



IMPACTO AMBIENTAL DE PROYECTOS CARRETEROS. EFECTOS POR LA CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE TUNELES

José Luis Hernández Michaca
Julieta Pisanty Levy
Víctor Manuel Sánchez Granados
Marco Antonio Carreón Méndez
Mauro Roldán Ortíz

**Publicación Técnica No. 146
Sanfandila, Qro, 2000**

**SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Impacto ambiental de
proyectos carreteros. Efectos
por la construcción y
operación de túneles**

**Publicación Técnica No. 146
Sanfandila, Qro, 2000**



Este trabajo fue desarrollado por la empresa Geología y Medio Ambiente, S.A. de C.V., bajo contrato con el Instituto Mexicano del Transporte, en el que intervinieron directamente el Ing. José Luis Hernández Michaca, Biol. Julieta Pisanty Levy, Ing. Víctor Manuel Sánchez Granados, Ing. Marco Antonio Carreón Méndez y Biol. Mauro Roldán Ortiz, consultores expertos de las áreas de Geología, Hidráulica, Biología y Química. El trabajo fue supervisado y complementado por investigadores del Area de Medio Ambiente de la Coordinación de Infraestructura del I.M.T., a cargo de los ingenieros Sergio Alberto Damián Hernández, América Martínez Soto y Rodolfo Téllez Gutiérrez.



Como parte de las obras fundamentales de la infraestructura carretera, los túneles son elementos importantes para solucionar trazos en terrenos donde no hay posibilidades de vencer a la pendiente del terreno y en donde otras opciones implican trayectorias demasiado largas para atravesar alguna topoforma eminente. Por ello, se les ha considerado dentro de este trabajo, para analizar el impacto ambiental que su construcción y operación pueden ocasionar sobre los distintos factores del ambiente (agua, suelo, aire, vegetación, fauna, entre otros).

Los impactos fueron identificados a partir de diversas técnicas, por lo que el documento también describe y analiza estas metodologías de identificación, con el objetivo de establecer las que mejor aplican.

Se describen cada uno de los impactos encontrados, identifican los impactos ambientales utilizando la matriz de Leopold modificada y se presentan las medidas de mitigación correspondientes.

Por último, se presentan algunas conclusiones y se proporciona la bibliografía utilizada.



Tunnels are one of important elements in the highways construction in order to eliminate distance traveled in place were is not possible modify the land slope, and other path which imply a long trip. For those elements, the construction and maintenance tunnels were considered to analyze it's environmental impacts on different elements like water, soil, air, vegetation, fauna, etc.

The environmental impacts were identified by several techniques, consequently the paper describe and analyze this methodologies, with the purpose of to establish the betters one for this case.

The environment impacts are founded and identified using the modified Leopold matrix and mitigation measurements are showed.

Finally, this paper provide some conclusions and bibliography.



Como parte de las obras de infraestructura carretera, los túneles son elementos importantes para solucionar trazos en terrenos donde no hay posibilidades de vencer a la pendiente del terreno y en donde otras opciones impliquen trayectorias demasiado largas para atravesar alguna topoforma eminente. Por ello, se les ha considerado dentro de este trabajo para analizar el impacto ambiental que su construcción y operación pueden ocasionar sobre los distintos factores del ambiente (agua, suelo, aire, vegetación, fauna, entre otros). Asimismo, debe tomarse en cuenta que los avances de nuestro país en materia de ingeniería civil, hacen cada vez más posible la construcción de este tipo de obras, por lo que se debe comenzar a sentar las bases para evaluar y dictaminar el impacto ambiental de este tipo de obras.

En el aspecto metodológico se analiza la totalidad de los impactos que la construcción de un túnel ocasiona sobre los factores del medio físico y natural, para lo cual se consideró que la tecnología constructiva que se aplica en la actualidad ha venido incorporando nuevos sistemas y elementos que necesitan controlarse para que esta infraestructura se construya sin provocar cambios significativos en el ambiente. Es por ello que se requirieron algunas etapas de análisis de las evaluaciones de impacto ambiental que se han venido practicando, las cuales en su mayoría hacen referencia a las alteraciones de los procedimientos constructivos tradicionales. Como resultado de ello se obtuvo la caracterización de los tipos de impacto que se ha logrado prever a través de dichos métodos y se evaluó el alcance de estos métodos descriptivos.

Los impactos descritos en el presente estudio fueron identificados a partir de diversas técnicas, por lo que el documento también describe y analiza estas metodologías de identificación, con el objetivo de establecer las que mejor aplican para la identificación de impactos en la construcción, operación y mantenimiento de túneles. Entre las diversas metodologías para la evaluación del impacto ambiental desarrolladas en los últimos años, se distinguen las siguientes cinco que se aplican de acuerdo con la información disponible y las necesidades de cada caso: 1) gráfica, 2) mapas digitales, 3) modelos, 4) matrices y 5) contabilidad social. Como resultado de este análisis se llegó a la conclusión que cualquiera de estas metodologías solamente ayuda a tomar decisiones planteando, jerarquizando y estructurando las opciones disponibles y las consecuencias de cada acción, y que la solución más adecuada social, técnica y económicamente, depende fundamentalmente de la sensibilidad, intuición, criterio, experiencia y preparación de los evaluadores, lo que significa que en la identificación de impactos ambientales se debe concebir un equipo multidisciplinario con integrantes de experiencia y el perfil indicado para la obra que se está evaluando, en este caso túneles.

Resumen Ejecutivo

■ ***Impactos ambientales identificados***

Durante las distintas etapas de construcción de un túnel se generan básicamente impactos de transformación de áreas, es decir, se modificarán aspectos morfológicos del relieve, estructura y conformación de las capas subterráneas, usos y calidad del suelo, distribución de flora y fauna, calidad de vida de los habitantes del área afectada y calidad del aire, principalmente. Asimismo, se modificará el uso, destino y reservas del suelo.

En la construcción los impactos ambientales serán consecuencia de la ocupación de las áreas previamente preparadas, es decir, se implantarán obras de ingeniería civil que determinarán un cambio definitivo en los atributos naturales y socioeconómicos del ambiente previo al proyecto.

Finalmente, durante la etapa de operación, se generarán impactos al medio natural y socioeconómico por la utilización del derecho de vía, propiciándose efectos ambientales a largo plazo, que desembocarán en un deterioro ambiental permanente con secuelas de tipo económico, mismas que tienen que ser contempladas para establecer las medidas de mitigación pertinentes. En este sentido se debe recordar que la vida útil del proyecto es indeterminada, debido a que este funcionará por tiempo indefinido, por lo cual sus efectos más significativos en el ambiente, en caso de no aplicar medidas de mitigación, permanecerán como impactos residuales.

De manera más particular y en relación con los elementos ambientales afectados, destacan los siguientes impactos:

La calidad de aguas puede verse afectada durante las etapas de construcción y de operación. En la primera, los principales parámetros que pueden modificarse son los sólidos disueltos y en suspensión y los nutrientes (debido a los movimientos de tierra) así como las grasas e hidrocarburos (por vertidos accidentales en las zonas de almacenamiento y maquinaria pesada). Durante la etapa de operación los principales contaminantes son los derivados de la deposición de las emisiones atmosféricas, principalmente partículas y plomo, y los de conservación del revestimiento del túnel, que incluyen herbicidas y materiales epóxicos; también en esta fase pueden presentarse vertidos ocasionales en los accidentes y derrames de aceites y grasas. El arrastre de todas estas sustancias por las aguas de escorrentía va a parar a los distintos cursos fluviales pudieron ocasionar cambios en la calidad del agua.

En la mayor parte de los estudios revisados se adjudica a las excavaciones y revestimientos la pérdida de las propiedades permeables del terreno, lo que trae como consecuencia el abatimiento del nivel freático. Otras acciones implican además la interrupción y/o desviación temporal de cauces, ocasionados por el movimiento de materiales y por el emplazamiento de maquinaria y equipo.

El movimiento de materiales y la utilización de sustancias tales como asfalto y pintura, ocasiona eventualmente la contaminación de cuerpos de agua.

Medidas de mitigación

De las medidas de mitigación recomendadas en el presente estudio destacan las siguientes:

- Prever la modificación integral del uso del suelo en el centro de población afectado, para compensar las alteraciones que puedan sufrir la planificación de equipamiento, infraestructura y estructura urbana. Los cambios de uso del suelo por razón del derecho de vía deben desarrollarse con las gestiones sociales necesarias para indemnizar a los propietarios y para prever la manera en que no resulte afectada ninguna actividad productiva local.
- Reforestar las colindancias del trazo con el mismo material removido.
- Recolectar material vegetal reproductivo (semillas, esquejes, etc.) para donarlo a los viveros locales.
- El conjunto de impactos ocasionados por el establecimiento y operación de campamentos de trabajadores, puede mitigarse equipándolos con los medios sanitarios requeridos para controlar la contaminación por aguas residuales, residuos sólidos y mediante su ubicación los lugares donde no interfieran con la vida comunal ni con las actividades productivas locales.
- Con respecto a los materiales que se extraen producto de la excavación del túnel, conviene que estos sean analizados en cuanto a sus propiedades físicas y, de acuerdo a los resultados, se envíen a canteras en donde se les aproveche para construcción de otras obras.
- Se deberán observar todas y cada una de las regulaciones sobre el uso de explosivos emitidas por la Secretaría de la Defensa Nacional, de esta manera se podrán tomar las precauciones necesarias para evitar accidentes que afecten a los posibles habitantes locales. Asimismo es importante que los habitantes tengan conocimiento previo de las actividades a realizar con explosivos y las medidas de seguridad con que se cuenta para este tipo de actividades.

Resumen Ejecutivo

- Establecer áreas de espera para los camiones que cargan el producto de la excavación de manera que no interfieran con el tránsito vehicular. Se deberá implementar un sistema de avisos en los casos que se obstaculice el tránsito. Y deberá exigirse a todos los fleteros que instalen lonas sobre las cajas de los vehículos para evitar partículas suspendidas al momento del transporte de material.
- Durante la etapa de preparación del sitio, será necesario que se lleven a cabo recorridos para detectar especies vegetales valiosas que ameriten trasplantarse a otros sitios, así como para coleccionar material vegetativo que pueda donarse a viveros locales.
- Durante la etapa de construcción se deberá contar con monitoreos de la calidad del aire laboral dentro del túnel, mediante la operación de sensores de CO, NOx, SO₂ y atmósferas explosivas, con el fin de contar con un sistema de alarma de condiciones adversas en el interior del túnel.
- En la etapa de operación y mantenimiento del túnel, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes deberá implementar y llevar a cabo un plan de emergencia para aplicarlo en caso de ocurrir un accidente dentro del túnel, se deberá considerar incendio, explosión y derrames de sustancias peligrosas.
- Intensificar las labores de mantenimiento después de las temporadas de alto tráfico, para retirar los residuos que se hayan generado.

Conclusiones

Por su ubicación geográfica y sus características fisiográficas, nuestro país es un mosaico de hábitats en los que se presentan diferentes condiciones y tipos de temperatura, precipitación pluvial, suelos que a su vez determinan distintos grados de distribución y abundancia de las especies de flora y fauna. Debido a que cualquiera de las partes de este conjunto de interacciones puede verse afectada por la construcción de un túnel, la evaluación del impacto ambiental es un procedimiento necesario para prever y mitigar los impactos que dicha actividad puede ocasionar sobre los elementos que constituyen al ambiente.

Los impactos más evidentes sobre la vegetación, los procesos geomorfológicos, el relieve y las corrientes de agua, pueden ser debidamente previstos desde la etapa de estudios preliminares. Los túneles implican cambios visuales muy evidentes que incluso pueden parecer atractivos en algunos tramos panorámicos, pero las consideraciones técnicas que los preceden son sin duda la garantía de su seguridad y de su integración al ambiente.

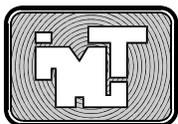
Resumen Ejecutivo

Los impactos de los túneles en las corrientes de agua superficial y subterránea son perfectamente predecibles mediante la aplicación correcta de las metodologías actuales. En la mayoría de los casos, la aplicación de listas de comprobación conduce a una predicción general de interacciones que necesitan de un análisis más detallado sobre todo en los proyectos que atraviesan varios ecosistemas o cuencas.

Existen las soluciones técnicas para prevenir y/o mitigar los impactos derivados de las etapas de preparación del sitio y de la construcción, que como se pudo ver en este trabajo, son los más significativos. Un buen número de estas soluciones son sencillas y de fácil aplicación durante el desarrollo de la actividad misma que ocasiona el impacto. Por ejemplo, en la desviación de las corrientes durante las excavaciones y los trabajos mismos de construcción, se debe tener la certeza de que el cauce desviado no provoque inundaciones que azolven otros escurrimientos.

Por otra parte, conviene insistir en un mayor detalle durante el análisis del costo/beneficio de los proyectos, ya que en la mayoría de las veces no está precedido de una ponderación suficientemente soportada de los factores ambientales que se están evaluando. Uno de los principales problemas de los métodos para evaluar, es que no se sabe si los valores recomendados para cada uno de ellos se obtuvieron a partir de un consenso de los equipos interdisciplinarios, ni como fueron resueltas las controversias sobre los valores relativos de estos factores, con la circunstancia de que la parte más importante en éstos métodos es la deducción del índice agregado.

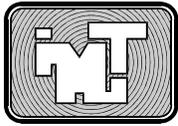




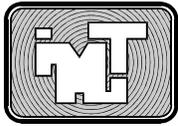
IMPACTO AMBIENTAL DE PROYECTOS CARRETEROS. EFECTOS POR LA CONSTRUCCION Y OPERACION DE TUNELES

INDICE

	RESUMEN	V
	ABSTRACT	VII
	RESUMEN EJECUTIVO	IX
1	INTRODUCCION	3
2	METODOLOGIA	5
3	CONSIDERACIONES GEOLOGICAS	8
	3.1 Conceptos Generales de Suelos y Rocas	8
	3.2 Consideraciones Geológicas de la Localización Diseño y Construcción	15
	3.3 Geotécnia Aplicada a la Construcción de Túneles	20
4	DESCRIPCION DE LAS OBRAS QUE CONFORMAN UN TUNEL	23
	4.1 Tipos de Túneles y sus Características	23
	4.2 Criterios de Proyecto Geométrico	25
	4.2.1 Sección transversal	26
	4.2.2 Alineamiento horizontal	27
	4.2.3 Alineamiento vertical	28
	4.2.4 Criterios de ventilación	28
	4.3 Localización y Preparación del Sitio	29
	4.4 Construcción	30
	4.4.1 Método inglés o método de ataque a plena sección	37
	4.4.2 Método belga o método de la galería de clave	37
	4.4.3 Método austríaco o método de las dos galerías	39
	4.4.4 Método alemán o método de las tres galerías	40
	4.4.5 Revestimiento del túnel	43
	4.4.6 Rezaga y transporte de materiales de excavación	46
	4.4.7 Obras complementarias	47



5	TECNICAS DE IDENTIFICACION DE IMPACTOS	50
	5.1 Método Gráfico	53
	5.2 Método de Mapas Digitales	54
	5.3 Método de Modelos de Uso de Terreno	55
	5.4 Método de Matrices	55
6	IDENTIFICACION DE IMPACTOS Y MEDIDAS DE MITIGACION	57
	6.1 Etapa de Preparación del Sitio	58
	6.2 Etapa de Construcción	61
	6.3 Etapa de Operación y Mantenimiento	70
7	CONCLUSIONES	74
	BIBLIOGRAFIA	78



1 INTRODUCCION

Como parte de las obras de infraestructura carretera, los túneles son elementos importantes para solucionar trazos en terrenos donde no hay posibilidades de vencer a la pendiente del terreno y en donde otras opciones impliquen trayectorias demasiado largas para atravesar alguna topografía eminente. Además, son una de las formas más evidentes de transformación del medio físico debido a la construcción de vías terrestres.

Por ello se les ha considerado dentro de este trabajo para analizar el impacto ambiental que su construcción y operación pueden ocasionar sobre los distintos factores del ambiente. Además debe tomarse en cuenta que los avances de nuestro país en materia de ingeniería civil, hacen cada vez más posible la construcción de este tipo de obras. Es decir, que también deben comenzar a sentarse las bases para evaluar y dictaminar el impacto ambiental de este tipo de obras.

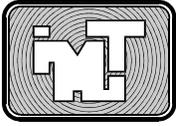
El objetivo y los alcances que se logran para el presente documento se describen a continuación.

Objetivo

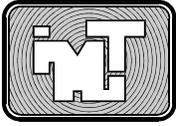
Analizar los efectos al medio ambiente por la construcción y operación de los túneles carreteros y proponer las medidas de mitigación para aquellos que sean de tipo adverso.

Alcances

- Analizar y describir los diferentes métodos de construcción de túneles carreteros.



- Describir todas las actividades que se realizan durante la construcción de túneles carreteros.
- Identificar los posibles impactos ambientales que se pueden presentar en los diferentes factores ambientales (hidrología superficial, subterránea, aire, flora, fauna, suelo, geomorfología y aspectos socioeconómicos) por la realización de todas las actividades que se lleven durante los estudios previos, la preparación del terreno, la construcción y la operación y mantenimiento de los túneles.
- Proponer las medidas preventivas de mitigación o compensación que eviten o minimicen los impactos ambientales identificados.



2 METODOLOGIA

El presente estudio analiza la totalidad de los impactos que la construcción de un túnel ocasiona sobre los factores del medio físico y natural, para lo cual se consideró que la tecnología constructiva que se aplica en la actualidad ha venido incorporando nuevos sistemas y elementos que necesitan controlarse para que esta infraestructura se construya sin provocar cambios significativos en el ambiente.

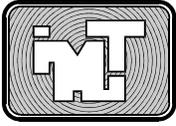
Es por ello que se requirieron algunas etapas de análisis de las evaluaciones de impacto ambiental que se han venido practicando, las cuales en su mayoría hacen referencia a las alteraciones de los procedimientos constructivos tradicionales. Como resultado se obtuvo la caracterización de los tipos de impacto que se han logrado prever y se evaluó el alcance de estos métodos descriptivos.

Para llegar a las conclusiones y recomendaciones del presente estudio, se llevaron a cabo las siguientes etapas:

- **Recopilación bibliográfica**

Se realizó una recopilación bibliográfica de anteproyectos y de proyectos de túneles carreteros. Se consultaron todos los estudios de impacto ambiental de proyectos de túneles o proyectos carreteros que consideran este tipo de obras y que se encuentran disponibles en la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) y en el Instituto Nacional de Ecología (INE).

Para el caso de la metodología de ciertos métodos de construcción en países europeos, los autores consideraron conveniente revisar y analizar bibliografía ad hoc



misma que se lista al final del trabajo y que corresponde a métodos de Inglaterra, Bélgica, Austria y Alemania.

Adicionalmente, se recopiló información de estudios de impacto ambiental para seleccionar la metodología y técnicas más aplicables para identificar y evaluar impactos de proyectos carreteros, particularmente en la construcción de túneles.

■ **Descripción de obras**

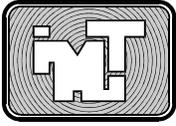
Se analizaron y describieron diferentes métodos de construcción de túneles, detallando cada una de las actividades que se realizan durante el desarrollo de este tipo de proyectos.

■ **Inventario de impactos ambientales de estudios previos**

Con toda la información bibliográfica de estudios anteriores y teórica se realizó un listado de todos los impactos ambientales que se identificaron en ellos durante las diferentes etapas que se llevaron a cabo en el desarrollo de la construcción de los túneles.

■ **Selección de impactos ambientales**

Se realizó una selección de impactos ambientales, aquellos que carecieron de fundamento científico o que fueron identificados erróneamente, no se consideraron en el presente estudio. Se evaluó la metodología empleada en los estudios que se detectaron y se verificó si era aplicable para proyectos carreteros y para las características predominantes en la región, como son: condiciones meteorológicas, tipo de corrientes, pendientes, procesos geomórficos y profundidad del manto freático.



- **Identificación de impactos ambientales no considerados en estudios anteriores**

El equipo multidisciplinario constituido para el presente estudio, aplicó una serie de técnicas diferentes a las utilizadas en los estudios recopilados, con lo que se identificaron varios impactos ambientales que no fueron considerados hasta el momento.

También se identificaron, a partir de la información bibliográfica teórica y de la experiencia, impactos ambientales que se pueden presentar en otras condiciones (climatológicas, geográficas, topográficas, etc.) diferentes a las presentes en el desarrollo de los proyectos analizados.

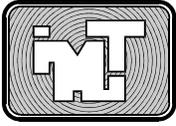
Con lo anterior se elaboró un listado de impactos ambientales definitivo que se presenta por la construcción de túneles.

- **Evaluación de impactos ambientales**

Se revisó la evaluación de los impactos ambientales realizados en los estudios recopilados, considerando las metodologías empleadas para dimensionarlos y aplicando nuevas en algunos casos.

- **Proposición de medidas de mitigación**

Una vez identificados y evaluados los impactos ambientales se propusieron las medidas que eviten, minimicen o compensen dichas afectaciones, tomando en consideración la dimensión del impacto, su temporalidad, su intensidad, así como la diferencia que presenta la alteración en las diferentes regiones geográficas del país.



3 CONSIDERACIONES GEOLOGICAS

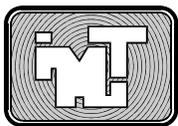
3.1 Conceptos Generales de Suelos y Rocas

Para la comprensión de los procesos naturales que intervienen en la construcción de obras subterráneas como lo son los túneles, es importante conocer las características y tipos de materiales que constituyen el ambiente físico del suelo y subsuelo. Antes de la descripción de estos materiales, es necesario mencionar que en dicho ambiente también se desarrollan formas de vida ligadas a las condiciones presentes. Las consecuencias sobre los animales y plantas que se desarrollan en el subsuelo, por tal motivo, dependerán de la forma en que se afecte al suelo y subsuelo durante la construcción del túnel.

En ingeniería se define al suelo como cualquier material no consolidado compuesto de distintas partículas sólidas con gases o líquidos incluidos. El suelo contiene una amplia variedad de materiales tales como la grava, la arena y las mezclas arcillosas depositadas por glaciares, las arenas aluviales y los limos y arcillas de los depósitos aluviales de los ríos, las arcillas marinas blandas y las arenas de las playas de costa.

Por su parte, la roca se define como material endurecido que para excavarlo se necesita usar taladros, cuñas, explosivos y otros procedimientos de fuerza bruta. El grado mínimo de dureza que caracteriza a una roca se ha fijado como la resistencia a compresión de 14 kg/cm^2 . La línea divisoria entre el suelo y la roca no está definida en todos los casos; hay una serie de materiales, desde el suelo más suelto hasta la roca más dura y cualquier división entre las dos categorías es arbitraria.

La definición de roca, desde el punto de vista ingenieril se complica debido a su estructura y sus defectos. Una roca que es dura pero que está fracturada, puede ser



más fácil de excavar que una blanda pero de un material más coherente. Aunque la roca fracturada sea más fácil de excavar puede que sea necesario entibarla, cuando la excavación es profunda, mientras que la roca blanda puede sostenerse sin soporte alguno. La resistencia de una roca tiene más importancia en ingeniería que su textura o clasificación geológica.

En la tabla 3.1 se presenta una norma para describir el endurecimiento en términos de la resistencia a compresión en muestras no confinadas.

Tabla 3.1 Clasificación de Rocas de Acuerdo a su Resistencia

Categoría	Grado de resistencia	Naturaleza del suelo o roca	Peso volumétrico Kg/m ³	Resistencia a la compresión	Factor de Resistencia
I	Muy alta	Cuarcita densa, basalto y rocas sanas de muy alta resistencia.	2 800 3 000	2 000	20
II	Muy alta	Granito, rocas ígneas, calizas y algunas areniscas de alta resistencia.	2 600 2 700	1 500	15
III	Alta	Granitos y rocas ígneas, areniscas resistentes y calizas, conglomerados bien cementados.	2 500 2 600	1 000	10
IIIa	Alta	Calizas, granito poco alterado, areniscas sanas, mármol y piritas.	2 500	800	8
IV	Fuerte Moderada	Areniscas competentes.	2 400	600	6
IVa	Fuerte Moderada	Areniscas estratificadas.	2 300	500	5
V	Media	Lutitas, arenisca y caliza de baja resistencia, conglomeradas, mal cementadas.	2 400 2 800	400	4
Va	Media	Pizarras y esquistos. Mármol denso.	2 400 2 800	300	3

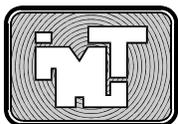
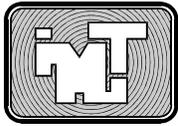


TABLA 3.1 Clasificación de Rocas de Acuerdo a su Resistencia (continuación)

Categoría	Grado de resistencia	Naturaleza del suelo o roca	Peso volumétrico Kg/m ³	Resistencia a la compresión	Factor de Resistencia
VI	Suelto Moderado	Pizarras sueltas y calizas muy suaves, yeso, terrenos de deshielo, mármol, areniscas en bloques, gravas y boleos compactos.	2 200 2 600	200 150	2
Via	Suelto Moderado	Terrenos con gravas, pizarras en bloques y fisurados, gravas y boleos compactos, arcillas duras.	2 200 2 400	--	1.5
VII	Suelto	Arcillas densas, suelos arcillosos, arenas y gravas con poca cementación.	2 000 2 200	--	1.0
VIIa	Suelto	Gravas, loes, depósitos de arena suelta.	1 800 2 000	--	0.8
VIII	Suelto	Sueltos con vegetación, arenas sueltas, húmedas, humus.	1 600 1 800	--	0.6
IX	Suelos granulares	Arenas limpias, gravas finas, rellenos superficiales.	1 400 1 600	--	0.5
X	Suelos Plásticos	Suelos limosos, loes modificadas y suelos en condiciones saturadas.	1 400 1 600	--	0.3

El comportamiento de una roca en trabajos de ingeniería está en gran parte dominado por su estructura mecánica. La estratificación es la segregación de materiales semejantes en láminas más o menos paralelas. Esto sucede en la mayoría de los sedimentos como los depósitos estratificados, y en las rocas metamórficas debido a la presión y escurrimiento. Hay muchos tipos: estratos delgados de materiales similares, estratos duros sobre blandos y viceversa, estratos



blandos y duros alternados, estratos horizontales o inclinados, rectos o curvos y hasta disconformes.

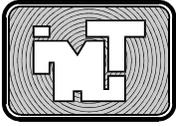
Dentro de las características de los suelos que es necesario explicar como parte de su comportamiento en ingeniería, se encuentra la resistencia al esfuerzo cortante. Esta es una propiedad fundamental de los suelos cohesivos inalterados, cuyo conocimiento es necesario para resolver muchos problemas.

Ordinariamente la resistencia se define en términos de la resistencia a compresión sin confinar, pero se puede estimar por la presión que se necesita para comprimir entre los dedos una muestra inalterada. De esta manera, se tienen los siguientes tipos de suelo:

- *Frágil*: falla bruscamente con pequeña deformación
- *Elástico*: recupera su forma original
- *Friable*: se desmorona fácilmente
- *Susceptible*: pierde resistencia al reamasarse

La reacción del suelo o de la roca a los esfuerzos es el factor más importante para el proyecto de construcción de un túnel. Debido a que en la composición de los suelos y de las rocas están presentes las tres fases, no siempre se comportan de la misma manera que otros materiales que tienen una sola fase. Los sólidos son relativamente incompresibles y soportan los esfuerzos cortantes estáticos (aunque pueden distorsionarse y si el esfuerzo cortante es suficientemente grande fallarán).

El agua es también relativamente incompresible, pero la resistencia al esfuerzo cortante que ofrecerá, será debida solamente a la viscosidad (que depende del tiempo). La fase gaseosa es compresible y tiene poca resistencia viscosa al esfuerzo cortante. Como cada fase reacciona a la carga de manera diferente, debe



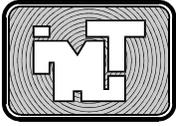
determinarse la distribución del esfuerzo entre las fases para poder establecer el efecto del esfuerzo en la masa.

Túneles en suelos

El análisis de los túneles como estructuras subterráneas, obliga a conocer de qué manera la geotécnica y las ciencias de la construcción resuelven el problema de soportar tanto el empuje horizontal como la presión vertical ejercidos por el suelo o la roca. Como se verá en la sección siguiente, el método de construcción está regido por la capacidad del suelo para sostenerse a sí mismo temporalmente, durante el proceso de la construcción y de las presiones que finalmente se producen en el sistema de soporte. Ambas están relacionadas con la profundidad del túnel y su diámetro, las propiedades elásticas y la resistencia del suelo y con la presión del agua subterránea.

Con la excepción de algunas arcillas resistentes y formaciones parcialmente saturadas, la mayoría de los túneles en tierra requieren soportes tanto durante la construcción como después. Sobre el nivel freático, en suelos relativamente firmes, la excavación se inicia por la parte superior o techo del túnel y continúa hacia abajo en etapas. La excavación se hace lo más grande posible dependiendo de la capacidad del suelo para soportarse a sí mismo temporalmente.

En la etapa inicial el suelo es soportado por planchas de revestimiento que son planchas de acero con pestañas o rebordes que se pueden atornillar unas con otras para formar un revestimiento continuo o con un tablestacado o entablonado de madera o de acero soportado por vigas de acero; se excava entonces la segunda etapa y se soporta en forma similar. Si el suelo es muy blando se emplea un soporte cilíndrico temporal llamado escudo que se introduce en el suelo por medio de gatos.



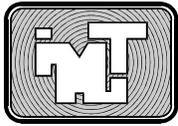
El frente de la excavación es soportado por una mampara equipada con portones que permiten la excavación de una porción limitada del frente cada vez.

El revestimiento permanente se construye dentro del escudo a medida que progresa la excavación; entonces se hace avanzar el escudo usando el túnel ya terminado como reacción. La construcción con tablonos requiere un soporte permanente, generalmente un revestimiento de concreto. El soporte temporal de planchas de revestimiento algunas veces pasa a ser definitivo, pero corrientemente se protege contra la corrosión con una cubierta de concreto. Si las planchas de revestimiento no son adecuadas, se construye un revestimiento permanente de concreto armado.

Debido a la presión en los túneles de arena, es necesario emplear soportes durante la construcción y permanentemente. Los revestimientos temporales, el drenaje, la estabilización del suelo y la presión de aire interior para balancear parcialmente la presión del agua, son medios auxiliares utilizados por los constructores de túneles.

Túneles en rocas

Los túneles en rocas tienen muchas de las características de los túneles en suelo, sin embargo, tienen algunas diferencias significativas. Primero, la formación puede estar sometida a grandes esfuerzos residuales debidos a movimientos tectónicos o a la erosión de sobrecargas de tierra que encubren los esfuerzos debidos al peso de la roca. Segundo, las juntas, planos de estratificación y zonas de esfuerzo cortante son zonas de debilitamiento que destruyen la continuidad de la masa de roca y concentran el esfuerzo cortante en esas direcciones. Tercero, el proceso de excavación, que a menudo requiere el proceso de explosivos, puede alterar la continuidad de la masa, añadiendo esfuerzos dinámicos y abriendo las juntas y fisuras que antes estaban cerradas.

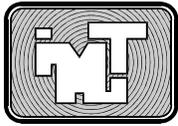


El método a seguir en los trabajos de excavación en túneles depende de la dureza y la calidad de la roca. En materiales más blandos, como la lutitas, los esquistos y las areniscas blandas, el trabajo se puede hacer empleando máquinas especiales para la perforación de túneles, si esas rocas no son lo suficientemente fuertes para sostenerse hasta que pase la máquina.

Las rocas duras se pueden perforar y volar avanzando de 3 a 6 m cada vez. Si la roca es débil o está astillada, es necesario un soporte temporal que consiste en costillajes de acero llamados marcos que se acuñan contra la roca y algunas veces se colocan tablonces entre ellos para evitar el desprendimiento de fragmentos de roca. En rocas en mejor estado se colocan pernos de anclaje. Es costumbre usar revestimientos permanentes de concreto para resistir la presión que se produce o para reducir el rozamiento interior.

En las masas de roca homogénea que no hayan sufrido esfuerzos tectónicos, el estado inicial es esencialmente el de reposo. Los trabajos de perforación del túnel hacen que se incremente el esfuerzo tangencial. Las rocas homogéneas fuertes pueden resistir esfuerzos de compresión sin confinar, extremadamente altos, por lo que el revestimiento o los soportes son innecesarios para sostener a grandes profundidades el equilibrio elástico.

En rocas con altos esfuerzos internos, las concentraciones locales de esfuerzo tangencial en la superficie de la roca causan unos estallidos progresivos en los segmentos de roca en forma de cuñas. El estallido se intensifica en las zonas menos duras o donde la roca ha sido debilitada por voladuras. Algunas rocas débiles, como las lutitas, fluyen por efecto de la carga, lo que causa un escurrimiento de la roca hacia el interior del túnel y la consiguiente reducción del diámetro de la perforación. Unas pocas rocas, como la lutita, se expanden cuando se exponen al aire, lo cual causa aumento de presión, fallas progresivas o escurrimiento.



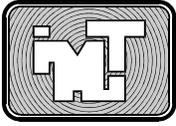
3.2 Consideraciones Geológicas de la Localización, Diseño y Construcción

Antes de la construcción de un túnel es necesario tener en consideración los rasgos geológicos del sitio en evaluación. Esto quiere decir analizar la litología y estratigrafía, las discontinuidades (estratificación, fracturas y fallas), el estado de alteración de las rocas, los problemas relacionados con el agua, la influencia de alteración de las rocas, la influencia de los factores de geodinámica externa y de los esfuerzos internos.

Litología y estratigrafía

Los términos litológicos son útiles en la geotécnica de los túneles, ya que su empleo es una relación entre la textura, fábrica y anisotropía estructural de las rocas de un determinado origen. Por su parte, la estratigrafía permite establecer una relación entre las distintas unidades litológicas o formaciones presentes y así conocer el origen, espesor, distribución y posición cronológica en la secuencia de las diversas unidades.

El conocimiento de la litología y estratigrafía es de suma importancia para saber, entre otras cosas, qué tipos de rocas se encontrarán dentro del túnel, qué problemas pueden causar durante la construcción y con qué confiabilidad se pueden proyectar los datos de superficie. La posición relativa del futuro túnel con respecto a los planos de estratificación, principalmente en terrenos sedimentarios, es importante desde varios puntos de vista. La presión total sobre el revestimiento de un túnel y la forma como se distribuye a lo largo de él, dependen en primer lugar de la estratificación de la roca. Existen dos posiciones extremas de la dirección de túneles con relación a la orientación de la estratificación y entre ellas hay numerosas posiciones intermedias.



- 1 Túneles en dirección: Su eje longitudinal coincide con la dirección de los estratos. Lo cual es aconsejable si la formación atravesada presenta buenas características.
- 2 Túneles atravesando estratos: El túnel es llevado perpendicular u oblicuo a la dirección de las capas, lo cual origina el irse encontrando varios tipos de rocas con diferentes propiedades e inclinaciones, esto puede ocasionar problemas de estabilidad o permeabilidad.

Por otra parte, la inclinación de los estratos con respecto al túnel es también de importancia por lo siguiente:

- Si los estratos son verticales y se construye un túnel perpendicular al rumbo, cada estrato puede actuar como una viga dando mayor estabilidad, con la desventaja de que puede filtrarse mucha agua de la superficie o, por su posición, la efectividad de los explosivos es menor.
- En el caso de que el túnel sea paralelo al rumbo de los estratos verticales, la masa de roca del túnel se sostiene por fricción a lo largo de los planos.
- Si la estratificación es inclinada pueden presentarse problemas de inestabilidad, más aún si se encuentran rocas alteradas, con fallas, fisuradas o intercalaciones de rocas competentes e incompetentes con bajo ángulo de fricción (yesos, sal, lutitas carbonosas, etc.), o bien si existen esfuerzos verticales u horizontales naturales del macizo o por esfuerzos tectónicos.
- En el caso de rocas horizontales la estabilidad del túnel es función del espesor de las capas, el fracturamiento y la resistencia a la tracción de la roca y de su variación con el contenido de agua, ya que una acumulación fuerte de agua en el techo aumenta la carga.

En la figura 3.1 se ejemplifica esquemáticamente la relación estratigrafía-túnel.

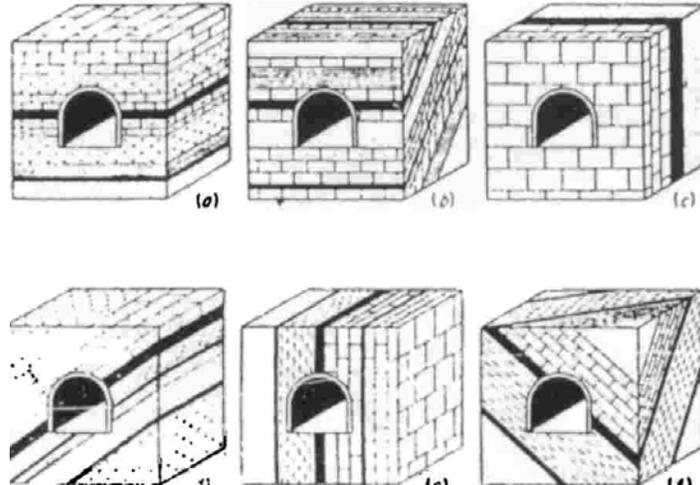
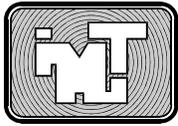


Figura 3.1 Estratigrafías posibles en la construcción de un túnel

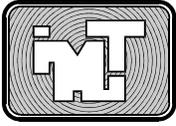
Fracturas o diaclasas

La presencia de fracturas o diaclasas, cualquiera que sea su origen y roca que afecte, puede causar serios problemas de estabilidad, ya que comúnmente se presentan asociadas en uno o varios sistemas con diversas direcciones e inclinaciones, los cuales definen bloques inestables.

En el caso de rocas estratificadas horizontalmente, el fracturamiento es importante, ya que si el espesor de la capa es grande y tiene pocas fracturas el estrato actúa como viga proporcionando estabilidad, sin embargo, las rocas con estratos delgados y fracturas tienden a dejar una zona inestable en el techo.

Fallas

En cuanto a las fallas es importante decir lo siguiente con respecto a sus implicaciones en la construcción de túneles:

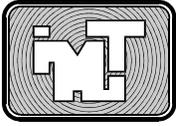


- Las fallas deben detectarse perfectamente; conocer su posición respecto al túnel y dónde están los bloques desplazados para planear el sentido de ataque y la forma de estabilizar las paredes.
- Es importante determinar si la falla es inactiva o activa, pues de ser activa, poco podrá hacerse para proteger la construcción, ya que el túnel estaría sometido, repentinamente, a fuertes esfuerzos cortantes, que inclusive podrían ocasionar corrimientos.
- En ocasiones, las zonas de falla están formadas por materiales alterados o faltos de cohesión con tendencia a fluir en el túnel y que puede confundirse con arena. Si el relleno está formado por materiales expansivos, se producirán presiones sobre los revestimientos. También puede encontrarse milonita o algún material impermeable que podría obstaculizar el paso de agua subterránea de uno a otro lado de la falla, produciendo fuertes cargas hidrostáticas sobre el túnel, o bien, puede suceder lo contrario, poniendo en contacto a rocas permeables que ocasionan fuertes entradas de agua al túnel.

Condiciones hidrogeológicas

La construcción de un túnel puede variar el régimen hidrológico de un lugar, es decir, la posición del agua dentro de las rocas, su dirección, velocidad de movimiento y provocar variaciones en el tiempo. Es lógico pensar que si el túnel está excavado en rocas permeables y se encuentra por debajo del nivel freático, la presencia de agua dentro de él sea muy probable, por lo que es recomendable ubicar el túnel por encima del nivel hidrostático.

En general, el caudal de agua que fluye en un túnel disminuye a medida que se avanza en la construcción de éste. Esto se debe al abatimiento gradual en el origen de la corriente y en la disminución del gradiente. También puede darse el caso de



que con las operaciones constructivas se provoque un fracturamiento de la roca que ocasione un aumento de caudal del agua o se corte una zona acuífera.

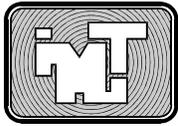
Es importante estimar correctamente el caudal de agua que entrará en el túnel, así como la distribución de los flujos a lo largo de él y sus cambios con el tiempo, ya que estos influyen en el programa de construcción. El agua puede penetrar al túnel de modos diferentes; ya sea goteando por el techo, con intensidad variable; por las paredes, en forma de gotas o corriente continua; bajo una fuerte presión puede irrumpir en forma de chorro por cualquier punto de la periferia, debido a la presencia de alguna discontinuidad permeable.

En el caso de túneles carreteros ubicados en las laderas de montaña y que se construyan sobre roca fracturada o alterada, es muy segura la presencia de agua durante la construcción, aunque no se encuentren necesariamente por debajo del nivel hidrostático.

Geodinámica externa

Dentro de este conjunto de procesos se incluye la actividad de los agentes modificadores del medio natural que se desarrollan externamente a la corteza terrestre (agua, viento, temperatura, nieve). Estudia los fenómenos de erosión y movimientos en masa del terreno como soliflucción, “creep”, deslizamientos y avalanchas. Estos parámetros adquieren una importancia muy especial en el caso de los túneles carreteros cercanos a laderas, ya que es en estas zonas donde los fenómenos de geodinámica externa adquieren mayor importancia.

La presencia del agua superficial puede ocasionar infiltraciones al túnel, o bien si la fuerza de la corriente es grande, al paso del tiempo podría llegar a entrar completamente a la excavación. El intemperismo actúa sobre las rocas disminuyendo



su resistencia mecánica; se produce una zona de descompresión que crea nuevas fracturas, o bien agranda las ya existentes, o las rellena con materiales perjudiciales.

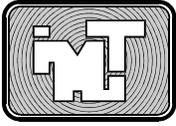
Esfuerzos internos

Las rocas, especialmente a profundidad, están afectadas por el peso de los materiales que le sobreyacen y por los esfuerzos que éstas ocasionan. En algunas zonas, principalmente en áreas orogénicas, el estado de esfuerzos está también influenciado por factores tectónicos, los cuales se presentan en diversas direcciones. Mientras las rocas contienen confinados los esfuerzos, se acumularán y pueden llegar a valores altos. Si se altera la condición confinante como en un túnel, los esfuerzos residuales pueden causar desplazamientos. La cantidad de movimiento depende de la magnitud de los esfuerzos residuales.

Las excavaciones subterráneas destruyen el estado de equilibrio existente de los materiales alrededor del túnel y se establece un nuevo estado de esfuerzos. Es muy importante detectar y cuantificar la magnitud de los esfuerzos para lograr realizar un diseño del revestimiento adecuado y prevenir problemas de inestabilidad.

3.3 Geotécnia Aplicada a la Construcción de Túneles

La apertura de un túnel cambia las condiciones de esfuerzos en el medio original, que puede concebirse en un principio como una masa en equilibrio dentro de un campo gravitacional. Los cambios que tengan lugar pueden ocurrir en forma continua o por etapas, hasta que llegue a alcanzarse una condición final en la masa, ya relativamente invariable, que puede considerarse como de equilibrio definitivo. Esta condición final implica nuevas condiciones hidráulicas en el subsuelo y el cese de las deformaciones y los cambios de esfuerzo producidos por la excavación.

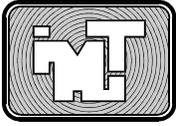


Cuando se excava un túnel se produce una región de esfuerzos cambiantes, en la que generalmente se incrementan las presiones verticales y que se localizan en el frente de la excavación, desplazándose con ella. En el frente, los estados de esfuerzo son netamente tridimensionales, pero tienden a transformarse en bidimensionales a medida en que las zonas en que se producen van quedando más atrás y el avance de la obra continua. Los cambios de estado de esfuerzos que produce la excavación no pueden ocurrir sin deformación en el medio; cuando hay revestimientos, estos se deforman también.

Los procesos de deformación resultantes evolucionan con el tiempo, de manera que esto último representa una nueva variable en el proceso. La excavación produce cambios en las presiones de poro del agua en su vecindad; como el túnel representa siempre una zona a la presión atmosférica, invariablemente el agua tenderá a fluir hacia su interior. De esta manera el juego de presiones en el agua constituye otra variable importante del problema; en suelos de permeabilidad relativamente baja, la adaptación de las presiones del agua a los nuevos estados de esfuerzo de ninguna manera es instantánea.

La aparición de presiones efectivas donde las presiones de poro se vayan disipando son fuente de la generación de nuevos esfuerzos cortantes y de nuevas deformaciones del medio. Todo el cuerpo puede aún complicarse más por la aparición de toda una serie de efectos viscoplásticos.

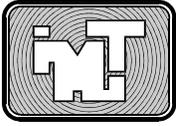
La construcción de un túnel no sólo cambia los estados de esfuerzos en el interior del medio, sino que muchas veces cambia el propio medio; el empleo de explosivos suele reducir la resistencia de rocas y suelos duros en torno a la galería y otros métodos de excavación tales como los escudos, producen remoldeo en los suelos vecinos. Solamente en túneles que puedan excavarse en forma manual y en los que



no se requiera ningún tipo de ademe podrá pensarse que la perturbación a los materiales de la galería sea realmente pequeña. La mayor parte de los túneles en suelos han de ser ademados en algún momento de la construcción. Muchas veces el ademe se requiere para garantizar la estabilidad inmediata; en ocasiones, inclusive antes de iniciar la excavación han de mejorarse los suelos involucrados.

Las cargas que soporte un ademe o un revestimiento dependen de la condición del suelo en el momento en que dicho soporte se coloca; si el suelo hubiese alcanzado una condición de equilibrio final antes de que se coloque el revestimiento, éste no recibirá empujes posteriores, pero si el revestimiento se coloca antes de alcanzar el equilibrio final, representará una nueva condición de frontera al estado de esfuerzos y deformaciones preexistentes, de manera que estos estados evolucionarán de manera diferente a que si el ademe no se hubiera puesto.

La construcción de los túneles produce cambios radicales en las condiciones hidráulicas del subsuelo; éstos pueden ser temporales o definitivos, según sea la permeabilidad de la estructura. Un túnel generalmente produce abatimiento del nivel freático vecino a él y ello hace aumentar los esfuerzos efectivos en la masa del suelo y los pesos de esa masa, de donde resultan asentamientos no reversibles. Si el revestimiento del túnel es impermeable o se toman precauciones para restaurar el contenido de agua y la condición de la misma en el suelo, el nivel freático se recuperará al cabo de un tiempo; en caso contrario el túnel será un dren permanente. La primera actitud conduce a la necesidad de que los revestimientos soporten adicionalmente presiones hidrostáticas, en tanto que la segunda exige tomar todas la precauciones para que el túnel funcione efectivamente como un dren, sin que ello interfiera en su utilización principal.



4 DESCRIPCIÓN DE LAS OBRAS QUE CONFORMAN UN TÚNEL

4.1 Tipos de Túneles y sus Características

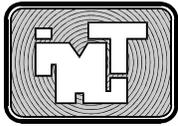
De acuerdo con Vieitez Utesa (Túneles carreteros, 1985) existe una serie de características a tomar en cuenta al evaluar las ventajas y desventajas de la construcción de un túnel:

- Se trata de una obra lineal con un número de accesos limitado.
- Se trata de un espacio más bien reducido en el que transita y trabaja el personal y el equipo, apoyados con recursos (aire, energía, agua, materiales) que se transportan a través del mismo túnel, a veces por grandes distancias, en tuberías, ductos, cables y unidades diversas de acarreo.
- Es un lugar de trabajo encerrado en el que hay que ofrecer un mínimo de condiciones ambientales que garanticen la salud y la seguridad del personal que en él labora.
- No pueden utilizarse partes del túnel para los fines vehiculares propuestos hasta no haber concluido por completo la perforación y buena parte, si no la totalidad del revestimiento definitivo.

Estas características se presentan en mayor o menor grado en los siguientes tipos de túneles:

- ***Túneles de puerto***

Son los que se ubican a muy alta cota en carreteras de montaña en las que con la pendiente gobernadora se han agotado las posibilidades de desarrollo exterior. Tienen la ventaja de ser túneles cortos, pero a costo muy probablemente de un



desarrollo tortuoso y por consiguiente antieconómico de las vías. Son soluciones inadmisibles en carreteras de alta especificación, con bajas pendientes y altos radios de curvatura.

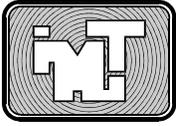
- ***Túneles de laderas***

Tienen por finalidad mejorar el trazo de la carretera al permitir tramos más rectos y de pendiente más suave. Compiten con los cortes, tajos y tramos en balcón cuando éstos resultan de alturas superiores a los 20 m, o cuando la disposición geológica del terreno plantea problemas potenciales de inestabilidad durante las fases de construcción o de operación de la obra exterior que obligan a obras mayores de estabilización o afianzamiento.

- ***Túneles de base***

Se denominan así debido a su localización en la base de la montaña. Pueden resultar más ventajosos que los de puerto o los de ladera a pesar de su mayor longitud, en cualquiera de los siguientes casos:

- Cuando la geología en la base de la montaña es considerablemente mejor que en las laderas o en la cumbre.
- Cuando se acorta considerablemente el trazo y se mejora el perfil de manera que el tiempo y la economía de recorrido mejoran considerablemente la operación de toda la carretera.
- Cuando a pesar de su longitud, introduce economía en la construcción total de la línea, al evitar obras de arte, viaductos, cortes y terraplenes en terreno difícil o accidentado, para dar especificaciones equivalentes de recorrido.



Como en cualquier otro tipo de infraestructura, se requiere una serie de estudios previos para el establecimiento de una carretera (localización, factibilidad económica y criterios de ingeniería de tránsito), para posteriormente realizar los estudios que se requieren para la construcción de un túnel carretero.

- ***Túneles urbanos***

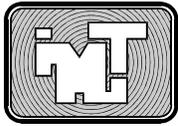
Se construyen en zonas urbanas cuando se pretende desahogar la congestión de tráfico y tiene ventajas cuando además evita la interferencia total o parcial de la propiedad urbana, de las instalaciones municipales y de la actividad citadina.

- ***Túneles subacuáticos***

Son una solución alternativa al puente cuando se hace evidente que en la construcción de éste se tiene que dejar una altura libre al nivel del agua superior a los 30 metros, lo cual obliga a un largo desarrollo de accesos. Razón de más si estos mismos penetran en terrenos blandos de poca capacidad de soporte, o en propiedad urbana de elevado valor o en zona urbana donde se altere su aspecto y su ambiente.

4.2 Criterios de Proyecto Geométrico

En primera instancia el problema básico en los túneles es poder determinar en qué medida las características geométricas recomendadas para las carreteras por superficie deben adoptarse para su dimensionamiento, sin que esto tenga efectos desfavorables con respecto a la seguridad y la fluidez de la circulación.



Dado que el túnel generalmente no es una obra aislada sino que forma parte integral de una carretera, los principios básicos que deben regir su geometría pueden resumirse en lo siguiente:

- La capacidad de un túnel debe compararse aceptablemente con la de la carretera al aire libre.
- Las limitaciones máximas de anchos de carril y pendiente deben ser congruentes entre ambos tramos.

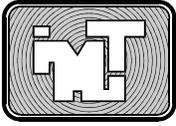
Por lo anteriormente expuesto, la geometría del túnel será función directa de las características del tránsito vehicular que circulará y del nivel de servicio que se pretende ofrecer.

Sin embargo, existen otras limitantes ajenas a estos aspectos que en determinado momento pudieran obligar el dimensionamiento, tales como las características estructurales de la masa rocosa por atravesar o espacios requeridos para alojar ductos de ventilación.

Sin embargo, únicamente se señalarán las limitaciones de cada elemento que constituye la geometría del túnel, con relación al tránsito.

4.2.1 Sección transversal

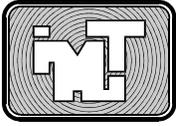
- *Ancho de carril.* Este ancho dentro del túnel deberá como mínimo ser del mismo ancho que en la carretera al aire libre, pero no menor de 3.50 m para carreteras tipo A o B con altos volúmenes vehiculares (autopistas) y 3.25 para los otros tipos de carretera (estatales o urbanas tipo B y C).
- **Número de carriles.** No se deberá reducir en el túnel el número de carriles con que cuenta la carretera al aire libre.



- *Espacio libre vertical.* Deberá quedar un espacio libre de cuando menos 50 cm sobre la altura de los vehículos que normalmente puedan transitar, con relación al techo del túnel, alumbrado, plafón o señal que se instale.
- *Banquetas.* Se define como banqueta la zona limitada por la orilla del pavimento y la pared. Su finalidad es múltiple, como permitir el paso al personal de mantenimiento, la salida de pasajeros que viajan en vehículos accidentados, protección de los dispositivos de equipo suspendido en la pared (alumbrado, señalamiento, teléfonos, extintores, etc.). Este ancho varía como mínimo entre 0.60 m y 1.00 m
- *Bombeo transversal.* Con objeto de facilitar el escurrimiento del agua de filtración o de limpieza sobre la superficie del pavimento, se proporcionará un bombeo transversal hacia las banquetas con una pendiente mínima del 2%.

4.2.2 Alineamiento horizontal

- *Localización.* Para evitar deslumbramientos indeseables, en la localización deberá cuidarse ubicar el túnel de tal manera que la entrada o salida no estén dirigidas en determinado momento y estación hacia el sol a poca altura sobre el horizonte. Y por seguridad, hacer obligatorio mediante señalamiento el encendido de los faros al cruzar un túnel.
- *Trazo general.* De ser posible, el túnel deberá ubicarse totalmente en tangente horizontal, para evitar sobre-anchos provocados por la ampliación de las curvas.
- *Curvatura.* Siempre que sea posible, se observarán cuando menos las mismas normas que en la carretera a cielo abierto para la velocidad de proyecto, principalmente en lo que se refiere a grados máximos y a las distancias de visibilidad de parada.



- *Intersecciones.* Los entronques deberán estar situados lo más lejos posible de la entrada y salida del túnel, para evitar entrecruzamientos peligrosos.

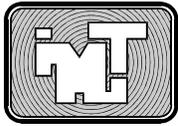
4.2.3 Alineamiento vertical

- *Localización.* De ser posible, el túnel se localizará en una cresta del alineamiento vertical de la carretera, para proporcionar el escurrimiento del agua por gravedad hacia los portales, tanto en la etapa de construcción como en la operación.
- *Pendiente longitudinal.* El valor máximo debe ser congruente con el que permita mantener en el túnel la capacidad y el nivel de servicio de la carretera a cielo abierto. La pendiente mínima será de 0.5% para garantizar el escurrimiento longitudinal del agua. En caso de túneles que requieren ventilación artificial no debe rebasarse el 4% para evitar incrementos importantes en la producción de contaminantes de los vehículos usuarios.
- *Curvas verticales.* Deberán tener una longitud de curva apropiada a la velocidad de proyecto y a la distancia de visibilidad de parada.

4.2.4 Criterios de ventilación

Como ventilación de un túnel carretero debemos entender la serie de medidas que se deben tomar para garantizar que los contaminantes que se emiten a la atmósfera del túnel sean diluidos hasta un nivel tolerable por el cuerpo humano, de acuerdo a los tiempos de exposición a que estén sujetos los usuarios.

Básicamente existen dos formas de ventilación: la natural y la forzada o artificial. La primera se provoca en función exclusivamente del efecto de los vientos dominantes en la zona y de la diferencia de altura y temperatura entre los portales del túnel,



formándose una corriente longitudinal de aire en el interior, motivada por diferencia de presiones que varía en intensidad a lo largo del tiempo y no puede ser controlada. En condiciones favorables puede esperarse una velocidad del aire entre 2 y 5 m/s. La segunda forma puede diferenciarse en tres sistemas: longitudinal, semitransversal y transversal.

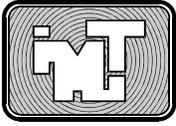
En el sistema longitudinal el aire es movido a lo largo del túnel, el aire fresco penetra por un portal y sale el contaminante por el otro. En el interior se colocan ventiladores o aceleradores que hacen circular la corriente de aire en forma controlada. Su campo de aplicación queda limitado por el valor máximo que puede alcanzar la velocidad del aire dentro del túnel, considerándose que ésta no debe ser mayor a 10 m/s por razones de comodidad y seguridad. El nivel de contaminación crece de un valor mínimo en la entrada hasta un valor máximo a la salida.

En el sistema semitransversal el aire fresco es movido a lo largo del túnel, el aire contaminado es recogido y expulsado por otros ductos semejantes que mueven el aire en sentido opuesto.

4.3 Localización y Preparación del Sitio

Las actividades en esta etapa de la obra consisten básicamente en la limpieza general y despalme del área en donde quedaran alojados los portales.

Según las condiciones en que se encuentre esta área del terreno será necesario el retiro de materiales tales como restos vegetales y cascajo producto de la demolición de banquetas, viviendas o carpeta asfáltica, etc., cuando parte del proyecto se ubica en centros urbanos.



Estos materiales generalmente son llevados a tiraderos cercanos a la zona donde se construye el túnel o utilizados como rellenos en tramos de la misma carretera.

4.4 Construcción

Existen varias técnicas para llevar a cabo la perforación de un túnel, entre ellas tenemos: el empleo de explosivos, el uso de máquinas excavadoras y el empleo de escudos. En la figura 4.1 se puede observar el procedimiento de excavación y la colocación del soporte primario.

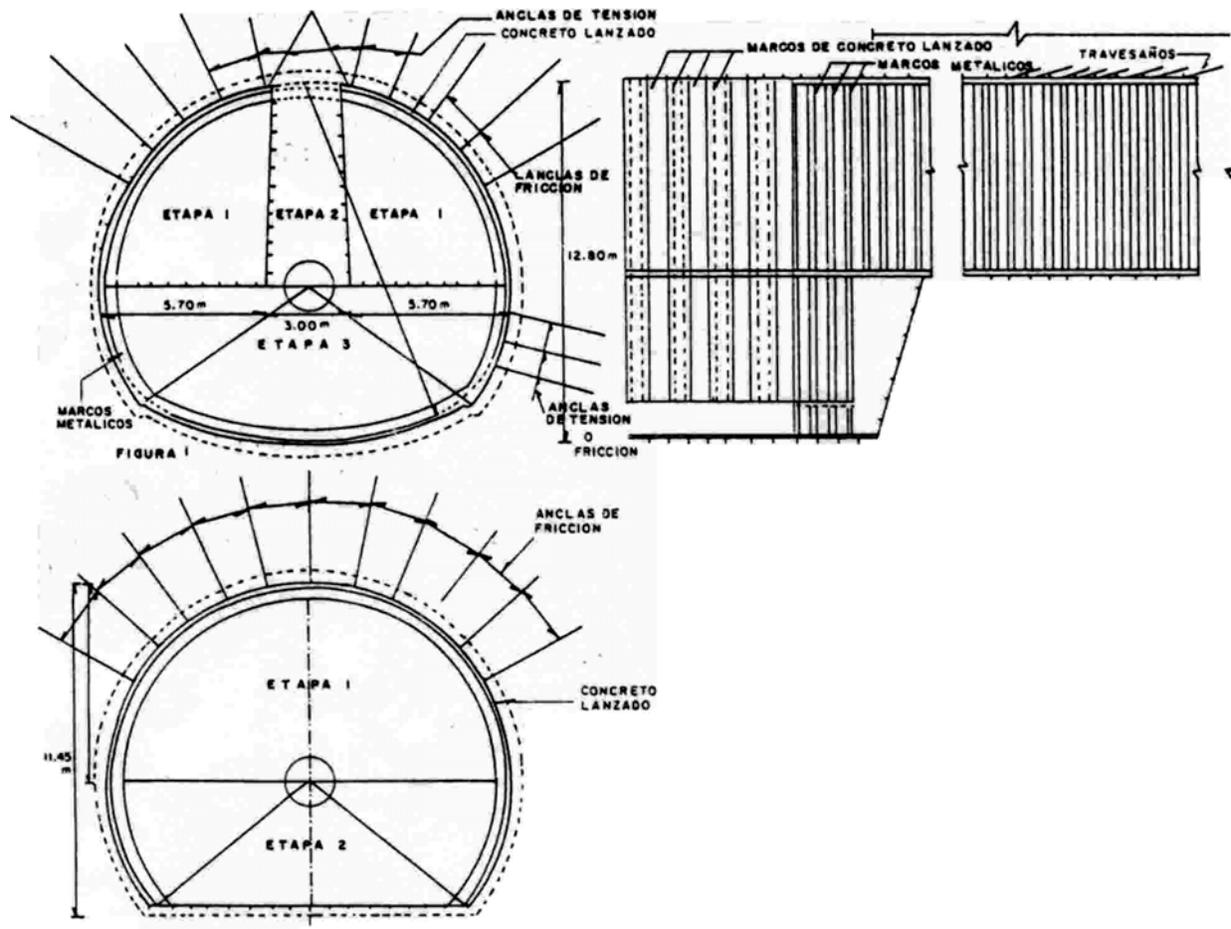
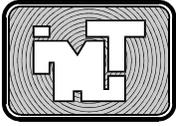


Figura 4.1 Procedimiento de Excavación y Colocación de Soporte Primario



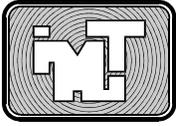
- Explosivos

Existen varios tipos de explosivos que se utilizan para la excavación de túneles, dependiendo de la clase de roca y del ambiente circundante en el que se trabaja, además del perfil y del tamaño de los pedazos de material excavado que se desee obtener. Entre los explosivos más utilizados están:

- Explosivos a base de pólvora: sirven para voladuras de galerías en roca blanda.
- Explosivos gelatinosos: son apropiados para voladuras en rocas semiduras hasta duras (Gelatina tipo C y A).
- Explosivos para rocas muy duras: dinamita F y gelatina explosiva.

Mientras que al aire libre bastan entre 0.3 y 0.6 kg de explosivos para un m³ a excavar, en las obras subterráneas se necesitan de 0.8 a 4 kg, es decir una cantidad considerablemente superior a causa del gran empotramiento al que está sometida la roca por sus costados.

Para trazar un perfil exacto se emplea hoy en día el método de perfeccionamiento, para el cual a lo largo del perfil se perforan los barrenos uno al lado del otro y se hacen volar a modo preliminar con precaución mediante un explosivo diluido con la ayuda de material sintético espumado. Gracias al corte separador que ello provoca en la estructura rocosa, cuando se procede a la voladura principal, la onda explosiva no se propaga a la roca circundante. La zona perturbada por la explosión que normalmente alcanza una profundidad de 1 a 1.50 m, se reduce bastante con este sistema. De gran importancia son los detonadores eléctricos de milisegundos que disminuyen las sacudidas por medio de pequeñas diferencias de tiempo entre explosión y explosión, es decir que ofrecen voladuras más suaves y que al mismo tiempo desmenuzan mejor la roca.



- Máquinas excavadoras (tuneleras)

En principio, se distinguen 2 tipos de máquinas fresadoras de galerías y túneles, que perforan toda la sección de la roca:

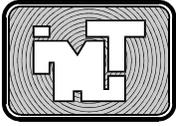
- Máquinas con cinceles rodantes montados en la cabeza
- Máquinas con cabezales porta-cuchillas

Para el sistema de cinceles rodantes, se aprietan con gran fuerza mediante la parte frontal de la máquina una serie de cinceles contra la superficie de la roca, de modo que las zonas de contacto estén sometidas a una presión excesiva que sobrepase la resistencia de la roca. Haciendo rodar los cinceles por encima de la superficie, se obtiene un proceso de cincelaje continuo.

El sistema con cabezas porta-cuchillas trabaja con cinceles fresadores montados alrededor de discos rotatorios. Mientras que para el sistema con cinceles rodantes las principales fuerzas actúan en el sentido del avance, para el sistema con cabezales porta-cuchillas las principales fuerzas se necesitan en el sentido del momento de rotación.

Grandes diámetros no se perforan solamente en excavación total, sino que también en primer término se abren galerías piloto de cerca de 1/3 del diámetro final. A continuación siguen una o dos máquinas ensanchadoras.

Para la construcción de un túnel de carretera de un diámetro de 10.50 m, en promedio se avanzan de 6 a 7 m por día. Estas cifras se calculan en base a 2 turnos de diez horas cada uno, e incluyen los trabajos de desplazamiento y del mantenimiento de la maquinaria.



- Escudos

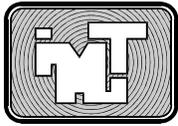
Aunque en la excavación por escudo no participan ningunas partes rotatorias, este procedimiento debe ser considerado como tipo de avance mecanizado. Empleando el avance por escudo se perforan unos 5 m diarios en promedio.

Los escudos son elementos estructurales cilíndricos de acero capaces de soportar las presiones radiales y/o del frente de excavación. Están provistos de un sistema que les permite avanzar mediante el empuje de un conjunto de gatos hidráulicos que se apoyan directamente sobre el revestimiento, que está constituido por anillos de concreto precolado divididos en segmentos, cuyo número puede variar de 3 a 10, siendo la práctica más frecuente un número aproximadamente igual a un segmento por cada diámetro exterior del túnel.

Existen varios tipos de escudos, aunque básicamente se tienen los de frente abierto y los de frente a presión. Los escudos de frente abierto tienen como característica principal el proveer un sistema de soporte mecánico parcial del frente de excavación, dejando la posibilidad de observar el comportamiento del subsuelo en el frente durante las actividades normales del ciclo de excavación. Existen diversas variantes de escudos de frente abierto, ya que son diseñados para proyectos específicos, tomando en cuenta las propiedades del subsuelo en que será construido el túnel y la información relativa a las características del proyecto.

Básicamente los escudos de frente abierto pueden dividirse en tres grandes grupos, atendiendo únicamente a la mecanización lograda:

- Manuales
- Semimecanizados
- Mecanizados



Los escudos manuales son aquellos que no cuentan con herramienta para ataque del frente y están provistos básicamente de los sistemas de empuje, soporte frontal y colocación del revestimiento. Los escudos semimecanizados son prácticamente una ligera variante de los manuales. Cuentan con herramienta para ataque parcial del frente, con objeto de lograr una mayor eficiencia. El mecanismo adecuado para la excavación, generalmente se compone de un brazo retroexcavador.

Los escudos mecanizados tienen la particularidad de contar con herramienta para el ataque total del frente. Dicha herramienta puede tener formas muy variadas y, en la actualidad, las principales son: cabeza cortadora giratoria, brazo retroexcavador articulado, brazo excavador deslizante y brazo rozador (ver figura 4.2).

Los escudos de frente a presión se emplean cuando se excava un túnel en suelos blandos y compresibles o en depósitos de arenas bajo el nivel freático, y es indispensable estabilizar el frente aplicando una presión desde el interior del túnel. La presión interior puede aplicarse mediante aire comprimido en todo el túnel o empleando escudos de frente a presión, en los que ésta se aplica solamente en una pequeña cámara colocada al frente del escudo, la cual puede estar totalmente ocupada por un lodo coloidal (bentonita) o agua, o por una combinación de cualquiera de estos líquidos con aire; en el primer caso se les denomina escudos de presión hidráulica y en el segundo, hidroneumáticos. Como consecuencia de las limitaciones que se han presentado en México, este método ha caído en desuso.

Una mención aparte merece la descripción de la excavación mecanizada de roca mediante máquinas perforadoras de túneles a sección completa (Hard Rock Tunnel Boring Machines, TBM).

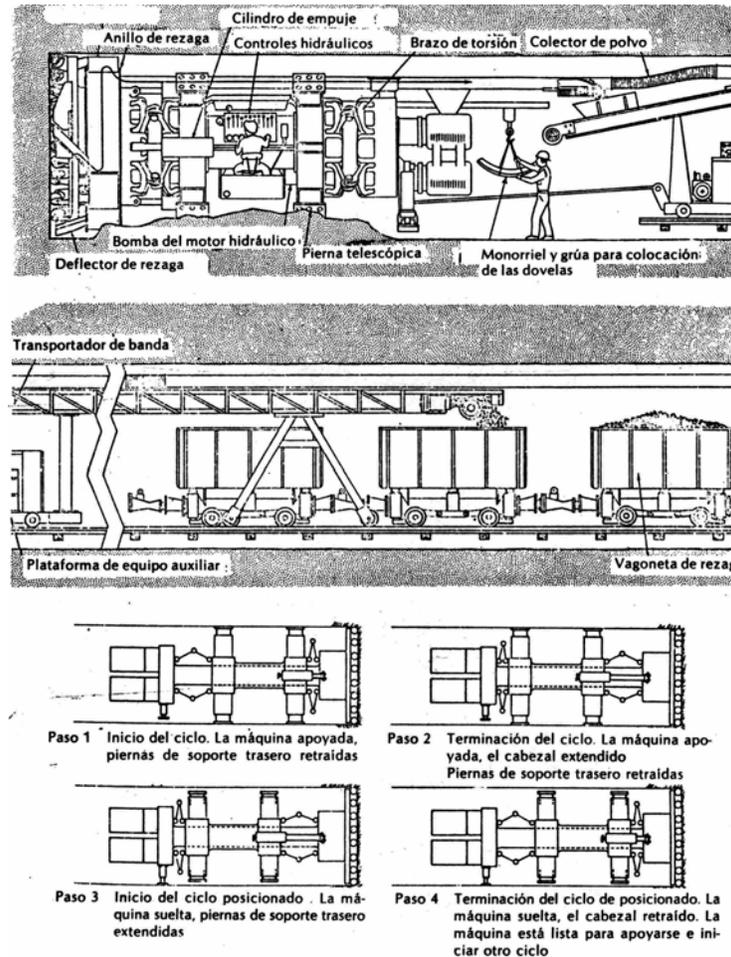
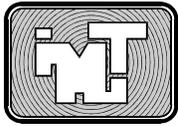
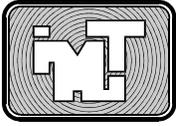


Figura 4.2 Escudo Mecanizado

La TBM típica para roca dura consiste de tres partes principales:

- La cabeza cortadora.
- El soporte de la cabeza cortadora, con las unidades motrices y el rodamiento principal.
- El sistema sujetador y de empuje.

La cabeza cortadora. Es plana y/o en forma de domo, con un radio relativamente pequeño en su extremo exterior para cortar el área del gálbo, cuyo diseño particular

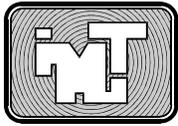


depende del fabricante de la TBM y de las condiciones específicas de la roca del proyecto. La cabeza cortadora es accionada por motores eléctricos con engranajes reductores o mediante motores hidráulicos montados justo detrás de la cabeza cortadora o conectados con la flecha principal al final de la TBM.

La rezaga (escombros de la roca excavada) cae a la plantilla y es levantada por medio de cangilones construidos en la periferia de la cabeza cortadora. La rezaga permanece en los cangilones hasta alcanzar la clave, donde es descargada hacia la banda transportadora de la máquina.

Soporte de la cabeza cortadora. El soporte de la cabeza cortadora y la viga principal son la parte central de una TBM y constituyen la base para las demás partes de la máquina, con la porción delantera proporcionando el espacio para el rodamiento principal. Dependiendo del diseño básico de la máquina, los motores accionadores se instalan en el área delantera o en la trasera del soporte de la cabeza cortadora. Esta cabeza es accionada por un cierto número de motores eléctricos o hidráulicos. La velocidad de accionamiento variable para la cabeza cortadora es factible para ambos sistemas.

Sistema sujetador y de empuje. Existen dos sistemas básicamente diferentes, las máquinas de asimiento doble con dos sistemas sujetadores fijos y las máquinas de asimiento único con sujetadores adicionales frontales deslizantes (zapatas de soporte expandibles). Estas últimas avanzan simultáneamente con el proceso de perforación, el cual es responsable del proceso de estabilización de la cabeza cortadora. Estas zapatas de soporte lateral cubren una gran superficie de la pared del túnel, con el fin de eliminar deformaciones del terreno, causando de esta forma cierta fricción en la pared del túnel que debe ser compensada con el empuje de la máquina (aproximadamente 10% del empuje total).



En cuanto a la perforación de túneles en terrenos excavables se distinguen los siguientes métodos:

4.4.1 Método inglés o método de ataque a plena sección

En este caso la excavación se efectúa por franjas horizontales comenzando por la parte superior. En caso de requerir revestimiento se hace por etapas.

La coronación de la bóveda se reviste sobre puntales radiales (apuntalamiento en abanico). Estos puntales soportan elementos longitudinales tras los que se hacen deslizar las palancas de encofrado. Todos estos puntales se apoyan en vigas transversales.

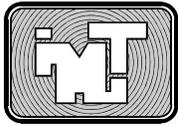
En el escalón inferior se colocan travesaños y se establece apuntalamiento entre éstos y los de la etapa de bóveda, continuando así en cada escalón.

El revestimiento, en caso de requerirse, se ejecuta tras la excavación comenzando por los muros y terminando por la bóveda. La solera, si es necesaria, se construye posteriormente por franjas entre los muros.

4.4.2 Método belga o método de la galería de clave

La característica del método es ejecutar rápidamente la bóveda para proteger la obra por encima, terminando después el revestimiento por los muros.

Se ataca el túnel en galería de avance de pequeña sección en el eje del túnel y en la parte superior. La anchura de esta galería varía de 2.50 a 3 m, su altura de 2 a 4 m y su sección de 5 a 12 m². Se construye esta galería a nivel de los arranques de la bóveda, ensanchando después a la derecha e izquierda para dejar al descubierto la



bóveda. Estos ensanches se realizan con un rendimiento de excavación muy superior al de la galería de avance, pues se trabaja por los costados y no de frente.

Después se construye la bóveda haciéndola descansar sobre el terreno si es resistente o sobre tablonces longitudinales juntos que reparten las presiones si el terreno es menos bueno. También es posible utilizar apoyos de concreto armado.

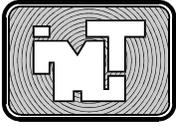
Cuando la bóveda ha endurecido, se quitan los encofrados y los puntales y la bóveda protege a la obra durante las operaciones siguientes.

Entonces se ataca la excavación de la parte inferior del túnel excavando en la cuneta central que se reviste si es necesario.

Después se realiza la excavación en el emplazamiento de los muros del revestimiento partiendo de la cuneta hacia los costados, realizando excavaciones de pequeña longitud (4 a 6 m) que se ejecutan alternativamente de derecha a izquierda.

Después se ejecutan los muros subiendo bajo la bóveda ya construida. Operando de esta forma por elementos de pequeña longitud, no se compromete la seguridad de la bóveda, que descansa siempre sobre la destroza no excavada o sobre los pilares ya contruidos.

Cuando el terreno es poco resistente y exige revestimiento de obra (tercera y cuarta categoría) hay que modificar el método de excavación de la destroza y de construcción de los muros. Después de haber excavado bajo la bóveda y de haberla revestido como antes, se excava en zanja revestida el emplazamiento de los muros por elementos cortos ejecutados alternativamente a derecha e izquierda.



En estas excavaciones se construyen los muros bajo la bóveda primeramente, y después se quitan los puntales y se excava la destroza a plena sección.

También es posible ejecutar los muros antes que la bóveda, para lo que se excava y apuntala ésta construyendo los muros en zanjas revestidas. Después se construye la bóveda y se excava la destroza a plena sección.

4.4.3 Método austríaco o método de las dos galerías

Este método se caracteriza por el empleo de una galería de avance en el eje y base del túnel. En ella se instala una vía de evacuación que se utiliza durante toda la obra (ver figura 4.3).

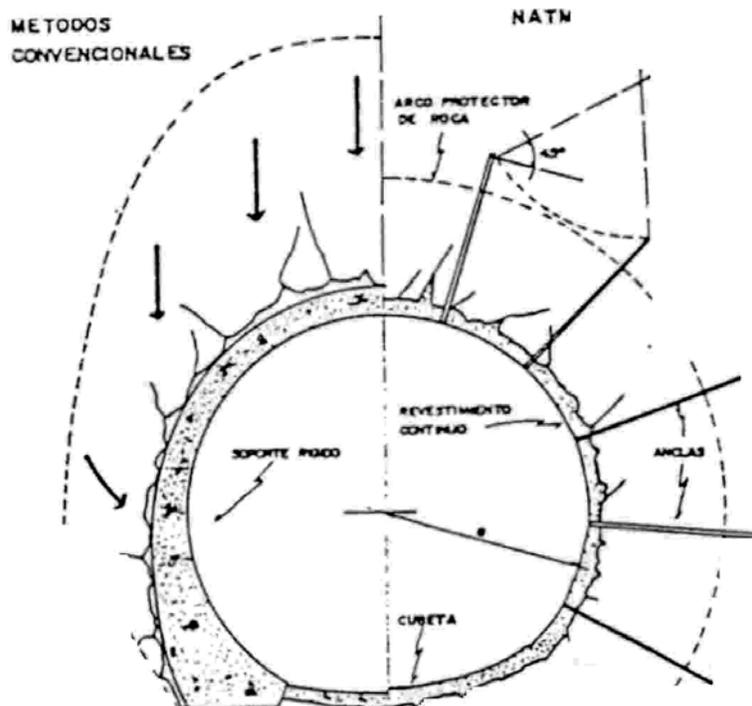
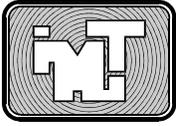


Figura 4.3 Comparación entre un Túnel Convencional y el Método Austríaco



Cuando esta galería ha avanzado cierta longitud, se sube verticalmente con un pozo hacia la clave del túnel atacando después una segunda galería por encima de la primera y trabajando hacia delante y hacia atrás.

Los escombros de la galería superior se envían por el pozo a la galería inferior que sirve para evacuar sin transbordo todos los escombros de los diferentes ataques. Por otro lado, es posible multiplicar los pozos y los ataques en la galería de coronación.

Una vez perforada la galería de clave, se continúa como en el método belga: excavación de la bóveda, construcción de ésta, destroza, excavación de los muros y construcción del revestimiento de éstos.

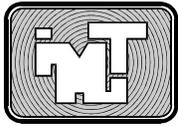
El método de la galería de base se presta a la evacuación de los escombros sin desplazamiento de la vía y facilita la eliminación de las aguas de infiltración.

4.4.4 Método alemán o método de las tres galerías

Este método se caracteriza por la conservación de la destroza hasta la terminación de los muros y de la bóveda. La destroza sirve de apoyo para todos los apuntalamientos y cimbras y evita el empleo de andamios de gran luz.

Se atacan dos galerías de base a derecha e izquierda del túnel. Se ensanchan después y se construyen los muros en terreno malo apuntalados contra la destroza.

Más atrás se ataca una galería de coronación que se ensancha construyendo la bóveda haciéndola descansar sobre muros ya construidos y sobre puntales apoyados en la destroza.



Cuando la bóveda ha endurecido, pueden quitarse todos los puntales excavando la destroza. Después, se ejecuta la solera para completar el revestimiento por franjas de algunos metros de longitud para evitar excavar completamente la destroza antes de terminado el revestimiento.

Clasificación de los terrenos para el empleo de los métodos de perforación

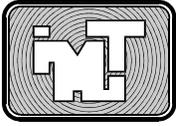
Según la naturaleza del terreno, puede atacarse la perforación con una sección superficial más o menos grande. En ciertos macizos rocosos, puede atacarse a plena sección incluso en el caso de las bóvedas de gran luz (más de 20 m) de las centrales hidroeléctricas subterráneas. En los terrenos sin cohesión (arenas secas, gravas) será necesario, por el contrario, limitarse a una galería elemental de 4 a 5 m² para poder avanzar con una entibación adecuada.

Si se trata de arenas finas saturadas de agua a presión (arenas fluidas) de lodos, arcillas o terrenos en los que se presentan importantes afloraciones de agua, será necesario incluso recurrir a procedimientos especiales como el escudo de aire comprimido o las inyecciones de avance.

Si el terreno contiene anhidrita, en ciertos casos los empujes pueden ser considerables cuando este material está saturado de agua, debiéndose utilizar en tal caso una robusta entibación metálica durante la construcción.

- ***Primera categoría***

Incluye a la roca que exige el empleo de explosivos, la cual puede ir desde la roca dura e intacta que permite el ataque a gran sección sin entibación, a la roca inestable que hace necesaria ésta.



- **Segunda categoría**

Buen terreno extraído sin explosivos, que permite la ejecución de 1 a 3 m de galería de sección adecuada sin entibación. Entran en esta categoría las arcillas duras, tierras compactas, areniscas, arenas y gravas aglomeradas y las pudingas (cuyo estado de consolidación puede exigir el empleo de explosivos).

- **Tercera categoría**

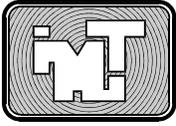
Terreno medio o mediocre, en el que el techo de una galería de sección adecuada puede mantenerse algunos minutos y los laterales y el frente de ataque una hora aproximadamente. Tal es el caso de las arcillas consistentes, la tierra seca, la arena y grava aglomeradas y ciertas rocas dislocadas.

- **Cuarta categoría**

Mal terreno, en el que el techo de las galerías de sección adecuada debe apuntalarse a medida que avanza, resistiendo los laterales algunos minutos. Tal es el caso de las arcillas blandas o que se expanden al aire, las arenas húmedas, gravas o tierras vegetales sin gran cohesión, roca descompuesta o gravas.

- **Quinta categoría**

Terrenos sueltos, como gravas o arenas secas en los que no se puede progresar en sección pequeña si no es al abrigo de blindaje continuo tanto en el frente como en el techo y muros laterales. Cuando se trata de arenas finas saturadas de agua, de arcillas blandas o de venidas de agua importantes, se imponen métodos especiales (escudo, inyecciones).



4.4.5 Revestimiento del túnel

El ademe primario de los túneles en suelos blandos con escudos, consiste en dovelas o segmentos que forman anillos, los cuales pueden o no estar ligados entre sí.

Estas dovelas pueden ser de concreto, de fierro fundido, de acero o una combinación de marcos metálicos con madera.

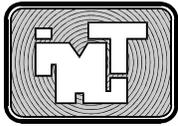
El revestimiento definitivo del túnel es necesario o deseado, ya sea para aislamiento, seguridad o por razones estéticas.

Existen túneles vehiculares en los que se han puesto y construido revestimientos enteramente de concreto lanzado. Esta técnica puede resultar inconveniente (en carreteras de altas especificaciones) por la irregular superficie del concreto lanzado y por sus efectos en la visibilidad y luminosidad de los túneles.

Concreto lanzado

Hay dos procedimientos para el lanzamiento de concreto que son el de “mezcla seca” y el de “mezcla húmeda”. En el primero el agua se incorpora en el chiflón y en el segundo se le agrega a la mezcla previamente.

Cualquier soporte provisional que se utilice en roca, después de una voladura, requiere cierto tiempo de aplicación; el uso del concreto lanzado como soporte provisional tiene grandes ventajas en comparación de otros, como el ademado con marcos de madera o metálicos o el uso de anclas. Asimismo, sea que el concreto lanzado toma menos tiempo para su aplicación y utiliza menos personal trabajando en la zona de peligro.



Cuando se emplea acelerante en polvo, por lo general se agrega a la mezcla en la tolva de la lanzadora y debe tenerse cuidado en su correcta distribución utilizando un espaciador. Los acelerantes líquidos son adicionados en el chiflón mediante una línea por separado a la presión debida o también se puede agregar a la mezcla en la tolva de la lanzadora en cantidades reguladas. La mayoría de los aditivos son muy cáusticos por lo que su manejo debe hacerse con mucho cuidado.

El aire para lanzado debe ser seco, limpio y libre de aceite, a una presión de 5-6 k/cm^2 ; el agua debe ser limpia y químicamente aceptable y debe ser suministrada a una presión constante de 4 k/cm^2 .

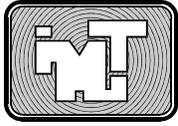
En el procedimiento de mezcla seca el agua se agrega en el chiflón y es controlada por el operador.

La cantidad de rebote, como su desperdicio, dependen principalmente del grado de control de todo el proceso de lanzado. El rebote en el procedimiento de mezcla varía entre 25 y 35%; si el control no es cuidadoso, puede llegar hasta un 50%.

La malla de alambre es lo que comúnmente se utiliza para refuerzo del concreto lanzado. La colocación de la malla de alambre es una actividad que consume mucho tiempo por la dificultad que se tiene en hacer que siga la superficie desigual de la roca; esto es más difícil en túneles de gran sección.

Los pernos de anclaje son frecuentemente utilizados en combinación con el concreto lanzado.

Los servicios que son necesarios para la aplicación del concreto lanzado son:



- Aire comprimido. Generalmente proviene de compresores estacionarios instalados en la superficie cercanos a la lumbrera de acceso.
- Agua a presión constante. Generalmente proviene de algún tanque instalado en la superficie y se conduce a través de tuberías.
- Electricidad, ya que es indispensable una buena iluminación, pues el lanzamiento de concreto genera polvo que reduce la visibilidad.
- Ventilación, ya que se produce mucho polvo.
- Mantenimiento de los drenes y cárcamos de bombeo.
- Comunicación entre los operadores de la tolva y los operadores del chiflón.

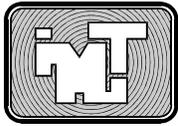
En el procedimiento de mezcla húmeda, el proporcionamiento se hace en la planta. Tanto el procedimiento de mezcla seca como el de mezcla rápida requieren que el operador esté muy próximo a la superficie que se va a tratar.

La limpieza de la superficie de roca que va a ser tratada debe hacerse antes de la aplicación del concreto lanzado.

En terrenos permeables con filtraciones se deberá drenar utilizando tubos de P.V.C. y así evitar las presiones hidrostáticas sobre el concreto lanzado.

El lanzamiento de concreto debe iniciarse a partir de las partes más bajas del túnel, continuando de manera ascendente hacia la clave, aprovechando de esta forma el efecto de sostén del concreto ya aplicado. Por otra parte, es indispensable contar con una plataforma que se pueda adaptar a diferentes alturas, para que el lanzamiento se realice desde la distancia y ángulo de proyección apropiados.

En algunos casos se utiliza acero de refuerzo en combinación con concreto lanzado. Se coloca el acero de refuerzo requerido únicamente por temperatura, esto es 0.2% del área transversal del concreto. En virtud de que la cantidad de acero resultante es



pequeña, generalmente se emplean mallas electrosoldadas colocadas en dos lechos.

Las mallas de refuerzo se fijan a las paredes del túnel por revestir por medio de anclas de varilla, cuya punta penetra en el terreno cuando menos 40 cm, colocadas en una cuadrícula de 1.0 a 1.5 m de lado, teniendo cuidado de no tener un recubrimiento menor a 2 cm.

La construcción de la cubeta debe iniciarse hasta que haya terminado la construcción de la bóveda superior en un tramo completo del túnel. El sentido de avance de la construcción de cubeta es inverso al de la bóveda superior, aprovechando así las instalaciones existentes para el transporte y extracción del material excavado.

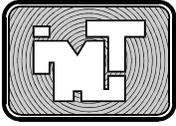
Para la construcción de la cubeta se implementan tres frentes de trabajo, que de manera coordinada cubran eficientemente las etapas de: a) excavación, b) colocación de acero de refuerzo y c) colado de concreto, en tramos de longitud no mayor a un radio del túnel.

De igual manera que en la bóveda superior se emplea únicamente el acero requerido por temperatura.

4.4.6 Rezaga y transporte de material de excavación

Para transporte del material excavado hacia el depósito temporal pueden utilizarse trenes de vagonetas sobre rieles o los vehículos sobre neumáticos.

La ventaja del transporte sobre rieles es la limpieza del suelo del túnel aun en suelos arcillosos y húmedos, además de que no ensucian el aire con gases de escape. Sin



embargo son muy sensibles a las pendientes y su modo de operación es poco flexible.

Los vehículos sobre neumáticos se adaptan mejor al servicio, pueden subir rampas de gran inclinación pero contaminan el aire con gases de escape y pueden convertir el suelo de la excavación en polvo y barro.

Cuando se proyectan obras subterráneas hay que encontrar un lugar de depósito final adecuado para el material de excavación. Este material en algunos casos es utilizado para rellenar tramos de la misma carretera.

4.4.7 Obras complementarias

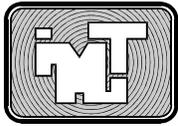
La construcción de un túnel requiere obras tales como:

- Drenaje
- Ventilación
- Iluminación
- Casetas
- Señalización
- Servicios de apoyo

Drenaje

La obra de drenaje se construye de forma paralela a la perforación del túnel.

Las concentraciones locales de agua que procedan de grietas son captadas por medio de tubos de plástico y recogidas a las franjas de drenaje previstos alrededor de la sección transversal del túnel. Estos drenajes circunferenciales desembocan en



el sistema principal de drenaje longitudinalmente emplazado en la línea más profunda de la sección de la obra.

En algunos casos es necesaria la impermeabilización para el aislamiento contra la humedad; para esto es común utilizar una hoja de material sintético que se pega al fondo liso mediante una pintura adhesiva. La estanqueidad de la soldadura puede controlarse por distintos métodos específicamente desarrollados.

Ventilación

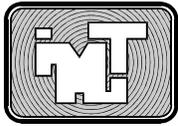
Entre los sistemas de aireación se distinguen la ventilación por compresión, por aspiración y combinación de éstas.

Para la ventilación por compresión se insufla aire fresco hacia el frente de trabajo mientras que el aire viciado es expulsado, a través del túnel, afuera.

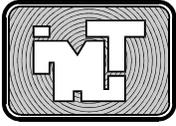
Para la ventilación por aspiración el aire viciado es aspirado en el frente de trabajo y el aire fresco viene desde la boca a través del túnel.

Entre las ventilaciones por compresión y por aspiración hay una serie de posibilidades de combinación; por ejemplo, la ventilación reversible, aspiración con aireación para la que son necesarios dos tubos de aireación, y otras distintas combinaciones.

En túneles carreteros en tangente puede decirse que si su longitud no es mayor de 500 m y la sección transversal del túnel esta generosamente diseñada, normalmente no se requiere ventilación forzada a menos que las condiciones atmosféricas en los portales sean francamente adversas.



Para el proceso de construcción es indispensable implementar medidas de seguridad y planes de emergencia ante posibles accidentes.



5 TÉCNICAS DE IDENTIFICACION DE IMPACTOS

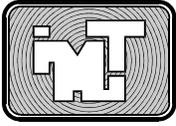
En la mayoría de la técnica aplicadas para identificar los impactos, se realiza un listado de actividades previstas en las diferentes etapas del proyecto; éstas son:

Preparación del sitio

- Trazo del túnel.
- Gestión del derecho de vía.
- Barda perimetral.
- Desmonte y despalme.
- Limpieza del terreno.
- Servicios de apoyo y campamentos.
- Brechas de acceso.

Construcción

- Frentes de ataque (poriales).
- Barrenación.
- Ventilación.
- Carga de explosivos y voladuras.
- Remoción, carga y acarreo de rezaga.
- Anclaje y concreto lanzado.
- Explotación de bancos de material.
- Instalación de obras de drenaje.
- Rellenos y compactaciones.
- Instalación de obras complementarias.
- Pavimentación.



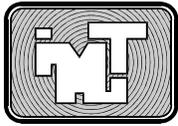
- Impermeabilización de cunetas.
- Estabilización de taludes.
- Manejo y disposición de residuos.
- Operación de maquinaria y equipo.
- Requerimiento de energía.
- Mano de obra.

Operación

- Circulación vehicular.
- Manejo y disposición de residuos.
- Monitoreo de emisiones.
- Programa de contingencias.
- Ventilación.
- Requerimiento de energía.
- Mano de obra.

Esta información se maneja por medio de matrices, que pueden considerarse como listas de confrontación de dos dimensiones y constituyen el primer paso para definir sistemáticamente las interrelaciones entre los elementos. Estas interrelaciones, que pueden no ser obvias durante los procesos iniciales de valoración del camino o del ambiente en que se alojará, comprenden relaciones de 3 tipos: a) relaciones causa-efecto (sistemas de drenaje-modificación de hábitat), b) relaciones entre los factores de deterioro del medio (modificación del flujo del agua-degradación de la vegetación), y c) relaciones entre las obras que componen el proyecto (terracerías-sistemas de drenaje).

Una matriz puede ayudar muy eficazmente a identificar los tipos de interacciones, así como a establecer el posible rango de los resultados de cualquier acción específica.



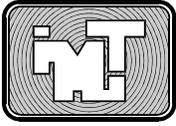
Del mismo modo, también puede ser útil para predecir con un mejor conocimiento del medio, aún sin ninguna acción llevada a cabo.

Para determinar la importancia relativa de cada uno de los impactos ambientales puede usarse un procedimiento de comparación, valorizando estos factores en una graduación de 1 a 10 en términos de magnitud (escala del efecto ambiental) e importancia (estimada a juicio del evaluador). Aunque este procedimiento presenta problemas para la unificación de criterios y, aunque las estimaciones tienen cierto carácter subjetivo, permite identificar los factores de deterioro más significativos, que corresponden a los valores más altos en la escala. En realidad, esta es la aplicación más importante que puede hacerse del análisis de los impactos ambientales por medio de matrices.

El uso del método de matrices simples de dos dimensiones ofrece algunos inconvenientes, especialmente que el formato no permite representar las interacciones sinérgicas que ocurren en el ambiente, ni tomar en cuenta los efectos indirectos o secundarios que se presentan con frecuencia en los proyectos.

Una modificación de este método resuelve el problema de mostrar las diferentes clases de información, incluyendo varios elementos en un solo formato, por ejemplo, uso de recursos, acción generada (corte), cambios iniciales y subsecuentes en las condiciones del medio (erosión, incremento de la carga de sólidos en las corrientes) y efectos probables (variaciones poblacionales de la fauna acuática).

Entre las diversas metodologías para la evaluación del impacto ambiental desarrolladas en los últimos años, se distinguen las siguientes cinco que se aplican de acuerdo con la información disponible y las necesidades de cada caso: 1) gráfica, 2) mapas digitales, 3) modelos, 4) matrices y 5) contabilidad social.



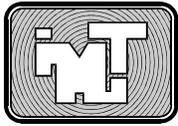
Debe aclararse que cualquiera de estas metodologías solamente ayuda a tomar decisiones planteando, jerarquizando y estructurando las opciones disponibles y las consecuencias de cada acción, y que la solución depende fundamentalmente de la sensibilidad, intuición y criterio de los evaluadores.

5.1 Método Gráfico

Uno de los métodos usuales para superar las limitaciones de los análisis tradicionales de evaluación es el gráfico, que permite introducir nuevos elementos en el proceso de selección de la ruta, como son la conservación de los recursos naturales, la preservación del paisaje, la protección de los diversos tipos de uso del suelo, la cohesión de las comunidades y la prevención contra diversas formas de contaminación, entre otros.

El método es simple, directo, totalmente gráfico y requiere solamente análisis visual. Se basa en el manejo de información distribuida en dos columnas, en una se consignan las diversas clases de beneficios y ahorros derivados del proyecto, tanto monetarios como no monetarios y en la otra, coincidiendo con cada una de dichas clases, se encuentran los costos, que complementan la estructura de la relación beneficio-costos.

Cada variable afectada por la construcción del camino, como la cohesión de la comunidad o de la calidad del paisaje, y cada variable que afecta la construcción del camino, como la topografía desfavorable o la falta de materiales de construcción, se presenta por separado en un mapa básico, dibujado en color gris y con el tono más oscuro, las áreas en donde se registran los valores más altos y los costos más elevados, reduciendo progresivamente el tono, conforme los valores o los costos decrecen, hasta llegar al color blanco en las áreas en donde los valores son mínimos o se incurre en los menores costos. La graduación y los sistemas de medida cambian



de una variable a otra a juicio del evaluador. Desde luego, el sistema de medida de cada variable debe determinarse con toda claridad a fin de que sea significativa para otras personas que consulten los mapas.

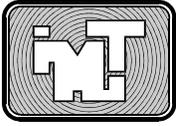
En general, el análisis debe realizarse considerando sólo tres categorías: alta, intermedia y baja. Por ejemplo, en el mapa de áreas de pendientes del terreno, las categorías pueden ser: 1) mayores de 10 por ciento, 2) entre 10 y 2.5 por ciento y 3) menores de 2.5 por ciento. En el caso de drenaje natural, las categorías de las áreas pueden ser: a) ríos, arroyos, lagos, lagunas, etc. b) cauces y zonas de drenaje natural y c) libre de aguas superficiales y rasgos pronunciados de drenaje. En cuanto al mapa de calidad de paisaje podrían mostrarse las zonas: 1) ciertos elementos escénicos, 2) gran valor escénico y 3) urbanizados con reducido valor escénico.

Después de preparados los mapas se sobreponen formando un mapa compuesto que tiene áreas sombreadas en diferentes tonos, dependiendo de los tonos de todos los componentes, correspondiendo las áreas con tonos más claros a las de menor costo social. Este mapa compuesto permite analizar las diferentes opciones de ruta previamente consideradas o generar una nueva ruta a través de las áreas más claras del mapa.

Las ventajas del método radican en su simplicidad, que facilita el análisis preliminar del problema y permite comparar opciones en forma cualitativa y aproximada.

5.2 Método de Mapas Digitales

Este método, también de aplicación corriente en problemas de evaluación ambiental, no es más que una versión mecanizada del método gráfico destinada a superar algunas de las limitaciones de éste por medio del cómputo. Además de representarse en mapas y exponerse en forma desplegada, la información recabada por este



método se codifica en formas continuas para alimentar a la computadora. De esta manera es posible formar mapas digitales de cada uno de los factores que se están analizando y producir, automáticamente por medio de la computadora, un plano compuesto que sustituye con ventaja al resultante de las sobreposiciones manuales del método gráfico.

5.3 Método de Modelos de Uso del Terreno

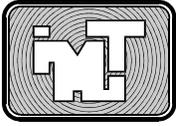
Una de las respuestas a las limitaciones que presentan las técnicas de investigación del impacto ambiental por medio de mapas, es el avance que se ha logrado aplicando el método de modelos de uso del terreno. En los modelos de evaluación del uso del terreno se investigan y estructuran las interacciones entre los propios usos del terreno, los aspectos bióticos, las actividades económicas, la infraestructura existente, las políticas de desarrollo y los proyectos, para tratar de reproducir las condiciones reales. En un modelo correctamente complementado pueden hacerse simulaciones para probar los cambios que ocurren en el sistema y detectar los impactos que producirían las opciones en estudio. Si se introduce en el modelo el factor tiempo, es posible observar la dinámica de los cambios.

5.4 Método de Matrices

Este método se aplica comúnmente para identificar los impactos que producirían el camino y sus obras complementarias en el ambiente y para evaluar su intensidad a fin de seleccionar la opción más adecuada. Se distinguen en general tres funciones que están asociadas con las actividades que se indican en cada caso.

1 Identificación

- a Descripción del ambiente existente.
- b Definición de los componentes del proyecto.



- c Determinación del ambiente modificado por el proyecto, incluyendo todos sus elementos.

2 *Pronóstico*

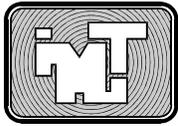
- a Descripción de los impactos ambientales que pueden ser significativos.
- b Pronóstico de la magnitud y/o las dimensiones espaciales de los impactos ambientales identificados.
- c Estimación de las probabilidades de ocurrencia del impacto en un periodo de tiempo.

3 *Evaluación*

- a Determinación de la incidencia de costos y beneficios ecológicos.
- b Especificaciones y comparación de los costos y los efectos entre varias opciones.

La utilidad y efectividad de los análisis de costo – beneficio y otros métodos de evaluación de los problemas ambientales, dependen en su mayor parte de que, además de los agregados normales del proyecto, se incluyan todos los beneficios y los costos atribuibles a los grupos de población que resultarán afectados por el proyecto. Aunque estas cuentas sociales son definitivas en la evaluación de los proyectos, por lo general no son consideradas en las estimaciones.

Para la asignación de los valores alternativos del impacto, se han desarrollado algunos métodos específicos de las mismas suposiciones y los agregados que aparecen en el caso de los análisis costo – beneficio.



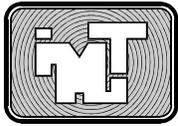
6 IDENTIFICACION DE IMPACTOS Y MEDIDAS DE MITIGACION

Durante las distintas etapas de construcción de un túnel se generan básicamente impactos de transformación de áreas, es decir, se modificarán aspectos morfológicos del relieve, estructura y conformación de las capas subterráneas, usos y calidad del suelo, distribución de flora y fauna, calidad de vida de los habitantes del área afectada y calidad del aire, principalmente. Asimismo, se modificará el uso, destino y reservas del suelo.

En la construcción los impactos ambientales serán consecuencia de la ocupación de las áreas previamente preparadas, es decir, se implantarán obras de ingeniería civil que determinarán un cambio definitivo en los atributos naturales y socioeconómicos del ambiente previo al proyecto.

Finalmente, durante la etapa de operación, se generarán impactos al medio natural y socioeconómico por la utilización del derecho de vía, propiciándose efectos ambientales a largo plazo, que desembocarán en un deterioro ambiental permanente con secuelas de tipo económico, mismas que tienen que ser contempladas para establecer las medidas de mitigación pertinentes. En este sentido se debe recordar que la vida útil del proyecto es indeterminada, debido a que funcionará por tiempo indefinido, por lo cual sus efectos más significativos en el ambiente, en caso de no aplicar medidas de mitigación, permanecerán como impactos permanentes.

A continuación se describen con mayor detalle los impactos ambientales identificados en túneles carreteros.



6.1 Etapa de Preparación del Sitio

Impacto: Afectación de la cubierta vegetal

Actividad

Trazo del eje del túnel.

Descripción

Durante esta actividad se deslindan terrenos y establecen niveles de altura sobre el nivel del mar con el objeto de planificar la ubicación de la obra y calcular el volumen de las acciones necesarias para la implantación del proyecto. Para realizar estas actividades se requiere del retiro de la vegetación en los sitios en donde se realiza el trazo en el terreno.

Medidas de mitigación

- Durante la nivelación se afectará únicamente a los sitios donde se instale el equipo topográfico.

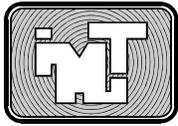
Impacto: Cambio de uso de suelo

Actividad

Gestión de derecho de vía.

Descripción

Se requiere de realizar cambios en el uso de suelo en las áreas en donde estarán ubicados los emportalamientos, las lumbreras y las vialidades de conexión. Además de las áreas relacionadas con los bancos de préstamo y de materiales. Este es un impacto adverso debido a que trae como consecuencia la pérdida de continuidad en los usos del suelo que se tienen previstos para el aprovechamiento local de los



recursos, así como la interferencia de la comunicación y la segmentación de áreas y actividades.

Medidas de mitigación

- Se deberá prever la modificación integral del uso del suelo en el centro de población afectado, para compensar las alteraciones que puedan sufrir la planificación de equipamiento, infraestructura y estructura urbana.
- Los cambios de uso del suelo por razón del derecho de vía deben desarrollarse con las gestiones sociales necesarias para indemnizar a los propietarios y para prever la manera en que no resulte afectada ninguna actividad productiva local.

Impacto: Eliminación de la cubierta vegetal
--

Actividades

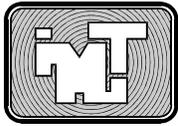
Desmante y despálme.

Descripción

Se identifica como un impacto adverso que al repercutir sobre el suelo, incrementa su susceptibilidad a la erosión y a su pérdida total. Como consecuencia de estos dos procesos se tiene el riesgo de azolvamientos y de infiltración de materiales hacia las aguas subterráneas.

También se generarán impactos en la calidad del aire, debido a la generación de polvos y gases de combustión por efecto del retiro del suelo y la operación de la maquinaria que realiza esta actividad.

Una actividad con importantes implicaciones ambientales es la eliminación de la cubierta vegetal y en consecuencia la pérdida del hábitat que existe en estos sitios. Este es un impacto local pero permanente.



El agua superficial también se verá afectada por esta actividad de despalme, debido a que existe incremento de material a ser transportado hacia las corrientes, las cuales aumentan su capacidad de carga, enturbiando el agua y aumentando la posibilidad de azolve.

Medidas de mitigación

- Reforestar las colindancias del trazo con el mismo material removido.
- Recolectar material vegetal reproductivo (semillas, esquejes, etc.) para donarlo a los viveros locales.

Impacto: Contaminación de agua superficial

Actividad

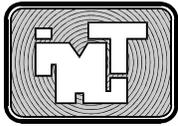
Establecimiento de campamentos provisionales.

Descripción

El establecimiento de campamentos provisionales incluye letrinas portátiles o fosas sépticas, lo que provoca disminución en la calidad del agua superficial cuando descargan sus aguas residuales en los cauces de las corrientes cercanas.

Medidas de mitigación

- En la medida de lo posible, se deberá procurar que una vez desocupadas las letrinas, su contenido sea descargado en los sistemas municipales de drenaje.
- Si el periodo de establecimiento de un campamento va a ser relativamente largo, deberá optarse por la instalación de una fosa séptica dentro del campamento, la cual debe ser diseñada y operada bajo criterios ambientales y sanitarios.
- El conjunto de impactos ocasionados por el establecimiento y operación de campamentos de trabajadores, puede mitigarse equipándolos con los medios sanitarios requeridos para controlar la contaminación por aguas residuales,



residuos sólidos y mediante su ubicación en lugares donde no interfieran con la vida comunal ni con las actividades productivas locales.

6.2 Etapa de Construcción

Impacto: Generación de polvos y ruido

Actividad

Barrenación.

Descripción

Las emisiones de polvo, ruido y vibraciones serán conspicuas, así como su dispersión limitada (impacto local) y además es temporal.

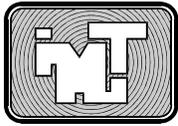
Medidas de mitigación

- En los puntos donde se genere polvo, deberá procederse a la instalación de sistemas de aspersión hidráulica o algún otro procedimiento que impida que las partículas se dirijan hacia los centros de población.
- Con respecto a los materiales que se extraen producto de la excavación del túnel, conviene que estos sean analizados en cuanto a sus propiedades físicas y como resultado se envíen a canteras en donde se les aproveche para construcción de otras obras.

Impacto: Generación de lodos contaminados

Actividades

Aplicación de sustancias neutralizantes, floculantes y espesadoras en los escudos presurizados con lodos.



Descripción

En los métodos de escudos presurizados con lodos se emplean plantas de tratamiento con las que se controlan las propiedades físicas de los lodos, por lo que se aplican floculadores como el cloruro de polialuminio (PAC) y el carboxil-metil-celulosa (CMC), para incrementar la viscosidad del lodo. Asimismo, se emplean ácidos y bases para neutralizar dichos lodos.

Medidas de mitigación

- Se deberá tener especial cuidado en el sitio donde se almacenen las sustancias mencionadas, para evitar que se derramen y contaminen el agua y el suelo.
- Los lodos finales deberán quedar dispuestos en confinamientos especiales, donde no sea posible que sus lixiviados se infiltren ni que la flora y fauna del sitio quede expuesta a su contacto.

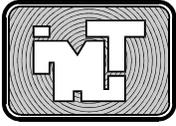
Impacto: Generación de polvos y ruido.

Actividades

Carga de explosivos y voladuras.

Descripción

Las emisiones de polvo, ruido y vibraciones serán importantes, pero de carácter temporal y por lo general muy locales. Este impacto implica ruido, lanzamiento de material, vibración y el golpe del viento producido por el uso de explosivos, que a pesar de ser de corta duración pueden provocar daños significativos sobre construcciones civiles y habitacionales en las zonas urbanas que se localicen cercanas al área de proyecto. El impacto correspondiente a las zonas rurales puede ser la afectación a la vivienda y al equipamiento agropecuario (granjas, molinos, silos, sistemas de riego, etc.).



Medidas de mitigación

- La medida recomendada para el impacto anterior, también es aplicable para este caso.
- Para mitigar el ruido por la voladura de los explosivos, se deberá planear y realizar voladuras de reducidas dimensiones y colocar sobre el área una cama formada por lonas, llantas usadas y mallas metálicas que amortiguarán el ruido y el riesgo de desprendimiento de rocas. Este impacto es mayor durante la construcción de tajos y empotramiento, ya que el impacto disminuye cuando las voladuras se llevan a cabo dentro del túnel.
- Se deberán observar todas y cada una de las regulaciones sobre el uso de explosivos emitidas por la Secretaría de la Defensa Nacional, de esta manera se podrán tomar las precauciones necesarias para evitar accidentes que afecten a los posibles habitantes locales. Asimismo es importante que los habitantes tengan conocimiento previo de las actividades a realizar con explosivos y las medidas de seguridad con que se cuenta para este tipo de actividades.

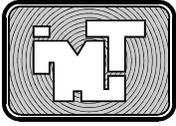
Impacto: Generación de polvos, gases de combustión y ruido

Actividades

Operación de maquinaria y equipo, remoción, carga y acarreo de materiales.

Descripción

Se identifica un impacto adverso por la emisión de polvos y gases de combustión provenientes de la manipulación del material de rezaga y la operación de la maquinaria que realiza estas actividades, así como la disminución de la visibilidad por efectos de dispersión de partículas de polvo. En consecuencia se identifica un impacto adverso en la apariencia visual durante las actividades de remoción, carga y acarreo de materiales.



Medidas de mitigación

- La maquinaria y equipo que se utilice deberá ser revisado con el fin de aminorar las emisiones gaseosas y el ruido que genere.
- El procedimiento recomendado para mitigar el ruido producido por los equipos mecánicos que estarán laborando en los portales del túnel, tales como compresoras, generadores de emergencia, etc. será el ubicarlos dentro del tajo de acceso del portal. De esta forma los taludes funcionarán como estructuras de confinamiento, reduciendo el ruido generado a niveles no dañinos al oído humano.
- Se deberá prever el sitio de disposición de los residuos sólidos y líquidos que se generen durante esta etapa. Por lo que se deberá instalar almacenamientos controlados, así como sanitarios fijos y portátiles de obra.
- Establecer áreas de espera para los camiones que cargan el producto de la excavación de manera que no interfieran con el tránsito vehicular. Se deberá implementar un sistema de avisos en los casos que se obstaculice el tránsito y exigir a todos los fleteros que instalen lonas sobre las cajas de los vehículos para evitar partículas suspendidas al momento del transporte de material.

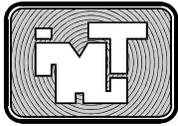
Impacto: Eliminación de la cubierta vegetal.

Actividad

Explotación de bancos de material.

Descripción

La explotación de bancos de material se hace necesaria para proveer de materia prima para la construcción del túnel. La actividad principal es la modificación del relieve, lo que trae como consecuencia la pérdida de la vegetación y la modificación de las corrientes superficiales. Este es un impacto que se identifica como



permanente y que generalmente se extiende más allá del área de explotación del banco, principalmente en aguas superficiales.

Medidas de mitigación

- Reforestar con vegetación nativa y resistente a las condiciones de tránsito vehicular en las áreas con camellones, islas de tráfico, banquetas en los cortes de terracería, etc. Adicionalmente se deberá colocar pasto en los taludes de las vialidades.
- Con anticipación a estas actividades, es necesario que se lleven a cabo recorridos para detectar especies valiosas que ameriten trasplantarse a otros sitios, así como para coleccionar material vegetativo que pueda donarse a viveros locales.

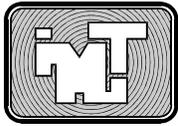
Impacto: Modificación de las corrientes superficiales

Actividad

Explotación de bancos de material.

Descripción

La explotación de bancos de material se hace necesaria para proveer de materia prima para la construcción del túnel. La actividad principal es la modificación del relieve, lo que trae como consecuencia la pérdida de la vegetación y la modificación de las corrientes superficiales. Este es un impacto que se identifica como permanente y que generalmente se extiende más allá del área de explotación del banco, principalmente en aguas superficiales.



Medidas de mitigación

- Diseñar los encausamientos, revestimientos, formación de cunetas y contracunetas, de tal manera que no incremente la erosión de las corrientes y tampoco se generen estancamientos de agua.
- Las obras de drenaje del túnel deberán apearse a lo recomendado en las normas de la SCT.

Impacto: Eliminación de hábitats

Actividad

Explotación de bancos de material.

Descripción

La explotación de bancos de material se hace necesaria para proveer de materia prima para la construcción del túnel. La actividad principal es la modificación del relieve, lo que trae como consecuencia la pérdida de la vegetación y la modificación de las corrientes superficiales. Este es un impacto que se identifica como permanente y que generalmente se extiende más allá del área de explotación del banco, principalmente en aguas superficiales.

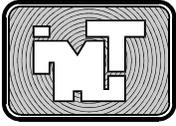
Medidas de mitigación

- La alteración de los hábitats edáficos provocada por la excavación y construcción del túnel prácticamente es, no obstante, deberá procurarse que sus consecuencias no se extiendan más allá de la zona del proyecto.

Impacto: Incremento de erosión

Actividad

Explotación de bancos de material.



Descripción

La explotación de bancos de material se hace necesaria para proveer de materia prima para la construcción del túnel. La actividad principal es la modificación del relieve, lo que trae como consecuencia la pérdida de la vegetación y la modificación de las corrientes superficiales. Este es un impacto que se identifica como permanente y que generalmente se extiende más allá del área de explotación del banco, principalmente en aguas superficiales.

Medidas de mitigación

- Diseñar los encausamientos, revestimientos, formación de cunetas y contracunetas, de tal manera que no incremente la erosión de las corrientes y tampoco se generen estancamientos de agua.
- Durante las excavaciones y perforaciones, no deberá alterarse en modo drástico la conformación de perfiles de suelo frágiles, ni dejar expuesto a intemperismos a los sitios que hayan sido empleados como almacenes y campamentos.

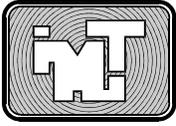
Impacto: Modificación del relieve original

Actividad

Explotación de bancos de material.

Descripción

La explotación de bancos de material se hace necesaria para proveer de materia prima para la construcción del túnel. La actividad principal es la modificación del relieve, lo que trae como consecuencia la pérdida de la vegetación y la modificación de las corrientes superficiales. Este es un impacto que se identifica como permanente y que generalmente se extiende más allá del área de explotación del banco, principalmente en aguas superficiales.



Medidas de mitigación

- Durante los estudios para el diseño del trazo geométrico del túnel, deberán incorporarse criterios para evitar la modificación drástica del relieve.
- La disposición del material extraído deberá hacerse en sitios donde no se alteren las características del relieve.

Impacto: Modificación de la red de drenaje natural

Actividad

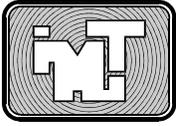
Construcción de las obras de drenaje.

Descripción

Al instalar las obras de drenaje del túnel, se modifica la red hidrológica natural, debido a que las corrientes que confluyen al sitio donde se construye el túnel modifican la dirección de su cauce, por lo que se identifica como un impacto adverso permanente.

Medidas de mitigación

- Dar cumplimiento a lo establecido en las normas de la SCT para la construcción e instalación de obras de drenaje, obligando al responsable del proyecto a registrar en su bitácora las razones de cualquier desviación a dichos lineamientos.
- Durante el diseño del trazo y la ingeniería del túnel, deberá procurarse evitar la alteración de los escurrimientos superficiales y subterráneos. En caso de existir filtraciones mayores se procederá a canalizar el escurrimiento desde la bóveda hasta el sistema de drenaje adoptado.



Impacto: Disminución de la recarga vertical de los acuíferos

Actividades

Compactación y pavimentación de la bóveda.

Descripción

Al modificar la estructura original del suelo, disminuye la velocidad de infiltración del agua de lluvia e incluso puede desviarse o quedar retenida sin poder llegar al subsuelo, incrementándose el escurrimiento local, lo que provoca que se vea disminuida la recarga vertical a los acuíferos.

Medidas de mitigación

- Encausar los escurrimientos afectados hacia canales o cunetas que los conduzcan hacia zonas de recarga.

Impacto: Contaminación de agua superficial

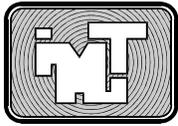
Actividades

Operación de maquinaria y equipo y establecimiento de campamentos provisionales.

Descripción

El agua superficial se contamina con grasas y aceites cuando existen derrames accidentales, ya que al no limpiar las superficies afectadas, el agua pluvial puede transportar estas sustancias a las corrientes cercanas.

Por otra parte, el establecimiento de campamentos provisionales incluye letrinas portátiles o fosas sépticas, lo que provoca disminución en la calidad del agua superficial cuando descargan sus aguas residuales en los cauces de las corrientes cercanas.



Medidas de mitigación

- Deberán observarse las medidas de mitigación recomendadas para prevenir y controlar la contaminación derivada de las aguas residuales de campamentos.
- Reparar cualquier desperfecto de la maquinaria y equipo empleados que provoque el derrame de sustancias hacia los cuerpos de agua.

6.3 Etapa de Operación y Mantenimiento

Impacto: Contaminación de agua superficial

Actividad

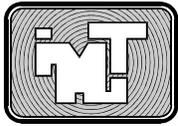
Tránsito vehicular.

Descripción

La caída de aceites, grasas y combustibles de los vehículos que transitan por el túnel ocasionará que estas sustancias se incorporen al agua de lluvia al seguir el curso de la pendiente o al transportarse por las cunetas, pudiendo por este medio invadir las corrientes cercanas. Se considera que a excepción de una volcadura y fuga de un autotank, los volúmenes de este tipo de contaminante son reducidos.

Medidas de mitigación

- Se deberá instalar separadores de aceite en los efluentes del túnel que puedan arrastrar aceites o derivados del petróleo.
- Deberá repararse cualquier desperfecto de la carpeta asfáltica para evitar que los líquidos derramados durante la operación normal del túnel se infiltren hacia el manto freático.



Impacto: Contaminación del aire

Actividad

Tránsito vehicular.

Descripción

Se identifican impactos adversos en la calidad del aire, la visibilidad y el estado acústico natural, debido a la circulación de los vehículos dentro del túnel, ya que propicia la acumulación de contaminantes tales como bióxido de carbono, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno e hidrocarburos.

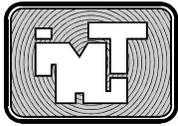
En lo que corresponde a la visibilidad, la generación de olores y el estado acústico dentro del túnel, el impacto se considera disminuido, ya que los sistemas de iluminación y ventilación se instalan como parte de la operación normal del túnel.

Medidas de mitigación

- Se deberá contar con monitoreos de la calidad del aire dentro del túnel, mediante la operación de sensores de CO, Nox, SO₂ y atmósferas explosivas, con el fin de contar con un sistema de alarma de condiciones adversas en el interior del túnel.
- Implementar y llevar a cabo un plan de emergencia para aplicarlo en caso de ocurrir un accidente dentro del túnel, se deberá considerar incendio, explosión, y derrames de sustancias peligrosas.

Impacto: Ruido

Con relación a este impacto es necesario hacer los siguientes comentarios:



- No es un impacto significativo debido a que el túnel es una barrera que no permite la dispersión del ruido hacia fuera.
- En casos excepcionales, el ruido produce vibración y resonancia que puede provocar desprendimiento de piedras (por ejemplo, en cortes pronunciados).

Sin embargo, se identifica un impacto a los usuarios del túnel, debido al ruido que se produce dentro de él por el tránsito de automotores. Este impacto se considera adverso no significativo porque se está considerando un túnel carretero en donde el flujo vehicular no es tan constante en comparación con los túneles urbanos en donde el tránsito es permanentemente y con un número considerable de vehículos. Asimismo, el impacto es temporal, dura los que se tarda en cruzar la totalidad del túnel.

Medidas de mitigación

- Para disminuir el impacto que provoca la generación de ruido dentro del túnel se recomienda que a la entrada de los túneles se coloquen señalizaciones que indiquen cerrar las ventanas del vehículo, que prohíban abrir el escape y la utilización del claxon dentro del túnel.

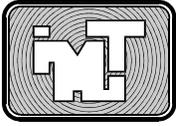
Impacto: Generación de residuos sólidos

Actividad

Tránsito vehicular.

Descripción

Los residuos generados durante la etapa de operación provienen de los usuarios quienes los arrojan durante los traslados. Asimismo, pueden llegar a generarse durante las actividades de mantenimiento del túnel.



Medidas de mitigación

- Intensificar las labores de mantenimiento después de las temporadas de alto tráfico, para retirar los residuos que se hayan generado.
- Sancionar a quienes arrojen basura dentro del túnel.

Impacto: Economía local y regional

Actividad

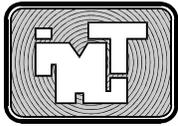
Tránsito vehicular.

Descripción

La operación de los túneles dentro del sistema carretero se identifica como un impacto benéfico, ya que permite menores tiempos de recorrido, así como una mayor eficiencia en la entrada y salida de bienes y servicios, adicionalmente se evitan conflictos por congestionamientos. Asimismo, se requiere de mano de obra local para que los túneles puedan operar (específicamente mantenimiento), lo que también contribuye a la economía local y que se identifica como impacto benéfico.

Medidas de mitigación

- No aplica, se trata de un impacto benéfico.

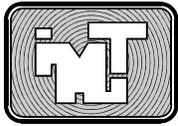


7 CONCLUSIONES

En este trabajo se analizaron las repercusiones de las obras de construcción de túneles y su operación, dentro del espectro de la infraestructura carretera, en los diferentes elementos ambientales. La bibliografía consultada, tanto extranjera como nacional, aporta las razones suficientes para continuar avanzando en las repercusiones de este tipo de obras. Los impactos más evidentes sobre la vegetación, los procesos geomorfológicos, el relieve y las corrientes de agua, pueden ser debidamente previstos desde la etapa de estudios preliminares. Los túneles implican cambios visuales muy evidentes que incluso pueden parecer atractivos en algunos tramos panorámicos, pero las consideraciones técnicas que los preceden son sin duda la garantía de su seguridad y de su integración al ambiente.

Los impactos de los túneles en las corrientes de agua superficial y subterránea son perfectamente predecibles, mediante la aplicación correcta de las metodologías actuales. En la mayoría de los casos, la aplicación de listas de comprobación, conduce a una predicción general de interacciones que necesitan de un análisis más detallado, sobre todo en los proyectos que atraviesan varios ecosistemas o cuencas.

Existen las soluciones técnicas para prevenir y/o mitigar los impactos derivados de las etapas de preparación del sitio y de la construcción, que como se pudo ver en este trabajo, son los más significativos. Un buen número de estas soluciones son sencillas y de fácil aplicación durante el desarrollo de la actividad misma que ocasiona el impacto. Por ejemplo, en la desviación de las corrientes durante las excavaciones y los trabajos mismos de construcción, se debe tener la certeza de que el cauce desviado no provoque inundaciones que azolven otros escurrimientos.

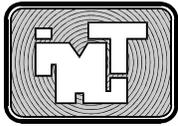


De igual forma, la manipulación que se hace de los materiales extraídos de bancos no debe incurrir en excavaciones ni movimientos de tierra que alteren la conformación de microcuencas.

Si bien la pérdida de permeabilidad es un impacto inevitable por la compactación y pavimentación de la bóveda, la empresa constructora debe compensar esta situación ya sea reforestando áreas adyacentes para conservar la permeabilidad del suelo en éstos sitios, así como infiltrando el agua pluvial captada en las represas y demás obras hidráulicas, siempre y cuando se cuente con los estudios geológicos, hidráulicos y geotécnicos suficientes.

La magnitud e importancia del impacto, están condicionadas por los atributos ambientales de la región en que se pretende desarrollar el proyecto. De este modo, en el presente trabajo se ha podido concluir que las repercusiones sobre las corrientes de agua de las carreteras y túneles construidas en regiones secas, donde la recarga del freático es más precaria, serán más drásticas que en las de grandes registros pluviales, en donde el impacto de mayor importancia puede atribuirse a la contaminación superficial y subterránea debido a la incorporación de sustancias contaminantes al agua de lluvia.

Otro aspecto a tener en cuenta en el análisis de las manifestaciones de impacto ambiental de proyectos de túneles carreteros, es el que tiene que ver con los alcances derivados de los costos de este tipo de estudios. La integración de un equipo experimentado, que aplique las técnicas de evaluación con el detalle necesario, implica costos que los responsables del proyecto no están siempre dispuestos a pagar, por lo que los estudios no alcanzan el sustento técnico suficiente. Es importante resaltar que los grandes beneficios sobre el medio ambiente que se pueden alcanzar cuando se cuenta con un “proyecto completo y bien hecho” que

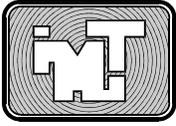


definitivamente minimizará o erradicará los efectos ambientales provocados por este tipo de obras en la infraestructura carretera.

Por otra parte, conviene insistir en un mayor detalle durante el análisis del costo/beneficio de los proyectos, ya que en la mayoría de las veces no está precedido de una ponderación suficientemente soportada de los factores ambientales que se están evaluando. Uno de los principales problemas de los métodos para evaluar es que no se sabe si los valores recomendados para cada uno de ellos se obtuvieron a partir de un consenso de los equipos interdisciplinarios, ni como fueron resueltas las controversias sobre los valores relativos de estos factores, con la circunstancia de que la parte más importante en estos métodos es la deducción del índice agregado.

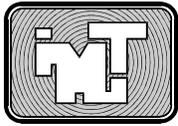
Finalmente, es conveniente reiterar que las medidas de mitigación son principalmente:

- 1 La reforestación con especies propias de la zona en aquellos sitios en los que se haya eliminado una cantidad significativa de cubierta vegetal.
- 2 El empleo de letrinas y otros implementos para controlar las aguas residuales y residuos sólidos generados en campamentos.
- 3 La instalación de sistemas de aspersion hidráulica y lonas contenedoras en los sitios donde se generen polvos durante la construcci3n.
- 4 Para mitigar el ruido por la voladura de explosivos, se deberá planear y realizar detonaciones poco intensas, colocando sobre el área una cama formada por lonas, llantas usadas y mallas metálicas.



- 5 Para contrarrestar la modificación al curso natural de corrientes de agua superficial o subterránea, los encausamientos, revestimientos, cunetas y demás obras hidráulicas, se deberán diseñar de tal manera que no incrementen la erosión y no ocasionen estancamientos de agua.

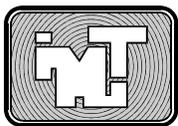
- 6 Con relación a los impactos que ocasionaría el uso de sustancias químicas para la floculación durante el tratamiento de lodos presurizados que se emplean en algunos casos de perforación con escudos, se deberán tener las siguientes precauciones:
 - Deberá tenerse especial cuidado en el sitio donde se almacenen las sustancias mencionadas, para evitar que se derramen y contaminen el agua y el suelo.
 - Los lodos finales deberán quedar dispuestos en confinamientos especiales, donde no sea posible que sus lixiviados se infiltren ni que la flora y fauna del sitio quede expuesta a su contacto.



BIBLIOGRAFIA

Manifestaciones de impacto ambiental de túneles

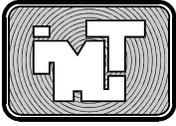
- A SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES. *Manifestación de impacto ambiental modalidad general del túnel San Lucas*. Constructora Urcula, S.A. de C.V. López, M. O. 1992.
- B SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES. *Manifestación de impacto ambiental modalidad general del túnel interurbano de acceso Acapulco*. Consorcio de Ecología Aplicada. 1994.
- C FERROCARRILES NACIONALES DE MEXICO. *Informe Preventivo de la ampliación de Gálibos en los Túneles No. 1, 2, 3, 4 y 5 de la vía férrea Guadalajara - Manzanillo, Tramo Tuxpan - Alzada (Túneles I)*. Del Río, S. G. 1994.
- D FERROCARRILES NACIONALES DE MEXICO. *Informe Preventivo de la construcción de la ampliación de Gálibos en los Túneles No. 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 y 13 de la vía férrea Guadalajara - Manzanillo, tramo Tuxpan - Alzada (Túneles II)*. Del Río, S. G. Ferrocarriles Nacionales de México.
- E FERROCARRILES NACIONALES DE MEXICO. *Informe Preventivo de la construcción de la Ampliación de Gálibos en los Túneles No. 14, 15 y 16 de la Vía Férrea Guadalajara - Manzanillo, Tramo Colima - Caleras (Túneles III)*. Del Río, S. G.
- F Minera Tayahua, S.A. de C. V. *Informe preventivo del desarrollo del Túnel Gloria Estela*. Espinoza, M. F. 1996.
- G Minera Tayahua, S.A. de C.V. *Manifestación de impacto ambiental modalidad general del Túnel Gloria Estela*. Escárcega, R. E. Seguridad Industrial y Control Ambiental, S.A. de C.V. 1997.
- H Hime Ingenieros Consultores, S. C. *Manifestación de impacto ambiental modalidad general del túnel interceptor Río de Los Remedios del proyecto de las obras de Abastecimiento y Saneamiento del Valle de México*. 1997.
- I Rivera, G. M.D. *Manifestación de impacto ambiental modalidad intermedia del túnel San Lucas.. Fraccionamiento Turístico Pedregal de Cabo San Lucas*. Quiñones, L. G. 1997.



- J SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES. *Manifestación de impacto ambiental modalidad general del túnel interurbano de acceso a Acapulco*. CEA. 1994.

Publicaciones

- 1 GULLAN, G.T. 1975. *Concreto lanzado para revestimiento de túneles. Tunnel and tunneling..*
- 2 Curso "Victor Hardy" 1997. AMITOS. Enero de 1997.
- 3 Escudos y Topos. Seminario. Enero de 1986.
- 4 Ernest Büchi. 1999. Excavación mecánica mediante máquinas perforadoras de túneles de frente completo en roca dura. Primera Conferencia Magistral "Ing. Fernando Hiriart Balderrame". Fundación ICA. México, D.F.
- 5 GALABRA. 1977. *Tratado de procedimientos generales de construcción. Cimentaciones y Túneles*. 2ª edición. México
- 6 MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS Y URBANISMO. SECRETARIA GENERAL TECNICA. MADRID, 1989. *Guía metodológicas para la elaboración de estudios de impacto ambiental. Carreteras y Ferrocarriles*.
- 7 PLANEACION Y DESARROLLO, CONSULTORES, S.A. DIRECCION GENERAL DE SERVICIOS TECNICOS. 1975. *Impacto de los Caminos en el Medio Ambiente*. México.
- 8 SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES. 1984. *Impacto de los Caminos en el Medio Ambiente*. SCT. México.
- 9 DEPARTAMENTO DEL MEDIO AMBIENTE. TRABAJO TECNICO DEL BANCO MUNDIAL. 1991. *Libro de Consulta para Evaluación Ambiental*. Volúmen II. Lineamientos Sectoriales. Número 140. EUA, 1991.
- 10 Manual de diseño y construcción de túneles. Procedimientos constructivos
- 11 Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos A. C. 1984 *Túneles carreteros*. México.
- 12 SOWERS G.B, 1990. *Introducción a la mecánica de suelos y cimentaciones*. Ed. Limusa, México.



- 13 *Túneles y Obras Subterráneas*. 1977. Editores técnicos asociados S. A. 2ª edición. Barcelona.

**CIUDAD DE MEXICO**

Av. Patriotismo 683
Col. Mixcoac
03730, México, D. F.
Tel (55) 56 15 35 75
55 98 52 18
Fax (55) 55 98 64 57

SANFANDILA

Km. 12+000, Carretera
Querétaro-Galindo
76700, Sanfandila, Qro.
Tel (442) 2 16 97 77
2 16 96 46
Fax (442) 2 16 96 71

Internet: <http://www.imt.mx>
publicaciones@imt.mx