron propiedades elásticas. En rocas metamórficas existen buenos indicadores mineralógicos de profundidad; estos datos se encuentran habitualmente en las memorias de los mapas geológicos regionales. En rocas plutónicas la estimación de la profundidad de emplazamiento no es directa, debiendo consultar la bibliografía regional.

El coeficiente NC se aplica cuando la zona esté próxima o se vea afectada por una falla activa de importancia regional, o con sismicidad asociada. En estos casos su valor es 0.25. El coeficiente SC interviene en situaciones topográficas especiales, como laderas de valles muy profundos o escarpes muy acusados. Su valor en estos casos es 0.30. Cuando coexistan NC y SC, sólo se tomará el valor inferior (0.25).

Aplicación del índice SFR

- Para rocas plegadas en el Hercínico se aplica la siguiente expresión:

$$K = \frac{SFR - 4.02}{-0.34}$$

- Para rocas plegadas en el Alpino, la expresión es:

$$K = \frac{SFR - 2.67}{-0.27}$$

- La evaluación del estado tensional se efectúa según se indica en la tabla 2.3.7.1

Criterios de aplicación del índice SFR

Rocas plegadas en el Hercínico			Rocas plegadas en el Alpino		
SFR	K	Estado tensional	SFR	K	Estado tensional
> 3.6	< 1.0	Bajo	> 2.4	< 1.0	Bajo
3.6 a 3.4	1.0 a 1.5	Medio	2.4 a 2.2	1.0 a 1.5	Medio
3.4 a 3.2	1.5 a 2.0	Alto	2.2 a 2.0	1.5 a 2.0	Alto
< 3.2	> 2.0	Muy Alto	< 2.0	> 2.0	Muy Alto

Tabla 2.3.7.1

Método de Sheorey

EL método de Sheorey (1994) tienen en cuenta las tensiones de origen no renovable, de membrana, térmicas y de origen elástico. No considera las tensiones tectónicas. La expresión propuesta es la siguiente:

$$K = 0.25 + 7 Eh (0.001 + 1 / z)$$

Donde:

Eh = el módulo de elasticidad medio de la zona de la corteza superior, medido en dirección horizontal, en GPa.

z = profundidad, en metros.

2.4 Sección transversal.

En base a los gálibos requeridos por la funcionalidad de cada tipo de obra, de la estructura geológico-geotécnica del terreno, de los imperativos de las instalaciones propias y de los contornos externos, se definirán y justificarán cuantas secciones tipo sean precisas para cumplir las condiciones mínimas de estabilidad y seguridad que las circunstancias indicadas exigen.

En el caso de túneles de carreteras se cumplirá lo prescrito en la normativa vigente de trazado de carreteras.

En el proyecto, se establecerán las tolerancias y las superficies del gálibo mínimo para la construcción del sostenimiento o revestimiento.

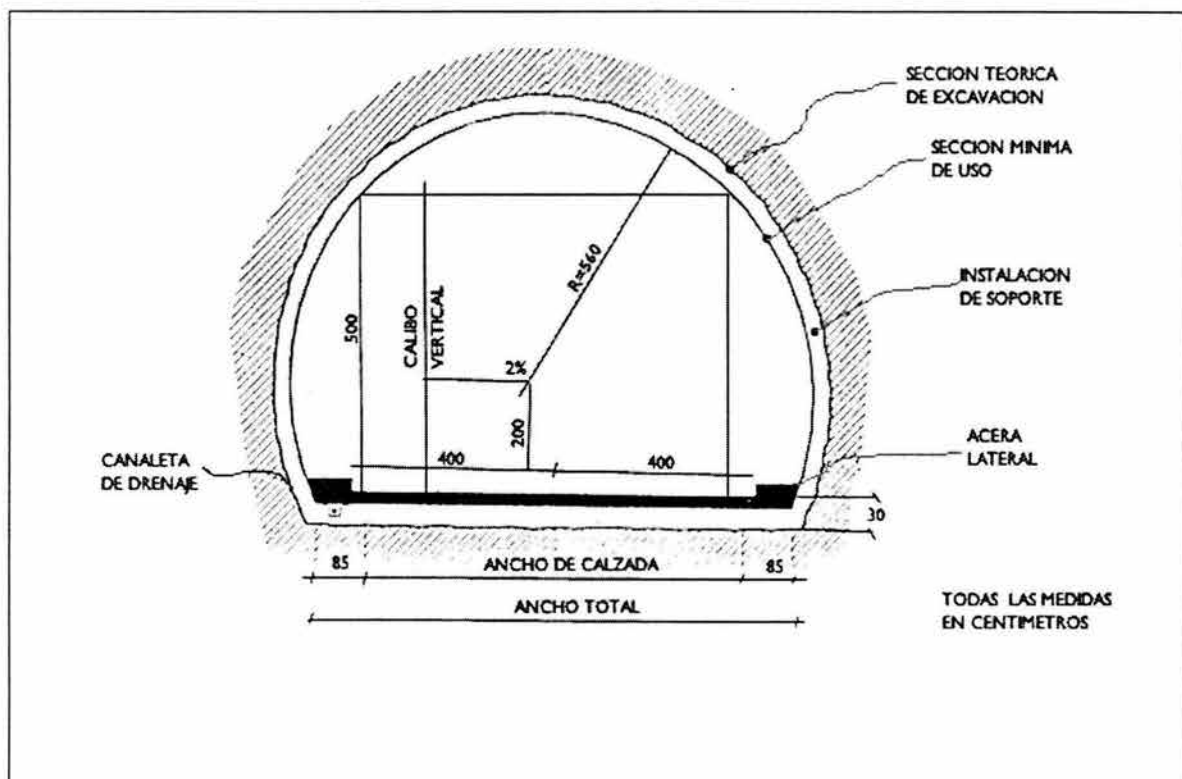


Figura 2.4.1. Sección transversal de un túnel.

Las secciones tipo más que se utilizan son rectangular, de herradura o circular, están determinadas principalmente por el método de construcción que se siguió para ajustarse a las condiciones del terreno.

Por lo general se utiliza la forma rectangular para corte y relleno; para la roca que se va a excavar con explosivos es más usual la herradura u otra sección arco; para las secciones mecánicas con frente completo, el círculo.

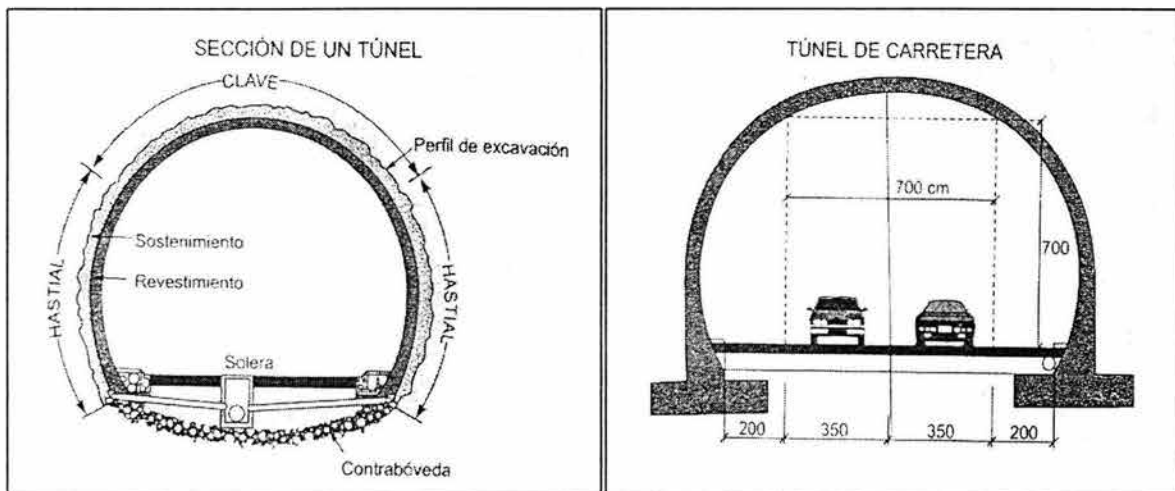


Figura 2.4.2 Sección de un túnel

2. 5 Métodos constructivos.

Se prestará especial atención al estudio de los factores que influyen en la elección del método de construcción más adecuado. La excavación mediante máquinas tuneladoras, rozadoras, palas, o explosivos; la protección y estabilidad de las excavaciones mediante escudos a presión atmosférica o presurizados, precortes, cerchas, bulones, hormigón proyectado, armadura con mallazos o fibras metálicas, micropilotes, *jet-grouting*, inyecciones, etcétera, serán convenientemente analizadas.

Se realizará una descripción de los aspectos fundamentales de la secuencia operativa del método de construcción elegido.

Se definirá el sostenimiento y el revestimiento de la obra subterránea; entendiendo por sostenimiento el conjunto de dispositivos precisos para mantener la estabilidad de la excavación provisionalmente hasta la ejecución de revestimiento, o definitivamente. Se justificarán y proyectarán las condiciones de drenaje o impermeabilización de los entornos de la excavación durante la construcción y explotación.

En el caso de que las deformaciones sean prioritarias por la proximidad de edificaciones o instalaciones importantes, los métodos constructivos y los sostenimientos se dirigirán especialmente hacia una admisibilidad de los movimientos originados por la obra, fijándose en el proyecto las condiciones de admisibilidad.

2. 6 Diseño del túnel.

2. 6. 1 Generalidades.

De acuerdo con el tipo y requerimientos de la obra, con las características del terreno y con los métodos de construcción elegidos, se justificará la seguridad del túnel durante la construcción y explotación, frente a los diferentes modos de posible inestabilidad que puedan presentarse.

Se definirán una o varias secciones tipo, longitudinales y transversales, de la obra, de su sostenimiento, y, si es el caso, de su revestimiento, que respondan a las diversas circunstancias previsibles del terreno y de la profundidad o situación de la obra. Se prestará especial atención a las zonas de emboquille.

Si la consecución del sostenimiento o revestimiento finales tiene lugar según diferentes etapas (desfases entre excavación y dispositivos del sostenimiento, galeñas u otro tipo de excavaciones en avance, destroza, etcétera), se justificará también la estabilidad en todas las fases intermedias.

También se contemplará la seguridad frente a eventuales desprendimientos de bloques.

La metodología para juzgar la seguridad de la obra, según su importancia y salvo justificación razonada, tomará como base el criterio más adecuado de entre los siguientes:

Una comparación con el comportamiento de obras semejantes en circunstancias análogas a las objeto del proyecto. En tal caso se deberá demostrar la similitud de los aspectos fundamentales que influyen en la estabilidad.

Utilización de métodos empíricos o semiempíricos, suficientemente contrastados en la práctica, basados en determinadas características geotécnicas de reconocida solvencia o en algunas clasificaciones geomecánicas del terreno.

Cálculo tenso-deformacional del conjunto obra-terreno, sustentado en unas acciones, estado inicial y propiedades geotécnicas del terreno, obtenidas por medio de determinaciones directas, o indirectas mediante comparaciones o métodos empíricos.

Se determinará la seguridad de cada uno de los elementos que configuran la obra, su sostenimiento y revestimiento, y el del conjunto obra-terreno. En el caso de utilizar el cálculo tenso-deformacional, se justificará la admisibilidad de las tensiones de trabajo y el coeficiente de seguridad a la rotura permisible, según las circunstancias de la obra, el modo de inestabilidad analizado, el método de diseño utilizado y la fiabilidad de los datos que han servido de base para los cálculos de estabilidad.

En el caso de obras lineales, y en concordancia con los estudios geológico-geotécnicos se incluirá la justificación de una sectorización longitudinal, que prevea la adopción, por tramos, de alguna de las secciones tipo diseñadas.

En el caso de que existan edificaciones o instalaciones industriales próximas, será preceptivo un cálculo deformacional que demuestre la inocuidad en aquellas de los movimientos originados por la obra.

2. 6. 2 Sostenimiento.

El sostenimiento de los túneles se visualiza casi siempre como un ademe o revestimiento de contacto más o menos continuo con la superficie interior de la cavidad. Evidentemente existen otros sistemas que no cumplen con esa definición, tales como anclas, presión de aire o lodos para estabilizar las paredes o frente de excavación, tratamiento de suelos o rocas para mejorar sus propiedades, etc. Los escudos para excavación de suelos y las máquinas perforadoras de formaciones rocosas, designadas como “topos” (túnel boeing machines, TBM), constituyen en si mismo un sistema de soporte.

El sostenimiento proporciona al túnel el principal elemento de estabilización, cumpliendo los siguientes objetivos:

- Evitar que el terreno pierda sus propiedades resistentes.
- Evitar el desprendimiento de cuñas o zonas sueltas del terreno por el proceso de excavación.
- Limitar las deformaciones en la cavidad creada.
- Controlar las filtraciones y proteger las rocas frente a la meteorización.
- Proporcionar seguridad a las personas e instalaciones.

Para alcanzar estos objetivos se debe instalar el sostenimiento tan pronto como sea posible. A este sostenimiento de tipo inmediato o provisional se le denomina **sostenimiento primario** este se coloca durante la etapa de construcción, más o menos cercano al frente de excavación. Es posible que la excavación precise de elementos de sostenimiento adicionales para tratar de reforzar el terreno en zonas débiles, en cuyo caso se denominan **sostenimiento secundario**, este queda en el túnel terminado para las condiciones de operación. La diferencia entre ellos puede ser inexistente, cuando el soporte cumple ambas funciones en un solo paso del proceso de tuneleo. No obstante frecuentemente ambos sistemas de soporte tiene que cubrir requisitos diferentes, en tiempos diferentes, por lo que no es tan evidente que sea necesario, e inclusive deseable, que los cumpla simultáneamente.

Una vez estabilizada la excavación y finalizada la instalación de los sostenimientos, los túneles se cubren de una capa de hormigón, llamada **revestimiento**, cuyas funciones son contribuir a la estabilidad a largo plazo del túnel, mejorar su estética, albergar de servicios y conducciones y disminuir la fricción del aire o el agua, entre otras.

Los sistemas de soporte temporales mas utilizados son los segmentos prefabricados (dovelas) de concreto o acero; estas dovelas pueden ser comunes o expandibles, con o sin pernos de sujeción. También comprenden a los marcos metálicos con o sin retaque de madera u otro material compresible, anclas a base de varillas, pernos de acero o plástico reforzado con fibra de vidrio, concreto lanzado reforzado con malla electrosoldada, con fibras de acero o de plástico, ya sea que se utilice solo o en combinación con anclas y/o costillas, tubos prehincados o placas metálicas corrugadas formando arco (sistema Bernold) en la clave del túnel, etc.

En cuanto a los sistemas de soporte permanente, los más comunes son también las dovelas, el concreto lanzado reforzado con mallas o varilla corrugada, y concreto hidráulico colado *in situ*, simple o reforzado.

Durante toda la vida útil del túnel, el soporte permanente debe cumplir con los siguientes requisitos de diseño:

- Garantizar la integridad estructural.
- La impermeabilidad.
- Las tolerancias de deformación.
- Evitar asentamientos excesivos en la superficie.
- Proteger a las edificaciones cercanas.
- Prever los efectos negativos de futuras excavaciones en superficie así como los túneles cercanos paralelos o transversales.
- Considerar las discontinuidades geométricas comprendidas en el trazo del túnel, como cambios de sección, nichos, galerías de servicio, intersección con lumbreras, etc.

- Finalmente cubrir otros requisitos relacionados con la operación del túnel, (conducción hidráulica, transporte), y con el mantenimiento.

En cuanto al soporte temporal, se repiten algunos de los requisitos mencionados previamente, pero los más relevantes estarán influenciados básicamente por las características del medio y del proceso de excavación:

- Necesidad de confinamiento inmediato o diferido de las paredes o frente del túnel.
- Drenaje de filtraciones
- Transportación, manejo y colocación de los elementos utilizados como ademe
- Cargas debidas al empuje de avance de los escudos o a las pretensiones de las inyecciones de contacto.

El dimensionamiento del soporte se fija inicialmente en base a medidas mínimas compatibles con el procedimiento constructivo. Como ejemplo puede citarse el espesor del revestimiento de concreto *in situ*, que esta gobernado por el espacio necesario para pasar la tubería de bombeo de concreto al interior de la cimbra; o bien el espesor mínimo de las dovelas que suele estar condicionado por los esfuerzos inducidos por su transporte y manejo, o por la necesidad de alojar dispositivos de unión entre las mismas.

Se aprecia por lo tanto, que en diseño del soporte intervienen otros factores que son determinantes, además de las acciones debidas a la interacción del medio. Es frecuente que su dimensionamiento final no quede supeditado exclusivamente por el efecto de las cargas geostáticas.

2. 6. 2. 1 Elementos necesarios para la selección y diseño del soporte.

Se parte de la base de que la geometría de la sección terminada del túnel ya ha sido establecida por requisitos de operación, y que su alineamiento horizontal y vertical ha sido decidido, después de sopesar varias alternativas apoyadas en la investigación geológica preliminar y en las limitantes impuestas por el proyecto.

La información necesaria de partida consiste en la caracterización del medio; reportes geológicos, hidrológicos, estudios de mecánica de suelos y de rocas; es indispensable incluir en estos reportes la explicación e interpretación de la influencia de los parámetros más importantes, en lo que a proceso de tuneleo se refiere. En este sentido, la información geotécnica debe incluir datos sobre las propiedades carga-deformación del medio, ya que la rigidez de la masa de suelo o roca es un dato indispensable para poder incluir su participación en el modelo de comportamiento. El segundo paso comprende la elección del o de los procedimientos de excavación; depende básicamente de la respuesta que tendrá el suelo o roca al ser excavado.

Las arcillas blandas tienen que soportarse lo antes posible en todo el perímetro del túnel. Y eventualmente en el frente; lo mismo pueden decirse de los suelos granulares ubicados bajo el nivel freático. Las arcillas rígidas y los suelos granulares con cierta cohesión, aun cuando ésta sea aparente, así como las rocas de dureza intermedia suelen tener tiempo de autosoporte suficiente, que permite colocar el soporte relativamente diferido con respecto al avance del frente de excavación. Las rocas más competentes no necesitarán de soporte para la estabilidad general de la cavidad, aunque pueden llevarlo para evitar desprendimiento locales en las paredes del túnel.

La elección del procedimiento contractivo es una de las tareas más difíciles de las señaladas en el diagrama de flujo del proceso de selección y diseño del soporte figura 2.6.2.1, ya que se basa en la habilidad para estimar con anticipación los problemas de tuneleo asociados al tipo de suelo o roca por excavar, siendo indispensable considerar la adaptabilidad del procedimiento a las condiciones esperadas.

Aquí, la experiencia del constructor es decisiva, apoyada muchas veces en la tradición local de construcción de obras semejantes, así como en los recursos disponibles en lugar y en el momento. Esto se complementa con una estimación preliminar del costeo de la obra y de su tiempo de ejecución.

Una vez seleccionado el sistema constructivo para tramos del túnel tipificados, quedará definida la secuencia de tiempo de colocación del soporte temporal, y del definitivo, o en su caso si se hará un soporte único desde el inicio, así como el tipo o tipos de soporte y sus características de resistencia y deformación. Debe reconocerse también el efecto del proceso de tuneleo en la capacidad de soporte del medio. Por ejemplo, el uso de explosivos puede fracturar la roca, dando lugar a cargas más altas que las que se producirían al excavar con equipo cortador de frente completo; otro caso es el del remoldeo del suelo que produce el cabeceo de los escudos al avanzar. A continuación se requiere seleccionar un modelo de comportamiento del túnel, que simule las condiciones que previsiblemente puedan presentarse durante las etapas de excavación y de operación.

Posteriormente, con el auxilio de métodos de análisis estructural se realiza el análisis y prediseño del soporte, a partir del que se derivan conclusiones respecto a sus condiciones de seguridad o servicio; de ser satisfactorias, se efectúa el diseño detallado. En caso contrario, es indispensable retroalimentar los resultados a los pasos anteriores ilustrados en el diagrama de la figura 2.6.2.1 y volver a hacer una prognosis del diseño. Si esta es positiva, se realiza el proyecto ejecutivo y se procede a la construcción del túnel; en esta etapa se inicia la verificación física del diseño, haciendo mediciones *in situ* de los parámetros más relevantes y llevando a cabo la interpretación del comportamiento del soporte. La secuencia indicada en la figura 2.6.2.1 puede cambiar en algunos casos, para los que con base en conocimiento semi-empíricos, se tipifican sistemas de soporte aplicables a diferentes tramos de túnel, dependiendo de los cambios registrados en el medio, y se procede directamente a la construcción del túnel y a recabar evidencia sobre su comportamiento. Tal es la filosofía original del llamado Nuevo Método de Túnel Austríaco, (NATM, por sus siglas en inglés), utilizado inicialmente para el soporte de macizos rocosos.

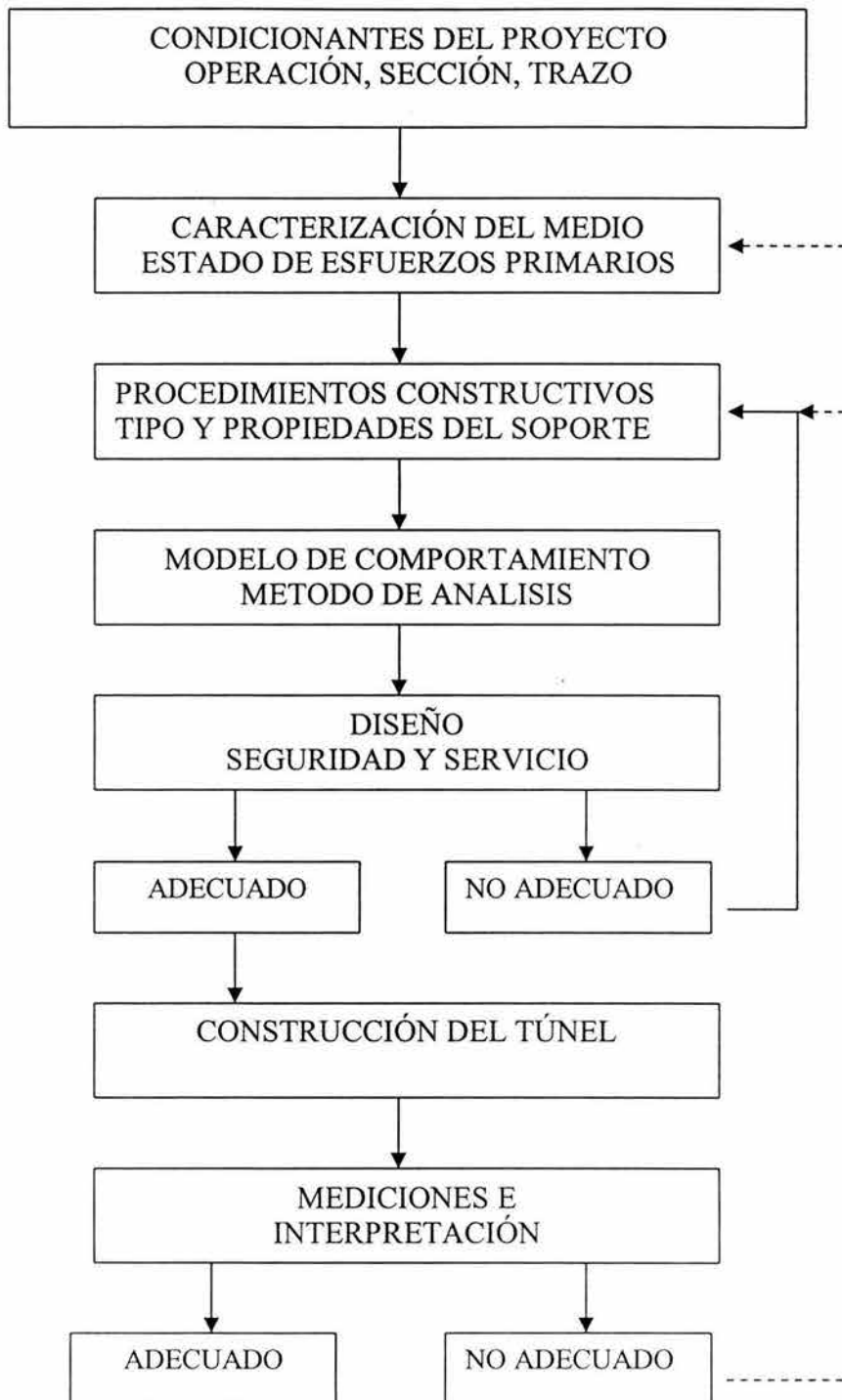


Figura 2.6.2.1.- Proceso de selección y diseño del soporte

2. 6. 2. 2 Estimación de los sostenimientos por métodos empíricos.

En el cálculo del sostenimiento de un túnel se puede efectuar por alguno de los siguientes métodos: analíticos, numéricos, empíricos y observacionales. Los métodos analíticos parten de la hipótesis de la elasticidad y suponen que el comportamiento del túnel es elástico hasta que alcanza una cierta presión interna crítica, para la cual se produce la plastificación. Se acepta que hay una correspondencia entre la presión interna y la deformación radial de la excavación según una curva característica (también denominada **línea característica**). El sostenimiento elegido debe ser capaz de resistir la citada presión interna. Como la ley de presión/deformación del sostenimiento es conocida, el punto de encuentro entre ambas curvas define la situación del equilibrio.

Los **métodos numéricos** parten de la discretización del macizo mediante los métodos de los elementos finitos, elementos discretos o de diferencias finitas. Permiten la modelación detallada de los procesos de deformación que afectan al terreno como consecuencia de la excavación, y el análisis de la influencia de los diferentes factores y parámetros que intervienen en los procesos constructivos, pudiéndose establecer los criterios de diseño adecuados para la excavación o la toma de decisiones ante un problema de inestabilidad o de otra índole.

Los **métodos observacionales** se basan en las medidas de tensiones y deformaciones que se producen durante la excavación del túnel, calculando los sostenimientos con el apoyo de métodos numéricos o analíticos. El método observacional más representativo es el Nuevo Método Austríaco (NATM).

Los **métodos empíricos** proporcionan una aproximación al sostenimiento de los túneles y no se consideran un método de cálculo; sin embargo, pueden ser muy útiles en macizos rocosos fracturados, y como medio de establecer las propiedades del macizo y los sostenimientos requeridos. También son útiles para estimar costes del sostenimiento en las etapas de anteproyecto.

Los métodos empíricos para el cálculo de sostenimiento se basan en las clasificaciones RMR y Q. Su aplicación requiere tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Es necesario analizar la idoneidad de la clasificación geomecánica elegida en función de los datos geológicos, del comportamiento tenso-deformacional del macizo y del proceso constructivo a utilizar.
- Los sostenimientos recomendados a partir de las clasificaciones representan las condiciones medidas del tramo considerado, y no tienen en cuenta posibles extremos, por ejemplo los puntos singulares, ni rocas especiales (volcánicas, evaporíticas, expansivas, etc.).

2. 6. 2. 3 Sostenimiento a partir del índice RMR.

La clasificación RMR (Bieniawski, 1979 y 1989) indica explícitamente los tipos de sostenimiento a emplear según se muestra en el tabla 2.6.2.1. En caso de utilizar SRC se emplea este valor en lugar del RMR.

A partir de RMR puede estimarse la **longitud de pase** (longitud de avance sin sostenimiento, figura 2.6.2.2. Por ejemplo, para un RMR = 60 se obtiene una longitud de pase de 2 m para un tiempo de estabilidad sin soporte de 25 días.

La **carga de roca o presión** sobre el sostenimiento se puede estimar según la expresión:

$$P = \frac{100 - \text{RMR}}{100} \gamma B$$

Donde:

γ = Peso específico de la roca

B = Ancho del túnel.

Esta expresión empírica hay que utilizarla con precaución pues puede dar resultados poco representativos.

2. 6. 2. 4 Sostenimiento a partir del índice Q.

Para la estimación de los sostenimientos a partir de Q se definen los siguientes parámetros:

- Diámetro equivalente del túnel =
$$\frac{\text{anchura, diámetro o altura (m)}}{\text{ESR}}$$
- ESR (*excavation support ratio*): factor que depende del tipo de excavación, cuyos valores se indican en el tabla 2.6.2.2

Los sostenimientos se estiman según se indica en la figura 2.6.2.3

El índice Q también permite calcular los siguientes parámetros:

- Máximo vano sin sostener (longitudes de pase) = $2\text{ESR}Q^{0.4}$
- Carga de roca sobre clave (P_r):

$$P_r = \frac{2\sqrt{J_n}}{3J_r^3\sqrt{Q}} \quad (\text{para macizos con menos de tres familias de})$$

$$P_r = \frac{2}{J_r^3\sqrt{Q}} \quad (\text{para macizos con tres o más familias de discontinuidades})$$

- Carga de roca en hastiales (P_h):

$$\text{Para } Q > 10 \quad P_h = 5Q$$

$$\text{Para } 0.1 < Q < 10 \quad P_h = 2.5Q$$

$$\text{Para } Q < 0.1 \quad P_h = Q$$

Sostenimiento a partir del índice RMR.

Clase RMR	Excavación	Sostenimiento		
		Bulones	Gunita	Cerchas
I 100-81	Sección completa. Avances de 3m.	Innecesario, salvo algún bulón ocasional.	No.	No.
II 80-61	Sección completa. Avances de 1-1.5 m.	Bulonado local en clave, con longitudes de 2-3 m y separación de 2-2.2m, eventualmente con mallazo.	5 cm en clave para impermeabilización.	No.
III 60-41	Avance y destroza. Avances de 1.5 a 3 m. Completar sostenimiento a 20 m del frente.	Bulonado sistemático de 3-4 m con separaciones de 1.5 a 2 m en clave y hastiales. Mallazo en clave.	5 a 10 cm en clave y 3 cm en hastiales.	No.
IV 40-21	Avances y destroza. Avances de 1 a 1.5 m. Sostenimiento inmediato del frente. Completar sostenimiento a menos de 10 m del frente.	Bulonado sistemático de 4-5 m con separaciones de 1-1.5 m. en clave y hastiales con mallazo.	10 a 15 cm en clave y 10 cm en hastiales. Aplicación según avanza la excavación.	Cerchas ligeras espaciadas 1.5 m cuando se requieran.
V ≤ 20	Fases múltiples. Avances de 0.5-1 m. Gutinar inmediatamente el frente después de cada avance.	Bulonado sistemático de 5-6 m, con separaciones de 1-1.5 cm en clave y hastiales con mallazo. Bulonado en solera.	15-20 cm en clave, 15 cm en hastiales y 5 cm en el frente. Aplicación inmediata después de cada avance.	Cerchas pesadas separadas 0.75 m con blindaje de chapas y cerradas en soleras.
Túneles de sección en herradura, máxima anchura 10 m, máxima tensión vertical 250 kg/cm ²				

Tabla 2.6.2.1

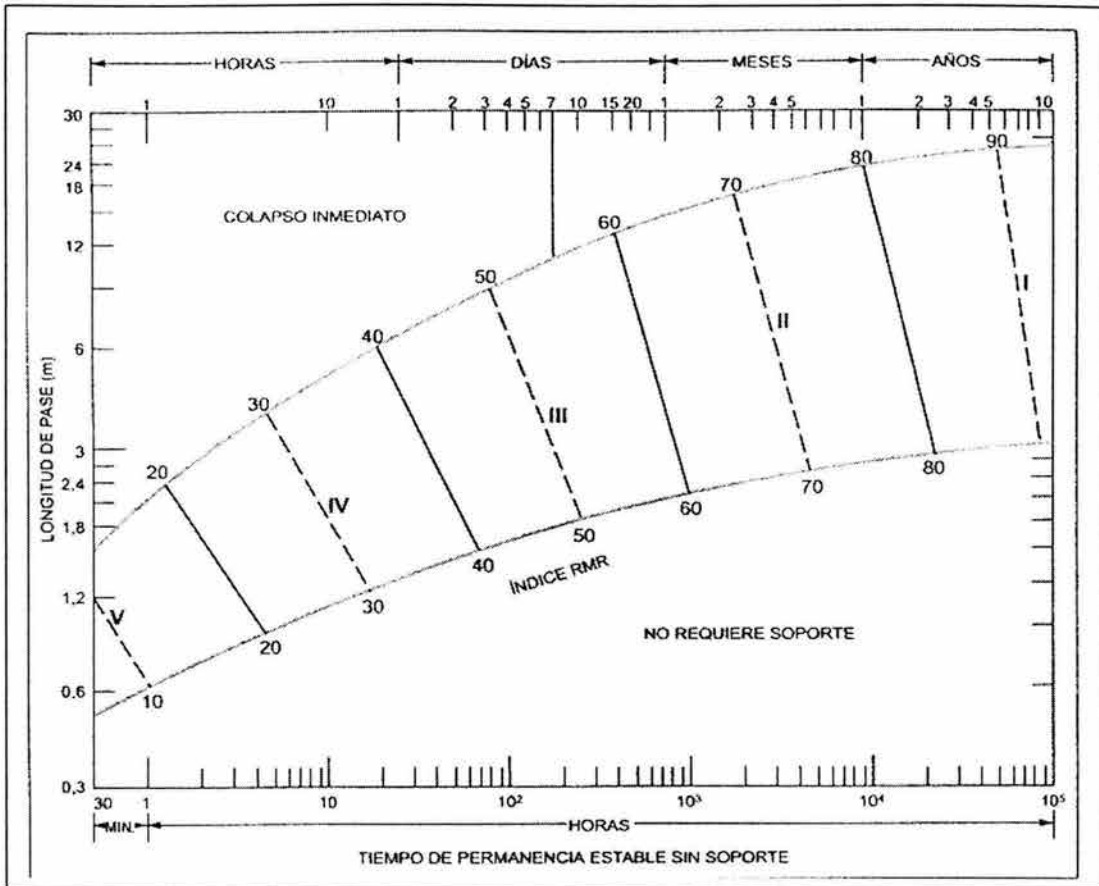


Figura 2.6.2.2 Longitudes de pase y tiempos de estabilidad sin soporte (Bieniawski,1989).

Valores del índice ESR de la Clasificación Q.

	Tipos de excavación	ESR
A	Labores mineras de carácter temporal.	2-5
B	Galerías mineras permanentes, túneles de centrales hidroeléctricas (excluyendo las galerías de alta presión), túneles piloto, galerías de avance en grandes excavaciones, cámaras de compensación hidroeléctrica.	1.6-2.0
C	Cavernas de almacenamiento, plantas de tratamiento de agua, túneles de carreteras secundarias y de ferrocarriles, túneles de acceso.	1.2-1.3
D	Centrales eléctricas subterráneas, túneles de carreteras primarias y de ferrocarril, refugios subterráneos para defensa civil, emboquilles e intersecciones de túneles.	0.9-1.1
E	Centrales nucleares subterráneas, estaciones de ferrocarril, instalaciones públicas y deportivas, fabricas, túneles para tuberías principales de gas.	0.5-0.8

Tabla 2.6.2.2

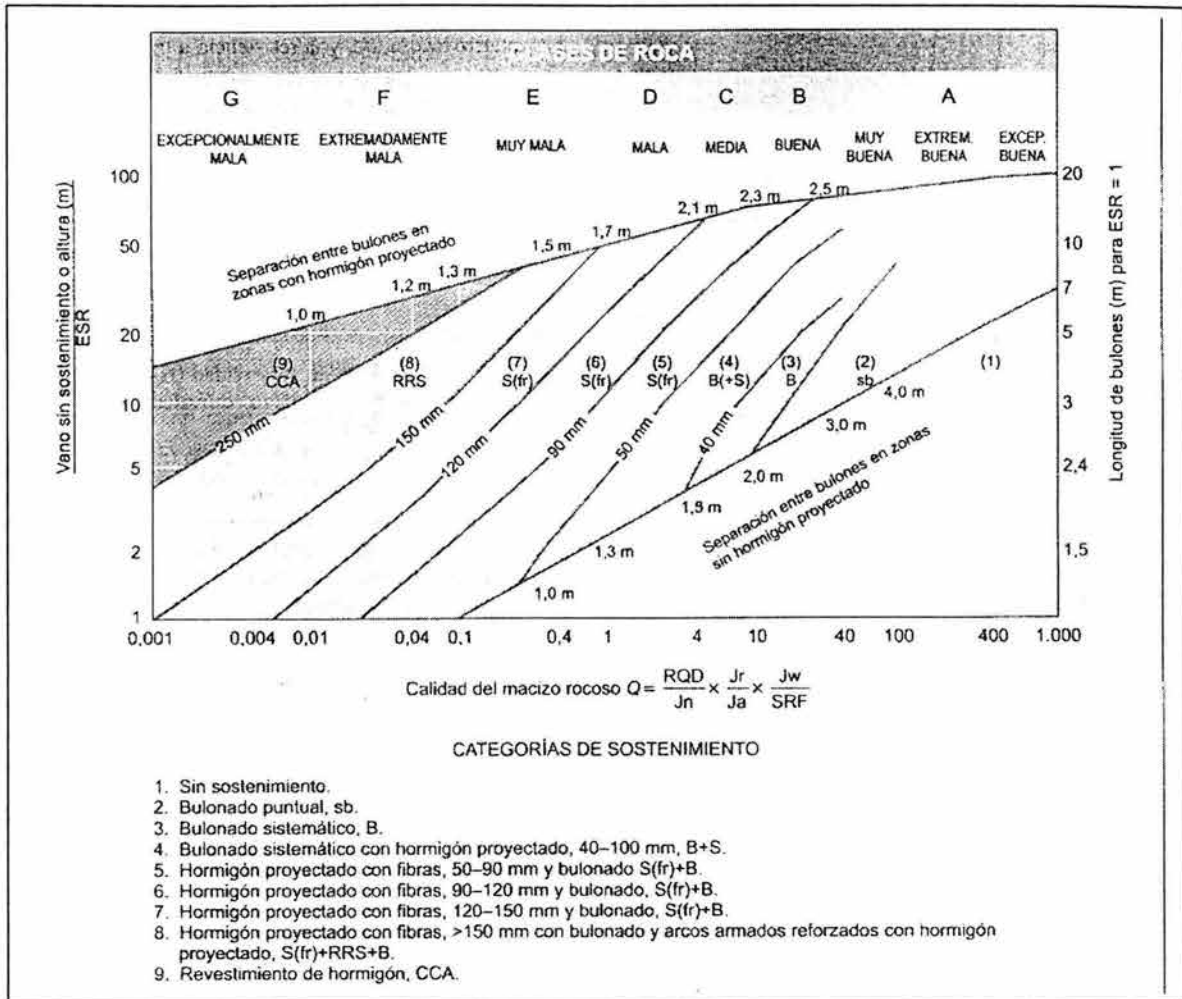


Figura 2.6.2.3 Sostenimiento según el índice Q (Barton,2000).

2. 6. 3 Revestimiento.

El revestimiento se coloca con posterioridad al sostenimiento y consiste en aplicar sobre dicho sostenimiento una capa de hormigón, u otros elementos estructurales, con el fin de proporcionar resistencia a largo plazo al túnel y dar un acabado regular, mejorando funcionalidad (condiciones aerodinámicas, impermeabilidad, luminosidad, albergar instalaciones y proporcionar la estética de la obra).

2. 6. 3. 1 Cálculo de esfuerzos para el proyecto de revestimiento.

Las teorías de elasticidad o plasticidad aplicables a la construcción de túneles, no concuerda mucho a la realidad, de ahí que se desarrollaran diversas teorías basadas en la observación de lo sucedido en los túneles que se han construido. Por lo tanto, estas teorías son de carácter empírico o semiempírico. Ejemplo de ellas son las de Terzaghi, Protodyakonov y Bierbaumer, que difieren en la forma como suponen que se desarrolla el arqueo. Cada uno concluye con recomendaciones para encontrar las cargas verticales sobre los túneles, en función de sus características geométricas y del tipo y calidad de los materiales.

Recomendaciones de Terzaghi.

1. En rocas sanas, los esfuerzos sobre el túnel son nulos en su interior y se necesita un recubrimiento o ademe sólo en las bocas, a distancias aproximadas de un diámetro. Si se presenta el fenómeno de roca explosiva (descascarado a presión), entonces se requiere un sostenimiento lo suficientemente acuñado que lo evite.
2. Si la estratificación de rocas es horizontal, el tamaño del sillar o la losa es grande y la resistencia de la roca es suficiente, se puede presentar el efecto

del puente. Si se representa una sobre excavación a causa de los explosivos y el tiempo de fracturación, la presión máxima en el cielo del túnel es de $0.5B$, donde B es el ancho del túnel. Si la fracturación o la estratificación es vertical, la presión máxima es de $0.25B$; si la roca tiene una inclinación, la presión varía entre las cantidades señaladas.

3. Si las fisuras son regulares, este caso puede parecerse al anterior; si el fisuramiento ocurre al azar por que haya varias familias de fisuras, es posible que se presente una excavación, en cuyo caso la presión máxima es de $0.25B$.
4. Cuando la roca está triturada, surge el fenómeno típico de arqueo y la presión sobre el túnel está en función de su ancho y altura. Entonces es posible tomar $0.27 (B + H_t)$ cuando las partículas estén compactadas y $0.47 (B + H_t)$ cuando estén sueltas (figura 2.6.3.1). En este caso, conviene que se ademe lo más pronto y se acuñe lo mejor posible; si hay flujo de agua la carga se puede duplicar.
5. Si la roca está fragmentada, el comportamiento es de arena compactada; sin embargo, conviene conocer el tiempo de punteo para ademararlo de manera oportuna, pues de otro modo hay caídas consecutivas en el frente de ataque. La presión sobre el túnel puede ser de $0.35 (B + H_t)$ si la roca está moderadamente agrietada y de $0.8 (B + H_t)$ si está muy agrietada y hay flujo de agua.
6. Cuando en el túnel se tiene rocas alteradas o arcillas, se presenta el fenómeno de flujo. Por un lado, esto se debe al relajamiento de los esfuerzos latentes que hay en el material y, por otro, a la expansión del material por el gradiente de presión que se da al abrir el túnel y que provoca un flujo de agua hacia él. Sin embargo, en este tipo de materiales, el tiempo de puente es mayor que con arenas o roca fracturada la acción de domo y se presenta cerca del frente de ataque y el arqueo como hacia atrás. Si la arcilla es blanda, el flujo se presenta de inmediato.

La presión de la roca en el cielo del túnel responde a las características de ancho y alto de éste (B y H_t), después de medir presiones en túneles de poca profundidad y de hasta $2.1(B + H_t)$. Sin embargo, en roca alterada se han medido cargas hasta de 70 m; en este caso, conviene que la sección sea circular y hacer el ademado con arcos circulares que tengan elementos de soporte entre si y que se pueden retirar con facilidad; es decir, cuando haya una deformación importante, se quite el soporte intermedio, se rebane el material fluido y el soporte se vuelva a colocar. A medida que pasa el tiempo, disminuyen el flujo y la presión sobre el ademe. En la tabla 2.6.3.1, se resume de las recomendaciones de Terzaghi.

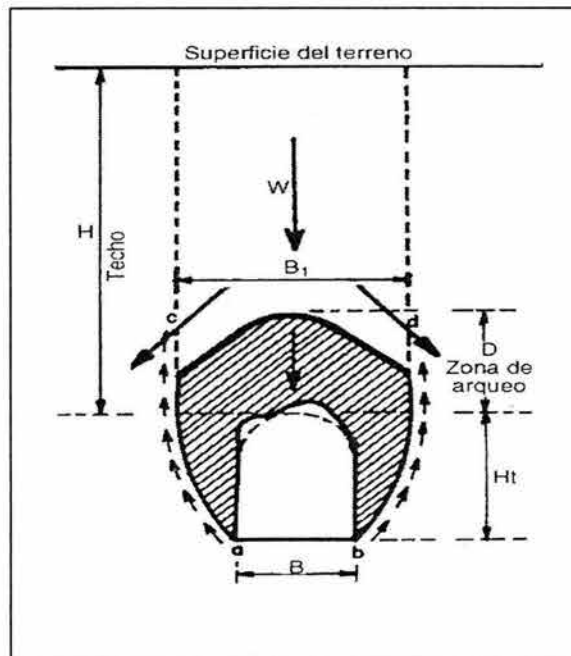


Figura 2.6.3.1 Mecanismo de arqueado en túneles, según Terzaghi.

Tipo de material	Carga	Observaciones
Roca sana o dura	0	Ademe en los portales y en el interior si hay descascaramiento.
Roca estratificada dura	0 a 0.5B	Ademe y acuanamiento si hay sobreexcavación. Se presenta arqueo.
Roca poco fisurada o fragmentada	0 a 0.35 (B + H _t)	Ademe y acuanamiento, sobreexcavación. Se presenta arqueo.
Roca muy fragmentada	0.35 (B + H _t) a 1.1(B + H _t)	Ademe en techo y paredes. Se presenta arqueo
Grava y arena; roca triturada no alterada	0.62 (B + H _t) a 1.4 (B + H _t)	Ademe circular, que presenta arqueo.
Arcilla o roca en túnel no profundo	1.1 (B + H _t) a 0.1 (B + H _t)	Ademe circular, que presenta arqueo lento.
Arcilla o roca en túnel profundo	2.1 (B + H _t) a 4.5 (B + H _t)	Ademe circular, que presenta arqueo lento.
Presión máxima en rocas que fluyen	80 m	Ademe circular

Figura 2.6.3.1 Cuadro de recomendaciones de K. Terzaghi para obtener la carga sobre la parte superior del túnel.

Teoría de Protodyakonov.

La teoría de Protodyakonov se basa en el estudio de las fuerzas que actúan en el arqueo. En la figura 2.6.3.2, se muestran las fuerzas que el investigador toma en cuenta. La fórmula para encontrar la carga vertical sobre el soporte de un túnel, por unidad de longitud, es:

$$C = 1/3 \gamma m B^2 / f; \quad f = \tan \varphi$$

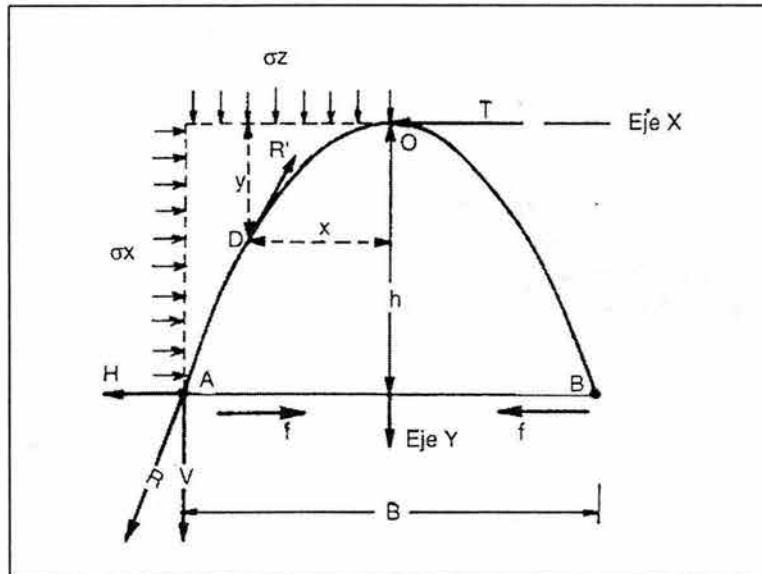


Figura 2.6.3.2 Mecanismo de arqueo en túneles, según Protodyakonov.

Como los materiales cohesivos no tienen fricción, f se le da el nombre de coeficiente de resistencia y se expresa como ($f = c / q_v$). Para materiales con cohesión y fricción $f = c / q_v + \tan \varphi$.

Para rocas, la $f = q_{uc} / 100$, donde q_{uc} es la resistencia a la compresión de rocas.

En la tabla 2.6.3.2, se dan algunos valores del factor f . Si el suelo está saturado, se debe hacer la corrección necesaria.

Tipo de roca o suelo	Resistencia	Factor F
Rocas de granito, cuarcitas, basalto y en general todas aquellas sanas y muy resistentes.	muy alta	20
Granitos sanos, pizarras silicosas, pórfidos, areniscas y caliza sanas.	muy alta	15
Granito, areniscas y calizas con poca alteración. Conglomerados resistentes.	alta	10
Calizas, granitos poco alterados. Limonitas. Areniscas de mediana resistencia	alta	8
Areniscas	medio alta	6
Pizarras	medio	5
Calizas y areniscas de baja resistencia, conglomerados no muy duros	media	4
Lutitas, calizas fracturadas, yesos, areniscas en bloques. Grava cementada.	bajo	2 - 1.5
Gravas, lutitas, pizarras fragmentadas y depósitos de talud consolidados. Arcillas duras.	bajo	1.5
Suelos arcillosos, loes, arena y grava, suelo arena o limo arcilloso.	bajo	0.8
Suelo con vegetación turbas, arenas húmedas.	muy bajo	0.5
Limos y arcillas blandas.	muy bajo	0 - 3

Tabla 2.6.3.2 cuadro de valores del factor f para calcular la carga sobre la parte superior de un túnel, de acuerdo con la teoría de Protodyakonov.

Método Bierbäumer

Bierbaumer hace el estudio de las fuerzas que resisten el arqueo del material y llega a la fórmula: $h = \alpha H$, donde h es la carga del cielo del túnel y H es la altura del cielo a la superficie; al analizar las fuerzas que se muestran en el diagrama de la figura 2.6.3.3, se llega al siguiente valor:

::

$$\alpha = 1 - \frac{\tan \varphi \tan^2 (45^\circ - \varphi / 2) H}{B + 2H \tan (45^\circ + \varphi / 2)}$$

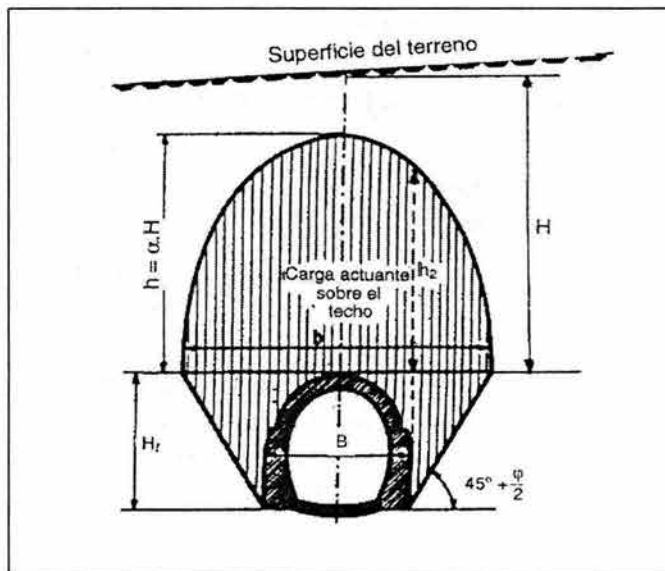


Figura 2.6.3.3 Mecanismo de arqueo en túneles, según Bieräumer.

2. 6. 4 Emboquilles.

Las boquillas constituyen una de las zonas más críticas de los túneles al estar situadas, generalmente, en laderas y tener un pequeño espesor de recubrimiento.

La zona de emboquille consta de:

- Los taludes de excavación (frontal y laterales), que pueden ser permanentes o temporales si posteriormente se rellena la excavación, previa a la construcción de un **falso túnel**.
- El inicio del túnel, formado por la zona de transición del talud frontal y los primeros metros del interior del túnel.

Los problemas **geológicos-geotécnicos** a considerar en el estudio de emboquilles son los siguientes:

- **Estabilidad natural:** deslizamientos activos o latentes (paleodeslizamiento).
- **Inestabilidad inducida:** la excavación de los taludes puede intersectar planos de discontinuidades inestables.
- **Resistencia:** la presencia de rocas muy alteradas y los depósitos superficiales pueden ser zonas de baja resistencia.
- **Contactos litológicos:** es frecuente encontrar colisiones sobre rocas alteradas, o bien rocas muy alteradas sobre rocas sanas de tipo arcilloso.
- **Alterabilidad:** la excavación de los taludes da lugar a superficies rápidamente degradables por meteorización, sobre todo en rocas de tipo arcilloso.
- **Descompresión:** La excavación puede producir la apertura de discontinuidades reduciendo su resistencia.
- **Filtraciones:** cuando la excavación intercepta el nivel freático, la red de flujo tiende a fluir hacia el frente de la excavación, incidiendo en la resistencia y estabilidad.

Las decisión del área de emboquille debe realizarse en función de las condiciones geológico-geotécnicas, principalmente exenta de zonas inestables y donde la roca adquiera una resistencia suficiente para poder sostener el túnel. Bajo el punto de vista constructivo los emboquilles deben aproximarse a una configuración simétrica. Igualmente se debe evitar las excavaciones de taludes de grandes dimensiones.

Los **criterios geológico-geotécnicos** a seguir en el diseño de emboquilles son los siguientes:

- Evitar las zonas afectadas por deslizamientos u otro tipo de movimientos del terreno; para el análisis en detalle de estos aspectos es necesario investigar e incluso instrumentar la ladera.
- Calcular y diseñar los taludes para alcanzar un factor de seguridad adecuado (≈ 1.3 para taludes temporales y 1.5 a 2.0 para taludes permanentes); si para lograr los citados factores de seguridad es necesario recurrir a elementos de estabilización, se deben diseñar dichos elementos.
- Complementariamente a los métodos de estabilización que resulten, los taludes deben protegerse frente a las siguientes acciones:
 - Rápida alteración y descompresión: se deben gunitar o bulonar, (mortero u hormigón transportado a través de manguera y proyectado neumaticamente sobre un soporte) los frentes de los taludes más cercanos a las boquillas, particularmente en rocas de tipo arcilloso, alteradas o muy fracturadas.
 - Filtraciones y sus efectos: para evitarlas se deben canalizar las aguas de escorrentía, taras circundantes, y en donde las pendientes confluyan hacia el emboquille; en caso necesario se deben instalar mechinales de drenaje.

- Caídas de rocas o desprendimientos: se deben proteger los taludes con barreras dinámicas u otros elementos.
- En el primer tramo de excavación del túnel se debe reforzar el terreno con un paraguas de presostenimiento en toda la sección del túnel o al menos en su clave (figura 2.6.4.1), o adoptar otras medidas de refuerzo (figura 2.6.4.2).
- Las investigaciones *in situ* en los emboquilles incluyen sondeos (3 mínimo), sísmica de refacción, calicatas, ensayos de deformabilidad y permeabilidad, piezómetros e instrumentación (inclinómetros y extensómetros).



Figura 2.6.4.1 Refuerzo del talud frontal del emboquille de un túnel. Paraguas de micropilotes, bulones y mallazo; en fase posterior el talud sería cubierto con gunita.

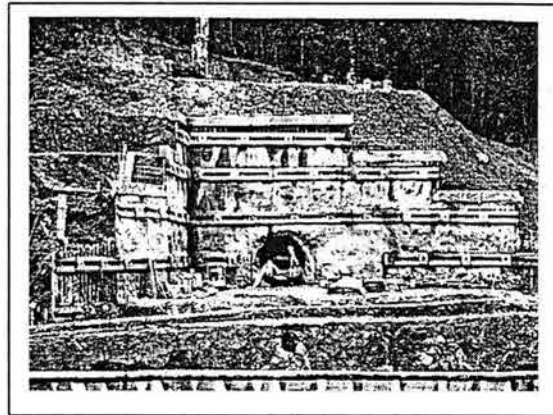


Figura 2.6.4.2 Emboquille de un túnel en rocas de mala calidad mediante pantalla anclada de micropilotes.

2.6. 5 Métodos de construcción en túneles en suelos.

2.6. 5.1 Métodos no mecanizados.

En la antigüedad los túneles se excavaban con secciones pequeñas, entibadas con madera, utilizando picas y cuñas para arrancar el cuerpo del terreno, ampliando poco a poco la sección. En el siglo XIX se produce un gran empuje en la actividad tunelera que llega hasta nuestros días, con la perforación de importantes túneles ferroviarios en los Alpes y otros lugares montañosos de Europa y América. En este sentido, cabe citar el Método austriaco con sistema a sección partida, que dio buen resultado. En este sistema se abren dos galerías de avance o de reconocimiento, una en clave y otra en solera, para completar la observación del terreno que se va a atravesar. Después se amplía la de clave, entibando con madera en un avance corto de (1.5-2.0 m), hasta excavar toda la zona de bóveda, extrayendo los escombros por la galería baja, comunicada con la de clave con pozos de 20 m aproximadamente. Por último, se excavan hastiales por bataches y se pasa a colocar, de abajo a arriba, el revestimiento definitivo de fábrica.

De este sistema se derivó el llamado **Método belga** (solo con galería en clave) y de él se pasó al llamado **Método Madrid** de sección partida (figura 2.6.5.1). En éste, los avances son de 2.50 m, la galería de clave va avanzando una pequeña distancia, se usan elementos mecánicos (longarinas) para el sostenimiento longitudinal y madera para todo el resto del sostenimiento, hormigonando el revestimiento definitivo de la bóveda en cada avance (que dura 24 horas). Después se excava la destroza y los hastiales, hormigonándolos por bataches (que van a unos 20-35 m de distancia desde el avance), cerrando la solera definitivamente con hormigón; el sostenimiento provisional se hace con madera y acero, y el definitivo con hormigón. Es un método bastante seguro y compatible con la apertura de varios frentes de avance simultáneos, dada la escasa maquinaria que emplea. La destroza se suele excavar con pala y, a veces, si el terreno es muy duro, puede necesitar incluso martillos hidráulicos o rozadoras en zonas de bóveda, con escasa entibación.

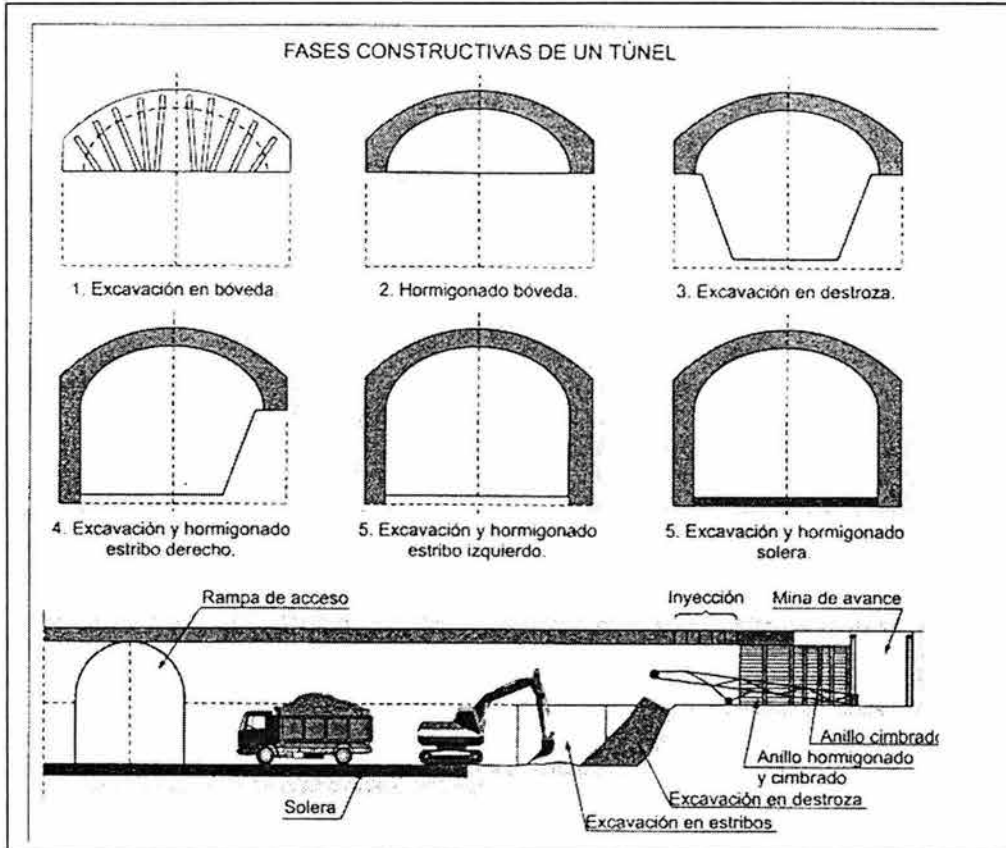


Figura 2.6.5.1 Método tradicional de Madrid

2. 6. 5 .2 Métodos semi-mecánicos.

En materiales tipo suelo una mejora importante ha sido el empleo de **escudos de lanzas** para excavación de la mitad superior del túnel, que llevan una serie de gatos hidráulicos que permiten avanzar el escudo metálico (formado por chapas deslizables o lanzas, bajo el cual pueden excavarse a mano o con máquina), gracias a la reacción que proporciona el revestimiento que se va hormigonando nada más excava (con avance de 2.5-3.0 m). El resto de la sección se excava con el Método Madrid (destroza, hastiales y solera).

Otro intento de mecanización parcial es el **Método Bernold** (figura 2.6.5.2), que puede aplicarse en suelos consistentes y en rocas de mala calidad. El avance es de 1 a 3 m, colocando enseguida cerchas metálicas a todo lo ancho de la bóveda, en la que se apoyan chapas metálicas con resaltes (Bernold), rellenándose el trasdós, entre la chapa y la roca (15-30 cm), con hormigón o gunita antes del avance siguientes, pudiéndose reforzar exteriormente el conjunto con gunita. La parte inferior de la sección se construye como en los procedimientos tradicionales, prolongando cerchas y chapa. Posteriormente puede construirse el revestimiento definitivo con hormigón o reforzar más la sección con gunita.

EL **precorte mecánico** o preserrado en suelos duros o roca blanda, constituye otro método de gran interés, en la que se construye una prebóveda antes de cada avance, mediante el relleno con gunita del hueco que produce una sierra debidamente guiada, que puede trabajar a plena sección (figura 2.6.5.3). El espesor teórico de la prebóveda puede ser de 10 a 30 cm, y la longitud de las *tejas* que constituyen la prebóveda es de unos 3 - 4.5 m con solapes de 0.5-1.0 m.

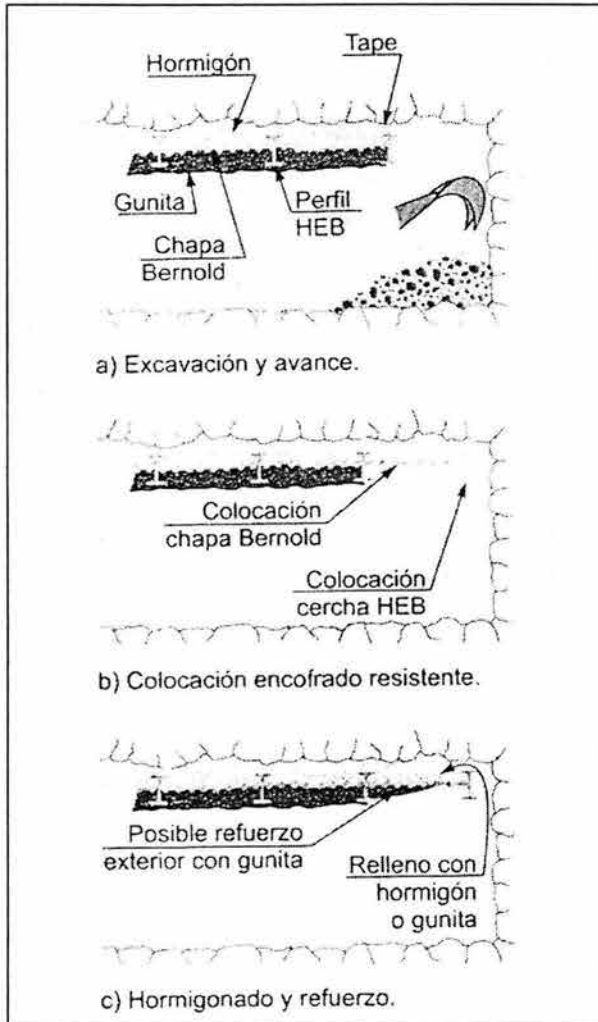


Figura 2.6.5.2 Método Bernold

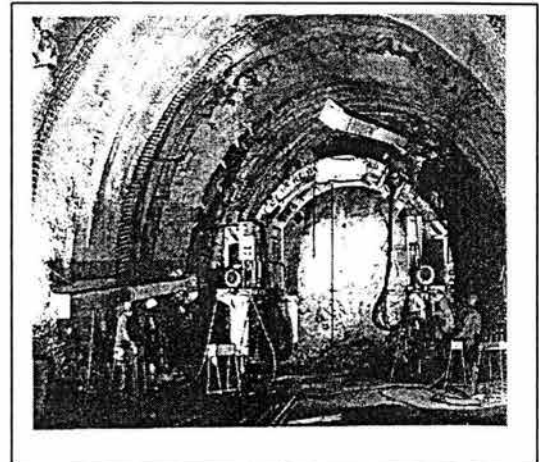


Figura 2.6.5.3 Excavación mediante precorte mecánico.

2.7 Auscultación y reconocimientos durante la construcción

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 eficiencia 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.

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

En el proyecto se incluirá una definición, o se justificará su ausencia, de los dispositivos e instrumentación precisa para conocer el comportamiento del terreno y de la obra (movimientos, presiones, filtraciones, gases, emisión acústica, radiación infrarroja, etc.).

En particular, será obligatorio el proyecto de auscultación siempre que concurra, al menos, una de las siguientes circunstancias:

- a) Cuando el método de construcción elegido requiera la obtención de parámetros a medida que progresa la excavación con objeto de adaptar localmente el diseño del sostenimiento o revestimiento.
- b) Cuando los movimientos estáticos o dinámicos inducidos por la excavación o por la presencia de la obra, puedan afectar a edificaciones, instalaciones industriales, o de cualquier otro tipo.

- c) Cuando se prevea una modificación sustancial, o un influjo decisivo, en las condiciones hidrológicas del contorno.
- d) Cuando las circunstancias previsibles influyan en la seguridad de los operarios, personal de mantenimiento, o usuarios.

No obstante, y en cualquier caso, se deberá llevar a cabo un control mínimo de convergencias.

Así mismo se especificarán en el proyecto los reconocimientos y estudios complementarios que deberán ser llevados a cabo durante la construcción (ensayos de características geotécnicas, sondeos en avance, tensiones internas, etc.), que no hayan sido viables, por razones de accesibilidad o motivos técnicos o económicos, para el proyecto, o que se requieran para una mayor precisión en las circunstancias señaladas en los párrafos anteriores.

El proyecto de auscultación analizará la conveniencia o no de que la auscultación se mantenga operativa para la fase de explotación.

2. 8 Instalaciones definitivas.

En el proyecto general de la obra se incluirán, o se acompañarán al mismo, los proyectos complementarios de las instalaciones definitivas que sean preceptivas o previstas en cada caso referentes a:

- Suministro de energía.
- Alumbrado.
- Ventilación.
- Señalización.
- Comunicaciones.
- Sistemas de control.
- Auscultación.
- Incendio.
- Otras instalaciones.

En el capítulo 4 se indican los condicionantes a cumplir por tales instalaciones.

2. 9 Escombreras.

En el proyecto se planificará el destino de los materiales procedentes de la excavación del túnel. Los que no vayan a ser utilizados en la construcción de terraplenes, rellenos, obras anexas, u otros fines específicos, serán depositados en escombreras, cuya situación deberá ser indicada en el proyecto.

En el caso de que se trate de vertederos o escombreras de nueva implantación, se justificará debidamente los rellenos a efectuar, en las siguientes vertientes:

- a) Morfología del relleno, su disposición topográfica, y suficiencia volumétrica para recibir los sobrantes de las excavaciones.

- b) Secuencia temporal y espacial de las operaciones, y condiciones de vertido o colocación.
- c) Estabilidad de la propia escombrera, de su cimentación y de su entorno. Con tal fin se llevarán a cabo los pertinentes reconocimientos geológico-geotécnicos que permitan establecer las condiciones para su permanencia con el adecuado margen de seguridad.
- d) Eventual influjo de los rellenos en las condiciones hidrológicas, superficiales o subterráneas, que existen en el terreno antes de construir el relleno. Diseño, en su caso, de los dispositivos de drenaje o impermeabilización.
- e) Impacto ambiental, y si fuere preciso, tratamiento final de la superficie de la escombrera, una vez finalizados los aportes de terreno.

En los casos que se considere necesario, el proyecto preverá unidades de abono de las operaciones efectuadas en las escombreras.

2. 10 Impacto medioambiental.

El proyecto deberá dar cumplimiento a las disposiciones vigentes en materia de medio ambiente que afecten al mismo y a la construcción y explotación de la obra subterránea.

En particular el proyecto deberá examinar, y justificar en su caso, las posibles incidencias que puedan afectar al entorno o a la propia obra, relacionadas con:

- a) Ruidos, vibraciones, efectos dinámicos o térmicos, originados por la construcción o explotación de la obra
- b) Contaminación de gases en el interior o exterior de la obra.
- c) Contaminación de aguas subterráneas y superficiales.
- d) Eliminación de los residuos y efluentes propios.
- e) Modificación de acuíferos.
- f) Interferencias con posibles restos arqueológicos o con dependencias amparados por la legislación vigente sobre el Patrimonio Nacional.
- g) Escombreras para los residuos de la excavación.
- h) Modificación del paisaje e influjo sobre la fauna y vegetación en las zonas de acceso y emboquille, y su adaptación a los contornos de la obra.
- i) Efectos psicológicos en los conductores de los vehículos en el caso de túneles de gran longitud en carreteras.

2. 11 Documentos del proyecto.

En el caso de que la obra subterránea forme parte de un proyecto que incluya otras obras, los documentos de éste deberán contener los apartados y artículos específicos de aquélla, análogos a los que requiere un proyecto independiente.

En la Memoria y en sus anexos se describirán y justificarán las obras de acuerdo con las prescripciones contenidas en la presente Instrucción. En particular se incluirá un anexo que estudie los costos de explotación.

En el documento Planos se incluirá la definición longitudinal y transversal de los accesos, emboquilles, y tramos subterráneos. Se establecerán cuantas secciones tipo sean precisas para cubrir las circunstancias previsibles en la obra.

En el documento Presupuesto se incluirán el cuadro de precios, las mediciones y el presupuesto parcial de la obra subterránea.

CAPITULO 3: CRITERIOS BASICOS EN LA FASE DE CONSTRUCCION

3. 1 Del terreno y los materiales de construcción.

Las condiciones previstas en el proyecto se irán adaptando a lo largo del proceso de ejecución, de acuerdo con la información disponible y aplicando las técnicas especializadas correspondientes.

3. 2 Memoria de construcción.

En la Memoria de construcción se deberán contemplar todas las disposiciones necesarias para el desarrollo adecuado del proceso constructivo previsto. En particular se incluirán:

- La descripción detallada del proceso constructivo, fases de construcción, esquema de tiro, si procede, y justificación de todas las instalaciones provisionales necesarias que se especifican más adelante.
- Los planos de todas las instalaciones auxiliares, accesos, etc.
- El plan de seguridad y salud en el trabajo.
- El plan de aseguramiento de calidad.
- El programa de ejecución.

- Un plan de tratamiento medioambiental, en el que se indiquen las cuestiones relacionadas con el medio ambiente (levantamiento de caminos, de instalaciones, formas de tratamiento de prestamos y vertederos, etc.).
- Cualquier otro documento que complete la descripción de todas las disposiciones que definen el proceso constructivo.

3.3 Instalaciones para la construcción.

Según las circunstancias de cada caso, se dispondrán los siguientes tipos de instalaciones: Redes de ventilación; sistema de iluminación; redes eléctricas, redes de aire comprimido, agua y desagüe etc.

3.4 Instrumentación geotécnica.

La instrumentación geotécnica tiene como finalidad determinar el comportamiento y las características del terreno para predecir su evolución frente a cargas, movimientos, empujes y demás acciones, tanto naturales como inducidas por las obras. En este apartado se describe la instrumentación de mayor interés en ingeniería geológica para la construcción de un túnel.

La planificación de un programa de instrumentación requiere elegir las magnitudes a medir y el tipo de instrumentos a utilizar. Dichas magnitudes pueden ser:

- Movimientos superficiales.
- Movimientos en el interior del terreno.
- Movimiento de apertura de grietas y entre diferentes puntos.
- Presiones intersticiales y sus variaciones.
- Empuje del terreno sobre elementos de construcción.

La frecuencia en las lecturas y la recogida de datos dependen de las magnitudes a medir y la velocidad del proceso a controlar. Las lecturas pueden ser manuales o automáticas. Las primeras están indicadas en los casos en que el número de sensores o puntos de registro sea pequeño, la periodicidad en la toma de datos sea semanal o mayor y los puntos de lectura sean fácilmente accesibles.

La elección del sistema de toma de datos viene condicionada por el número de sensores y características de los mismos, frecuencia de lectura, número de datos a tratar, rapidez con la que ha de realizarse el tratamiento e interpretación, situación y accesibilidad del lugar y ubicación de los sensores. (Tabla 3.4.1)

Por lo tanto se revisará de acuerdo con la evolución de los trabajos el sistema de sensorización e instrumentación que se considere más adecuado, tanto para el seguimiento de las subsidencias que el proceso constructivo produzca en superficie, como para el seguimiento de los parámetros necesarios que midan el comportamiento del terreno para realizar el ajuste que proceda del diseño de los sostenimientos y revestimientos definitivos.

Instrumentación geotécnica.

Magnitud medida	Métodos	Equipos
Desplazamiento entre puntos próximos.	Con sistema de lectura mecánico.	Cinta de convergencia.
		Cinta métrica.
		Calibre.
		Flexímetro.
	Con sistema de lectura eléctrico.	Potenciómetro.
		LVDT
Cuerda Vibrante.		
Desplazamientos superficiales.	Métodos geodésicos, nivelación y colimación.	Topográficos, DGPS.
Desplazamientos superficiales.	Inclinómetro.	Cuerda Vibrante y otros.
	Extensómetro.	De hilos o varillas. De lectura mecánica o eléctrica.
Presión intersticial	Piezómetros abiertos.	Tubería aislada.
	Piezómetros cerrados.	Cuerda Vibrante y otros.
	Tuberías piezométricas ranuradas.	Tubería abierta.
Presiones	Células de presión total.	Traductor de presión neumático.
		Traductor de presión hidráulico.
		Traductor de presión eléctrico.
	Células de carga.	Mecánicas.
		Hidráulicas.
		Eléctricas.

Tabla 3.4.1

3. 5 Maquinaria.

En relación con la maquinaria a emplear, ésta cumplirá con los requisitos reglamentarios, y especialmente se tendrá en cuenta que:

- El funcionamiento de los sistemas hidráulicos, eléctricos y mecánicos debe garantizar la seguridad de los operarios durante el desarrollo de su trabajo.
- Deben adoptarse las medidas de seguridad, que en cada caso procedan, durante la conservación de la maquinaria: Paradas, frenos, calzos, etc.. especialmente cuando la conservación se haga fuera del taller.
- Deben protegerse las partes móviles de máquinas estáticas.
- Las máquinas de combustión interna (diesel) deben llevar dispositivos de depuración en el escape y se comprobar periódicamente su correcto funcionamiento.
- Las máquinas deben ir provistas de medios auxiliares que indiquen su presencia y maniobrabilidad, tales como sistemas acústicos o luminosos.
- Debe establecerse un programa para la conservación y mantenimiento de maquinaria, instalaciones y redes.

3. 6 Explosivos.

La utilización de explosivos se realizará, en su caso, de acuerdo con la reglamentación vigente de carácter general sobre la materia. Además, se actuará, específicamente, de acuerdo con lo siguiente:

- Se fijarán criterios para el almacenamiento, transporte y manipulación de explosivos dentro de la propia obra, así como en relación con la carga de las voladuras y medidas particulares a adoptar.
- Se dispondrá de personal responsable y autorizado para el manejo de los explosivos.
- Los materiales que se empleen cumplirán con los requisitos reglamentarios.
- Los medios empleados para la comprobación o práctica de la voladura tendrán la capacidad suficiente y cumplirán con los requisitos reglamentarios.
- No se podrá simultanear la carga de explosivos y perforación, a no ser que se adopten medidas especiales.
- La recuperación de las voladuras fallidas se hará bajo la dirección de un responsable cualificado.
- Deberá disponerse en obra de un detector de tormentas.
- Durante la carga de explosivos se deben prever golpes del brazo del *jumbo*, desprendimientos de roca; se debe separar perforación y carga; se deben utilizar plataformas de trabajo, etc.

3. 7 Proceso constructivo.

3. 7. 1 Saneamiento.

Se saneará el frente y el avance correspondiente a cada voladura.

Debe mantenerse una estabilidad temporal de la bóveda y hastiales hasta el sostenimiento definitivo mediante la vigilancia y saneo periódicos de las zonas excavadas.

3.7.2 Perforación.

3.7. 2. 1 Métodos de perforación.

Según la naturaleza del terreno se puede atacar la excavación del túnel con una sección más o menos grande. La roca dura permitirá el ataque a sección completa; sin embargo los terrenos sueltos (arenas, gravas) sólo permitirán avanzar mediante pequeñas secciones y provisiones 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:

Método de ataque a plena sección o método inglés.

Recibe su nombre por haber sido aplicado en túneles a través del tipo de terreno que usualmente se localiza en Inglaterra, como son las arenas y areniscas. Su principal característica es proceder el avance de la perforación a sección completa del túnel, en una sola operación.

Suele utilizarse para túneles de pequeña sección (menos de 15 m²), o en muy buen terreno en secciones mayores, por supuesto en roca.

Una solución para terrenos de inferior calidad es utilizar el ataque a plena sección pero con varios escalones de ataque. La excavación se realiza por franjas horizontales comenzando por la de la bóveda, con el inconveniente de que la evacuación del material requiere varias actuaciones hasta llegar al nivel a donde se instala el sistema de transporte al exterior.

En el esquema que indica el proceso de actuación se numera las etapas por orden de ejecución y se redondea con un círculo la fase de sostenimiento. (figura 3.7.2.1)

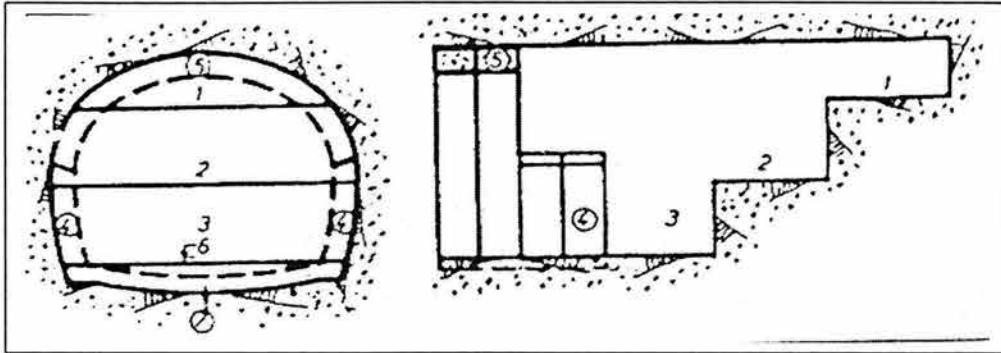


Figura 3.7.2.1 Ataque a plena sección con varios pisos

Método de la galería en clave o método belga.

Es uno de los métodos más utilizados (figura 3.7.2.2). Tiene la característica de ejecutar primeramente la excavación de la bóveda (es lo que se llama **avance en bóveda o calota**), incluido el sostenimiento que descansa directamente sobre terreno, pues de esta manera se protege la obra por encima. Después se realiza la excavación en la parte inferior llamada **destroza**, comenzando por la zona central y siguiendo, en cortos tramos alternativos, por los hastiales, que una vez excavados se revisten; de esta manera no se compromete la seguridad de la bóveda que descansa siempre sobre la **destroza** no excavada o sobre pilares ya construidos. Se termina por la construcción de la solera cuando es necesaria.

Tiene el inconveniente de que necesita vías de excavación de escombros a diferentes niveles, con el consiguiente transvase de un nivel al inferior.

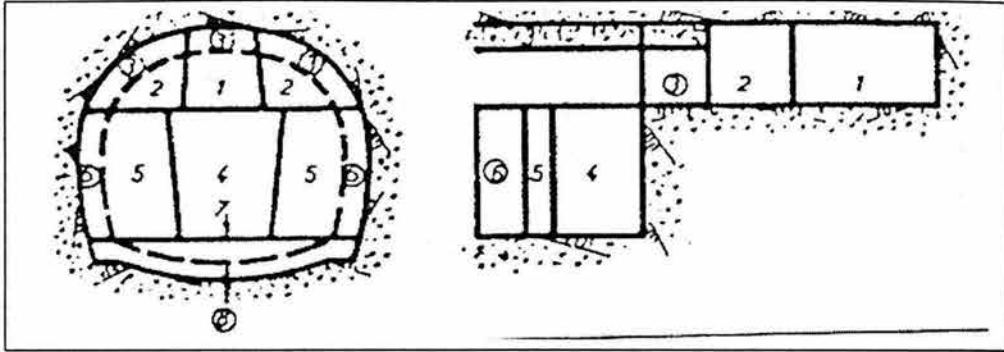


Figura 3.7.2.2 Método de la galería en clave o método belga

Método de las dos galerías o método austriaco.

Este método se caracteriza por el empleo de una galería de avance en el eje y base del túnel, donde se instala una vía de evacuación que se utiliza durante toda la obra (figura 3.7.2.3).

Cuando la galería ha avanzado cierta longitud se perfora un pozo hacia arriba y se excava en los sentidos una segunda galería. Una vez perforada la galería superior se sigue con el método belga. Tiene la ventaja de que el transvase de los escombros a la galería inferior se hace por los pozos y sin modificaciones desde su situación original. También, que los múltiples frentes de ataque aceleran la construcción del túnel.

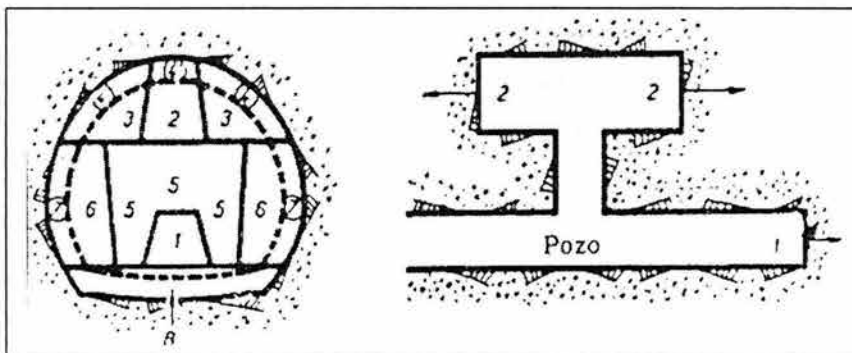


Figura 3.7.2.3 Método de las dos galerías o método austriaco

Método de las tres galerías o método alemán.

Se caracteriza por la conservación de la **destroza** hasta la finalización del sostenimiento de la bóveda y los hastiales. Se utiliza en secciones superiores a los 50 m².

Se excavan dos galerías en la base y a derecha e izquierda del eje (figura 3.7.2.4); se ensancha y se construyen los hastiales. Más atrás se ataca una galería de coronación que a continuación se ensancha hasta construir la bóveda que descansará sobre los hastiales. Por último se excava la destroza, y si es necesario se excava y se reviste la solera.

El método alemán es costoso por sus tres galerías, pero seguro en el mal terreno.

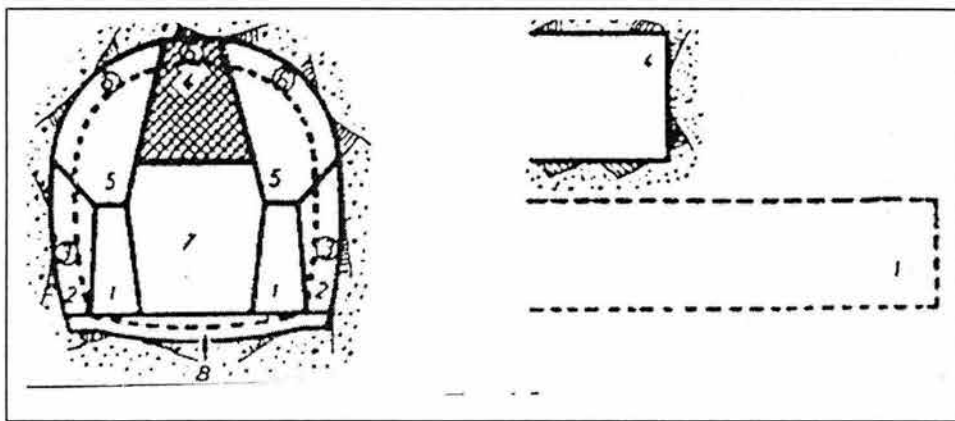


Figura 3.7.2.4 Método de las tres galerías o método alemán

Cabe comentar que el método belga es muy utilizado en túneles cortos en los que la evacuación de los escombros no es un problema importante; donde sí constituyen 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.

Debe procederse al saneo del frente previamente al comienzo de la perforación.

La perforación debe realizarse siempre con aportación de agua.

No deben utilizarse fondos de barrenos de la voladura anterior para emboquilles de la nueva perforación.

En el uso de *jumbos* prever golpes, aplastamientos, caídas de roca, polvo y ruido; señalar áreas peligrosas, utilizar perforación por vía húmeda, protección antirruído y luces intermitentes en vehículos. etc.

En la perforación manual deben preverse los resbalones y caídas, el polvo y la proyección de piedras; se debe asegurar buena protección de ojos y oídos.

3.7.3 Excavación.

Para la ejecución de la excavación se pueden emplear: Los métodos convencionales basados en la utilización de explosivos; los de arranque mecánico con máquinas puntuales o de plena sección, o cualquier otro sancionado por la práctica.

Desde el punto de vista de la seguridad se tendrán en cuenta las situaciones peligrosas siguientes:

- Voladura (prever proyección de rocas, humos tóxicos: ruido y onda expansiva; cuidar distancia de seguridad y protección, ventilación inmediata, protectores de oídos. etcétera).
- Arranque con excavadora (prever atropellos y arrastres; delimitar zonas de trabajo de riesgo).
- Arranque con rozadora (prever atropellos y arrastres, desprendimientos de roca; delimitar zonas de trabajo de riesgo; instalar interruptores visibles para parada de emergencia).
- Máquinas integrales (prever caídas, desprendimientos de roca, entibaciones provisionales. equipo personal de seguridad, etc.).

3. 7. 3. 1 Métodos de excavación.

Los métodos más utilizados para la excavación de túneles son el manual, la perforación y voladura, la excavación mecanizada.

1.- 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 naturaleza 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 4 m²).

2.- Perforación y voladura.

Durante muchos años ha sido el método más empleado para excavar túneles en roca de dureza media o alta, hasta el punto de que se conoció también como *Método Convencional de Excavación de Avance de Túneles*. La excavación se hace en base a explosivos, su uso adecuado, en cuanto a calidad, cantidad y manejo es muy importante para el éxito de la tronadura y seguridad del personal, generalmente se usa dinamita.

La excavación mediante explosivos produce inevitablemente una operación cíclica y no continua que consta de los siguientes pasos: (figura 3.7.3.1)

- 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 de explosivo y retirada del personal.
- Detonación de las cargas.
- Ventilación para eliminar humo, polvo y vapores.
- Desprender la roca suelta.
- Saneo de los hastiales y bóveda
- Carga y transporte de escombros.
- Replanteo de la nueva tronadura.

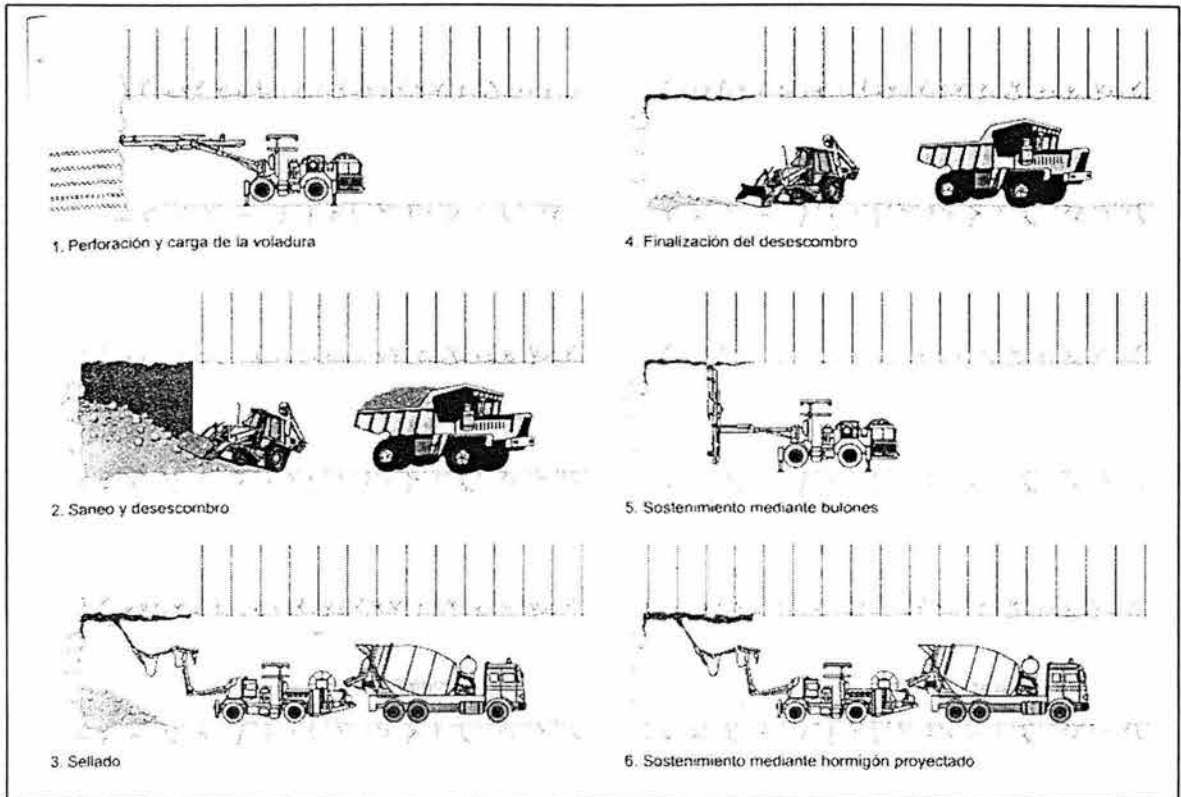


Figura 3.7.3.1 Secuencia de excavación y sostenimiento en avance por perforación y voladura

En secciones grandes, el avance del túnel se establece al menos en dos fases: en primer lugar la semisección superior, también llamada **avance de bóveda o calota**, y en segundo la semisección inferior o **destroza**. Si las 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.

Para la perforación del frente se utilizan perforadoras neumáticas 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 caballetes).

En el método con explosivos es importante el llamado **plan de voladura**. En la figura 3.7.3.2 el punto negro representa el taladro cargado de explosivo y la numeración indica el orden en el que se hace explotar a cada uno de ellos, lo que se consigue con detonadores retardados que se activan eléctricamente (microretardos).

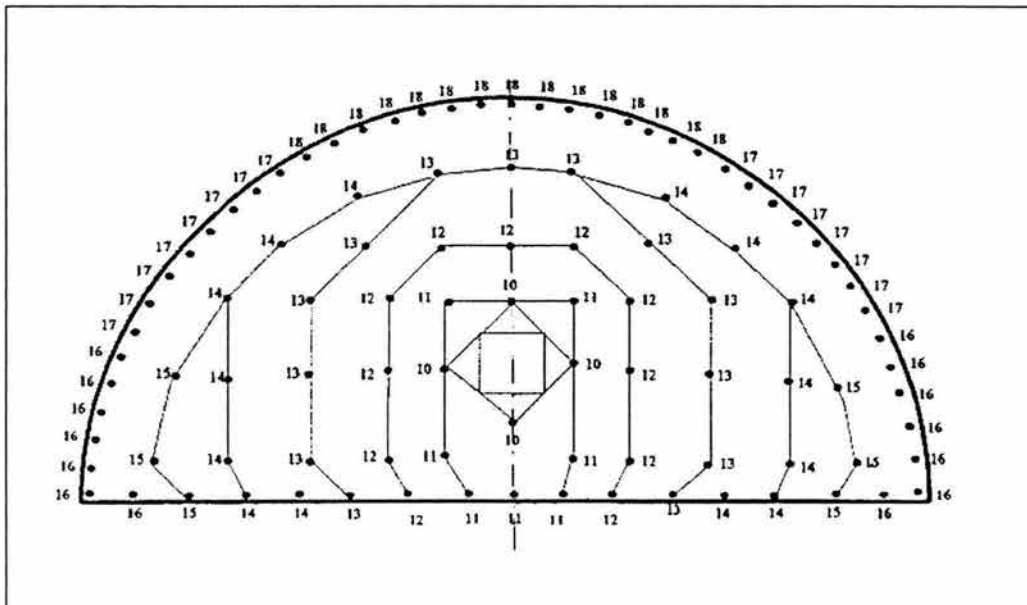


Figura 3.7.3.2 Esquema del plan de voladura

Uno de los objetivos principales en una buena voladura es evitar un excesivo deterioro en la roca circundante a la excavación. Una voladura inadecuada da lugar a sobreexcavaciones y caídas de bloques con problemas de estabilidad adicionales. Por ello es preciso efectuar **voladuras controladas** y técnicas como el precorte, voladuras suaves, etc., que minimicen el daño estructural al macizo.

Según el esquema, en el plan de voladura se distinguen las siguientes partes esenciales:

- El **cuele** que está situado en la parte central del esquema de tiro (figura 3.7.3.3) y 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. (figura 3.7.3.4)
- Las **zapateras** son los barrenos situados en la parte central y en los extremos de la línea más baja de la sección.(figura 3.7.3.5)
- 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), por lo que hay que cuidar mucho el no dañar la roca durante la voladura, pues dicho método se basa en la propia autoresistencia del terreno.(figura 3.7.3.6)

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 marca 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.

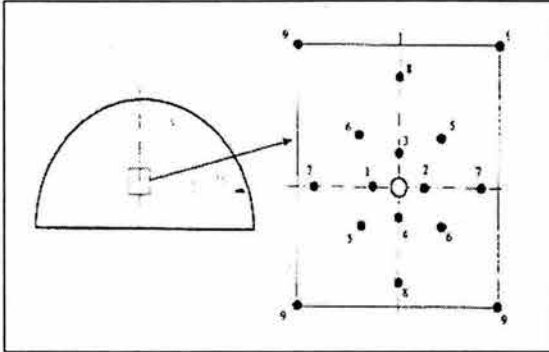


Figura 3.7.3.3 Cuele

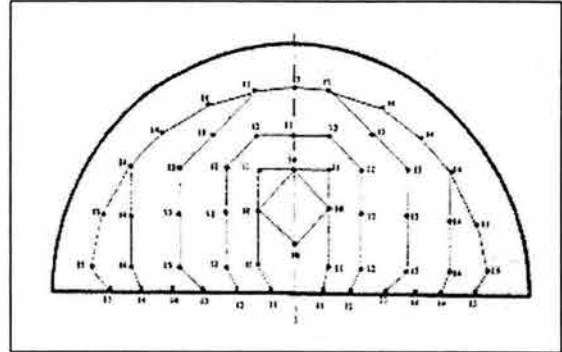


Figura 3.7.3.4 Franqueo

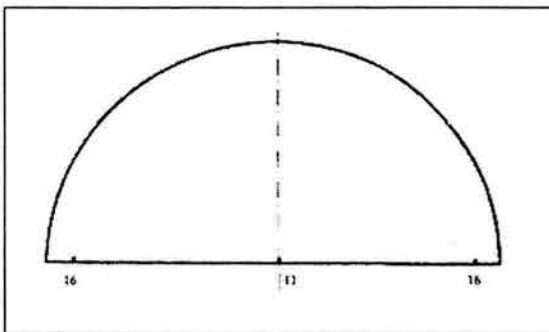


Figura 3.7.3.5 Zapateras

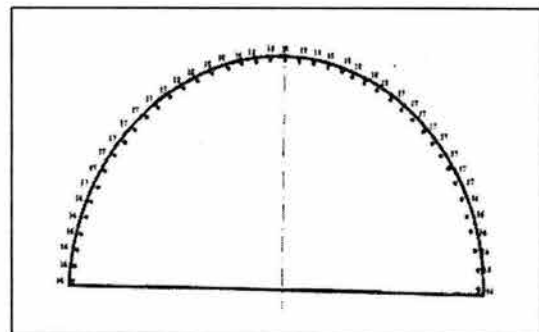


Figura 3.7.3.6 Recorte

3.- Excavación mecanizada.

Se distinguirán los métodos en los que se utiliza la maquinaria convencional, las tuneladoras y las rozadoras.

a) Con máquinas convencionales.

En terrenos de roca media a blanda, y en secciones medias y grandes, un método mecanizado es el convencional con tractores (*bulldozer*) dotados de *ripper*, para terrenos de mayor dureza, y palas cargadoras. Existen también versiones de estas máquinas, galibo mínimo o brazos cortos, que solucionan los problemas de espacio. (figuras 3.7.3.7 y 3.7.3.8).



Figura 3.7.3.7 Bulldozer con ripper

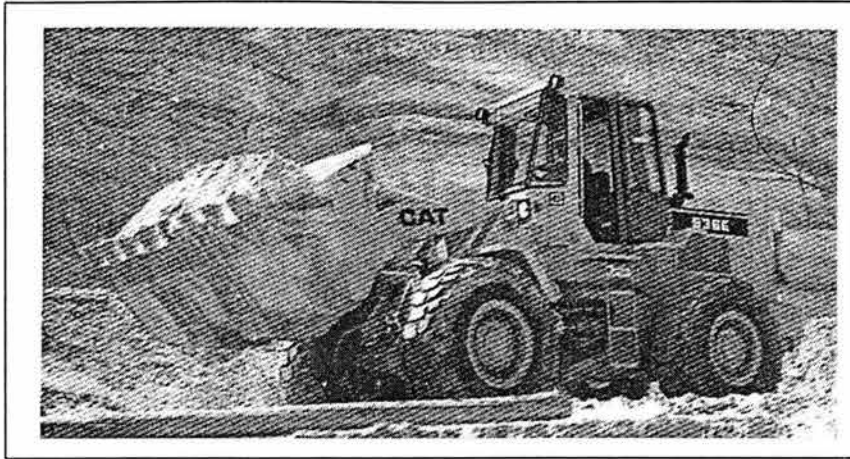


Figura 3.7.3.8 Pala cargadora y excavadora

b) Con tuneladoras

Podemos definir las tuneladoras como máquinas que realizan la excavación a plena sección mediante la acción directa y continua 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:

b.1) Máquinas topo (TBM, *Túnel Boeing Machina*)

Se utilizan para excavar 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 convencionales distribuidas en su superficie frontal. El dispositivo de empuje acciona contra el frente y reacciona contra unos codales extensibles o *grippers*. (figura 3.7.3.9)

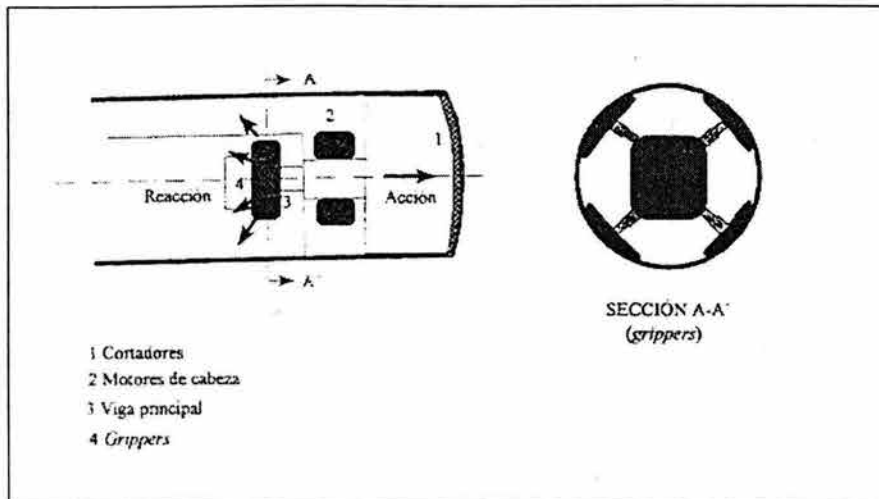


Figura 3.7.3.9 Esquema del topo

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. (figura 3.7.3.10).

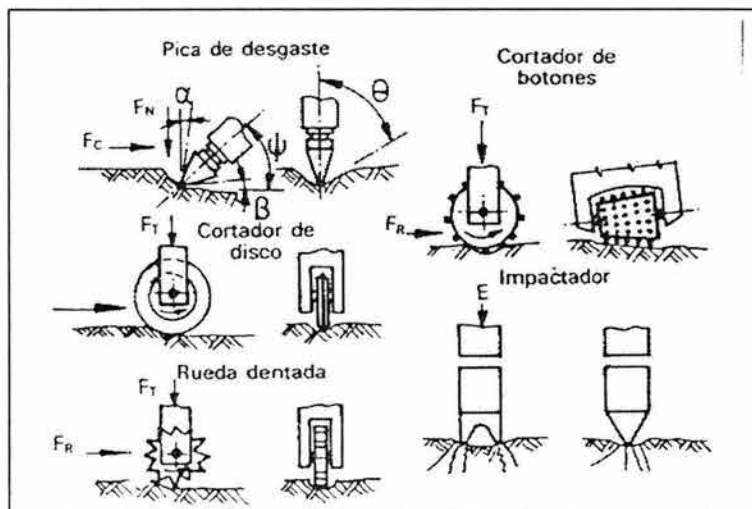


Figura 3.7.3.10 Tipos de cortadores

La tecnología actualmente permite fabricar topos desde 2.5 m de diámetro hasta 12 m, también se fabrican topos dúplex formados por un piloto de 3 a 4 m de diámetro combinado con una cabeza ensanchadora de hasta 12 m. Son muy útiles en galería de pendiente muy inclinada en las que la excavación se realiza de abajo hacia arriba con el topo piloto, para posteriormente ser ensanchada en la dirección contraria.

Un topo puede llevar bulonadoras que trabajan según se avanza, o mecanismo para colocar cerchas metálicas. También se puede preparar para el revestimiento con dovelas prefabricadas de hormigón en el caso de que se esperen grandes deformaciones de la roca. (figura 3.7.3.11).

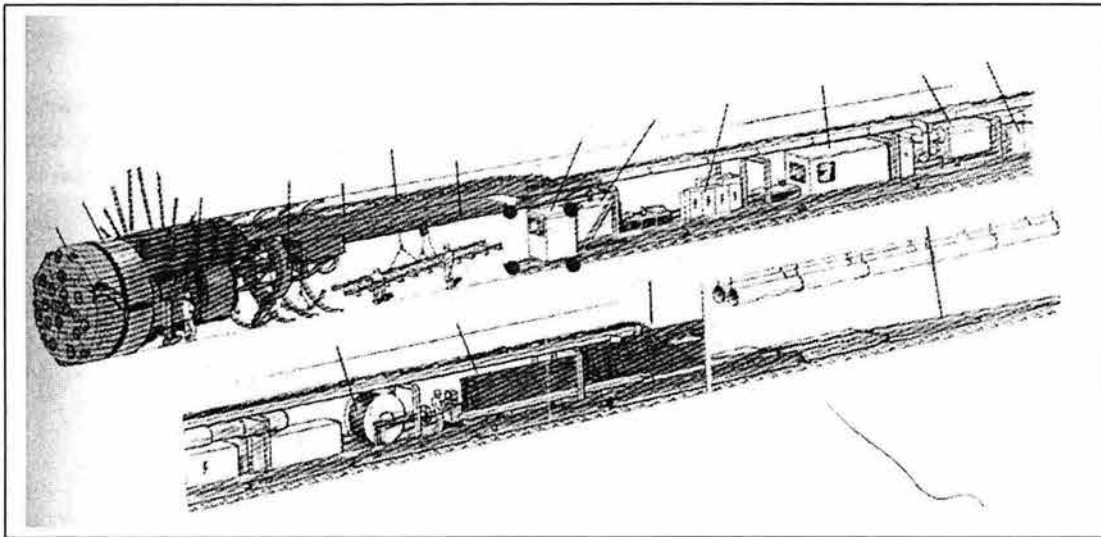


Figura 3.7.3.11 Máquina topo

En el rendimiento del avance con topo suele estar entre 1.5 y 2.5 m/h. Sin embargo una de las desventajas mayores que presenta respecto a otros métodos es la falta de flexibilidad cuando se presentan, macizos rocosos heterogéneos, con fallas, zonas con aportes importantes de agua, terreno plástico o con altas tensiones; debido a la longitud importante de toda la estructura que le acompaña (hasta 300 m). Esta longitud es la que limita el radio de las curvas, que no conviene que sean mayores de 100 m.

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 7% en rampas cortas) sino bastantes superiores, llegando hasta el 15 y 20%. (figura 3.7.3.12 y 3.7.3.13).

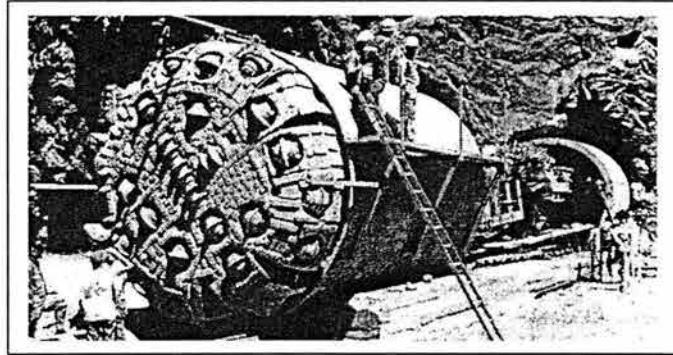


Figura 3.7.3.12 Tuneladoras TBM <Robbins> para rocas

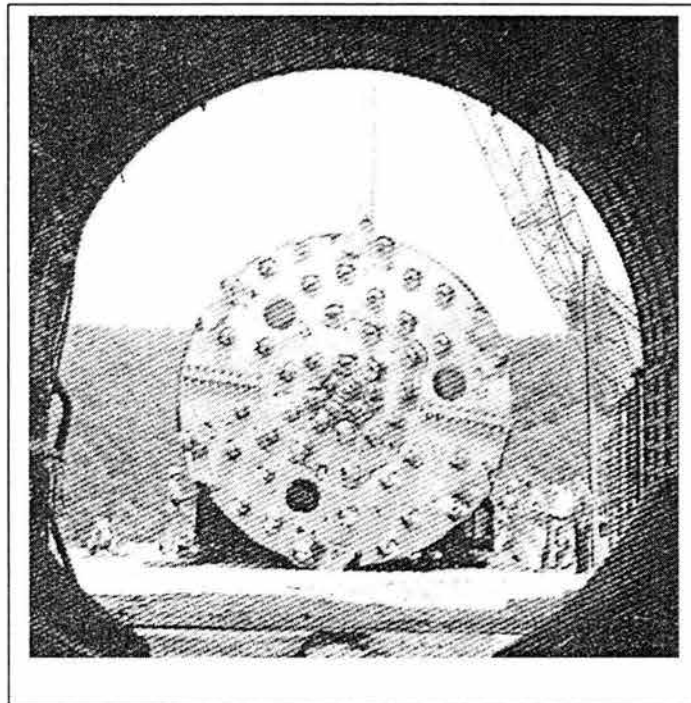


Figura 3.7.3.13 Topo

En general, precisan de un conocimiento muy completo de las condiciones geológicas del terreno a perforar. La elección del método se basa en un criterio de rentabilidad económica (una vez descartados los posibles criterios excluyentes): sección, longitud, problemas geológicos, abrasividad y dureza de las rocas, entre otros.

Algunos de los puntos básicos que deben considerarse antes de decidir la excavación con TBM son los siguientes:

- Dureza y abrasividad de las rocas.
- Sección y ángulo del eje del túnel con respecto a los planos de anisotropía estructural.
- Heterogeneidad litológica y longitud de los distintos tipos de terreno a atravesar.
- Condiciones geomecánicas del macizo rocoso.
- Presencia de fallas, zonas de cizalla y pasos de zonas muy fracturadas.
- Filtraciones, gases y tensiones tectónicas.

b.2) Los escudos.

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

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

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

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

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

Una vez completa esta parte del ciclo se coloca el revestimiento en la zona que ha quedado libre detrás de la cola del escudo. (figura 3.7.3.14)

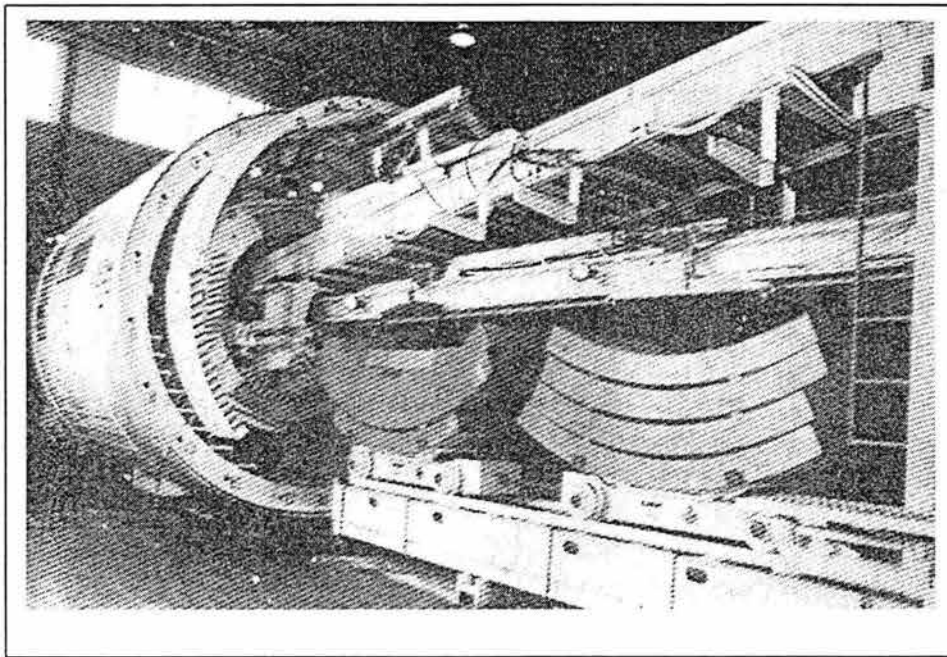


Figura 3.7.3.14 Escudo con las piezas de un anillo de revestimiento

A los escudos se les puede acoplar distintos sistemas o útiles de excavación según el tipo de terreno (brazo excavador con cuchara, con martillo, cabeza giratoria, rozadoras, cuchillas),

e incluso permiten la excavación manual en secciones de pequeño diámetro. Las limitaciones de pendiente vienen impuestas por el sistema de transporte del escombro elegido, siendo valido lo dicho anteriormente para los topes. (figuras 3.7.3.15 y 3.7.3.16)

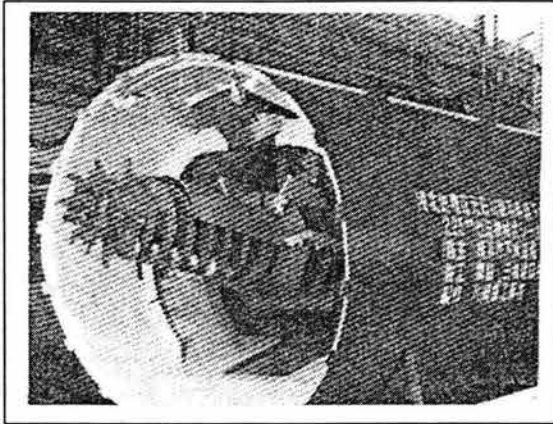


Figura 3.7.3.15 Escudo con excavadora rotary

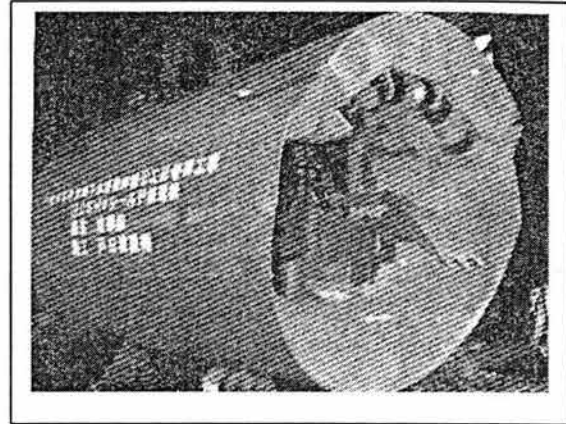


Figura 3.7.3.16 Escudo con cuchara y cuchillas móviles

En cuanto a las curvas, los escudos con longitudes similares a las de la estructura que les acompaña, son más problemáticos que los topes, pues los radios muy cortos obligan a un diseño sofisticado de dovelas. Como criterio general puede decirse que un escudo de determinado radio puede admitir radios del trazado iguales o menores a 80 veces el suyo propio. (figura 3.7.3.17).

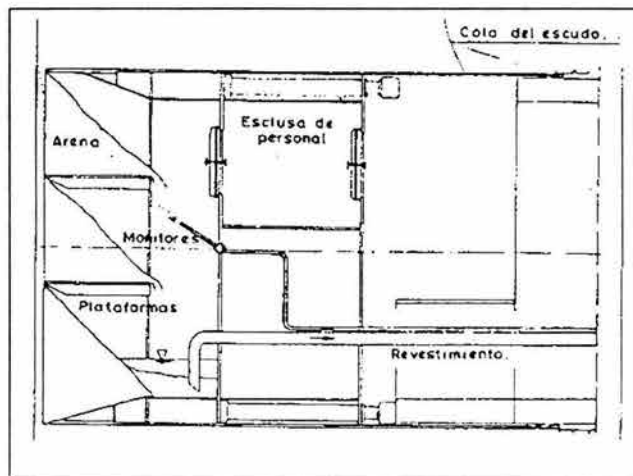


Figura 3.7.3.17 Escudo de excavación hidráulica

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

c) Con rozadores

Una rozadora es una máquina excavadora provista de un brazo articulado en cuyo extremo va montado un cabezal rotatorio que dispone de herramienta de corte de metal duro llamadas **picas**.

Estas máquinas, denominadas de ataque puntual, producen la desagregación de la roca con las **picas** que van situadas en la cabeza rotativa, que se mantiene presionada contra el frente con toda la potencia del motor de corte, actuando como fuerza de reacción el propio peso de la máquina. (figuras 3.7.3.18 y 3.7.3.19)

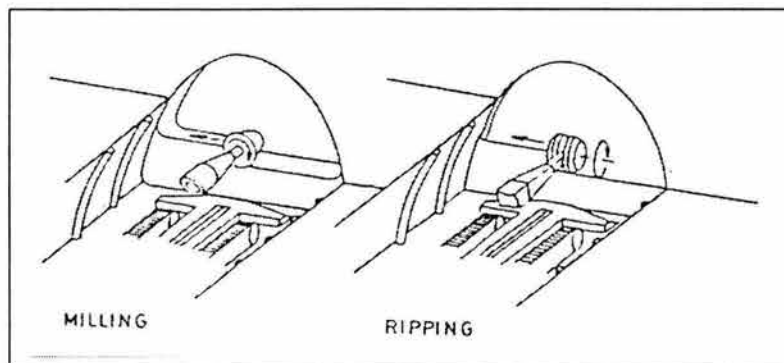


Figura 3.7.3.18 Rozadoras. Sistemas de corte.

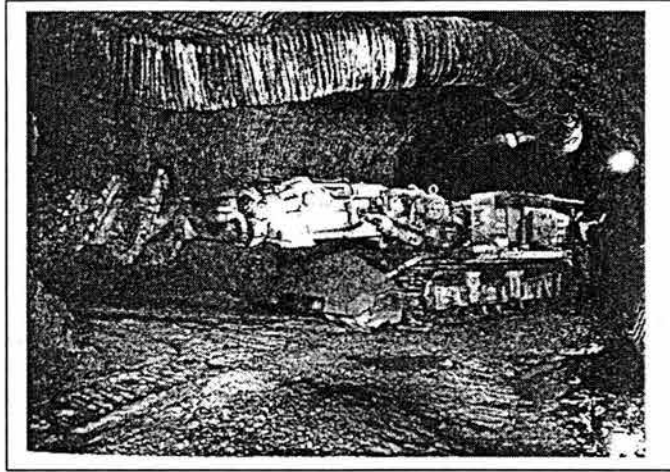


Figura 3.7.3.19 Rozadora de gran potencia.

Existen dos sistemas distintos de corte, el llamado de ataque frontal (*Ripping*) y el de ataque lateral (*Milling*). En el primero el cabezal de corte gira perpendicularmente al brazo soporte, por lo que la fuerza del corte se aplica principalmente de un modo frontal permitiendo atacar rocas de dureza alta. En el ataque lateral el cabezal es cilíndrico o tronco-cónico y gira en línea con el eje del brazo soporte, por lo que la fuerza de corte se aplica lateralmente no aprovechándose todo el peso de la máquina como fuerza de reacción; sin embargo, para la minería tiene la ventaja de poder extraer el mineral en vetas estrechas sin afectar a la roca encajante, ya que el cabezal de corte tiene dimensiones más reducidas. No hay que olvidar que el desarrollo de estas máquinas provenientes de la minería. (figura 3.7.3.20)

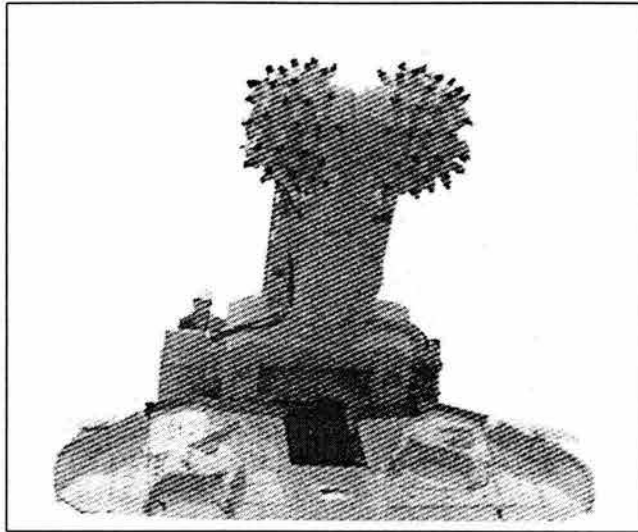


Figura 3.7.3.20 Rozadoras (Ripping). Sistema de carga mediante mesa de recogida con brazos recolectores.

Las rozadoras disponen de distintos sistemas de recogida de escombros que, complementados con la utilización de pequeñas cargadoras, los traslada a la parte trasera de la máquina para ser cargados y extraídos al exterior, normalmente por maquinaria sobre neumáticos (palas cargadoras y camiones). (figura 3.7.3.21 y 3.7.3.22)

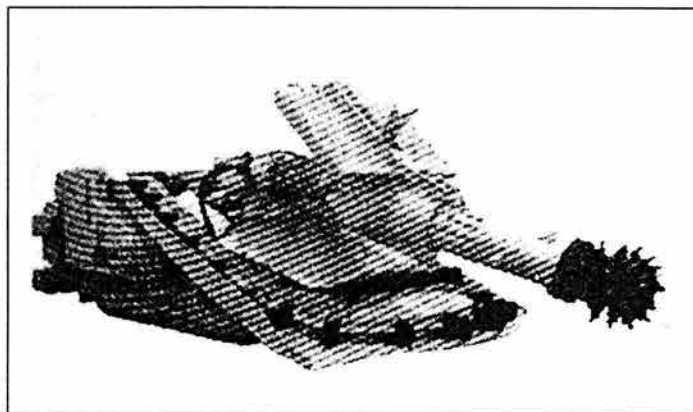


Figura 3.7.3.21 Rozadora (Milling). Carga de escombros con carrusel de paleta.

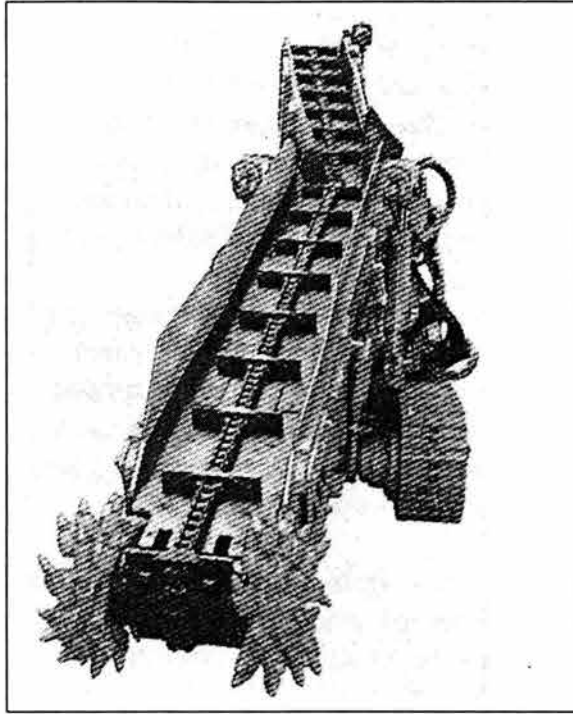


Figura 3.7.3.22 Rozadora (Ripping). Brazo rozador y recolector.

En relación con las condiciones anormales del terreno, las rozadoras presentan indudables ventajas a otros sistemas mecanizados, por su gran movilidad. Tanto si la máquina se ve rebasada por una excesiva dureza de la roca, que obliga al empleo de explosivos como si aparecen rocas muy blandas, que recomiendan el empleo transitorio de excavadoras o métodos manuales, las rozadoras permiten dar paso inmediato a estos sistemas. También se adaptan fácilmente a cualquier tipo de sostenimiento. (figura 3.7.3.23)

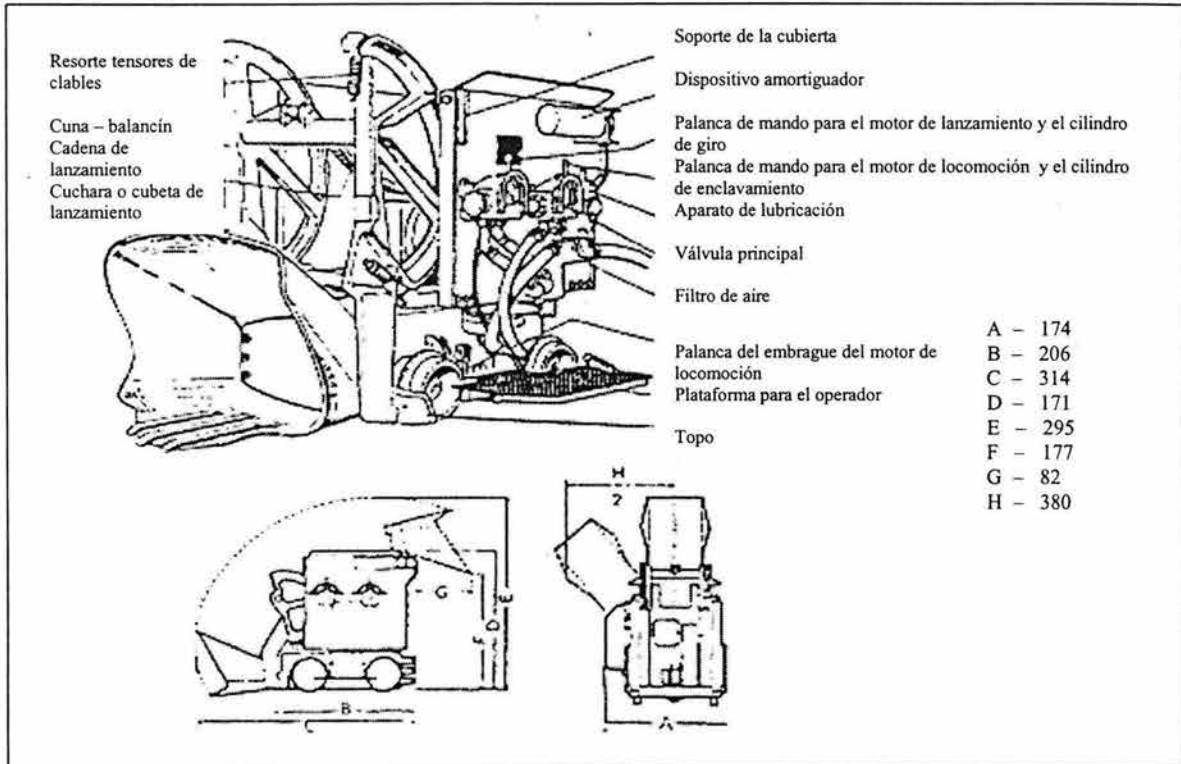


Figura 3.7.3.23 Pala de volteo para secciones mínimas o como completamente a otros métodos

Con carácter más selectivo, se pueden emplear los **martillos hidráulicos**, que permiten las excavación mediante una herramienta de impacto, o martillo picador, situada en el extremo de un brazo articulado (figura 3.7.3.24). Este sistema se emplea como auxiliar de alguno de los métodos anteriores, por ejemplo cuando la utilización de explosivos no sea posible por problemas de vibración o de estabilidad, en el caso de que la longitud del tramo a atravesar no justifique el cambio del proceso constructivo, o para pasar una zona de mayor dificultad o resistencia.

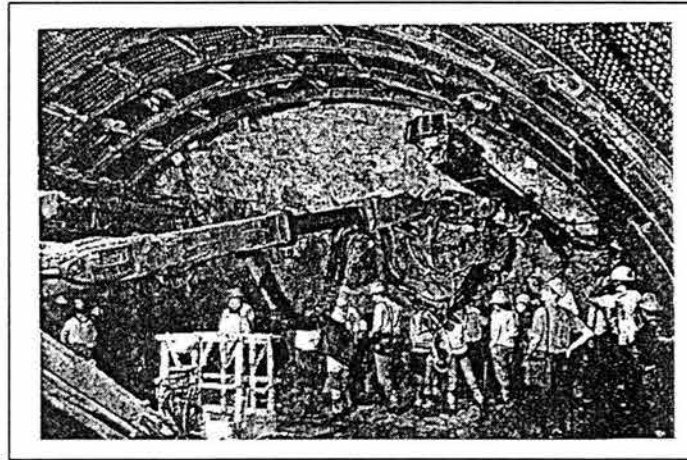


Figura 3.7.3.24 Excavación mediante martillo hidráulico y sostenimiento con cerchas y chapa Bernold.

3.7.3.2 Fases de excavación.

Cuando la sección del túnel es mayor de un cierto valor, unos 40-50 m², conviene realizar la excavación en varias fases, sobre todo si la calidad y estabilidad del terreno son bajas. A la primera fase de excavación se la denomina **avance** y a la siguiente **destroza** (figura 3.7.3.25); la destroza puede excavarse a su vez en una única fase o en varias: banco central y bataches laterales (figura 3.7.3.26). En terrenos de mala calidad puede excavarse en una tercera fase la **contrabóveda**, como objeto de cerrar un anillo de hormigón.



Figura 3.7.3.25 Excavación de la destroza

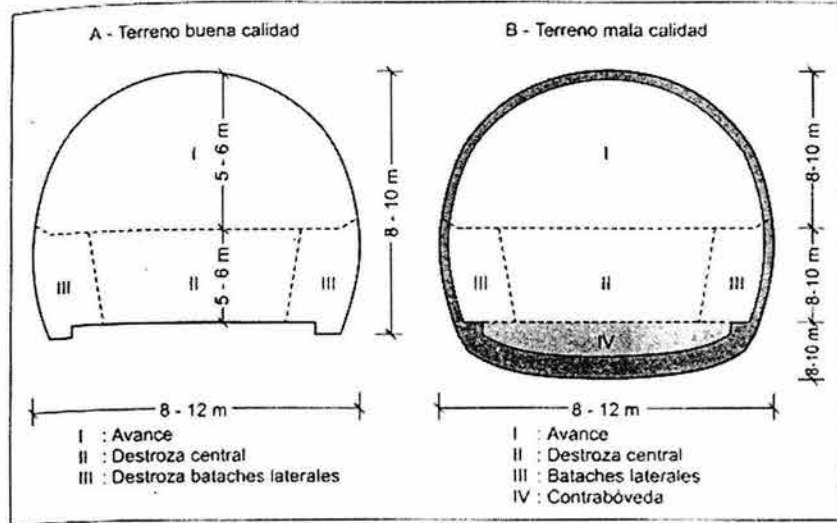


Figura 3.7.3.26 Fases de excavación en un túnel.

3.7.4 Carga, transporte, vertido y acopio.

3.7.4.1 Carga.

En secciones pequeñas, las palas de volteo de accionamiento neumático, sobre vía o sobre rueda, fueron los equipos aplicados inicialmente a los túneles de pequeña sección y, por supuesto, siguen empleándose (figura 3.7.3.23). Hay versiones eléctricas que siguen el mismo principio combinadas con grupos hidráulicos para el volteo de cuchara. La carga rehace por descarga del cucharón sobre el vehículo, en general vagones metálicos sobre vía.

Otro equipo de carga lo forman los cargadores de racletas, que penetran en la parte inferior del montón de escombros 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.

Sin embargo en casos extremos de sección mínima o fase de sección mínima, no hay más remedio que cargar manualmente el escombros, si bien suele hacerse sobre cintas 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. 7. 4. 2 Transporte.

a) 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 11 m³ y velocidad de hasta 50 km/hr.

En lo que a rentabilidad se refiere, las palas rápidas pueden ser la solución ideal para túneles de 600 o 700 m de longitud. Si la sección es grande y pueden cruzarse dos palas en pleno recorrido, son rentables para longitudes de 1.200 a 1.500 m

b) Transporte sobre vías

Es una alternativa más 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.

c) Transporte sobre caminos.

Se utilizan vehículos pesados tipo *dumper* que unen a la rapidez de descarga por basculado una gran maniobrabilidad. Existe una gran gama que se adapta a las limitaciones de sección y a las características de la cargadora adoptada.

3. 7. 4. 3 Recomendaciones de seguridad.

Las máquinas utilizadas en la carga de escombros en el frente irán dotadas de dispositivos acústicos y luminosos que permitan identificar sus movimientos durante el trabajo.

En la zona de trabajo solamente permanecerá el personal imprescindible para la ejecución de los trabajos y siempre fuera del alcance de las máquinas.

Los medios de transporte se cargarán correctamente y nunca con exceso, evitando la caída de escombros durante el transporte. Los vehículos de transporte se visualizarán fácilmente mediante dispositivos acústicos y luminosos.

Se evitará la circulación inmediatamente por detrás de los vehículos cargados y se tomarán precauciones durante el cruce.

En el caso de transporte por cinta se preverán los posibles aplastamientos por el escombros, los atrapamientos por la máquina sin protección; se protegerán las máquinas; se dispondrán interruptores de emergencia.

En los pozos se preverán las caídas por el cazo o almeja, las caídas de material; las áreas de carga estarán protegidas durante la carga; estarán controlados los movimientos de la almeja, etc.

Durante la elevación en pozos se cuidarán las oscilaciones o caídas de la carga y se dispondrán áreas protegidas de las caídas.

Los vertederos estarán bien explotados y organizados y debidamente iluminados en caso de trabajo nocturno.

Se cuidará el tratamiento ambiental de los vertederos y escombreras de acuerdo con lo definido en el estudio de impacto ambiental, en el proyecto de construcción y en el plan de tratamiento medioambiental incluido en la Memoria de construcción.

3. 7. 5 Sostenimiento.

3. 7. 5. 1 Elementos de Sostenimiento.

Los principales tipos de sostenimiento empleados en túneles en roca se describen a continuación:

Hormigón proyectado

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 esfuerzo de malla de acero. (figura 3.7.5.2)

El hormigón proyectado, también llamado **gunita** tiene dos finalidades principales: sellar la superficie de la roca, cerrando las juntas, y evitar la decompresión y alteración de la roca. El anillo de hormigón proyectado adquiere una resistencia de 50 kp/cm² a las 8 horas y 280 kp/cm² a los 28 días, y trabaja resistiendo las cargas que le transmite la roca al deformarse, evitando también la caída de pequeñas cuñas o bloques de roca.

Cuando el hormigón se utiliza únicamente para el sellado de la excavación no se combina con elementos de refuerzo adicional, siendo los espesores empleados generalmente inferiores a 5 cm. Cuando se pretende que funcione como elemento resistente el hormigón proyectado se refuerza con malla electrosoldada o mediante fibras de acero.

Antes del hormigón proyectado, se empezó a emplear el mortero (arena + cemento + agua) proyectado, para crear anillo protector de la roca en las formaciones susceptibles de meteorización rápida. Fue a finales de los 50 cuando empezó a utilizarse hormigón proyectado, es decir mezcla con áridos de hasta 16 ó 18 mm, con la consiguiente problemática de los aditivos para la aceleración del fraguado.(figura 3.7.5.1)

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 forman sobre la superficie de la roca una capa fuertemente adherida. Con el hormigón proyectado se pueden obtener con rapidez espesores de 10 a 15 cm, resolviendo no solo los problemas de meteorización sino evitando los desplazamientos en zonas muy fracturadas.

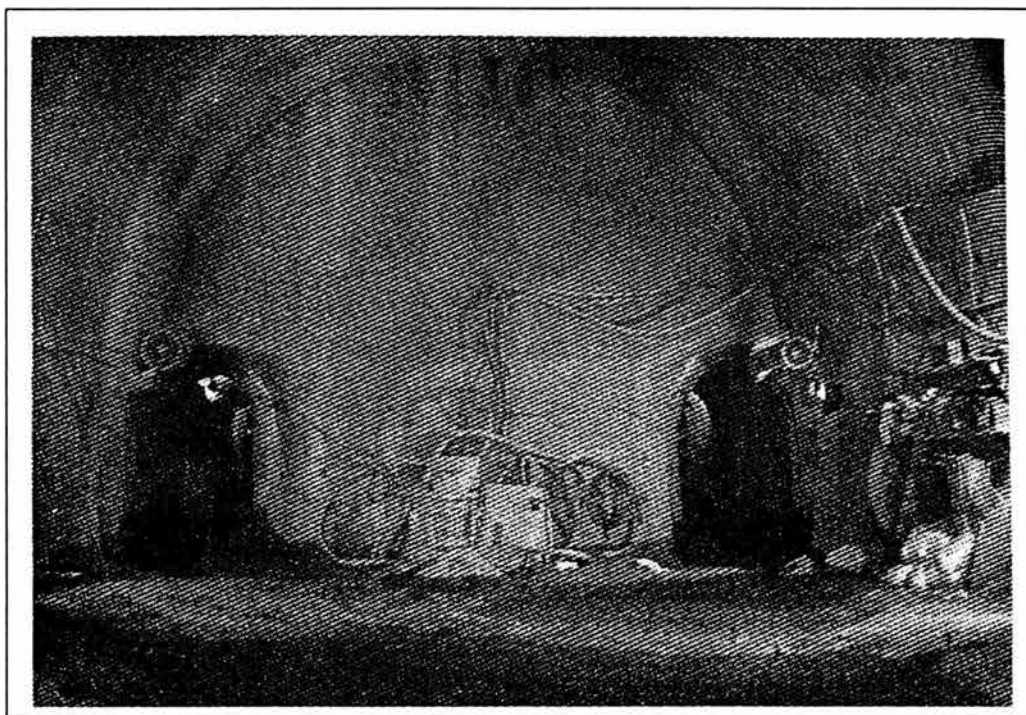


Figura 3.7.5.1 Gunitado en el frente, la bóveda y los hastiales.

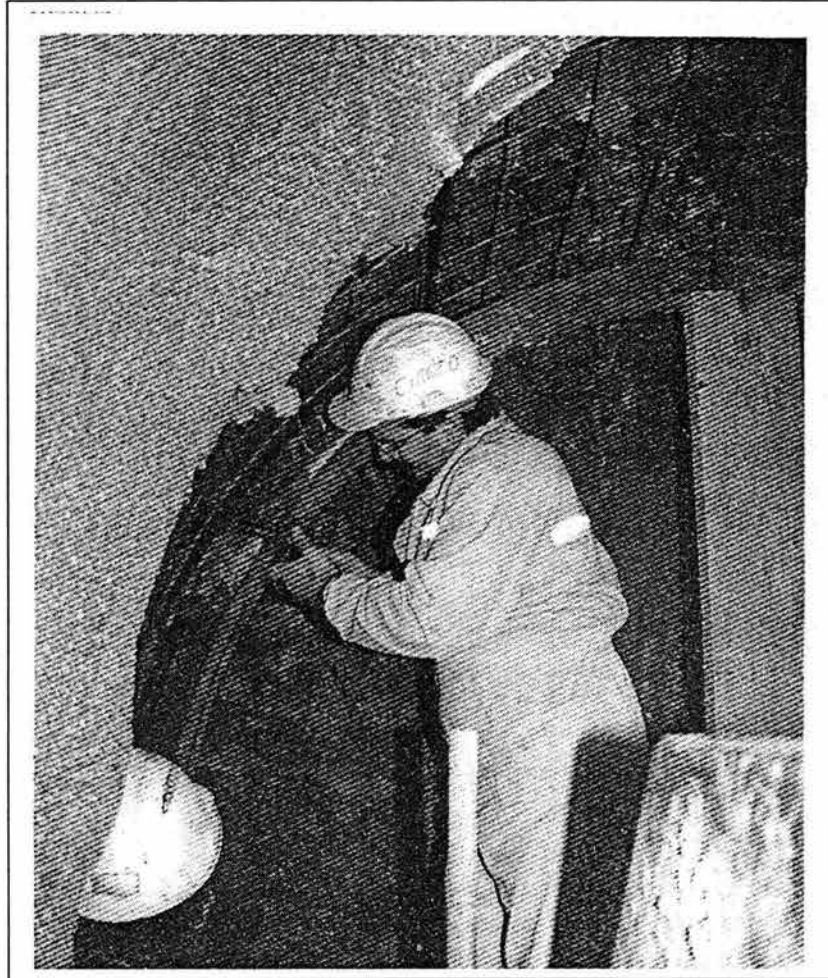


Figura 3.7.5.2 Sostenimiento mixto (cerchas, malla y hormigón proyectado)

Preanillos de hormigón.

a) Preanillos sobre chapa desplegada (método Bernold).

Se conocen también como *método Bernold*, puesto que fue esta la marca suiza que 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. (figura 3.7.5.3).

b) Preserrado de la roca.

Con el preserrado se construye un preanillo, como sostenimiento provisional, encofrado por el propio terreno y hormigonado por proyecciones. Consiste en cortar, con sierra mecánica de cadena, similares a las empleadas en trabajo forestales, un anillo de un espesor entre 15 y 20 cm 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 está abierto es mínimo. (figura 3.7.5.4)

Este método se usa también en rocas duras que han de tratarse con explosivos, como técnica más para resolver los casos en que las limitaciones por vibraciones son muy estrictas. (figura 3.7.5.5)

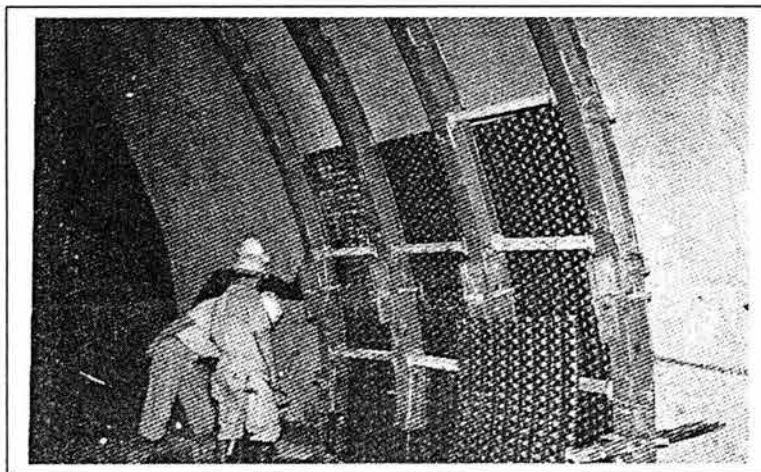


Figura 3.7.5.3 Método Bernold antes del hormigón definitivo

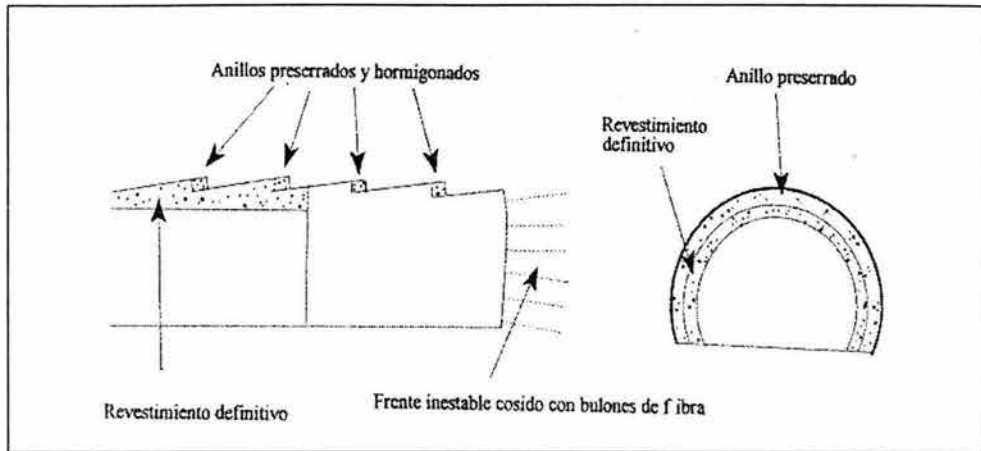


Figura 3.7.5.4 Método de preserrado en rocas blandas

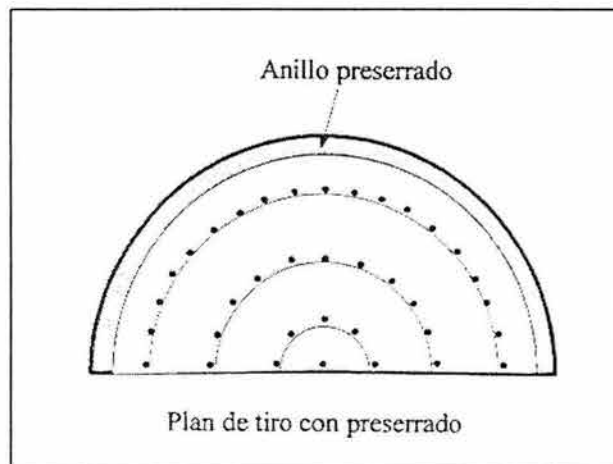


Figura 3.7.5.5 Preserrado en rocas duras (explosivos)

Dovelas.

Son anillos circulares segmentados, normalmente de hormigón más o menos armado. Como revestimiento permanente tienen la ventaja de que inmediatamente después de 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:

a) Dovelas ordinarias inyectadas.

Son de hormigón mediante armado que se usan llaves para su unión. El trasdós debe inyectarse inmediatamente a su colocación.

b) Dovelas expandidas.

Son dovelas de hormigón en masa o ligeramente armadas. Un erector las coloca sobre el anillo metálico 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 trasdós.

c) 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.

Malla electrosoldada o mallazo.

La malla electrosoldada o mallazo esta formada por una parrilla de barras corrugadas unidas mediante electrosoldaduras, y se utiliza como refuerzo del hormigón, proyectado por su facilidad de adaptación a la forma del túnel. Generalmente se usan mallazos de diámetros de 4.5 ó 6 mm con separaciones comprendidas entre 10 y 20 centímetros. En sustitución del mallazo se puede emplear **fibras de acero** que se incorpora a la dosificación del hormigón; consistente en alambres de acero de 0.5 mm de diámetro y 30 mm de longitud, utilizados en una proporción del orden de 40 a 50 kg de fibras por m³ de hormigón; cuando se emplea este sistema el espesor de la gunita no debe ser inferior a 6 cm.

Bulones.

Los bulones consisten en barras de acero de 20 a 40 mm de sección y longitudes variables, normalmente entre 3 y 6 m, que se instalan en el terreno previa perforación del taladro correspondiente; 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. Admiten cargas al orden de 10 a 25 t.

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 un bulonado previo si hay agua que dificulta el fraguado de morteros o resinas. Los bulones más utilizados son los contruidos por barras corrugadas, ancladas en toda su longitud con resina o cemento. Otros tipos de bulones son los de **fricción**, colados mediante hinchados por agua a presión (figura 3.7.5.6), y de **resina de poliéster** armada

con fibras de vidrio. Por su forma de actuar los bulones pueden ser **activos o pasivos**. Los primeros funcionan como anclaje, tienen un fuste libre, y la cabeza (parte que sobresale de la excavación) se sujeta mediante una placa y una rosca, aplicándoles una tensión entre 5 y 15 t. El bulón pasivo se adhiere a la roca en toda su longitud y no se le aplica tensión.

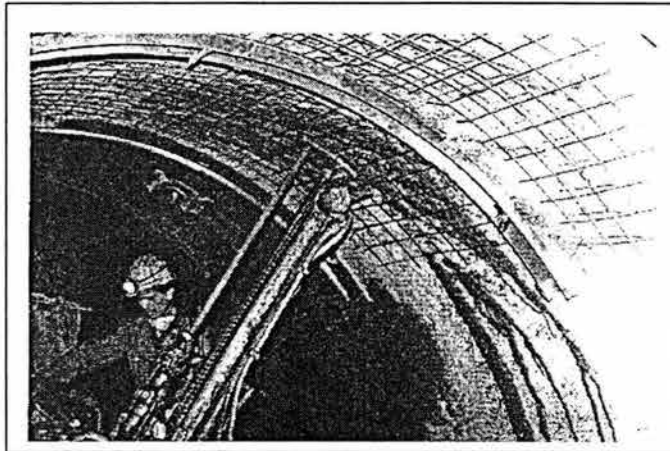


Figura 3.7.5.6 Instalación de bulones friccionantes tipo “Swelllex”, con cerchas, mallazo y gunita.

Los bulones ejercen dos efectos sobre la excavación:

- *Cosen* las discontinuidades del macizo rocoso, impidiendo los deslizamientos y caídas de cuñas y bloques.
- Aportan al terreno un efecto de confinamiento.

Cerchas.

La 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.

Las cerchas son perfiles de acero laminados en forma de arco que ejercen una función resistente cuando trabajan en contacto con el terreno (figura 3.7.5.7) por tanto se han de colocar en contacto con el mismo a lo largo de toda su longitud y firmemente apoyadas en el suelo. Las cargas de trabajo son generalmente bajas, del orden de $3\text{-}6\text{ t/m}^2$. En España se suelen utilizar, entre otras, las de tipo TH, con espaciados entre 0.75 y 1.50 m cuando los empujes del terreno no son muy elevados. (figura 3.7.5.8)

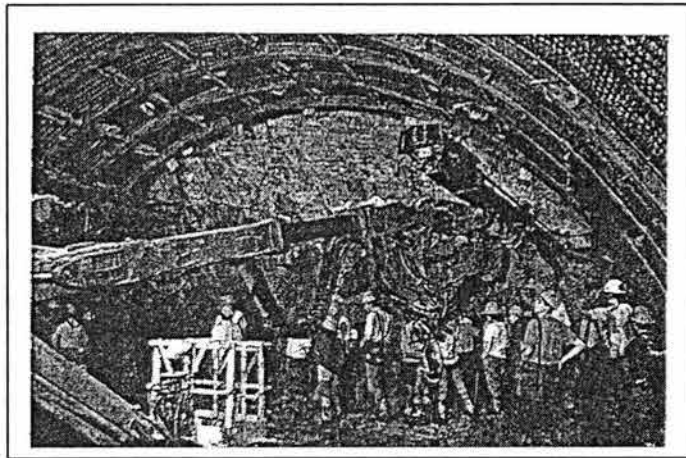


Figura 3.7.5.7 Excavación mediante martillo hidráulico y sostenimientos con cerchas y chapa Bernold.

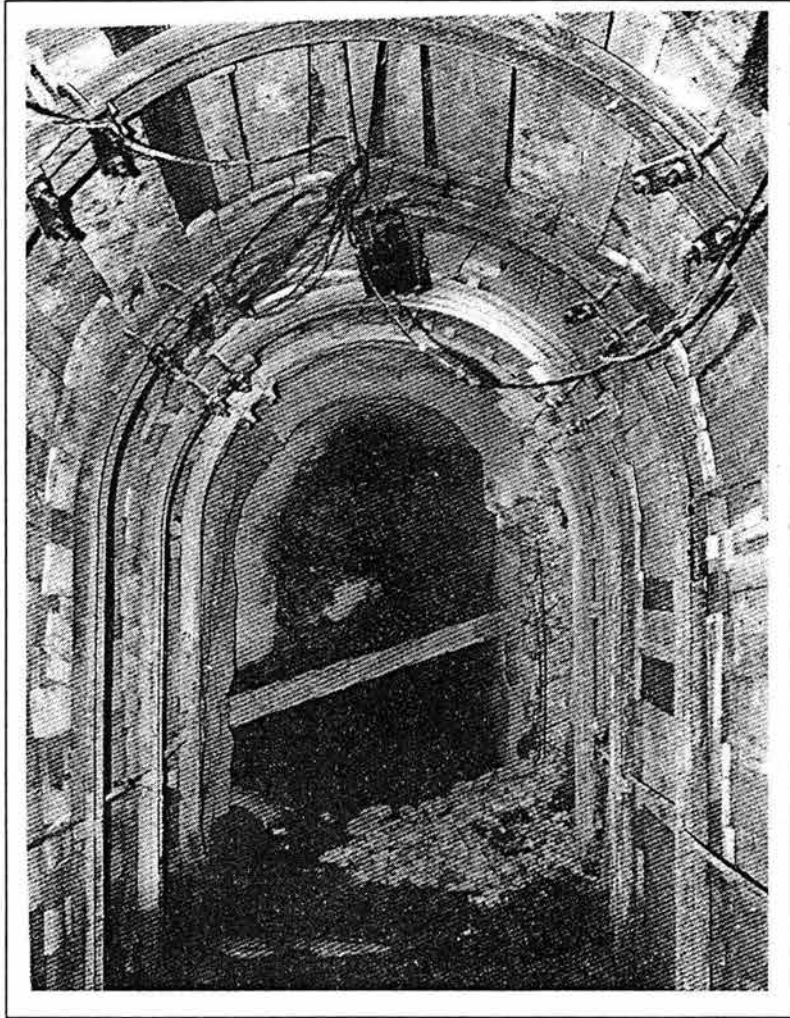


Figura 3.7.5.8 Cerchas con tablones en el sostenimiento de una galería de avance.

3.7.5.2 Método Austríaco.

El Nuevo Método Austríaco (NATM) constituye un procedimiento especial de construcción de túneles, desarrollado en Austria por Rabcewicz y otros en los años cuarenta en base a observaciones sobre el comportamiento reológico de los macizos rocosos y las relaciones entre las deformaciones radiales y los sostenimientos. Es aplicable a todo tipo de terreno, incluyendo los blandos y con escaso recubrimiento. Sus principios básicos se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Aplicación inmediata de un sostenimiento provisional semirígido de hormigón proyectado, bulones y excepcionalmente cerchas.
- Auscultación y medidas *in situ* de deformaciones / tiempo (medidas de convergencia).
- Eventual refuerzo del sostenimiento.
- Construcción de un revestimiento definitivo de la información anterior obtenida.

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

1. Evitar la meteorización y la descompresión de la masa rocosa, ya que estos procesos reducen considerablemente la resistencia al corte. Se aplica en forma inmediata hormigón proyectado o gunita a la superficie excavada, en toda la sección.
2. Las rocas diaclasadas son muy sensibles a los esfuerzos uniaxiales, por tanto, como complemento de la gunita, se instalan bulones.
3. Cada cambio o reajuste en el estado de tensiones del macizo crea perturbaciones y roturas en la roca circundante a la excavación. Por ellos

se debe excavar, a ser posible, a sección completa, y evitar excavaciones parciales o al menos reducirlas a un máximo de tres.

4. Puesto que el *anillo* de roca que circunda a la excavación debe ser lo más resistente posible, se debe evitar la concentración excesiva de tensiones en esas secciones; en consecuencia, se debe evitar las esquinas y salientes prominentes, adoptando secciones redondeadas, especialmente en los pies de las excavaciones parciales.
5. La construcción de un túnel no debe ser considerada estáticamente como una estructura tipo arco sino como un tubo. Un tubo tiene mucha mayor capacidad portante, pero actúa como tal únicamente si está cerrado en toda su sección. Por consiguiente, siempre que se trate de excavar un terreno de mala calidad se debe cerrar la solera mediante una contrabóveda, o procedimientos similares.
6. Es preciso llevar a cabo el control de las deformaciones y de los sostenimientos a lo largo del tiempo durante la excavación, así como una asistencia técnica especializada.

3. 7. 5. 3 Tratamientos especiales.

Cuando el terreno tiene baja resistencia o presenta problemas de estabilidad, filtraciones, hinchamientos, etc., se aplican tratamientos especiales de consolidación, refuerzo, impermeabilización o drenaje (figura 3.7.5.9). Algunos de estos tratamientos son los siguientes:

Esfilajes. Consisten en la colocación de bulones inclinados unos 40° - 45° hacia el frente de avance, para evitar la caída de cuñas. Tienen utilidad cuando se atraviesa la roca muy fracturada.

Paraguas. Se usan para pasar zonas de roca muy fracturada o muy alterada, con riesgo de desprendimiento al efectuar el avance. Pueden utilizarse bulones o micropilotes instalados alrededor de la sección o de la clave del túnel. Los bulones suelen tener diámetros de 32 mm (paraguas ligero); los micropilotes consisten en tubos huecos inyectados de lechada de diámetro 102-150 mm y espesor 3-4 mm (paraguas pesado figura 3.7.5.10). Cuando la zona a atravesar es amplia se colocan paraguas sucesivos, con un solape mínimo entre uno y otro de 2 ó 3 metros.

Coronas de *jet grouting*. En el caso de atravesar una zona muy suelta (rellenos de falla, roca descompuesta, etc.) se puede tratar todo el contorno del túnel mediante inyecciones por la técnica de *jet grouting*. Con ello se estabiliza el terreno formando un arco que permite avanzar bajo él.

Inyecciones. En función de sus fines pueden ser de relleno, consolidación o impermeabilización.

Drenajes. Para captación de filtraciones, mediante taladros o galerías de drenaje.

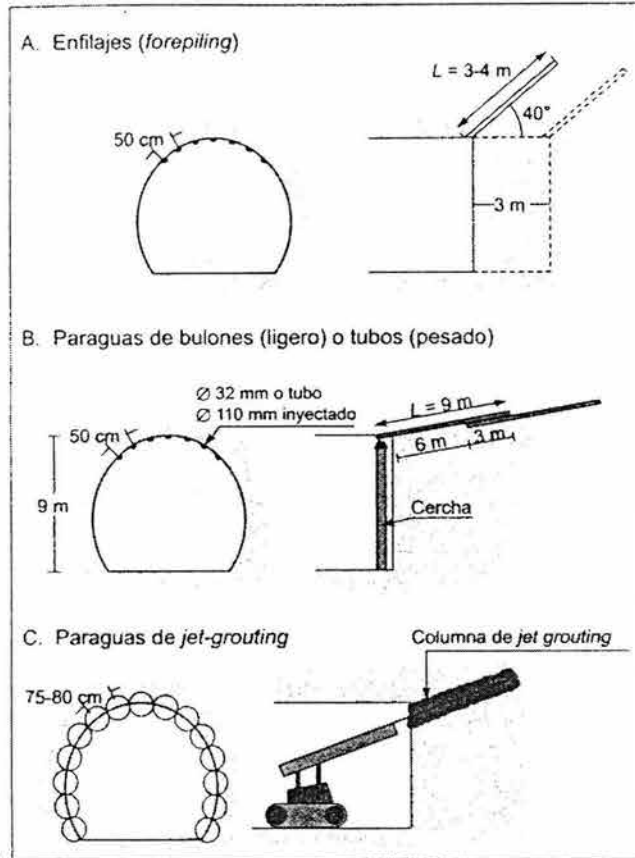


Figura 3.7.5.9 Tratamientos especiales de estabilización.

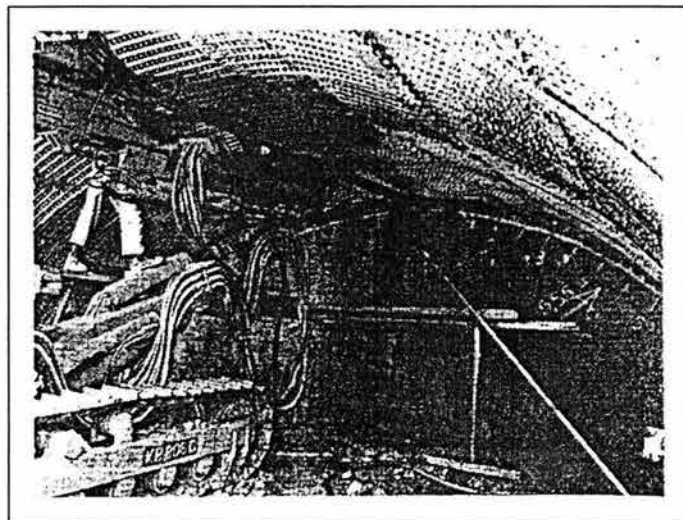


Figura 3.7.5.10 Ejecución de un paraguas de micropilotes

3 .7. 5. 4 Recomendaciones de seguridad.

Teniendo en cuenta la operatividad que se espera del sostenimiento, éste podrá ser provisional o definitivo.

Se deberá controlar el comportamiento del sostenimiento, tanto visualmente, como mediante el auxilio de la auscultación, para poder actuar ante circunstancias indeseadas (pérdidas de gálibo, reducciones de la capacidad resistente, etc).

Para la colocación del sostenimiento se emplearán equipos y medios adecuados que eviten el riesgo de los operarios, especialmente en el caso de que tengan que trabajar inicialmente desprotegidos.

El manejo de los materiales se hará con maquinaria adecuada o adaptada a tal fin, evitando la utilización de equipos específicos para otros trabajos. Si se emplean medios fijos tales como andamios, se tomarán precauciones frente a posibles desprendimientos.

Salvo justificación en contrario se emplearán brazos o equipos mecánicos para gunitar, con el objeto de reducir los riesgos y mejorar la calidad de obra terminada. Los andamios para trabajos en altura deberán ser amplios y estar provistos, al menos, de barandilla y rodapio.

En el proceso de ejecución del sostenimiento se tendrán en cuenta, entre otras, las precauciones siguientes desde el punto de vista de la seguridad:

- En el saneo mecánico: Los desprendimientos de rocas; las caídas, etc.
- En el saneo manual: Los desprendimientos de roca, las caídas; se procurará trabajar desde zonas protegidas, usar plataformas de trabajo y definir las zonas de trabajo de riesgo.
- En el uso de mallazos: Las caídas; las heridas por bordes cortantes; se utilizarán plataformas de trabajo; guantes; se definirán las zonas de trabajo de riesgo.

- En el uso de cerchas metálicas: Los golpes fuertes; caídas; se emplearán plataformas de trabajo, etc.
- En el uso de bulones de anclaje: Las caídas; se emplearán plataformas de trabajo.
- En la aplicación de hormigones proyectados se tendrán en cuenta:
 - En general (caídas; polvo; material de rebote; empleo de plataformas de trabajo; iluminación adecuada; empleo de robots de proyección; uso obligado de máscaras de protección).
 - Robots de proyección (caídas o aplastamiento; material de rebotes; zonas de trabajo de riesgo; mascara de protección).
 - Proyección manual (daños en la piel, ojos y sistema respiratorio; silicosis; equipo a prueba de polvo; aditivos en forma líquida; gafas y mascarar protectoras; guantes y traje adecuado).
- En el uso de gunitadoras se tendrán en cuenta:
 - Mantenimiento (arranque accidental de la máquina; desconexión de la alimentación de la máquina, tanto eléctrica como neumática).
 - Supresión de atascos en las tuberías (golpes de las mangueras o proyección de material; zonas de proyección de riesgo; contacto visual del operador).

3. 7. 6 Revestimiento.

El revestimiento se coloca con posterioridad al sostenimiento y consiste en aplicar sobre dicho sostenimiento una capa de hormigón, u otros elementos estructurales, con el fin de proporcionar resistencia a largo plazo al túnel y dar un acabado regular, mejorando su funcionalidad (condiciones aerodinámicas, impermeabilidad, luminosidad, albergar instalaciones y proporcionar la estética de la obra.)

Es corriente aplicar un revestimiento secundario en lo muros laterales del túnel a fin de contribuir a la visibilidad y por razones estéticas y, a veces, para contribuir a la impermeabilización. El techo se puede tratar de un modo similar, pero en muchos casos se construye un falso plafón para instalar ductos de ventilación y tendidos de cables en la parte superior, o para verter el agua o con fines de absorción acústica.

Los criterios principales en lo que se refiere a la selección y diseño de estos revestimientos para las paredes de los túneles son:

1. Costos de instalación, mantenimiento y renovación.
2. Alta reflexión luminosa, pero difusa y de ningún modo con reflejos espectaculares.
3. Superficies no absorbentes, resistencia al agua, al aceite y a la suciedad; lavables con detergentes y que no se rayan con facilidad.
4. Resistencia al envejecimiento y a la corrosión en la atmósfera del túnel.
5. Dimensionalmente rígidos y sin vibración.
6. Renovables cuando se echen a perder y removibles cuando sea necesario para tener acceso a los servicios que estén detrás.
7. De espesor mínimo, conformados al perfil.

3. 8 Prevención de riesgos laborales.

Las especificaciones de este apartado se entenderán sin perjuicio de lo dispuesto en la Ley de Prevención de Riesgos Laborales, donde se establecen disposiciones mínimas de seguridad y de salud en las obras de construcción.

Debe establecerse una buena organización, limpieza y orden en los tajos, para eliminar riesgos.

Los tajos deben estar bien iluminados y señalizados, especialmente cuando los trabajos sean peligrosos o sea frecuente el paso de maquinaria. El régimen interno de cada obra fijará las zonas y medidas a aplicar en cada caso.

Se deben emplear equipos (máquinas y medios) insonorizados, de forma que se mantenga el nivel de ruido admisible, tanto en interior como exterior de los túneles, muy especialmente en zonas urbanas o trabajos nocturnos. Se debe realizar una comprobación periódica.

Es conveniente la selección y formación del personal que permita dotarles de carnet de especialista después de un examen realizado por un organismo oficial u oficialmente acreditado.

Se establecerá una comunicación del frente de trabajo o tajos especialmente peligrosos con algún centro situado en el exterior que permita la actuación inmediata frente a accidentes. Se dispondrá de equipos de comunicación normal y de emergencia.

Se debe preparar y actualizar periódicamente un plan de actuación frente a situaciones de emergencia producidas por accidentes: Definiendo la persona responsable, los equipos de salvamento, las normas de primeros auxilios, el teléfono de centro de asistencia, etc.

Se adoptarán, además, las siguientes medidas:

3. 8. 1 Accesos y transporte (exterior e interior de la obra subterránea).

- Conservación de caminos de acceso a las bocas.
- Señalización de tráfico interior: Semáforos, indicadores. etc.
- Diferenciación entre zonas de circulación de máquinas y personal si la sección lo permite.
- Utilización de pasillos peatonales señalizados sobre la propia solera o con pasarelas montadas expresamente sobre el nivel del suelo con sus respectivas barandillas.
- Disposición de refugios señalizados en túneles de pequeña sección.
- Utilización de ropas o distintivos luminosos que permitan identificar a los peatones.
- El Plan de seguridad y salud en el trabajo debe definir las disposiciones particulares para circulación de personas y máquinas.

3. 8. 2 Transporte de personal.

En el transporte sobre neumáticos: Prevención de arrollamiento por vehículos en movimiento; camino especial para personal; nichos de refugio; ropas visibles y reflectantes; sistema adecuado de señales. etc.

En el transporte sobre vía: Prevención de arrollamiento por vehículos en movimiento; pasarelas de peatones; locomotoras en cabeza con luces frontales y claxon; vagones de transporte de personal; doble vía, si es posible, etc.

En el transporte por pozos: Caídas de objetos o materiales; caídas de cestas; escaleras protegidas con plataformas intermedias; cables antigiratorios; guías fijas para las cestas; elevador de cangilones u otros, etc.

CAPITULO 4: CRITERIOS BASICOS PARA LAS INSTALACIONES DEFINITIVAS Y LA EXPLOTACION

4.1 Consideraciones generales.

La explotación de un túnel de carretera exige la implantación de una serie de instalaciones que aseguren el adecuado nivel de servicio y seguridad, tanto en régimen normal como en circunstancias excepcionales (accidentes, incendio, etc.).

Para asegurar un buen servicio será preciso considerar las circunstancias específicas de este tipo de obras:

- Espacio limitado a la sección transversal.
- Mayor incidencia que a cielo abierto, de cualquier accidente, incendio o avería.
- Efectos psicológicos que pueden derivarse sobre el conductor: Claustrofobia, adormecimiento, etc.
- Reacciones mal conocidas del usuario en caso de incidencias graves.
- Cambio de condiciones ambientales y físicas a las entradas y salidas del túnel (sección. luz, efecto pared, aire, etc.).

El Proyectista deberá tener en cuenta dichas circunstancias desde el inicio de los estudios previos, con objeto de proceder a su mejor resolución a lo largo de las distintas etapas del proyecto.

4.2 Sistemas de explotación. Criterios de clasificación.

Existen diversos sistemas de explotación que dependen, fundamentalmente, de los siguientes factores:

- Tráfico (frecuencia y tipo).
- Longitud.
- Trazado.
- Sección tipo (uní o bidireccional).
- Ubicación (urbano, semiurbano, bajo agua...).
- Condiciones medioambientales.
- Revestimiento.
- Tipo de propiedad (concesión administrativa, Administración).
- Condiciones legales.

El análisis e integración de todos estos parámetros en el proyecto proporcionará el tipo o sistema de explotación.

Estos sistemas se pueden clasificar en tres niveles:

- Nivel III: Túneles cortos o de poco tráfico que no requieren de ningún tipo de instalación específica.
- Nivel II: Túneles que van a exigir un cierto tipo de instalaciones y de vigilancia particular con respecto al resto del trazado donde están inscritos (túneles de montaña de mediana longitud).

- Nivel I: Túneles en los que por sus especiales condiciones, se va a necesitar una organización específica permanente para el control y vigilancia de sus instalaciones (túneles de autopista, urbanos, etc.). Estos túneles dispondrán de una sala de control donde se recogerá y tratará toda la información proveniente de las diversas instalaciones del túnel.

Para los túneles de nivel I y II será preceptiva la redacción de un Manual de Explotación.

4. 3 Instalaciones fijas.

El proyecto de las instalaciones de un túnel se puede descomponer en los siguientes apartados:

1. Suministro de energía.
2. Sistemas de control.
3. Ventilación.
4. Alumbrado.
5. Salidas de emergencia. Refugios.
6. Incendios. Detección. Sistemas de extinción.
7. Control de tráfico y circulación.
8. Comunicaciones.
9. Señalización y balizamiento.
10. Obra civil.
11. Manual de Explotación.

4. 3. 1 Suministro de energía.

El suministro de energía para el funcionamiento de las instalaciones deberá ser adecuado a su nivel.

En túneles de nivel I habrá que prever el doble abastecimiento y la instalación de generadores de emergencia, así como un sistema de alimentación ininterrumpida (SAI) que cubra el servicio hasta el funcionamiento de los generadores.

4. 3. 2 Sistema de control.

Los túneles de nivel I dispondrán de un centro de control que recogerá toda la información procedente de las instalaciones fijas. Deberá preverse un sistema que garantice las funciones vitales de ventilación, extinción de incendios y energía de emergencia en el caso de que fallara el sistema de control.

El sistema de control deberá ser permanente con mando automático y/o manual, según los casos.

4. 3. 3 Ventilación.

El estudio de la ventilación en un túnel de carretera tendrá como fin reducir a límites aceptables la concentración de gases tóxicos y humos expulsados por los vehículos que circulen por el interior del túnel, teniendo en cuenta los parámetros de óxidos de carbono y los humos provenientes de los motores diesel que afectan a la visibilidad dentro del túnel.

La cantidad y composición de estos gases y humos varían sensiblemente en función de diversos parámetros, que habrá que tener en cuenta en el momento de diseñar el túnel.

Entre otros:

- Pendiente (en el túnel y en los accesos).
- Altura o nivel sobre el mar.
- Composición del tráfico.
- Fluidez del tráfico.

Serán las condiciones del túnel y del tráfico a soportar las que determinen el sistema de ventilación artificial más adecuado para cada caso, siendo conveniente que se le dote del correspondiente sistema de automatizado.

Otros criterios para la elección del sistema van a ser el entorno y/o afección del medio ambiente y el costo, de instalación y explotación, del sistema.

La necesidad de ventilación de un túnel a partir de una determinada longitud quedará fijada de acuerdo con el cuadro adjunto. (Tabla 4.3.3.1)

Modo	Tráfico	Longitud Metros
Unidireccional	Alto	> 300
	Medio	> 500
	Bajo	> 1.000
Bidireccional	Alto	> 100
	Medio	> 200
	Bajo	> 300

Tabla 4.3.3.1. Ventilación de un túnel de acuerdo a las condiciones de tráfico

El estudio de la ventilación del túnel tendrá en cuenta la posibilidad de actuación en caso de incendios en el interior.

Los estudios relativos a los sistemas de ventilación en túneles se enfocan actualmente desde tres puntos de vista:

- la seguridad de las personas, en primer lugar, creando vías de evacuación y escape de los usuarios, señalización más clara, instalaciones para la alerta temprana en caso de accidente, sistemas de ventilación más seguros en caso de incendio, etc.
- la reducción de los daños producidos a la estructura en caso de incendio con actuaciones rápidas de los equipos de bomberos procurando facilitar las labores de auxilio y extinción. Al igual que el aspecto anterior es evidente que la rapidez de actuación es determinante en la evolución del incendio.
- El mantenimiento de unos niveles de confort en el interior del túnel frente a las emisiones de gases contaminantes (CO, humos, NOx, etc) y cada vez más, el cuidado de los niveles de contaminantes expulsados por las bocas en áreas urbanas (mediante, por ejemplo, el uso de precipitadores electrostáticos)

El procedimiento habitual para la elección del sistema de ventilación pasa por la definición y posterior estudio de los distintos casos que pueden presentarse en el túnel.

4.3.3.1 Escenarios.

Habitualmente los escenarios se definen al plantear el conjunto de casos posibles que pueden presentarse en el interior del túnel. De una forma general éstos pueden dividirse en escenarios de servicio o de accidente.

Los escenarios de servicio surgen por las diferentes condiciones que se presentan en el funcionamiento "normal" de un túnel, es decir, teniendo únicamente en cuenta variaciones de aspectos como la composición del tráfico de los vehículos, las condiciones atmosféricas en las bocas, los límites de contaminación admisibles, las características de emisión de gases de los vehículos, etc. A pesar de que este tipo de escenarios no suele tener implicaciones desde el punto de vista de la seguridad, la definición de los mismos debe permitir un correcto dimensionamiento del sistema. Un defecto en el mismo puede producir falta de confort en el usuario e incluso un aumento del riesgo de accidente, mientras que un sobredimensionamiento eleva los costos de explotación y mantenimiento.

Dentro de los escenarios de accidente el más habitual es aquél en que no se produce incendio. En este caso, la finalidad del sistema de ventilación es el mantenimiento de unos niveles de contaminación que permitan la evacuación de los usuarios o el control de la situación en un breve periodo de tiempo.

Sin embargo, el gran peligro inherente al desarrollo de un incendio en un túnel hace que este tipo de escenarios sea dimensionante desde el punto de vista del sistema de ventilación y se centre básicamente en permitir el salvamento de los usuarios.

Los diferentes objetivos del sistema de ventilación para estos tipos de escenarios modifica los límites considerados admisibles para las concentraciones de contaminantes en el túnel. Así, los umbrales permitidos para servicio son menores que para accidente sin fuego los cuales, a su vez, son menores que para el caso de accidente con fuego.

4. 3. 3. 2 El papel de la ventilación.

Como ya se ha visto en apartados anteriores, los cometidos del sistema de ventilación no corresponden únicamente al funcionamiento habitual del túnel, manteniendo los niveles de contaminación dentro de unos niveles considerados admisibles, sino que también debe ser capaz de permitir la evacuación en caso de accidente y el control de la nube de humos en caso de accidente con fuego. Sin embargo, el sistema de ventilación a instalar en un túnel también debe mantener unas condiciones aceptables en un gran número de recintos auxiliares que, cada vez más, son necesarios para albergar las instalaciones del túnel, el personal de explotación, etc.

4. 3. 3. 3 Sistemas de ventilación.

Ventilación principal.

Para conseguir los objetivos descritos en el apartado anterior existen distintos sistemas de ventilación empleados en la actualidad. De forma general se clasifican los sistemas de ventilación en función de la dirección, en la sección del tráfico, en la que circula el aire preciso para diluir los contaminantes. Siguiendo este principio se obtienen diversas posibilidades que se exponen a continuación.

Ventilación longitudinal natural

No corresponde propiamente a un sistema de ventilación al no disponerse instalaciones de ventilación ya que la dilución de contaminantes se produce únicamente por efectos meteorológicos o del tráfico creando una corriente suficiente de aire en el túnel. Suele emplearse solamente en túneles muy cortos (no superior a 300 metros) ya que no existe ningún control sobre la ventilación en caso de accidente. (figura 4.3.3.1)

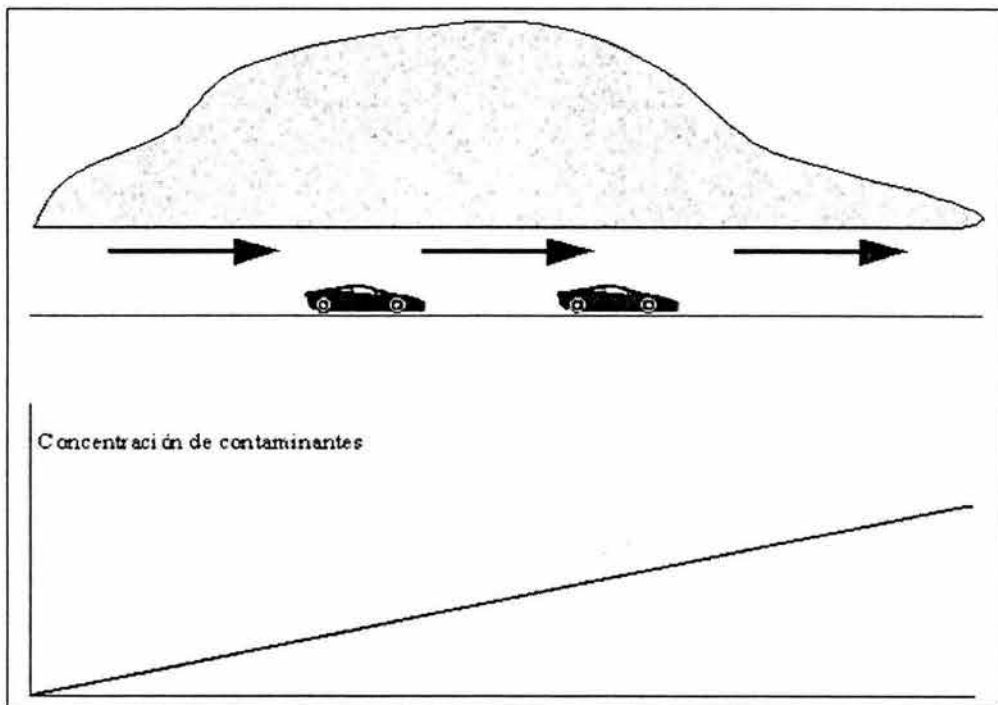


Figura 4.3.3.1 Ventilación longitudinal natural.

Ventilación longitudinal natural con pozo.

Este sistema, prácticamente en desuso, es muy similar al longitudinal natural pero se potencia el efecto atmosférico creando un pozo de ventilación gracias al cual, debido al efecto atmosférico, parte del aire viciado se extrae del túnel. De esta forma, manteniendo la misma concentración máxima admisible se dobla la longitud del túnel permitida. Sin embargo, en caso de algunas circunstancias meteorológicas pueden aparecer funcionamientos incorrectos del sistema. (figura 4.3.3.2)

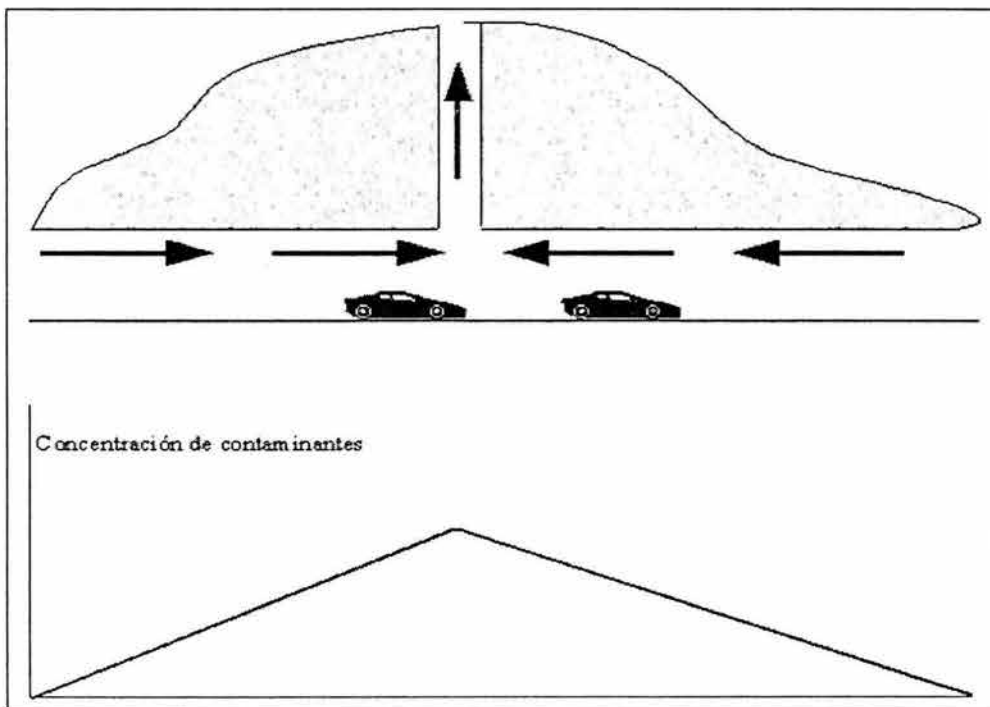


Figura 4.3.3.2. Ventilación longitudinal natural con pozo

Ventilación longitudinal con ventiladores en pozo.

Partiendo del concepto anterior este sistema permite el control correcto del flujo de aire con contaminantes en la dirección deseada. Es posible tener configuraciones en las que a través del pozo se sople aire fresco o se aspire aire viciado. En cualquier caso, el segundo tipo es más favorable ya que evita las molestias de un fuerte chorro en la mitad del túnel y en zonas urbanas no sale aire contaminado a través de las bocas. (figura 4.3.3.3)

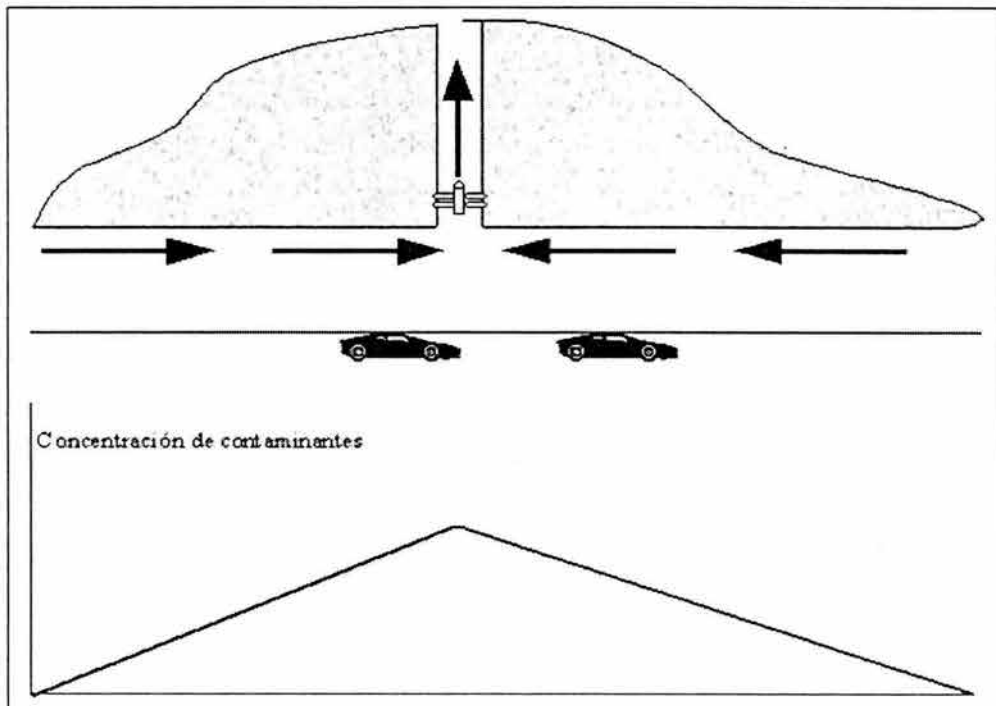


Figura 4.3.3.3 Ventilación longitudinal por ventiladores de chorro

Ventilación longitudinal por ventiladores de chorro.

En este tipo de túneles se disponen pequeños ventiladores de chorro situados a lo largo del túnel los cuales generan una corriente longitudinal de aire en el mismo. Este tipo de ventilación está especialmente indicado para túneles con un sentido único de circulación incluso para grandes longitudes. En caso de incendio, se impulsan los humos hacia la boca de salida de los vehículos, evitando el retroceso de los humos a la zona en la que se produce la retención de los coches. En túneles bidireccionales es muy conveniente que los ventiladores sean de tipo reversible para facilitar el control de los humos en caso de incendio. Su gran ventaja es un reducido coste tanto inicial como de explotación. (figura 4.3.3.4)

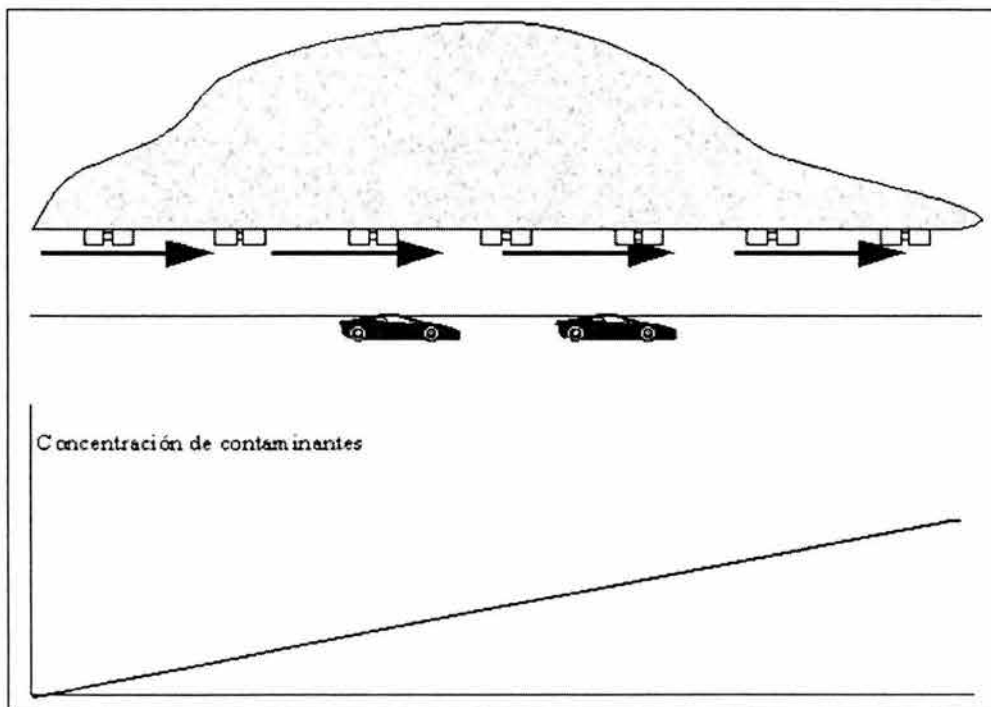


Figura 4.3.3.4. Ventilación longitudinal por ventiladores en pozo y aceleradores.

Ventilación longitudinal por ventiladores en pozo y aceleradores.

Es un sistema de ventilación que tiene la ventaja de que el pozo de extracción permite doblar la longitud máxima del túnel y a la vez controlar la nube de contaminantes en caso de incendio. (figura 4.3.3.5)

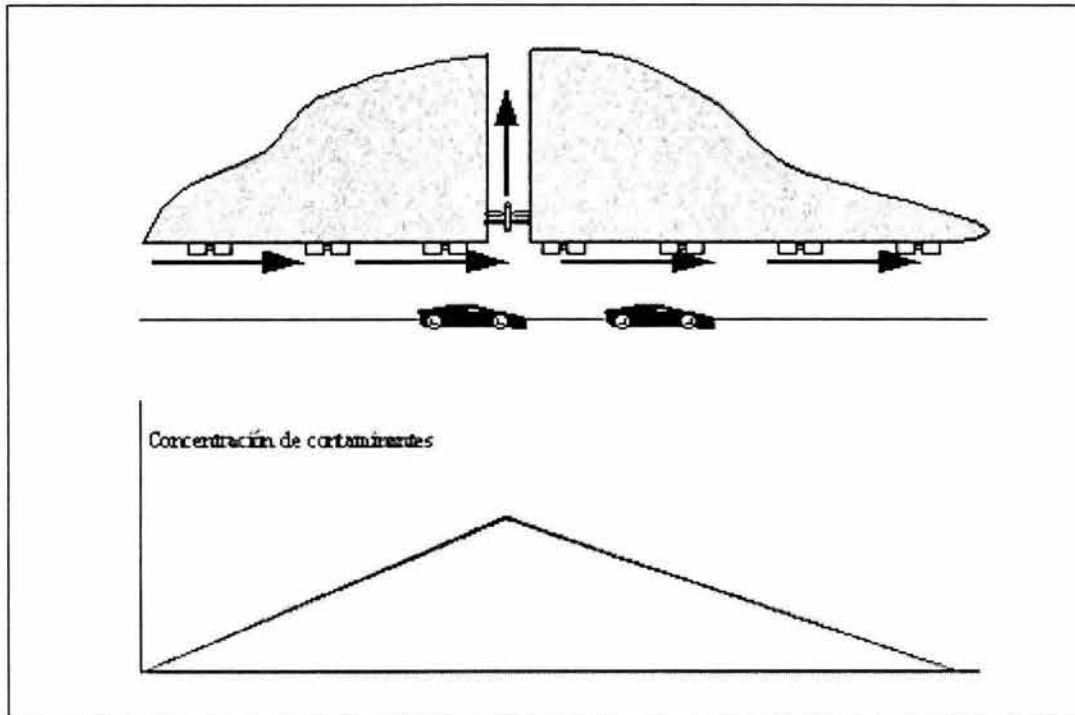


Figura4.3.3. 5. Ventilación semi-transversal con inyección de aire fresco

Ventilación semi-transversal con inyección de aire fresco.

Con este tipo de ventilación se pretende dar a cada zona del túnel la cantidad de aire fresco necesario para diluir los contaminantes que allí se producen. El aire fresco se introduce a lo largo de todo el túnel a través de una serie de aberturas que comunican un conducto auxiliar con el túnel. El conducto auxiliar habitualmente va situado en un falso techo del túnel. El aire contaminado sale a través de las bocas. Para prevenir el caso de incendio este tipo de ventilación puede estar preparada para invertir el sentido del aire y pasar a una aspiración a lo largo del túnel o en zonas localizadas. Para ello se disponen trampillas que se pueden abrir o cerrar según el caso. (figura 4.3.3. 6)

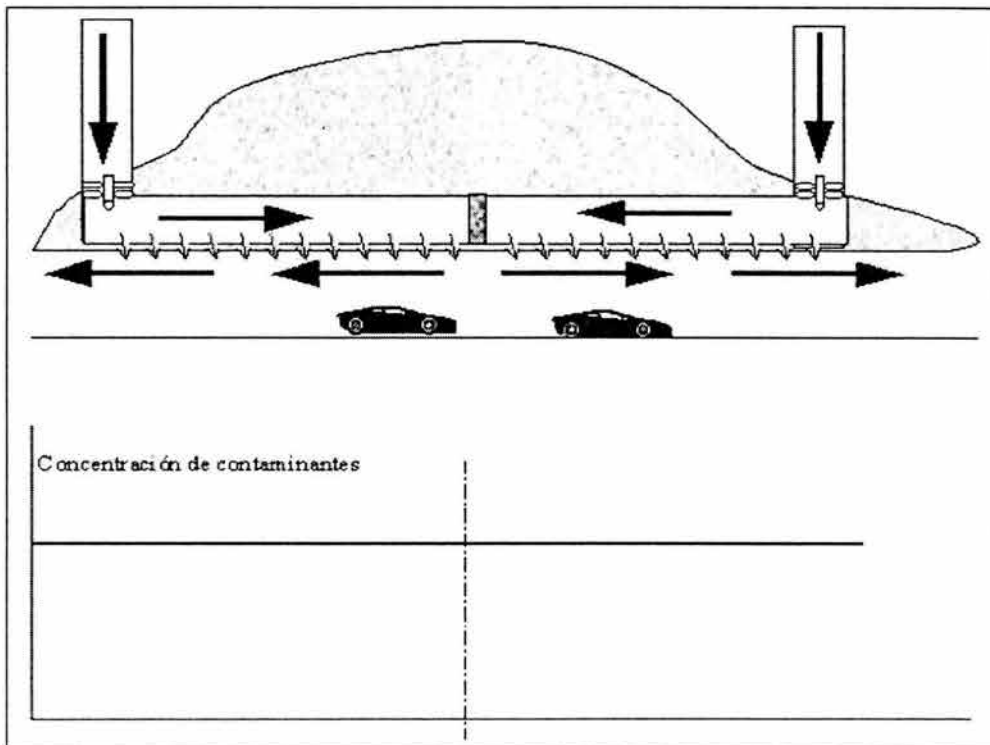


Figura 4.3.3. 6. Ventilación semi-transversal con inyección de aire fresco

Ventilación transversal total.

Con este tipo de ventilación cada tramo del espacio de tráfico debe recibir exactamente la cantidad de aire fresco necesario para diluir las materias nocivas producidas. Igualmente, el sistema debe ser capaz de extraer aire viciado con el fin de que en el túnel no se produzca ninguna corriente longitudinal dentro del espacio del tráfico. El aire fresco se suele repartir mediante aberturas situadas al nivel de la calzada o en la parte superior mientras que el aire viciado se extrae por la parte superior del túnel. Las aberturas para la extracción de aire viciado deben situarse siempre en la parte superior del túnel para permitir la extracción de los humos en caso de incendio.

Este es probablemente el sistema de ventilación más completo aunque conlleva los mayores gastos tanto de instalación como de mantenimiento y explotación. Existen dudas también sobre su capacidad para controlar la velocidad longitudinal del aire (y por consiguiente la nube de humos en caso de incendio) en caso de fuertes diferencias de presión entre bocas. (figura 4.3.3.7)

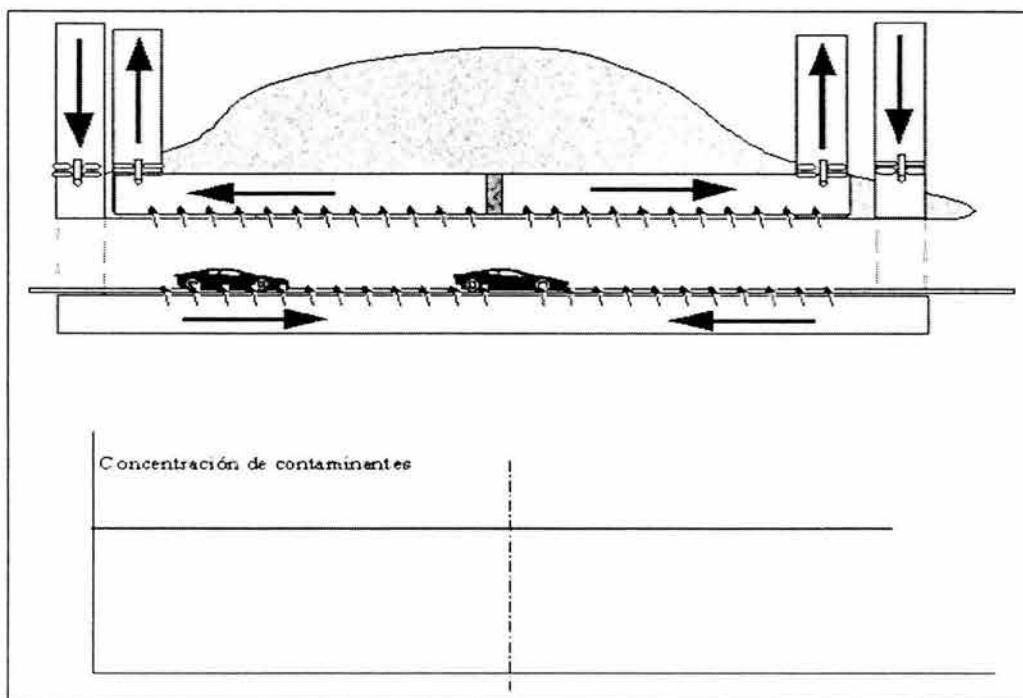


Figura 4.3.3. 7 Ventilación transversal total.

Ventilación pseudo-transversal.

La ventilación pseudo-transversal está basada en la transversal total con la diferencia de que la cantidad de aire extraído es menor que la del aire inyectado, saliendo por las bocas la diferencia entre ambos. Esto permite reducir los gastos de explotación y de construcción al dimensionarse los conductos de extracción para un menor caudal. Sin embargo, la capacidad del sistema de extracción en caso de incendio se ve reducida. (figura 4.3.3.8)

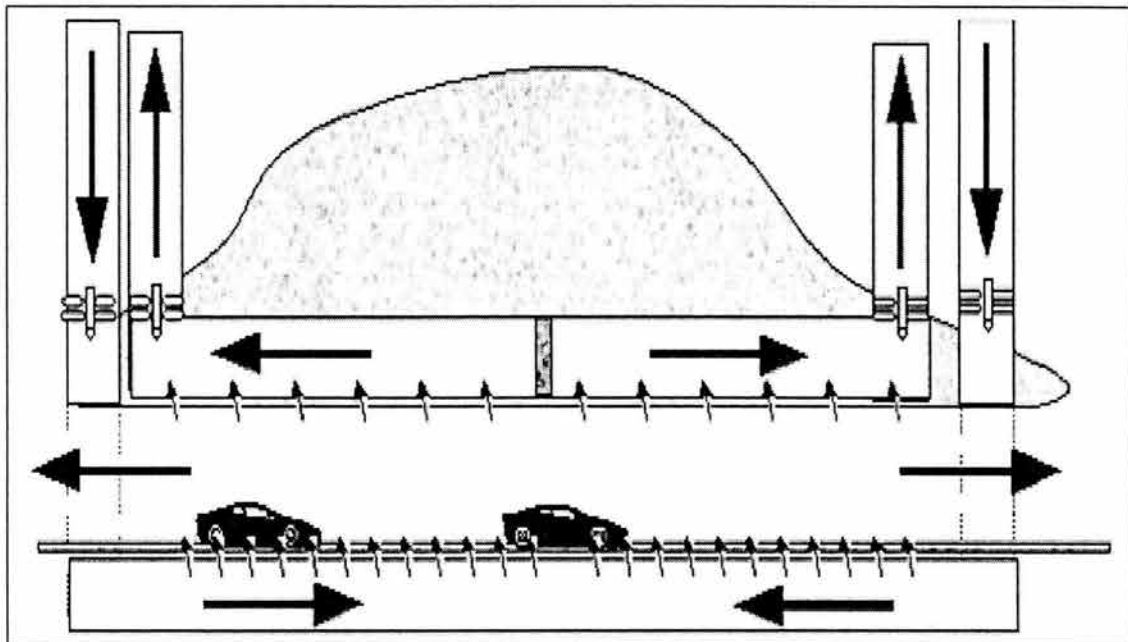


Figura 4.3.3.8. Ventilación pseudo-transversal

Mixtos

A la hora de llevar a la práctica estos principiaron con las limitaciones económicas, de espacio o simplemente las peculiaridades de cada túnel obligan a buscar soluciones intermedias. Una alternativa interesante consiste en diferenciar el funcionamiento del túnel en caso de servicio y en caso de incendio. Por ejemplo, una distribución de tipo longitudinal mediante aceleradores puede completarse con un sistema de extracción con trampillas telecomandadas para los casos de incendio.

4.3.3.4 Ventilación secundaria.

Existen otros conjuntos de ventilación a los que se presta a veces menos atención que a los anteriores aunque son fundamentales en el funcionamiento del túnel especialmente para los casos de incendio.

Refugios y nichos.

Para túneles de gran longitud se considera imprescindible la disposición a lo largo del túnel y a unas distancias no excesivas de locales en los que los usuarios puedan utilizar en caso de incendio. Hay dos tipos distintos de locales que deben cumplir la misión de salvaguardar temporalmente a los usuarios: los nichos y los refugios.

Los nichos, de reducidas dimensiones están pensados para albergar a una o dos personas y en ellos se sitúan instalaciones de seguridad como los postes SOS o los hidrantes para los servicios de emergencia. Su uso es de duración limitada y, aunque se ventilan, no suelen someterse a grandes exigencias de tiempo en relación con su resistencia al fuego.

Los refugios, en cambio, son locales de dimensiones mayores con capacidad para un número más elevado de personas donde guarecerse en caso de incendio hasta la llegada de los equipos de rescate. Por ello deben estar dotados de un sistema de ventilación suficiente para las personas que vayan a permanecer además de generar una ligera sobrepresión para impedir la entrada de humos al local.

Generalmente se exige que estos refugios tengan una salida diferente a la entrada para evitar su conversión en trampas mortales.

Normalmente, estos locales tienen un sistema de ventilación independiente del sistema principal que se alimentan mediante tuberías dispuestas en la calzada a lo largo de todo el túnel. Las estaciones de ventilación que sirven estos conductos poseen ventiladores que en caso de incendio actúan al máximo de su capacidad y en caso de servicio garantizan un aporte de aire "de limpieza".

Locales técnicos.

Otros locales que están habitualmente dispuestos en el interior del túnel son los locales técnicos para los transformadores de los sistemas eléctricos que dan servicio a instalaciones como la de iluminación del túnel, dispositivos de señalización, detectores de CO y humos, etc. El calor generado por los transformadores se disipa mediante sistemas de ventilación independientes que operan de modo automático cuando la temperatura de estos recintos se incrementa.

4. 3. 3. 5 Sistemas de detección.

El sistema de ventilación depende en gran medida del seguimiento de los parámetros que intervienen en su control para poder intervenir de forma correctiva y preventiva para asegurar el cumplimiento de los niveles de calidad del aire exigidos. Para ello se emplea un numeroso tipo de equipos que permiten monitorizar el comportamiento del túnel.

Control de aforo

Desde el punto de vista de la ventilación es fundamental conocer el número, sentido y comportamiento de los vehículos dentro del túnel, tanto por la influencia del efecto émbolo en el sistema de ventilación como por la información que puede aportar para la detección de incidentes dentro del túnel. Uno de los sistemas más empleados para el control de aforos es la colocación de espiras bajo la calzada, de forma que se registra no sólo el número de vehículos que circulan por aquélla sino la velocidad de éstos.

Opacidad

En el túnel se generan gran número de partículas suspendidas en el aire que absorben la luz existente reduciendo la visibilidad. El principal portador de partículas en el túnel es el humo de los motores Diesel, sin embargo, cada vez se está estudiando más el polvo generado por el desgaste de los neumáticos y de la carretera. Otro factor a tener en cuenta en la reducción de visibilidad por la opacidad es la niebla.

Para cuantificar la opacidad se mide el debilitamiento de un haz luminoso sometido a la atmósfera del túnel en función de la distancia atravesada por aquél. Esta determinación se realiza empleando la ley de Beer Lambert según la cual:

$$\phi = \phi_0 \cdot e^{-kL}$$

donde ϕ es el flujo luminoso a la salida, ϕ_0 el flujo luminoso a la entrada, L la longitud atravesada por el flujo y k el llamado coeficiente de extinción.

Otra magnitud usada habitualmente es la densidad óptica relacionada con el coeficiente de extinción según:

$$k = OD \cdot \ln(10) = 2.3 \cdot OD$$

Existen distintos aparatos para la medición de la opacidad del aire en un túnel que pueden diferenciarse según:

- Sistemas de medición directa: Estos aparatos emplean directamente el principio de la debilitación del rayo de luz por la atmósfera del aire. Para medir correctamente es necesario que un haz de luz de unos 100 metros de longitud atraviese el aire lo que dificulta su instalación y mantenimiento.
- Sistemas de medición por difusión: Este tipo de aparatos aprovechan la difusión de luz que provocan las partículas del aire. En estos equipos, se aspira una corriente de aire del tubo del túnel y se lleva al aparato medidor. Este flujo de aire genera en el rayo de luz la llamada luz dispersa de las partículas. La mayor desventaja de este sistema de medición es la inestabilidad de la medida debido al envejecimiento y ensuciamiento de la óptica y las fotocélulas.
- Sistemas de medición por difusión compensados por puente de Wheatstone óptico: Similares a los anteriores, el puente de Wheatstone óptico permite compensar las posibles variaciones de tensión y señal, envejecimiento de los elementos, etc.

CO

El CO es un gas de alta toxicidad, no irritante, incoloro e inodoro cuya presencia no es detectable por los sentidos de los seres humanos. El efecto tóxico se basa en la unión reversible con la hemoglobina de la sangre formando la carboxihemoglobina (COHb) la cual impide el intercambio de oxígeno entre los glóbulos rojos y el aire.

Para el control de la concentración de CO se emplean tres tipos de fenómenos: absorción de la radiación infrarroja, combustión catalítica y oxidación electroquímica. Sin embargo, el más empleado es el tercer sistema que se basa en la tonalidad térmica debida a la oxidación catalítica del CO. Una bomba de membrana introduce aire a través del aparato. El aire filtrado es calentado mediante una resistencia, de tal forma, que si el aire contiene CO se produce una sobrettemperatura al transformarse por oxidación catalítica el CO en CO₂. El exceso de temperatura es convertido en una señal de tensión que se puede registrar.

Velocidad y sentido del aire

Además del valor de la velocidad del aire en el interior del túnel es interesante conocer el comportamiento del aire en las proximidades de las bocas del túnel. Por ese motivo, se suelen instalar estaciones meteorológicas que registran el valor de la velocidad mediante un anemómetro de cazoleta (la medida se obtiene a través de la velocidad de giro respecto de su eje de una serie de cazoletas movidas por el aire) y el sentido mediante una veleta, así como las presiones barométricas.

En el interior del túnel se pueden emplear también anemómetros de cazoleta pero son más apropiados los anemómetros de rueda alada que permiten determinar el sentido de circulación del aire y el valor se da con mayor precisión. Estos aparatos consisten en un marco circunferencial con una pequeña y ligera turbina cuyos álabes giran al paso del aire generando una corriente eléctrica continua de intensidad proporcional a la velocidad del aire.

Existen anemómetros electrónicos basados en la modificación del tiempo de tránsito de una onda de ultrasonidos entre dos puntos que formen un ángulo determinado con el flujo. La onda que circula en el mismo sentido que el flujo tarda menos tiempo en recorrer un mismo camino que la enviada en sentido contrario. La diferencia de tiempos permite determinar la velocidad del aire en el túnel. El costo de este tipo de equipos es superior pero presenta una mayor fiabilidad en el valor medido.

4.3.4 Alumbrado.

En la iluminación de túneles, y en general de cualquier tramo de vía cubierta, se busca proporcionar unas condiciones de seguridad, visibilidad, economía y fluidez adecuadas para el tráfico rodado. En túneles cortos, menos de 100 m, no será necesario iluminar salvo de noche o en circunstancias de poca visibilidad. En los largos, será necesario un estudio individualizado de cada caso. Para ello es necesario analizar los problemas que representan los túneles para los vehículos en condiciones de día o de noche, el mantenimiento necesario y las características de los equipos de alumbrado a instalar.

El alumbrado de un túnel se justifica fundamentalmente por razones de seguridad. El conductor debe verse mínimamente afectado al pasar de un espacio abierto, iluminado (aire libre) a otro oscuro (túnel) y viceversa.

Estos cambios bruscos de luminosidad afectan negativamente a la retina del ojo y deben ser evitados o al menos reducidos a límites tolerables. La transición debe ser gradual, para lo que se fijan habitualmente unas zonas de transición a las entradas y salidas del túnel de diferente graduación lumínica, con objeto de conseguir una mejor adaptación del ojo del conductor.

El proyecto debe fijar los niveles mínimos de iluminación en la parte central del túnel y en las zonas de transición.

El siguiente Tabla 4.3.4.1 recoge la necesidad de alumbrado de un túnel en determinadas condiciones de tráfico (unidireccional o bidireccional), intensidad (alto, medio y bajo), y longitud que se tendrá en cuenta salvo justificación razonada.

Modo	Tráfico	Longitud Metros
Unidireccional	Alto	> 100
	Medio	> 500
	Bajo	No
Bidireccional	Alto	> 50
	Medio	> 200
	Bajo	> 1.000

Tabla 4.3.4.1 Alumbrado de un túnel de acuerdo a las condiciones del tráfico.

4.3.4.1 Iluminación Interior.

El objetivo del alumbrado del túnel es garantizar la seguridad del tráfico existente, permitiendo atravesar el túnel a velocidad apropiada a cualquier hora del día.

Es necesario disponer de una iluminación acorde con la iluminación exterior, para evitar tanto el deslumbramiento del conductor en el caso de que la iluminación en el túnel sea mayor que en el exterior, y el efecto **agujero negro** si la iluminación exterior supera en mucho la iluminación dentro del túnel.

Para conseguir la adaptabilidad de la iluminación interna con la iluminación exterior, se dispone de control de iluminación con fotocélulas, facilitando al usuario la adaptación de la visión al acceder al túnel.

4.3.4.2 Iluminación Exterior.

La iluminación exterior en algunos casos puede estar compuesta por una torre de 30 m. de altura, con una corona móvil, en la que hay instalados 16 proyectores de 1.000 W., que iluminan la entrada y la salida del túnel. También forman parte de la iluminación exterior una serie de farolas que iluminan la entrada del túnel.

4.3.4.3 Requisitos Iluminación Diurna.

Los conductores al acercarse a la entrada de un túnel durante el día deben adaptar rápidamente su visión a la diferencia de las luminosidades entre el exterior y el interior del túnel.

Cuando nos aproximamos a un túnel de día, la primera dificultad que encontramos es el llamado efecto del **agujero negro**. En él, la entrada se nos presenta como una mancha oscura en cuyo interior no podemos distinguir nada. Este problema, que se presenta cuando estamos a una distancia considerable del túnel, se debe a que la luminancia ambiental en el exterior es mucho mayor que la de la entrada. Es el fenómeno de la **inducción**.(figura 4.3.4.1)

La **inducción** se produce cuando no es posible distinguir un objeto de otros a su alrededor por mucho tiempo que se mire. Esto se debe a que su luminancia es muy inferior a la del campo de distribución de luminancias del resto de objetos del campo visual. Dicho de forma sencilla, es un problema de contrastes de luminancias entre un cuerpo y el resto del campo visual.

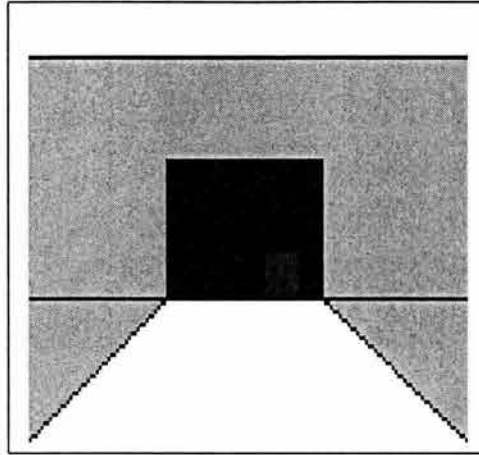


Figura 4.3.4.1 Efecto del agujero negro

A medida que nos acercamos a la entrada, esta va ocupando una mayor porción del campo visual y nuestros ojos se van adaptando progresivamente al nivel de iluminación de su interior. Pero si la transición es muy rápida comparada con la diferencia entre las luminancias exterior e interior, sufriremos una ceguera momentánea con visión borrosa hasta llegar a un nuevo estado de adaptación visual. Es lo mismo que ocurre cuando, en un día soleado, entramos en un portal oscuro y durante unos instantes no vemos con claridad. Es el fenómeno de la **adaptación**.

La **adaptación** es la capacidad del ojo para ajustarse a los cambios en los niveles de iluminación. No es un proceso inmediato, ya que depende del tiempo de reacción del ojo, que es muy rápido al pasar de ambientes oscuros a luminosos pero apreciablemente más lento en caso contrario.

Se trata, por lo tanto, de un problema de diferencia de niveles de luminancia entre el exterior (3000-8000 cd/m^2) y el interior del túnel (5-10 cd/m^2). Podríamos pensar que manteniendo un valor de luminancia próximo al exterior en toda su longitud habríamos resuelto el problema, pero esta solución es antieconómica. Lo que se hace en túneles largos, con densidad de tráfico elevada o cualquier otra circunstancia que dificulte la visión, es reducir progresivamente el nivel de luminancia desde la entrada hasta la zona central. En la salida no hay que preocuparse de esto pues al pasar de niveles bajos a altos esta es muy rápida.

4.3.4.4 Requerimientos de alumbrado por zonas.

Podemos dividir los túneles en varias zonas según los requerimientos luminosos:

- Zona de acceso
- Zona de entrada
 - Zona de umbral.
 - Zona de transición.
- Zona central.
- Zona de salida.

Zona de acceso.

Antes de establecer la iluminación necesaria en la entrada del túnel, debemos determinar el nivel medio de luminancia en la zona de acceso o luminancia externa de adaptación. Este magnitud se calcula a partir de las luminancias de los elementos del campo visual del observador como puedan ser el cielo, los edificios, las montañas, los árboles, la carretera, etc. y su valor oscila entre 3000 y 10000 cd/m^2 . (Figura 4.3.4.2)

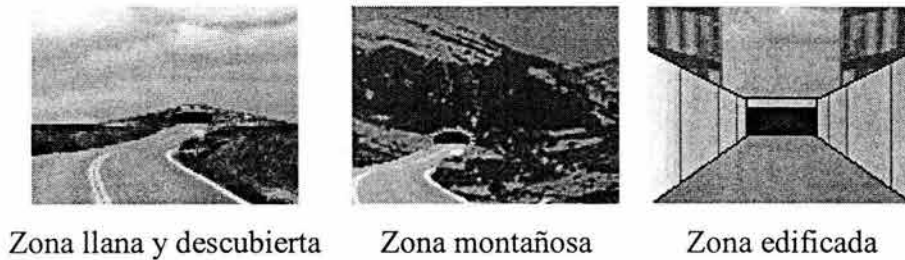


Figura 4.3.4.2. Zonas de acceso

En zonas llanas y descubiertas donde el cielo ocupa la mayor parte del campo visual podemos tomar un valor máximo de 8000 cd/m^2 . Mientras en las zonas montañosas o edificadas donde cobran mayor importancia las luminancias de los edificios, las montañas, la carretera o los árboles se adopta un valor de 10000 cd/m^2 . (Tabla 4.3.4.2)

Región	Luminancia máxima (cd/m^2)
Llana y descubierta	8000
Montañosa o edificada	10000

Tabla 4.3.4.2. Luminancia máxima por región

Sin embargo, estos valores orientativos no excluyen de un cálculo más riguroso de la luminancia de la zona de acceso siguiendo las recomendaciones y normas vigentes.

Zona de umbral.

Para proporcionar al conductor una información visual adecuada en la entrada del túnel, la iluminación debe ser por lo menos un 10% de la luminancia de la zona de acceso en un tramo de longitud aproximadamente igual a la distancia de frenado del vehículo (entre 40 y 80 m para velocidades comprendidas entre 50 y 100 km/h). Como aún así la luminancia necesaria es muy alta y supone un consumo importante de energía, se pueden intentar rebajar aplicando medidas especiales.

La primera de ellas es rebajar el límite de velocidad en el túnel y hacer que los vehículos usen sus propias luces. De esta manera se facilita el proceso de adaptación y se reduce la distancia de frenado y por tanto la longitud de la zona de umbral. Asimismo, conviene emplear materiales no reflectantes oscuros en calzada y fachadas en la zona de acceso para rebajar la luminosidad y otros claros con propiedades reflectantes de la zona de umbral para maximizarla. También es conveniente evitar que la luz directa del Sol actúe como fondo de la entrada del túnel. A tal efecto conviene cuidar la orientación geográfica, maximizar el tamaño de la entrada, plantar árboles y arbustos que den sombra sobre la calzada, usar paralúmenes, etc. En estos últimos casos hay que tener cuidado en regiones frías porque en invierno pueden favorecer la aparición de hielo en la calzada además de otros problemas. Por último, es posible crear una zona iluminada con farolas antes de la entrada para favorecer la orientación visual y atraer la mirada del conductor hacia el túnel.

Zona de transición.

Como al llegar al final de la zona de umbral el nivel de luminancia es todavía demasiado alto, se impone la necesidad de reducirlo hasta los niveles de la zona central. Para evitar los problemas de adaptación, esta disminución se efectúa de forma gradual según un gradiente de reducción o en su defecto una curva escalonada con relaciones de 3 a 1 entre luminancias. Estas curvas, obtenidas empíricamente, dependen de la velocidad de los vehículos y la diferencia entre las luminancias de las zonas umbral e interior. (Figura 4.3.4.3)

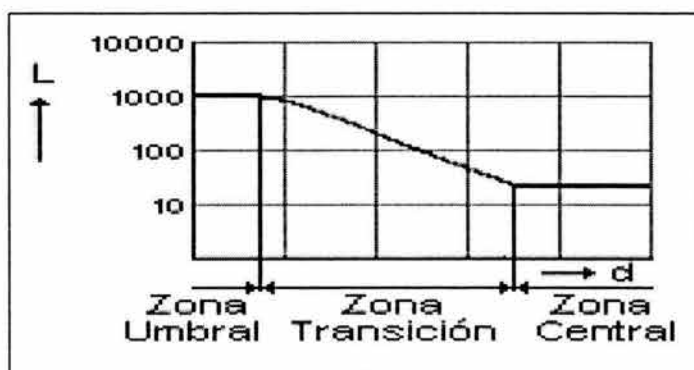


Figura 4.3.4.3 Curva de reducción de la luminancia

Zona central.

En la sección central de los túneles el nivel de luminancia se mantiene constante en valores bajos que rondan entre 5 y 20 cd/m^2 según la velocidad máxima permitida y la densidad de tráfico existente. Es conveniente, además, que las paredes tengan una luminancia por lo menos igual a la de la calzada para mejorar la iluminación en el interior del túnel.

Zona de salida.

En la salida las condiciones de iluminación son menos críticas pues la visión se adapta muy deprisa al pasar de ambientes oscuros a claros. Los vehículos u otros obstáculos se distinguen con facilidad porque sus siluetas se recortan claramente sobre el fondo luminoso que forma la salida. Esto se acentúa, además, si las paredes tienen una reflectancia alta. En estas condiciones, la iluminación sirve más como referencia y basta en la mayoría de los casos con unas 20 cd/m^2 para obtener buenos resultados. (Figura 4.3.4.4)

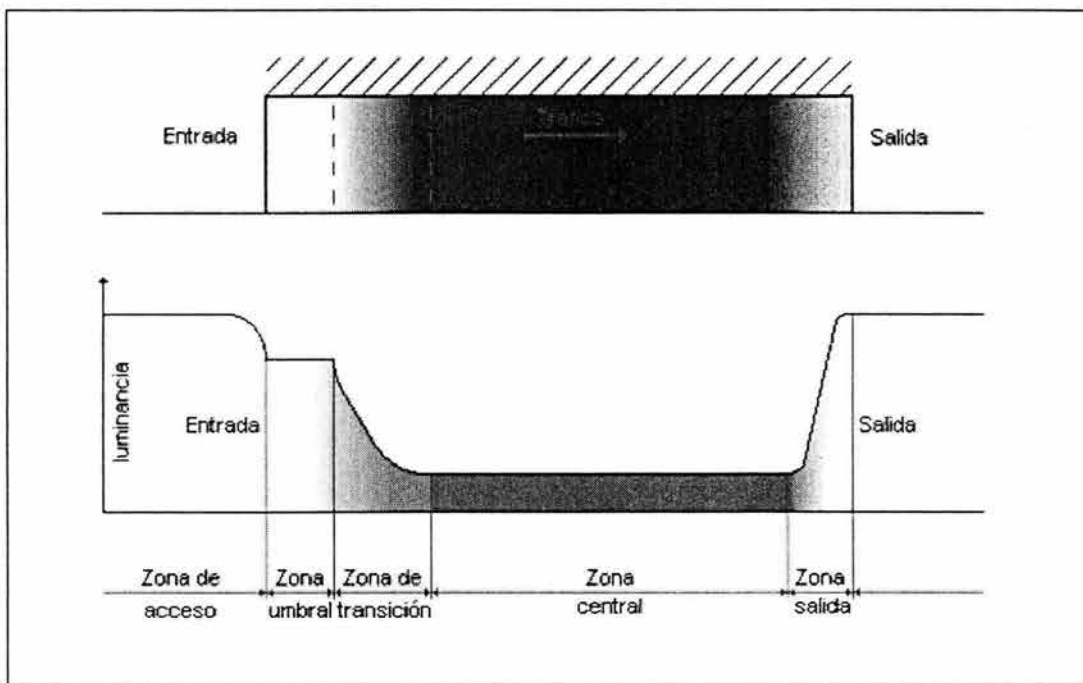


Figura 4.3.4.4 .Niveles de luminancia requeridos en un túnel de tráfico unidireccional

4.3.4.5 Requisitos de Iluminación nocturna, crepusculares y/o días nublados.

Los requerimientos de alumbrados durante las horas nocturnas, crepusculares y en días muy nublados suelen ser diferentes a los requerimientos diurnos.

En este caso la adaptación de los conductores a los cambios bruscos de luminancia, tienen lugar tanto a la salida como a la entrada del túnel.

En ausencia de luz diurna, iluminar un túnel resulta mucho más sencillo. Basta con reducir el nivel de luminancia en el interior del túnel hasta el valor de la iluminación de la carretera donde se encuentra o si esta no está iluminada que la relación entre las luminancias interior y exterior no pase de 3 a 1 para evitar problemas de adaptación. En este último caso se recomienda un valor aproximado entre 2 y 5 cd/m^2 . Hay que tener en cuenta que aunque no se presente el efecto del agujero negro en la entrada sí se puede dar en la salida. Por ello es recomendable iluminar la carretera a partir de la salida durante un mínimo de 200 m para ayudar a la adaptación visual.

4.3.4.6 Equipos de alumbrado.

En la elección de las fuentes de la luz para la iluminación de túneles se ha de tener muy en cuenta los criterios de:

- Eficiencia eléctrica
- Durabilidad de lámparas.
- Calidad de luz.

Cuyo objetivo es conseguir instalaciones de alumbrado que sea:

- Adecuadas a las necesidades.
- Razonables en costos de explotación.
- Ecológicamente sostenibles.

Las **lámparas** utilizadas en los túneles se caracterizan por una elevada eficiencia luminosa y larga vida útil. Por ello se utilizan lámpara fluorescentes o de vapor de sodio a baja presión dispuestas en filas continuas en paredes o techos. En la entrada, donde los requerimientos luminosos son mayores se instalan lámparas de halogenuros metálicos o de vapor de sodio a alta presión.

En el caso de las **luminarias**, estas deben ser robustas, herméticas, resistentes a las agresiones de los gases de escape y los productos de limpieza. Además de ser de fácil instalación, acceso y mantenimiento. Debido a los gases de escape y partículas en suspensión es conveniente una limpieza periódica. Momento que se puede aprovechar para sustituir las lámparas fundidas aunque conviene también establecer un plan de sustitución periódica de todas las lámparas a la vez según el ciclo de vida de las mismas para garantizar un nivel de iluminación óptimo.

La distribución de las luminarias es muy importante; ha de garantizar una distribución uniforme de la luz sobre la calzada, el control del deslumbramiento, el nivel de luminancia, etc. Pero además, los túneles presentan dos dificultades añadidas: el efecto cebra y el efecto del parpadeo o *flicker*. El **efecto cebra** se produce por la aparición sucesiva de zonas claras

y oscuras ante el conductor que puede llegar a sentir una sensación de molestia e incluso mareo debido a una baja uniformidad de las luminancias en el túnel. El **efecto de parpadeo** o *flicker* se produce por cambios periódicos de los niveles de luminancia (unos reflejos, unas lámparas...) en el campo visual según unas frecuencias críticas (entre 2.5 y 15 ciclos/segundo) que provocan incomodidad y mareos y se evita colocando los aparatos en filas continuas o con una separación adecuada.

Como las condiciones de iluminación en el exterior varían con la climatología y con las horas del día es conveniente instalar un **sistema de regulación** automática de la iluminación interior. Esta se hace gradualmente, con variaciones entre los estados inicial y final inferiores a 3 a 1. Para simplificar, se distingue entre tres niveles de iluminación: diurno, nocturno y crepuscular para los días nublados.

Es necesario disponer, además, de un **sistema de alumbrado de emergencia** que garantice unos niveles mínimos de iluminación en caso de apagón. En este sentido hay que garantizar por lo menos el funcionamiento de una de cada tres luminarias.

4.3.4.7 Mantenimiento.

Para mantener en buenas condiciones el sistema de iluminación del túnel y conservar unos niveles óptimos es necesario realizar una serie de operaciones periódicamente como la sustitución de las lámparas o la limpieza de las luminarias, paredes y calzada. Además de contar con un sistema de ventilación eficaz que evacue los humos, gases de escape y partículas en suspensión que dispersan la luz. Así mismo, para maximizar la iluminación en el interior del túnel conviene que el techo, las paredes y la calzada sean de materiales con alta reflectancia pero sin brillos, fáciles de limpiar y resistentes a las agresiones.

4. 3. 5 Salidas de emergencia. Refugios.

Las salidas de emergencia o de evacuación, son de vital importancia para los usuarios, pues constituyen la vía de escape más segura. No existen en todos los túneles. Deben de estar correctamente señalizadas y tener puertas de paso para las personas. En algunos casos se diseñan para que también pasen los vehículos. En los túneles de dos tubos paralelos, comunican un túnel con el otro. En los túneles de un solo tubo, pueden que den salida a una galería de servicio paralela al túnel o que se suban verticalmente a la superficie del terreno.

Un túnel carretero a partir de los 500 metros debe disponer de salidas de emergencia cada 200 metros y sus puertas estar dotadas con barras antipático, con mecanismos de cierre de la puerta automático, para utilizar en caso de accidente grave, incendio o vertido de materias peligrosas.

En túneles de montaña esta salida será la propia galería de servicios que en muchas ocasiones ha sido necesario construir con el túnel por razones de reconocimiento del terreno, constructivas y/o de ayuda a la explotación.

En túneles urbanos con baja cobertura, se estudiará la conveniencia de habilitar pozos de servicio, distanciados convenientemente y con salida directa a la vía pública.

Una alternativa a la galería de servicios podrá ser la habilitación de refugios adosados a los hastiales del túnel, con suficiente capacidad y dotados de los medios de supervivencia necesarios (agua, aire, luz, telecomunicación).

En el diseño de las salidas de emergencia habrá que tener en cuenta muy especialmente los efectos psicológicos que se derivan en la persona por el hecho de haber sufrido un accidente o ser víctima de un incendio en el interior de un túnel. Los esquemas de señalización y comunicación deberán ser muy claros y su aparellaje suficientemente resistente al choque o fuego.

4. 3. 6 Incendio. Detección y extinción.

El túnel deberá estar equipado con los sistemas de detección y extinción de incendios que mejor se adapten a sus características.

El proyecto deberá recoger esta eventualidad y analizarla con todo detalle para incorporar en el diseño de las instalaciones, especialmente en el de la ventilación, los medios necesarios para evitar o al menos reducir al máximo los efectos que pueda producir el incendio.

El Manual de Explotación recogerá de forma pormenorizada las sucesivas actuaciones que será necesario acometer en el caso de incendio y las medidas permanentes de mantenimiento y conservación para que el sistema en su conjunto (ventiladores, detectores de fuego, tuberías, sistemas de comunicación, etc.), esta siempre en condiciones de servicio.

4. 3. 6. 1 Sistemas de detección de incendio.

En caso de incendio, uno de los aspectos más importantes para poder actuar de forma rápida y precisa es disponer de un sistema capaz de localizar la posición del incendio en el interior del túnel.

Un método muy empleado para la medición lineal de temperatura es un cable sensor detector colocado a lo largo de todo el techo del túnel y que compara la temperatura en cada punto del túnel con la temperatura tipo en su interior. Otro método, más sofisticado consiste en un cable de fibra óptica a través del cual circula un haz láser y permite medir la vibración producida por la temperatura a lo largo del cable. Los cambios de temperatura son recibidos por un detector que permite localizar el punto del incendio y su evolución a lo largo del tiempo.

4.3.7 Sistema de monitoreo y control.

Aspectos generales.

Este sistema tiene como fin el control y motorización de los distintos elementos situados en el túnel: Alumbrado, suministro de energía, contaminantes, ventilación, incendios, tráfico, portes de auxilio, megafonía, comunicación ambiental, etc. Este permite la detección de incidencias en el túnel (incendios, excesos de CO, tráfico denso, etc.) y hace posible la actuación automática o manual sobre los distintos elementos de control.

La utilización de elementos de seguridad en túneles es fundamental, dado el carácter de gravedad que puede conllevar cualquier tipo de incidentes en un túnel por el hecho de tratarse de un entorno cerrado y sin comunicación y temporal con el exterior.

La detección de incidentes como un incendio, un colapso en el tráfico o un exceso de gases tóxicos son aspectos imprescindibles ya que pueden afectar gravemente la seguridad de las personas, además de asegurar la seguridad de la perspectiva visual de los conductores a la entrada del túnel y durante la travesía. Otra ventaja de este sistema es la de conocer el estado ambiental del interior del túnel y mantener los niveles de polución dentro las de normativas.

El control de un túnel no puede ser concebido, como en los sistemas antiguos, como un conjunto de sistemas independientes, algunos incluso, de fabricantes distintos, a partir de los cuales no se puede realizar un control coordinado de todas las instalaciones, por lo tanto se ha concebido como un producto para el control integral de túneles, en el que cada uno de los elementos que lo componen tiene como misión ser un componente fundamental en la seguridad activa del túnel.

Este sistema integra todo un conjunto de funciones destinadas a realizar el control de túneles. Entre estas funciones cabe destacar: Comunicación con los equipos de túnel, Control del funcionamiento de los equipos, Control de la ventilación, Captura de datos ambientales, Captura de datos meteorológicos, Control de Energía, Control de la

iluminación, Detección de Incendios, Postes de auxilio, Control de inundación, Circuito Cerrado de Televisión, Control de Incidencias, Históricos de equipos, Históricos de actuación, Estadísticas.

Los equipos mas importantes que pueden formar parte del control del túnel son los siguientes :

Regulador de tráfico CD, Regulador de tráfico RD, Regulador de tráfico RC, Regulador de alumbrado RA, Estación de Toma de Datos de Tráfico, Central de Comunicaciones, Estación Remota, Central Ventilación, Poste SOS, Señal Mensaje Variable. La misión fundamental del sistema es garantizar la seguridad a todos los usuarios de los túneles.

La detección de una incidencia se realiza a través de los subsistemas de toma de datos de que dispone el sistema como: los ambientales (nivel de CO, visibilidad, etc), meteorológicos (dirección del viento en los distintos puntos), incendios, inundación o bien mediante la actuación sobre postes de auxilio de un usuario o por observación a través del circuito cerrado de televisión por parte de los operadores del sistema.

La actuación se realiza mediante planes que establecen como debe actuar cada uno de los elementos para minimizar la situación de riesgo. Estas actuaciones pueden realizarse sobre los distintos subsistemas como puede ser el de control del tráfico, la ventilación, la iluminación, etc. Cada tipo de incidencia tendrá asociada un plan de actuación establecido según los criterios de los expertos en seguridad. Para conseguir que la actuación ante una incidencia sea al mismo tiempo segura y rápida, antes de que el sistema actúe, se sugiere al operador que valide la actuación propuesta, la cancele o seleccione otro plan. Pero si por alguna causa el operador no fuera capaz de actuar en un tiempo de seguridad, configurable por los responsables de la seguridad, el sistema actúa de forma automática.

4. 3. 8 Control del tráfico y circulación.

Los túneles en los que, por razones de su longitud, intensidad de tráfico o alguna otra razón que lo justifique, fuera necesario conocer en cada instante el tráfico que circula por su interior y en sus accesos, habrán de equiparse adecuadamente para este fin, estudiándose y eligiéndose los diversos tipos de equipamiento que aislados o combinados pueden servir a estos efectos:

- Circuito cerrado de televisión (CCTV) conectado al centro de control.
- Equipos de señalización (semáforos, barreras, paneles alfanuméricos, etc., accionables a control remoto), para regular el tráfico en caso de accidente, y equipamientos fijos para evitar la entrada de vehículos no deseados en razón de su galibo, tipo de carga, etc.
- Sistemas para la ordenación del tráfico después de un accidente o incendio, en coordinación con los planes de emergencia.
- Sistema de audiodifusión
- Dotación de instrumentos para comprobar el monóxido de carbono, la visibilidad, el número de vehículos y la velocidad.
- Casetas de peaje.

Cámaras de televisión.

Con las cámaras de televisión se controla visualmente, desde un centro de control, todo lo que sucede en el interior del túnel. Suelen ir colocadas por encima de los hastiales. Últimamente, se utilizan junto con un sistema automático de detección de incidentes (sistema DAI) mediante comparación de imágenes.

Semáforos.

Suelen ir colocados por encima del gálibo, sobre sus carriles correspondientes. Sirven, lógicamente para regular el tráfico. Si hay fuego, el centro de control los pondrá en rojo para cerrar la entrada al túnel.

Otros aspectos a tener en cuenta a la hora de controlar y regular la circulación dentro del túnel son:

- Aforadores de tráfico, por bucle magnético.
- Nichos o refugios para la protección de peatones o personal de mantenimiento.
- Anchurones dentro del túnel para paradas de vehículos, zona de maniobras...
- Galerías transversales conectando los túneles, en caso de separación de tráfico.

Comunicaciones.

Tanto en régimen normal como en el caso de accidente o incidente grave es importante disponer de un sistema de comunicación entre el usuario del túnel y el centro de control, entre este último y el titular de la obra, y de éste con los servicios exteriores (bomberos, policía de tráfico).

Existen diversos sistemas:

Radiotransmisión y recepción.

Altavoces.

Intercomunicación.

Teléfono (línea directa).

Habrá que incluir en el proyecto los más adecuados para cada caso, incorporando su utilización, manejo y conservación al Manual de Explotación.

4. 3. 9 Señalización y balizamiento.

Aparte de la señalización específica en caso de incidencias, el túnel deberá disponer de una señalización en su interior y en los accesos, que informe adecuadamente y en cada momento al usuario que circula por el túnel, de los aspectos que éste debe conocer para garantizar la máxima seguridad en la circulación.

Asimismo y según los casos, se dispondrá de sistemas de balizamiento, fijos o móviles, para regular la circulación, cuando las condiciones del tráfico lo requiriesen.

Todas estas instalaciones deberán justificarse en el proyecto y su funcionamiento vendrá recogido en el Manual de Explotación.

4. 3. 10 Obra civil y auscultación.

Estructuras de Hormigón

El fuego, en caso de incendio, y el agua de infiltración son los dos agentes que más pueden afectar a la durabilidad de una obra subterránea de hormigón (revestimiento, falsos techos). El proyecto deberá analizar estos aspectos y prever en su caso las medidas protectoras más adecuadas. En fase de explotación se procederá a inspecciones permanentes para actuar preventivamente en caso de necesidad.

Revestimiento de hormigón proyectado

Si el túnel no dispone de un revestimiento rígido, deberán instalarse secciones de auscultación permanente en algunas zonas del túnel. En este caso, el Manual de Explotación definirá el tipo y frecuencia de las medidas a realizar.

Hastiales y pavimentos

Su conservación y mantenimiento se regirá de acuerdo con los criterios generales aplicables a este tipo de obra. El Manual de Explotación recogerá la frecuencia de lavado y limpieza de estas unidades de obra especialmente en aquellos casos en que su grado de luminosidad afecte a la visibilidad dentro del túnel.

4.4 Manual de explotación.

Los túneles que por razón de su importancia (niveles I y II) van a disponer de una serie de instalaciones fijas para su buen funcionamiento y máxima garantía de seguridad, deberán disponer de unos equipos y medios para su correcta explotación. La estructura de estos medios debe ser analizada y valorada en la fase de proyecto y su costo debe integrarse en el presupuesto general de la obra.

Las funciones principales son:

- Control de la circulación.
- Mantenimiento de las instalaciones y de la obra civil.
- Actuación en caso de emergencia.

Parte de estas tareas son permanentes (control de la circulación y mantenimiento de las instalaciones fijas). El resto serán periódicas o puntuales.

Tanto unas como otras se registrarán por el Manual de Explotación, cuyos términos de referencia estarán recogidos en el proyecto y serán los que sirvan de base para el diseño de la estructura organizativa: Personal, locales y medios materiales con su correspondiente valoración a lo largo del tiempo.

El Manual de Explotación contemplará las limitaciones a imponer, en su caso, al tráfico de mercancías peligrosas en general, sin perjuicio de lo establecido en la legislación vigente sobre la materia.

CONCLUSIONES

El túnel es una de las obras más completas de la ingeniería civil. Su proyecto y construcción exige llevar a cabo una serie de etapas encadenadas y precisas, además, una gran flexibilidad en el sistema de ejecución que permitan en todo momento abordar de la forma más eficaz y segura posible la situación planteada.

Una vez establecida la idoneidad de la solución túnel tras contrastarla con otras posibles opciones mediante un análisis multivariable, es preciso pormenorizar los requerimientos funcionales de la obra que habrá de garantizarse mediante un adecuado trazado, dimensionado e instalaciones y servicios de túnel, cuya viabilidad técnica, sistema constructivo y presupuesto constructivo habrá de determinarse en base al establecimiento de un protocolo de prospecciones y reconocimientos in situ.

Pero el túnel no es una obra exenta, aislada, sino que por el contrario constituye el trabajo de ingeniería más en contacto con el terreno; la esencia del túnel es precisamente esa íntima relación con su entorno. En consecuencia, el análisis integral de la obra requiere tener en cuenta su integración en el medio, sea rural o urbano, el análisis de impactos ambientales, minimizando o eliminando aquellos negativos, la preservación de la flora y la fauna, la mínima alteración de las corrientes subterráneas de agua, reconduciéndolas y evitando su contaminación, el aprovechamiento y reciclaje de los materiales extraídos, el adecuado tratamiento de escombreras, de las laderas, etc.

La adecuada armonización del túnel en su entorno es condición esencial para el logro de una actuación de calidad y que signifique un aporte global, no limitarse a dar satisfacción a unos determinados requisitos funcionales sin más. Es por ello que desde las primeras fases de planeamiento han de considerarse y valorarse los requerimientos y características tanto de la solución túnel en sí misma como el entorno y territorio en el que se ha de incorporar.

BIBLIOGRAFIA

1. FARJEAT PÁRAMO, Enrique, *et al.*, *Curso Victor Hardy 93 Túneles y excavaciones subterráneas*. México, AMITOS Asociación Mexicana de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas, A.C., 1993, t.1, pp. 6.5-6.11.
2. GONZÁLES DE VALLEJO Luis I., Ferrer M. *et al.*, *Ingeniería geológica*, Madrid, Pearson Educación, 2002, pp 487-539
3. MEGAN T.M. y BARLTLETT J.V., *Túneles planeación, diseño y construcción*, México, Limusa Noriega, volumen 2, pp. 149-185.
4. OLIVERA BUSTAMANTE Fernando, *Estructuración de vías terrestres*, 2a. ed., México, Continental, 1996, pp.355-370.
5. TAPIA GÓMEZ Ana, *Topografía subterránea*, México, Alfaomega Grupo Editor, 1999, pp.65-96.

PUBLICADOS EN INTERNET

1. Enrique Alarcón., “Técnicas de evacuación de humos y gases en túneles”
Autoprotección corporativa Planes de autoprotección en túneles.
<http://www.proteccioncivil.org/informes/tuneles/proyec04-01.htm>
2. Alberto Pleite Casimiro., “El manual de explotación de túneles de carreteras”
Autoprotección corporativa Planes de autoprotección en túneles.
<http://www.proteccioncivil.org/informes/tuneles/proyec01-06.htm>
3. Dirección Nacional de Vialidad., “Túneles viales en Chile”
<http://www.vialidad.cl/webvial/tuneles/tuneles.htm>

4. “Alumbrado en túneles”<http://edison.upc.es/curs/llum/exterior/tunel.html>
5. J. Soto Pazos “Iluminación de túneles”, Simposium nacional de alumbrado
<http://www.ceisp.com/symposium/pdf/optigast.pdf>
6. Grupo Etra “Área de tráfico interurbano sistemas y productos”
<http://www.etra.es/soluciones/trafico/interurbano/interurb.pdf>
7. Carlos Orta “Incendio en túneles” Bomberos de Navarra Nafarroako Suhiltzaileak
<http://www.bomberosdenavarra.com/manual/tuneles.pdf>